

**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

ปริญญญา

วิศวกรรมชลประทาน

วิศวกรรมชลประทาน

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าวโดยแนวทางเชิงอ็อบเจกต์ร่วมกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์

Modeling of Irrigation Water Use in Paddy Land by Object-Oriented Approach and Artificial Intelligence Techniques

นามผู้วิจัย นายยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์

๒ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกสิทธิ์ โหมสิตสกุลชัย, Dipl. Docteur.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์เจษฎา แก้วกัลยา, Ph.D.)

กิจกรรมการ

(รองศาสตราจารย์วราวุธ วุฒินิชย์, Ph.D.)

กิจกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ปัญญา ขวัญยืน, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ปรัชญา ขวัญยืน, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าว
โดยแนวทางเชิงอ็อบเจกต์ร่วมกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์

Modeling of Irrigation Water Use in Paddy Land
by Object-Oriented Approach and Artificial Intelligence Techniques

โดย

นายยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

พ.ศ. 2551

ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์ 2551: การจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าวโดย
แนวทางเชิงอ้อมเจดต์ร่วมกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎี
บัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน) สาขาวิศวกรรมชลประทาน ภาควิชาวิศวกรรม
ชลประทาน ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกสิทธิ์ โหมสิตสกุลชัย,
Dipl. Docteur. 331 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลอง “จิเรสต์” (JrAIs) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับจำลองการ
ใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าวโดยพิจารณาปัจจัยทั้งด้านกายภาพ ชีวภาพ และพฤติกรรมการใช้
น้ำของเกษตรกร การพัฒนาแบบจำลองใช้แนวทางเชิงอ้อมเจดต์ด้วยภาษาจาวาและชุดเครื่องมือ
รีพาสต์ แบบจำลองจิเรสต์จำลองกระบวนการหมุนเวียนของน้ำในระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ
และการจัดการน้ำชลประทาน การไหลของน้ำบนผิวดินใช้สมการการไหลแบบ diffusion wave
ส่วนการไหลของน้ำในดินใช้สมการของริชาร์ด และหาคำตอบด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข อาศัย
บังคับน้ำในระบบชลประทานควบคุมด้วยกฎแบบฟัซซี่และการจัดการน้ำในแปลงเพาะปลูก
จำลองด้วยเทคนิคเอเจนต์ การตรวจสอบแบบจำลองกระทำโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับ
แบบจำลองที่เป็นที่รู้จัก สำหรับการใช้งานแบบจำลองจิเรสต์กับพื้นที่จริง ได้ทำการประเมิน
สมรรถนะการจัดการน้ำของโครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน โดยแบบจำลองจิเรสต์สามารถ
แสดงความแตกต่างเชิงพื้นที่ ทั้งในด้านปริมาณการใช้น้ำและรูปแบบการเพาะปลูก ผลการ
ประเมินสมรรถนะแสดงให้เห็นว่า บริเวณตอนบนของพื้นที่ศึกษามีความเข้มของการเพาะปลูก
และปริมาณการใช้น้ำมากกว่าตอนล่าง โดยข้าวได้รับน้ำอย่างเพียงพอ และปริมาณน้ำชลประทาน
ที่ส่งใกล้เคียงกับความต้องการ ส่วนพื้นที่ตอนล่าง เป็นพื้นที่เสี่ยงต่อความเสียหายจากการขาดน้ำ
และบางพื้นที่ได้รับน้ำเกินความต้องการ โดยสรุป แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลอง
กระบวนการตัดสินใจของมนุษย์ร่วมกับกระบวนการทางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม เทคนิค
ปัญญาประดิษฐ์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว งานวิจัยยังจำเป็นต้องดำเนินต่อไปเพื่อคิดค้นแนวทางที่
เหมาะสม สำหรับการจำลองที่สมจริงมากยิ่งขึ้น

Yutthana Phankamolsil 2008: Modeling of Irrigation Water Use in Paddy Land by Object-Oriented Approach and Artificial Intelligence Techniques. Doctor of Engineering (Irrigation Engineering), Major Field: Irrigation Engineering, Department of Irrigation Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Ekasit Kositsakulchai, Dipl. Docteur. 331 pages.

In this research, “jIraIs” model, a tool for simulating irrigation water use in paddy land, was developed. Both bio-physical processes and farmer behavior were taken into consideration. The object-oriented approach (Java language) and Repast toolkit were selected as tools for model development. The model simulates water circulation in soil-water-plant-atmosphere system and tasks in irrigation water management. Surface water flow was calculated by the diffusion wave equation, while soil-water flow was described by Richards’s equation. Both equations were solved using numerical methods. Regulators in irrigation system controlled by fuzzy rules and field water management were simulated by agent-based modeling technique. For model verification, jIraIs results were compared with those from other well-known models, i.e. GSSHA, SWAP. After that, the model was applied for evaluating water management performance in the Upper Chao Phraya Irrigation Project. The jIraIs model demonstrated spatial variability in term of water use and cropping pattern. The simulation results showed that cropping intensity and irrigation water use in the upper part of study area were more than those in the lower part; rice had sufficient water and irrigation supply was closed to crop water requirement. In the lower part, not only risks of water shortage were observed, but excess water was also found. In conclusions, jIraIs model can mutually simulate processes of human decision-making and of natural phenomena. However, artificial intelligence techniques are rapidly developed. Further research is still indispensable for better representation of real world.

Student’s signature

Thesis Advisor’s signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ โฆสิตสกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยซึ่งข้าพเจ้าจะระลึกถึงอยู่ตลอดเวลา ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา แก้วกัลยา รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุธ วุฒินิชย์ รองศาสตราจารย์ ดร.บัญชา ขวัญยืน กรรมการวิชาเอก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิทธิ์ ทองจู ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติม ตลอดจนช่วยเหลือแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยมหิดลที่สนับสนุนทุนการศึกษาคุณูปกัณฑ์ และทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย ทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน รวมถึงทุนอุดหนุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ได้มีส่วนในการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนคอยให้คำแนะนำแก่ข้าพเจ้าเสมอมา ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง รวมทั้งเพื่อน ๆ นิสิตบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานทุกคน สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

และที่ข้าพเจ้าไม่เคยลืมเลือนไปจากจิตใจเลยคือคุณพ่อประเสริฐ แม่หอมแก้ว ที่คอยห่วงใย เรื่องสุขภาพและความเป็นอยู่ ตลอดจนสนับสนุนการศึกษาของลูกอยู่ตลอดเวลาจนลูกได้รับความสำเร็จอีกขั้นหนึ่งของชีวิต ขอขอบคุณพี่ศักดิ์ เหมียว และพี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือให้กำลังใจ ชี้แนะ และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้

ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์

พฤศจิกายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	10
อุปกรณ์และวิธีการ	39
เครื่องมือ	39
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	87
สรุปและข้อเสนอแนะ	208
สรุป	208
ข้อเสนอแนะ	212
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	214
ภาคผนวก	235
ภาคผนวก ก แบบจำลองจีเรส	236
ภาคผนวก ข การทดสอบแบบจำลอง	261
ภาคผนวก ค ข้อมูลการประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยา ฝั่งตะวันตกตอนบน	295
ภาคผนวก ง การเผยแพร่ผลงาน	309

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คำอธิบายรูปแบบการปลูกข้าวในเขตโครงการเจ้าพระยาตอนบน	8
2	ชุดคำสั่งภาษาจาวาสำหรับช่วยในการพัฒนาแบบจำลอง	40
3	พารามิเตอร์สำหรับคำนวณศักยภาพการคายน้ำและศักยภาพการระเหย	61
4	ข้อกำหนดการจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน	71
5	สถานการณ์สำหรับจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน	74
6	ข้อกำหนดการจำลองการไหลของน้ำในดิน	75
7	พารามิเตอร์ดินสำหรับประมาณค่าชลศาสตร์ของดิน	77
8	ค่าชลศาสตร์ดินในชุดดินนครปฐมและชุดดินสระบุรี	77
9	ข้อกำหนดการศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง	78
10	การกำหนดคุณสมบัติหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ	79
11	ชนิดของเนื้อดินที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง	80
12	การกำหนดสถานการณ์การจำลองจำนวน 56 สถานการณ์	80
13	ตัวอย่างคุณสมบัติของดินเหนียวสำหรับประมาณค่าชลศาสตร์ดิน	81
14	ข้อกำหนดในการจำลองระบบย่อย	84
15	อัตราการใช้และประสิทธิภาพ	106
16	ผลสำเร็จของการจำลองที่ขนาดกริดและชั้นเวลาต่าง ๆ	107
17	ปริมาณการระเหยจากดิน กรณีดินเปล่า	112
18	ปริมาณการระเหยจากดิน กรณีปลูกหญ้า	117
19	ปริมาณการคายน้ำ กรณีปลูกหญ้า	117
20	การกำหนดคุณสมบัติหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ	126
21	จำนวนสถานการณ์สำหรับการทดสอบแบบจำลอง	126
22	การเปรียบเทียบสมมูลของน้ำบนผิวดินของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว	128
23	การเปรียบเทียบสมมูลของน้ำในดินของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว	128
24	สรุปสมมูลน้ำในระบบส่งน้ำ	138
25	ตัวแปรสำหรับตัดสินใจปลูกข้าวของเกษตรกร	162

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
26	ข้อกำหนดการจำลองการจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาใหญ่ ฝั่งตะวันตกตอนบน	164
27	สรุปสมมูลน้ำ	179
28	ตัวชี้วัดสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน	193

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 รายชื่อตารางข้อมูลจัดเก็บข้อมูลผลการจำลอง	240
ก2 คำอธิบายคลาสในแบบจำลองจีเรส์	249
ข1 ค่าชลศาสตร์ของดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง	263
ข2 ค่าชลศาสตร์ของดินเหนียวปนทรายแป้ง	264
ข3 ค่าชลศาสตร์ของดินเหนียว	265
ข4 ค่าชลศาสตร์ของดินเหนียวปนดินร่วน	266
ข5 ค่าชลศาสตร์ของดินร่วน	267
ข6 ค่าชลศาสตร์ของดินร่วนปนดินเหนียวปนทราย	268
ข7 ค่าชลศาสตร์ของดินร่วนปนทราย	269
ข8 ค่าชลศาสตร์ของดินทรายปนดินร่วน	270
ข9 ค่าชลศาสตร์ดิน	287
ค1 ข้อมูลด้านชลศาสตร์ของชั้นดิน	299
ค2 กฎการควบคุมแบบฟuzzy สำหรับอาคารบังคับน้ำปากคลอง	303
ค3 กฎการควบคุมแบบฟuzzy สำหรับอาคารบังคับน้ำปลายคลอง	303
ค4 กฎการควบคุมแบบฟuzzy สำหรับอาคารทดน้ำกลางคลอง	304

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขอบเขตพื้นที่ศึกษาในเขตโครงการเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งตะวันตกตอนบน	4
2	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูลการระเหยของน้ำ อุณหภูมิและปริมาณน้ำฝน ของสถานีตรวจอากาศเกษตร จังหวัดสุพรรณบุรี (พ.ศ.2514-2543)	5
3	ปริมาณน้ำรายปีที่ผันเข้าพื้นที่โครงการเจ้าพระยาใหญ่	6
4	พื้นที่นาข้าวในโครงการเจ้าพระยาตอนบน	7
5	แบบแผนการปลูกข้าวในโครงการเจ้าพระยาตอนบน	8
6	องค์ประกอบระบบชลประทาน	10
7	ไดอะแกรมแสดงองค์ประกอบของสมมูลน้ำในนาข้าว	11
8	สมการการไหลซึมของน้ำผ่านดิน	13
9	การเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน้าตัดดินขณะน้ำซึมผ่านผิวดิน	14
10	การประมาณค่าสมการของระเบียบวิธี Finite Difference	22
11	การประมาณค่าสมการของระเบียบวิธี Finite Element	23
12	การประมาณค่าสมการของระเบียบวิธี Finite Volume	24
13	ผังไดอะแกรมแบบยูเอ็มแอล	29
14	คลาสไดอะแกรมสำหรับแบบจำลองสมมูลของน้ำ	31
15	กระบวนการปฏิสัมพันธ์ของเอเจนต์ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับเอเจนต์อื่น	33
16	ตัวอย่างการเขียนชุดคำสั่งภาษาจาวา	40
17	แหล่งรวบรวมข้อมูลและดาวน์โหลดทรัพยากร	41
18	ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของ Eclipse	42
19	ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของแบบจำลอง GSSHA	43
20	ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของแบบจำลอง SWAP	44
21	แผนผังการดำเนินงานวิจัย	45
22	แบบจำลองเชิงแนวคิดสำหรับสร้างแบบจำลองจิเรส	48
23	การกำหนดการไหลของน้ำจาก DEM	54
24	พารามิเตอร์ของข้าวจากการปรับเทียบกับข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	แนวคิดการควบคุมอาคารบังคับน้ำแบบพีชชี	62
26	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสภาพน้ำในคลอง	63
27	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระดับการยกบานประตูระบายน้ำ	64
28	การจำลองเกษตรกรด้วยเทคนิคเอเจนต์และเซลล์ลู่ออโตมาตา	66
29	กระบวนการเลือกแหล่งน้ำสำหรับปลูกข้าวของเกษตรกร	68
30	ขั้นตอนการปลูกข้าวของเกษตรกร	70
31	พื้นที่จำลองการไหลของน้ำอยู่ตอนบนของเขื่อนกระเสียว	73
32	โค้งความเข้ม-ระยะเวลาการตก-ความถี่ ของฝน อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี	74
33	ระบบชลประทานสำหรับจำลองระบบการกระจายน้ำชลประทาน	83
34	แผนการส่งน้ำรายสัปดาห์ในช่วงแล้ง (ประมาณเดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน)	85
35	แผนการส่งน้ำรายสัปดาห์ในช่วงฝน (ประมาณเดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม)	85
36	ส่วนต่อประสานของแบบจำลองจีเรส์	88
37	คลาสไดอะแกรมหลักของแบบจำลองจีเรส์	89
38	แนวคิดการจำลองชนิดการไหลของน้ำบนผิวดิน	92
39	คลาสไดอะแกรมแสดงกระบวนการไหลของน้ำบนผิวดิน	93
40	แนวคิดการจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ	95
41	คลาสไดอะแกรมจำลองความสัมพันธ์ระหว่างดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ	96
42	คลาสไดอะแกรมของการจำลองการไหลของน้ำในดิน	97
43	คลาสไดอะแกรมจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำ	99
44	คลาสไดอะแกรมจำลองกระบวนการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก	101
45	แบบจำลองจีเรส์สำหรับจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน	105
46	การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าระหว่างแบบจำลองจีเรส์กับแบบจำลอง GSSHA	106
47	การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำ	108
48	เปอร์เซ็นต์สะสมของความลาดชันของพื้นผิว	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
49	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ขึ้นเวลา 15, 30 และ 60 วินาที โดย	110
50	การเปรียบเทียบการระเหยของน้ำระหว่างแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์ กรณีดินเปล่า ในชุดดินนครปฐม	114
51	การเปรียบเทียบการระเหยของน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์ กรณีดินเปล่า ในชุดดินสระบุรี	114
52	ปริมาณการระเหยรายวันจากแบบจำลองจิเรสต์ กรณีดินเปล่า ในชุดดินนครปฐม	115
53	ปริมาณการระเหยรายวันจากแบบจำลองจิเรสต์ กรณีดินเปล่า ในชุดดินสระบุรี	115
54	การเปรียบเทียบการระเหยของน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินนครปฐม	118
55	การเปรียบเทียบการระเหยของน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินสระบุรี	118
56	ปริมาณการระเหยรายวันจากแบบจำลองจิเรสต์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินนครปฐม	119
57	ปริมาณการระเหยรายวันจากแบบจำลองจิเรสต์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินสระบุรี	119
58	การเปรียบเทียบการคายน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินนครปฐม	120
59	การเปรียบเทียบการคายน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินสระบุรี	120
60	ปริมาณการคายน้ำรายวันจากแบบจำลองจิเรสต์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินนครปฐม	121
61	ปริมาณการคายน้ำรายวันจากแบบจำลองจิเรสต์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินสระบุรี	121
62	ปริมาณน้ำฝนรายวันและปริมาณน้ำฝนสะสม (1 ม.ค. 01 ถึง 31 ม.ค.02)	123
63	การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน กรณีดินเปล่า	123
64	การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน กรณีปลูกหญ้า	123
65	สัดส่วนของสมมูลน้ำบนผิวดิน ของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว	129
66	สัดส่วนสมมูลน้ำในดิน ของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในกรณีดินเหนียว	129

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
67	ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นระหว่างหน้าตัดดิน	130
68	การเปรียบเทียบปริมาณการระเหยจากดินสะสมของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว	131
69	การเปรียบเทียบปริมาณการซึมผ่านผิวดินสะสมของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว	132
70	การเปรียบเทียบปริมาณการซึมลึกลงดินสะสมของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว	132
71	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดินในดินเหนียว	134
72	ระบบชลประทานสำหรับจำลองระบบการกระจายน้ำชลประทาน	137
73	ปริมาณน้ำเฉลี่ยรายสัปดาห์ ที่ ปตร. ปากคลองสายใหญ่	140
74	ปริมาณน้ำเฉลี่ยรายสัปดาห์ ที่ ปตร. ปากคลอง 1R	140
75	สัดส่วนของพื้นที่ปลูกข้าว กรณีส่งน้ำตลอดปี	142
76	ตัวอย่างผลการบันทึกกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของแปลงติดคลองส่งน้ำ กรณีส่งน้ำตลอดปี	146
77	ตัวอย่างผลการบันทึกกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของแปลงติดคลองส่งน้ำ กรณีส่งน้ำตามฤดูกาล	147
78	โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบนส่วนที่ใช้น้ำจากแม่น้ำท่าจีน	150
79	ผังการจำลองระบบชลประทาน	151
80	ปริมาณน้ำรายปีที่ระบายผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน	153
81	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำรายเดือนที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน ระหว่างปี พ.ศ.2518 - พ.ศ.2547	153
82	การสำรวจพื้นที่ชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน	157
83	ขั้นตอนการเตรียมแปลงปลูกข้าว	158
84	พื้นที่เสี่ยงต่อน้ำท่วมขังในเขตในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน	163

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
85	ปริมาณน้ำท่ารายเดือนไหลผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	167
86	การเปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลผ่านประตูระบายน้ำระหว่างข้อมูลสถิติ กับข้อมูลจากการจำลอง กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	168
87	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำรายเดือนที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน กรณีจำกัดน้ำต้นทุน (1 ก.ค.43 ถึง 31 ธ.ค.45)	169
88	ปริมาณน้ำรายเดือนไหลผ่านอาคารควบคุมน้ำในแม่น้ำท่าจีน กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	171
89	การเปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลผ่านประตูระบายน้ำระหว่างข้อมูลสถิติกับ ข้อมูลจากการจำลอง กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	172
90	ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำรายเดือนที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด (1 ก.ค.43 ถึง 31 ธ.ค.45)	173
91	ความเข้มของการเพาะปลูก กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	176
92	ความเข้มของการเพาะปลูก กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	177
93	การเปรียบเทียบสมดุลของน้ำในกรณีน้ำต้นทุนจำกัดกับกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	179
94	สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของข้าว กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	181
95	สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของข้าว กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	181
96	ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของข้าว	182
97	สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำของข้าวที่แท้จริง กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	183
98	สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำของข้าวที่แท้จริง กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	183
99	ปริมาณการใช้น้ำของข้าวที่แท้จริง	184
100	ปริมาณน้ำฝนรวมตลอดการจำลอง	185
101	ปริมาณน้ำท่าผิวดิน	187
102	สัดส่วนการใช้น้ำชลประทาน กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	188
103	สัดส่วนการใช้น้ำชลประทาน กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	188

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
104	ปริมาณการใช้น้ำชลประทานตลอดระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)	189
105	สัดส่วนของพื้นที่ที่ใช้น้ำชลประทานต่อช่วงฤดูกาลเพาะปลูก กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	190
106	สัดส่วนของพื้นที่ที่ใช้น้ำชลประทานต่อช่วงฤดูกาลเพาะปลูก กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	190
107	ปริมาณน้ำชลประทานต่อช่วงฤดูกาลเพาะปลูก	191
108	ปริมาณน้ำต้นทุนทั้งหมด	192
109	การแบ่งโซนสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน	194
110	การใช้น้ำของพืชสัมพัทธ์	197
111	อัตราส่วนการใช้น้ำของข้าวกับปริมาณน้ำต้นทุนทั้งหมด	198
112	การเปรียบเทียบสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานกรณีน้ำต้นทุนจำกัด และกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	201
113	สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานกรณีน้ำต้นทุนจำกัด	202
114	สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	203
115	สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานในช่วงฝน กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	204
116	สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานในช่วงแล้ง กรณีน้ำต้นทุนจำกัด	205
117	สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานในช่วงฝน กรณี น้ำต้นทุนไม่จำกัด	206
118	สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานในช่วงแล้ง กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	207

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1	การสร้างไคเรททอรีสำหรับใช้งานแบบจำลอง
ก2	รายชื่อไฟล์ที่จัดเก็บอยู่ในไคเรททอรี
ก3	ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์สำหรับบันทึกผลการจำลอง
ก4	การสร้างระบบติดต่อกับฐานข้อมูลเพื่อรองรับข้อมูลนำออกจากแบบจำลอง
ก5	การเรียกใช้งานแบบจำลองจาก MS-Dos Prompt Window
ก6	การใช้งานแบบจำลองจีเรสผ่าน Eclipse
ก7	องค์ประกอบการทำงานของแบบจำลองจีเรส
ก8	คลาสไดอะแกรมสำหรับแสดงการเชื่อมโยงระหว่างคลาส “ModelMain” กับคลาสจากรีพอร์ท
ก9	แพ็กเกจและคลาสในแบบจำลองจีเรสมีทั้งหมด 14 แพ็กเกจ 52 คลาส
ก10	การสืบทอดรายละเอียดของคลาส
ก11	คลาสไดอะแกรมคำนวณข้อมูลเกี่ยวกับภูมิอากาศ
ก12	คลาสไดอะแกรมของการอ่านข้อมูล
ก13	ไดอะแกรมแสดงกิจกรรมของเกษตรกร
ก14	ไดอะแกรมแสดงกระบวนการเลือกหาแหล่งน้ำ
ก15	ไดอะแกรมแสดงกระบวนการใช้น้ำชลประทาน
ก16	ไดอะแกรมแสดงกระบวนการเตรียมแปลง
ก17	ลำดับเลขรหัสของกริดอ้างอิง
ก18	ตัวอย่างการสร้างข้อมูลกริดอ้างอิง
ข1	การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง
ข2	การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดิน ของในดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง
ข3	การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินเหนียวปนทรายแป้ง
ข4	การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินเหนียวปนทรายแป้ง
ข5	การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินเหนียว
ข6	การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินเหนียว

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข7 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินเหนียวปนดินร่วน	274
ข8 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินเหนียวปนดินร่วน	274
ข9 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินร่วน	275
ข10 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินร่วน	275
ข11 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินร่วนปนดินเหนียวปนทราย	276
ข12 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินร่วนปนดินเหนียวปนทราย	276
ข13 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินร่วนปนทราย	277
ข14 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินร่วนปนทราย	277
ข15 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินทรายปนดินร่วน	278
ข16 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินทรายปนดินร่วน	278
ข17 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดิน ในกรณีดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง	279
ข18 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดิน ในกรณีดินเหนียว	281
ข19 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดินในกรณีดินร่วน	283
ข20 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดิน ในกรณีดินทรายปนดินร่วน	285
ข21 คุณสมบัติของประตูละบายน้ำในระบบย่อย	288
ข22 สัดส่วนของพื้นที่ปลูกข้าว กรณีส่งน้ำตลอดปี	289
ข23 สัดส่วนของพื้นที่ปลูกข้าว กรณีส่งน้ำรายฤดูกาล	291
ข24 ตัวอย่างผลการบันทึกกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของแปลงติดคลองส่งน้ำ กรณีส่งน้ำตลอดปี	293
ข25 ตัวอย่างผลการบันทึกกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของแปลงติดคลองส่งน้ำ กรณีส่งน้ำตามฤดูกาล	294

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค1 ข้อมูลภูมิอากาศรายวันของสถานีตรวจอากาศ จังหวัดชัยนาทประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ชั่วโมงแสงแดด ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน	297
ค2 ข้อมูลภูมิอากาศรายวันของสถานีตรวจอากาศอำเภออุทุมพร จังหวัดสุพรรณบุรี ประกอบด้วยอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ชั่วโมงแสงแดด ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน	298
ค3 ปริมาณน้ำท่าไหลจากพื้นที่กระเสียว ประกอบด้วย ลำน้ำกระเสียว 4 แห่ง และคลองจรเข้สามพัน (JKSP)	300
ค4 ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยจากคลองระบายน้ำสุพรรณบุรีทั้ง 4 สาย	300
ค5 คุณสมบัติประติรูประบายน้ำในกลุ่มน้ำท่าเงิน	301
ค6 แบบสอบถามเกษตรกร	305
ค7 ปริมาณน้ำรายเดือนไหลผ่านจังหวัดนครสวรรค์	307
ค8 ปริมาณน้ำรายเดือนไหลผ่านอาคารควบคุมน้ำ กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด	307

การจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าว โดยแนวทางเชิงอ็อบเจกต์ร่วมกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์

Modeling of Irrigation Water Use in Paddy Land by Object-Oriented Approach and Artificial Intelligence Techniques

คำนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญนับตั้งแต่อดีต โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 60 ล้านไร่ ซึ่งคิดเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่ทางการเกษตรทั้งประเทศ (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2549) ในช่วงฤดูแล้ง มีการทำนาปรังประมาณ 9 ล้านไร่ โดยครึ่งหนึ่งกระจายอยู่ในเขตภาคกลาง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ชลประทานของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พื้นที่ทางตอนบนของโครงการเป็นพื้นที่ปลูกข้าวติดต่อกันเป็นผืนใหญ่มากกว่าร้อยละ 95 การทำนาข้าวมีความต้องการใช้น้ำค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการปลูกพืชชนิดอื่น ดังนั้นการบริหารจัดการน้ำชลประทานอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำมีแหล่งที่มาจากระบบการทางธรรมชาติ ซึ่งมีความไม่แน่นอนและคาดการณ์ได้ยาก นอกจากนี้ การใช้น้ำยังแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ ดังนั้น การบริหารจัดการน้ำให้ตรงตามวัตถุประสงค์จึงทำได้ไม่ง่ายนัก

แบบจำลองคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือที่สำคัญอันหนึ่งสำหรับงานบริหารจัดการน้ำ แต่โดยทั่วไป แบบจำลองจากต่างประเทศ มักถูกพัฒนาขึ้นด้วยวัตถุประสงค์เฉพาะ ฉะนั้น การนำแบบจำลองมาประยุกต์ในประเทศไทยซึ่งมีสภาพพื้นที่เป็นนาข้าวจึงทำได้ค่อนข้างยาก ด้วยเหตุนี้การพัฒนาแบบจำลองให้ทำงานอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสำหรับจัดการน้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าวจึงเป็นสิ่งจำเป็น ในการพัฒนาแบบจำลอง ส่วนใหญ่ยังใช้วิธีเขียนโปรแกรมด้วยภาษาเชิงกระบวนการ อาทิ ภาษาฟอร์แทรนหรือภาษาซี ถึงแม้ว่าแบบจำลองดังกล่าวยังมีการใช้งานในปัจจุบัน แต่การปรับแบบจำลองให้สอดคล้องกับความต้องการหรือให้รองรับการจำลองกระบวนการที่ซับซ้อนเพิ่มขึ้นกระทำได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากแบบจำลองถูกพัฒนาโดยใช้ภาษาเขียนโปรแกรมและระบบปฏิบัติการแบบดั้งเดิม ด้วยเหตุนี้ แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ (object orientation) จึงมีแนวโน้มได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากแนวทางนี้มีจุดเด่นหลายประการ อาทิ

การพัฒนาซอฟต์แวร์สามารถนำชุดคำสั่งกลับมาใช้ และขยายขีดความสามารถได้ง่าย วิธีการเชิงอ็อบเจกต์ให้แนวทางสำหรับการสร้างแบบจำลองที่สอดคล้องกับโลกตามความเป็นจริงได้โดยง่าย (Liu and Stewart, 2004) นอกจากนี้ วิทยาการทางคอมพิวเตอร์ที่ปัจจุบันได้เจริญก้าวหน้าค่อนข้างมาก โดยเฉพาะเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence หรือ AI) อาทิ การจำลองแบบเอเจนต์ (Agent-Based Modeling หรือ ABM) (Ferber, 1999) เทคนิคนี้เป็นวิธีการจำลองหน่วยย่อยให้เป็นเอเจนต์ที่มีความสามารถในการรับรู้ข้อมูล ตอบสนอง และตัดสินใจตามวัตถุประสงค์ของตนเอง เทคนิคการจำลองดังกล่าวมีศักยภาพสูงสำหรับใช้ในอธิบายกระบวนการต่าง ๆ ที่ค่อนข้างซับซ้อน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนาเครื่องมือสำหรับจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าว โดยพิจารณาปัจจัยทั้งด้านกายภาพ ชีวภาพ และพฤติกรรมการใช้น้ำของเกษตรกร โดยใช้แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ร่วมกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์

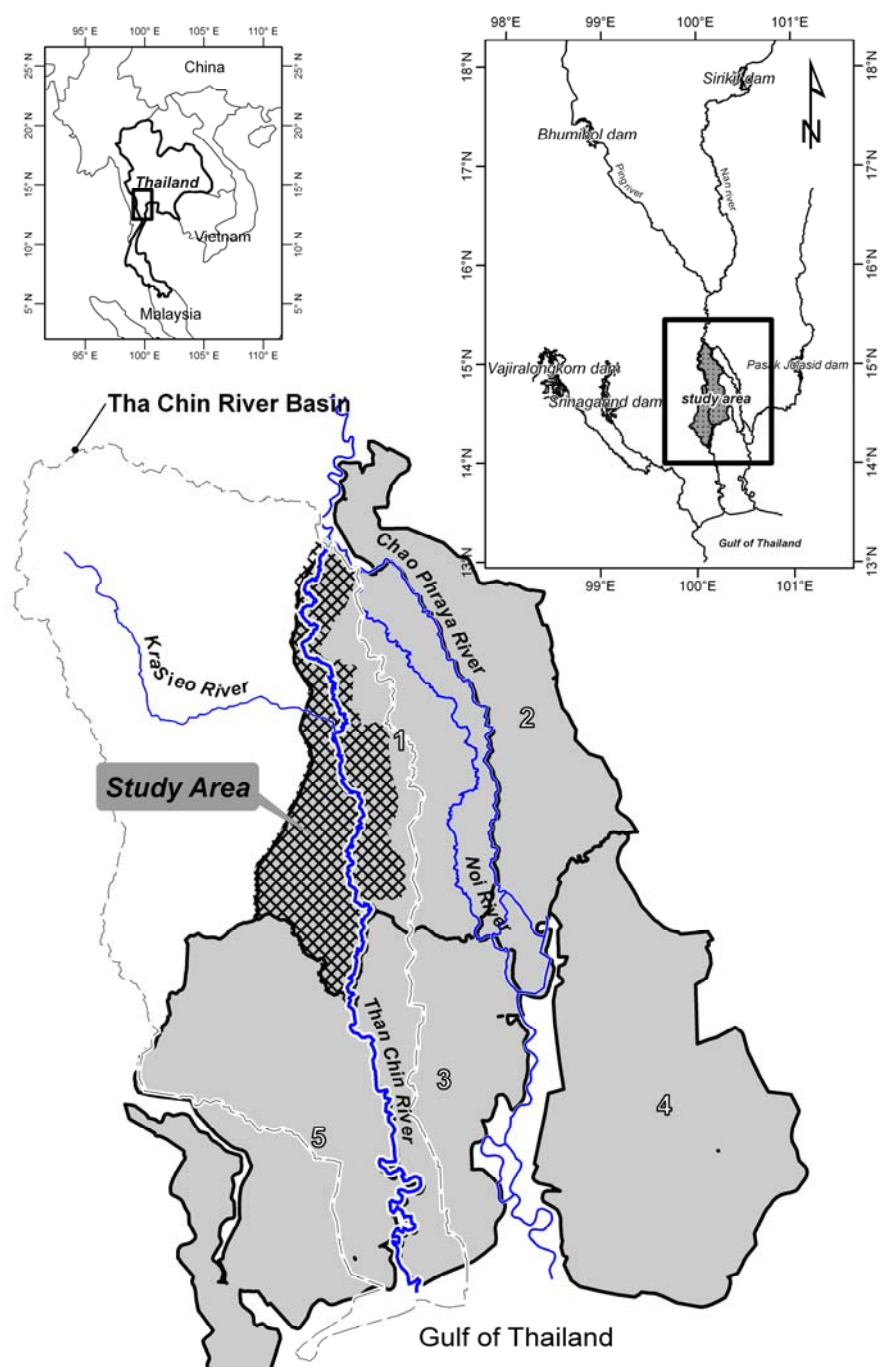
วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะพัฒนาเครื่องมือสำหรับจำลองการใช้น้ำชลประทานในนาข้าว โดยพิจารณาปัจจัยทั้งด้านกายภาพ ชีวภาพ และพฤติกรรมการใช้น้ำของเกษตรกร โดยใช้แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ (object orientation) ด้วยภาษาจาวา (Java) ร่วมกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligences หรือ AI) ซึ่งสามารถแยกเป็นวัตถุประสงค์ของการดำเนินงานได้ ดังนี้

1. พัฒนาแบบจำลองกระบวนการไหลเวียนของน้ำบนผิวดินและในระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ โดยพิจารณาปัจจัยทั้งทางกายภาพและชีวภาพ ด้วยวิธีเชิงอ็อบเจกต์
2. จำลองพฤติกรรมการใช้น้ำในการเพาะปลูกของเกษตรกรและการจัดการน้ำชลประทาน โดยแทนกระบวนการตัดสินใจด้วยเทคนิคการจำลองด้วยเอเจนต์ (Agent-Based Modeling หรือ ABM) และตรรกะแบบฟัซซี (fuzzy rule-based control)
3. ตรวจสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่เป็นที่ยอมรับ
4. ประยุกต์แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน

ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ กำหนดขอบเขตการศึกษาเป็นพื้นที่ตอนบนของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ส่วนที่ใช้น้ำจากแม่น้ำท่าจีน (โครงการเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งตะวันตก) โดยเป็นพื้นที่ชลประทานของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาในเขตลุ่มน้ำท่าจีน ซึ่งประกอบด้วยโครงการพลเทพ โครงการท่าโบสถ์ โครงการ สามชุก โครงการโพธิ์พระยา และโครงการคอนเจดีย์ ในส่วนขั้นตอนการตรวจสอบแบบจำลอง กระบวนการไหลของน้ำบนผิวดินเปรียบเทียบกับผลลัพธ์กับแบบจำลอง GSSHA ส่วนการไหลของน้ำในดินเปรียบเทียบกับแบบจำลอง SWAP



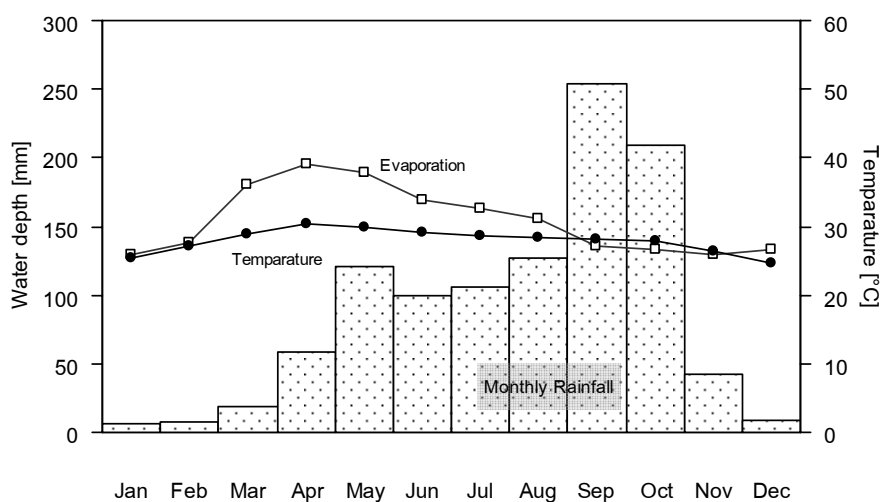
ภาพที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาในเขตโครงการเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งตะวันตกตอนบน

หมายเหตุ (1) โครงการเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งตะวันตกตอนบน (2) โครงการเจ้าพระยาใหญ่
ฝั่งตะวันออกตอนบน (3) โครงการเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งตะวันตกตอนล่าง
(4) โครงการเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งตะวันออกตอนล่าง (5) โครงการแม่กลองใหญ่

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในเขตของกลุ่มน้ำท่าจีน โดยเป็นพื้นที่ชลประทานทางตอนบนของโครงการเจ้าพระยาใหญ่ที่ใช้น้ำจากแม่น้ำท่าจีน ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ราว 1.4 ล้านไร่ ในเขตรับผิดชอบของสำนักงานชลประทานที่ 12 จังหวัดชัยนาท โดยตั้งอยู่ระหว่างละติจูด $14^{\circ} 8'$ ถึง $15^{\circ} 15'$ เหนือ และลองจิจูด $99^{\circ} 52'$ ถึง $100^{\circ} 15'$ ตะวันออก ทิศเหนือของพื้นที่ศึกษาดัดกับลุ่มน้ำสะแกกรัง ทิศใต้ติดกับพื้นที่โครงการเจ้าพระยาใหญ่ตอนล่าง ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำเจ้าพระยา ส่วนทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำแม่กลอง

ขอบเขตของพื้นที่ศึกษา (ในภาพที่ 1) มีลักษณะทั่วไปเป็นพื้นที่ราบลุ่ม มีแม่น้ำท่าจีนเป็นแม่น้ำสายหลักไหลผ่านตอนกลางของพื้นที่ ซึ่งไหลขนานกับแม่น้ำเจ้าพระยาจากทิศเหนือลงสู่ทิศใต้ ฝั่งซ้ายของแม่น้ำท่าจีนส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ชลประทานที่รับน้ำจากแม่น้ำท่าจีนและแม่น้ำน้อย ส่วนทางฝั่งขวาที่ติดกับแม่น้ำท่าจีนเป็นพื้นที่ชลประทานที่รับน้ำจากแม่น้ำท่าจีนเป็นหลัก และห่างออกไปทางทิศตะวันตกเป็นพื้นที่ลุ่มน้ำกระเสียวซึ่งเป็นลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำท่าจีน พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นอกเขตชลประทานมีลักษณะภูมิประเทศค่อนข้างลาดชัน

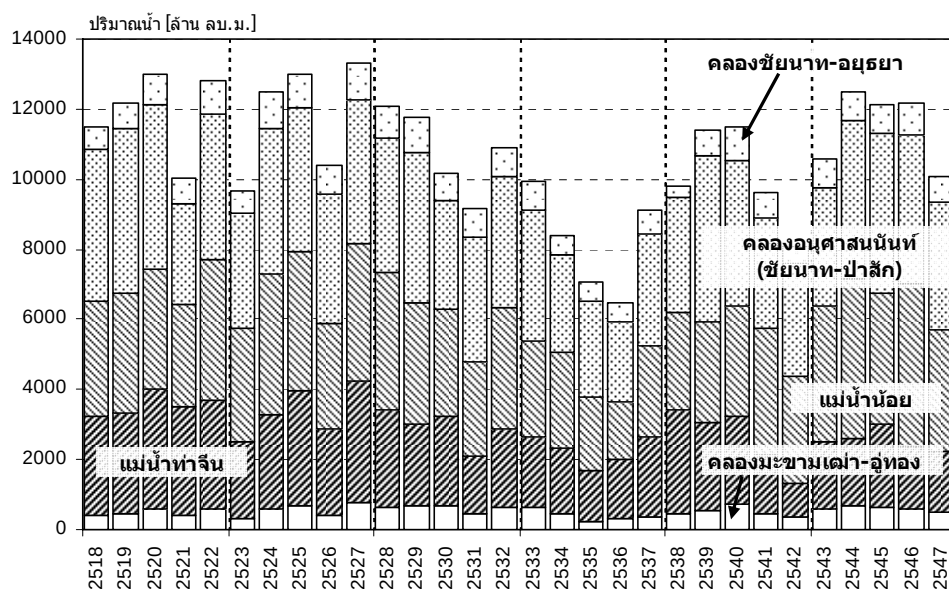


ภาพที่ 2 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูลการระเหยของน้ำ อุณหภูมิ และปริมาณน้ำฝน
ของสถานีตรวจอากาศเกษตร จังหวัดสุพรรณบุรี (พ.ศ.2514-2543)

จากข้อมูลเฉลี่ยรายเดือน 30 ปี (ภาพที่ 2) พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ย 28 องศาเซลเซียส โดยเดือนเมษายนอุณหภูมิสูงสุด 30 องศาเซลเซียส เดือนธันวาคมต่ำสุด 25 องศาเซลเซียส น้ำฝนเฉลี่ยรายปีราว 1,000 มิลลิเมตร การระเหยเฉลี่ย 1,800 มิลลิเมตร ฤดูฝนเริ่มเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ฤดูหนาวเริ่มเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ และฤดูร้อนเริ่มเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม

ระบบชลประทานมีเขื่อนเจ้าพระยาเป็นหัวงาน ตั้งอยู่ที่ อ.สรรพยา จ.ชัยนาท เขื่อนเจ้าพระยาทำหน้าที่กั้นน้ำเข้าพื้นที่สองฝั่งของแม่น้ำ โดยฝั่งซ้ายทอดเข้าคลองชัยนาท-ป่าสัก (อนุศาสนนันท์) และคลองชัยนาท-อยุธยา โดยกระจายน้ำให้พื้นที่เจ้าพระยาฝั่งตะวันออกตอนบน ส่วนฝั่งขวาทอดน้ำเข้าแม่น้ำท่าจีนและแม่น้ำน้อยเพื่อกระจายน้ำให้กับพื้นที่เจ้าพระยาฝั่งตะวันตก

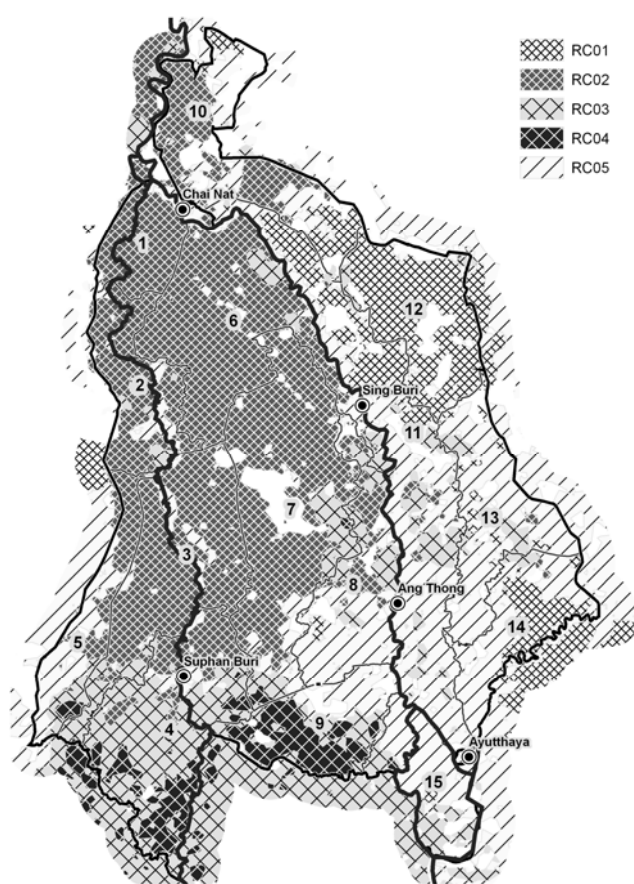
น้ำต้นทุน เป็นปริมาณน้ำท่าที่เขื่อนเจ้าพระยา ซึ่งไหลจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์รวมกับลำน้ำสาขาของแม่น้ำเจ้าพระยา ปริมาณน้ำที่เขื่อนเจ้าพระยาผันเข้าพื้นที่ฝั่งตะวันตก (แม่น้ำท่าจีน แม่น้ำน้อย และคลองมะขามเต่า-อุททอง) ประมาณ 6,200 ล้าน ลบ.ม. ผันเข้าพื้นที่ฝั่งตะวันออกราว 4,500 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งรวมปริมาณน้ำประมาณ 11,000 ล้าน ลบ.ม. แสดงปริมาณน้ำในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ปริมาณน้ำรายปีที่ผันเข้าพื้นที่โครงการเจ้าพระยาใหญ่

ที่มา: เอกสิทธิ์และคณะ (2550ก)

โครงการเจ้าพระยาใหญ่ เป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่ใช้น้ำชลประทานเป็นหลัก และเป็นพื้นที่ปลูกข้าวติดกันเป็นผืนใหญ่ครอบคลุมพื้นที่มากกว่าร้อยละ 95 ในกรณีนี้ ชาญณรงค์ (2551) ได้ทำการจำแนกพื้นที่นาข้าวในเขตโครงการเจ้าพระยาตอนบน ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ศึกษา ผลการจำแนกทำให้ทราบรูปแบบการปลูกพืช 5 รูปแบบ (ในภาพที่ 4) โดยพบว่า รูปแบบที่ 2 (RC02) เป็นรูปแบบการปลูกพืชที่ปรากฏในเขตพื้นที่ศึกษาเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นการปลูกข้าวต่อเนื่องทั้งปี 3 ครั้ง โดยนาปีจะเริ่มประมาณเดือนสิงหาคมแล้วไปเก็บเกี่ยวประมาณเดือนธันวาคม หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วเสร็จ จะมีการเตรียมแปลงปลูกข้าวนาปรังครั้งแรกต่อทันที และจะเริ่มเก็บเกี่ยวอีกครั้งราวเดือนมีนาคม หลังจากนั้น จะเริ่มทำนาปรังครั้งที่ 2 ต่อในเดือนเมษายน



ภาพที่ 4 พื้นที่นาข้าวในโครงการเจ้าพระยาตอนบน

ที่มา: ดัดแปลงจากชาญณรงค์ (2551)

Cropping Pattern	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
RC01												
RC02												
RC03												
RC04												
RC05												

ภาพที่ 5 แบบแผนการปลูกข้าวในโครงการเจ้าพระยาตอนบน

ตารางที่ 1 คำอธิบายรูปแบบการปลูกข้าวในเขตโครงการเจ้าพระยาตอนบน

รูปแบบ	คำอธิบาย
RC01	นาปี (WS)+นาปรัง (DS) โดยนาปีเริ่มปลูกช่วงกรกฎาคมถึงสิงหาคม นาปรังเริ่มเดือนกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม แบบแผนนี้ใกล้เคียงกับปฏิทินส่งน้ำของกรมชลประทาน
RC02	นาปี+นาปรัง1 (DS1)+นาปรัง 2 (DS2) เป็นพื้นที่ปลูกข้าวต่อเนื่องนับได้ถึงปีละ 3 ครั้ง คือ นาปีหนึ่งครั้ง และนาปรังสองครั้ง โดยนาปีเริ่มปลูกช่วงเดือนสิงหาคม นาปรังครั้งแรกเริ่มปลูกในช่วงเดือนธันวาคม และนาปรังครั้งที่สองเริ่มปลูกในเดือนเมษายน
RC03	นาปีปลูกเร็ว+น้ำท่วมขัง+นาปรัง เป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อน้ำท่วมขังสั้น ๆ ช่วงปลายฤดูฝน นาปีเริ่มประมาณพฤษภาคม นาปรังเริ่มปลูกเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคม
RC04	นาปีปลูกเร็ว+น้ำท่วมขังนาน+นาปรัง เป็นพื้นที่บริเวณที่มีความเสี่ยงต่อน้ำท่วมขังค่อนข้างนานช่วงปลายฤดูฝน นาปีเริ่มปลูกช่วงเดือน พ.ค นาปรังเริ่มปลูกในช่วงเดือน ม.ค. ถึง ก.พ.
RC05	นาปี+ไม่ทำนาปรัง เป็นพื้นที่ทำนาปีครั้งเดียว นาปีเริ่มปลูกช่วงเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม ตามปฏิทินการส่งน้ำ ส่วนในฤดูแล้งบางพื้นที่อาจมีการปลูกพืชผัก พืชไร่

ในส่วนของการวิจัยที่เกี่ยวข้องในเขตพื้นที่ศึกษามีเผยแพร่หลายชิ้น อาทิ การวินิจฉัย การจัดการน้ำในลุ่มน้ำแม่น้ำท่าจีน (เอกสิทธิ์และคณะ, 2550ก) เป็นการใช้แนวทางการวิเคราะห์ แบบองค์รวมทั้งระบบในการวินิจฉัยปัจจัยที่เป็นข้อจำกัดในการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำท่าจีน ผลการวิจัยบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ไหลเวียนในระบบ และการใช้น้ำชลประทาน ถัดมาเป็น การศึกษาสภาพน้ำท่วมขังในพื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีนโดยการวิเคราะห์ ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการใช้แบบจำลองลุ่มน้ำ (ณัฐพล, 2551; ณัฐพล และเอก สิทธิ์, 2550ก, 2550ข) งานวิจัยชิ้นนี้ได้วิเคราะห์ขอบเขตของน้ำท่วมขังและระดับความรุนแรงใน พื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีน ซึ่งจากการทบทวนผลการวิจัยนี้พบว่าพื้นที่น้ำท่วมขังครอบคลุมพื้นที่บางส่วน ของการวิจัย

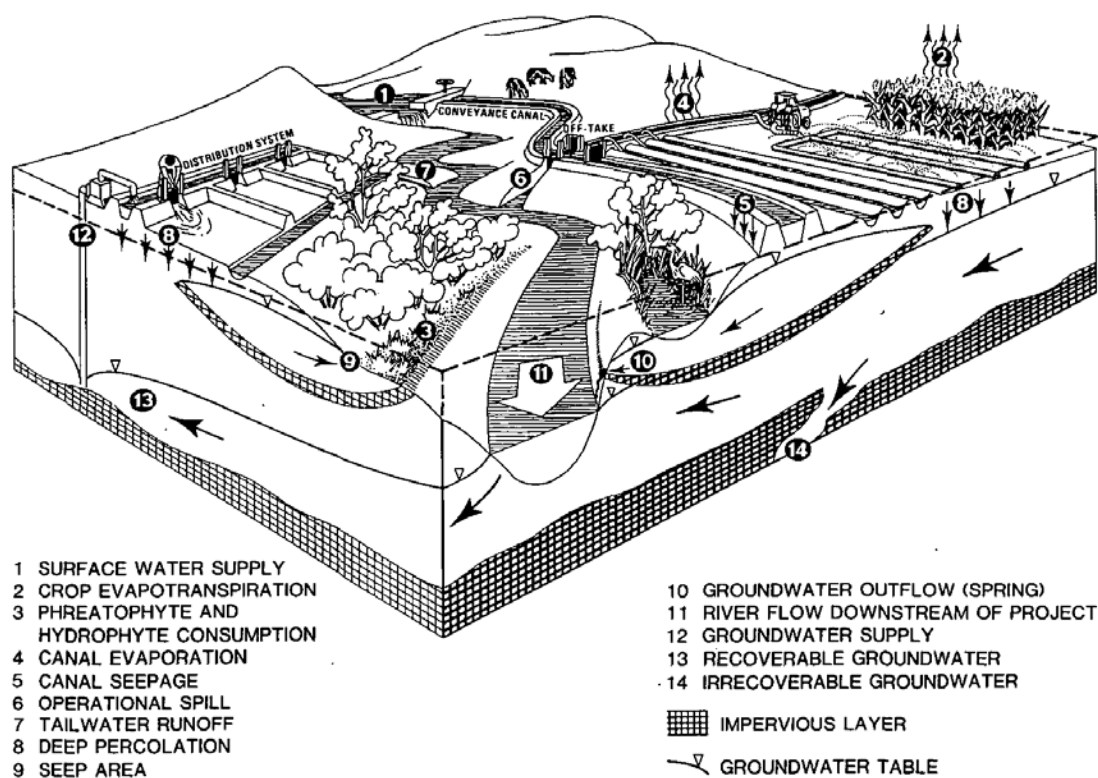
นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกหลายชิ้น อาทิ วิธีการสำรวจระยะไกลสำหรับประเมินการใช้น้ำ ของข้าว: กรณีศึกษาโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตก (ชูพันธุ์, 2547; ชูพันธุ์ และเอก สิทธิ์, 2548) การวิเคราะห์บัญชีน้ำในโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน (ไชยวัฒน์, 2548; ไชยวัฒน์ และเอกสิทธิ์, 2548ก, 2548ข) การติดตามพลวัตของความต้องการน้ำ ชลประทานในพื้นที่โครงการแม่กลองใหญ่โดยใช้ข้อมูล MODIS และแบบจำลอง WEAP (ปกรณ, 2550; ปกรณ และเอกสิทธิ์, 2550) การประเมินการจัดการระบบอ่างเก็บน้ำของลุ่มน้ำแม่กลองโดย วิธี DEA (ภาสกร, 2550; ภาสกร และเอกสิทธิ์, 2550) การวิเคราะห์ผลผลิตของน้ำสำหรับการปลูก ข้าวในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนโดยใช้แบบจำลองพยากรณ์ผลผลิตพืชและเทคนิคการ สำรวจระยะไกล (ชาญณรงค์, 2551)

การตรวจเอกสาร

หัวข้อการตรวจเอกสารแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ การจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าว และอุทกสารสนเทศกับงานด้านชลประทาน ทั้งสองส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1. การจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าว

ในภาพที่ 6 แสดงองค์ประกอบในระบบชลประทาน โดยแสดงการหมุนเวียนของน้ำในพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งเกี่ยวข้องกับหลายกระบวนการ อาทิ แหล่งน้ำผิวดิน แหล่งน้ำใต้ดิน ระบบส่งน้ำ ระบบกระจายน้ำ กระบวนการคายระเหย และพื้นที่เพาะปลูก

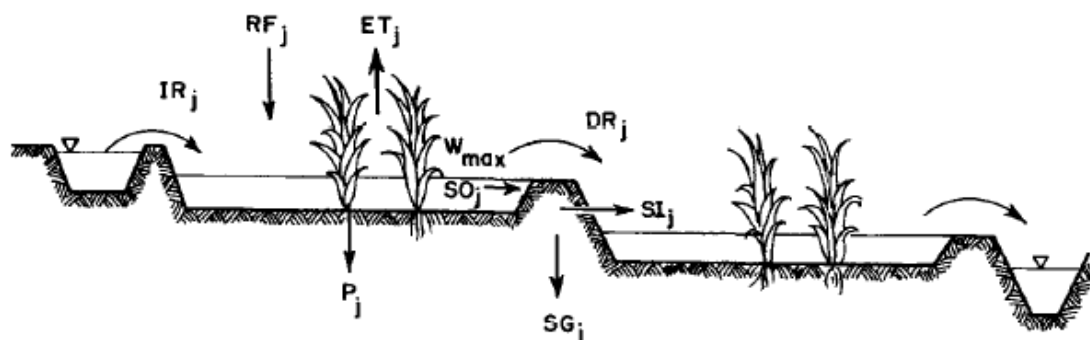


ภาพที่ 6 องค์ประกอบระบบชลประทาน

ที่มา: Ritzema (1994)

1.1 สมดุลน้ำในนาข้าว

การใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาข้าวใช้หลักการสมดุลของน้ำในแปลงนา ซึ่งมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังแสดงในภาพที่ 7 และสามารถเขียนเป็นสมการสมดุลของน้ำในแปลงนาได้ดังนี้



ภาพที่ 7 ไคอะแกรมแสดงองค์ประกอบของสมดุลน้ำในนาข้าว

ที่มา: Odhiambo and Murty (1996)

$$\frac{\Delta WD}{\Delta t} = RF_j + IR_j - ET_j - DR_j - SO_j + SI_j - P_j - SG_j \quad (1)$$

ในเมื่อ ΔWD_j คือ ความลึกของน้ำในแปลงนาที่เวลา ปัจจุบัน j (L) ต่อเวลา Δt

RF_j คือ ปริมาณน้ำฝน (rainfall)

IR_j คือ ปริมาณน้ำชลประทาน (irrigation water)

ET_j คือ ปริมาณการคายระเหย (evapotranspiration)

DR_j คือ ปริมาณน้ำที่ระบายจากแปลงนาหรือน้ำที่ไหลล้นคันนา (surface drainage)

SO_j คือ ปริมาณการซึมผ่านออกจากคันนา (seepage outflow)

SI_j คือ ปริมาณการซึมผ่านเข้าคันนา (seepage inflow)

P_j คือ ปริมาณการซึมผ่านดิน (percolation in the field)

SG_j คือ ปริมาณการซึมผ่านดินใต้คันนา (percolation below the bund)

W_{max} คือ ความลึกน้ำสูงสุดที่ทำให้น้ำไหลล้นคันนา

1) ปริมาณการคายระเหย (evapotranspiration)

ปริมาณการคายระเหย (evapotranspiration หรือ ET) คำนวณจากสมการของ Penman ซึ่งได้เสนอไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 โดย Penman ได้พัฒนาสมการโดยการผสมผสานวิธีการคำนวณการระเหยของน้ำตามหลักสมดุลพลังงานที่พื้นผิว (surface energy balance) เข้ากับวิธีการคำนวณการระเหยน้ำตามหลักการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) สมการของ Penman-Monteith (Monteith and Unsworth, 1990) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (เอกสิทธิ์, 2551)

$$\lambda ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \left\{ \frac{e_s - e_a}{r_a} \right\}}{\Delta + \gamma \left\{ 1 + \frac{r_s}{r_a} \right\}} \quad (2)$$

โดย ET_o เป็นปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (mm d^{-1})
 λ เป็นความร้อนแฝงของการระเหย (MJ kg^{-1})
 R_n เป็นพลังงานการแผ่รังสีสุทธิ ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 G เป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทลงดิน ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 ρ_a เป็นความหนาแน่นเฉลี่ยของอากาศ (kg m^{-3})
 c_p เป็นความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ($\text{MJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$)
 $(e_s - e_a)$ เป็นความดันไอน้ำที่ขาด (kPa)
 Δ เป็นความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa C^{-1})
 γ เป็นค่าคงที่ของเทอมความชื้น (kPa C^{-1})
 r_a และ r_s เป็นค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ชั้นการไหลเวียนอากาศและที่ชั้นพื้นผิว (s m^{-1})

2) ปริมาณการซึมผ่านผิวดิน

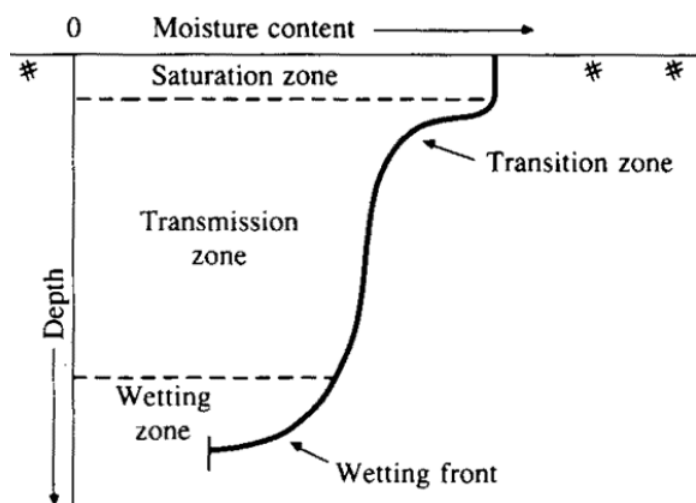
การซึมผ่านผิวดิน (infiltration) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากผิวดินเข้าไปในดินตามช่องว่างระหว่างเม็ดดิน กระบวนการนี้ เริ่มต้นเมื่อมีน้ำตกลงสู่ผิวดินซึ่งอาจเป็นน้ำฝนตามธรรมชาติ หรือน้ำชลประทาน จากนั้น ในขณะที่ดินแห้ง น้ำจะแทรกซึมผ่านผิวดินและแพร่ลงไปในดินอย่างรวดเร็วด้วยแรงดึงดูดความชื้นในดินเป็นหลัก โดยแรงดึงดูดความชื้นนี้จะมีค่าลดลงในขณะที่ดินมีความชื้นเพิ่มขึ้น จนกระทั่งดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ แรงดึงดูดความชื้นจะมีค่าน้อยมาก (เป็นศูนย์) ในขณะที่น้ำสามารถไหลซึมในดินในแนวดิ่งได้ด้วย อิทธิพลของแรงดึงดูดของโลกซึ่งเรียกว่า การซึมในดิน (percolation) (เอกสิทธิ์, 2551)

ในการคำนวณการซึมผ่านผิวดิน อาจทำได้โดยวิธีวิเคราะห์โดยตรง (analytical method) และวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) แนวทางแรกมีหลายสมการที่มีการใช้งาน อาทิ สมการของเลวิส (Lewis) สมการของฮอร์ตตัน (Horton) สมการของฟิลิป (Philip) และสมการของกรีนและแอมป์ท (Green and Ampt) (ในภาพที่ 8) ส่วนวิธีเชิงตัวเลข ได้แก่ สมการของ Richards วิธีนี้ใช้สำหรับคำนวณการไหลของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated soil)

สมการ	อัตราการซึมผ่านผิวดิน Infiltration rate $f(t)$	ปริมาณการซึมผ่านผิวดิน Cumulative infiltration $F(t)$
Lewis (1926)	$f(t) = a\gamma t^{a-1}$	$F(t) = \gamma t^a$
Horton (1939)	$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt}$	$F(t) = f_c t + \frac{1}{k}(f_o - f_c)(1 - e^{-kt})$
Philip (1957)	$f(t) = \frac{1}{2} S t^{-1/2} + A$	$F(t) = S t^{1/2} + A t$
Green&Ampt (1911)	$f(t) = K \left(\frac{(\psi \Delta \theta + F(t))}{F(t)} \right)$	$F(t) = K t + \psi \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi \Delta \theta} \right)$

ภาพที่ 8 สมการการไหลซึมของน้ำผ่านดิน

ที่มา: เอกสิทธิ์ (2547)



ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน้าตัดดินขณะน้ำซึมผ่านผิวดิน

ที่มา: Chow *et al.* (1988)

ในภาพที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน้าตัดดินขณะน้ำซึมผ่านผิวดิน โดยแบ่งโซนความชื้นออกเป็นสามส่วน ได้แก่ (1) ส่วนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturation zone) เริ่มจากส่วนที่อยู่ใกล้กับผิวดินและจะมีความลึกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป (2) ส่วนที่น้ำแพร่ผ่าน (transmission zone) เป็นส่วนที่น้ำไหลผ่านชั้นดินขณะที่ดินยังไม่อิ่มตัวโดยปริมาณความชื้นตลอดหน้าตัดใกล้เคียงกัน (3) ส่วนที่กำลังเปียก (wetting zone) เป็นส่วนที่ความชื้นกำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในชั้นดินที่ลึกลงไปนั้นในช่วงเริ่มต้นยังมีความชื้นน้อย

ในส่วนของหน้าตัดที่กำลังเปียก (wetting front) เป็นหน้าตัดที่เริ่มเปียกน้ำและกำลังมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งบริเวณนี้ ดินจะมีความชื้นแตกต่างกันมากจนสามารถแยกแยะระหว่างดินเปียกกับดินแห้งได้อย่างชัดเจน

1.2 การจำลองกระบวนการไหลของน้ำในพื้นที่นาชลประทาน

การไหลของน้ำอธิบายโดยสมการควบคุมการไหล (governing equation) ซึ่งประกอบด้วยสมการหลัก ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) และสมการสมมูลของแรง (conservation of momentum) ลักษณะการไหลของน้ำในนาข้าว อาจแบ่งได้สองลักษณะคือ การไหลในทางน้ำเปิด และการไหลบนผิวดิน

1) การไหลในทางน้ำเปิด

การไหลในทางน้ำเปิด (open channel flow) อธิบายโดยสมการเซนต์เวเนนต์ (Saint Venant equation) ซึ่งเป็นสมการจำลองการไหลในทางน้ำเปิด โดยมีสมมติฐานของสมการคือ (1) การไหลแบบหนึ่งมิติ ความเร็วและความลึกเปลี่ยนแปลงตามแนวการไหลของน้ำ (2) การไหลเป็นแบบ gradually varied flow ซึ่งมีลักษณะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลง (3) แนวการไหลของน้ำค่อนข้างตรง (4) ความลาดชันท้องน้ำค่อนข้างน้อย (5) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับการไหลแบบ steady uniform turbulent flow สามารถประยุกต์ได้ (6) ของไหลมีคุณสมบัติไม่บีบอัดตัว (incompressible) (Chow *et al.*, 1988; นุชนารถ, 2545)

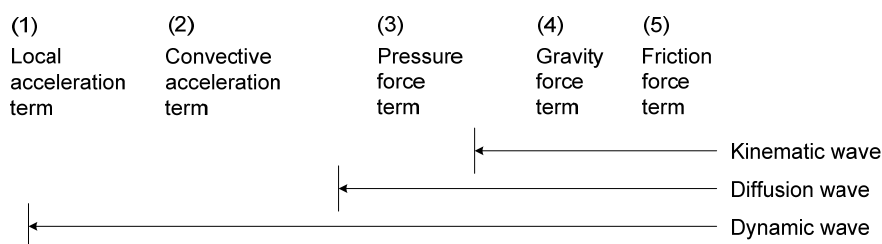
สมการเซนต์เวเนนต์ มีที่มาจากสมการการไหลต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการโมเมนตัม (momentum equation) โดยการไหลแบบต่อเนื่องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรควบคุม (control volume) ในระหว่างช่วงใดช่วงหนึ่งของลำน้ำ โดยปริมาตรเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล ความเร็ว และความลึกน้ำเป็นฟังก์ชันกับระยะทางและเวลา (Chaudhry, 1993) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการโดยไม่พิจารณาการไหลของน้ำเข้าออกทางด้านข้าง ได้ดังนี้

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

โดยที่	Q	คือ อัตราการไหลของน้ำ
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดการไหลของน้ำ
	x	คือ ระยะทางการไหลตามแนวแกน x
	t	คือ เวลา

ส่วนสมการ โมเมนตัม มีที่มาจากสมการการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's law) ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเท่ากับแรงที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม สมการ โมเมนตัม ในรูปแบบการเคลื่อนที่หนึ่งมิติเขียนได้ดังนี้

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad (4)$$



โดยที่ g คือแรงโน้มถ่วงของโลก, S_o และ S_f เป็นความลาดชันท้องน้ำและความลาดชันพลังงาน

สมการ โมเมนตัมข้างต้น ประกอบด้วย 5 เทอมหลัก ได้แก่ (1) local acceleration term เป็นเทอมที่อธิบายการโมเมนตัมอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเวลา (2) convective acceleration term เป็นเทอมอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวการไหล (3) pressure force term เป็นการเปลี่ยนแปลงความลึกน้ำตามแนวการไหล (4) gravity force term เป็นความลาดชันท้องน้ำ (5) friction force term เป็นความลาดชันของความเสียดทาน โดยที่เทอม (1) และ (2) เป็นตัวแทนของแรงเฉื่อยในการไหล (inertia forces)

อย่างไรก็ตาม การนำสมการข้างต้นไปใช้งานโดยตรงอาจทำได้ไม่ง่ายนัก ฉะนั้น การลดรูปสมการจึงเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งาน (Singh and Bhallamudi, 1997; Bradford and Katopodes, 2001) โดยอาจลดรูปสมการเป็นแบบ kinematic wave, diffusion wave หรือ dynamic wave สมการแบบ kinematic wave พิจารณาเฉพาะเทอม (4) และ (5) สมการนี้สามารถใช้คำนวณการไหลในพื้นที่ที่มีความลาดชันและไม่มีอิทธิพลของน้ำเท่อ (Singh, 1996; Tsai and Yang, 2005) ส่วนสมการ diffusion wave พิจารณาเทอม (3) (4) และ (5) ซึ่งได้พิจารณาอิทธิพลจากแรงดันน้ำทำให้สามารถใช้ได้สำหรับการไหลในพื้นที่ราบหรือมีอิทธิพลจากน้ำเท่อ (Feng and Molz, 1997; Jain *et al.*, 2004; Jain and Singh, 2005) ส่วนการไหลแบบ dynamic wave พิจารณาทุกเทอมการไหล

2) การไหลของน้ำผิวดิน

การไหลของน้ำผิวดิน (overland flow หรือ surface flow) เป็นการไหลของน้ำท่าผิวดินซึ่งเกิดจากน้ำฝนที่ตกลงมาเหนือพื้นที่รับน้ำฝนแล้วไหลบนผิวดินไปลงลำน้ำ โดยสมการที่ใช้อธิบายการไหลของน้ำผิวดินพัฒนามาจากสมการของนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stoke's equation) ในกรณีของไหลไม่บีบอัดตัว (incompressible) โดยการอินทิเกรตสมการการไหลต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมแบบสองมิติของสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Chaudhry, 1993) ผลการอินทิเกรตเขียนเป็นสมการแบบต่อเนื่องได้ใหม่ตามแกน x และ y ดังนี้

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

โดยที่ h คือ ความลึกน้ำ (L)

u และ v คือ ความเร็วในทิศทาง x และ y ($L T^{-1}$)

S_f คือ ความลาดชันพลังงาน ($L L^{-1}$)

ส่วนสมการโมเมนตัมตามแกน x และ y เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} - gh(S_{ox} - S_{fx}) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} - gh(S_{oy} - S_{fy}) = 0 \quad (7)$$

โดยที่ S_{ox} และ S_{oy} คือ ความลาดชันพื้นผิว ($L L^{-1}$)

S_{fx} และ S_{fy} คือ ความลาดชันพลังงาน ($L L^{-1}$)

3) การไหลของน้ำในดิน

การไหลของน้ำในดินอธิบายโดยสมการของริชาร์ด (Richards's equation) ซึ่งเป็นสมการคำนวณการไหลของน้ำในดินแบบ 1 มิติในแนวดิ่ง สมการนี้มีพื้นฐานจากหลักการอนุรักษ์มวลและสมการของ Darcy (Jury *et al.*, 1991) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (8)$$

โดย	θ	เป็นปริมาณน้ำในดิน ($L^3 L^{-3}$)
	h	เป็นแรงดึงความชื้นในดิน (L)
	z	เป็นระดับในแนวดิ่ง (L) (มีค่าเป็นบวกในทิศขึ้น)
	K	เป็นค่าการนำน้ำของดิน ($L T^{-1}$)
	S	เป็นอัตราการดูดซึมน้ำของรากพืชออกจากดิน ($L^3 L^{-3} T^{-1}$)

สมการของริชาร์ดเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่อยู่ในรูปแบบเชิงเส้นตรง ขึ้นอยู่กับค่าการนำน้ำของดิน (hydraulic conductivity หรือ K) ปริมาณความชื้น (water content หรือ θ) และแรงดึงความชื้นในดิน (metric potential หรือ h) ฉะนั้นการแก้ปัญหาก็ทำได้ค่อนข้างลำบาก ในการนี้ van Genuchten (1980) เสนอสมการหาปริมาณความชื้นจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงความชื้นในดินและปริมาณความชื้น ซึ่งเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า water retention curve หรือ WRC หรือ $\theta(h)$ หรือ เส้นอัตลักษณ์ของน้ำในดิน (soil water characteristic) (สุนทรี, 2535) โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\theta(h) = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (9)$$

โดยที่	θ_{res}	เป็นปริมาณน้ำที่ยังคงเหลือในดินเมื่อแห้ง (residual water content) ($L^3 L^{-3}$)
	θ_{sat}	คือปริมาณน้ำขณะดินอิ่มตัว (saturation water content) ($L^3 L^{-3}$)
	α (L^{-1}), n และ m	ไม่มีหน่วย โดย $m = 1 - 1/n$

ค่าการนำน้ำของดินตามความชื้น (hydraulic conductivity curve) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง K และ θ ตามสมการ Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$K(\theta) = K_{sat} S_e^\lambda \left[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad (10)$$

โดย K_{sat} เป็นค่าการนำน้ำของดินอิ่มตัว ($L T^{-1}$)

λ ใช้เท่ากับ 0.50 (Mualem, 1976)

S_e เป็นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน โดย $S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}}$

ความสัมพันธ์ระหว่าง K และ θ อาจหาได้โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะโค้ง WRC แต่ค่าการนำน้ำทำได้ค่อนข้างลำบาก (Hopmans and Schoups, 2005) ฉะนั้นแนวทางการใช้การ “pedotransfer function” ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่สร้างขึ้นมาเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ดิน (Warrick, 2003) ฟังก์ชันนี้สร้างโดยใช้ข้อมูลคุณสมบัติดินที่ตรวจวัดได้โดยง่าย อาทิ เนื้อดิน สัดส่วนอนุภาคดิน ความพรุน หรือปริมาณอินทรีย์วัตถุ McBratney *et al.* (2002) ได้รวบรวมประวัติการพัฒนาและข้อมูลเกี่ยวกับฟังก์ชันไว้ระดับหนึ่ง และปัจจุบันมีแบบจำลองที่สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของดิน อาทิ ROSETTA (Schaap *et al.*, 2001) และ SOILPAR2.0 (Acutis and Donatelli, 2003)

ในส่วนของการจำลองกระบวนการทางชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืช เอกสิทธิ์และคณะ (2550ข) ได้จำแนกกลุ่มของผู้พัฒนาแบบจำลองการเจริญเติบโตพืชตามแนวทางของ Jones *et al.* (2001) เป็นสามกลุ่ม ประกอบด้วย (1) กลุ่มผู้พัฒนาแบบจำลองตามแนวทางของเดอวิท (School of de Wit) (Bouman *et al.*, 1996) จากประเทศเนเธอร์แลนด์ (2) กลุ่มผู้พัฒนาแบบจำลอง DSSAT จากประเทศสหรัฐอเมริกา และ (3) กลุ่มผู้พัฒนาแบบจำลองจากประเทศออสเตรเลีย

ตัวอย่างของแบบจำลองในกลุ่มแรกได้แก่ BACROS (de WIT *et al.*, 1978; Penning de Vries, 1982), MACROS (Penning de Vries *et al.*, 1989), WOFOST, SUCROS (van Laar *et al.*, 1997), ORYZA2000 (Bouman *et al.*, 2001), SWATRE (Feddes *et al.*, 1978), SWAP (van Dam *et al.*, 1997) และ APSIM (Keating *et al.*, 2003) ส่วนกลุ่มสองเป็นชุดของแบบจำลอง DSSAT (Jones *et al.*, 2003) ประกอบด้วย CERES, CROPGRO (Boote *et al.*, 1998) โดยชุดแบบจำลอง DSSAT มีการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทยค่อนข้างแพร่หลาย ส่วนกลุ่มสาม ได้แก่ แบบจำลอง APSIM (Keating *et al.*, 2003) และชุดของแบบจำลอง CLASS (Tuteja *et al.*, 2004) นอกจากนี้ ยังมีแบบจำลองกลุ่มอื่น อาทิ แบบจำลอง EPIC, CropSyst และ CROPWAT (Smith, 1992) ซึ่งเป็นแบบจำลองสำหรับคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชที่มีการประยุกต์ใช้ค่อนข้างมาก

1.3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย วิธีเชิงตัวเลขอาจแบ่งได้สามวิธี อาทิ ระเบียบวิธีผลต่างอันดับ (Finite Difference Method หรือ FDM) ระเบียบวิธีสมาชิกจำกัด (Finite Element Method หรือ FEM) และระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method หรือ FVM) แต่ละวิธีมีหลักการดังนี้

ระเบียบวิธี Finite Difference Method เป็นระเบียบวิธีหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial difference equation หรือ PDE) โดยการเปลี่ยนสมการ PDE ให้อยู่ในรูปแบบของสมการแบบ algebraic finite-difference method ซึ่งอาจเป็นเชิงเส้นตรงหรือไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Chow *et al.*, 1988) วิธี FDM ใช้การประมาณค่าโดยการขยายอนุกรมของเทเลอร์ (Taylor series expansion) และพิจารณาการประมาณค่าของอนุกรมเพียงอันดับสอง วิธีนี้มีระเบียบวิธีไม่ซับซ้อนเหมาะสมกับกริดรูปสี่เหลี่ยมสม่ำเสมอ (Feng and Molz, 1997; Bradbrook *et al.*, 2004) แสดงเป็นแนวทางการประมาณค่าในภาพที่ 10

ระเบียบวิธี Finite Element เป็นการแบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย (element) ซึ่งแต่ละส่วนย่อยเชื่อมกันด้วยจุดต่อ (node) แล้วจึงนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการเพื่อหาคำตอบในแต่ละชิ้นส่วนย่อยบนโดเมน วิธีนี้มีขั้นตอนการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนกว่าวิธีแรก แต่สามารถแบ่งการคำนวณเป็นรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ (Hirsch, 1988; Vieux, 2001) แสดงเป็นแนวทางการประมาณค่าในภาพที่ 11

ระเบียบวิธี Finite Volume เป็นระเบียบวิธีการประมาณค่าคำตอบสมการเชิงตัวเลข คล้ายกับวิธี FDM และวิธี FEM โดยวิธี FVM มีความยืดหยุ่นในการกำหนดขอบเขตของกริด เหมือนกับวิธี FEM แต่การคำนวณไม่ยุ่งยากเท่าวิธี FEM (Singh and Bhallamudi, 1997) และในกรณีการคำนวณหาคำตอบของสมการด้วยวิธี FVM แบบ 1 มิติ จะมีขั้นตอนวิธีการคล้ายกับวิธี FDM ซึ่งระเบียบวิธี FDM จะหาค่าที่แต่ละโหนด (node) ส่วนวิธี FVM พิจารณา flux เข้าออกในแต่ละด้านของการไหล วิธี Finite Volume เริ่มมีการประยุกต์ใช้ในการศึกษาการไหลในระดับลุ่มน้ำมากขึ้น (Bradford and Katopodes, 2001; Horritt *et al.*, 2006; Moroney and Turner, 2006) โดยแสดงเป็นแนวทางการประมาณค่าในภาพที่ 12

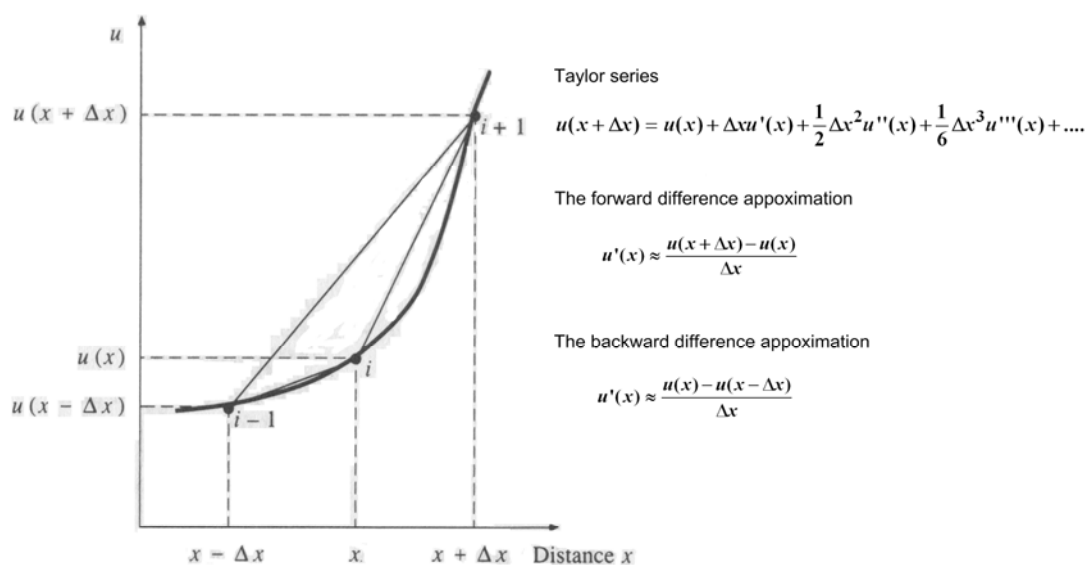
ระเบียบวิธีปริมาตรจำกัด (Finite Volume Method หรือ FVM) เป็นการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละด้านของกริดและพิจารณา flux เข้าออกในแต่ละด้านของการไหล โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Hirsch, 1988)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_s \vec{F} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (11)$$

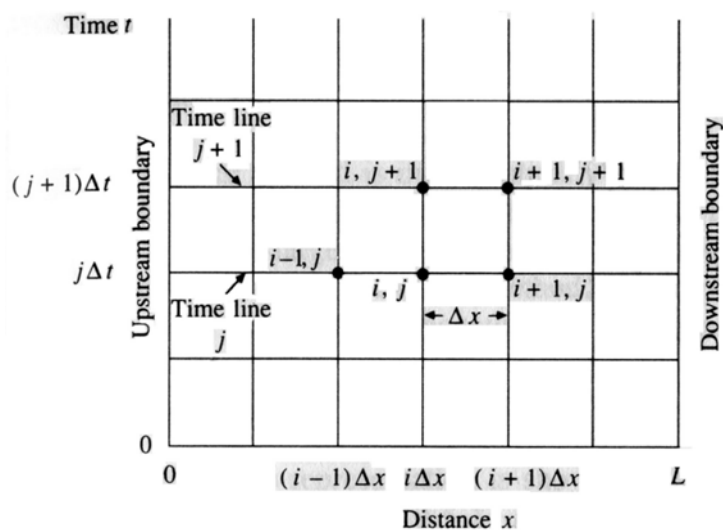
หรือเขียนเป็นสมการในรูปแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete form) ได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_i \Omega_i) + \sum_{ABCD} (\vec{F} \cdot \vec{S}) = 0 \quad (12)$$

โดยที่ U คือ ตัวแปรเชิงปริมาณที่เปลี่ยนแปลงต่อหน่วยปริมาตร
 Ω_i คือ ปริมาตรควบคุม (control volume) ที่ i ซึ่งเป็น flux เข้าออกทั้งสี่ด้าน ได้แก่ AB, BC, CD และ DA (ในภาพที่ 12)
 $\vec{F}$ คือ flux เข้าออก
 $\vec{S}$ คือ ผิวการไหล



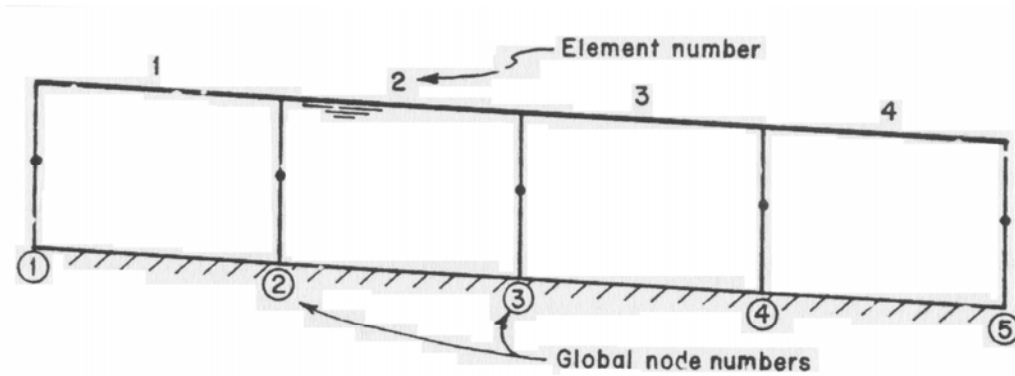
(a) finite difference approximation



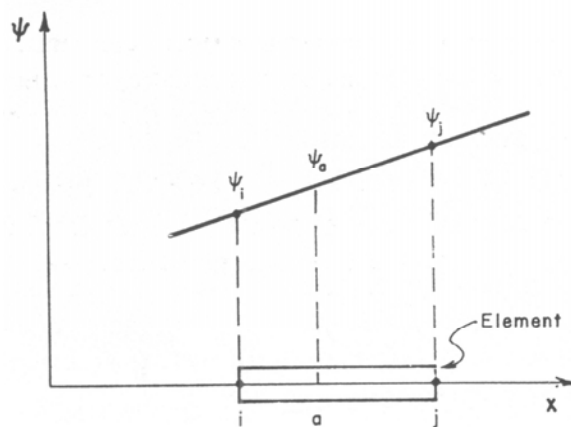
(b) finite difference grid

ภาพที่ 10 การประมาณค่าสมการของระเบียบวิธี Finite Difference

ที่มา: ดัดแปลงจาก Chow *et al.* (1988)



(a) finite element grid



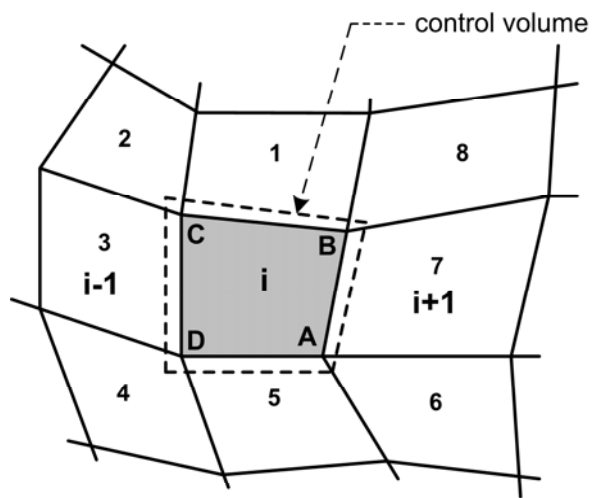
(b) 1D linear element

$$\begin{aligned}\psi_a &= \psi_i + \frac{x_a - x_i}{x_j - x_i} (\psi_j - \psi_i) \\ &= \frac{x_j - x_a}{x_j - x_i} \psi_i + \frac{x_a - x_i}{x_j - x_i} \psi_j \\ &= N_i \psi_i + N_j \psi_j\end{aligned}$$

N_i, N_j = shape functions

ภาพที่ 11 การประมาณค่าสมการของระเบียบวิธี Finite Element

ที่มา: ดัดแปลงจาก Chaudhry (1993)



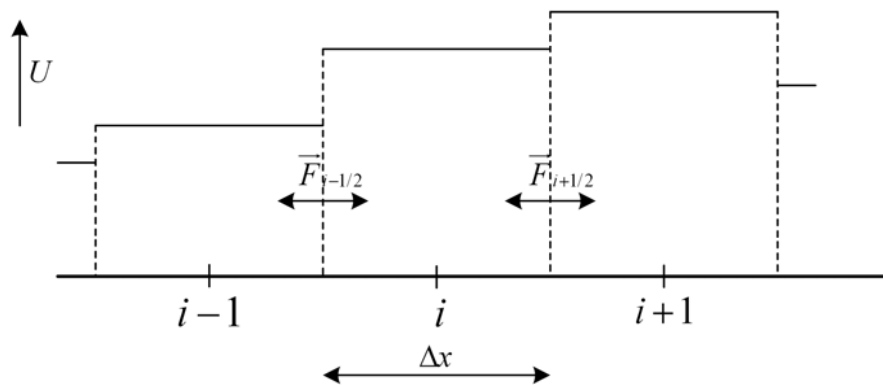
(a) Finite volume grid

Integral form

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_S \vec{F} \cdot d\vec{S} = 0$$

discrete form

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_i \Omega_i) + \sum_{sides} (\vec{F} \cdot \vec{S}) = 0$$



(b) flux at control volume

ภาพที่ 12 การประมาณค่าสมการของระเบียบวิธี Finite Volume

ที่มา: คัดแปลงจาก Hirsch (1988)

1.4 การจำลองระบบการควบคุมน้ำชลประทาน

การจำลองการควบคุมน้ำชลประทาน ซึ่งจากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพอสรุปได้ดังนี้ ในอดีต เอกสารที่เกี่ยวข้องกับระบบการควบคุมน้ำชลประทานชื่อ “System Water Automation” (Water Systems automation Term, 1973) ซึ่งเป็นเอกสารที่รวบรวมเนื้อหาเกี่ยวกับระบบการควบคุมน้ำก่อนข้างสมบูรณ์ โดยได้นำเสนอหลักการและวิธีการควบคุมระบบส่งน้ำชลประทาน อาทิ หลักการ แนวคิด และเทคนิคการควบคุมระบบส่งน้ำ

ต่อมาในหน่วยงานเดียวกัน ได้จัดทำเอกสารเกี่ยวกับระบบการควบคุมคลองส่งน้ำขึ้นใหม่อีกครั้งในปี ค.ศ. 1991 เอกสารนี้ชื่อว่า “canal system automation manual” (Buyalaki *et al.*, 1991) และได้จัดทำเป็นครั้งที่สองในห้าปีต่อมา (Buyalaki *et al.*, 1995) เอกสารทั้งสองฉบับนับว่าได้รวบรวมและสรุปเนื้อหาเกี่ยวกับระบบการควบคุมน้ำชลประทานค่อนข้างครบถ้วนและทันสมัยเมื่อเทียบกับครั้งแรกที่จัดทำ

เนื้อหาบางส่วนในฉบับแรกที่ถือว่าค่อนข้างเด่น คือ การอธิบายรายละเอียดและการแสดงข้อเปรียบเทียบเกี่ยวกับรูปแบบของวิธีควบคุมระบบส่งน้ำ ซึ่งมีสี่รูปแบบ ได้แก่ local manual control, local automatic control, supervisory control และ combined control รวมถึงอธิบายขั้นตอนวิธี (algorithm) สำหรับควบคุมระบบส่งน้ำ เช่น วิธี little-man algorithm, colvin algorithm, EL-ELO และวิธี P+PR เป็นต้น ส่วนฉบับที่สองมีเนื้อหาทันสมัยขึ้น โดยเฉพาะการอธิบายเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์การสื่อสารในงานควบคุมน้ำ อาทิ การใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ WS77 (Falvey, 1990) ในการควบคุมน้ำ การใช้แบบจำลอง unsteady model (USM) และ gate stroking model (GSM) ที่มีการวิเคราะห์การไหลแบบ unsteady state เป็นต้น ส่วนระบบการสื่อสารที่มีการใช้ควบคุมน้ำ เช่น fiber optic cable, UHF/VHF, microwave รวมถึงการใช้ข้อมูลดาวเทียม

งานวิจัยของ Malaterre *et al.* (1998) ได้จำแนกขั้นตอนวิธีในการควบคุมระบบส่งน้ำซึ่งบางส่วนของบทความได้สรุปขั้นตอนวิธีกว่า 20 รูปแบบ อาทิ ประเภทที่ใช้ตัวแปรควบคุมไม่มากนัก เช่น วิธี heuristic, predictive control (Gomez *et al.*, 2002), fuzzy control (Bouillot, 1994), neural network (Toudefit *et al.*, 1994) ส่วนวิธีที่ใช้ตัวแปรในการควบคุมค่อนข้างมาก เช่น วิธี feed forward control (Liu *et al.*, 1992) และ feedback control (Liu *et al.*, 1994) ส่วนงานของ Roger and

Goussard (1998) มีเนื้อหาคล้ายกัน แต่เน้นการนำเสนอการประยุกต์ใช้งานมากกว่า ในส่วนงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง อาทิ การศึกษาแนวทางการทดสอบขั้นตอนวิธีสำหรับควบคุมน้ำ (Clemmens *et al.*, 1998) เทคนิคการสร้างสมการคณิตศาสตร์ในการควบคุมน้ำ (Ruiz-Carmoma *et al.*, 1998) การพัฒนาและประเมินขั้นตอนวิธีควบคุมน้ำแบบ CLIS (Liu *et al.*, 1998) การศึกษาอิทธิพลลักษณะทางเรขาคณิตของคลองส่งน้ำต่อความสามารถในการควบคุมน้ำ (Strelkoff *et al.*, 1998)

1.5 แบบจำลอง

แบบจำลอง (models) เป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับศึกษากระบวนการทางอุทกวิทยาในพื้นที่ลุ่มน้ำ แบบจำลองที่ใช้ศึกษาอาจเป็นชนิด lumped หรือ distributed โดยแบบจำลองชนิด lumped มีพารามิเตอร์ของแบบจำลองสม่ำเสมอทั้งลุ่มน้ำ ซึ่งต่างจากแบบจำลองชนิด distributed ที่ได้พิจารณาความแตกต่างทางกายภาพของพื้นที่ (Beven, 2005)

ในอดีตที่ผ่านมาแบบจำลอง distributed ได้รับความนิยมน้อย เนื่องจากการประมวลผลต้องการระบบคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงและใช้ข้อมูลมาก และ ในปัจจุบันแบบจำลอง distributed ถูกนำไปศึกษาลุ่มน้ำมากขึ้น (Schultz and Engman, 2000; Fortin *et al.*, 2001a, 2001b; Singh and Woolhiser, 2002) อันเป็นผลมาจากเทคโนโลยีสารสนเทศที่พัฒนาอย่างรวดเร็ว และ ข้อมูลปริภูมิจากระบบภูมิสารสนเทศและการสำรวจระยะไกลสามารถจัดหาได้ง่ายขึ้น (Schultz and Engman, 2000; Singh and Fiorentino, 1996) แบบจำลองชนิด distributed ที่ถูกนำมาใช้ศึกษาในระดับลุ่มน้ำ เช่น CASC2D (Downer and Ogden, 2002), GSSHA (Downer and Ogden, 2004), DHM (Hromadka and Yen, 1987), r.water.fea (Vieux, 2001), TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979) และ SHE (Abbott *et al.*, 1986a) เป็นต้น

แหล่งรวบรวมข้อมูลแบบจำลองในงานด้านชลประทาน อาทิ ฐานข้อมูลของ irrigation and hydrology software หรือ IRRISOFT (<http://www.irisoft.org>) ซึ่งเป็นฐานข้อมูลออนไลน์ที่รวบรวมแบบจำลองด้านการชลประทาน การระบายน้ำ และอุทกวิทยาไว้มากที่สุดแห่งหนึ่ง โดยได้รวบรวมข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลอง เช่น รายชื่อ วัตถุประสงค์ ชนิด ผู้พัฒนา และแหล่งดาวน์โหลดข้อมูล เป็นต้น Jurriens and Lenselink (1996) ได้นำเสนอรายงานเกี่ยวกับฐานข้อมูลดังกล่าว และแสดงรายชื่อของแบบจำลองตามกลุ่มการประยุกต์ใช้งานกว่า 180 ชนิดและภายหลังปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา ฐานข้อมูลได้ปรับปรุงเพิ่มเติมแบบจำลองกว่า 100 ชนิด

แหล่งข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองอีกชิ้นหนึ่งของ Wurbs (1995) ชื่อ water management models: a guide to software ซึ่งเป็นผลงานที่รวบรวมแบบจำลองโดยจำแนกตามระบบทรัพยากรน้ำหลัก ๆ อาทิ แบบจำลองความต้องการน้ำ แบบจำลองระบบส่งน้ำ แบบจำลองระบบน้ำใต้ดิน แบบจำลองระบบน้ำผิวดิน แบบจำลองชลศาสตร์ของลำน้ำ แบบจำลองคุณภาพน้ำ และแบบจำลองการจัดการอ่างเก็บน้ำ งานของ Wurbs ชิ้นนี้ยังได้รวบรวมรายชื่อหน่วยงานที่พัฒนาและแจกจ่ายแบบจำลอง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นการรวบรวมแบบจำลองที่ทำการพัฒนาในช่วงปี 80 ถึง 90 ได้สมบูรณ์ที่สุดชิ้นหนึ่ง (เอกสิทธิ์และคณะ, 2550ก)

ส่วนบทความที่รวบรวมรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองระดับลุ่มน้ำเป็นของ Singh and Woolhiser (2002) บทความนี้กล่าวถึงประวัติของแบบจำลองระดับลุ่มน้ำในอดีต การนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาพัฒนาองค์ประกอบของแบบจำลอง รวมถึงแบบจำลองลุ่มน้ำในปัจจุบัน และเทคโนโลยีของข้อมูลข่าวสาร นอกจากนี้ บทความได้แสดงรายชื่อ และผู้พัฒนาแบบจำลองไว้ถึง 83 ชนิด และที่สำคัญ บทความยังให้มุมมองอนาคตเกี่ยวกับแบบจำลอง โดยกล่าวว่า แบบจำลองจะกลายเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการจัดการน้ำ แบบจำลองจะพัฒนาตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล ภาพถ่ายดาวเทียม และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่รวบรวมรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลอง อาทิ งานของ Ranatunga *et. al.*, (2008) ได้รวบรวมแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับระบบดินและน้ำราว 21 ชนิด ที่ใช้ในประเทศออสเตรเลีย

2. แนวทางเชิงอ็อบเจกต์

แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์ (object orientation) มีที่มาจากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาเชิงอ็อบเจกต์ (object-oriented programming หรือ OOP) โดยภาษา Simula นับได้ว่าเป็นภาษาแรกที่ใช้แนวคิดนี้ในการเขียนโปรแกรมสำหรับแบบจำลองสถานการณ์แบบแยกหน่วย (discrete-event simulation) จากนั้นได้มีพัฒนาการต่อมาเป็นการวิเคราะห์และการออกแบบเชิงอ็อบเจกต์ (object-oriented analysis and design) (Liu and Stewart, 2004; จตุรพิธ และพิชานันท์, 2548)

องค์ประกอบมูลฐานของแนวคิดเชิงอ็อบเจกต์ คือ “อ็อบเจกต์” นั่นเอง โดยในที่นี้จะหมายถึง สิ่งที่ปรากฏอยู่ทั้งในโลกของความเป็นจริง (เป็นวัตถุจับต้องได้) และที่เป็นนามธรรม โดยอ็อบเจกต์ประกอบด้วย ข้อมูลคุณลักษณะของตัวเอง (attribute) และ รายละเอียดประกอบการทำงานกับข้อมูล (method) ส่วนคำว่า “คลาส” (class) หมายถึง แม่แบบสำหรับสร้างอ็อบเจกต์ที่มีคุณลักษณะและการทำงานที่เหมือนกัน (Papajorgji and Pardalos, 2006) อ็อบเจกต์ถูกสร้างจากคลาส (หรือเป็น instance ของคลาส) ผ่านกลไกที่เรียกว่า instantiation การสร้างคลาสหนึ่ง ๆ ขึ้นมากระทำโดยการกำหนดสาระสำคัญของสิ่งที่กำลังพิจารณา โดยเน้นรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับปัญหาหรือที่เรียกว่า abstraction

นอกจากนี้ การประยุกต์แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์ยังต้องการเครื่องมือที่สามารถรองรับคุณสมบัติของอ็อบเจกต์อีก 3 ประการ คือ encapsulation, inheritance และ polymorphism

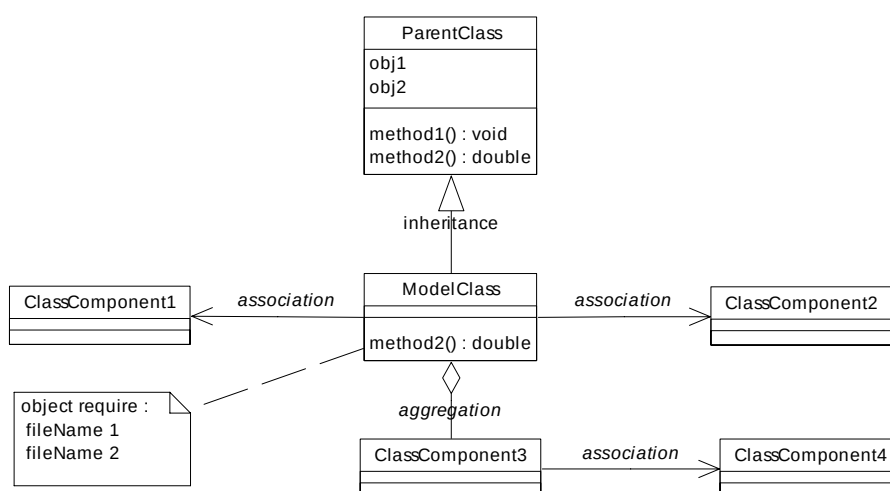
(1) การห่อหุ้มปกปิดโครงสร้างภายใน (encapsulation) เป็นเทคนิคการออกแบบให้ข้อมูลและการทำงานกับข้อมูลรวมอยู่ในอ็อบเจกต์เดียวกัน และปกปิดรายละเอียดโดยจำกัดให้เข้าถึงได้เฉพาะส่วนที่กำหนดไว้

(2) กลไกการสืบทอด (inheritance) เป็นความสามารถในการสืบทอดรายละเอียดประกอบของคลาสหนึ่งไปยังคลาสอื่น ๆ ได้

(3) ภาวะพหุสัณฐาน (polymorphism) เป็นความสามารถในการสร้างคลาสจากฐานเดียวกันให้มีบทบาทต่างกันเพื่อการตอบสนองอย่างเหมาะสมกับข้อมูล

การนำแนวทางเชิงอ็อบเจกต์ไปใช้งาน ส่วนใหญ่ใช้ภาษายูเอ็มแอล (Unified Modeling Language หรือ UML) เป็นเครื่องมืออธิบายแบบจำลอง โดย UML เป็นภาษาในรูปแบบกราฟิกที่แสดงสัญลักษณ์ รายละเอียด และจัดการกับเอกสารต่าง ๆ ในระบบการทำงานจริง เพื่อให้การออกแบบซอฟต์แวร์ที่แทนระบบการทำงานจริงนั้นทำได้โดยง่าย และปรับปรุงวิธีการทำงานที่มีอยู่เดิมให้ดียิ่งขึ้น UML มักใช้อธิบายและนำเสนอแนวความคิดของการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ ก่อนนำไปเขียนโปรแกรม ซึ่งบางทีอาจเรียกว่า เป็นภาษาสำหรับการสร้างแบบจำลองพิมพ์เขียว (blueprint) ให้แก่ระบบงาน ในภาพที่ 13 แสดงตัวอย่างสัญลักษณ์ของภาษา UML โดยกรอบสี่เหลี่ยมแทนคลาส ในกรอบด้านบนสุดแทนชื่อคลาส ถัดลงมาเป็นคุณสมบัติของคลาส ส่วนกรอบด้านล่างแทนเมธอดของคลาส เส้นเชื่อมโยงแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างคลาส การเรียกชื่อคลาส อ็อบเจกต์ และเมธอด มีความหมายดังนี้

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
“ClassName”	แทนการอ้างถึงคลาส เขียนคำติดกัน อักษรตัวแรกของคำเป็นตัวพิมพ์ใหญ่ คำถัดมาขึ้นต้นด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่
“objectName”	แทนการอ้างถึงอ็อบเจกต์ เขียนคำติดกัน อักษรตัวแรกของคำเป็นตัวพิมพ์เล็ก คำถัดมาขึ้นต้นด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่
“methodName()”	แทนการอ้างถึงเมธอด เขียนคำติดกันด้วยตัวอักษรเอียง โดยตัวแรกของคำเป็นตัวพิมพ์เล็ก คำถัดมาขึ้นต้นด้วยอักษรพิมพ์ใหญ่ มีวงเล็บท้ายคำ

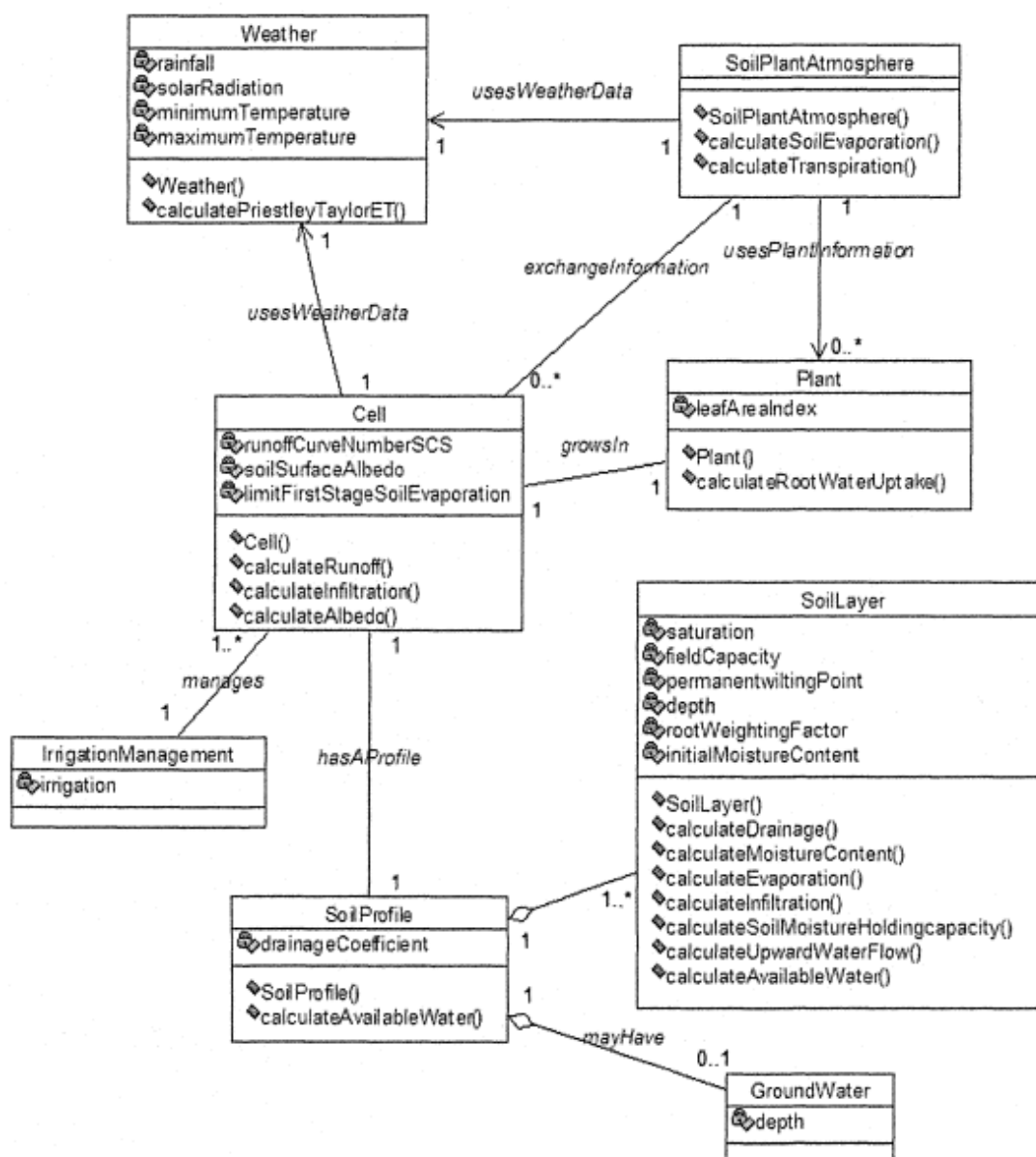


ภาพที่ 13 ฟังก์ชันไดอะแกรมแบบยูเอ็มแอล

สำหรับงานวิจัยที่นำแนวทางเชิงอ็อบเจกต์ไปประยุกต์สำหรับการสร้างแบบจำลองที่เกี่ยวข้องด้านชลประทาน อาทิ งานของ Papajorgji and Pardalos (2006) ได้พัฒนาแบบจำลองสมดุลของน้ำในดินโดยวิธีเชิงอ็อบเจกต์ (แสดงโครงสร้างแบบจำลองอ็อบเจกต์ในภาพที่ 14) ซึ่งแบบจำลองได้ออกแบบโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง พืช (plant) บรรยากาศ (weather) และดิน (soil) โดยแทนพืชด้วยคลาส “Plant” แทนบรรยากาศด้วยคลาส “Weather” และแทนความสัมพันธ์ระหว่างดิน-พืช-บรรยากาศด้วยคลาส “SoilPlantAtmosphere” โดยดินมีสามคลาสเกี่ยวข้องกัน คือ คลาส “SoilProfile” คลาส “SoilLayer” และคลาส “Cell” ซึ่งคลาส “SoilProfile” ทำหน้าที่แทนหน้าตัด คลาส “SoilLayer” แทนชั้นดินในแต่ละหน้าตัด ส่วนคลาส “Cell” ทำหน้าที่เป็นพื้นผิวดิน ในส่วนคลาส “GroundWater” ทำหน้าที่เก็บข้อมูลเกี่ยวกับน้ำใต้ดิน และสำหรับกระบวนการคำนวณสมดุลของน้ำคลาสที่ทำหน้าที่หลัก คือ คลาส “IrrigationManagement”

การทำงานของแบบจำลองเกิดจากการใช้ลูกศรเชื่อมโยงระหว่างคลาส เช่น คลาส “SoilPlantAtmosphere” มีการใช้ข้อมูลเกี่ยวกับบรรยากาศจากคลาส “Weather” ซึ่งในที่นี้หมายถึงอ็อบเจกต์จากคลาส “SoilPlantAtmosphere” สามารถเข้าหาข้อมูลหรือดำเนินการใด ๆ จากคลาส “Weather” ในคลาส “Weather” มีเมธอด “*calculatePriestleyTaylorET()*” ทำหน้าที่คำนวณการคายระเหย ซึ่งเมธอดนี้เกี่ยวข้องกับหลายเมธอด เนื่องจากการคำนวณต้องใช้ข้อมูลภูมิอากาศ ดิน และพืช ดังนั้น แบบจำลองจึงใช้ลูกศรเชื่อมโยงคลาส “SoilPlantAtmosphere” กับคลาส “Weather” คลาส “Cell” และคลาส “Plant” เข้าด้วยกัน

สำหรับงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง อาทิ การใช้แนวทางอ็อบเจกต์พัฒนาแบบจำลองคุณภาพน้ำ (Martinez, 2006) การพัฒนาแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชผ่านทางอินเทอร์เน็ตเพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้ (Pan *et al.*, 2000) การใช้แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ร่วมกับการจำลองแบบเซลล์สำหรับงานวางแผนการจัดการทรัพยากรป่าไม้ (Mathey *et al.*, 2008)



ภาพที่ 14 คลาสไดอะแกรมสำหรับแบบจำลองสมดุลของน้ำ

ที่มา: Papajorgji and Pardalos (2006)

3. อุตกสารสนเทศกับงานด้านชลประทาน

อุตกสารสนเทศ (hydoinformatic) เป็นศาสตร์ด้านหนึ่งเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ประโยชน์ของเทคโนโลยีหลายด้าน อาทิ เทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ เทคโนโลยีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และการจำลองเชิงสังคม เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับทรัพยากรน้ำ (Abbott *et al.*, 2005) อุตกสารสนเทศถูกนำเสนอครั้งแรก โดย Michael. M Abbott ในปี ค.ศ. 1991 ซึ่งเป็นนักวิจัยที่มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับงานด้านแหล่งน้ำค่อนข้างมาก โดยเฉพาะงานด้านแบบจำลอง Abbott (1999) ได้กล่าวถึงหลักการพื้นฐานและทบทวนงานวิจัยในแต่ละสาขาที่เกี่ยวข้องกับอุตกสารสนเทศ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ (Nilsson, 1998), computational intelligence (Engelbrecht, 2002; Engelbrecht, 2005) และ communication (Ferber, 1999; Abbott *et al.*, 2005) เป็นต้น

ปัญญาประดิษฐ์ (Intelligence Artificial หรือ AI) เป็นศาสตร์คอมพิวเตอร์ที่นำมาประยุกต์ทางด้านทรัพยากรน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นับแต่ช่วงปี 2000 เป็นต้นมา เทคนิคที่ใช้งานโดยทั่วไปอาจแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม (Zhang and Zhang, 2004) คือ

(1) เทคนิคการประมวลผลแบบดั้งเดิม (traditional hard computing technique) ซึ่งกำหนดข้อมูลและกระบวนการประมวลผลที่เป็นขั้นตอนชัดเจน อาทิ ระบบผู้เชี่ยวชาญ (expert systems)

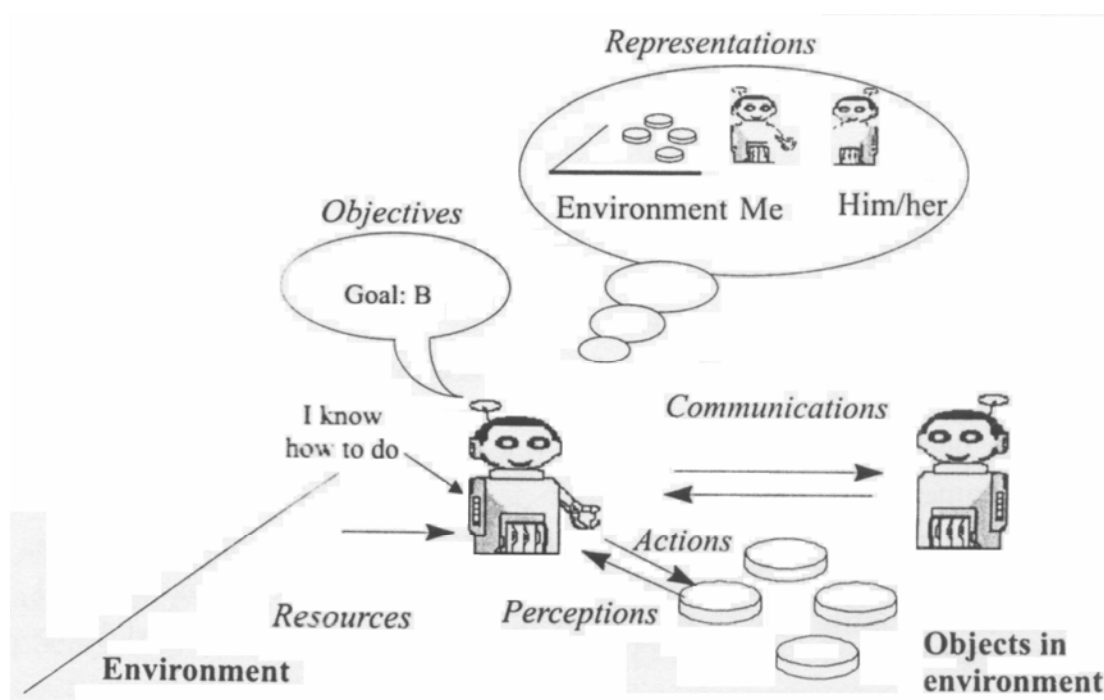
(2) เทคนิคการประมวลผลแบบยืดหยุ่น (soft computing technique) เทคนิคในกลุ่มนี้ ได้แก่ ตรรกศาสตร์วิภาษหรือฟัซซีลอจิก (fuzzy logic), โครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neural Networks หรือ ANN), กระบวนการวิวัฒนาการพันธุกรรม (Genetic Algorithms หรือ GA) และเทคนิคเอเจนต์ (Agent-Based Modeling หรือ ABM)

การนำเสนอในหัวข้อนี้ ได้กล่าวรายละเอียดในสาขาที่นำมาประยุกต์ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เทคนิคการจำลองแบบเอเจนต์ และเทคนิคของฟัซซีลอจิก โดยทั้งสองสาขามีหลักการและการประยุกต์สำหรับงานวิจัยดังนี้

3.1 การจำลองแบบเอเจนต์

การจำลองแบบเอเจนต์ ซึ่ง “Agent” หมายถึง “An agent is a computer system that is situated in some environment, and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its design objectives.” (Wooldridge, 2002) หรืออาจหมายถึง “An agent is a physical or virtual entity” (Ferber, 1999) ในพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน นิยามคำว่า agent (เอเจนต์) คือ ตัวกระทำ, ผู้กระทำ, ตัวแทน หรือ โปรแกรมเอเจนต์

จากนิยามข้างต้น อาจกล่าวได้ว่า เอเจนต์ หรือตัวกระทำ หมายถึง ระบบคอมพิวเตอร์ หรือสิ่งต่าง ๆ ทางกายภาพที่สามารถรับรู้ ตอบสนอง และปฏิสัมพันธ์ต่อสิ่งแวดล้อม มีคุณสมบัติในการติดต่อสื่อสาร คิด ประมวลผล และตัดสินใจภายใต้ความพึงพอใจเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของตัวกระทำเอง ในภาพที่ 15 แสดงกระบวนการปฏิสัมพันธ์ของเอเจนต์กับสิ่งแวดล้อมภายนอก



ภาพที่ 15 กระบวนการปฏิสัมพันธ์ของเอเจนต์ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับเอเจนต์อื่น

ที่มา: Ferber (1999)

กระบวนการปฏิสัมพันธ์ของเอเจนต์ (ในภาพที่ 15) ซึ่งเอเจนต์หนึ่งอาจมีการปฏิสัมพันธ์ (interaction) หรือการติดต่อสื่อสาร (communication) เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกับเอเจนต์อื่น ซึ่งจะทำให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างเอเจนต์หลายลักษณะ เช่น การเจรจาต่อรอง (negotiation) การร่วมมือกัน (cooperation) การประสานงาน (coordination) และการแข่งขัน (competition) เป็นต้น การรวมกลุ่มกันของเอเจนต์เรียกว่า ระบบมัลติเอเจนต์ (multi-agent system) หรืออาจเรียกอีกชื่อว่า “Agent-Based Modeling หรือ ABM” โดย Bousquet and Le Page (2004) ได้กล่าวว่า ระบบมัลติเอเจนต์เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence หรือ AI) ซึ่งบางครั้งเรียกว่า “distributed artificial intelligence หรือ DAI” หรือปัญญาประดิษฐ์แบบกระจาย

การสร้างระบบมัลติเอเจนต์ โดยให้เอเจนต์เป็นบุคคลที่เป็นผู้ตัดสินใจหรือเป็นกลุ่มของคนที่มีพฤติกรรมในการตัดสินใจคล้ายกัน สิ่งสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองมัลติเอเจนต์ ผู้พัฒนาระบบจะต้องหาแนวทางระบุคุณสมบัติของเอเจนต์ให้เหมาะสมกับสถานการณ์ที่ต้องการจำลอง โดยระบุว่าในระบบที่เราสนใจมีเอเจนต์อะไรบ้าง แต่ละเอเจนต์มีคุณสมบัติอย่างไรและมีพฤติกรรมในการตัดสินใจอย่างไร ข้อมูลเหล่านี้อาจได้จากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญ การสำรวจ สอบถาม หรือการเล่นเกมส์สวมบทบาท (role-playing game) เป็นเอเจนต์ที่สนใจเพื่อเรียนรู้ถึงพฤติกรรมและกระบวนการตัดสินใจในสิ่งที่ต้องการ ตัวอย่างการจำลองพฤติกรรมของบุคคล อาทิ การจำลองเกมชลประทานสำหรับเขาวชน (พงศธร, 2548); พงศธร และคณะ, 2548) เกมการจัดการน้ำในระดับลุ่มน้ำ (Lankford *et al.*, 2004) และในระดับพื้นที่ชลประทาน (Dare and Barreteau, 2003; Barreteau *et al.*, 2003; Barreteau, 2003)

ในส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานด้านชลประทานมีหลายชิ้น Becu *et al.* (2003) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อช่วยในการจัดการทรัพยากรน้ำ โดยให้จำแนกเอเจนต์เป็นสองชนิด ชนิดแรกเป็นเอเจนต์ที่สามารถรับรู้ได้ (cognitive agent) ได้แก่ เกษตรกรและเจ้าหน้าที่ชลประทาน ชนิดที่สองเป็นเอเจนต์แบบตอบสนอง (reactive agent) ประกอบด้วย พืช ลำน้ำ คลองชลประทาน และหมู่บ้าน เอเจนต์เหล่านี้เป็นองค์ประกอบของระบบการผลิต เกษตรกรตัดสินใจปลูกพืชฤดูแล้งเพื่อให้ผลตอบแทนสูงสุดจากข้อจำกัดด้านการเงินสด แรงงาน และความพอเพียงของน้ำ แบบจำลองนี้สามารถอธิบายและทำนายการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของระบบการปลูกพืช และรายได้ของเกษตรกรภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกันด้านการจัดการน้ำชลประทาน เช่น เมื่อมีการจัดแย้งเรื่องน้ำ เมื่อมีการลักลอบใช้น้ำ และเมื่อมีการขาดน้ำ เป็นต้น ผลการจำลองสามารถนำไปอธิบายกับเกษตรกร

เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบของความขัดแย้งในการใช้น้ำ และผลดีที่จะเกิดขึ้นหากมีการเจรจาหรือหาทางออกร่วมกันเพื่อลดความขัดแย้งในอนาคต

ส่วนงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกัน อาทิ การจำลองระบบเอเจนต์เพื่อทดสอบผลกระทบของการจัดสรรน้ำแก่เกษตรกร (Le Bars *et al.*, 2005) การตัดสินใจด้านการจัดการน้ำชลประทาน (Barreteau *et al.*, 2004) การใช้แบบจำลองเอเจนต์ประเมินการจัดการน้ำในเขตเมือง (Lopez-Paredes *et al.*, 2005) กระบวนการเจรจาต่อรองความต้องการน้ำ (Feuillet *et al.*, 2003) การใช้ระบบเอเจนต์จำลองการจัดการด้านชลศาสตร์ (Espinasse and Franchesquin, 2005) แบบจำลองเอเจนต์สำหรับประมาณค่าความต้องการน้ำเพื่อการบริโภค (Athanasiadis *et al.*, 2005) การใช้ระบบเอเจนต์ปรับปรุงระบบการชลประทานในประเทศภูฏาน (Gurung, 2004) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่การใช้ที่ดิน (Parker *et al.*, 2001; Valbuena *et al.*, 2008) การวางแผนการใช้ที่ดิน (Ligtenberg *et al.*, 2004) การใช้ระบบเอเจนต์กับการจำลองทางเศรษฐศาสตร์เข้ากับแบบจำลองทางอุทกวิทยาเพื่อทำนายพฤติกรรมทางด้านเศรษฐกิจและการตอบสนองต่อนโยบายทางด้านการเกษตร (Berger, 2001) และการใช้ระบบเอเจนต์ทำความเข้าใจกฎเกณฑ์ เงื่อนไข และกระบวนการใช้น้ำในเซเนกัล (Barreteau *et al.*, 2004) การใช้เอเจนต์กับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Crooks, 2006)

สำหรับระบบมัลติเอเจนต์ในประเทศไทย เมธี (2548) ได้ทบทวนงานวิจัยเรื่องการจำลองและวิเคราะห์สถานการณ์ในระบบสนับสนุนการตัดสินใจทางการเกษตร ซึ่งบางตอนในบทความกล่าวว่า การใช้ระบบระบบมัลติเอเจนต์ในประเทศไทยยังอยู่ในระยะเริ่มต้น เนื่องจากปัญหาด้านซอฟต์แวร์ทางระบบมัลติเอเจนต์ ซึ่งมีการพัฒนาไม่ยาวนานนัก จึงยังมีขีดความสามารถจำกัดในการประมวลผลและแสดงผลเชิงพื้นที่ อีกทั้งยังต้องการงานวิจัยที่สนับสนุนความเข้าใจในกระบวนการรวมกลุ่มและการตัดสินใจของเอเจนต์ที่เป็นกลุ่มอิสระหนึ่ง ตัวอย่างงานวิจัย อาทิ การใช้ระบบมัลติเอเจนต์ในการจัดการทรัพยากรธรรมชาติในกลุ่มน้ำทางภาคเหนือของประเทศไทย (Becu *et al.*, 2003) การใช้ระบบมัลติเอเจนต์จำลองระบบการกักเก็บเงินของเกษตรกรในภาคเหนือของประเทศไทย (Barnaud *et al.*, 2008)

การจำลองแบบเอเจนต์ยังเกี่ยวข้องกับเทคนิคทางคอมพิวเตอร์อีกสาขา คือ เซลลูล่า ออโตมาตา ซึ่งเซลล์ูล่า ออโตมาตา (Cellular Automata หรือ CA) เป็นวิทยาศาสตร์สาขาหนึ่งของคอมพิวเตอร์ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย von Neumann (Toffoli and Margolus, 1989; Torrens, 2000) ตัวอย่างที่สามารถอธิบายหลักการของ CA คือ เกม “Conway's Game of Life” (Gardner, 1970) เกมนี้มีองค์ประกอบ คือ ตารางกริดและกฎการจำลอง กริดแต่ละตำแหน่งมีสถานะคงอยู่และดับหาย ซึ่งสองสถานะนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับสถานะของกริดรอบข้าง เช่น กริดจะเปลี่ยนสถานะจากดับหายเป็นคงอยู่ต่อเมื่อสถานะของกริดรอบข้างส่วนใหญ่เป็นคงอยู่ ในทางกลับกัน กริดอาจดับหายได้ถ้ากริดรอบข้างดับหาย ฉะนั้น เกมจะจำลองการเปลี่ยนแปลงสถานะของกริดไปพร้อมกันจนกว่าจะหยุดการจำลอง Dragicevic (2004) กล่าวว่า การจำลองในลักษณะดังกล่าว เป็นการจำลองด้วยกฎแบบง่าย แต่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการอธิบายปัญหาที่มีความซับซ้อนได้ โดยเฉพาะการใช้การจำลองแบบหน่วยย่อยเพื่อทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระดับกว้างขึ้น (Wootton, 2001)

จากคำอธิบายข้างต้น อาจให้คำจำกัดความของ CA ได้ว่าเป็นแบบจำลองที่แบ่งพื้นที่ออกเป็นกริด แต่ละกริดมีการเปลี่ยนสถานะที่เวลาต่าง ๆ พร้อมกัน ตามคุณสมบัติของกริดหรือกลุ่มของกริดที่อยู่ใกล้เคียงโดยอาศัยฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงที่กำหนด แนวคิดนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ในงานวิจัยหลายด้าน เช่น ด้านคอมพิวเตอร์ ชีววิทยา นิเวศวิทยา และด้านสังคม เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ CA ในงานด้านการชลประทาน

จากการทบทวนเอกสารสังเกตว่ายังมีไม่มากนัก งานวิจัยที่ใกล้เคียง อาทิ การใช้ขั้นตอนวิธีแบบเซลล์ูล่าจำลองการไหลของน้ำบนผิวดินในบริเวณน้ำท่วมถึง (Rinaldi *et al.*, 2007) แบบจำลองเซลล์ูล่าสำหรับจัดการโครงข่ายการไหลของน้ำ (Coppola *et al.*, 2007) การสร้างแบบจำลองเซลล์ูล่าสำหรับศึกษาการกร่อนของดินจากอิทธิพลของน้ำ (D'Ambrosio *et al.*, 2001) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของชุมชนและการจัดการน้ำ (Ducrot *et al.*, 2004) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของการใช้ที่ดิน (Dragicevic, 2004; Itami, 1994) การใช้ CA ร่วมกับเอเจนต์เพื่อวางแผนการใช้ที่ดิน (Ligtenberg *et al.*, 2001) การใช้ CA ร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของประชากรเขตเมือง (Batty *et al.*, 1999)

เครื่องมือหรือซอฟต์แวร์สำหรับการสร้างและจำลองระบบมัลติเอเจนต์มีหลายชนิด เช่น Repast (North *et al.*, 2006), Swarm (Minar *et al.*, 1996), Quicksilver, VSEit (Brassel, 2001), Cormas (Bousquet *et al.*, 1998), StarLogo และ Madkit เป็นต้น จากการทบทวนเอกสารเกี่ยวกับภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้พัฒนา พบว่า ส่วนใหญ่ใช้วิธีเชิงอ็อบเจกต์ (object orientation) ด้วยภาษา java, smalltalk, C++, object pascal และภาษา starlogo โดยเฉพาะภาษา java มีการใช้ค่อนข้างมาก

Tobias and Hofmann (2004) ได้ประเมินซอฟต์แวร์ระบบมัลติเอเจนต์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายสี่ชนิด ได้แก่ Repast, Swarm, Quicksilver และ VSEit โดยใช้เกณฑ์ในการประเมินห้าข้อ คือ (1) ลิขสิทธิ์ (2) เอกสารประกอบการใช้งาน (3) ระบบสื่อสารระหว่างผู้ใช้กับผู้พัฒนา (4) ขนาดของกลุ่มผู้ใช้งาน และ (5) แนวโน้มการปรับปรุงและพัฒนาต่อไปในอนาคต ผลการประเมินชี้ว่า Repast มีคะแนนมากที่สุด รองมาคือ Swarm โดย Repast มีคะแนนการประเมินสูงสุดในทุกเกณฑ์ ทั้งนี้ในเอกสารยังรวบรวมรายชื่อและแหล่งข้อมูลของแบบจำลองที่ไม่ถูกประเมินไว้ เช่น Cormas, StartLogo, Madkit และ ECHO เป็นต้น

3.2 ฟัซซีลอจิก

ตรรกศาสตร์วิภาษหรือฟัซซีลอจิก (fuzzy logic) เป็นปัญญาประดิษฐ์สาขาหนึ่งที่ใช้ทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้กฎพื้นฐาน แทนความรู้ของมนุษย์ เพื่อช่วยในการตัดสินใจ แนวคิดครั้งแรกของการใช้ระบบตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือนี้ เสนอโดย Zadeh (1965) ซึ่งให้หลักการพื้นฐานของระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือว่า สามารถนำความยืดหยุ่น หรือความไม่แน่นอน เข้ามาใช้ได้ในแง่ของตัวเลข หรือการแสดงออกด้วยคำพูด โดยไม่ได้ระบุเพียงสองสถานะที่เป็นจริง หรือเท็จ แบบตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมเท่านั้น แต่สามารถให้ค่าน้ำหนักของความเป็นไปได้ เป็นค่าใด ๆ ก็ได้ โดยปกติมักจะให้ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 การประยุกต์ใช้งานด้านการจัดการทรัพยากรน้ำ เช่น การสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ การควบคุมแบบอัตโนมัติ การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น

งานวิจัยด้านชลประทานที่มีการประยุกต์เทคนิคพืชซี อาทิ การพัฒนาแบบจำลองความต้องการน้ำชลประทานโดยใช้พืชซีลอจิก (ยุทธนา, 2545; ยุทธนา และเอกสิทธิ์, 2546ก, 2546ข, 2547) การใช้พืชซีพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Casper *et al.*, 2007) การใช้พืชซีคาดการณ์ความต้องการใช้น้ำชลประทานบนพื้นที่ปลูกข้าวในประเทศญี่ปุ่น (Saruwatari and Yomota, 1995) ประยุกต์ทฤษฎีพืชซีประมาณค่าปริมาณน้ำที่ยอมให้พืชนำไปใช้ได้ (Bahat *et al.*, 2000) การใช้พืชซีควบคุมปริมาณความชื้นในดินเพื่อประโยชน์ในการควบคุมการให้น้ำชลประทาน (Cazemier *et al.*, 2001) ส่วนงานวิจัยด้านการจัดการอ่างเก็บน้ำ อาทิ การใช้พืชซีในการจัดการอ่างเก็บน้ำหลายวัตถุประสงค์โดยเปรียบเทียบกับการปฏิบัติจริง (Shrestha *et al.*, 1996) ประยุกต์กฎการควบคุมแบบพืชซีจัดการอ่างเก็บน้ำวัตถุประสงค์เดียวในประเทศอินเดีย (Panigrahi and Mujumdar, 2000) และ การใช้เกณฑ์แบบพืชซีในการจัดการอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ (ภาณุวัฒน์ และเอกสิทธิ์, 2547)

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือ

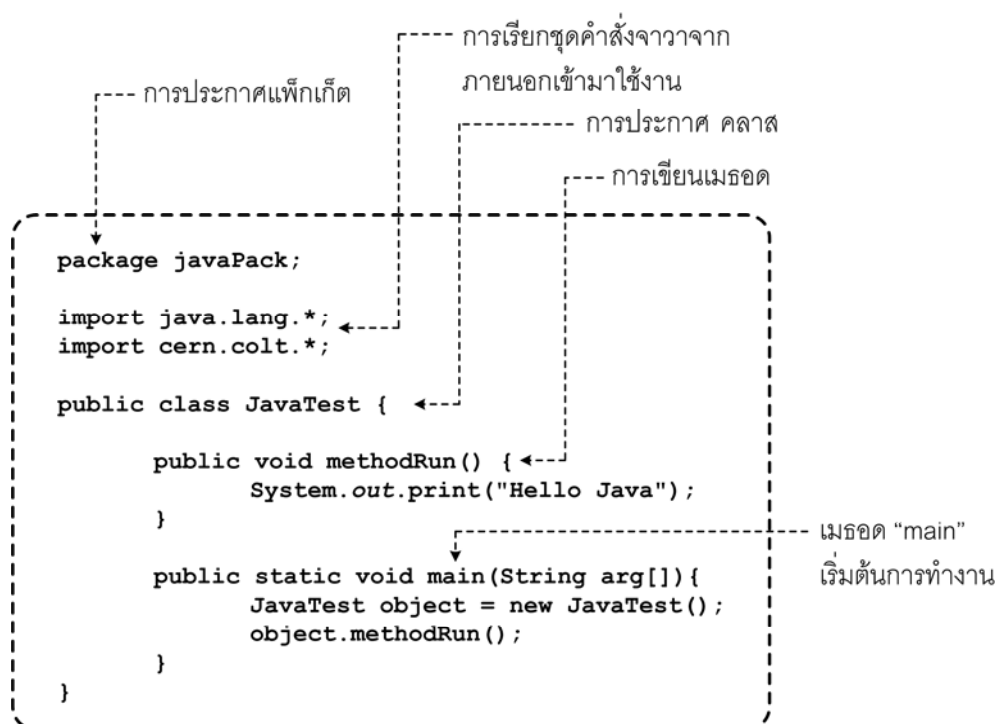
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย ภาษาจาวา, รีพาสต์, Eclipse, GSSHS และ SWAP เครื่องมือแต่ละชนิดมีรายละเอียด ดังนี้

1. เครื่องมือสำหรับพัฒนาแบบจำลอง

1.1 ภาษาจาวา (Java programming languages)

ภาษาเขียนโปรแกรมจาวา (Java programming) มีต้นกำเนิดมาจากบริษัท Sun Microsystems โดยทีมงานของ James Gosling การพัฒนาเริ่มในปี พ.ศ. 2534 (ค.ศ. 1991) ซึ่งเดิมออกแบบเพื่อใช้ควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก เรียกว่า “โอ๊ค” (Oak) และ เปลี่ยนเป็น “จาวา” ในปี พ.ศ. 2538 (ค.ศ. 1995) (Liang, 2005) จาวาเริ่มเป็นที่สนใจ เมื่อบริษัท Sun ประกาศให้จาวาเป็นภาษาสำหรับสร้างโปรแกรมบนอินเทอร์เน็ต โดยโปรแกรมถูกสร้างขึ้นบนคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่ง แล้วนำไปทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ต่างระบบได้โดยไม่ต้องคอมไพล์โปรแกรมใหม่ (วีระศักดิ์, 2543)

ภาษาจาวาถูกออกแบบให้มีลักษณะ ดังนี้ เป็นภาษาที่ง่ายต่อการเรียนรู้และใช้งาน (simple) เป็นภาษาเชิงอ็อบเจกต์โดยสมบูรณ์ (object-oriented) ทำงานโดยเชื่อมโยงกันผ่านเครือข่ายได้ (distributed) ทำงานผ่านตัวแปลภาษา (interpreted) คงทนต่อข้อผิดพลาดของโปรแกรม (robust) ปลอดภัยในการประมวลผล (secure) ทำงานบนเครื่องต่างระบบได้ (architecture-neutral) ย้ายระบบได้โดยไม่ต้องทำการคอมไพล์ (portable) มีสมรรถนะสูง (high performance) ด้วยเทคโนโลยี JIT (just-in-time) ประมวลผลได้หลายงานพร้อมกัน (multithreaded) ปรับเปลี่ยนได้ง่าย (dynamic) (Liang, 2005)



ภาพที่ 16 ตัวอย่างการเขียนชุดคำสั่งภาษาจาวา

คลังชุดคำสั่งภาษาจาวา (java library) ในรูปแบบของไฟล์จาร์ (jar) เป็นชุดคำสั่งภาษาจาวาที่นำมาใช้ร่วมกับการพัฒนาแบบจำลอง รายละเอียดของชุดคำสั่งที่นำมาใช้แสดงดังนี้

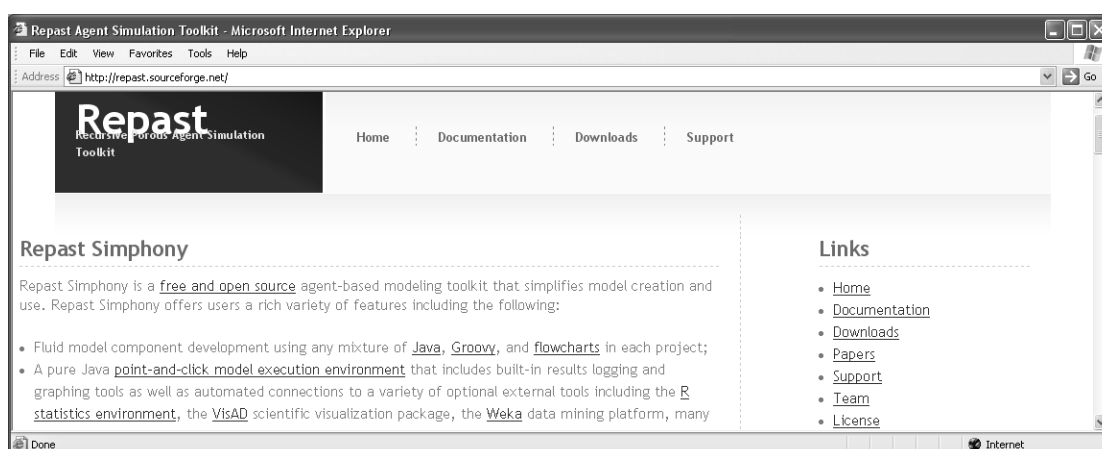
ตารางที่ 2 ชุดคำสั่งภาษาจาวาสำหรับช่วยในการพัฒนาแบบจำลอง

ชุดคำสั่ง	คำอธิบาย	แหล่งที่มา
Repast 3	ชุดเครื่องมือสำหรับสร้างแบบจำลองเอเจนต์	http://repast.sourceforge.net/ พัฒนาโดย The University of Chicago
jdk6	ชุดคำสั่งภาษาจาวา	http://java.sun.com/javase/downloads/index.jsp
colt	ชุดคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับงานทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์	http://dsd.lbl.gov/~hoschek/colt/
flanagan	ชุดคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับงานทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์	http://www.ee.ucl.ac.uk/~mflanaga/java/
fuzzy	ชุดคำสั่งฟัซซี่	http://people.clarkson.edu/~esazonov/FuzzyEngine

1.2 รีพาสต์ (Repast)

รีพาสต์ (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit หรือ Repast รุ่น 3) เป็นชุดเครื่องมือสำหรับสร้างแบบจำลองบนพื้นฐานของตัวกระทำหรือเอเจนต์ (Agent-Based Modeling) (North *et al.*, 2006) การพัฒนารีพาสต์ใช้แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์และได้ผนวกแนวคิดหลายอย่างจากชุดเครื่องมือ Swarm (Kennedy *et al.*, 2001) ชุดเครื่องมือของรีพาสต์ ได้แก่ เครื่องมือสำหรับจำลองกระบวนการเชิงพื้นที่ซึ่งรองรับการใช้งานร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เครื่องมือสำหรับบันทึกและแสดงผลการจำลองสถานการณ์รวมทั้งอนุญาตให้ผู้ผู้ใช้ปรับเปลี่ยนข้อมูลระหว่างการจำลองสถานการณ์ ในปัจจุบัน รีพาสต์ได้พัฒนารุ่นใหม่ชื่อ Repast Symphony ให้สามารถทำงานได้มากขึ้น เช่น การเพิ่มความเร็วในการจำลองเมื่อจำนวนเอเจนต์มากขึ้น ปรับปรุงส่วนการแสดงผลแบบ 3 มิติให้รองรับข้อมูลจากองค์กร NASA ได้ เชื่อมโยงการทำงานกับ Eclipse เป็นต้น

นอกจากนี้ ยังมีคลังชุดคำสั่งสำหรับการพัฒนาแบบจำลองหลายรูปแบบ อาทิ กระบวนการวิวิธพันธุกรรม (genetic algorithms) โครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (artificial neural networks) พลวัตของระบบ (system dynamics) การจำลองแบบมอนต์คาร์โล (Monte Carlo) การใช้งาน Repast สามารถเลือกใช้ภาษาโปรแกรมได้หลายภาษา การพัฒนาแบบจำลองขั้นพื้นฐานสามารถเลือกใช้ Repast-Py ที่เขียนชุดคำสั่งด้วยภาษา Python ส่วนการพัฒนาแบบจำลองในขั้นสูงอาจเลือกใช้ Repast -J ที่เขียนชุดคำสั่งด้วยภาษา Java หรือ Repast.NET ที่เขียนชุดคำสั่งด้วยภาษาที่รองรับ .NET framework (เช่น C#, VB.NET)

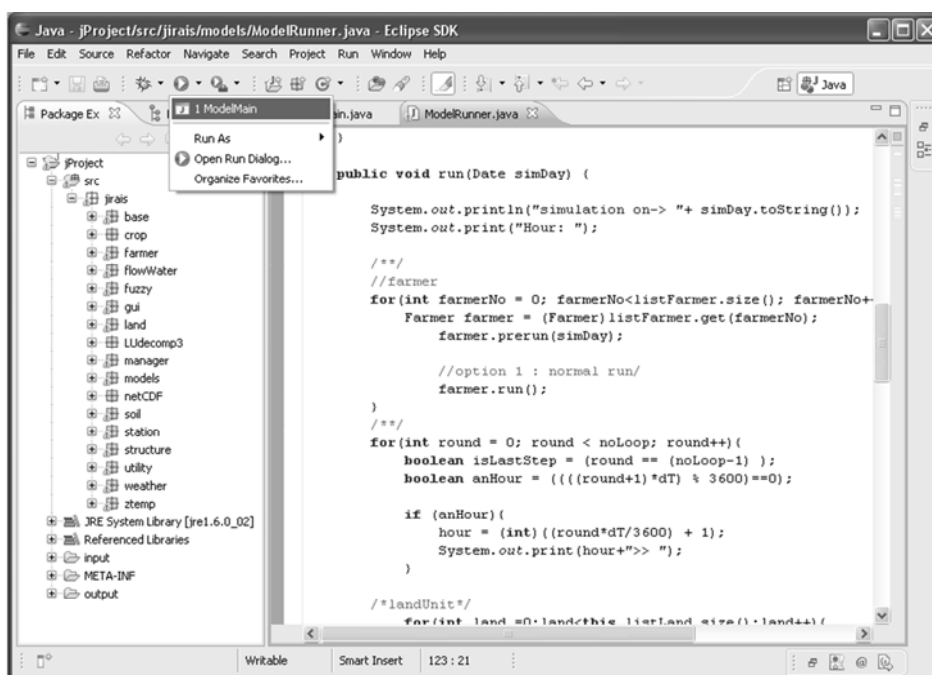


ภาพที่ 17 แหล่งรวบรวมข้อมูลและดาวน์โหลดรีพาสต์

1.3 Eclipse

Eclipse เป็นเครื่องมือที่สนับสนุนสภาพแวดล้อมสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง Eclipse เป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิด (open source) มีองค์ประกอบหลักเรียกว่า eclipse platform ซึ่งใช้ในการรวบรวมเครื่องมือต่าง ๆ จากภายนอกให้สามารถเข้ามาทำงานร่วมกันในสภาพแวดล้อมเดียวกัน นอกจากนี้ Eclipse ยังมีองค์ประกอบที่เรียกว่า plug-in development environment ซึ่งใช้ในการเพิ่มความสามารถในการพัฒนาซอฟต์แวร์ เช่น ถ้าหากต้องการให้ Eclipse ทำงานใดเพิ่มเติมเพียงแค่พัฒนา plug-in สำหรับงานนั้น ๆ ขึ้นมา และนำ plug-in นั้นมาติดตั้งเพิ่มเติมให้กับ Eclipse เท่านั้น ก็จะสามารถทำงานที่ต้องการได้ Eclipse

Eclipse สามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ www.eclipse.org โดยมีหลายแพลตฟอร์มให้เลือกได้แก่ Windows, Linux หรือ Mac OS X เป็นต้น



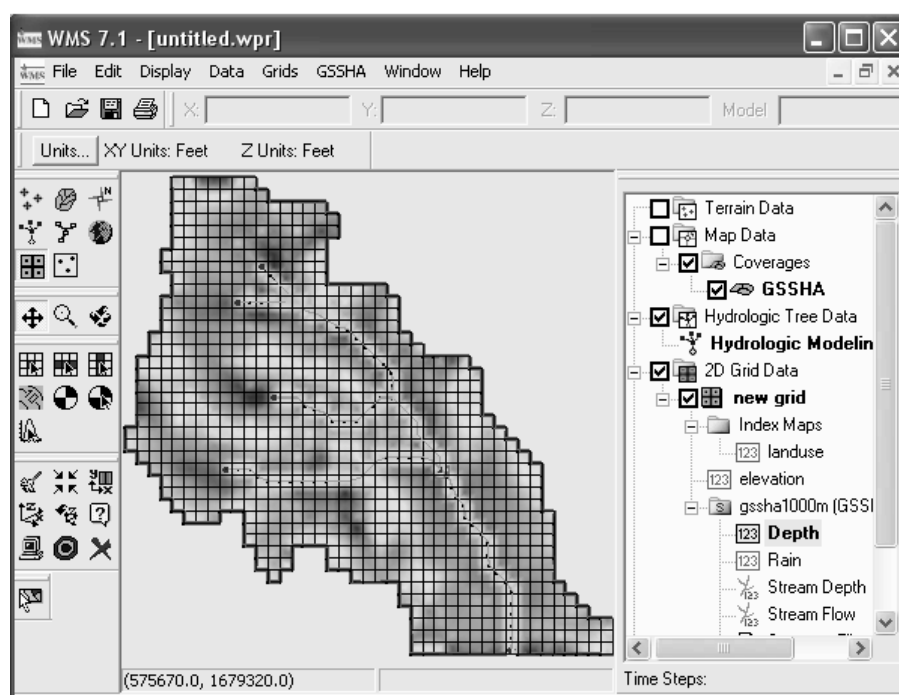
ภาพที่ 18 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของ Eclipse

2. เครื่องมือสำหรับตรวจสอบแบบจำลอง

เครื่องมือสำหรับตรวจสอบแบบจำลองมี 2 ชนิด คือ แบบจำลอง GSSHA และแบบจำลอง SWAP รายละเอียดของแบบจำลองทั้งสองสรุปได้ดังนี้

2.1 แบบจำลอง GSSHA

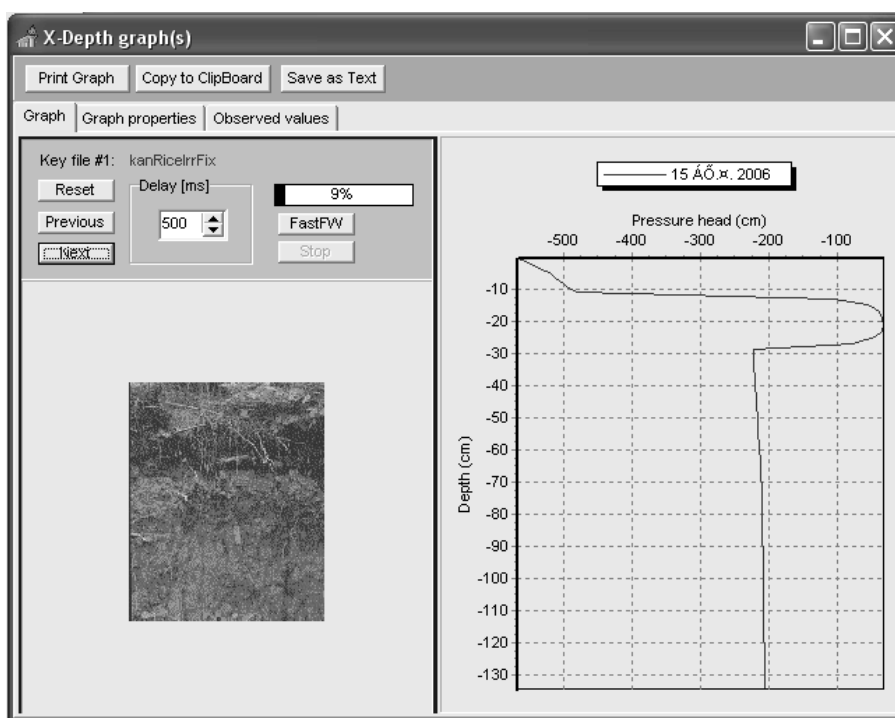
แบบจำลอง GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis) (Downer and Ogden, 2004) เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่พิจารณากระบวนการทางกายภาพแบบกระจาย (physically-based hydrologic model) แบบจำลองพัฒนาต่อจากแบบจำลอง CASC2D (Downer and Ogden, 2002) องค์ประกอบหลักของแบบจำลองประกอบด้วย กระบวนการจำลองการไหลของน้ำท่าผิวดินและในลำน้ำ คำนวณโดยสมการ diffusive wave หาคำตอบสมการโดยระเบียบวิธี Finite Difference กระบวนการไหลของน้ำใต้ผิวดิน คำนวณโดยสมการของดาร์ซี (Darcy's law) กระบวนการซึมผ่านผิวดิน มีหลายสมการให้เลือก อาทิ สมการของ Green and Ampt หรือ สมการของริชาร์ด (Richards's equation) กระบวนการคายระเหย โดยสมการของ Penman-Monteith



ภาพที่ 19 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของแบบจำลอง GSSHA

2.2 แบบจำลอง SWAP

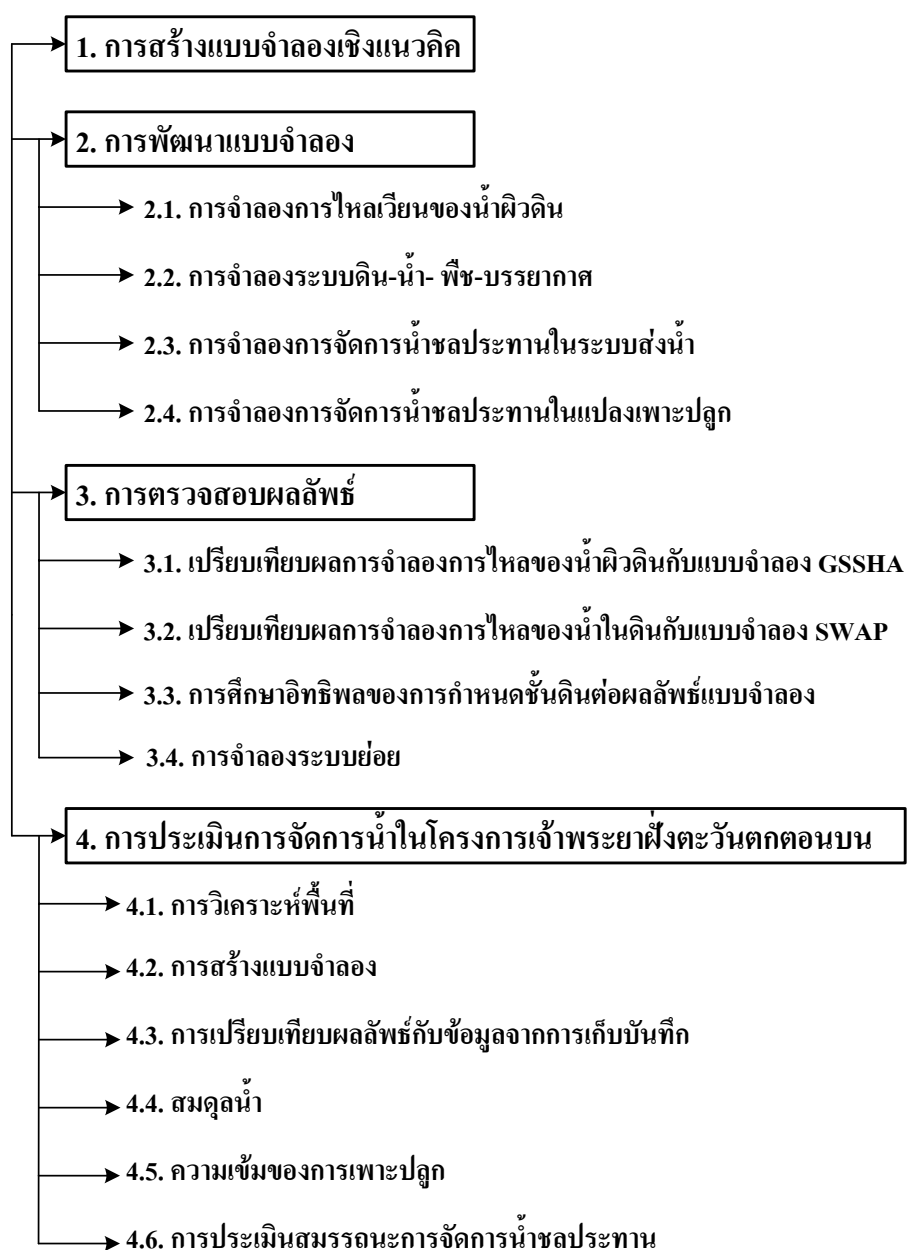
แบบจำลองระบบดิน-น้ำ-บรรยากาศ-พืช (Soil-Water-Atmosphere-Plant หรือ SWAP) (van Dam *et al.*, 1997; van Dam, 2000; Kroes and van Dam, 2003) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาโดยความร่วมมือของทีมวิจัยของ Centre for Water and Climate ภายใต้สังกัดของ Wageningen University and Research Centre ประเทศเนเธอร์แลนด์ เพื่อใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการอุทกวิทยาทางการเกษตร แบบจำลองคำนวณการไหลของน้ำโดยสมการของริชาร์ด (Richard's equation) และหาคำตอบโดยระเบียบวิธี finite difference การประมวลผลผลลัพธ์ของแบบจำลองเป็นการพิจารณาร่วมกันระหว่างกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายในดิน กระบวนการถ่ายเทความร้อน และกระบวนการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งการพิจารณาในกระบวนการต่าง ๆ จะเป็นการพิจารณาในระดับแปลง (field scale)



ภาพที่ 20 ส่วนติดต่อกับผู้ใช้ของแบบจำลอง SWAP

วิธีการ

การดำเนินงานวิจัยมีสี่ขั้นตอนหลัก คือ (1) การสร้างแบบจำลองเชิงแนวคิด (2) การพัฒนาแบบจำลอง (3) การตรวจสอบแบบจำลอง และ (4) การประยุกต์แบบจำลอง



ภาพที่ 21 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

ในภาพที่ 21 แสดงผังการดำเนินงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

ขั้นตอนที่ (1) เป็นการพัฒนาแบบจำลองเชิงแนวคิด (conceptual model) โดยการกำหนดกรอบแนวคิดของแบบจำลองและออกแบบโครงสร้างแบบจำลองในเบื้องต้น จากนั้นจึงแปลงแบบจำลองเชิงแนวคิดนี้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer model)

ขั้นตอนที่ (2) เป็นการพัฒนาแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยใช้แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ (object orientation) ร่วมกับเทคนิคทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) การพัฒนาแบ่งเป็นการสร้างองค์ประกอบของแบบจำลอง 4 ส่วน ได้แก่ การจำลองกระบวนการไหลเวียนของน้ำบนผิวดิน การจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำและในระบบแปลงเพาะปลูก

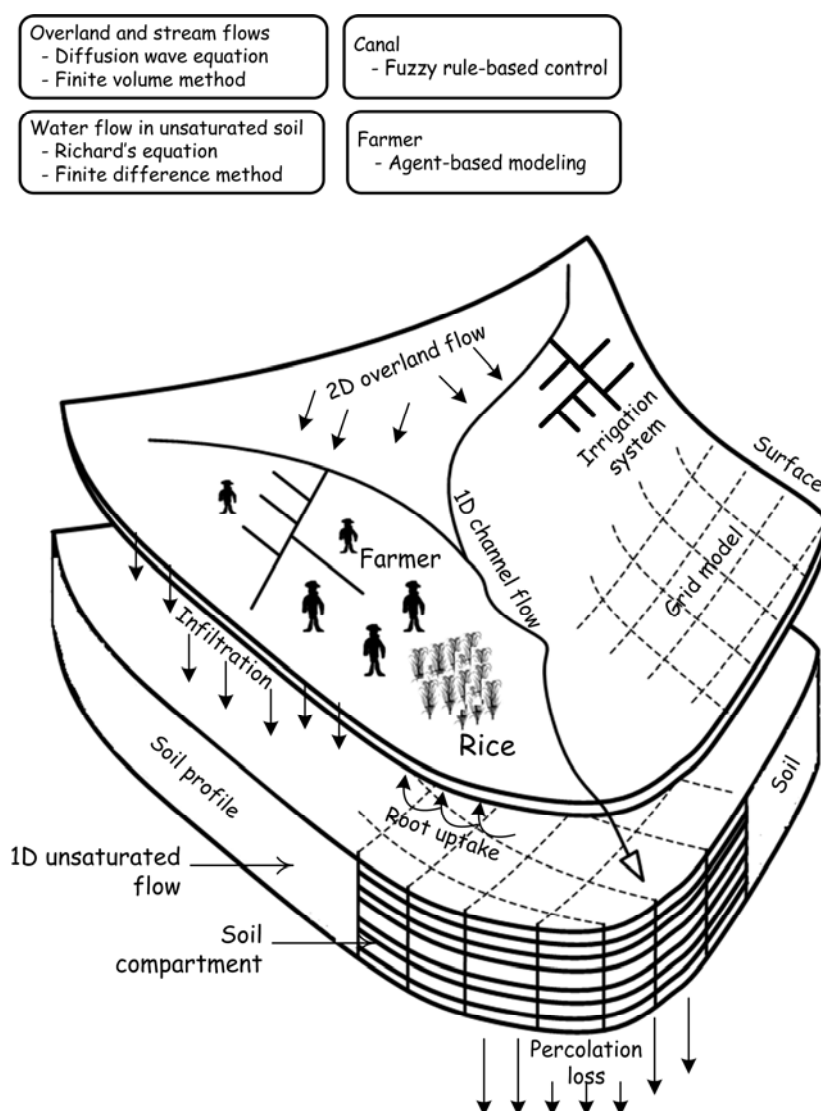
การจำลองกระบวนการไหลเวียนของน้ำบนผิวดินคำนวณโดยสมการ diffusion wave และหาคำตอบด้วยระเบียบวิธี Finite Volume การจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ ประกอบด้วย การไหลของน้ำในดินคำนวณโดยสมการของริชาร์ด (Richards's equation) และหาคำตอบของสมการโดยระเบียบวิธี Finite Difference การจำลองการเจริญเติบโตพืชแบบธรรมดา การระเหยและการคายระเหยด้วยสมการของ Penman-Monticeth การจำลองการจัดการน้ำในระบบส่งน้ำด้วยกฎการควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy rule-based control) และการจำลองการจัดการน้ำในแปลงเพาะปลูกด้วยเทคนิคเอเจนต์ (Agent-Based Modeling หรือ ABM)

ขั้นตอนที่ (3) เป็นการตรวจสอบแบบจำลอง (model verification) โดยแบ่งเป็นการเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองอื่น (benchmarking) และทดสอบการทำงานในระบบย่อย การเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองอื่นมีสองส่วน คือ ผลการจำลองการไหลของน้ำผิวดิน เปรียบเทียบกับแบบจำลอง GSSHA และผลการจำลองการไหลของน้ำในดินกับแบบจำลอง SWAP จากนั้นนำแบบจำลองไปทดสอบการทำงานในระบบย่อย โดยการศึกษาอิทธิพลการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง และการทดสอบระบบการกระจายน้ำชลประทานซึ่งเป็นการทดสอบการทำงานในทุกองค์ประกอบของแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ (4) เป็นการประยุกต์แบบจำลองในระดับลุ่มน้ำ โดยการประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน การดำเนินงานประกอบด้วยการสำรวจพื้นที่และสัมภาษณ์เกษตรกร การสร้างแบบจำลอง และการจำลอง ในส่วนของการจำลองแบ่งออกเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลจากการเก็บบันทึก การจำลองสมดุลน้ำ การประเมินความเข้มของการปลูกข้าว และการประเมินสมรรถนะระบบชลประทาน

1. แบบจำลองเชิงแนวคิด

ส่วนแรกนี้ เป็นการนำเสนอแนวคิดในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งแสดงเป็นภาพแนวคิดในภาพที่ 22 การอธิบายแนวคิดนี้ เริ่มจากการมององค์ประกอบของระบบที่จะทำการพิจารณา จากนั้นเป็นการแทนแนวคิดด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ แล้วจึงใช้วิธีการทางคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลอง



ภาพที่ 22 แบบจำลองเชิงแนวคิดสำหรับสร้างแบบจำลองจิเรศ

ส่วนแรก เป็นการอธิบายแนวคิดของแบบจำลอง ซึ่งเป็นการจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในพื้นที่ชลประทาน กระบวนการเริ่มจากน้ำฝน (rainfall) ตกลงมาบนพื้นดิน ส่วนหนึ่งได้ระเหยจากผิวดินขึ้นสู่บรรยากาศ (surface evaporation) ส่วนยังคงขังอยู่บนพื้นดินและไหลบนผิวดิน (overland flow) ตามแนวลาดชันลงสู่แม่น้ำลำธารออกสู่ทางออกของกลุ่มน้ำ น้ำอีกส่วนไหลซึมผ่านผิวดิน (infiltration) ในแนวดิ่งลงสู่ชั้นดินและไหลซึมผ่านดิน (percolation) ลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน น้ำที่ไหลในชั้นดินบางส่วนระเหยกลับสู่ผิวดิน (soil evaporation) บางส่วนถูกรากพืชดูดซึม (root water uptake) เพื่อคายน้ำ (transpiration)

กระบวนการข้างต้น เป็นการไหลเวียนของน้ำบนผิวดินและในระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ ทั้งนี้ ในพื้นที่เกษตรกรรมโดยเฉพาะในเขตชลประทาน กระบวนการไหลเวียนของน้ำส่วนหนึ่งถูกควบคุมด้วยระบบส่งน้ำชลประทานและกิจกรรมการเพาะปลูกของเกษตรกร กล่าวคือระบบส่งน้ำทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำจากแม่น้ำให้ไหลเข้าสู่ระบบ น้ำที่ไหลเข้าระบบถูกอาคารบังคับน้ำควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อกระจายน้ำให้กับพื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกร โดยเกษตรกรที่อยู่ในระบบมีแปลงเพาะปลูกเป็นของตนเอง มีระบบการตัดสินใจเพาะปลูกพืช มีระบบการหาแหล่งน้ำเพื่อใช้ในการเพาะปลูก และสามารถติดตามและควบคุมปริมาณน้ำในแปลงของตนเองได้

ส่วนที่สอง จากกรอบแนวคิดข้างต้น ได้ปรับเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยกระบวนการไหลของน้ำบนผิวดินและในลำน้ำถูกคำนวณด้วยสมการ diffusion wave และหาคำตอบของสมการโดยระเบียบวิธี Finite Volume ส่วนกระบวนการไหลของน้ำในดินคำนวณโดยใช้สมการของริชาร์ด หาคำตอบสมการด้วยระเบียบวิธี Finite Difference การควบคุมระบบส่งน้ำชลประทานใช้การควบคุมแบบอัตโนมัติด้วยระบบพีชชีลอจิก ส่วนเกษตรกร จำลองโดยใช้เทคนิคเอเจนต์ (Agent-Based Modeling)

ส่วนที่สาม เป็นการแทนแนวคิดข้างต้นเป็นแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากกรอบแนวคิดในข้อแรกและการแทนแนวคิดด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ในข้อสอง ท้ายสุดเป็นการออกแบบแบบจำลองด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์ แบบจำลองถูกออกแบบเป็นชนิดกระจาย (distributed model) โครงสร้างแบบจำลองเป็นกริด (grid model) ในแนวระนาบ วิธีเชิงอ็อบเจกต์ถูกเลือกเป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง ซึ่งวิธีการนี้ได้พิจารณาทุก ๆ องค์ประกอบเป็นอ็อบเจกต์ อาทิ ดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ ระบบชลประทาน และเกษตรกร รวมถึงกระบวนการคำนวณ

2. การพัฒนาแบบจำลอง

หัวข้อการพัฒนาแบบจำลอง นำเสนอองค์ประกอบหลักของแบบจำลองได้แก่ (1) การจำลองการไหลของน้ำผิวดิน (2) การจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ (3) การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำ และ (4) การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก รายละเอียดแสดงดังนี้

2.1 การจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน

กระบวนการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ อธิบายโดยสมการต่อเนื่อง (continuity equation) และสมการโมเมนตัม (momentum equation) (Chaudhry, 1993) โดยเขียนสมการการไหลของน้ำแบบต่อเนื่องตามแกน x และ y ดังนี้

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + (r - f) = 0 \quad (13)$$

โดยที่ h เป็นความลึกน้ำ (L)

u และ v เป็นความเร็วในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ($L T^{-1}$)

r เป็นความเข้มข้น ($L T^{-1}$)

f เป็นอัตราการซึมผ่านผิวดิน ($L T^{-1}$)

เขียนสมการโมเมนตัม (momentum equation) ตามแกน x และ y ได้ว่า

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} - gh(So_x - Sf_x) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} - gh(So_y - Sf_y) = 0 \quad (15)$$

โดยที่ g เป็นความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ($L T^{-2}$)

S_{ox} และ S_{oy} เป็นความลาดชันพื้นผิวตามแนวการไหลทิศทาง x และ y ($L L^{-1}$)

S_{fx} และ S_{fy} เป็นความลาดชันพลังงานตามแนว x และ y ตามลำดับ ($L L^{-1}$)

ซึ่งคำนวณจากสมการของแมนนิ่ง

ในการนี้ สมการที่ (13) (14) และ (15) อาจเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = G \quad (16)$$

โดยที่

$$U = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$E = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$F = \begin{bmatrix} vh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$G = \begin{bmatrix} r - f \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

แนวทางการหาคำตอบของสมการการไหล ได้ใช้ระเบียบวิธี Finite Volume ตามแนวทางที่เสนอโดย Jain และคณะ (Jain and Singh (2005), Jain *et al.* (2004)) ซึ่งใช้สมการ diffusion wave แบบ 1 มิติ ในการหาคำตอบการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ โดยการกำหนดทิศทางของการไหลของน้ำล่วงหน้าจากข้อมูล DEM (ภาพที่ 23) ซึ่งแนวทางดังกล่าว เสนอให้ลดรูปสมการที่ (13) (14) และ (15) ให้เป็นสมการการไหลแบบ 1 มิติ โดยสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = G \quad (21)$$

และเขียนสมการในรูปเวกเตอร์ได้เป็น

$$U = \begin{bmatrix} h \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$E = \begin{bmatrix} uh \\ h \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$G = \begin{bmatrix} r - f \\ (So_x - Sf_x) \end{bmatrix} \quad (24)$$

วิธี Finite Volume เป็นวิธีการแก้ปัญหเชิงตัวเลขโดยการอินทิเกรตสมการ partial differential equation ดังนี้

$$\int_{\Omega} \frac{\partial U}{\partial t} dv + \oint_{sides} (E \cdot \omega) ds = \int_{\Omega} G dv \quad (25)$$

หรือ อาจจัดสมการที่ (7) ให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$A \frac{\Delta U}{\Delta t} + \sum_{jj=1}^{sd} E^{jj} L^{jj} = AG \quad (26)$$

โดย	E	เป็น Flux ของพื้นที่ควบคุม
	ω	เป็นเวกเตอร์การไหลที่มีทิศทางไหลเข้ากริด
	A	เป็นพื้นที่กริด
	sd	เป็นจำนวนเวกเตอร์ของการไหลที่ชี้เข้าหากริด
	jj	เป็นลำดับของเวกเตอร์การไหล
	L^{jj}	เป็นความยาวด้านของการไหล

ทางการหาคำตอบของสมการประกอบด้วยขั้นตอน predictor และขั้นตอน corrector โดยขั้น predictor เป็นการทำนายค่าของ $\mathbf{U}^*$ จากพารามิเตอร์ที่ทราบค่าที่เวลา t ดังสมการ

$$\mathbf{U}_i^* = \mathbf{U}_i^t - \frac{\Delta t}{A_i} \left[\sum_{jj=1}^{sd} (\mathbf{E}_i^{jj})^t \cdot L_i^{jj} \right] + \Delta t \mathbf{G}_i^t \quad (27)$$

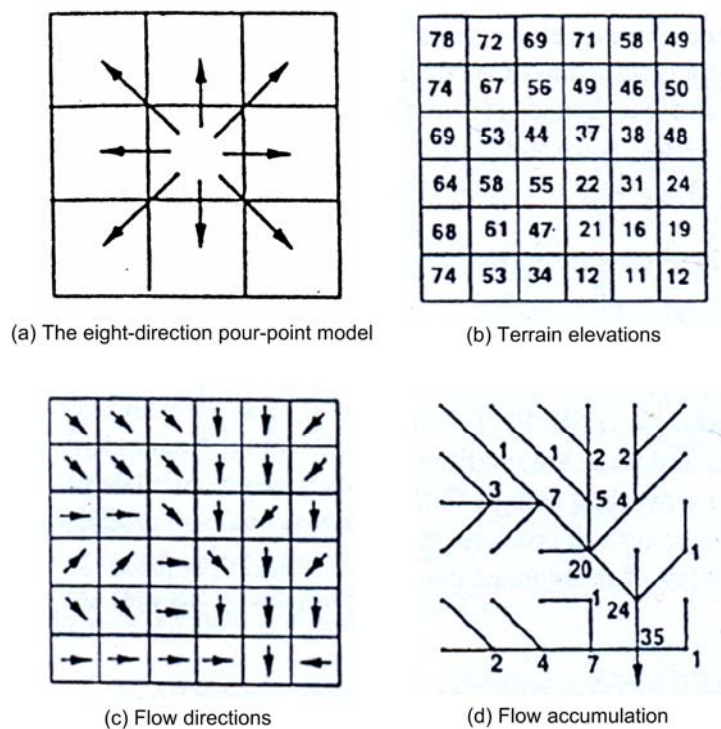
ส่วนขั้น corrector เป็นการปรับแก้ผลลัพธ์ โดยใช้พารามิเตอร์ที่ทำนายจากขั้น predictor ดังสมการ

$$\mathbf{U}_i^{t+1} = 0.5 \left\{ \mathbf{U}_i^t + \mathbf{U}_i^* - \frac{\Delta t}{A_i} \left[\sum_{jj=1}^{sd} (\mathbf{E}_i^{jj})^* \cdot L_i^{jj} \right] + \Delta t \mathbf{G}_i^* \right\} \quad (28)$$

เสถียรภาพการคำนวณ พิจารณาค่า Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) ซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 1 ค่านี้ ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลและขนาดของกริด กรณีค่าเกิน 1 แสดงว่าเสถียรภาพการคำนวณต่ำ

$$\max \left\{ (u + \sqrt{gh}) \cdot \frac{\Delta t}{L} \right\} \leq 1 \quad (29)$$

ในการนี้ การกำหนดทิศทางการไหลของน้ำจากข้อมูลระดับความสูงเชิงตัวเลข (digital elevation model หรือ DEM) โดยประมวลผลด้วยระบบภูมิสารสนเทศ ข้อมูล DEM เป็นข้อมูล SRTM (shuttle radar topography mission) ซึ่งได้จากการสำรวจด้วยเรดาร์โดยกระสวยอวกาศ Endeavour ในปี 2543 (USGS, 2006) หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางการไหลโดยระบบภูมิสารสนเทศ คือ กำหนดให้ทิศทางการไหลของน้ำแต่ละกริดมีทิศทางเป็นไปได้ 8 ทิศทาง โดยทิศทางการไหลจะชี้ไปยังกริดรอบข้างที่ต่ำสุด ซึ่งทิศทางการไหลที่กำหนดได้จะถูกนำไปใช้หาโครงข่ายของลำน้ำต่อไป ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 23 โดยภาพที่ 23(a) เป็นทิศทางการไหลของกริดซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ 8 ทิศทาง ส่วนภาพที่ 23(b) เป็นระดับความสูง ภาพที่ 23(c) เป็นทิศทางการไหลของน้ำ และ ภาพที่ 23(d) เป็นโครงข่ายลำน้ำ



ภาพที่ 23 การกำหนดการไหลของน้ำจาก DEM

ที่มา: Jain and Singh (2003)

2.2 การจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ

หัวข้อนี้เป็นการจำลองการไหลเวียนของน้ำในระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงานได้แก่ (1) การจำลองการไหลของน้ำในดิน (2) การจำลองการเจริญเติบโตพืชแบบธรรมดา และ (3) การคายระเหยหรือการใช้น้ำของพืช แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

1) การจำลองการไหลของน้ำในดิน

การไหลของน้ำในดินอธิบายโดยสมการของริชาร์ด (Richards's equation) ซึ่งคำนวณการไหลของน้ำในดินแบบ 1 มิติ ในแนวดิ่ง สมการนี้มีพื้นฐานจากหลักการอนุรักษ์มวลสารและสมการของ Darcy (Jury *et al.*, 1991) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (30)$$

โดย	θ	เป็นปริมาณน้ำในดิน ($L^3 L^{-3}$)
	h	เป็นแรงดึงดูดความชื้นในดิน (L)
	z	เป็นระดับในแนวดิ่ง (L) (มีค่าเป็นบวกในทิศขึ้น)
	K	เป็นค่าการนำน้ำของดิน ($L T^{-1}$)
	S	เป็นอัตราการดูดซึมน้ำของรากพืชออกจากดิน ($L^3 L^{-3} T^{-1}$)

จากรูปของสมการที่ (30) ยังไม่สามารถหาคำตอบได้ เนื่องจาก มีตัวแปร θ และ h ซึ่งเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าสองตัว การหาคำตอบจึงอาศัยการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง θ และ h ซึ่งเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า water retention curve หรือ WRC หรือ เส้นอรรถลักษณะของน้ำในดิน (soil water characteristic) ในการศึกษาใช้สมการของ van Genuchten (1980) ดังนี้

$$\theta(h) = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (31)$$

ค่าการนำน้ำของดินตามความชื้น (hydraulic conductivity curve) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง K และ θ ตามสมการ Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) ดังนี้

$$K(\theta) = K_{sat} S_e^\lambda \left\{ 1 - \left[1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (32)$$

ในเมื่อ

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (33)$$

โดยที่ K_{sat} เป็นค่าการนำน้ำของดินอิ่มตัว
 θ_{sat} เป็นปริมาณน้ำในดินขณะดินอิ่มตัว
 θ_{res} เป็นปริมาณน้ำในดินขณะดินแห้งในอากาศ
 S_e เป็นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน
 ส่วน α , n , m และ λ เป็นพารามิเตอร์ของสมการ
 เมื่อ $m=1-1/n$ และ λ ใช้เท่ากับ 0.50 (Mualem, 1976)

สมการที่ (30) สามารถเขียนในรูปอนุพันธ์ของ h โดยการกำหนดค่า water capacity (C) ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินเทียบกับแรงดึงของน้ำในดิน หรือ $C = \partial\theta / \partial h$ เมื่อแทนลงในสมการที่ (30) สามารถเขียนเป็นสมการที่ (34) ดังนี้

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (34)$$

ค่า water capacity หาจากค่าอนุพันธ์ของสมการ water retention curve ของ van Genuchten โดยเขียนเป็นสมการดังนี้

$$C(h) = \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res}) \alpha^n n m |h|^{n-1}}{(1 + |\alpha h|^n)^{2-1/n}} ; h < 0 \quad (35)$$

การหาคำตอบสมการริชาร์ดด้วยวิธีเชิงเลขใช้แนวทางที่เสนอโดย van Dam and Feddes (2000) ซึ่งใช้ระเบียบวิธี finite difference กับสมการริชาร์ดรูปแบบผสม θ และ h และหาคำตอบด้วยวิธี modified Picard iteration scheme (Celia *et al.*, 1990) เกณฑ์การดูเ้าของคำตอบกำหนดด้วยผลต่างของ θ (Huang *et al.*, 1996) สมการริชาร์ดในรูปแบบไม่ต่อเนื่องของชั้นดิน i (compartment) เขียนได้ ดังนี้

$$C_i^{j+1,p-1}(h_i^{j+1,p} - h_i^{j+1,p-1}) + \theta_i^{j+1,p-1} - \theta_i^j = \frac{\Delta t^j}{\Delta z_i} \left[K_{i-(1/2)}^j \left(\frac{h_{i-1}^{j+1,p} - h_i^{j+1,p}}{\Delta z_u} \right) + K_{i-(1/2)}^j \right. \\ \left. - K_{i+(1/2)}^j \left(\frac{h_{i-1}^{j+1,p} - h_{i+1}^{j+1,p}}{\Delta z_l} \right) - K_{i+(1/2)}^j \right] \quad (36)$$

โดยดัชนีล่าง i เป็นตัวชี้ตำแหน่งของชั้นดิน โดยชั้นดินที่อยู่ด้านบนจะเป็น $i-1$ ชั้นดินด้านล่างจะเป็น $i+1$ เช่น h_i เป็นแรงดึงน้ำของชั้นดิน i ส่วนของชั้นดินด้านบนเป็น h_{i-1} หรือชั้นดินด้านล่างเป็น h_{i+1} ส่วนดัชนีบน j เป็นตัวชี้เวลาในขั้นปัจจุบัน โดยเวลาในขั้นถัดไปจะเป็น $j+1$

Δt^j เป็นขั้นเวลา (time step), Δz_i เป็นความหนาของชั้นดิน i ส่วน Δz_u เป็นผลต่างระหว่างความลึกที่จุดกึ่งกลางชั้นดินด้านบนกับชั้นดิน i ($\Delta z_u = z_{i-1} - z_i$) และ Δz_l เป็นผลต่างระหว่างความลึกที่จุดกึ่งกลางชั้นดิน i กับชั้นดินด้านล่าง ($\Delta z_l = z_i - z_{i+1}$), K^j เป็นค่าการนำน้ำของดินที่ขั้นเวลาปัจจุบัน j โดยเป็นค่าเฉลี่ยของชั้นดินที่ i กับชั้นดินด้านบน ($K_{i-(1/2)}^j$) หรือชั้นดินด้านล่าง ($K_{i+(1/2)}^j$) ทั้งนี้ สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมจาก van Dam *et al.* (1997)

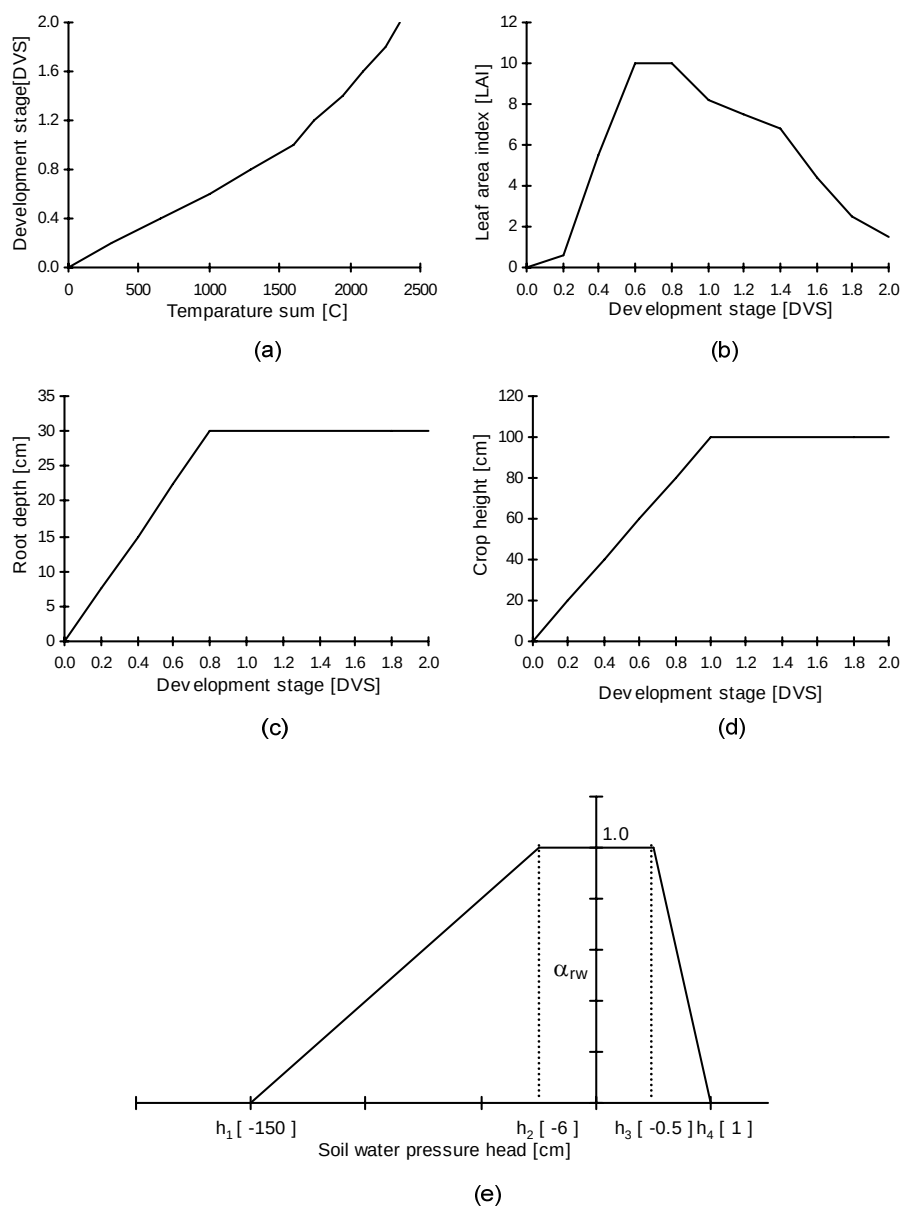
เนื่องจาก ค่า water capacity C ในสมการ (36) มีการเปลี่ยนแปลงมากในแต่ละรอบของการหาคำตอบ ซึ่งมีผลต่อความถูกต้องในการหาปริมาณความชื้น θ ดังนั้น van Dam and Feddes (2000) จึงเสนอให้ใช้วิธีทำนายค่า C ที่ขั้นเวลา $j+1, p-1$ หรือ $C_i^{j+1,p-1}$ ขึ้นมาก่อน จากนั้น จึงหาคำตอบในขั้นเวลา $j+1, p$ โดยการคำนวณจะทำซ้ำ จนกระทั่ง $\theta_i^{j+1,p-1}$ (ปริมาณน้ำในชั้นดิน i ที่ขั้นเวลา $j+1, p$) และ $\theta_i^{j+1,p}$ (ปริมาณน้ำที่ขั้นเวลา $j+1, p$) มีผลต่างไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด

2) การจำลองการเจริญเติบโตของข้าว

แนวทางการจำลองการเจริญเติบโตของข้าว ใช้วิธีแบบธรรมดา (simple crop growth model) ตามแนวทางของ Kroes and van Dam (2003) โดยทำการประมาณค่าพารามิเตอร์พืช ได้แก่ ค่าพัฒนาการเจริญเติบโตพืช (crop development stage หรือ DVS) สัดส่วนของพื้นที่ใบพืช ต่อพื้นที่ปลูกพืช (leaf area index หรือ LAI) ความยาวราก (root depth) และความสูงพืช (crop height) ค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิสะสม

อุณหภูมิสะสมคำนวณจากอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันกับอุณหภูมิฐาน โดยอุณหภูมิฐานเป็นอุณหภูมิที่พืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งมีค่าประมาณแปดองศาเซลเซียส อุณหภูมิสะสมคำนวณจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันกับอุณหภูมิฐาน โดยเริ่มสะสมอุณหภูมิตั้งแต่พืชเริ่มงอกจนถึงเก็บเกี่ยว ค่าอุณหภูมิสะสมมีความสัมพันธ์กับค่า DVS และค่า DVS สัมพันธ์กับค่า LAI ความยาวราก และความสูงพืช

ในการนี้ การหาค่าพารามิเตอร์พืชข้างต้น ใช้ข้อมูลจากข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (เอกสิทธิ์และคณะ, 2550ข) ซึ่งได้ทำการปลูกและเปรียบเทียบค่าดังแสดงในภาพที่ 24 ซึ่งเป็นการความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิสะสมกับค่า DVS และค่า DVS กับค่า LAI ความยาวรากและความสูงพืช ส่วนภาพสุดท้ายเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำของรากพืชกับค่าแรงดึงน้ำ โดยเมื่อแรงดึงน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น (มีค่าลบมาก) ความสามารถในการดูดซึมน้ำของรากจะน้อยลง โดยรากพืชสามารถดูดน้ำได้ค่อนข้างสูงเมื่อแรงดึงความชื้นเข้าใกล้ศูนย์



ภาพที่ 24 พารามิเตอร์ของข้าวจากการปรับเทียบกับข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1

หมายเหตุ พารามิเตอร์ข้าว ประกอบด้วย

- (a) อุณหภูมิสะสมกับค่าพัฒนาการเจริญเติบโตพืช (development stage หรือ DVS)
- (b) ค่า DVS กับสัดส่วนของพื้นที่ใบพืชต่อพื้นที่ปลูกพืช (leaf area index หรือ LAI)
- (c) ค่า DVS กับความยาวราก
- (d) ค่า DVS กับความสูงต้นพืช
- (e) สัมประสิทธิ์การดูดซับน้ำของรากพืชตามแรงดึงน้ำ

3) การคายระเหยหรือการใช้น้ำของพืช

การคายระเหยหรือการใช้น้ำของพืช (Evapotranspiration หรือ ET) เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียจากพื้นที่สู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำ ค่าดังกล่าวคำนวณจากสมการของ Penman-Monteith (Monteith and Unsworth, 1990) ดังนี้

$$\lambda ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \left\{ \frac{e_s - e_a}{r_a} \right\}}{\Delta + \gamma \left\{ 1 + \frac{r_s}{r_a} \right\}} \quad (37)$$

โดย ET_o เป็นปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (mm d^{-1})
 λ เป็นความร้อนแฝงของการระเหย (MJ kg^{-1})
 R_n เป็นพลังงานการแผ่รังสีสุทธิ ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 G เป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทลงดิน ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 ρ_a เป็นความหนาแน่นเฉลี่ยของอากาศ (kg m^{-3})
 c_p เป็นความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ($\text{MJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$)
 $(e_s - e_a)$ เป็นความดันไอน้ำที่ขาด (kPa)
 Δ เป็นความชันของโค้งความดันไอน้ำอิ่มตัว (kPa C^{-1})
 γ เป็นค่าคงที่ของเทอมความชื้น (kPa C^{-1})
 r_a และ r_s เป็นค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ชั้นการไหลเวียนอากาศและที่ชั้นพื้นผิว (s m^{-1})

จากสมการข้างต้น ใช้คำนวณศักยภาพการคายน้ำ (potential transpiration หรือ T_p) และศักยภาพการระเหย (potential evaporation หรือ E_p) โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index หรือ LAI) (Belmans *et al.*, 1983) และคำนวณค่า ET_{po} และ E_{po} ซึ่งค่า ET_{po} เป็นศักยภาพการคายระเหยของพื้นผิวที่ปกคลุมด้วยพืช (potential evapotranspiration rate of a dry canopy) ส่วนค่า E_{po} เป็นศักยภาพการระเหยของน้ำจากพื้นผิวดินเปล่า (potential evaporation rate of a wet, bare soil)

ในการนี้ การคำนวณค่าทั้งสองใช้การกำหนดสัมประสิทธิ์ในสมการที่ (37) ได้แก่ ความต้านทานของพื้นผิวที่ปกคลุมด้วยพืช (crop resistance หรือ r_{crop}) ความสูงของพืช (crop height หรือ h_{crop}) สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว (reflection coefficient)

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับคำนวณศักย์การคายน้ำและศักย์การระเหย

Parameters	ET_{po}	E_{po}
Crop resistance, r_{crop} ($s\ m^{-1}$)	30	0
Crop height, h_{crop} (cm)	0.1	0
Reflection coefficient	0.23	0.12

หมายเหตุ ในกรณีข้าว h_{crop} เท่ากับความสูงของพืช

ที่มา: Kroes and van Dam (2003)

ศักย์การระเหย (potential evaporation หรือ E_p) เขียนเป็นสมการดังนี้

$$E_p = E_{po} \cdot e^{-K_{gr} LAI} \quad (38)$$

$$K_{gr} = K_{df} \cdot K_{dir} \quad (39)$$

โดยที่ K_{gr} เป็นค่า extinction coefficient for global solar radiation
 K_{dir} เป็นค่า extinction coefficient for direct visible light radiation
 K_{df} จะผันแปรตามชนิดของพืช ซึ่งค่าระหว่าง 0.4 – 1.1 (ข้าว มีค่าประมาณ 0.6)
 LAI สัดส่วนของพื้นที่ใบพืชต่อพื้นที่ปลูกพืช (leaf area index)

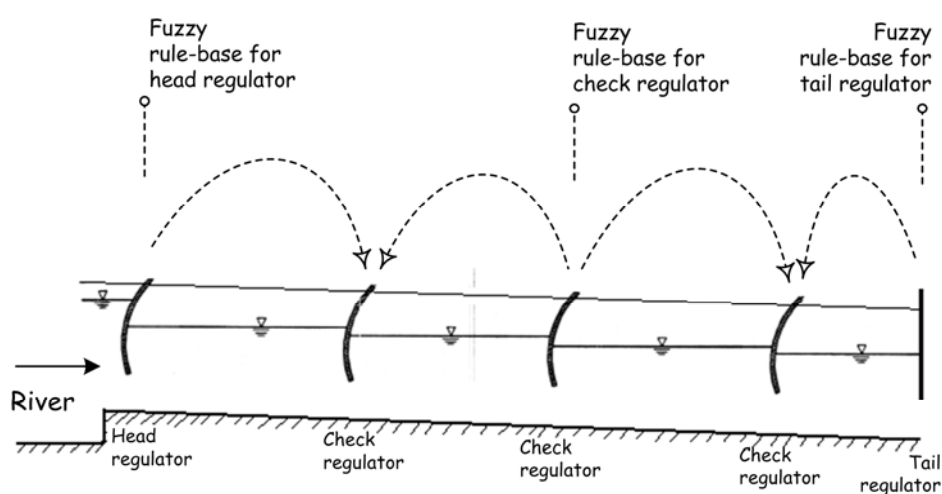
ศักย์การคายน้ำ (potential transpiration หรือ T_p) คำนวณจากสมการ

$$T_p = ET_{po} - E_p \quad (40)$$

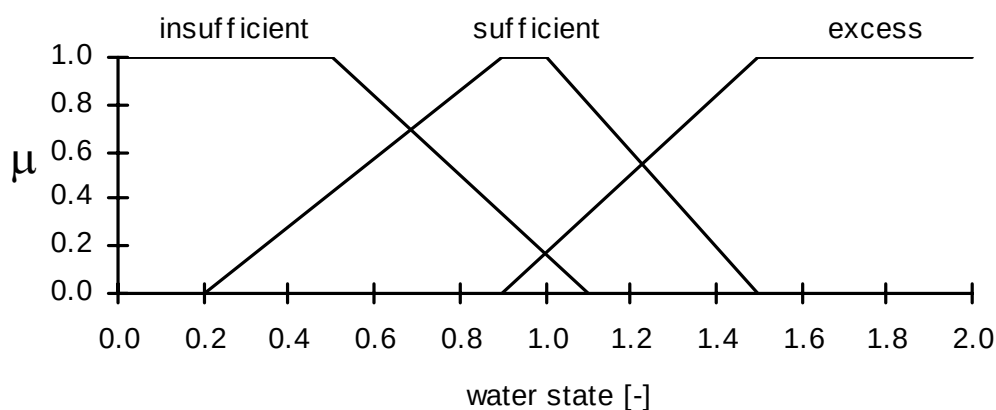
2.3 การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำ

การจำลองระบบการควบคุมอาคารบังคับน้ำชลประทานเลือกใช้กฎการควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy rule-based control) เหตุผลส่วนหนึ่ง que เลือกเทคนิคดังกล่าว คือ จำนวนเงื่อนไขของการควบคุมค่อนข้างมากและซับซ้อน การเขียนชุดคำสั่งตรรกะแบบดั้งเดิมทำได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากต้องเขียนชุดคำสั่งให้ครอบคลุมทุกเงื่อนไขของการควบคุม ฉะนั้นการเลือกตรรกะแบบฟัซซีทำให้ง่ายต่อการพัฒนาชุดคำสั่งและสามารถสร้างเงื่อนไขการควบคุมที่ซับซ้อนได้ค่อนข้างง่าย ในภาพที่ 25 แสดงแนวคิดการสร้างกระบวนการควบคุมอาคารบังคับน้ำ ซึ่งประกอบด้วยอาคารบังคับน้ำเป็น 3 ชนิด ได้แก่ อาคารบังคับน้ำปากคลอง (head regulator) อาคารทดน้ำกลางคลอง (check regulator) และอาคารบังคับน้ำปลายคลอง (tail regulator) อาคารบังคับน้ำทั้งสามชนิดสามารถควบคุมการปิด-เปิดบานประตูได้ด้วยตนเอง

การควบคุมการทำงานของประตูระบายน้ำแบบฟัซซีลอจิก อาคารบังคับน้ำปากคลองจะตัดสินใจปรับบานประตูระบายน้ำโดยพิจารณาสภาพน้ำที่ตำแหน่งของตนเองร่วมกับสภาพน้ำของอาคารท้ายน้ำ ส่วนอาคารทดน้ำกลางคลองจะพิจารณาสภาพน้ำตนเองร่วมกับสภาพน้ำของอาคารที่ตั้งอยู่ทางเหนือและทางท้ายน้ำ และอาคารบังคับน้ำปลายคลองพิจารณาสภาพน้ำของตนเองร่วมกับสภาพน้ำของอาคารที่ตั้งอยู่ทางเหนือ

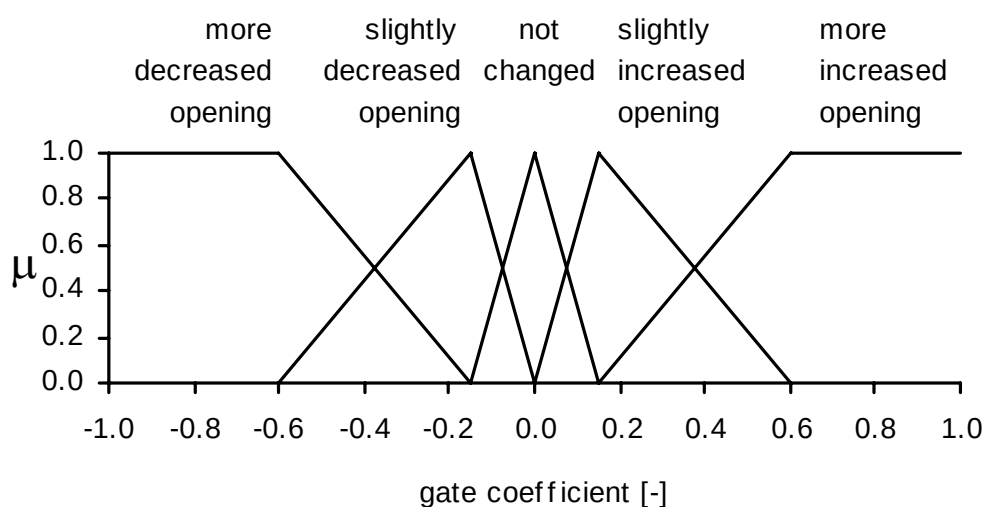


ภาพที่ 25 แนวคิดการควบคุมอาคารบังคับน้ำแบบฟัซซี



ภาพที่ 26 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของสภาพน้ำในคลอง

ในภาพที่ 26 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรรับเข้า (membership functions of gate water states) ซึ่งเป็นสภาพน้ำในคลองชลประทาน โดยประเมินจากระดับน้ำในคลองเทียบกับระดับน้ำเป้าหมาย แกนนอนแสดงสัมประสิทธิ์ของสภาพน้ำในคลอง แกนตั้งแสดงระดับความเป็นสมาชิกของสภาพน้ำ กำหนดค่าแกนนอนระหว่างศูนย์ถึงสอง และแบ่งระดับของสภาพน้ำในคลองเป็นสามระดับ ได้แก่ ขาดหรือคลองแห้ง (insufficient) ปกติสามารถส่งเข้าคลองได้ (sufficient) และน้ำเกิน (excess) ค่าศูนย์หมายถึงสภาพน้ำขาดมาก ค่าหนึ่งหมายถึงสภาพน้ำเท่ากับระดับเป้าหมาย ส่วนค่าสองหมายถึงสภาพน้ำเกินระดับเป้าหมายมาก



ภาพที่ 27 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระดับการยกบานประตูระบายน้ำ

ในภาพที่ 27 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของระดับการยกบานประตูระบายน้ำ (membership functions of gate coefficient) โดยแบ่งระดับการยกบานประตูออกเป็นห้าระดับ คือ ไม่ปรับบานประตู (not change) ยกบานประตูขึ้นน้อย (slightly increased opening) ยกบานประตูขึ้นมาก (more increased opening) กดบานประตูลง (slightly decreased opening) และกดบานประตูลง (slightly decreased opening) สัมประสิทธิ์การควบคุมบานประตูระบายน้ำมีค่าเป็นบวกและลบ ค่าบวก (+) หมายถึง การยกบานประตู ส่วนค่าลบ (-) หมายถึงการกดบานประตูลง

ตัวอย่าง กฎการควบคุมแบบฟัซซี่ สำหรับอาคารบังคับน้ำปากคลอง (head regulator)

- *"if (self is insufficient) and (DS is sufficient) then gateCoef is slightlyIncreased "*
- *"if (self is sufficient) and (DS is sufficient) then gateCoef is notChanged "*
- *"if (self is excess) and (DS is excess) then gateCoef is moreDecreased "*

ตัวอย่าง กฎการควบคุมแบบฟัซซี่ สำหรับอาคารทดน้ำกึ่งกลางคลอง (check regulator)

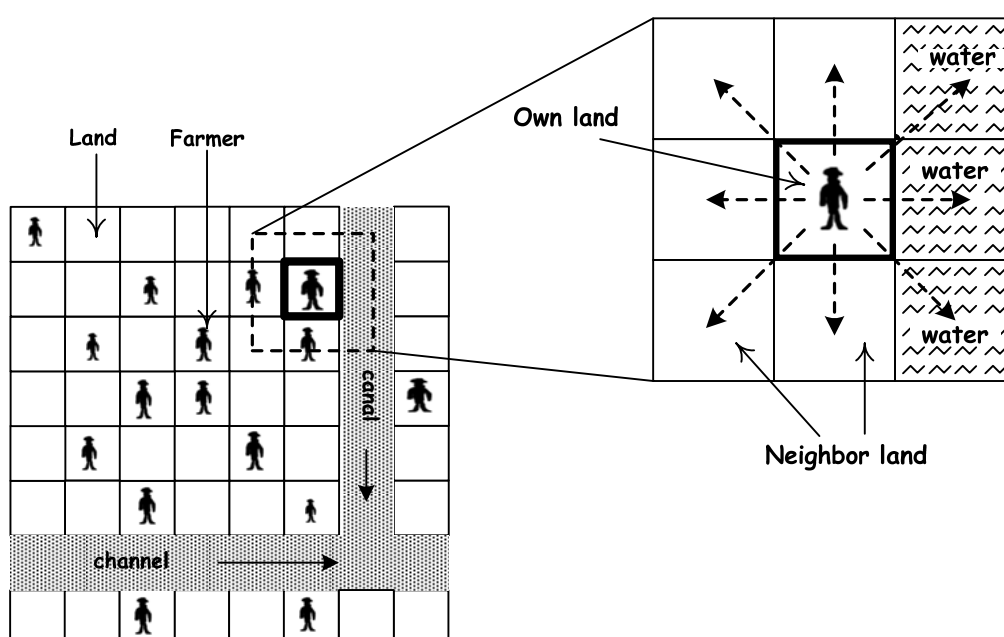
- *"if (self is insufficient) and (US is sufficient) and (DS is sufficient) then gateCoef is slightlyDecreased"*
- *"if (self is sufficient) and (US is excess) and (DS is insufficient) then gateCoef is slightlyIncreased"*
- *"if (self is excess) and (US is excess) and (DS is insufficient) then gateCoef is moreIncreased"*

ตัวอย่าง กฎการควบคุมแบบฟัซซี่ สำหรับอาคารบังคับน้ำปลายคลอง (tail regulator)

- *"if (self is insufficient) and (DS is insufficient) then gateCoef is moreDecreased"*
- *"if (self is sufficient) and (DS is insufficient) then gateCoef is notChanged "*
- *"if (self is excess) and (DS is excess) then gateCoef is moreIncreased"*

2.4 การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก

การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก เพื่อต้องการสร้างองค์ประกอบในการจำลองเกษตรกรด้วยเทคนิคเอเจนต์ (Agent-Based Modeling หรือ ABM) ในการนี้ ต้องการสร้างเกษตรกรให้เป็นเอเจนต์ ซึ่งคุณสมบัติของ “เอเจนต์ (agent)” คือ ความสามารถในการรับรู้ข้อมูลข่าวสารจากสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัว และสามารถตัดสินใจปรับเปลี่ยนพฤติกรรมตนเองได้ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้



ภาพที่ 28 การจำลองเกษตรกรด้วยเทคนิคเอเจนต์และเซลล์อ้อโตมาตา

ในภาพที่ 28 แสดงแนวคิดการจำลองเอเจนต์เกษตรกร ร่วมกับเทคนิคการจำลองแบบเซลล์อ้อโตมาตา (Cellular Automata หรือ CA) การจำลองทำโดยสร้างเกษตรกรให้เป็นเอเจนต์ ซึ่งเอเจนต์เกษตรกรที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติ อาทิ มีแปลงที่ดินเป็นของตนเอง (own land) มีรหัสตำแหน่งแปลง และชนิดของแปลงที่ดิน เกษตรกรสามารถทำกิจกรรม (action) ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกข้าวได้ อาทิ การเตรียมแปลง การปลูกข้าว หรือการหาแหล่งน้ำ เกษตรกรสามารถตัดสินใจดำเนินการใด ๆ ได้ด้วยตนเอง โดยอาจนำปัจจัยที่เกี่ยวข้องในแปลงรอบข้าง (neighbor land) ทั้งแปดด้านมาช่วยประกอบการตัดสินใจ

ในการนี้ การนำเทคนิคแบบเซลล์ต่ำอโตมาตาใช้งาน คือ การจำลองแปลงเพาะปลูกเป็นกริด โดยแต่ละกริดมีสถานะของตนเอง สามารถปรับเปลี่ยนสถานะเมื่อกริดรอบข้างมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม กริดยังไม่สามารถทำการตัดสินใจได้ ซึ่งต้องอาศัยการจำลองแบบเอเจนต์ โดยในที่นี้ คือ เอเจนต์เกษตรกร

หน้าที่ของเกษตรกรมีสองส่วนหลัก คือ หน้าที่เกี่ยวกับการปลูกข้าว และหน้าที่เกี่ยวกับการหาแหล่งน้ำ โดยการปลูกข้าว ได้แก่ การเตรียมแปลง ซึ่งเริ่มจากการเคลียร์พื้นที่ การไถ การตีดิน การทำเทือก การลущเทือก จนถึงการหว่านเมล็ดพันธุ์ และหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับน้ำชลประทาน ได้แก่ การตัดสินใจปลูกพืช การหาแหล่งน้ำ การดึงน้ำเข้าแปลง การให้น้ำชลประทาน และการระบายน้ำออกจากแปลง

1) การตัดสินใจปลูกข้าว

ปัจจัยสำหรับตัดสินใจปลูกข้าวของเกษตรกรมี 5 ปัจจัยหลัก ได้แก่

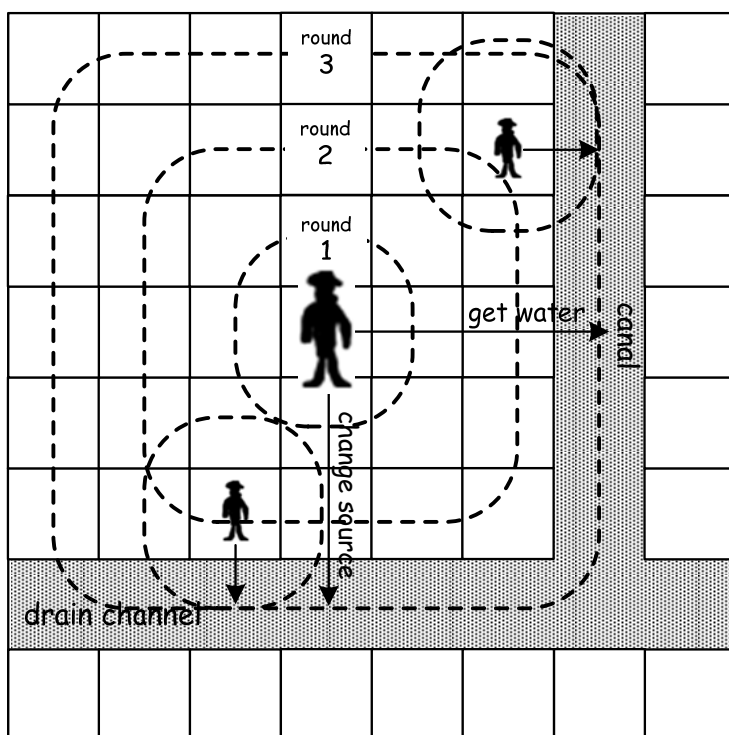
- (1) ปริมาณน้ำชลประทาน
- (2) ปริมาณน้ำฝน
- (3) ช่วงเวลาที่เสี่ยงต่อน้ำท่วม
- (4) พื้นที่เพาะปลูกที่เสี่ยงต่อน้ำท่วม
- (5) สภาพภูมิอากาศ

โดยเกษตรกรตัดสินใจปลูกพืชโดยพิจารณาปัจจัยข้างต้นเป็นรายเดือน ในเบื้องต้น เกษตรกรพิจารณาปริมาณน้ำต้นทุนสำหรับปลูกข้าวได้แก่ น้ำชลประทานและน้ำฝน ซึ่งถ้าหากปริมาณน้ำส่วนใดส่วนหนึ่งมีเพียงพอสำหรับการเพาะปลูก เกษตรกรก็จะตัดสินใจปลูกข้าว ถ้าดับถัดมา เกษตรกรพิจารณาปัจจัยที่มีโอกาสเสี่ยงต่อน้ำท่วมได้แก่ ช่วงระยะเวลาของเดือนที่เสี่ยงน้ำท่วม และตำแหน่งที่ตั้งแปลงเพาะปลูก ปัจจัยท้ายสุด คือ สภาพภูมิอากาศ เกษตรกรจะคาดการณ์ช่วงอายุของข้าวไม่ให้ออกดอกในช่วงเดือนที่มีอากาศค่อนข้างหนาว ซึ่งถ้าหากเกษตรกรตัดสินใจปลูกข้าวแล้ว ข้าวเจริญเติบโตในช่วงดังกล่าว อาจทำให้ข้าวไม่สามารถออกดอกได้มากเท่าที่ควร

2) การเลือกแหล่งน้ำ

ในภาพที่ 29 แสดงการเลือกแหล่งน้ำของเกษตรกร โดยเกษตรกรจะเลือกแหล่งน้ำที่เป็นคลองชลประทาน (canal) ก่อน แต่ถ้าหากคลองชลประทานไม่มี เกษตรกรจะเปลี่ยนไปเลือกแหล่งน้ำอื่นซึ่งอาจเป็นแม่น้ำหรือคลองระบายน้ำ (channel) สมมติกรณีเลือกแหล่งน้ำได้แล้ว เกษตรกรจะทำการตรวจสอบว่าน้ำมีเพียงพอต่อความต้องการหรือไม่ ถ้าน้ำมีพอเกษตรกรจะนำน้ำจากแหล่งนั้นไปใช้ในการเพาะปลูก แต่ถ้าหากน้ำมีไม่เพียงพอ เกษตรกรจะทำการเลือกแหล่งน้ำใหม่อีกครั้ง

การเลือกแหล่งน้ำครั้งนี้ ขั้นแรกเกษตรกรจะเลือกแหล่งน้ำที่อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกับแปลงที่ดินของตัวเองก่อน ซึ่งถ้าหากไม่มีแหล่งน้ำหรือน้ำมีไม่พอแล้ว เกษตรกรจะหาแหล่งใหม่รอบ ๆ แปลงที่ดินของตนเอง และถ้าหากยังไม่สามารถหาแหล่งน้ำได้อีก เกษตรกรจะขยายการหาแหล่งน้ำรอบแปลงตนเองไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะพบแหล่งน้ำ

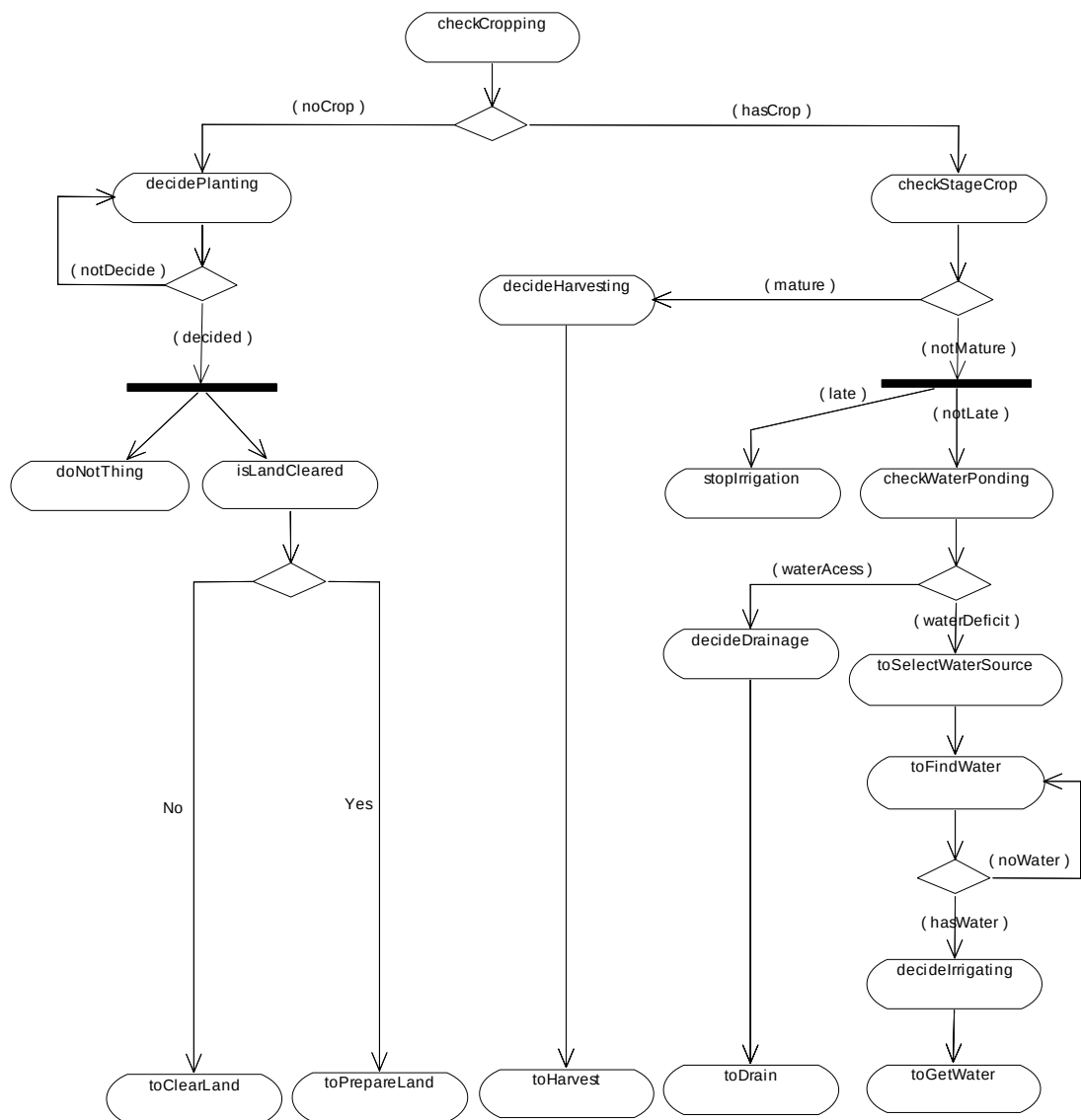


ภาพที่ 29 กระบวนการเลือกแหล่งน้ำสำหรับปลูกข้าวของเกษตรกร

3) ขั้นตอนดำเนินงานเพาะปลูกของเกษตรกร

ขั้นตอนการทำงานของเกษตรกร พอสรุปเป็นขั้นตอนได้ในภาพที่ 30 โดยเริ่มแรกเกษตรกรทำการตรวจสอบแปลงเพาะปลูกของตนเองว่ามีพืชปลูกอยู่หรือไม่ ถ้าพบว่าไม่มีพืชเกษตรกรจะดำเนินการตัดสินใจต่อว่าจะปลูกพืชหรือไม่ ถ้าตัดสินใจไม่ปลูกเกษตรกรก็จะไม่มีการดำเนินการใด ๆ ต่อ แต่ถ้าเกษตรกรตัดสินใจปลูกพืช จะเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมแปลงเพาะปลูก

ทั้งนี้ ถ้าเกษตรกรพิจารณาแปลงตนเองแล้วพบว่ามีพืช เกษตรกรจะดำเนินการต่อโดยตรวจสอบว่าพืชที่ปลูกนั้น อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตระยะที่เท่าใด ซึ่งถ้าพบว่าพืชแก่พอที่จะเก็บเกี่ยว เกษตรกรจะทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตทันที การเก็บเกี่ยวผลผลิต แต่ถ้าเกษตรกรพบว่าพืชกำลังอยู่ในช่วงใกล้เก็บเกี่ยว เกษตรกรจะทำการหยุดการให้น้ำชลประทานก่อนที่จะทำการเก็บเกี่ยวเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ในการนี้ถ้าเกษตรกรพิจารณาว่าพืชกำลังเจริญเติบโต เกษตรกรจะคอยติดตามสภาพน้ำในแปลง ซึ่งถ้าหากน้ำในแปลงมากจนเกินไปเกษตรกรก็จะทำการระบายน้ำออก แต่ถ้าน้ำในแปลงยังขาดหรือแห้งไม่เพียงพอ เกษตรกรก็จะทำการหาแหล่งน้ำและดำเนินการให้น้ำชลประทานต่อไป



ภาพที่ 30 ขั้นตอนการปลูกข้าวของเกษตรกร

3. การตรวจสอบผลลัพธ์

การทดสอบแบบจำลองเป็นขั้นตอนตรวจสอบความถูกต้องเหมาะสมของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนนี้แบ่งออกเป็น (1) การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำผิวดินกับแบบจำลอง GSSHA (2) การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำในดินกับแบบจำลอง SWAP (3) การศึกษาอิทธิพลการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง และ (4) การจำลองระบบย่อย แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำผิวดินกับแบบจำลอง GSSHA

การจำลองการไหลของน้ำบนผิวดินมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อตรวจสอบแบบจำลองในส่วนของการไหลของน้ำบนผิวดิน โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลอง GSSHA รวมถึงการใช้แบบจำลองประเมินขนาดกริดและช่วงเวลา โดยข้อกำหนดการจำลองสรุปในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อกำหนดการจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน

ตัวแปร	คำอธิบาย
1. กรณศึกษา	- จำลองการไหลของน้ำบนผิวดินบนพื้นที่ลุ่มน้ำกระเสียว - ตรวจสอบความถูกต้องกับแบบจำลอง GSSHA - ประเมินขนาดกริดและช่วงเวลา
2. ระยะเวลาจำลอง	- 120 ชั่วโมง
3. ขั้นเวลา	- เป็นวินาที มี 5 ขั้น ตั้งแต่ 15, 30, 60 และ 120 วินาที
4. ขนาดกริด	- เป็นเมตร มี 3 ขนาด คือ 250, 500 และ 1,000 เมตร
5. ข้อมูลภูมิอากาศ	- ข้อมูลภูมิอากาศใช้ของสถานีตรวจอากาศ จ.ชัยนาท - ผ่นเป็นรายชั่วโมงวิเคราะห์จากสถานี อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี
6. ระบบชลประทาน	- ไม่มี
7. พืช	- ไม่มี
8. ทิศทางการไหล	- กำหนดจากข้อมูล DEM
9. คุณสมบัติดิน	- ไม่มีการซึมผ่านผิวดิน
10. เกษตรกร	- ไม่มี

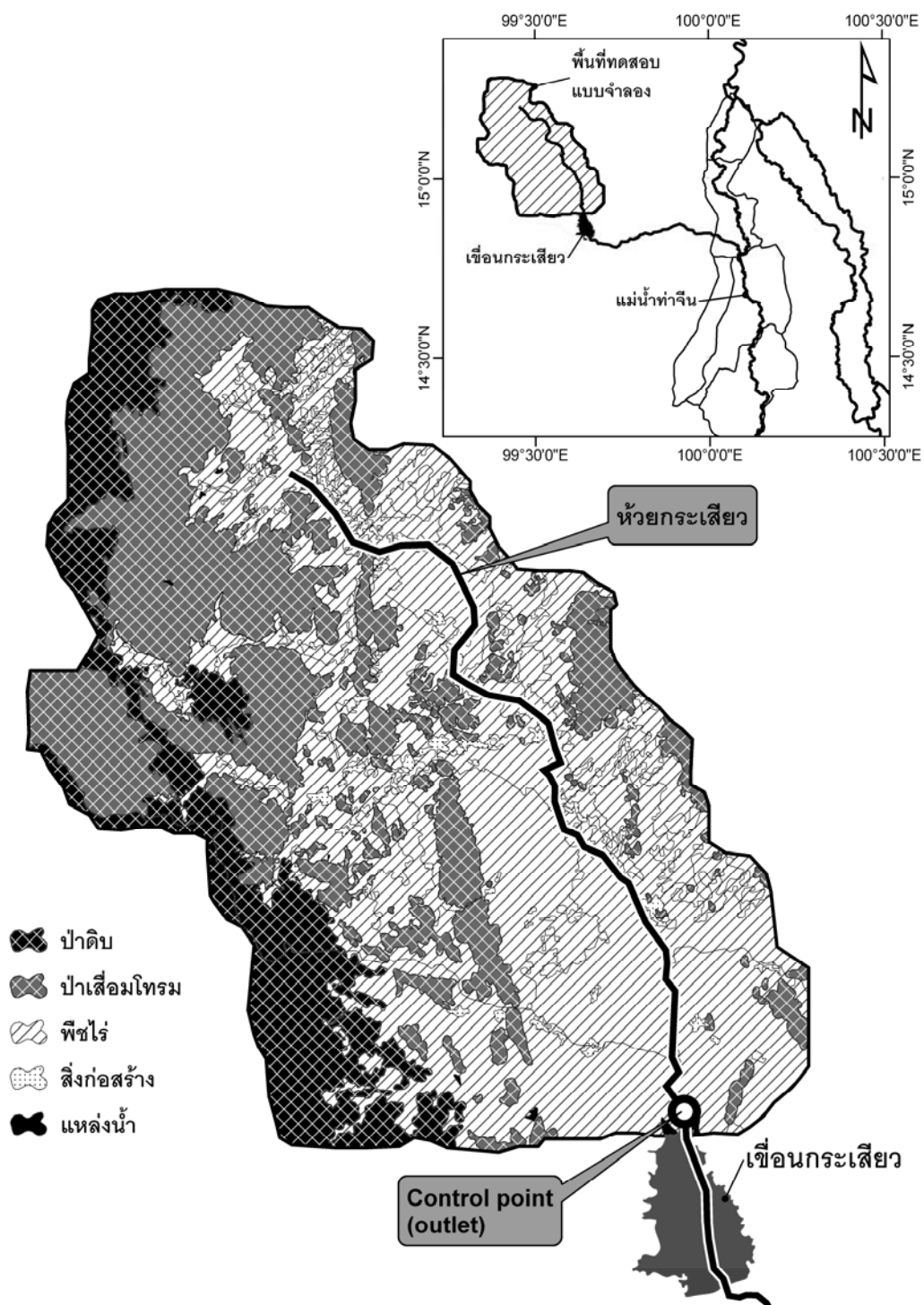
การจำลองการไหลของน้ำบนผิวดินโดยกำหนดพารามิเตอร์นำเข้าของทั้งสองแบบจำลองเหมือนกัน ผลลัพธ์การจำลองพิจารณากราฟน้ำท่าที่จุดท่าออกของกลุ่มน้ำ ได้แก่ รูปร่างของกราฟน้ำท่า ระยะเวลาที่เกิด และอัตราการไหลสูงสุด

พื้นที่ทดสอบแบบจำลอง (ในภาพที่ 31) เป็นพื้นที่ตอนบนของกลุ่มน้ำกระเสียว ซึ่งเป็นกลุ่มน้ำย่อยของแม่น้ำท่าจีน ตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของแม่น้ำท่าจีน มีขนาดพื้นที่รับน้ำประมาณ 870 ตารางกิโลเมตร ห้วยกระเสียวเป็นลำน้ำสายหลัก ลำน้ำนี้รองรับปริมาณน้ำท่าผิวดินที่ไหลจากพื้นที่สองฝั่งลุ่มน้ำที่เก็บน้ำกระเสียว ที่อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี สาเหตุที่เลือกพื้นที่แห่งนี้ เพราะเป็นพื้นที่ต้นน้ำของกลุ่มน้ำกระเสียว ซึ่งอยู่ในเขตพื้นที่ศึกษา พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าดิบและป่าเสื่อมโทรมมีการตั้งถิ่นฐานของชุมชนน้อยจึงมีการรบกวนกระบวนการทางอุทกวิทยาไม่มาก

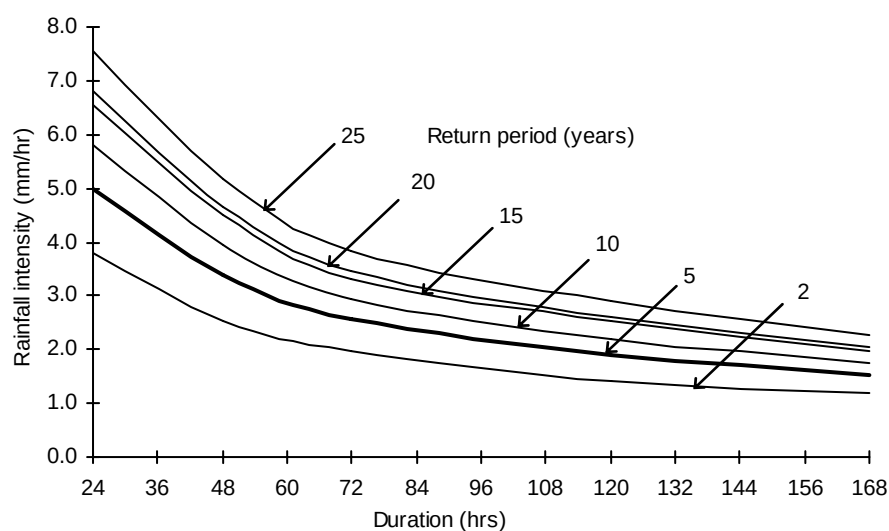
ขั้นเวลาและระยะเวลา กำหนดขั้นเวลา (time step) ในการจำลองการไหลของน้ำ 60 วินาที (time step) และระยะเวลาจำลองการไหลของน้ำ 120 ชั่วโมง หรือ 5 วัน ส่วนขนาดกริดทำการจำลองการไหลบนพื้นที่กริดขนาด 1,000 เมตร กล่าวคือ พื้นที่การไหลของน้ำบนผิวดินถูกแทนเป็นกริดรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1,000 เมตร

รูปแบบของฝน จำลองการตกของฝนเป็นแบบกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ ปริมาณน้ำฝนกำหนดจากโค้งความเข้ม-ระยะเวลาการตก-ความถี่ ของฝน (intensity duration rainfall หรือ IDF) ที่ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง รอบปีการเกิดซ้ำ 5 ปี เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นความลึกน้ำ 12 เซนติเมตร ในภาพที่ 32 แสดงโค้ง IDF ที่มีรอบปีการเกิดซ้ำตั้งแต่ 2 ปี ถึง 25 ปี โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนของสถานีบ้านไร่ อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี ซึ่งเป็นสถานีที่อยู่ในพื้นที่ทดสอบแบบจำลอง

ทั้งนี้ การจำลองไหลของน้ำในขั้นนี้ กำหนดให้ไม่มีการซึมผ่านผิวดิน เนื่องจากต้องการตรวจสอบความถูกต้องเฉพาะกระบวนการไหลของน้ำผิวดิน ส่วนค่าความขรุขระของพื้นผิวแบ่งตามชนิดของสิ่งปกคลุมตามแนวทางของ USGS (2006) โดยจำแนกพื้นผิวดินออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ป่าดิบ ป่าเสื่อมโทรม และพืชไร่ ซึ่งเท่ากับ 0.104, 0.084 และ 0.059 ตามลำดับ ส่วนค่าความขรุขระของทางน้ำ เท่ากับ 0.032 ตลอดลำน้ำ



ภาพที่ 31 พื้นที่จำลองการไหลของน้ำอยู่ตอนบนของเขื่อนกระเสียว



ภาพที่ 32 โค้งความเข้ม-ระยะเวลาการตก-ความถี่ ของฝน อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี

การประเมินขนาดกริดและชั้นเวลา โดยภายหลังการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง ขั้นตอนต่อมาเป็นการนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาทำการประเมินขนาดกริดและชั้นเวลา โดยสร้างสถานการณ์จำลองการไหลของน้ำ 15 กรณี ตามขนาดของกริดและชั้นเวลา โดยขนาดกริดถูกแบ่งออกเป็น 3 ขนาด คือ 250, 500 และ 1,000 เมตร ชั้นเวลามี 5 ระดับ ได้แก่ 15, 30, 60, 90 และ 120 วินาที ซึ่งแสดงสถานการณ์การจำลองดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สถานการณ์สำหรับจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน

Times step (second)	Grids size (m)		
	250 m	500 m	1000 m
15	G250T15	G500T15	G1000T15
30	G250T30	G500T30	G1000T30
60	G250T60	G500T60	G1000T60
90	G250T90	G500T90	G1000T90
120	G250T120	G500T120	G1000T120

หมายเหตุ “G1000T60” หมายถึง จำลองการไหลบนกริดขนาด 1,000 เมตร ชั้นเวลา 60 วินาที

3.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำในดินกับแบบจำลอง SWAP

การจำลองการไหลของน้ำในดินมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลการไหลของน้ำในดิน วิธีการจำลองทำโดยจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน 2 กรณี คือ กรณีดินเปล่า (bare soil) และกรณีปลูกหญ้า (grass covered surface) การทวนสอบผลลัพธ์ทำโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลอง SWAP โดยกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้งสองเหมือนกัน ข้อกำหนดของการจำลองแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อกำหนดการจำลองการไหลของน้ำในดิน

รายการ	คำอธิบาย
1. กรณีศึกษา	- จำลองการไหลของน้ำในดิน
2. ระยะเวลาจำลอง	- รายวัน รวม 2 ปี เริ่ม 1 มกราคม 2544 ถึง 31 ธันวาคม 2545
3. ขนาดกริด	- จำลอง 1 กริด ขนาด 1,000 เมตร
4. ข้อมูลภูมิอากาศ	- ใช้ข้อมูลรายวันจากสถานีตรวจอากาศเกษตรชัยนาท ประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด, ความยาวนานของแสงแดด, ความชื้นสัมพัทธ์, ความเร็วลม, และปริมาณน้ำฝน
5. ระบบชลประทาน	- ไม่มี
6. พืช	- หญ้า
7. ภูมิประเทศ	- ไม่มี เพราะจำลองการไหลของน้ำเฉพาะในแนวดิ่ง
8. คุณสมบัติดิน	- คุณสมบัติชุดดินสระบุรีและชุดดินนครปฐม
9. เกษตรกร	- ไม่มี
10. ข้อกำหนดอื่น	- การจำลองพิจารณาการไหลของน้ำลงสู่ดินในแนวดิ่ง 1 มิติ โดยปริมาณน้ำที่ไหลพิจารณาเฉพาะปริมาณน้ำฝน

ข้อมูลพืช เลือหญ้าเป็นพืชอ้างอิงซึ่งใช้เฉพาะการจำลองในกรณีปลูกหญ้า (grass-covered surface) โดยกำหนดความสูงคงที่ 12 เซนติเมตร (Allen *et al.*, 1998) และปลูกตลอดช่วงเวลาที่ยาลองสถานการณ์

ข้อมูลดินใช้ชุดดินสระบุรี (Saraburi soil series หรือ Sb) เป็นตัวแทนดินเหนียวและชุดดินนครปฐม (Nakhon Pathom soil series หรือ Np) เป็นตัวแทนดินร่วน ทั้งนี้เนื่องจาก ดินในพื้นที่ศึกษามีคุณสมบัติเป็นเนื้อดินเหนียวและดินร่วนซึ่งมีการกระจายตัวค่อนข้างมาก และชุดดินสระบุรีและชุดดินนครปฐมเป็นชุดดินที่มีคุณสมบัติของเนื้อดินเป็นดินเหนียวและดินร่วน ซึ่งพบมากในพื้นที่ ดังนั้นจึงเลือกชุดดินทั้งสองเป็นตัวแทน

คุณสมบัติของหน้าตัดดินแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เนื้อดินและโครงสร้างชั้นดิน เนื้อดินกำหนดให้เป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งหน้าตัดดิน (homogenous) ซึ่งเป็นชุดดินสระบุรีและชุดดินนครปฐมโดยคุณสมบัติของเนื้อดินทั้งสองอ้างอิงจากกรมพัฒนาที่ดิน (สถิระและคณะ, 2547) (ในตารางที่ 7) ในส่วนของโครงสร้างชั้นดิน แบ่งชั้นดินเป็น 7 ชั้น (horizons) และแบ่งชั้นดินย่อย (compartments) ออกเป็น 18 ชั้น รวมความลึกทั้งหมด 200 ซม ค่าพารามิเตอร์ทางศาสตร์ของดินใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนคุณสมบัติดิน (pedotransfer function) (Wosten *et al.*, 2001) โดยใช้ข้อมูลเนื้อดิน (soil texture) ค่าอินทรีย์วัตถุ (organic matter) และความหนาแน่นรวม (bulk density) โดยค่าศาสตร์ดินที่ได้แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ดินสำหรับประมาณค่าชลศาสตร์ของดิน

Soil Series	%Sand	%Silt	%Clay	%OM	bulk density (g cm ⁻¹)
Nakhon Pathom (Np)	12	52	36	1	1.35
Saraburi (Sb)	5	33	62	1	1.35

ที่มา: สิริระและคณะ (2547)

ตารางที่ 8 ค่าชลศาสตร์ดินในชุดดินนครปฐมและชุดดินสระบุรี

Soil series	Layer id	depth below surface (m)	soil depth (m)	Number of compartment	Porosity (-)	Ks (mm/d)	Ores (m3/m3)	Os (m3/m3)	n (-)	alfa (1/cm)	lamda (-)
Np	1	0.05	0.01	5	0.462	139.0	0.0100	0.4620	1.1570	0.0185	0.5
	2	0.15	0.02	5	0.462	139.0	0.0100	0.4620	1.1570	0.0185	0.5
	3	0.25	0.05	2	0.462	139.0	0.0100	0.4620	1.1570	0.0185	0.5
	4	0.45	0.10	2	0.462	139.0	0.0100	0.4620	1.1570	0.0185	0.5
	5	0.85	0.20	2	0.462	139.0	0.0100	0.4620	1.1570	0.0185	0.5
	6	1.25	0.40	1	0.462	139.0	0.0100	0.4620	1.1570	0.0185	0.5
	7	2.00	0.75	1	0.462	139.0	0.0100	0.4620	1.1570	0.0185	0.5
Sb	1	0.05	0.01	5	0.480	34.5	0.0100	0.4800	1.1184	0.0140	0.5
	2	0.15	0.02	5	0.480	34.5	0.0100	0.4800	1.1184	0.0140	0.5
	3	0.25	0.05	2	0.480	34.5	0.0100	0.4800	1.1184	0.0140	0.5
	4	0.45	0.10	2	0.480	34.5	0.0100	0.4800	1.1184	0.0140	0.5
	5	0.85	0.20	2	0.480	34.5	0.0100	0.4800	1.1184	0.0140	0.5
	6	1.25	0.40	1	0.480	34.5	0.0100	0.4800	1.1184	0.0140	0.5
	7	2.00	0.75	1	0.480	34.5	0.0100	0.4800	1.1184	0.0140	0.5

3.3 การศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง

การศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลองมีวัตถุประสงค์ที่จะตอบคำถามหลัก คือ การกำหนดคุณสมบัติของหน้าตัดดินต่างกันมีผลทำให้ผลลัพธ์การจำลองแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวนี้จะใช้เป็นแนวทางในการกำหนดคุณสมบัติของหน้าตัดดินในงานวิจัยต่อไป

ในตารางที่ 9 แสดงข้อกำหนดการจำลอง โดยการจำลองการไหลของน้ำในดินเป็นรายวัน เริ่มตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2543 ถึง 31 ธันวาคม 2545 รวมระยะเวลา 2 ปี 3 เดือน การจำลองเป็นการจำลองระดับแปลง ซึ่งแปลงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1,000 เมตร

ตารางที่ 9 ข้อกำหนดการศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง

รายการ	คำอธิบาย
1. กรณีศึกษา	- จำลองการไหลของน้ำในดิน เพื่อศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง
2. ระยะเวลาจำลอง	- รายวัน เริ่ม 1 ตุลาคม 2543 ถึง 31 ธันวาคม 2545 รวม 2 ปี 3 เดือน
3. ขนาดกริด	- จำลองเพียง 1 กริด ขนาด 1,000 เมตร
4. ข้อมูลภูมิอากาศ	- ใช้ข้อมูลรายวันจากสถานีตรวจอากาศเกษตรชัยนาท ประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด, ความยาวนานของแสงแดด, ความชื้นสัมพัทธ์, ความเร็วลม, และปริมาณน้ำฝน
5. ระบบชลประทาน	- ไม่มี
6. พืช	- ไม่มี
7. ภูมิประเทศ	- ไม่มี เพราะจำลองการไหลของน้ำเฉพาะในแนวดิ่ง
8. คุณสมบัติดิน	- เนื้อดิน 8 ชนิด และหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ
9. เกษตรกร	- ไม่มี
10. ข้อกำหนดอื่น	- การจำลองพิจารณาการไหลของน้ำลงสู่ดินในแนวดิ่ง 1 มิติ

วิธีการศึกษาทำโดยกำหนดรูปแบบของหน้าตัดดินต่างกัน 7 รูปแบบ (D1 ถึง D7) ดังแสดงในตารางที่ 10 โดยกำหนดให้หน้าตัดดินมี 3 ชั้น (horizon) ได้แก่ ดินชั้นบน ดินชั้นกลาง และดินชั้นล่าง ซึ่งดินทั้งสามชั้นกำหนดขนาดความหนาต่างกัน ในส่วนของเนื้อดิน กำหนดให้ดินเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหน้าตัด ในงานวิจัยนี้ ทดสอบเนื้อดิน 8 ชนิด โดยเริ่มจากเนื้อดินละเอียดจนถึงเนื้อดินหยาบ ดังแสดงชนิดดินในตารางที่ 11

การประมาณค่าชลศาสตร์ของดิน ทำโดยใช้โปรแกรม Rosetta (Schaap *et al.*, 2001) ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับประมาณค่าชลศาสตร์ของดิน การประมาณค่าใช้ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกของชั้นดิน และสัดส่วนการกระจายตัวของดิน ได้แก่ ดินทราย (Sand) ดินทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) โดยแสดงตัวอย่างคุณสมบัติของดินเหนียวสำหรับประมาณค่าชลศาสตร์ดินในตารางที่ 13 และในส่วนของดินเนื้ออื่น ๆ แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 10 การกำหนดคุณสมบัติหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ

หน้าตัดดิน(Soil profile)	ดินชั้นบน	ดินชั้นกลาง	ดินชั้นล่าง
	20 cm	80 cm	100 cm
D1	1 @ 20 cm	1 @ 80 cm	1 @ 100 cm
D2	1 @ 20 cm	4 @ 20 cm	5 @ 20 cm
D3	4 @ 5 cm	4 @ 20 cm	1 @ 100 cm
D4	5 @ 1 cm, 3 @ 5 cm	4 @ 20 cm	1 @ 100 cm
D5	2 @ 10 cm	8 @ 10 cm	5 @ 20 cm
D6	2 @ 10 cm	8 @ 10 cm	10 @ 10 cm
D7	4 @ 5 cm	16 @ 5 cm	20 @ 5 cm

ตารางที่ 11 ชนิดของเนื้อดินที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง

ลำดับ	เนื้อดิน	Texture	Code
1	ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง	Silty Clay Loam	SiCL
2	ดินเหนียวปนทรายแป้ง	Silty Clay	SiC
3	ดินเหนียว	Clay	C
4	ดินเหนียวปนดินร่วน	Clay Loam	CL
5	ดินร่วน	Loam	L
6	ดินร่วนปนดินเหนียวปนทราย	Sandy Clay Loam	SCL
7	ดินร่วนปนทราย	Sandy Loam	SL
8	ดินทรายปนดินร่วน	Loamy Sand	LS

จากการกำหนดรูปแบบของหน้าตัดดินต่างกัน 7 รูปแบบ และเนื้อดิน 8 ชนิดในข้างต้น ทำให้สามารถสร้างสถานการณ์การจำลองการไหลของน้ำในดินได้ 56 สถานการณ์ ซึ่งแสดงชื่อของสถานการณ์ทั้งหมดในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การกำหนดสถานการณ์การจำลองจำนวน 56 สถานการณ์

Soil profile	Soil texture							
	SiCL	SiC	C	CL	L	SCL	SL	LS
D1	D1SiCL	D1SiC	D1C	D1CL	D1L	D1SCL	D1SL	D1LS
D2	D2SiCL	D2SiC	D2C	D2CL	D2L	D2SCL	D2SL	D2LS
D3	D3SiCL	D3SiC	D3C	D3CL	D3L	D3SCL	D3SL	D3LS
D4	D4SiCL	D4SiC	D4C	D4CL	D4L	D4SCL	D4SL	D4LS
D5	D5SiCL	D5SiC	D5C	D5CL	D5L	D5SCL	D5SL	D5LS
D6	D6SiCL	D6SiC	D6C	D6CL	D6L	D6SCL	D6SL	D6LS
D7	D7SiCL	D7SiC	D7C	D7CL	D7L	D7SCL	D7SL	D7LS

หมายเหตุ “D5C” หมายถึง การจำลองด้วยหน้าตัดดินรูปแบบ “D5” ซึ่งมีเนื้อดินเป็นดินเหนียว

ตารางที่ 13 ตัวอย่างคุณสมบัติของดินเหนียวสำหรับประมาณค่าชลศาสตร์ดิน

Soil profile	Layer id	Depth below surface (m)	Soil depth (m)	Number of compartment	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk density (g/cm ³)
D1	1	0.20	0.20	1	20	20	60	1.36
	2	1.00	0.80	1	20	20	60	1.40
	3	2.00	1.00	1	20	20	60	1.42
D2	1	0.20	0.20	1	20	20	60	1.36
	2	1.00	0.20	4	20	20	60	1.39
	3	2.00	0.20	5	20	20	60	1.42
D3	1	0.20	0.05	4	20	20	60	1.35
	2	1.00	0.20	4	20	20	60	1.39
	3	2.00	1.00	1	20	20	60	1.42
D4	1	0.05	0.01	5	20	20	60	1.34
	2	0.20	0.05	3	20	20	60	1.34
	3	1.00	0.20	4	20	20	60	1.39
	4	2.00	1.00	1	20	20	60	1.42
D5	1	0.20	0.10	2	20	20	60	1.35
	2	1.00	0.10	8	20	20	60	1.39
	3	2.00	0.20	5	20	20	60	1.42
D6	1	0.20	0.10	2	20	20	60	1.35
	2	1.00	0.10	8	20	20	60	1.39
	3	2.00	0.10	10	20	20	60	1.41
D7	1	0.20	0.05	4	20	20	60	1.35
	2	1.00	0.05	16	20	20	60	1.39
	3	2.00	0.05	20	20	20	60	1.41

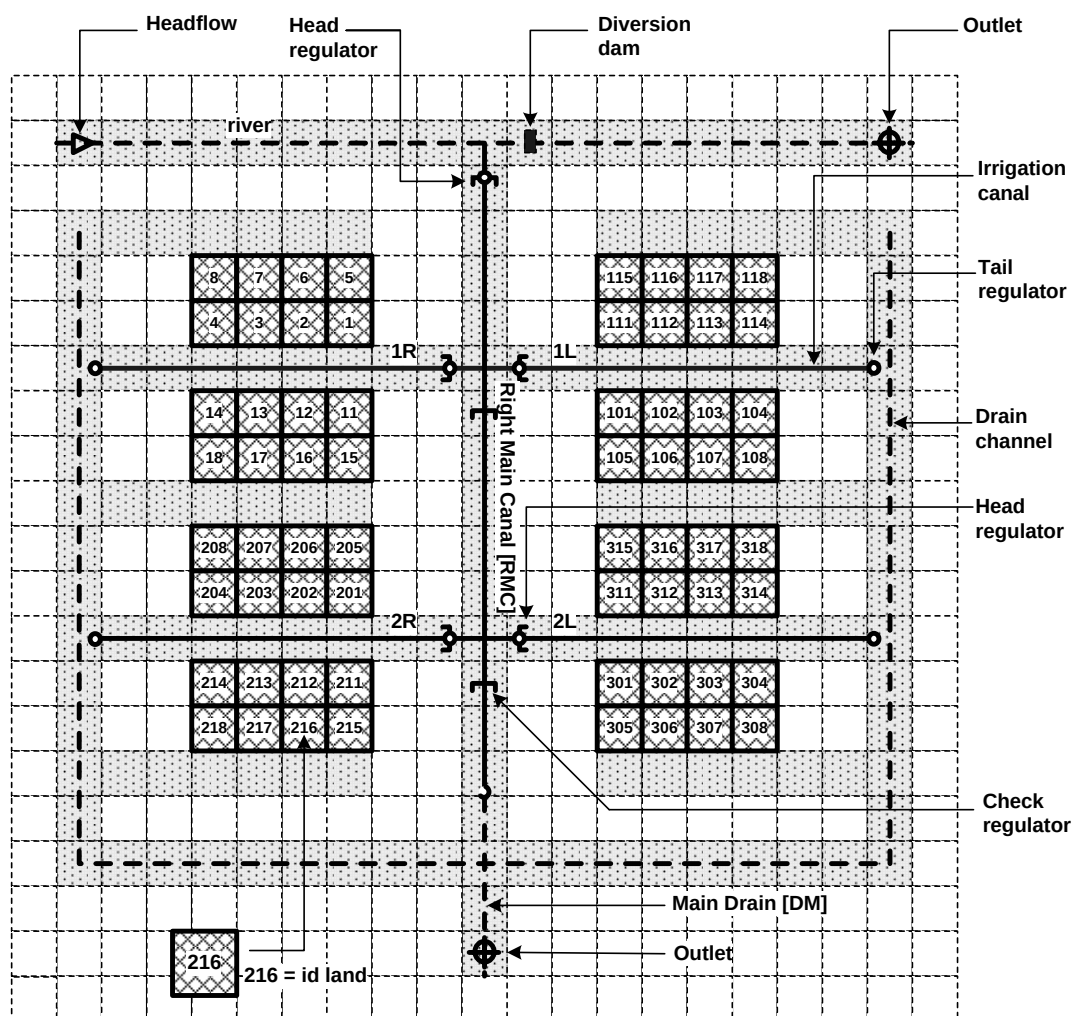
3.4 การจำลองระบบย่อย

ภายหลังจากการทดสอบแต่ละโมดูลในแบบจำลอง ขั้นตอนต่อมาเป็นการรวมทุกองค์ประกอบเข้าด้วยกันแล้วทำการทดสอบแบบจำลองทั้งระบบ การทดสอบทำโดยจำลองระบบการกระจายน้ำชลประทานบนพื้นที่ชลประทานสมมุติ จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการตรวจสอบความสมเหตุสมผล สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่ ซึ่งผลลัพธ์ที่นำมาพิจารณาได้แก่ สมดุลน้ำในระบบส่งน้ำ ในระบบคลองส่งน้ำ ปริมาณการใช้น้ำชลประทาน รวมถึงกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของเกษตรกร การทดสอบมีข้อกำหนดดังนี้

องค์ประกอบระบบชลประทาน ในภาพที่ 33 แสดงระบบชลประทานสมมุติ ประกอบด้วย คลองส่งน้ำสายใหญ่ ซึ่งเป็นคลองส่งน้ำสายหลักของระบบ รับน้ำจากแม่น้ำ (river) โดยการทดน้ำจากหัวงาน (headworks) คลองส่งน้ำสายใหญ่ส่งน้ำให้แก่พื้นที่ชลประทาน 40,000 ไร่ โดยแบ่งเป็นโซนส่งน้ำ 4 โซน แต่ละโซนมีพื้นที่ 10,000 ไร่ แยกตามคลองซอย 4 แห่ง ได้แก่ 1R, 2R, 1L และ 1R ทั้งนี้ คลองซอยแต่ละสายส่งน้ำเข้าพื้นที่ทางฝั่งซ้ายและฝั่งขวา โดยแต่ละฝั่งมีพื้นที่ชลประทาน 5,000 ไร่

อาคารบังคับน้ำ คลองส่งน้ำสายใหญ่มีอาคารบังคับน้ำ 4 แห่ง ได้แก่ อาคารบังคับน้ำปากคลอง (head regulator) 1 แห่ง อาคารทดน้ำกลางคลอง (check regulator) 2 แห่ง และอาคารบังคับน้ำปลายคลอง (tail regulator) 1 แห่ง อาคารบังคับน้ำปากคลองทำหน้าที่ควบคุมน้ำที่ไหลจากลำน้ำเข้าสู่คลอง ส่วนอาคารทดน้ำกลางทำหน้าที่ทดน้ำให้กับพื้นที่ชลประทานสองฝั่งคลองผ่านทางคลอง 1R, 1L, 2R และ 2L ส่วนอาคารบังคับน้ำปลายคลองทำหน้าที่ควบคุมน้ำส่วนเกินให้ระบายลงสู่คลองระบายสายใหญ่ คลองซอยทั้ง 4 สาย มีอาคารควบคุมน้ำปากคลอง 1 แห่ง และอาคารบังคับน้ำปลายคลอง 1 แห่ง ซึ่งที่ปลายคลองน้ำส่วนเกินจะถูกบังคับให้ระบายลงสู่คลองระบายสายย่อยแล้วจึงไหลไปรวมที่คลองระบายสายใหญ่ จากนั้นจึงไหลออกจากระบบผ่านจุดทางออกท้ายน้ำ (outlet)

การจำลองสรุปเป็นข้อกำหนดไว้ในตารางที่ 14 ข้อกำหนดในการจำลองระบบย่อย ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์สมมติ 2 กรณี คือ กรณีส่งน้ำตลอดปี และกรณีส่งน้ำเป็นรายฤดูการ



ภาพที่ 33 ระบบชลประทานสำหรับจำลองระบบการกระจายน้ำชลประทาน

หมายเหตุ กริดขนาด 1000 เมตร (1 กริด เท่ากับ 625 ไร่) เช่น พื้นที่ฝั่งขวาของคลอง 1R มีพื้นที่ชลประทาน 5,000 ไร่ ซึ่งแทนด้วยกริดจำนวน 8 กริด (หมายเลข 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)

ตารางที่ 14 ข้อกำหนดในการจำลองระบบย่อย

รายการ	คำอธิบาย
1. กรณีศึกษา	- กรณีที่ 1 ส่งน้ำตลอดปี กรณีที่ 2 ส่งน้ำตามฤดูกาล
2. เวลาจำลอง	- รายวัน เริ่ม 1 กรกฎาคม 2543 ถึง 31 ธันวาคม 2545
3. ขนาดกริด	- 1,000 เมตร
4. อัตราการไหล	- มี 1 ตำแหน่ง ที่จุดทางเข้าแม่น้ำ - กำหนดให้คงที่ 20 ลบ.ม ต่อวินาที
5. ข้อมูลภูมิอากาศ	- ข้อมูลภูมิอากาศใช้ของสถานีตรวจอากาศ จ.ชัยนาท - ข้อมูลฝน ไม่มี
6. ระบบชลประทาน	
- ทางน้ำ	- คุณสมบัติคลองส่งน้ำ อาทิ ความกว้าง ความลึก
- อาคารบังคับน้ำ	- มีจำนวน 10 แห่ง (รายละเอียดเกี่ยวกับ ปตร. แสดงในภาคผนวก ข)
- การควบคุม	- ควบคุมอาคารบังคับน้ำแบบพีซีซี
7. พืช	- ข้าว
8. ภูมิประเทศ	
- ทิศทางการไหล	- กำหนดตามการไหลของน้ำ
- ระดับความสูง	- พื้นที่ราบความสูง 15 เมตร
- พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม	- พื้นที่ทั้งหมดไม่เสี่ยงต่อน้ำท่วม
- ตำแหน่งละติจูด	- เท่ากับที่ 13.5
9. คุณสมบัติดิน	
- เนื้อดิน	- ดินเหนียวปนดินร่วน
- หน้าตัดดิน	- กำหนดเหมือนกันทุกแปลง (คุณสมบัติชลศาสตร์ในภาคผนวก ข)
10. เกษตรกร	
- การใช้น้ำ	- ใช้น้ำจากคลองชลประทานเท่านั้น
- การเตรียมแปลง	
- ระยะเวลา	- เคลียร์พื้นที่ 5 วัน, ไถ 3 วัน, ตีดิน 7 วัน, ทำเทือก 2 วัน ลูบเทือก 1 วัน
- น้ำชลประทาน	- เตรียมดินครั้งแรก 5 มม, การไถรักษาระดับน้ำไว้ที่ 5 ซม

Dry season	weekly plan																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Continuous plan	<																									>
Seasonal plan							<																>			

ภาพที่ 34 แผนการส่งน้ำรายสัปดาห์ในช่วงแล้ง (ประมาณเดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน)

หมายเหตุ กรณีส่งน้ำตลอดปี (continuous plan)

กรณีส่งน้ำตามฤดูกาล (seasonal plan) (เริ่มช่วงแล้งสัปดาห์ที่ 7 หยุดส่งน้ำสัปดาห์ที่ 23)

Wet season	weekly plan																									
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
Continuous plan	<																									>
Seasonal plan	<																>									

ภาพที่ 35 แผนการส่งน้ำรายสัปดาห์ในช่วงฝน (ประมาณเดือนกรกฎาคมถึงเดือนธันวาคม)

หมายเหตุ กรณีส่งน้ำตลอดปี (continuous plan)

กรณีส่งน้ำตามฤดูกาล (seasonal plan) (เริ่มสัปดาห์ที่ 27 หยุดสัปดาห์ที่ 43)

4. การประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน

การประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน เป็นการประยุกต์แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในระดับลุ่มน้ำ เพื่อใช้ในการศึกษาการบริหารจัดการน้ำ การศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

- (1) การวิเคราะห์พื้นที่ศึกษา เป็นการสำรวจและรวบรวมข้อมูลที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองประกอบด้วย ข้อมูลทางกายภาพของพื้นที่ ซึ่งได้จากการสำรวจในพื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีน และจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการสำรวจข้อมูลเชิงพฤติกรรมในการทำนาของเกษตรกร กล่าวคือ เป็นการสำรวจเพื่อประมวลผลวิธีการและขั้นตอนในการทำนาของเกษตรกรโดยวิธีการสัมภาษณ์
- (2) การสร้างแบบจำลอง เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนการสำรวจพื้นที่ โดยข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์จะถูกนำมาเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลอง ส่วนข้อมูลจากเกษตรกรจะถูกนำไปเป็นข้อกำหนดการจำลอง
- (3) การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลการบันทึก เป็นขั้นตอนตรวจสอบผลลัพธ์ โดยนำข้อมูลปริมาณน้ำไหลผ่านของ ปตร.ทั้งสี่แห่งในแม่น้ำท่าจีน ซึ่งได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการบันทึก
- (4) การวิเคราะห์สมดุลน้ำ เป็นขั้นตอนการจำลองการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน ผลลัพธ์นำมาวิเคราะห์สมดุลน้ำในกรณีน้ำต้นทุนจำกัด และกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด
- (5) การวิเคราะห์ความเข้มของการเพาะปลูก เป็นการวิเคราะห์ความถี่ของการใช้พื้นที่เพื่อการเพาะปลูกในรอบปี โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ในกรณีน้ำต้นทุนจำกัดและกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด
- (6) การประเมินสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน เป็นแนวทางในการประเมินระบบการบริหารจัดการน้ำ โดยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปริมาณการใช้น้ำของพืชและปริมาณน้ำต้นทุนตามแนวทางของ Bandara (2006)

ผลและวิจารณ์

หัวข้อผลและวิจารณ์ ได้แบ่งการนำเสนอออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

(1) แบบจำลองจิเรศ ผลลัพธ์ส่วนนี้เป็นการนำเสนอรายละเอียดของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น อาทิ แนวคิดแบบจำลอง กระบวนการทำงานในแต่ละองค์ประกอบของแบบจำลอง

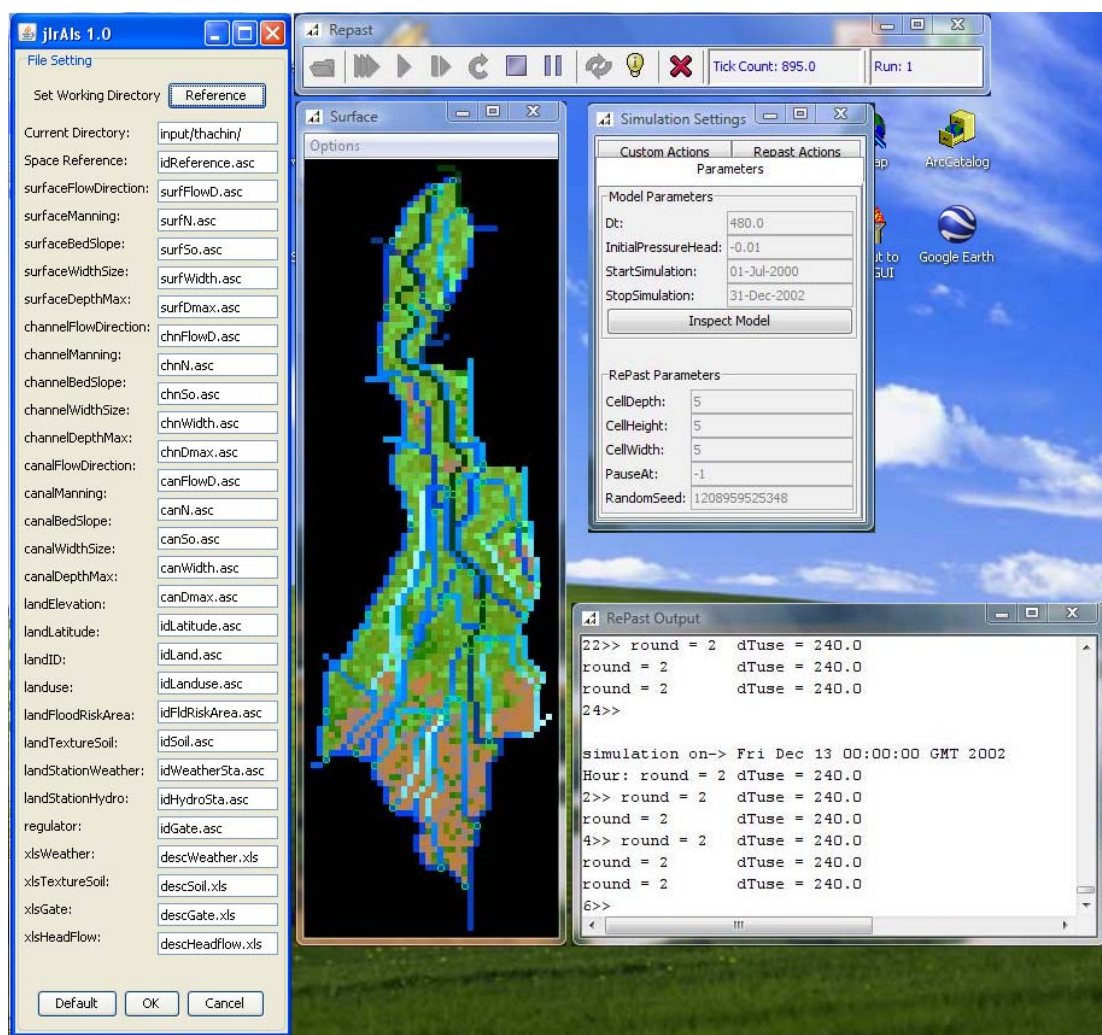
(2) การตรวจสอบแบบจำลอง เป็นการตรวจสอบผลลัพธ์ของแบบจำลอง ได้แก่ การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลเวียนของน้ำบนผิวดินและในระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศกับแบบจำลอง GSSHA และแบบจำลอง SWAP รวมถึงผลการศึกษาอิทธิพลการกำหนดชั้นดินและการจำลองระบบย่อยเพื่อตรวจสอบผลการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำและในแปลงเพาะปลูก

(3) การประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน ผลลัพธ์ส่วนนี้เป็นส่วนการประยุกต์แบบจำลองจิเรศกับพื้นที่จริง โดยได้นำเสนอผลเกี่ยวกับการสำรวจพื้นที่ การสร้างแบบจำลอง การจำลอง และการประเมินสมรรถนะระบบชลประทาน

แบบจำลองจิเรศ

หัวข้อแบบจำลองจิเรศ แบ่งการนำเสนอเป็น (1) องค์ประกอบหลักของแบบจำลอง (2) การจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน (3) การจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ (4) การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำ และ (5) การจำลองการจัดการน้ำในแปลงเพาะปลูก

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นชื่อว่า “จิเรศ” (ในภาพที่ 36) ย่อจาก Java, Irrigation, Artificial Intelligences แบบจำลองจิเรศพัฒนาโดยวิธีเชิงอ็อบเจกต์ด้วยภาษาจาวาร่วมกับเทคนิคเอเจนต์ แบบจำลองนี้มีเป้าหมายหลักเพื่อจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในพื้นที่เกษตรกรรมโดยเฉพาะพื้นที่ทำนาข้าว แบบจำลองจิเรศเป็นแบบจำลองชนิดกระจาย (distributed model) มีองค์ประกอบย่อยสำหรับจำลองกระบวนการไหลเวียนของน้ำบนผิวดินและในระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ และการจำลองระบบควบคุมอาคารบังคับน้ำแบบพืชชี รวมถึงการจำลองการทำนาของเกษตรกร

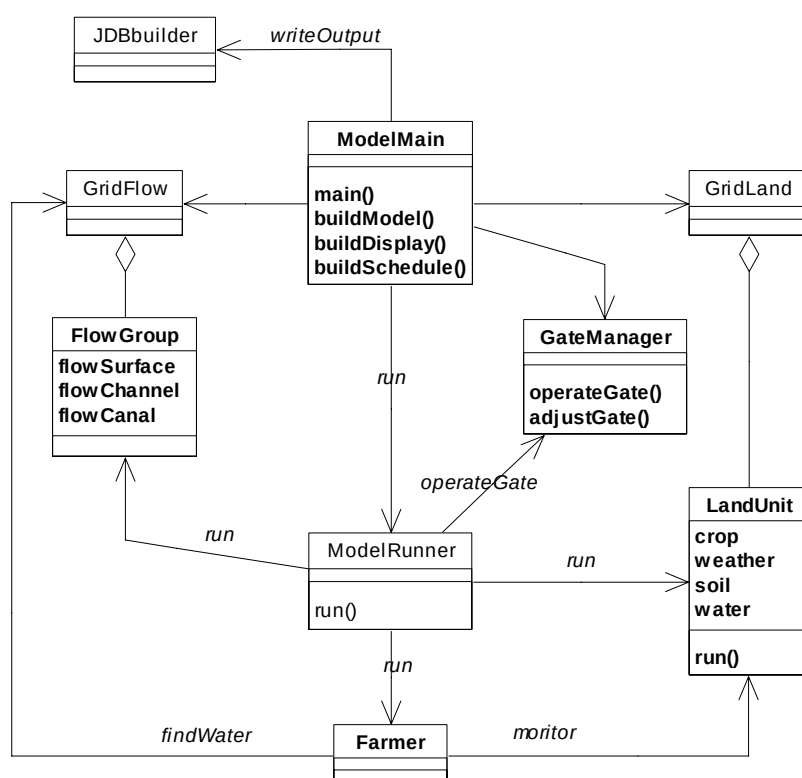


ภาพที่ 36 ส่วนต่อประสานของแบบจำลองจีเรส

ในภาพที่ 36 แสดงส่วนต่อประสาน (interface) ของแบบจำลองจีเรส โดยด้านซ้ายเป็นแถบรายการข้อมูลรับเข้า ส่วนแถบรายการอื่นเป็นส่วนต่อประสานจากรีพาสต์ อาทิ แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงผลการจำลองแบบกริด และแถบรายการกำหนดค่าการจำลอง จากการพิจารณาส่วนต่อประสานของแบบจำลองจีเรส

1. องค์ประกอบหลักของแบบจำลอง

ส่วนประกอบหลักของแบบจำลองมีจำนวน 9 คลาส จากทั้งหมด 52 คลาส (คลาสทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ก) โดยนำเสนอเป็นคลาสไดอะแกรมในภาพที่ 37 ประกอบด้วยคลาส “ModelMain”, “ModelRunner”, “GridLand”, “GridFlow”, “Farmer”, “LandUnit”, “FlowGroup” “GateManager” และ “JDBbuilder”



ภาพที่ 37 คลาสไดอะแกรมหลักของแบบจำลองจีเรย์

คลาส “ModelMain” เป็นคลาสหลัก มีหน้าที่ควบคุมและจัดการระบบการทำงานทั้งหมดในแบบจำลอง ขั้นตอนการทำงานของคลาสนี้พอสรุปได้ดังนี้ คลาส “ModelMain” เป็นคลาสแรกที่ถูกสั่งให้ทำงาน โดยจะทำหน้าที่กำหนดสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ให้กับแบบจำลอง คลาสหลักนี้มีเมธอดสำคัญ อาทิ เมธอด “main()” เมธอด “begin()” เมธอด “buildModel()” เมธอด “buildDisplay()” และเมธอด “buildSchedule()” โดยเมธอด “main()” เป็นจุดเริ่มต้นของการทำงาน ซึ่งจะถูกโหลดเข้าสู่ตัวแปลภาษาจาวาเพื่ออ่านโค้ดโปรแกรม

ขั้นตอนการทำงานของเมธอด “*main()*” เกิดขึ้นภายหลังที่ผู้ใช้ได้เรียกใช้งานแบบจำลองระบบจะทำการสร้างอ็อบเจกต์ “*simInit*” และ “*modelMain*” ขึ้นมา จากนั้นอ็อบเจกต์ “*modelMain*” จะถูกส่งให้อ็อบเจกต์ “*simInit*” เพื่อทำการโหลดแบบจำลองขึ้นมาทำงาน ในการทำงานเริ่มต้นที่เมธอด “*begin()*” ซึ่งจะสั่งการทำงานไปยังสามเมธอดหลักได้แก่ “*buildModel()*” “*buildSchedule()*” และ “*buildDisplay()*” โดย “*buildModel()*” เป็นเมธอดสำหรับสร้างองค์ประกอบทั้งหมดของการจำลอง อาทิ องค์ประกอบการรับข้อมูลเข้าและออกจากแบบจำลอง องค์ประกอบเกี่ยวกับกระบวนการไหลของน้ำ องค์ประกอบของหน่วยที่ดินและเกษตรกร ส่วนเมธอด “*buildSchedule()*” ทำหน้าที่จัดการเรื่องเวลา และเมธอด “*buildDisplay()*” ทำงานเกี่ยวกับการแสดงผลลัพธ์

ตัวอย่าง การโปรแกรมขั้นตอนทำงานหลักในคลาส “*ModelMain*” ด้วยภาษาจาวา

```
public class ModelMain extends SimModelImpl {

    public String getName(){
        return "jIrAIs Model";
    }

    public void begin(){
        buildModel();
        buildSchedule();
        buildDisplay();
    }

    public void buildModel(){
    }

    public void buildSchedule(){
    }

    public void buildDisplay(){
    }

    public static void main(String[] strings) {
        SimInit siminit = new SimInit();
        ModelMain modelMain = new ModelMain();
        siminit.loadModel(modelMain, "", false);
    }

}
```

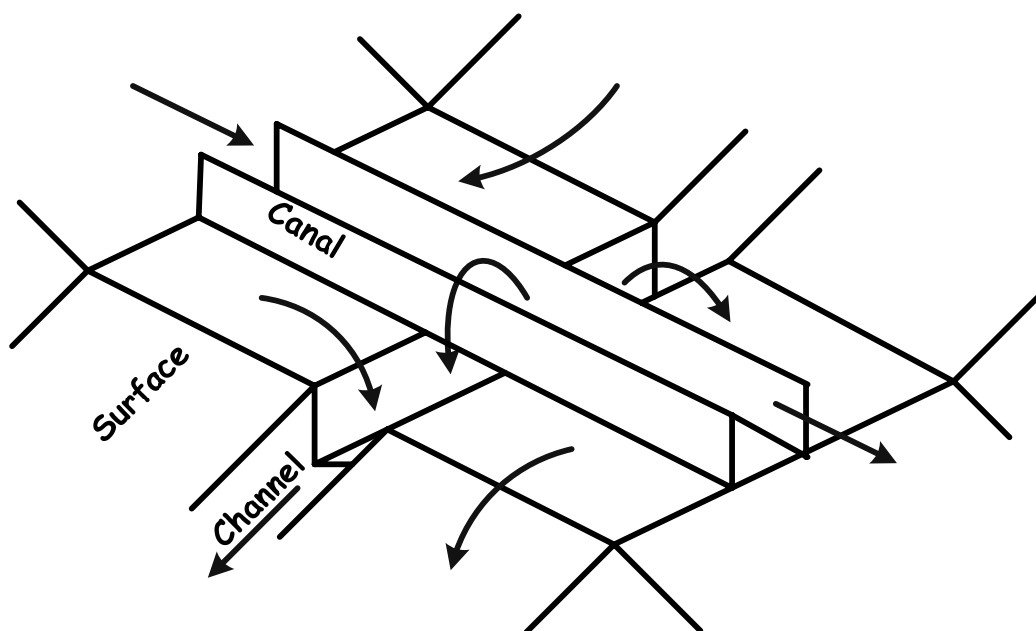

ส่วนหน้าที่การทำงานของคลาสอื่น โดยคลาส “GridFlow” ทำหน้าที่แทนตารางกริดการไหลของน้ำ เก็บอ็อบเจกต์ที่ทำงานเกี่ยวกับการคำนวณการไหลของน้ำบนผิวดิน คลาส “FlowGroup” เป็นคลาสองค์ประกอบของกริดการไหล ทำหน้าที่แทนขั้นตอนการคำนวณการไหลของน้ำ คลาส “GridLand” แทนตารางกริดที่ดิน ทำหน้าที่เก็บอ็อบเจกต์หน่วยที่ดิน ส่วนคลาส “LandUnit” แทนหน่วยที่ดิน โดยเป็นคลาสที่ใช้จำลองความสัมพันธ์ ดิน-น้ำ-พืช และบรรยากาศ คลาสนี้เป็นองค์ประกอบของคลาส “GridLand” คลาส “Farmer” แทนเกษตรกร ทำหน้าที่จำลองกระบวนการเพาะปลูกพืช คลาส “GateManager” ทำหน้าที่ควบคุมอาคารบังคับน้ำ ส่วนคลาส “JDBbuilder” ทำหน้าที่เก็บข้อมูลผลการจำลอง

ส่วนคลาส “ModelRunner” เป็นคลาสที่ทำหน้าที่ควบคุมลำดับการทำงานของแบบจำลอง โดยการดำเนินงานของแบบจำลอง ซึ่งมีเมธอดหลัก คือ เมธอด “run()” เมธอดนี้ทำหน้าที่แทนลำดับการทำงานของแบบจำลอง โดยเริ่มจากการสั่งให้คลาส “Farmer” ดำเนินงาน จากนั้นจึงสั่งคลาส “LandUnit” จำลองความสัมพันธ์ของดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ ในแปลงที่ดิน ถัดมาเป็นคลาส “GateManager” ให้ทำการควบคุมอาคารบังคับน้ำ และท้ายที่สุดสั่งให้คลาส “FlowGroup” ทำการจำลองการไหลของน้ำเหนือพื้นดิน ทั้งนี้ การทำงานของแบบจำลองจะดำเนินงานต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าจะครบเงื่อนไขการจำลอง ซึ่งคลาสหลักจะทำหน้าที่ควบคุมเวลาในการจำลอง

2. การจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน

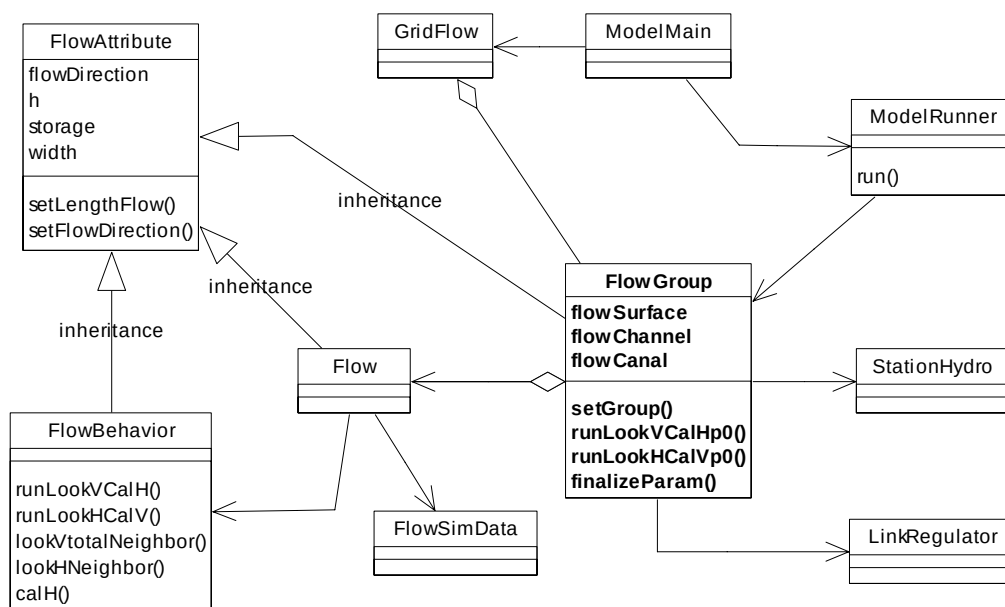
การจำลองการไหลของน้ำบนผิวดินและในลำน้ำ ทำโดยจำแนกชนิดของทางน้ำออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ “Surface”, “Channel” และ “Canal” โดย “Surface” แทนพื้นดินหรือแปลงเพาะปลูก “Channel” แทนแม่น้ำลำธารหรือคลองระบายน้ำ ส่วน “Canal” แทนคลองส่งน้ำชลประทาน

ในภาพที่ 38 แสดงการไหลของน้ำ โดยน้ำสามารถไหลได้บนทางน้ำทั้งสามชนิดข้างต้น และสามารถไหลจากทางน้ำหนึ่งไปสู่อีกทางน้ำหนึ่งได้ กล่าวคือ น้ำที่ไหลบน “Surface” สามารถไหลลงสู่ “Channel” และน้ำที่ไหลบน “Canal” จะไหลลง “Channel” และน้ำที่ไหลบน “Channel” สามารถไหลขึ้น “Surface” ได้หากเกิดกรณีน้ำล้นคลอง



ภาพที่ 38 แนวคิดการจำลองชนิดการไหลของน้ำบนผิวดิน

หมายเหตุ ชนิดการไหลประกอบด้วย พื้นดิน (surface) คลองระบายน้ำ (channel) และคลองชลประทาน (canal)



ภาพที่ 39 คลาสไดอะแกรมแสดงกระบวนการไหลของน้ำบนผิวดิน

แบบจำลองแสดงเป็นคลาสไดอะแกรมในภาพที่ 39 ซึ่งแสดงคลาสหลักๆ สำหรับการไหลของน้ำบนผิวดิน ประกอบด้วย คลาส “GridFlow” คลาส “FlowAttribute” คลาส “FlowGroup” คลาส “Flow” คลาส “FlowBehavior” คลาส “FlowSimData” คลาส “StationHydro” และคลาส “LinkRegulator” โดยคลาส “GridFlow” ทำหน้าที่แทนตารางกริดการไหลของน้ำ ใช้เก็บข้อมูลหรืออ็อบเจกต์ที่มีการระบุตำแหน่งตามลำดับของแถวในแนวดิ่งและแนวนอน คลาส “FlowAttribute” เป็นคลาสที่ใช้เก็บตัวแปรทุกชนิดในการทำงาน อาทิ คุณสมบัติทางน้ำ เช่น ทิศทางการไหล สัมประสิทธิ์ความขรุขระ ความกว้าง ความยาว ความลึก หรือตัวแปรการคำนวณ เช่น ความเร็ว ความลึกน้ำ ปริมาตร โดยตัวแปรเหล่านี้ถูกสร้างเป็นคุณสมบัติของคลาสนี้เพื่อให้คลาสอื่นสามารถสืบทอดไปใช้งาน

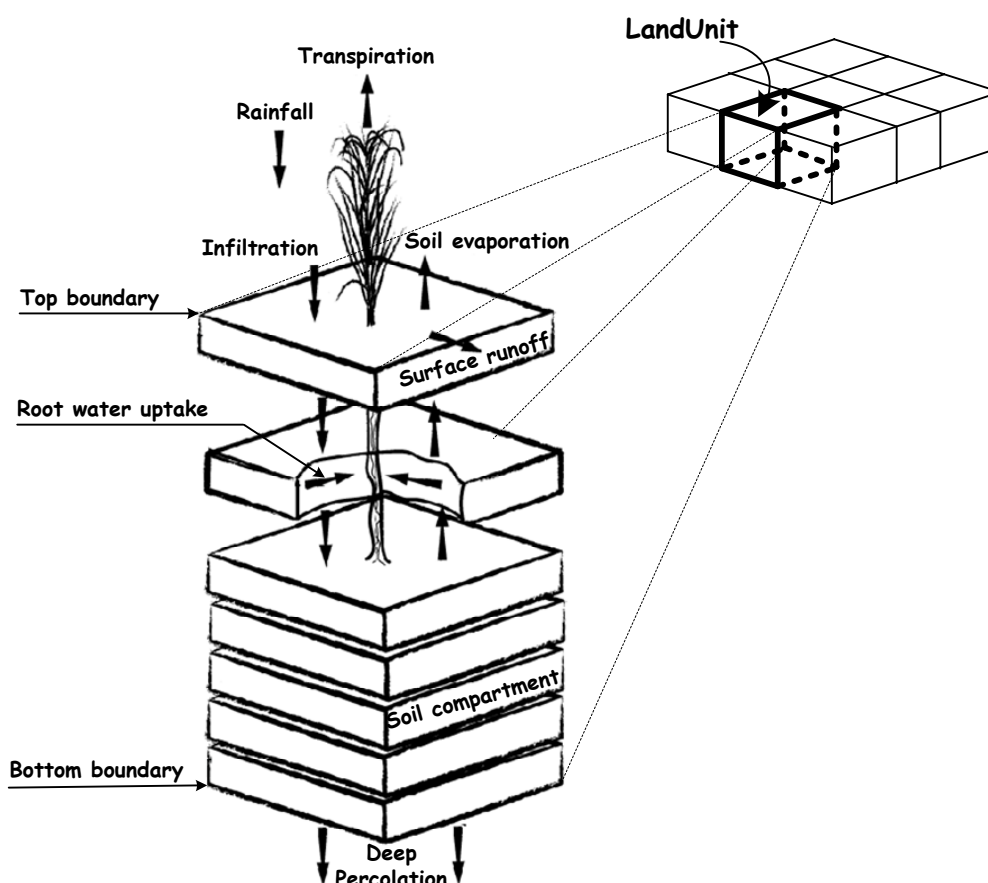
คลาส “FlowBehavior” ทำหน้าที่แทนวิธีการคำนวณหาค่าของตัวแปรที่สืบทอดมาจากคลาสแม่ โดยวิธีการการคำนวณทำผ่านเมธอดของคลาสนี้ อาทิ เมธอด “lookHNeighbor()” เป็นการหาค่าความลึกน้ำจากกริดรอบข้าง เมธอด “runLookHCalV()” ทำหน้าที่คำนวณการเปลี่ยนปริมาตรของน้ำ หรือเมธอด “calH()” เป็นการคำนวณความสูงของน้ำ คลาส “Flow” แทนการคำนวณการไหลของน้ำในแต่ละขั้นตอน ส่วนคลาส “FlowGroup” ทำหน้าที่สร้างลำดับการคำนวณการไหลของน้ำด้วยระเบียบวิธี Finite Volume

การสร้างแบบจำลองการไหลของน้ำเกิดขึ้นครั้งแรกที่เมธอด “*buildModel()*” ในคลาส “*modelMain*” โดยการสร้างตารางกริดการไหลจากคลาส “*GridFlow*” เพื่อใช้เก็บอ็อบเจกต์ที่เป็นองค์ประกอบการไหลของน้ำ สร้างอ็อบเจกต์จากคลาส “*Flow*” ให้ทำหน้าที่แทนการไหลของน้ำในระบบชลประทาน ได้แก่ การไหลของน้ำบนผิวดิน การไหลของน้ำในแม่น้ำ และการไหลของน้ำในคลองชลประทาน สร้างอ็อบเจกต์จากคลาส “*FlowGroup*” ให้ทำหน้าที่รวมองค์ประกอบทั้งหมดสำหรับคำนวณการไหลของน้ำ ซึ่งเป็นแนวทางให้อ็อบเจกต์สามารถทำงานร่วมกันได้

ในขั้นตอนการทำงาน คลาส “*FlowGroup*” เป็นคลาสหลัก อ็อบเจกต์ที่อยู่ในคลาส อาทิ อ็อบเจกต์ “*surface*” อ็อบเจกต์ “*channel*” อ็อบเจกต์ “*canal*” และอ็อบเจกต์ “*linkRegulator*” จะถูกสั่งให้ทำงานร่วมกันผ่านทางเมธอดต่าง ๆ ในคลาส ซึ่งการสั่งให้เมธอดทำงาน จะถูกสั่งจากภายนอกคลาส โดยคลาส “*ModelRunner*” เป็นคลาสที่ควบคุมลำดับการทำงานของแบบจำลอง โดยจะสั่งการผ่านเมธอด “*run()*” ซึ่งเป็นการเรียกเมธอดของคลาส “*FlowGroup*” ขึ้นมาทำงานเพื่อหาคำตอบของสมการการไหลของน้ำ

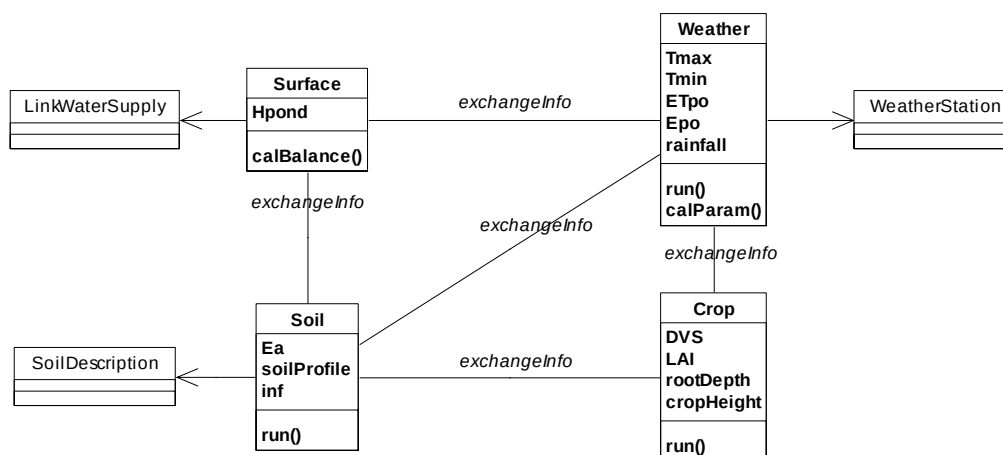
3. การจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ

องค์ประกอบส่วนนี้ เป็นการจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ ซึ่งในภาพที่ 40 แสดงแนวคิดในการออกแบบโครงสร้างแบบจำลอง โดยในภาพเป็นหน้าตัดดิน (soil profile) ซึ่งแบ่งเป็นชั้นดินย่อย (soil compartment) เรียงต่อกันในแนวดิ่ง มีองค์ประกอบของน้ำที่หมุนเวียน ได้แก่ น้ำฝน (rainfall) การซึมผ่านผิวดิน (infiltration) น้ำท่าผิวดิน (surface runoff) การระเหยจากดิน (soil evaporation) การคายน้ำ (transpiration) และการดูดซึมน้ำของรากพืช (root water uptake) กระบวนการไหลเวียนของน้ำในดินเกิดขึ้นตามแนวดิ่ง กรณีมีน้ำบนผิวดินน้ำจากผิวดินจะไหลซึมลงดินผ่านชั้นดินย่อย กรณีผิวดินแห้งน้ำในดินจะระเหยขึ้นจากผิวดิน กรณีมีพืช พืชจะดูดซึมน้ำผ่านรากและจะคายน้ำสู่บรรยากาศ และกรณีมีน้ำฝนส่วนเกินจากการซึมลงดินจะเกิดน้ำท่าไหลออกไปทางผิวดิน



ภาพที่ 40 แนวคิดการจำลองระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ

การจำลองความสัมพันธ์ของระบบดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศแสดงคลาสไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 41 ซึ่งประกอบด้วยคลาสหลัก 4 ชนิดได้แก่ “ดิน (Soil)” คลาส “น้ำจบบนผิวดิน (Surface)” คลาส “พืช (Crop)” และคลาส “ภูมิอากาศ (Weather)” ส่วนอีกสามคลาสทำหน้าที่สนับสนุนคลาสหลัก ซึ่งได้แก่ คลาส “WeatherStation” คลาส “SoilDescription” และคลาส “LinkWaterSupply”

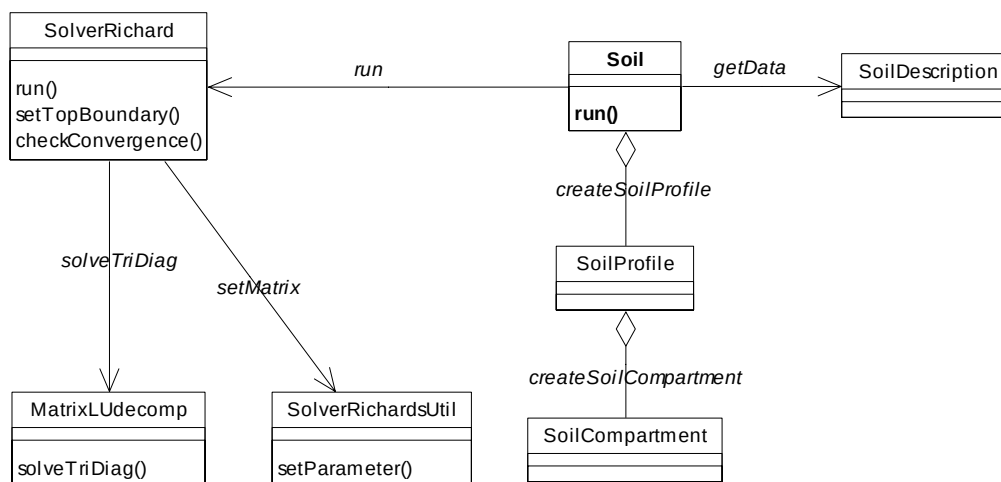


ภาพที่ 41 คลาสไดอะแกรมจำลองความสัมพันธ์ระหว่างดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศ

คลาส “ดิน (Soil)” มีคุณสมบัติหลายอย่าง อาทิ หน้าตัดดิน ค่าการระเหย การซึมผ่านผิวดิน คลาสดินยังทำหน้าที่ในการจำลองการไหลของน้ำในดิน ส่วนคลาส “น้ำ (Surface)” เป็นน้ำในส่วนที่จบบนผิวดิน ซึ่งทำหน้าที่จำลองสมดุลน้ำ คลาส “พืช (Crop)” ทำหน้าที่จำลองการเจริญเติบโตพืช โดยมีคุณสมบัติ อาทิ พัฒนาการเจริญเติบโตพืช สัดส่วนของพื้นที่ใบต่อพื้นที่ปลูกพืช ความยาวราก และความสูง เป็นต้น ส่วนคลาส “ภูมิอากาศ (Weather)” เก็บข้อมูลภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิ ฝน ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม รวมถึงทำหน้าที่คำนวณการระเหยจากพื้นผิว

ความสัมพันธ์ของอ็อบเจกต์เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างคลาส โดยคลาส “ภูมิอากาศ” เชื่อมกับดิน น้ำ และพืช คลาส “พืช” เชื่อมกับภูมิอากาศและดิน คลาส “น้ำ” เชื่อมกับภูมิอากาศและดิน ส่วนคลาส “ดิน” เชื่อมโยงกับทุกคลาส ในการนี้ ความสัมพันธ์ของภูมิอากาศใช้วิธีการส่งข้อมูลข่าวสารแลกเปลี่ยนระหว่างกัน การส่งข้อมูลลักษณะนี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอ็อบเจกต์ทั้งสี่ชนิด กล่าวคือ เมื่ออ็อบเจกต์ใดเกิดการเปลี่ยนสถานะก็จะส่งผลต่อไปยังอ็อบเจกต์อื่นทันที เหตุนี้ จึงทำให้สามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง ดิน-น้ำ-พืช-บรรยากาศได้

แบบจำลองการไหลของน้ำในดิน แสดงเป็นคลาสไดอะแกรมในภาพที่ 42 ซึ่งในภาพแสดงคลาสหลัก 7 คลาส ได้แก่ คลาส “ดิน (Soil)” คลาส “SoilDescription” คลาส “หน้าตัดดิน (SoilProfile)” คลาส “ชั้นดิน (SoilCompartment)” คลาส “SolverRichard” คลาส “SolverRichardsUtil” และคลาส “MatrixLUdecomp”



ภาพที่ 42 คลาสไดอะแกรมของการจำลองการไหลของน้ำในดิน

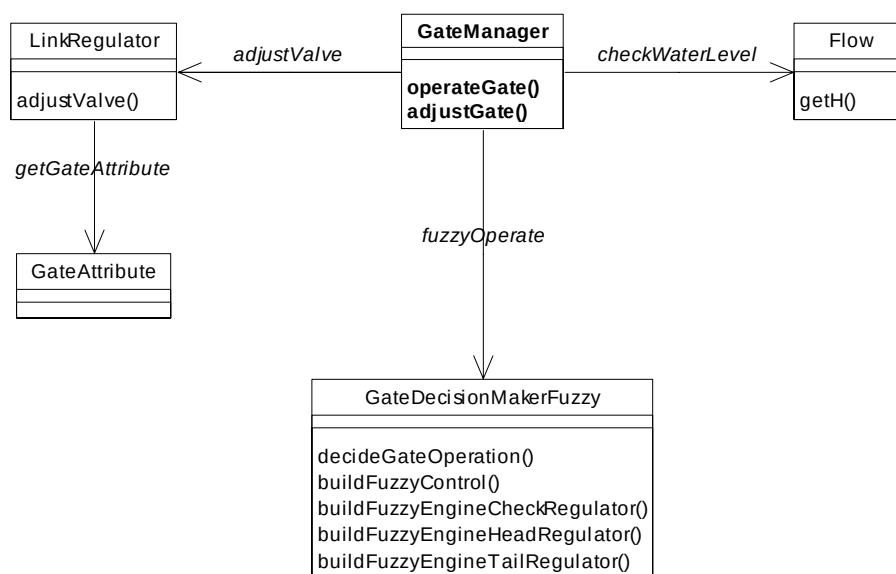
คลาส “ดิน (Soil)” ทำหน้าที่แทนดิน มีความสัมพันธ์กับภายนอกระบบ ได้แก่ น้ำ พืช และบรรยากาศ ส่วนคลาส “หน้าตัดดิน (SoilProfile)” ทำหน้าที่แทนหน้าตัดของดินตามความลึก คลาส “ชั้นดิน (SoilCompartment)” ทำหน้าที่แทนชั้นดินที่ทับถมกันเป็นชั้น ๆ อยู่ในหน้าตัดดิน คลาส “SoilDescription” มีหน้าที่เก็บรวบรวมคุณสมบัติดิน ซึ่งนำเข้าจากภายนอกแบบจำลอง อาทิ ขนาดของหน้าตัดดิน จำนวนชั้นดิน และพารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ ในส่วนคลาส “SolverRichard” เป็นคลาสหลักสำหรับประมาณค่าสมการริชาร์ด คลาส “SolverRichardsUtil” ทำหน้าที่กำหนดองค์ประกอบการคำนวณตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ท้ายสุดเป็นคลาส “MatrixLUdecomp” ทำหน้าที่หาคำตอบระบบสมการ

ในการจำลองการไหลของน้ำในดิน ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างคลาส ซึ่งมีสองลักษณะคือ ความสัมพันธ์ในเชิงโครงสร้างดินและความสัมพันธ์ในการคำนวณ สำหรับความสัมพันธ์เชิงโครงสร้าง คลาส “ดิน” มีความสัมพันธ์อยู่กับคลาส “SoilDescription” และ “หน้าตัดดิน” โดย คลาส “ดิน” มีหน้าที่กำหนดคุณสมบัติของหน้าตัดดิน แต่ในการกำหนดนั้น ต้องใช้ข้อมูลที่ส่งมาจากคลาส “ข้อมูลดิน” ซึ่งถูกกำหนดมาแล้วจากภายนอกแบบจำลอง และเมื่อคลาส “ดิน” รับข้อมูลเข้ามาจะถูกส่งต่อไปยังคลาส “ชั้นดิน” ผ่านคลาส “หน้าตัดดิน” เพื่อทำการเก็บคุณสมบัติของชั้นดิน ในความสัมพันธ์ระหว่างดินกับหน้าตัดดินเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะที่คลาส “หน้าตัดดิน” เป็นองค์ประกอบหนึ่งในคลาส “ดิน” กล่าวคือ ดินที่พิจารณาสามารถมีหน้าตัดหลาย ๆ รูปแบบแตกต่างกัน ในส่วนความสัมพันธ์ระหว่างคลาส “หน้าตัดดิน” กับคลาส “ชั้นดิน” มีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันกับดินและหน้าตัดดิน โดยคลาส “ชั้นดิน” เป็นองค์ประกอบของคลาส “หน้าตัดดิน” ซึ่งหน้าตัดดินประกอบด้วยชั้นดินที่ทับถมกันเป็นชั้น ๆ

สำหรับการคำนวณการไหลของน้ำในดิน เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างคลาส “ดิน” กับ คลาส “SolverRichard” กล่าวคือ ภายหลังคลาส “ดิน” ได้กำหนดโครงสร้างของดินเรียบร้อยแล้ว จากนั้น คลาส “SolverRichard” ซึ่งมีหน้าที่จำลองขั้นตอนการคำนวณ จะดึงคุณสมบัติดินไปใช้ในการคำนวณสมการริชาร์ด ในการนี้ การคำนวณต้องทำผ่านเมธอดของคลาส อาทิ เมธอด “setTopBoundary()” มีไว้สำหรับกำหนดค่าขอบการคำนวณ หรืออาจเป็นเมธอด “checkConvergence()” ซึ่งมีสำหรับตรวจสอบเงื่อนไขการลู่เข้าหาคำตอบของสมการ ในระหว่างขั้นตอนการคำนวณ คลาส “SolverRichard” ต้องใช้คลาสอื่นมาช่วยแบ่งภาระการคำนวณบางขั้นตอน ได้แก่ คลาส “SolverRichardsUtil” ช่วยลำดับขั้นตอนการหาคำตอบสมการตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ส่วนคลาส “MatrixLUdecomp” ช่วยในการหาคำตอบของระบบสมการ

4. การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำ

การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำแสดงเป็นคลาสไดอะแกรมในภาพที่ 43 โดยในภาพแสดงคลาสหลัก 5 คลาส ได้แก่ คลาส “GateManger” คลาส “GateArtribute” คลาส “GateDecisionMarkerFuzzy” คลาส “LinkRegulator” และคลา “Flow”



ภาพที่ 43 คลาสไดอะแกรมจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำ

ในภาพ คลาส “GateManger” ทำหน้าที่ตรวจสอบสภาพน้ำและสั่งควบคุมอาคารบังคับน้ำ คลาส “GateDecisionMarkerFuzzy” ทำหน้าที่ประมวลผลการตัดสินใจควบคุมน้ำแบบฟัซซี่เพื่อหาค่าการปรับบานประตูน้ำ ส่วนคลาส “Flow” มีหน้าที่เก็บข้อมูลสภาพน้ำในคลองชลประทาน คลาส “LinkRegulator” มีคุณสมบัติหลายอย่าง อาทิ เลขรหัสอาคาร ตำแหน่งอาคาร ชนิดอาคาร และอัตราไหลสูงสุด อาคารบังคับน้ำมีเมธอดทำงานหลายชนิด อาทิ เมธอด “`adjustValve()`” ทำหน้าที่ในการปรับระดับบานประตูน้ำ ส่วนคลาส “GateArtribute” ทำหน้าที่เก็บข้อมูลคุณสมบัติตัวอาคาร

การจำลองการควบคุมน้ำทำได้โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคลาส ซึ่งเริ่มจากคลาส “LinkRegulator” ทำการดึงข้อมูลคุณสมบัติจากคลาส “GateAttribute” มากำหนดคุณสมบัติให้กับอาคาร ซึ่งข้อมูลที่ดึงมาถูกกำหนดจากภายนอกแบบจำลอง อาทิ รหัสอาคาร ชนิดของอาคาร ชนิดการควบคุมน้ำ อัตราไหลสูงสุด รวมถึงแผนการส่งน้ำ จากนั้น คลาส “GateManger” จะทำการอ่านข้อมูลอาคารบังคับน้ำทุกแห่งเพื่อมาใช้เป็นข้อมูลประกอบการควบคุม

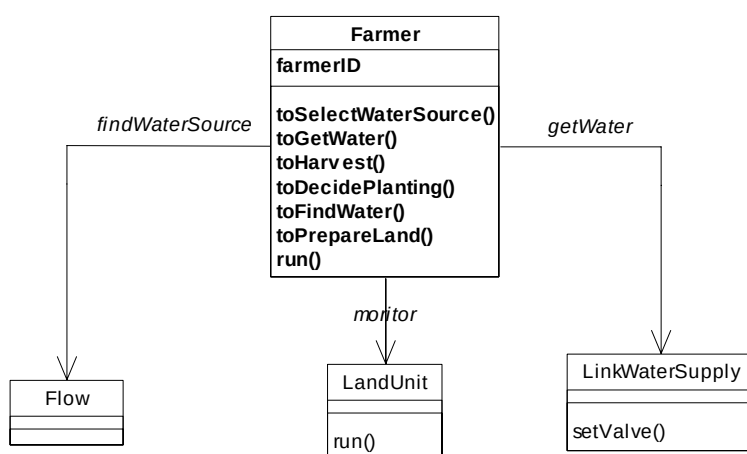
กระบวนการควบคุมน้ำเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างคลาส “GateManger” คลาส “GateDecisionMarkerFuzzy” คลาส “LinkRegulator” กับคลาส “Flow” โดยคลาส “GateManger” จะพิจารณาแผนการส่งน้ำก่อน จากนั้นจึงทำการตรวจสอบสภาพน้ำจากคลาส “Flow” แล้วจึงทำการตัดสินใจ กระบวนการตัดสินใจกระทำผ่านเมทอด “*operateGate()*” ในคลาส “GateManger” ซึ่งต้องใช้คลาส “GateDecisionMarkerFuzzy” ช่วยทำหน้าที่ในขั้นตอนการตัดสินใจ โดยการตัดสินใจแบบฟัซซี่จะทำการประมวลผลค่าการปรับบานประตู แล้วส่งผลการตัดสินใจไปยังคลาส “GateManger” จากนั้นส่งค่าไปยังคลาส “LinkRegulator” เพื่อทำการปรับบานประตูโดยกระทำผ่านเมทอด “*adjustValve()*”

5. การจำลองการจัดการน้ำในแปลงเพาะปลูก

ส่วนนี้นำเสนอกระบวนการจำลองการจัดการน้ำในแปลงเพาะปลูก ซึ่งการจำลองใช้เทคนิคเอเจนต์ (Agent-Based Modeling หรือ ABM) โดยต้องการจำลองเกษตรกรให้เป็นเอเจนต์ ที่มีความสามารถในการรับรู้ข้อมูลข่าวสารจากสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัว และสามารถตัดสินใจปรับเปลี่ยนพฤติกรรมตนเองได้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ในการนี้ เกษตรกรได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการปลูกข้าว โดยเกษตรกรในที่นี้อาจหมายถึง คนหรือกลุ่มคนที่ทำนาข้าว เกษตรกรมีแปลงที่ดินเป็นของตนเอง และสามารถทำกิจกรรมการเพาะปลูกได้ดังนี้ กิจกรรมการเตรียมแปลง เริ่มจากการเคลียร์พื้นที่ การไถ การตีดิน การทำเทือก การขุดเทือก จนถึงการหว่านเมล็ดพันธุ์ กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับน้ำชลประทาน ได้แก่ การตัดสินใจปลูกพืช การหาแหล่งน้ำ การดึงน้ำเข้าแปลง การให้น้ำชลประทาน และการระบายน้ำออกจากแปลง

ในภาพที่ 44 แสดงคลาสไดอะแกรมจำลองกระบวนการจัดการน้ำในแปลงเพาะปลูก โดยประกอบด้วยคลาสหลัก 4 คลาส ได้แก่ คลาส “เกษตรกร (Farmer)” คลาส “หน่วยที่ดิน (LandUnit)” คลาส “Flow” และคลาส “LinkWaterSupply”



ภาพที่ 44 คลาสไดอะแกรมจำลองกระบวนการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก

คลาส “เกษตรกร” มีคุณสมบัติประจำ คือ รหัสเกษตรกร และมีหน้าที่ทำกิจกรรมหลายอย่าง อาทิ หาแหล่งน้ำ ดึงน้ำชลประทาน เตรียมแปลงปลูกข้าว เก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งหน้าที่เหล่านี้จะกระทำผ่านเมธอดของคลาส ส่วนคลาส “หน่วยที่ดิน” สัมพันธ์กับเกษตรกรผ่านทางรหัสของเกษตรกร ซึ่งในที่นี้ แบบจำลองกำหนดให้เกษตรกรมีที่ดินได้เพียง 1 แปลง โดยเกษตรกรจะคอยติดตามสภาพการเปลี่ยนแปลงของที่ดินตนเอง อาทิ การเจริญเติบโตพืช หรือสภาพน้ำในแปลง ส่วนคลาส “Flow” เชื่อมโยงกับเกษตรกรเพื่อใช้ในการหาแหล่งน้ำ คลาส “LinkWaterSupply” ทำหน้าที่ในการเอนำน้ำเข้าแปลงเพาะปลูก

ตัวอย่างหน้าที่ของเกษตรกร อาทิ การทำงานของเมธอด “*toGetWater()*” เป็นการเอนำน้ำหรือการดึงน้ำชลประทานไปทำการเพาะปลูก ซึ่งภายหลังจากเกษตรกรตรวจแหล่งน้ำว่ามีเพียงพอต่อความต้องการแล้ว เกษตรกรจะทำการเปิดเอนำน้ำหรือดึงน้ำไปใช้ ซึ่งขั้นตอนการดึงน้ำต้องทำผ่านเมธอด “*setValve()*” ในคลาส “LinkWaterSupply” น้ำจึงจะไหลเข้าแปลง ในทางตรงข้าม ถ้าหากพบว่าน้ำมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ เกษตรกรจะรอน้ำเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งถ้าน้ำเริ่มมีพอต่อความต้องการแล้วก็จะทำการดึงน้ำแต่ถ้าหารอน้ำแล้วพบว่าไม่มี เกษตรกรจะกลับไปใช้เมธอด “*toSelectWaterSource()*” เลือกแหล่งน้ำใหม่อีกครั้ง

การระบายน้ำทำผ่านเมธอด “*toDrainWater()*” เป็นการปิดน้ำไม่ให้ไหลเข้าแปลงเพาะปลูก และทำการระบายน้ำออกจากแปลง การปิดน้ำต้องทำผ่านเมธอด “*setValve()*” ในคลาส “LinkWaterSupply” ซึ่งคล้ายกับขั้นตอนการดึงน้ำ

การตัดสินใจปลูกข้าวของเกษตรกรทำผ่านเมธอด “*decidePlanting()*” โดยเมธอดนี้กำหนดตัวแปรในการตัดสินใจสี่ตัวแปร ได้แก่ น้ำชลประทาน น้ำฝน ช่วงฤดูกาล ปัจจัยเสี่ยงต่อน้ำท่วม ซึ่งได้แก่ ตำแหน่งที่ตั้งของแปลงและช่วงเวลาของเดือนที่มีโอกาสเกิดน้ำท่วม เกษตรกรจะทำการตัดสินใจปลูกหรือไม่ขึ้นอยู่กับการคาดการณ์ของตัวเกษตรกรเอง ซึ่งถ้าหากเกษตรกรคาดการณ์ว่าน้ำชลประทานหรือน้ำฝนมีเพียงพอและโอกาสเสี่ยงต่อน้ำท่วมไม่มี รวมถึงฤดูกาลเหมาะสมแล้ว เกษตรกรก็จะตัดสินใจปลูก แต่หากตัวแปรใดมีความไม่เหมาะสมแล้ว การปลูกข้าวจะไม่เกิดขึ้น

การเตรียมแปลงปลูกข้าวทำผ่านเมธอด “*toPrepareLand()*” ซึ่งเมธอดนี้มีหลักการทำงาน ซึ่งพอสรุปได้ คือ จำลองขั้นตอนการเตรียมแปลง 7 ขั้นตอน ได้แก่ การเคลียร์พื้นที่ (clearing) การเข้าน้ำเข้าแปลง (soaking) การไถ (plowing) การตีดิน (harrowing) การทำเทือก (pudding) การลู่หรือปรับเทือก (smoothing) และการหว่านเมล็ดข้าว (seeding) โดยขั้นตอนเหล่านี้ มีรายละเอียดคือ ขั้นตอนการทำแปลงให้ว่างเป็นขั้นตอนการเผาฟางและกำจัดตอซัง ซึ่งจำลองเป็นระยะเวลาที่ใช้ดำเนินงาน

ส่วนขั้นตอนการเอาน้ำเข้าแปลง เป็นการดึงน้ำชลประทานให้ไหลเข้าสู่แปลงเพาะปลูก ซึ่งน้ำที่ดึงเข้ามานั้นต้องเพียงพอต่อความต้องการของเกษตรกรจึงจะสามารถผ่านขั้นตอนนี้ได้ ทั้งนี้ในการดึงน้ำนั้นต้องทำผ่านเมธอด “*toGetWater()*” จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนการไถ โดยการไถ จำลองเป็นระยะเวลาที่ใช้ดำเนินการไถ ส่วนขั้นตอนการตีดินก็ทำเช่นเดียวกัน แต่เกษตรกรจะก่อนตรวจสอบสภาพของน้ำในแปลงเพาะปลูกตลอดเวลา ซึ่งถ้าหากน้ำในแปลงแห้งเกษตรกรจะดึงน้ำเข้ามาอีกครั้ง ถัดมาเป็นขั้นตอนการทำเทือก ซึ่งใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานและเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาเกษตรกรจะทำการระบายน้ำที่ขังออกจากแปลงเพาะปลูก ซึ่งจะทำผ่านเมธอด “*toDrainWater()*” ส่วนขั้นตอนการลู่เทือกจะใช้ระยะเวลาเช่นเดียวกัน สุดท้ายเป็นขั้นตอนการหว่าน ซึ่งเกษตรกรจะทำการหว่านเมล็ดพันธุ์ การจำลองในขั้นนี้เกษตรกรจะส่งข้อมูลไปยังคลาส “พืช” โดยผ่านคลาส “หน่วยที่ดิน”

การตรวจสอบผลลัพธ์

การตรวจสอบผลลัพธ์แบ่งออกเป็น (1) การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำผิวดินกับแบบจำลอง GSSHA (2) การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำในดินกับแบบจำลอง SWAP (3) การศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง และ (4) การจำลองระบบย่อย

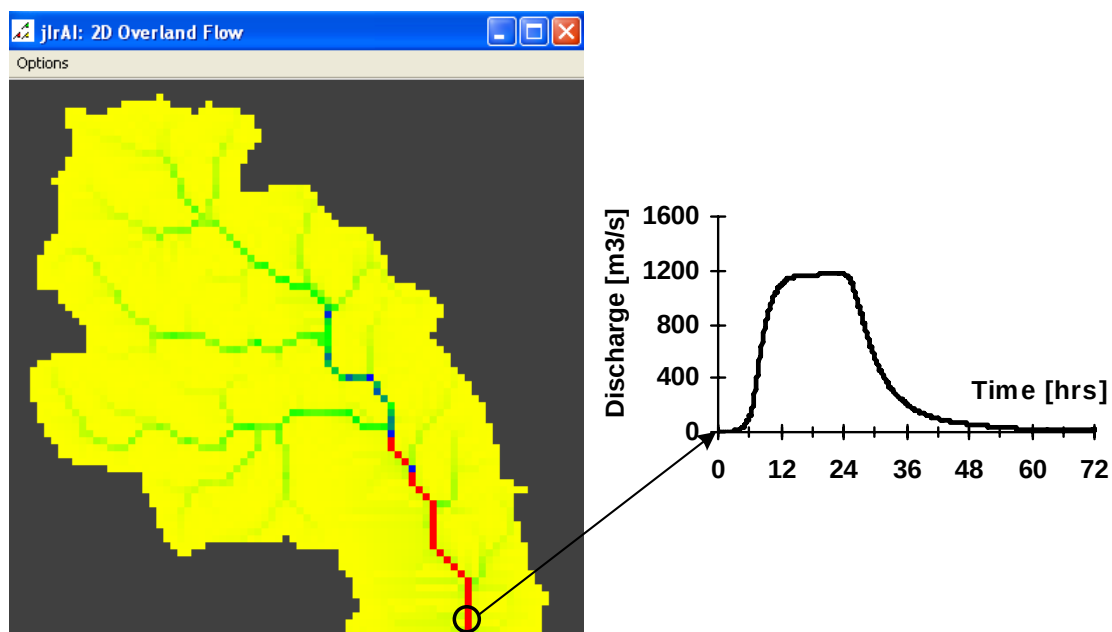
1. การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำผิวดินกับแบบจำลอง GSSHA

จากรายละเอียดและข้อกำหนดในหัวข้อวิธีการ เป็นการทดสอบองค์ประกอบของการไหลของน้ำผิวดินโดยใช้ด้วยสมการ diffusion wave และหาคำตอบด้วยระเบียบวิธี Finite Volume การทดสอบแบบจำลองได้จำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติบนพื้นที่ตอนบนของกลุ่มน้ำกระเสียว (แสดงเป็นแผนที่ในหัวข้อวิธีการ) การตรวจสอบผลลัพธ์ทำโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลอง GSSHA โดยกำหนดพารามิเตอร์และข้อมูลนำเข้าเหมือนกัน โดยผลลัพธ์พิจารณาจากกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำได้แก่ รูปร่างของกราฟน้ำท่า ระยะเวลาที่เกิด และอัตราการไหลสูงสุด นอกจากนี้ ยังได้ประเมินการแบ่งขนาดของกริดและชั้นเวลา

ผลลัพธ์ในส่วนนี้ นำเสนอเป็นสองส่วน ได้แก่ ผลการทวนสอบความถูกต้องแบบจำลอง และการประเมินขนาดกริดและชั้นเวลา

1.1 การทวนสอบความถูกต้องแบบจำลอง

การทวนสอบทำโดยจำลองการไหลของน้ำผิวดินบนกริดขนาด 1,000 เมตร ชั้นเวลา 60 วินาที เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยความเข้มฝน 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเทียบเป็นความลึกของน้ำเท่ากับ 12 เซนติเมตร ผลการจำลองสรุปเป็นอัตราการไหลสูงสุดและความลึกน้ำในตารางที่ 15 และกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำในภาพที่ 46



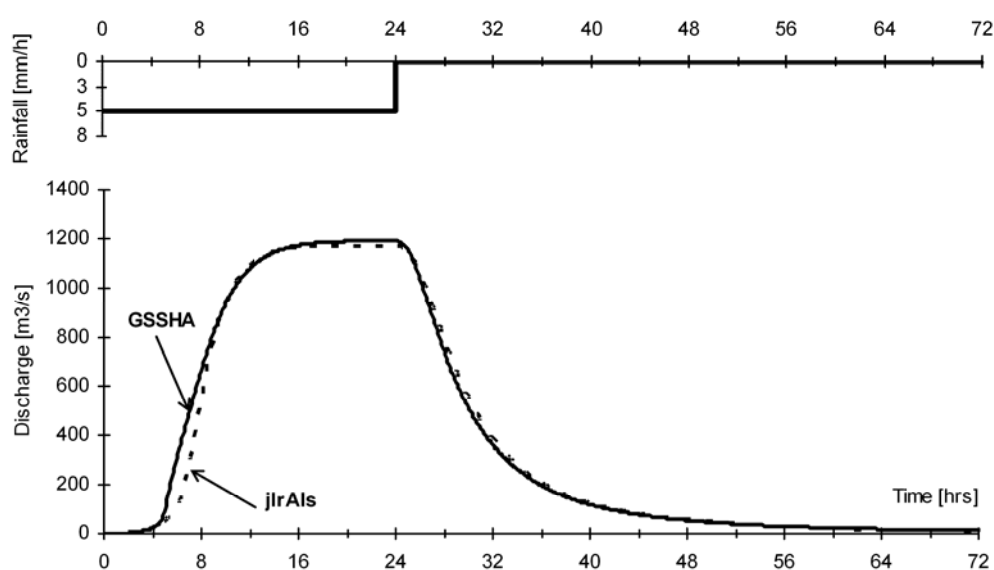
ภาพที่ 45 แบบจำลองจิเรสสำหรับจำลองการไหลของน้ำบนผิวดิน

ในภาพที่ 45 แสดงหน้าต่างการแสดงผลของแบบจำลองจิเรสสำหรับจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบสองมิติ โดยในภาพเป็นการจำลองการไหลของน้ำผิวดินในพื้นที่ตอนบนของกลุ่มน้ำกระเสียว ผลลัพธ์เป็นกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำ ซึ่งผลลัพธ์นี้ได้นำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลอง GSSHA

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแบบจำลองระหว่างแบบจำลองจิเรส์และแบบจำลอง GSSHA โดยพิจารณาองค์ประกอบของกราฟน้ำท่า คือ อัตราการไหลสูงสุดและปริมาณน้ำท่า พบว่า แบบจำลองจิเรส์ให้ค่าอัตราการไหลสูงสุดประมาณ 1,170 ลบ.ม. ต่อวินาที ความลึกน้ำ 11.6 ซม ในขณะที่ แบบจำลอง GSSHA ให้ค่าอัตราการไหลสูงสุดราว 1,190 ลบ.ม. ต่อวินาที และความลึกน้ำ 11.7 ซม ส่วนกราฟที่แสดงในภาพที่ 46 เป็นกราฟน้ำที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำโดยแกนตั้งเป็น อัตราการไหลส่วนแกนนอนเป็นระยะเวลาที่เกิดน้ำท่า ซึ่งในที่นี้แสดงระยะเวลาเพียง 72 ชั่วโมง กราฟเส้นเข็มเป็นกราฟน้ำท่าของแบบจำลอง GSSHA เส้นประเป็นของแบบจำลองจิเรส์ จากการพิจารณารูปร่างของกราฟ สังเกตได้ว่า ลักษณะโดยรวมของกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยเฉพาะช่วงการลดลงของกราฟ แบบจำลองทั้งสองให้ระยะเวลาการลดลงใกล้เคียงกัน ในขณะที่ช่วงการเพิ่มขึ้น แบบจำลอง GSSHA ให้ค่าระยะเวลาการเกิดเร็วกว่าเล็กน้อย

ตารางที่ 15 อัตราการไหลและความลึกน้ำ

	jIrAls	GSSHA
Peak discharge (m ³ /s)	1,173	1,191
Depth of runoff (cm)	11.63	11.74



ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าระหว่างแบบจำลองจิเรส์กับแบบจำลอง GSSHA

1.2 การประเมินขนาดกริดและขั้นเวลา

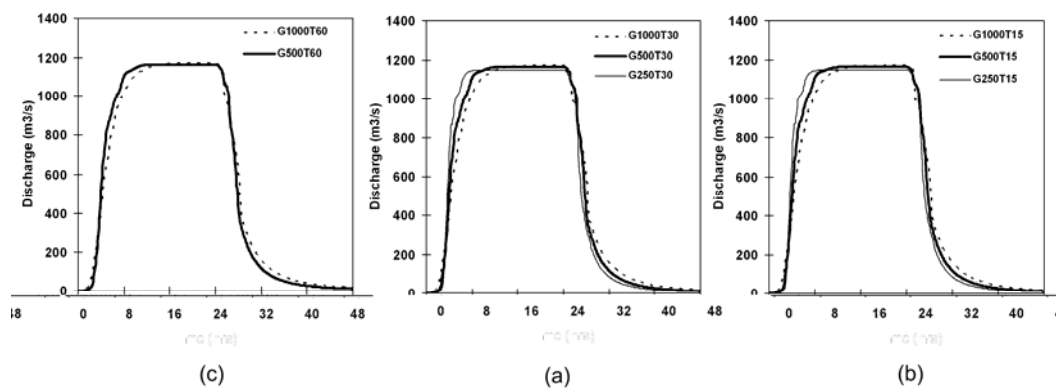
การประเมินขนาดกริดและขั้นเวลา เป็นการทดสอบเสถียรภาพการคำนวณของแบบจำลอง การทดสอบทำโดยสร้างสถานการณ์จำลอง 15 สถานการณ์ตามขนาดกริดและขั้นเวลา โดยกริดแบ่งเป็น 3 ขนาด ได้แก่ 250, 500 และ 1,000 เมตร ขั้นเวลา 5 ระดับ คือ 15, 30, 60, 90 และ 120 วินาที ผลลัพธ์แสดงเป็นผลสำเร็จของการจำลอง กราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำ และความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ขั้นเวลาต่างกัน

ผลสำเร็จของการจำลองการไหลของน้ำทั้ง 15 สถานการณ์ (ในตารางที่ 16) พบว่าแบบจำลองสามารถให้ผลลัพธ์การคำนวณได้ 10 สถานการณ์ ส่วนอีก 5 สถานการณ์ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ได้ โดยจากตารางพบว่า กริดขนาด 1,000 เมตร แบบจำลองสามารถให้ผลสำเร็จได้ทุกขั้นเวลา ส่วนกริดขนาดเล็กลงมาแบบจำลองให้ผลลัพธ์กรณีขั้นเวลาสั้นเท่านั้น กริดขนาด 500 เมตรให้ผลลัพธ์ได้เฉพาะขั้นเวลาสั้นกว่า 90 วินาที ส่วนกริดขนาด 250 เมตร ให้ผลลัพธ์ที่ขั้นเวลาสั้นกว่า 60 วินาที

ตารางที่ 16 ผลสำเร็จของการจำลองที่ขนาดกริดและขั้นเวลาต่าง ๆ

Time step (second)	Grid size (m)		
	250 m	500 m	1000 m
15	√	√	√
30	√	√	√
60	×	√	√
90	×	×	√
120	×	×	√

หมายเหตุ สัญลักษณ์ × แทนการคำนวณไม่ได้ผลลัพธ์, √ แทนการคำนวณได้ผลลัพธ์

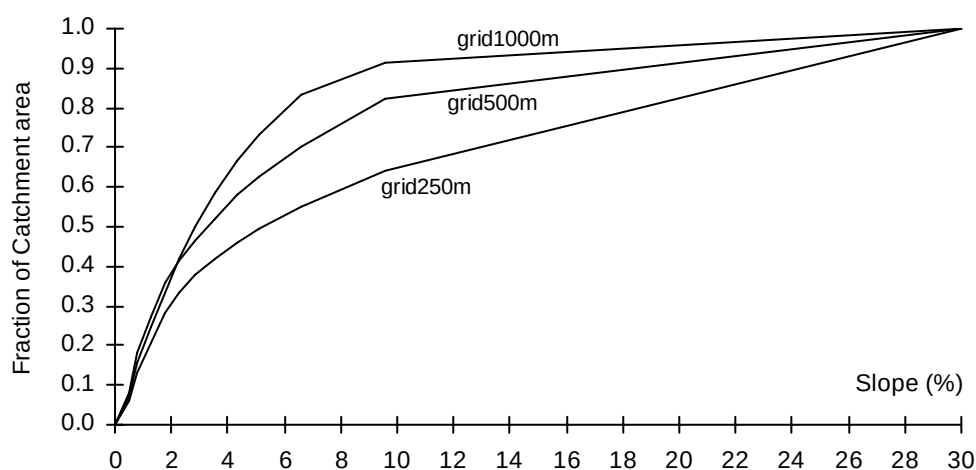


ภาพที่ 47 การเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำ

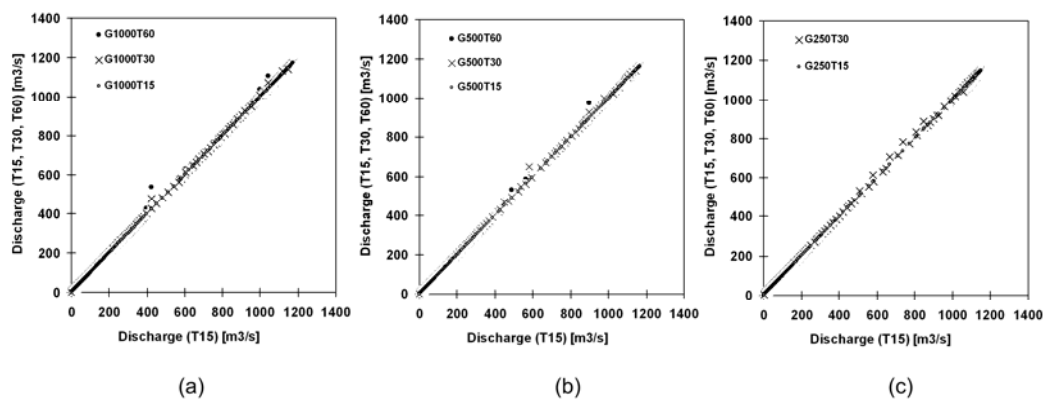
- หมายเหตุ (a) กราฟน้ำท่าที่ขึ้นเวลา 60 วินาที ของกริดขนาด 500 และ 1,000 เมตร
 (b) กราฟน้ำท่าที่ขึ้นเวลา 30 วินาที ของกริดขนาด 250, 500 และ 1,000 เมตร
 (c) กราฟน้ำท่าที่ขึ้นเวลา 15 วินาที ของกริดขนาด 250, 500 และ 1,000 เมตร

การพิจารณากราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำในภาพที่ 47 เป็นการเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่เกิดจากกริดขนาดต่างกันแต่ขึ้นเวลาเดียวกัน สังเกตได้ว่า กริดขนาด 250 เมตร (เส้นบาง) ให้ระยะเวลาการเกิดน้ำท่าสูงสุดเร็วกว่ากริดขนาด 500 (เส้นเข้ม) และ 1,000 เมตร (เส้นประ) เล็กน้อย โดยกริดขนาด 1,000 เมตร ให้ระยะเวลาที่เกิดช้าสุด

จากผลลัพธ์ก่อนหน้านี้ มีข้อสังเกตว่าการจำลองการไหลด้วยกริดขนาดต่างกันทำให้ผลลัพธ์ต่างกัน ในการนี้จึงได้วิเคราะห์ข้อมูลค่าความลาดชันจากข้อมูล DEM ของกริดขนาด 250, 500 และ 1,000 เมตร โดยในภาพที่ 48 แสดงค่าความลาดชันและสัดส่วนของพื้นที่ ซึ่งพบว่า ผลการคำนวณความลาดชันจาก กริดขนาด 250 เมตร ให้สัดส่วนพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงกว่ากริดขนาด 500 เมตร และขนาด 1,000 เมตร โดยกริดขนาด 1,000 เมตร ให้สัดส่วนพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงน้อยสุด ด้วยเหตุนี้ จึงอาจกล่าวได้ว่า กราฟน้ำท่าที่คำนวณได้จากกริดขนาดเล็กมีแนวโน้มเกิดขึ้นเร็วกว่า กริดขนาดใหญ่



ภาพที่ 48 เปอร์เซ็นต์สะสมของความลาดชันของพื้นที่



ภาพที่ 49 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ขึ้นเวลา 15, 30 และ 60 วินาที โดย

หมายเหตุ (a) กริดขนาด 1,000 เมตร ใช้ขึ้นเวลา 15 วินาที เป็นข้อมูลอ้างอิง

(b) กริดขนาด 500 เมตร ใช้ขึ้นเวลา 15 วินาที เป็นข้อมูลอ้างอิง

(c) กริดขนาด 250 เมตร ใช้ขึ้นเวลา 15 วินาที เป็นข้อมูลอ้างอิง

ในภาพที่ 49 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ขึ้นเวลา 15, 30 และ 60 วินาที โดยใช้ขึ้นเวลา 15 วินาที เป็นข้อมูลอ้างอิง ผลการเปรียบเทียบสังเกตว่า กราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรงในกริดทั้งสามขนาด ฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่า การจำลองด้วยกริดขนาดเดียวกันแต่ใช้ขึ้นเวลาต่างกันผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบข้างต้น มีข้อสังเกตเกี่ยวกับผลลัพธ์บางส่วน โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองจีเรส์กับแบบจำลอง GSSHA สังเกตได้ว่ากราฟน้ำท่าของทั้งสองแบบจำลองใกล้เคียงกัน และเมื่อเทียบกราฟน้ำท่าเป็นความลึกน้ำพบว่าแบบจำลองทั้งสองให้ค่าต่ำกว่าความลึกของน้ำฝนเล็กน้อย ผลส่วนนี้เห็นว่า น้ำบางส่วนที่หายไปเกิดจากเงื่อนไขการหยุดดำเนินงานของแบบจำลองเร็วเกินไป โดยสังเกตได้จากกราฟน้ำท่าเมื่อเวลาสิ้นสุดการจำลอง ซึ่งเส้นกราฟยังไม่ตัดกับแกนนอน แสดงว่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำยังมีน้ำไหลออกตลอดเวลาแต่ปริมาณค่อนข้างน้อย ดังนั้น จึงเห็นว่าน้ำที่ยังคงไหลออกนี้เป็นปริมาณน้ำส่วนที่หายไป

ส่วนการประเมินขนาดกริดและชั้นเวลา โดยจาก 15 สถานการณ์สมมุติ (ในตารางที่ 1) พบว่าแบบจำลองไม่สามารถให้ผลลัพธ์ 5 สถานการณ์ ซึ่งผลการจำลองในส่วนนี้เห็นว่า ก่อนการคำนวณจะล้มเหลว ความเร็วของการไหลในกริดมีค่าค่อนข้างสูง เป็นผลให้เกิดการแกว่งตัวของผลลัพธ์เล็กน้อย และรุนแรงขึ้นเมื่อค่า CFL เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งเป็นช่วงที่กราฟน้ำท่าเข้าใกล้จุดสูงสุด โดยสาเหตุอาจเกิดจากชั้นเวลาไม่เหมาะสมกับขนาดของกริดโดยกริดขนาดเล็กที่คำนวณด้วยชั้นเวลากว้างเกินไปมีผลให้แบบจำลองไม่สามารถให้ผลลัพธ์ได้

จากผลการจำลองทั้งสองส่วน ได้ใช้เป็นแนวทางในการกำหนดขนาดกริดและชั้นเวลา สำหรับงานวิจัยในขั้นตอนต่อไป ในการนี้ได้เลือกกริดขนาด 1,000 เมตร และชั้นเวลา 60 วินาที เป็นเกณฑ์ในการกำหนดแบบจำลอง โดยเหตุผลที่เลือกมาจากการพิจารณาด้านเวลาในการจำลอง ซึ่งในกรณีการจำลองด้วยกริดที่ใกล้เคียงกัน เช่น กริดกริด 500 เมตร ชั้นเวลา 60 วินาที ถึงแม้แบบจำลองจะสามารถคำนวณได้ผลลัพธ์ แต่เมื่อพิจารณาเรื่องของเวลาในการจำลอง สังเกตได้ว่ากริด 500 เมตร ใช้เวลานานกว่ากริด 1,000 เมตร ค่อนข้างมาก

2. การเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลของน้ำในดินกับแบบจำลอง SWAP

ผลลัพธ์ส่วนนี้ เป็นการทดสอบองค์ประกอบคำนวณการไหลของน้ำในดินโดยใช้ด้วยสมการการไหลของริชาร์ดแบบ 1 มิติ และหาคำตอบสมการโดยระเบียบวิธี Finite Difference การทดสอบแบบจำลองทำได้โดยการจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินเป็นรายวัน ระยะเวลา 2 ปี (ม.ค.44 ถึง ธ.ค.45) ในกรณีดินเปล่า (bare soil) และกรณีปลูกหญ้า (grass covered surface) กับชุดดินนครปฐมและชุดดินสระบุรี

การทวนสอบผลลัพธ์ทำได้โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลอง SWAP โดยกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้งสองให้เหมือนกัน (รายละเอียดข้อกำหนดแสดงไว้ในหัวข้อวิธีการ) ผลลัพธ์แบบจำลองนำเสนอเป็นสามส่วน ได้แก่ (1) การระเหยจากดินกรณีดินเปล่า (2) การระเหยและคายน้ำกรณีปลูกหญ้า และ (3) การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน

2.1 การระเหยจากดินกรณีดินเปล่า

การเปรียบเทียบผลการประมาณค่าปริมาณการระเหยระหว่างแบบจำลองจิเรสต์และแบบจำลอง SWAP ในกรณีดินเปล่ากับชุดดินนครปฐมและชุดดินสระบุรี แสดงดังตารางที่ 17 โดยเปรียบเทียบค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย จากผลลัพธ์เมื่อพิจารณาโดยรวมชุดดินทั้งสองชุดให้ปริมาณการระเหยจากดินใกล้เคียงกัน

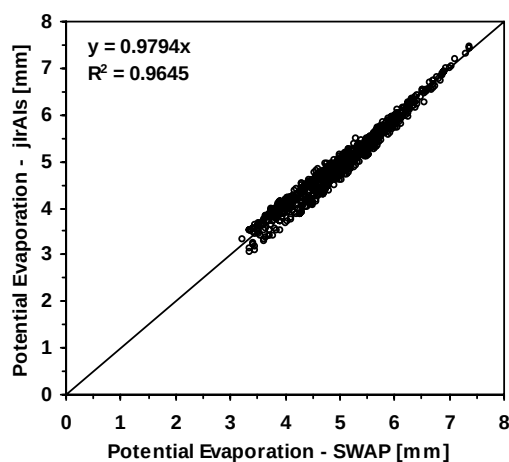
ตารางที่ 17 ปริมาณการระเหยจากดิน กรณีดินเปล่า

ชุดดิน	แบบจำลอง	ศักยภาพการระเหย (E_p)			การระเหยจริง (E_a)		
		สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย
นครปฐม (Np)	SWAP	7.39	3.22	4.98	6.59	0.14	1.91
	jIraIs	7.46	3.06	4.89	6.49	0.16	1.95
สระบุรี (Sb)	SWAP	7.39	3.22	4.98	6.59	0.10	1.65
	jIraIs	7.46	3.06	4.89	6.49	0.10	1.73

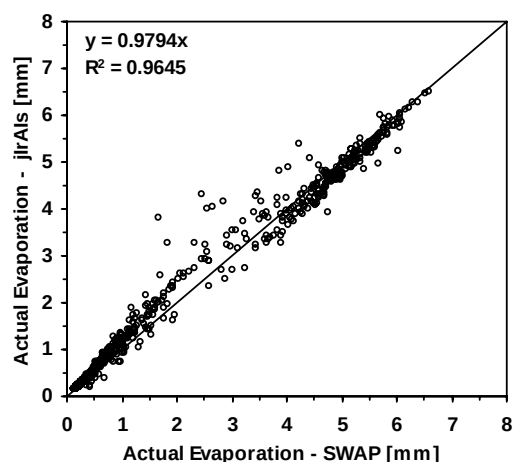
หมายเหตุ หน่วย (มิลลิเมตร)

การเปรียบเทียบการระเหยระหว่างแบบจำลองจิเรสต์และแบบจำลอง SWAP ในชุดดิน นครปฐม (ในภาพที่ 50) และชุดดินสระบุรี (ในภาพที่ 51) ซึ่งการเปรียบเทียบได้แสดงเป็นกราฟ ความสัมพันธ์ของศักย์การระเหย (potential evaporation) (ภาพที่ 50(ก) และภาพที่ 51(ก)) และการระเหยจริง (actual evaporation) (ภาพที่ 50(ข) และภาพที่ 51(ข)) จากกราฟพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าสูงใกล้เคียง 1 ฉะนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลการประมาณค่าศักย์การระเหยใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณการระเหยจริงแบบจำลองจิเรสต์มีแนวโน้มให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย

กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงศักย์การระเหยและการระเหยจริงเป็นรายวัน (ม.ค.44 ถึง ธ.ค.45) แสดงในภาพที่ 52 (ชุดดินนครปฐม) และภาพที่ 53 (ชุดดินสระบุรี) โดยสังเกตได้ว่า การระเหยในดินทั้งสองชุดดิน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยศักย์การระเหยสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนเมษายนซึ่งตรงกับหน้าแล้ง ค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเดือนธันวาคม ส่วนปริมาณการระเหยจริงสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนกันยายนและเดือนตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงฝนทำให้ปริมาณน้ำในดินมีค่าสูง ส่วนค่าต่ำสุดอยู่ในเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงหน้าแล้งปริมาณน้ำในดินต่ำ

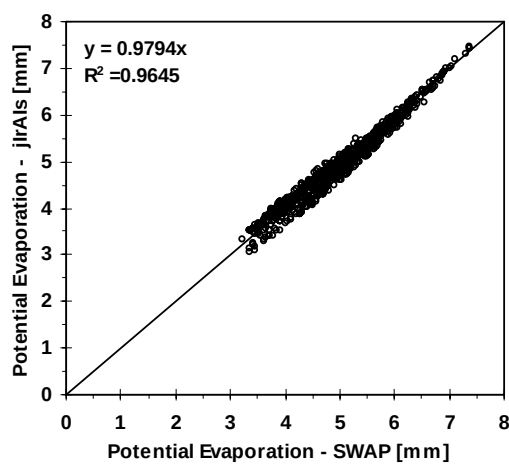


(ก) potential evaporation [Ep]

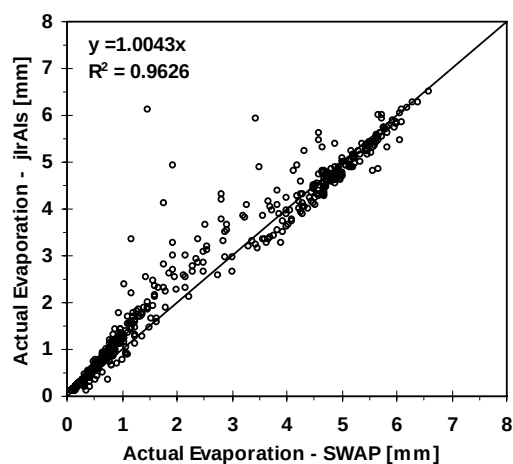


(ข) actual evaporation [Ea]

ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบการระเหยของน้ำระหว่างแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์
กรณีดินเปล่า ในชุดดินนครปฐม

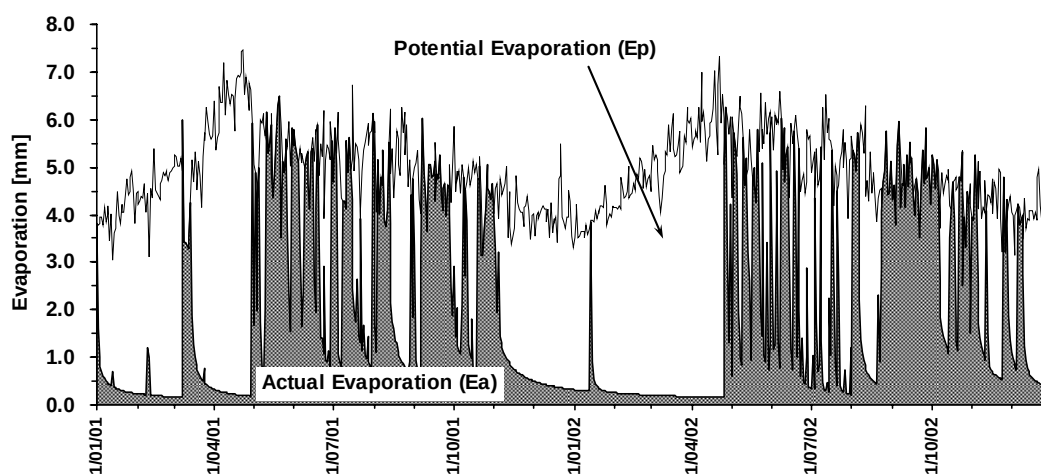


(ก) potential evaporation [Ep]

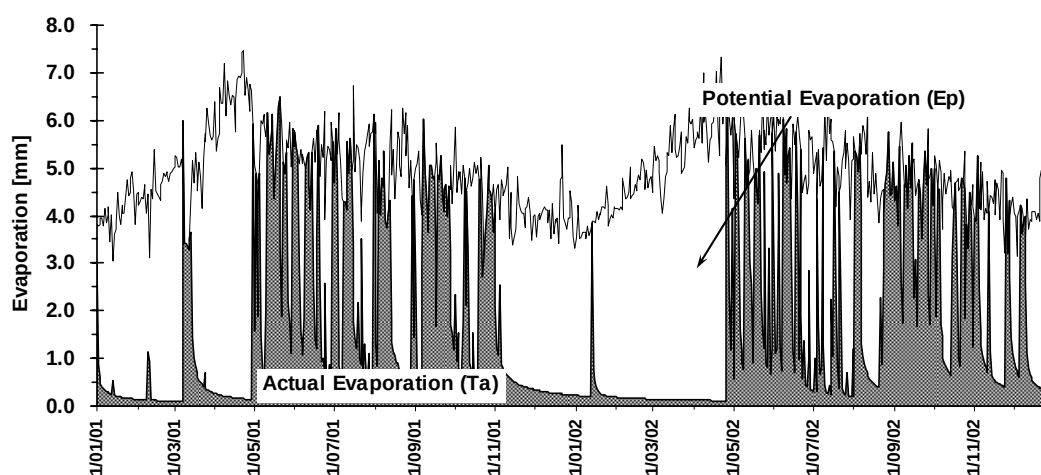


(ข) actual evaporation [Ea]

ภาพที่ 51 การเปรียบเทียบการระเหยของน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์
กรณีดินเปล่า ในชุดดินสระบุรี



ภาพที่ 52 ปริมาณการระเหยรายวันจากแบบจำลองจิเรส์ กรณีดินเปล่า ในชุดดินนครปฐม



ภาพที่ 53 ปริมาณการระเหยรายวันจากแบบจำลองจิเรส์ กรณีดินเปล่า ในชุดดินสระบุรี

2.2 การระเหยและคายน้ำกรณีปลูกหญ้า

การเปรียบเทียบการระเหยและคายน้ำในกรณีปลูกหญ้า ระหว่างแบบจำลองจิเรสและแบบจำลอง SWAP สรุปเป็นสัจการระเหย (evaporation) (ในตารางที่ 18) และการคายน้ำ (transpiration) (ในตารางที่ 19) จากผลลัพธ์เมื่อพิจารณาค่าสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ของการระเหยและการคายน้ำ โดยสังเกตเห็นว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลการประมาณค่าอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน และเมื่อนำผลลัพธ์เปรียบเทียบกับกรณีแรก พบว่า สัจการระเหยและการระเหยจริงในกรณีปลูกหญ้าให้ค่าต่ำกว่ากรณีดินเปล่า

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัจการระเหยในชุดดินนครปฐม (ในภาพที่ 54(ก)) และชุดดินสระบุรี (ในภาพที่ 55(ก)) พบว่ามีค่าใกล้ 1 โดยกราฟกระจายตัวในแนวเส้นตรง ส่วนการระเหยจริงกราฟมีการกระจายตัวออกจากแนวเส้นตรง โดยแบบจำลองจิเรสให้ค่าการระเหยจริงสูงกว่าแบบจำลอง SWAP ซึ่งชุดดินนครปฐม (ในภาพที่ 54(ข)) ให้ค่าต่างไม่มากนัก ส่วนชุดดินสระบุรี (ในภาพที่ 55(ก)) ให้ค่าต่างกันมากกว่า โดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.9

ส่วนการคายน้ำ (transpiration) เมื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ในลักษณะเดียวกันกับการระเหย โดยสังเกตได้ว่า แบบจำลองทั้งสองประมาณค่าสัจการคายน้ำในชุดดินนครปฐม (ภาพที่ 58(ข)) และชุดดินสระบุรี (ภาพที่ 59(ก)) ใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 ส่วนค่าการคายน้ำจริงแบบจำลองทั้งสองให้ค่าต่างกันตามชนิดของชุดดิน โดยชุดดินนครปฐม (ภาพที่ 58(ข)) แบบจำลองทั้งสองให้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วนชุดดินสระบุรี (ภาพที่ 59(ข)) แบบจำลองทั้งสองให้ค่าต่างกันค่อนข้างมาก โดยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ลดลงมาที่ระดับ 0.5 ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับชุดดินนครปฐม

ตารางที่ 18 ปริมาณการระเหยจากดิน กรณีปลูกหญ้า

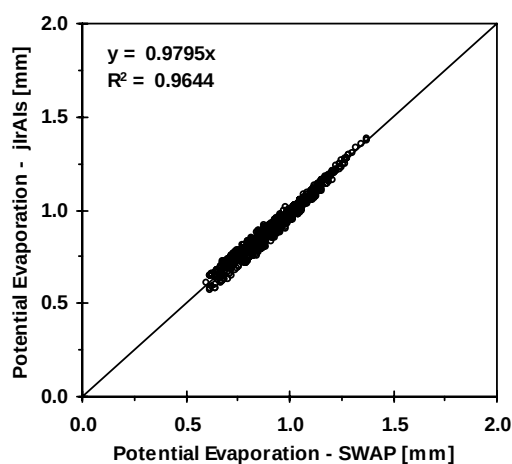
ชุดดิน	แบบจำลอง	ศักย์การระเหย (Ep)			การระเหยจริง (Ea)		
		สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย
นครปฐม (Np)	SWAP	1.37	0.60	0.92	1.27	0.01	0.50
	jIraIs	1.38	0.57	0.90	1.24	0.01	0.50
สระบุรี (Sb)	SWAP	1.37	0.60	0.92	1.27	0.01	0.46
	jIraIs	1.38	0.57	0.90	1.24	0.01	0.51

หมายเหตุ หน่วย (มิลลิเมตร)

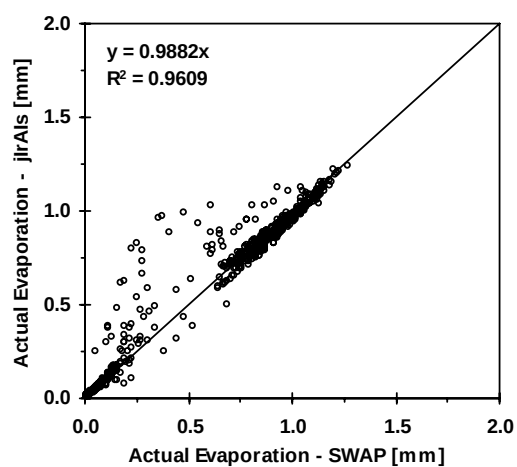
ตารางที่ 19 ปริมาณการคายน้ำ กรณีปลูกหญ้า

ชุดดิน	แบบจำลอง	ศักย์การคายน้ำ (Tp)			การคายน้ำจริง (Ta)		
		สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย
นครปฐม (Np)	SWAP	6.69	1.55	3.77	5.25	0.00	1.58
	jIraIs	6.85	1.86	3.86	5.30	0.00	1.71
สระบุรี (Sb)	SWAP	6.69	1.55	3.77	5.08	0.03	1.32
	jIraIs	6.85	1.86	3.86	5.20	0.00	1.52

หมายเหตุ หน่วย (มิลลิเมตร)

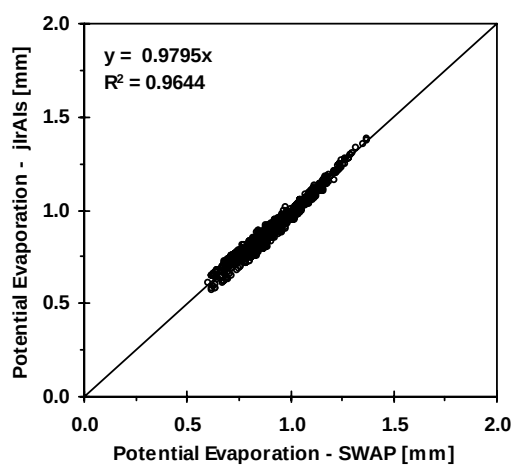


(ก) potential evaporation [Ep]

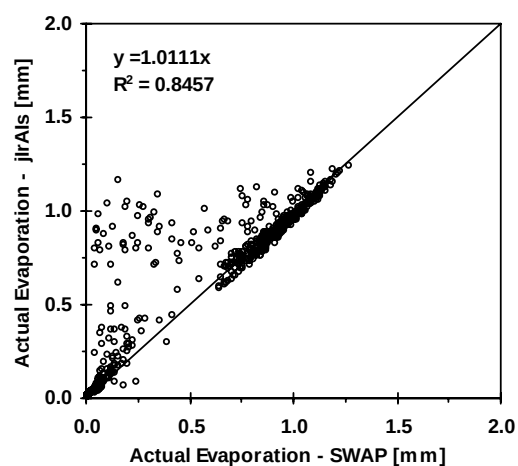


(ข) actual evaporation [Ea]

ภาพที่ 54 การเปรียบเทียบการระเหยของน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์
กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินนครปฐม

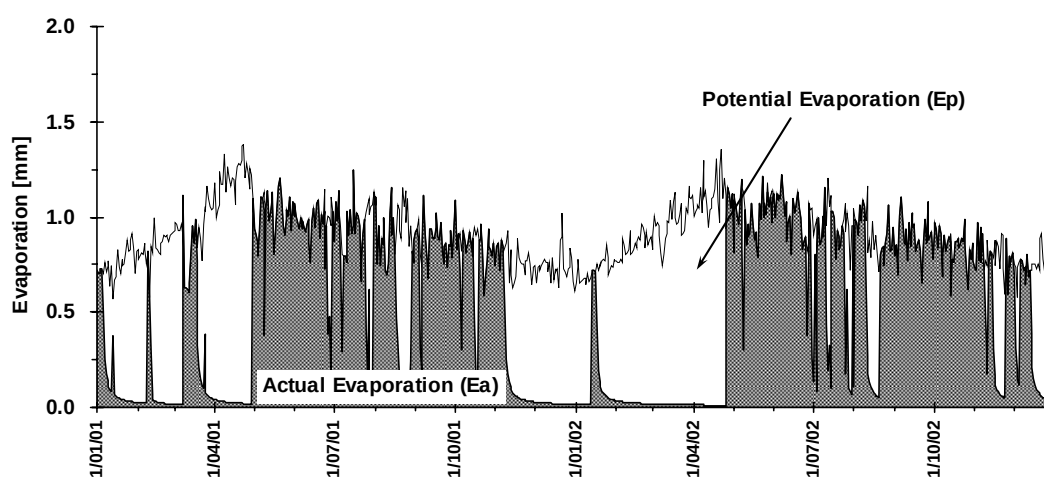


(ก) potential evaporation [Ep]

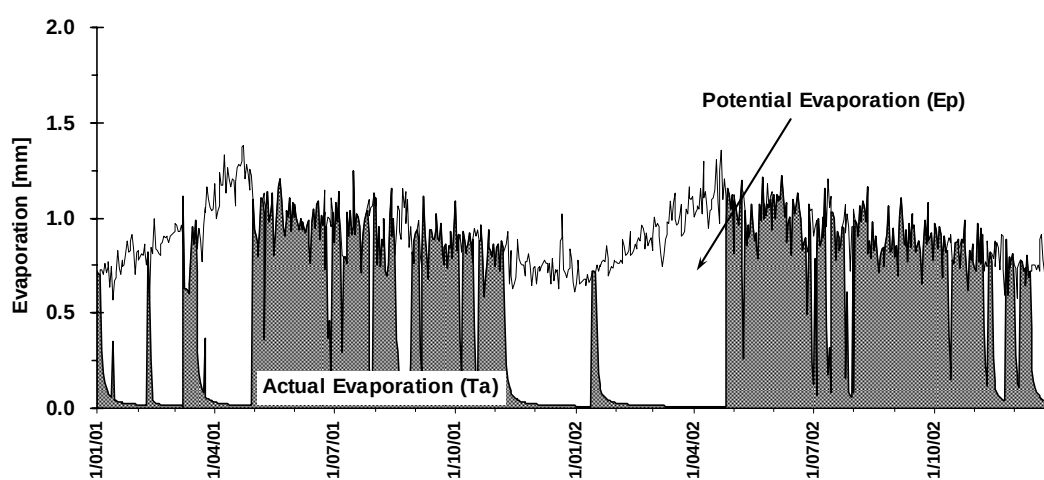


(ข) actual evaporation [Ea]

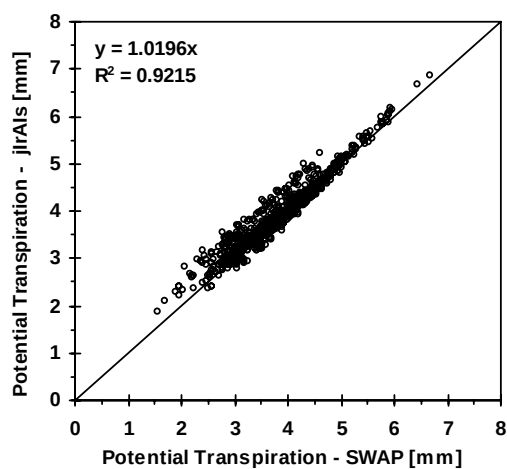
ภาพที่ 55 การเปรียบเทียบการระเหยของน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์
กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินสระบุรี



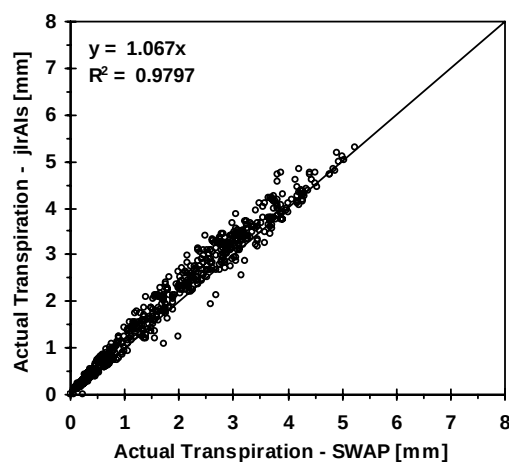
ภาพที่ 56 ปริมาณการระเหยรายวันจากแบบจำลองจีเรส์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินนครปฐม



ภาพที่ 57 ปริมาณการระเหยรายวันจากแบบจำลองจีเรส์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินสระบุรี

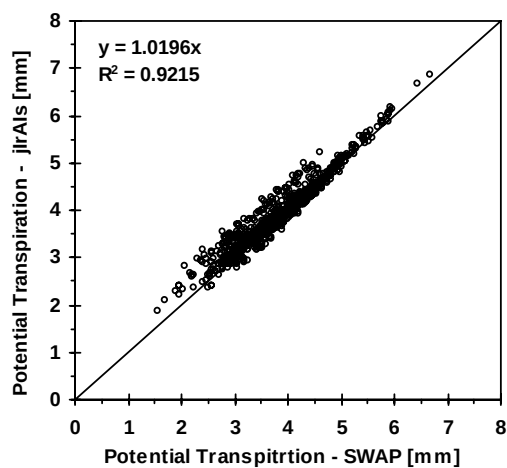


(ก) potential transpiration [Tp]

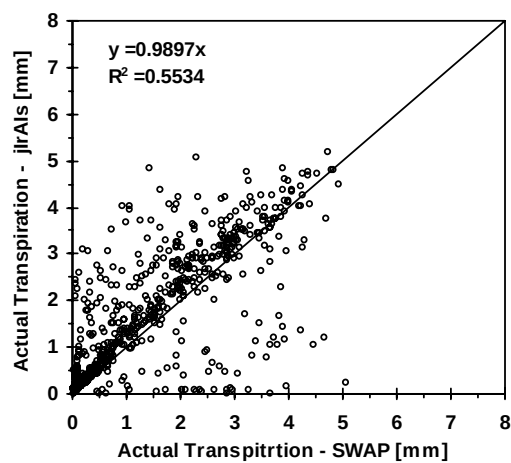


(ข) actual transpiration [Ta]

ภาพที่ 58 การเปรียบเทียบการคายน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์
กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินนครปฐม

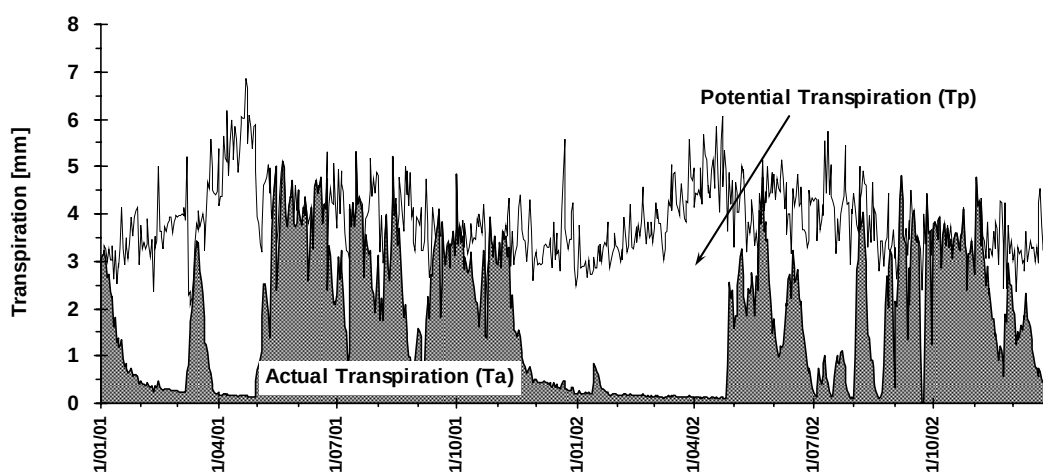


(ก) potential transpiration [Tp]

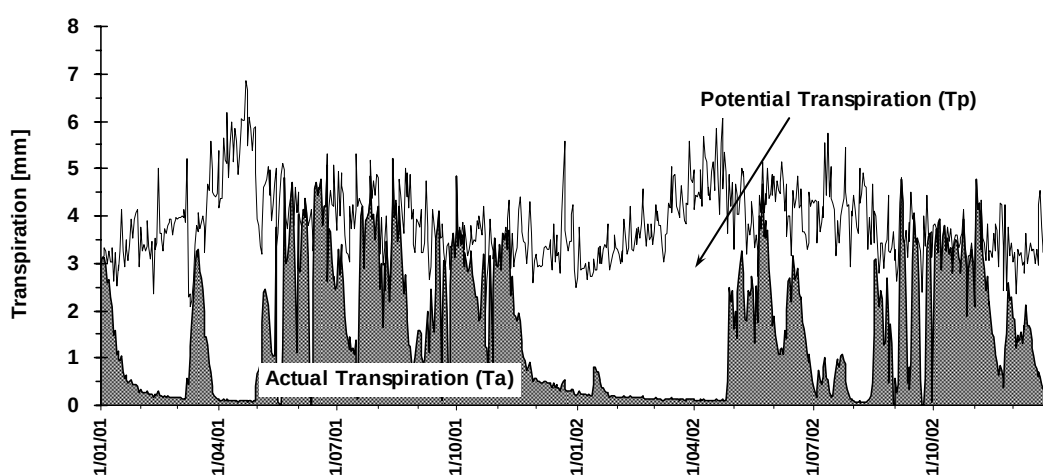


(ข) actual transpiration [Ta]

ภาพที่ 59 การเปรียบเทียบการคายน้ำจากแบบจำลอง SWAP และแบบจำลองจิเรสต์
กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินสระบุรี



ภาพที่ 60 ปริมาณการคายน้ำรายวันจากแบบจำลองจีเรส์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินนครปฐม



ภาพที่ 61 ปริมาณการคายน้ำรายวันจากแบบจำลองจีเรส์ กรณีปลูกหญ้า ในชุดดินสระบุรี

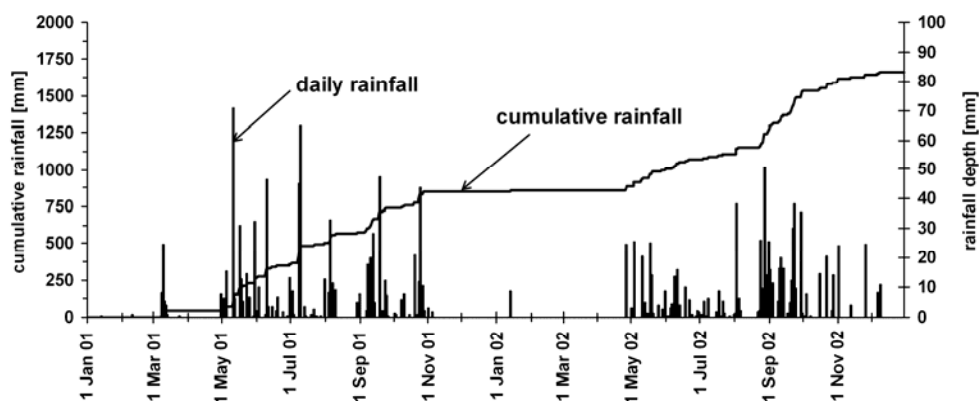
2.3 การจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน

ผลลัพธ์ส่วนนี้ เป็นการจำลองการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินเป็นรายวัน ตั้งแต่ 1 มกราคม 2544 ถึง 1 ธันวาคม 2545 การจำลองมีสองกรณี คือ กรณีดินเปล่า (bare soil) และกรณีปลูกหญ้า (grass covered surface) โดยการจำลองการไหลของน้ำในชุดดินนครปฐม (Nakhon Pathom soil series หรือ Np) และชุดดินสระบุรี (Saraburi soil series หรือ Sb) ซึ่งชุดดินนครปฐม แทนดินร่วนส่วนชุดดินสระบุรีแทนดินเหนียว

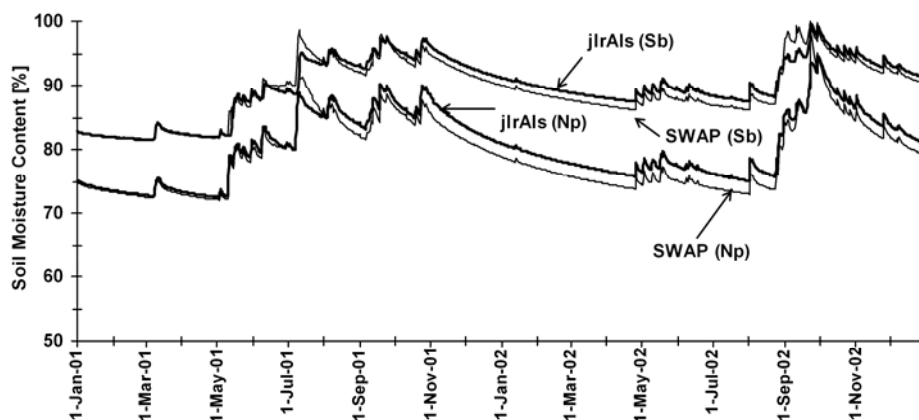
ผลการจำลองแสดงเป็นภาพการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินกรณีดินเปล่า (ในภาพที่ 63) และกรณีปลูกหญ้า (ในภาพที่ 64) โดยในสองภาพแกนอนแสดงสัดส่วนความชื้นดินที่เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 50 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแกนตั้งเป็นระยะเวลาจำลอง กราฟเส้นเข็มหนา แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากแบบจำลองจิเรสในชุดดินสระบุรีและชุดดินนครปฐม (jIrAIs[Sb] และ jIrAIs[Np]) ส่วนเส้นเล็กบางเป็นผลลัพธ์จากแบบจำลอง SWAP (SWAP[Sb] และ SWAP[Np])

จากกราฟทั้งสองกรณีสังเกตได้ว่า นับตั้งแต่เริ่มต้นการจำลองสถานการณ์ในเดือน มกราคม ปริมาณความชื้นในดินมีปริมาณลดลงช้า ๆ จนกระทั่งฝนตกถึงหลังเดือนเมษายน (ในภาพที่ 62) ปริมาณความชื้นจึงกลับเพิ่มขึ้นและมีการแกว่งตัวในช่วงไม่กว้างนักตลอดฤดูฝน เมื่อฝนหยุดตกหลังเดือนตุลาคม ทำให้ปริมาณความชื้นค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งเดือนเมษายนในปีถัดไป ปริมาณน้ำในดินจึงกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ในช่วงปลายฤดูฝนของรอบปีที่สองระหว่างเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม ปริมาณความชื้นในดินมีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก จนทำให้หน้าตัดดินอึดตัวด้วยน้ำทั้งหน้าตัดในการจำลองสถานการณ์บางกรณี ส่วนผลลัพธ์ของแบบจำลอง SWAP ในการจำลองกรณีปลูกหญ้าของดินสระบุรี (ในภาพที่ 64) ซึ่งให้ผลไม่สอดคล้องกับผลของแบบจำลองจิเรส โดยปริมาณความชื้นในดินมีค่าค่อนข้างต่ำกว่ามาก และมีการตอบสนองต่อน้ำฝนที่ซึมลงดินน้อย

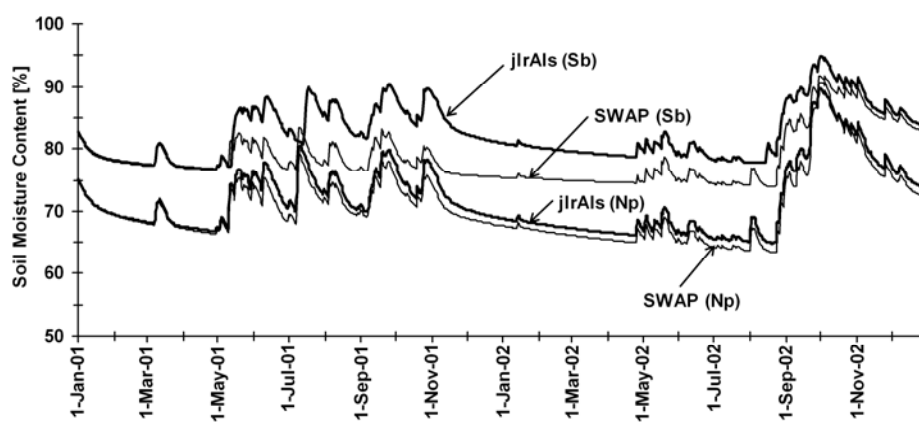
ทั้งนี้ เนื่องจากชุดดินสระบุรีเป็นดินเหนียวมีค่าการนำน้ำค่อนข้างต่ำ เมื่อฝนตกในปริมาณมากมีผลให้น้ำซึมลงดินไม่หมด จึงเกิดเป็นฝนส่วนเกินขึ้น แบบจำลอง SWAP กำหนดให้ฝนส่วนเกินไหลเป็นน้ำท่าผิวดินออกจากหน่วยที่พิจารณา ส่วนแบบจำลองจิเรส กำหนดให้ เป็นน้ำขังบนผิวดิน และไหลซึมลงดินในวันถัดมา



ภาพที่ 62 ปริมาณน้ำฝนรายวันและปริมาณน้ำฝนสะสม (1 ม.ค. 01 ถึง 31 ม.ค.02)



ภาพที่ 63 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน กรณีดินเปล่า



ภาพที่ 64 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน กรณีปลูกหญ้า

จากผลลัพธ์การจำลองการไหลของน้ำในดินข้างต้น สรุปว่า ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินมีแนวโน้มสอดคล้องกัน ทั้งผลจากแบบจำลองจิเรสส์และแบบจำลอง SWAP ทั้งกรณีดินเปล่าและกรณีปลูกหญ้า ผลลัพธ์จากแบบจำลองจิเรสส์ให้ค่าปริมาณความชื้นในดินโดยเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อย ชุดดินสระบุรีซึ่งเป็นดินเหนียวมีปริมาณความชื้นในดินโดยเฉลี่ยสูงกว่าชุดดินนครปฐมซึ่งเป็นดินร่วน และท้ายสุดผลการจำลองกรณีปลูกหญ้ามียุติปริมาณน้ำในดินโดยเฉลี่ยน้อยกว่ากรณีดินเปล่า

3. การศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง

ผลการศึกษาส่วนนี้มีวัตถุประสงค์ที่ ตอบคำถามหลัก คือ การกำหนดคุณสมบัติหน้าตัดดินต่างกันมีผลทำให้ผลลัพธ์การจำลองแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งผลส่วนนี้จะใช้เป็นแนวทางกำหนดคุณสมบัติดินในงานวิจัยขั้นต่อไป การศึกษาทำโดยจำลองการไหลของน้ำในดินเป็นรายวัน 56 สถานการณ์ (ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2000 ถึง 31 ธันวาคม 2002) การจำลองได้กำหนดเนื้อดินเป็น 8 ชนิด เริ่มจากเนื้อดินละเอียดจนถึงเนื้อดินหยาบ และกำหนดคุณสมบัติหน้าตัดดินต่างกัน 7 รูปแบบ (ในตารางที่ 20) ทำให้สามารถสร้างสถานการณ์จำลองได้ 56 สถานการณ์ (ในตารางที่ 21)

ผลลัพธ์ในส่วนนี้ แบ่งการนำเสนอออกเป็นสองส่วน ได้แก่ (1) สมดุลน้ำในดินและองค์ประกอบของสมดุลน้ำ และ (2) การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในหน้าตัดดิน

ในการนี้ ผลส่วนนี้มีค่อนข้างมาก ฉะนั้น การนำเสนอจึงเลือกผลลัพธ์บางส่วนที่เกี่ยวข้องกับดินที่มีเนื้อเป็นดินเหนียว ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ศึกษา ซึ่งอยู่ในเขตโครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน (การศึกษาในบทสุดท้าย) มีการกระจายตัวของดินเหนียวค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับดินชนิดอื่น ฉะนั้นในส่วนนี้ได้นำเสนอผลลัพธ์เฉพาะหน้าตัดดินที่มีคุณสมบัติเป็นดินเหนียว ส่วนดินชนิดอื่นอีก 7 ชนิด ได้สรุปไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 20 การกำหนดคุณสมบัติหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ

Soil profile	Horizon 1 [20 cm]	Horizon 2 [80 cm]	Horizon 3 [100 cm]
D1	1 @ 20 cm	1 @ 80 cm	1 @ 100 cm
D2	1 @ 20 cm	4 @ 20 cm	5 @ 20 cm
D3	4 @ 5 cm	4 @ 20 cm	1 @ 100 cm
D4	5 @ 1 cm, 3 @ 5 cm	4 @ 20 cm	1 @ 100 cm
D5	2 @ 10 cm	8 @ 10 cm	5 @ 20 cm
D6	2 @ 10 cm	8 @ 10 cm	10 @ 10 cm
D7	4 @ 5 cm	16 @ 5 cm	20 @ 5 cm

ตารางที่ 21 จำนวนสถานการณ์สำหรับการทดสอบแบบจำลอง

Soil profile	Soil texture							
	SiCL	SiC	C	CL	L	SCL	SL	LS
D1	D1SiCL	D1SiC	D1C	D1CL	D1L	D1SCL	D1SL	D1LS
D2	D2SiCL	D2SiC	D2C	D2CL	D2L	D2SCL	D2SL	D2LS
D3	D3SiCL	D3SiC	D3C	D3CL	D3L	D3SCL	D3SL	D3LS
D4	D4SiCL	D4SiC	D4C	D4CL	D4L	D4SCL	D4SL	D4LS
D5	D5SiCL	D5SiC	D5C	D5CL	D5L	D5SCL	D5SL	D5LS
D6	D6SiCL	D6SiC	D6C	D6CL	D6L	D6SCL	D6SL	D6LS
D7	D7SiCL	D7SiC	D7C	D7CL	D7L	D7SCL	D7SL	D7LS

3.1 สมดุลน้ำ

ผลลัพธ์การเปรียบเทียบสมดุลน้ำบนผิวดิน (สรุปตัวเลขปริมาณน้ำในตารางที่ 22 และสรุปเป็นกราฟในภาพที่ 65) โดยส่วนประกอบของน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบมีเพียงน้ำฝน (rainfall) ส่วนประกอบของน้ำที่ไหลออกจากระบบมีสองส่วนได้แก่ การระเหยจากผิวดิน (evaporation from surface) และการซึมผ่านผิวดิน (infiltration) จากสมดุลน้ำพบว่า ผลรวมของปริมาณน้ำไหลเข้า (total inflow) และไหลออกจากระบบ (total outflow) มีค่าประมาณ 1,700 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 7 หน้าตัด เมื่อพิจารณาส่วนของน้ำที่ไหลออกจากระบบพบว่า หน้าตัดดินทั้ง 7 รูปแบบมีปริมาณการซึมผ่านผิวดินสูงกว่าการระเหยจากผิวดิน โดยหน้าตัด “D7” มีสัดส่วนการซึมผ่านผิวดินสูงสุด หน้าตัด “D1” มีสัดส่วนต่ำสุด ซึ่งตรงข้ามกับการระเหยจากดินพบว่า หน้าตัด “D1” มีสัดส่วนสูงสุด หน้าตัด “D7” มีสัดส่วนต่ำสุด

ส่วนผลลัพธ์การเปรียบเทียบสมดุลน้ำในดิน (สรุปตัวเลขปริมาณน้ำในตารางที่ 23 และสรุปเป็นกราฟในภาพที่ 66) ส่วนประกอบของน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบเป็นปริมาณการซึมผ่านผิวดิน (infiltration) ส่วนประกอบของน้ำที่ไหลออกจากระบบมีสองส่วนได้แก่ การระเหยจากดิน (evaporation from soil) และการซึมลึกลงดิน (deep percolation) จากสมดุลน้ำพบว่า ผลรวมของปริมาณน้ำไหลเข้า (total inflow) และไหลออกจากระบบ (total outflow) ประมาณ 1,000 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าต่างกันในแต่ละหน้าตัดดิน โดยการระเหยจากดินเป็นส่วนของน้ำที่ไหลออกจามากสุด โดยหน้าตัด “D2” มีค่าสูงสุด หน้าตัด “D4” ให้ค่าต่ำสุด ส่วนปริมาณการซึมลึกลงดินหน้าตัด “D4” มีค่าสูงสุด หน้าตัด “D1” ให้ค่าต่ำสุด

ตารางที่ 22 การเปรียบเทียบสมดุลของน้ำบนผิวดินของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว

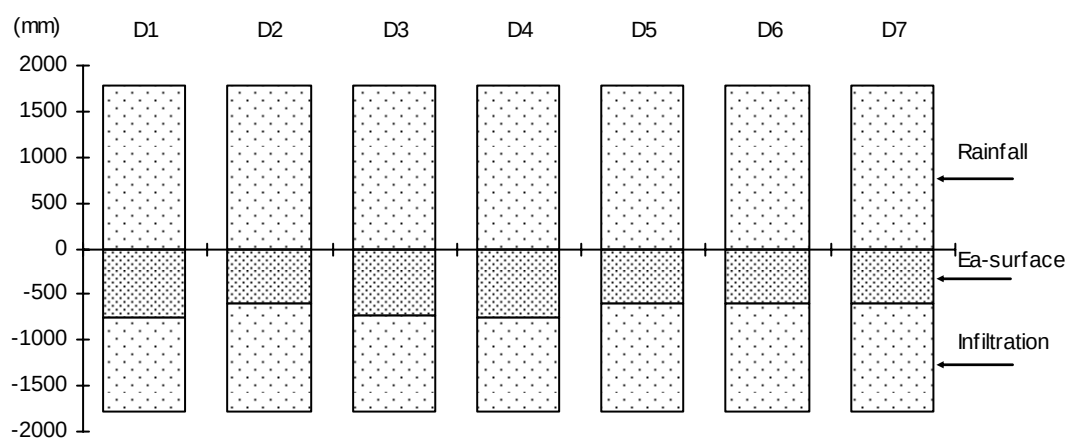
Water balance component	Soil profiles						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
(1) Rainfall	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779
(2) Evaporation from surface [Ea]	-754	-604	-740	-743	-606	-600	-598
(3) Infiltration	-1,024	-1,174	-1,039	-1,035	-1,173	-1,178	-1,181
(4) Surface storage [dH]	0	0	0	0	0	0	0
(4) Total inflow : (1)	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779
(4) Total outflow : (2)+(3)	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779

หมายเหตุ หน่วย (มิลลิเมตร)

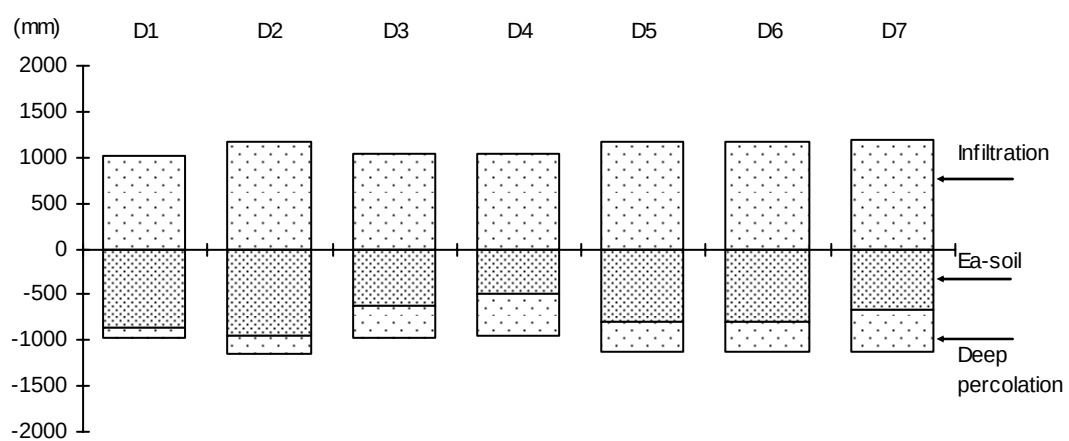
ตารางที่ 23 การเปรียบเทียบสมดุลของน้ำในดินของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว

Water balance component	Soil profiles						
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
(1) Infiltration	1,024	1,174	1,039	1,035	1,173	1,178	1,181
(2) Transpiration	0	0	0	0	0	0	0
(3) Evaporation from soil [Ea-soil]	-866	-945	-619	-492	-807	-808	-672
(4) Deep percolation	-114	-192	-353	-458	-315	-320	-443
(5) Soil water storage [dS]	49	41	71	88	55	54	70
(6) Total inflow : (1)	1,024	1,174	1,039	1,035	1,173	1,178	1,181
(7) Total outflow : (2)+(3)+(4)	-979	-1,137	-972	-949	-1,122	-1,128	-1,114

หมายเหตุ หน่วย (มิลลิเมตร)

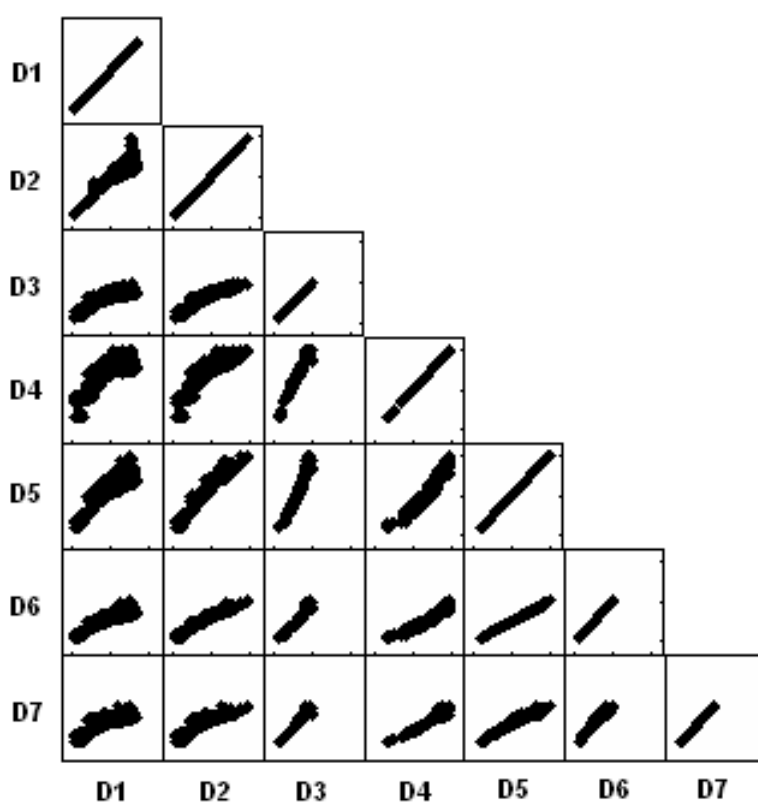


ภาพที่ 65 สัดส่วนของสมมูลน้ำบนผิวดิน ของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว



ภาพที่ 66 สัดส่วนสมมูลน้ำในดิน ของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในกรณีดินเหนียว

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบอื่นของสมมูลน้ำ ความสัมพันธ์ของความชื้นในหน้าตัดดินแต่ละรูปแบบแสดงในภาพที่ 67 ในภาพแสดงรูปแบบการเปรียบเทียบผลลัพธ์ 21 รูปแบบ ซึ่งไม่รวมความสัมพันธ์ของหน้าตัดรูปแบบเดียวกัน จากภาพสังเกตได้ว่า กราฟที่มีรูปแบบความสัมพันธ์ในลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างหน้าตัดรูปแบบ “D5” กับรูปแบบ “D6” รองลงมาคือ ความสัมพันธ์ระหว่าง “D3” กับ “D6” ส่วนหน้าตัดที่มีความสัมพันธ์ในลักษณะกระจายตัวเมื่อเทียบกับหน้าตัดอื่น ๆ ได้แก่ หน้าตัด “D1” และหน้าตัด “D2”

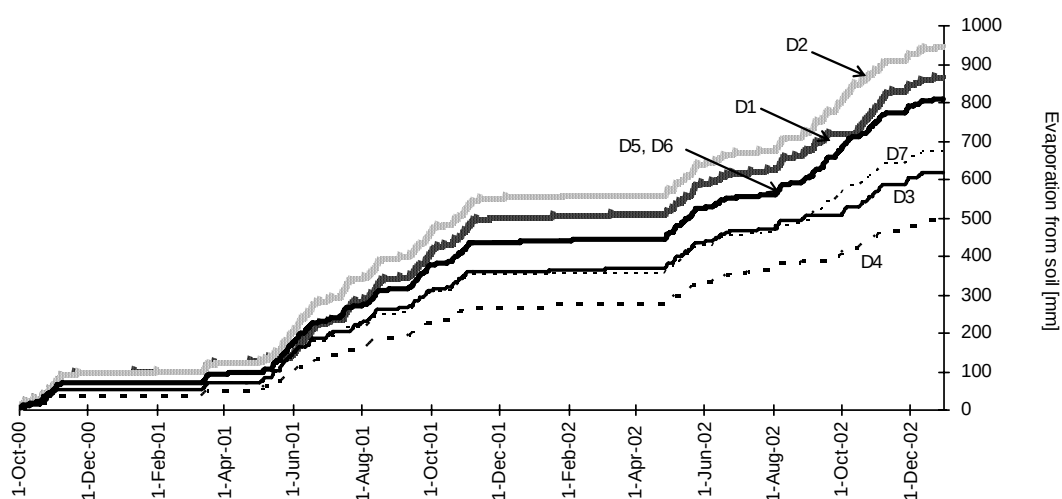


ภาพที่ 67 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นระหว่างหน้าตัดดิน

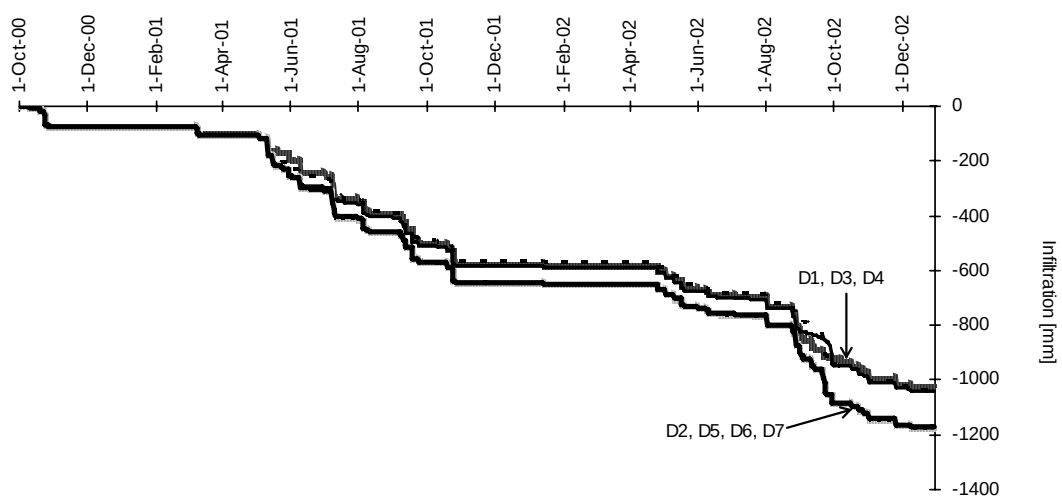
เมื่อพิจารณาปริมาณการระเหยของน้ำจากดินสะสม (cumulative evaporation) ในภาพที่ 68 สังเกตว่าเมื่อสิ้นสุดการจำลองหน้าตัดรูปแบบ “D2” มีค่าการระเหยมากที่สุด รองมาคือรูปแบบ “D1” ส่วนหน้าตัดที่ให้ค่าการระเหยสะสมต่ำสุดคือหน้าตัด “D4”

ในส่วนของการปริมาณการซึมผ่านผิวดินสะสม (cumulative infiltration) ในภาพที่ 69 สังเกตเห็นว่า โดยรวมหน้าตัดดินทั้ง 7 รูปแบบให้ค่าการซึมใกล้เคียงกัน โดยกลุ่มที่ให้ค่าซึมผ่านผิวดินสูงได้แก่ หน้าตัด “D2” “D5” “D6” และ “D7” ส่วนกลุ่มที่ให้ค่าต่ำกว่า คือ หน้าตัดรูปแบบ “D1” “D3” และ “D4”

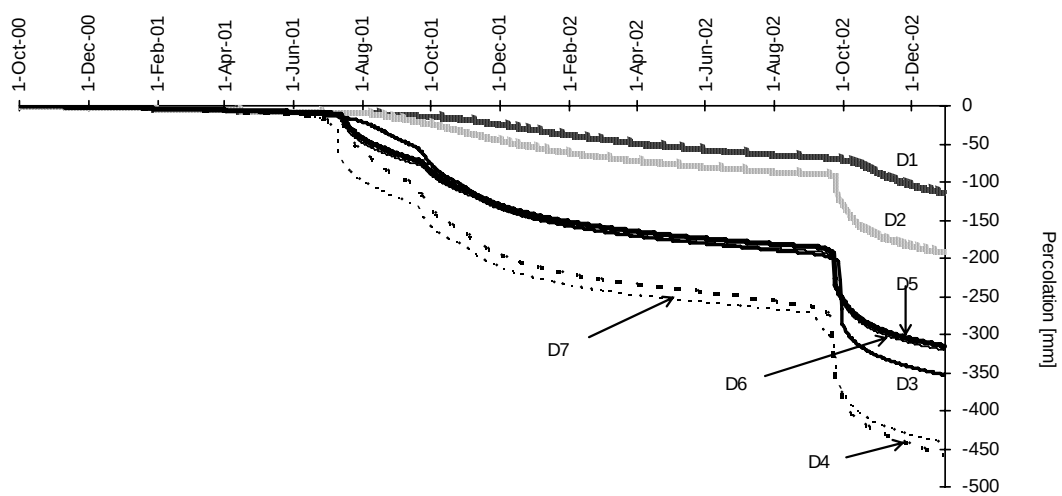
ปริมาณการซึมลึกลงดินสะสม (cumulative percolation) แสดงในภาพที่ 70 โดยสังเกตได้ว่า เมื่อสิ้นสุดการจำลองหน้าตัดดินรูปแบบ “D4” มีปริมาณซึมลึกลงดินมากที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับหน้าตัด “D7” ส่วนหน้าตัดที่มีการซึมผ่านน้อยสุด คือ “D1” รองมาเป็น “D2” หน้าตัดดินรูปแบบที่ “D5” และ “D6” ให้ค่าการซึมผ่านดินใกล้เคียงกันค่อนข้างมาก



ภาพที่ 68 การเปรียบเทียบปริมาณการระเหยจากดินสะสมของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว



ภาพที่ 69 การเปรียบเทียบปริมาณการซึมผ่านผิวดินสะสมของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว



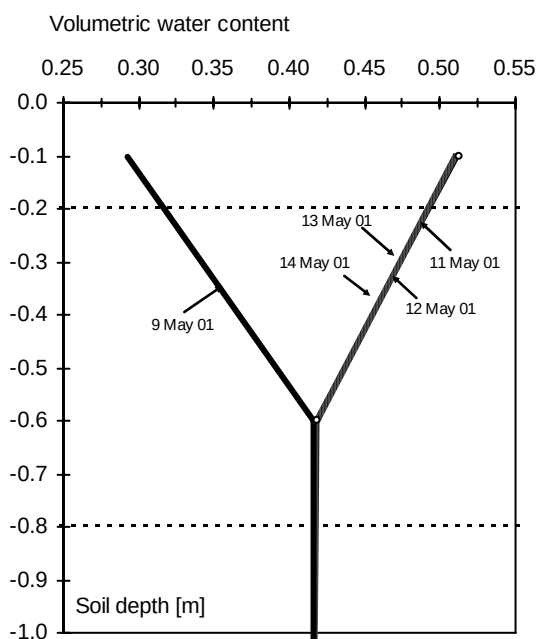
ภาพที่ 70 การเปรียบเทียบปริมาณการซึมลึกลงดินสะสมของหน้าตัดดิน 7 รูปแบบ ในดินเหนียว

3.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในหน้าตัดดิน

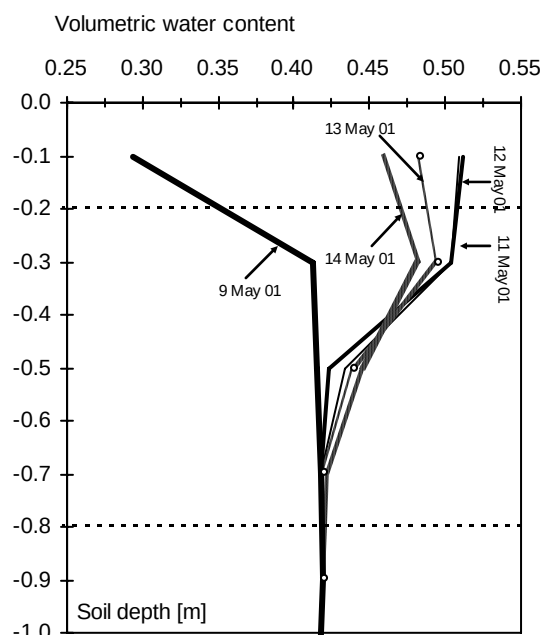
การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นในหน้าตัดดินทั้ง 7 รูปแบบ แสดงในภาพที่ 71 โดยแกนตั้งเป็นความลึกหน้าตัดดิน ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับผิวดิน 1 เมตร สาเหตุที่นำเสนอผลลัพธ์เฉพาะช่วง 1 เมตรแรก เนื่องจากความชื้นที่ระดับต่ำกว่า 1 เมตรลงมามีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ในแกนนอนเป็นความชื้นในช่วง 0.25 ถึง 0.55 นอกจากนี้ ตัวอย่างความชื้นที่นำเสนอเป็นปริมาณความชื้นดินระหว่างวันก่อนฝนตกและหลังฝนตกในเดือนพฤษภาคม ปี 2001 ซึ่งนำเสนอ 5 วัน ดังนี้ วันที่ 9 เป็นวันก่อนฝนตก วันที่ 11 เป็นฝนตก วันที่ 12 เป็นวันหลังฝนตก 1 วัน วันที่ 13 เป็นวันหลังฝนตก 2 วัน และวันที่ 14 เป็นวันหลังฝนตก 3 วัน

ปริมาณความชื้นในหน้าตัด “D1” (ภาพที่ 71(ก)) มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะ 60 ซม.แรก โดยก่อนวันตกความชื้นอยู่ต่ำกว่า 0.40 และระดับใกล้ผิวดินความชื้นค่อนข้างต่ำ จากนั้นเมื่อฝนตกความชื้นกลับเพิ่มสูงขึ้นและยังคงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงภายหลังฝนตกเป็นระยะเวลา 3 วัน ส่วนหน้าตัด “D2” (ภาพที่ 71(ข)) ความชื้นในหน้าตัดเริ่มต่างกันมากขึ้น ก่อนวันฝนตกความชื้นมีลักษณะคล้าย “D1” แต่ภายหลังฝนตกความชื้นเริ่มต่างกัน โดย 1 วันหลังวันตกความชื้นยังคงมีค่าสูง จากนั้นความชื้นค่อยลดลงเป็นลำดับเมื่อเวลาผ่านไป ในหน้าตัด “D3” (ภาพที่ 71(ค)) ปริมาณน้ำสามารถไหลลงสู่ชั้นดินได้มากขึ้น ซึ่งก่อนวันฝนตกความชื้นมีค่าประมาณ 0.45 ที่ระดับต่ำกว่า 10 ซม จากนั้น เมื่อฝนตก ปริมาณน้ำสามารถไหลลงดินได้ลึกขึ้น สังเกตจากกราฟในวันหลังฝนตก ปริมาณความชื้นมีค่าสูงกว่า 0.45 ในระดับต่ำกว่า 1 เมตร

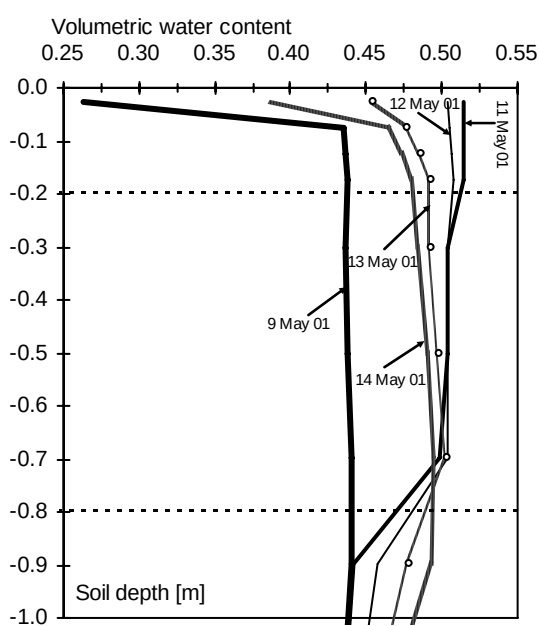
ในหน้าตัดถัดมาคือ “D4” (ภาพที่ 71(ง)) ปริมาณความชื้นมีลักษณะเปลี่ยนแปลงคล้ายหน้าตัด “D3” แต่ขึ้นภายหลังฝนตกมีเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า ขณะที่หน้าตัด “D5” (ภาพที่ 71(จ)) มีลักษณะคล้ายหน้าตัด “D3” เช่นกัน แต่ปริมาณน้ำไหลลงสู่ดินได้น้อยกว่า ความชื้นที่ระดับต่ำกว่า 1 เมตร เปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย ส่วนหน้าตัด “D6” (ภาพที่ 71(ฉ)) ปริมาณความชื้นที่ระดับความลึกต่าง ๆ มีลักษณะคล้ายหน้าตัด “D5” ค่อนข้างมาก สุดท้ายเป็นหน้าตัด “D7” (ภาพที่ 71(ช)) ความชื้นมีลักษณะคล้ายหน้าตัด “D4” แต่ความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าภายหลังฝนตก



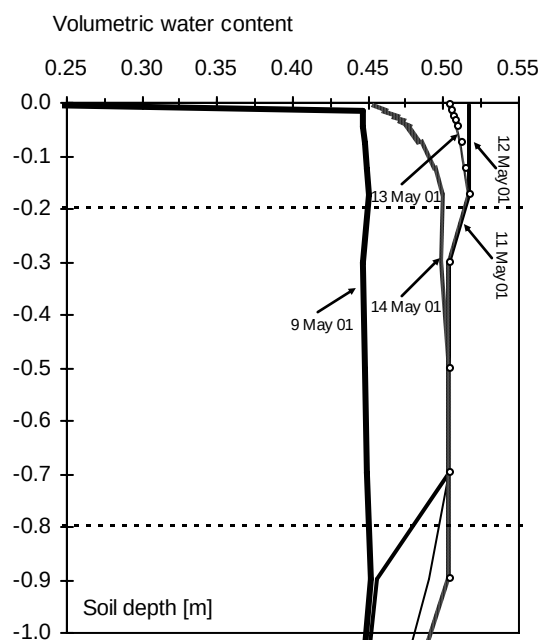
(ก) Soil profile "D1"



(ข) Soil profile "D2"

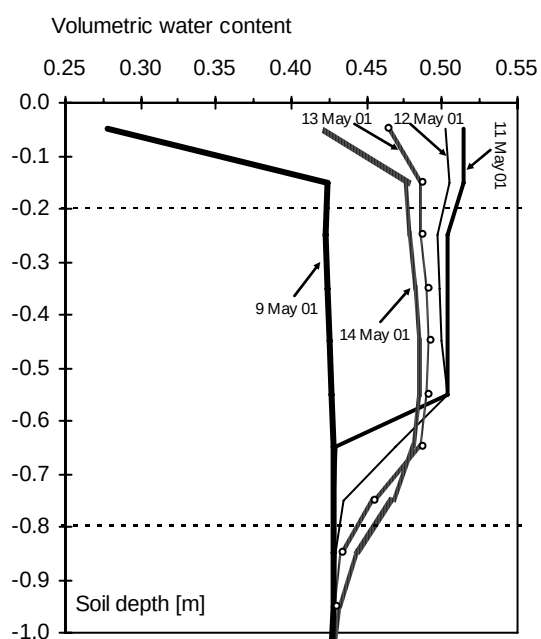


(ค) Soil profile "D3"

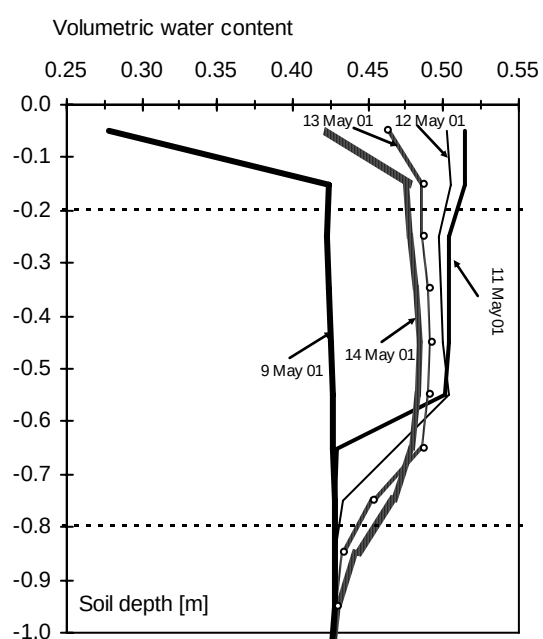


(ง) Soil profile "D4"

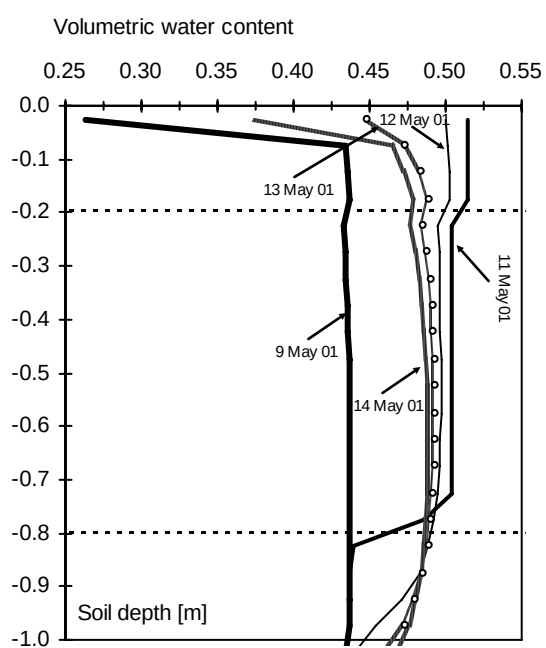
ภาพที่ 71 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดินในดินเหนียว



(จ) Soil profile "D5"



(ฉ) Soil profile "D6"



(ช) Soil profile "D7"

ภาพที่ 71 (ต่อ)

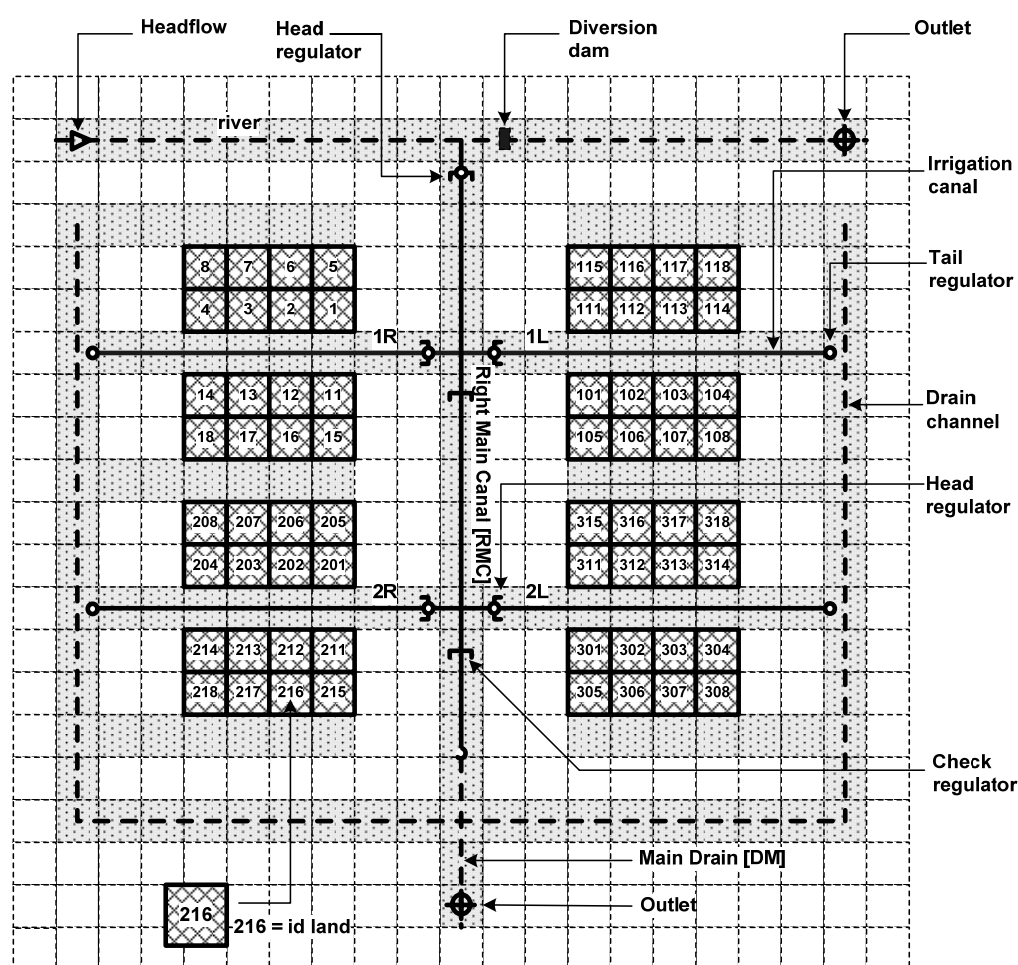
จากผลลัพธ์การศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินข้างต้น พบว่า การกำหนดหน้าตัดดินต่างกันมีผลให้ผลการจำลองต่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำสะสมในส่วนของการระเหยจากผิวดิน การซึมผ่านผิวดิน และการซึมผ่านดิน สังเกตได้ว่าผลการกำหนดชั้นดินมีผลให้การระเหยจากดินแตกต่างกันค่อนข้างมาก ซึ่งการกำหนดชั้นดินให้ละเอียดในช่วงชั้นดินบนทำให้การระเหยต่ำ แต่หากกำหนดชั้นดินหยาบการระเหยจากดินมีค่าสูง และเมื่อพิจารณาปริมาณการซึมผ่านผิวดินสะสม พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ในส่วนนี้เห็นว่า การกำหนดหน้าตัดดินมีผลไม่มากนักต่อค่าการซึม ในส่วนการซึมผ่านดินสังเกตได้ว่าแต่ละหน้าตัดมีความแตกต่างกัน โดยการกำหนดชั้นดินให้ละเอียดในช่วงชั้นดินล่างทำให้การซึมผ่านดินสูง แต่หากกำหนดชั้นดินให้หยาบการซึมผ่านดินมีค่าต่ำ

จากผลการจำลองดังกล่าวได้ใช้เป็นแนวทางเลือกหน้าตัดดินในงานวิจัยขั้นตอนต่อไป โดยรูปแบบหน้าตัดดินที่เลือกคือ “D5” ซึ่งหน้าตัดนี้ให้ค่าองค์ประกอบสมดุลน้ำในดินไม่สูงหรือต่ำมากนัก อย่างไรก็ตาม หน้าตัดดินในรูปแบบอื่นยังมีความเหมาะสมเช่นกัน โดยเฉพาะ “D6” ซึ่งให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับหน้าตัด “D5” ค่อนข้างมาก แต่เมื่อพิจารณาจำนวนของชั้นดินแล้วพบว่า หน้าตัดนี้มีจำนวนของชั้นดินมากกว่า และทำให้เวลาในการคำนวณยาวนานกว่าเช่นกัน

4. การจำลองระบบย่อย

ผลส่วนนี้เป็นการจำลองระบบย่อย ซึ่งผนวกทุกองค์ประกอบของแบบจำลองเข้าด้วยกัน แล้วทำการทดสอบแบบจำลองทั้งระบบ การทดสอบทำโดยการจำลองระบบการส่งน้ำชลประทาน ระยะเวลาเป็นรายวันรวม 2 ปี 6 เดือน (เริ่ม 1 ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45) โดยกำหนดสถานการณ์จำลอง 2 กรณีตามแผนการส่งน้ำ คือ กรณีส่งน้ำตลอดปี และกรณีส่งน้ำตามฤดูกาล (รายละเอียดของข้อกำหนดได้อธิบายในหัวข้อวิธีการ)



ภาพที่ 72 ระบบชลประทานสำหรับจำลองระบบการกระจายน้ำชลประทาน

หมายเหตุ กริดขนาด 1,000 เมตร (1 กริด เท่ากับ 625 ไร่) เช่น พื้นที่ฝั่งขวาของคลอง 1R มีพื้นที่ชลประทาน 5,000 ไร่ ซึ่งแทนด้วยกริดจำนวน 8 กริด (หมายเลข 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)

ผลการจำลองระบบย่อยนำเสนอเป็นสองส่วน ได้แก่การทดสอบการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำและการทดสอบการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก โดยทั้งสองส่วนมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การทดสอบการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำ

ผลการจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ สมดุลน้ำในระบบส่งน้ำ และการวิเคราะห์ปริมาณน้ำไหลผ่านประตูระบายน้ำ

ส่วนแรก เป็นสมดุลน้ำในระบบส่งน้ำ (ในตารางที่ 24) องค์ประกอบของน้ำที่ไหลเข้าระบบเป็นปริมาณน้ำท่าผิวดินที่ไหลเข้า ปตร. ปากคลองส่งน้ำสายใหญ่ ส่วนองค์ประกอบของน้ำที่ไหลออกจากระบบ ได้แก่ ปริมาณน้ำท่าที่ระบายผ่าน ปตร. ปลายคลองทั้งหมด จากสมดุลน้ำสรุปได้ว่า ผลรวมของน้ำที่ไหลเข้าออกในระบบในกรณีส่งน้ำตลอดปีมีปริมาณราว 580 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งมีสัดส่วนสูงกว่ากรณีส่งน้ำตามฤดูกาลประมาณร้อยละ 20

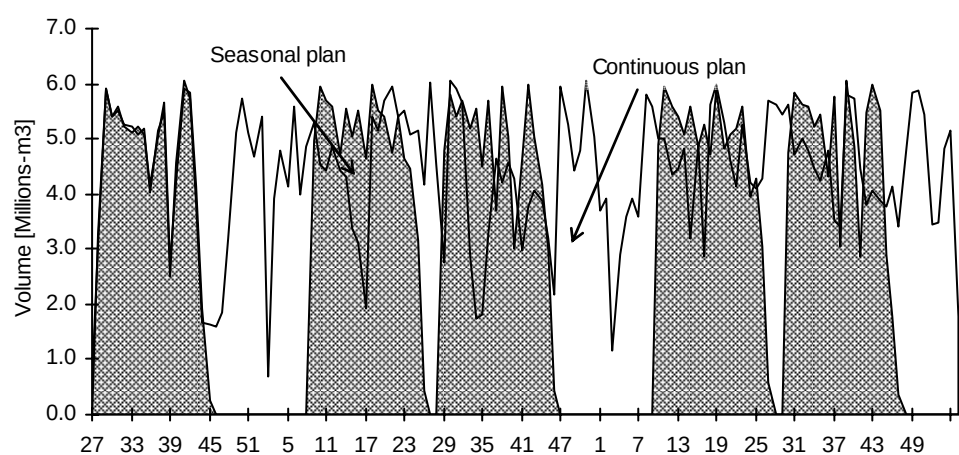
ตารางที่ 24 สรุปสมดุลน้ำในระบบส่งน้ำ

สมดุลน้ำ	ปริมาณน้ำตามแผนการส่งน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)	
	ส่งน้ำตลอดปี	ส่งน้ำตามฤดูกาล
ปตร.ปากคลองสายใหญ่	585.29	418.86
ปตร.ปลายคลอง	585.28	419.06
สมดุลน้ำในระบบส่งน้ำ	0.01	-0.21

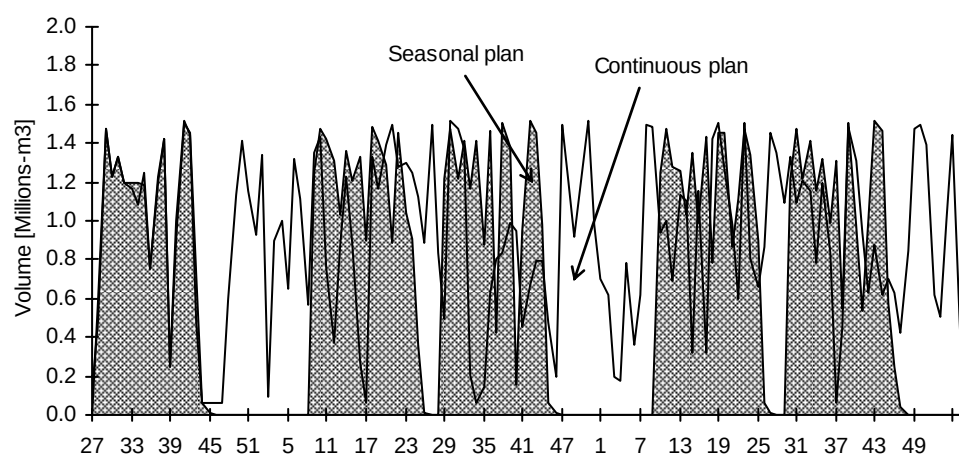
ส่วนที่สอง เป็นปริมาณน้ำไหลผ่านประตูระบายน้ำ ซึ่งผลลัพธ์ได้นำเสนอปริมาณน้ำผ่าน ประตู. ปากคลองส่งน้ำสายใหญ่ และ ประตู. ปากคลองซอย โดยในส่วนของคลองซอยได้นำเสนอเฉพาะ ประตู. ปากคลอง 1 ขวา เนื่องจากได้พิจารณาผลลัพธ์โดยรวมของ ประตู อื่น ๆ แล้วพบว่า ลักษณะการไหลเข้าของน้ำไม่ต่างกันมากนัก

ในภาพที่ 73 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำเฉลี่ยรายสัปดาห์ที่ ประตู. ปากคลองสายใหญ่ระหว่างกรณีส่งน้ำตลอดปีกับกรณีส่งน้ำตามฤดูกาล โดยกรณีส่งน้ำตลอดปีสังเกตได้ว่า ตลอดสัปดาห์ที่จำลองสถานการณ์ ปริมาณน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะขึ้นลงต่างกันค่อนข้างมาก และลักษณะการไหลเข้าของน้ำไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน ส่วนกรณีการส่งน้ำตามฤดูกาลลักษณะการไหลของน้ำมีรูปแบบคล้ายกันเป็นบางช่วง โดยสังเกตว่า การไหลของน้ำผ่าน ประตู. มีด้วยกันห้าช่วงเวลา โดยในช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มการจำลองจนถึงสัปดาห์ปลายปี จากนั้นพบว่าไม่มีน้ำไหลเข้า ประตู. จนกว่าจะถึงประมาณสัปดาห์ที่ 7 ซึ่งเป็นช่วงต้นปีที่สองของการจำลอง โดยน้ำได้ไหลเข้าตลอดจนมาถึงประมาณสัปดาห์ที่ 28 ปริมาณน้ำได้ลดลงจนไม่มีน้ำไหลเข้าอีก จากนั้นไม่ถึงสัปดาห์พบว่ามีการไหลเข้าอีกครั้งและไหลเข้าตลอดจนไปสิ้นสุดราวปลายปีที่สองของการจำลอง จากนั้นการไหลของน้ำกลับมามีรูปแบบคล้ายต้นปีที่สองอีกครั้ง ในส่วนของการไหลของน้ำผ่าน ประตู. ปากคลอง 1 ขวา (ในภาพที่ 74) สังเกตได้ว่า การไหลของน้ำมีลักษณะคล้ายกับน้ำที่ไหลเข้าปากคลองสายใหญ่ ต่างที่ปริมาณน้ำที่ไหลเข้ามีสัดส่วนที่น้อยกว่า

จากผลลัพธ์ข้างต้น สังเกตว่าความต่างของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำมาจากแผนการส่งน้ำ กล่าวคือ ในแผนการส่งน้ำตลอดปีน้ำได้ไหลเข้าคลองต่อเนื่องตลอดเวลา ส่วนแผนการส่งน้ำตามฤดูกาล น้ำไหลเข้าคลองเป็นบางช่วงเวลา การเปลี่ยนแปลงของน้ำขึ้นลงเกิดจากเกษตรกรได้ดึงน้ำจากคลองชลประทานเข้าแปลงเพาะปลูกของตนเอง ฉะนั้น เมื่อน้ำในคลองลดลง ประตู. ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมน้ำจะส่งน้ำเข้ามาในคลองให้เพียงพอต่อความต้องการ อย่างไรก็ตาม การส่งน้ำเข้ามาในคลองของ ประตู. ขึ้นอยู่กับระบบการควบคุมแบบฟิชซี ซึ่งจะตัดสินใจเปิดบานประตูระบายน้ำตามชนิดการควบคุมของอาคาร



ภาพที่ 73 ปริมาณน้ำเฉลี่ยรายสัปดาห์ ที่ ปตร. ปากคลองสายใหญ่



ภาพที่ 74 ปริมาณน้ำเฉลี่ยรายสัปดาห์ ที่ ปตร. ปากคลอง 1R

4.2 การทดสอบการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก

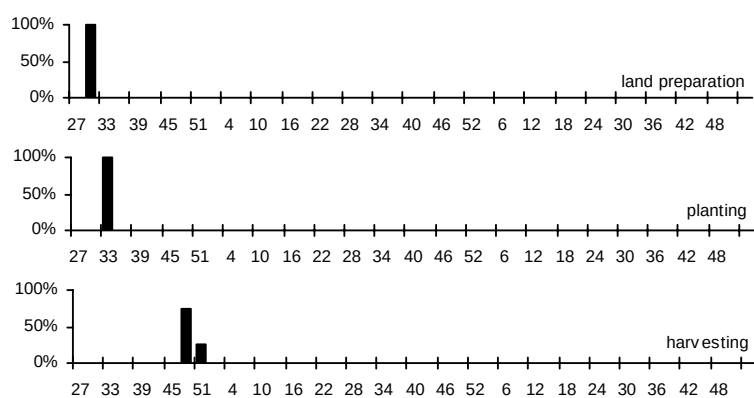
การทดสอบการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก เป็นการนำเสนอผลการตัดสินใจของเกษตรกรในการเพาะปลูกข้าว การนำเสนอแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ การเปรียบเทียบสัดส่วนความก้าวหน้าของกิจกรรมการปลูกข้าว และการเปรียบเทียบความต่างของพื้นที่เพาะปลูก

ส่วนแรก เป็นการเปรียบเทียบสัดส่วนความก้าวหน้าของกิจกรรมการปลูกข้าว ซึ่งกิจกรรมที่นำเสนอเป็นกิจกรรมการเพาะปลูกหลัก ได้แก่ การเตรียมแปลงเพาะปลูก (land preparation) การหว่าน (planting) และการเก็บเกี่ยวผลผลิต (harvesting) โดยทั้งสามกิจกรรมแสดงเป็นสัดส่วนของพื้นที่เพาะปลูกตามระยะเวลาเป็นสัปดาห์ (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45) โดยเริ่มต้นสัปดาห์ที่ 27 และสิ้นสุดสัปดาห์ที่ 52 ของปี

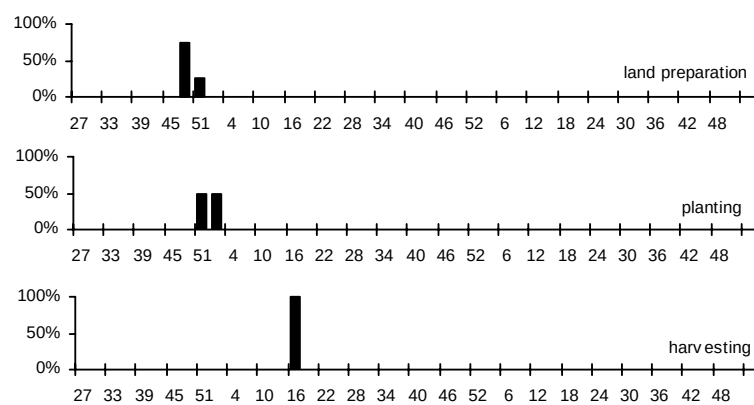
ในภาพที่ 75 แสดงกราฟแท่งสัดส่วนของพื้นที่ปลูกข้าวกรณีส่งน้ำตลอดปี โดยแสดงกิจกรรมเพาะปลูกสามอย่าง เริ่มจากการเตรียมแปลง การหว่านข้าว และการเก็บเกี่ยวผลผลิต ในกราฟแกนนอนแทนเวลาเป็นสัปดาห์ แกนตั้งแทนสัดส่วนของพื้นที่เพาะปลูก

จากภาพสังเกตเห็นว่า การปลูกข้าวครั้งแรก (ในภาพที่ 75 ก)) ทุกแปลงตัดสินใจทำการเตรียมแปลงพร้อมกัน โดยพิจารณาจากสัดส่วนของพื้นที่อยู่ซึ่งมีค่า 100 เปอร์เซ็นต์ ถัดมาเป็นกิจกรรมการหว่านข้าว พบว่า ทุกแปลงยังตัดสินใจหว่านพร้อมกัน แต่เมื่อถึงขั้นการเก็บเกี่ยวผลผลิต สังเกตว่าการเก็บเกี่ยวไม่พร้อมกัน โดยพื้นที่ประมาณร้อยละ 70 ดำเนินการก่อนประมาณ 3 สัปดาห์

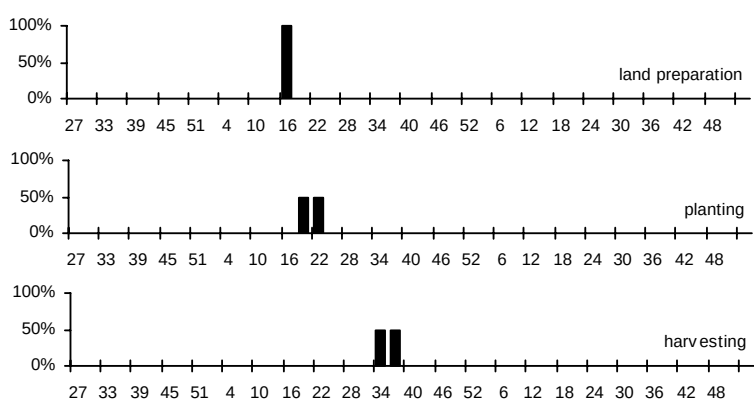
เมื่อเริ่มการปลูกครั้งที่สอง (ในภาพที่ 75 ข)) การตัดสินใจเตรียมแปลงต่างจากการปลูกครั้งแรก โดยพื้นที่ประมาณร้อยละ 70 ได้ทำการเตรียมแปลงก่อน ต่อมาเป็นการหว่าน สังเกตว่ามีพื้นที่สองกลุ่มทำพร้อมกัน และเมื่อถึงขั้นตอนการเก็บเกี่ยวผลผลิตพบว่า ทุกแปลงกลับดำเนินการพร้อมกัน ในส่วนการปลูกครั้งที่สาม (ในภาพที่ 75 ค)) สังเกตว่าทุกแปลงทำการเตรียมแปลงพร้อมกัน กิจกรรมต่อมาเริ่มเห็นว่าตัดสินใจไม่พร้อมแต่ระยะเวลาต่างกันไม่มากนัก การพิจารณากิจกรรมสำหรับการเพาะปลูกในครั้งที่สี่เป็นต้นไป สังเกตเห็นว่า การตัดสินใจทำกิจกรรมทั้งสามไม่พร้อมกันทั้งยังมีระยะเวลาที่ห่างกันมากขึ้น



(ก) การเพาะปลูกครั้งที่ 1

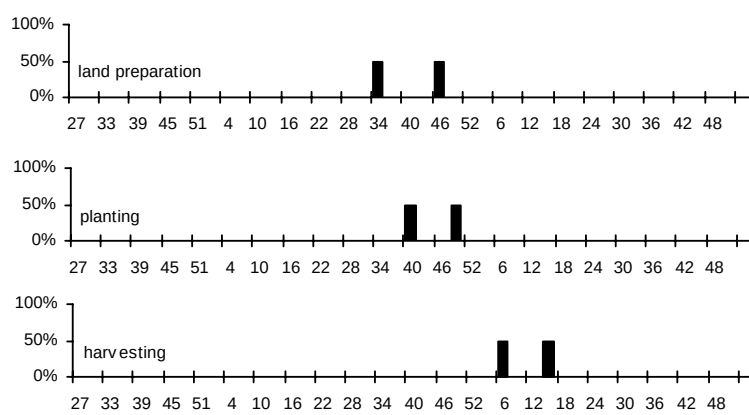


(ข) การเพาะปลูกครั้งที่ 2

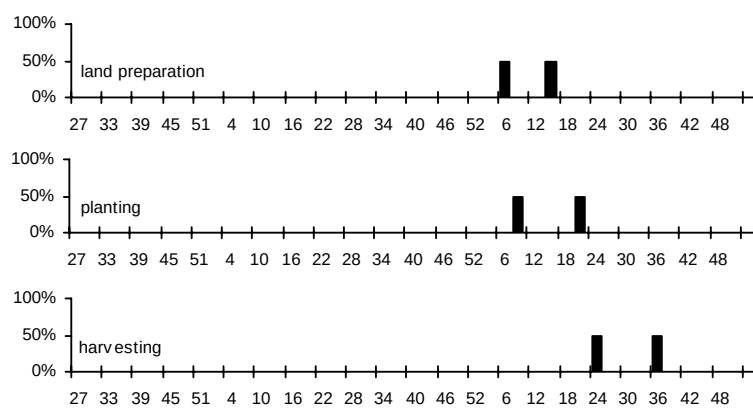


(ค) การเพาะปลูกครั้งที่ 3

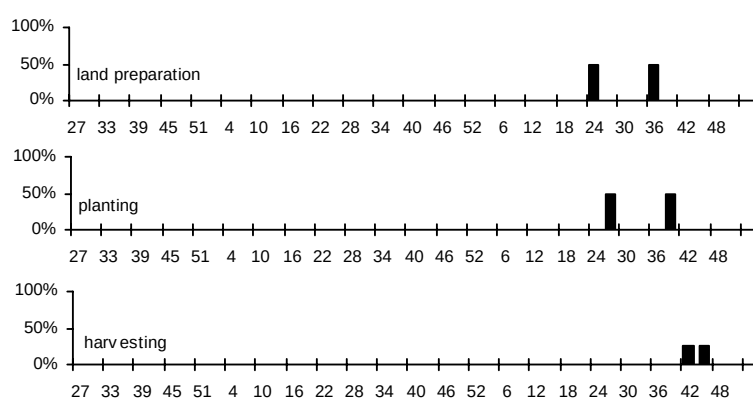
ภาพที่ 75 สัดส่วนของพื้นที่ปลูกข้าว กรณีส่งน้ำตลอดปี



(จ) การเพาะปลูกครั้งที่ 4



(ฉ) การเพาะปลูกครั้งที่ 5



(ช) การเพาะปลูกครั้งที่ 6

ภาพที่ 75 (ต่อ)

ส่วนที่สอง เป็นการอธิบายความต่างของการตัดสินใจเพาะปลูกของเกษตรกร กล่าวคือ จากผลการจำลองเกษตรกรข้างต้น มีข้อสังเกตเกี่ยวกับกิจกรรมของเกษตรกร ซึ่งถ้าพิจารณาสัดส่วนพื้นที่ในการทำกิจกรรมสามอย่าง คือ การเตรียมแปลง การหว่านเมล็ดพันธุ์ และการเก็บเกี่ยว ผลผลิต (ในภาพที่ 75) สังเกตได้ว่า การปลูกข้าวแต่ละครั้งเกษตรกรทำกิจกรรมไม่พร้อมกัน ซึ่ง ถึงแม้จะกำหนดเกณฑ์ในการจำลองเหมือนกัน

ข้อสังเกตในส่วนนี้เห็นว่า ตำแหน่งของแปลงเพาะปลูกเป็นผลทำให้พฤติกรรมในการ ปลูกข้าวของเกษตรกรต่างกัน โดยแปลงเพาะปลูกของเกษตรกรใดสามารถดึงน้ำได้พอต่อความต้องการ ก่อน จะสามารถดำเนินกิจกรรมการเพาะปลูกได้เร็วกว่าแปลงอื่น

เหตุผลดังกล่าวนี้ ได้ยกตัวอย่างแปลงเพาะปลูกของเกษตรกรบางรายประกอบการอธิบาย โดยพิจารณาผังระบบชลประทาน (ในภาพที่ 72) แปลงเพาะปลูกของเกษตรกรที่ทำการยกตัวอย่าง ได้แก่ แปลงหมายเลข “1” “2” “3” และ “4” โดยแปลงเหล่านี้อยู่ในพื้นที่ส่งน้ำฝั่งขวาของคลอง ซอย 1 ขวา ลักษณะที่ตั้งของแปลงเพาะปลูกทั้งสิ้น แปลงที่ 1 ตั้งอยู่ต้นคลอง ถัดมาเป็นแปลงที่ 2 และ 3 ส่วนแปลงที่ 4 อยู่ท้ายคลอง

ผลการตัดสินใจทำกิจกรรมของทั้งสี่แปลงแสดงเป็นรายการบันทึกกิจกรรมการ เพาะปลูกประกอบ (ในภาพที่ 76 และภาพที่ 77) ซึ่งเป็นการบันทึกวันที่ทำกิจกรรมของเกษตรกรใน แต่ละครั้งของการปลูกข้าว โดยเริ่มจากการเตรียมแปลงซึ่งมี 6 กิจกรรมย่อย ได้แก่ การเคลียร์พื้นที่ (clearing) การเอาน้ำเข้าแปลง (soaking) การไถ (plowing) การตีดิน (harrowing) การทำเทือก (puddling) การลูบเทือก (smoothing) จากนั้นเป็นขั้นตอนการปลูกข้าว (cropping) ซึ่งช่วงเริ่มเป็น การหว่านเมล็ดพันธุ์ (planting) จนถึงสิ้นสุด คือ การเก็บเกี่ยวผลผลิต (harvesting)

จากรายงานการบันทึกกิจกรรม สังเกตได้ว่าเกษตรกรทุกแปลงตัดสินใจเคลียร์พื้นที่ พร้อมกัน เหตุการณ์ขั้นนี้เป็นผลสืบเนื่องจากเงื่อนไขการเริ่มต้นของการจำลอง ซึ่งกำหนดให้ทุก แปลงมีสถานะเหมือนกัน คือ เริ่มเตรียมแปลงพร้อมกัน จากนั้นเมื่อถึงขั้นตอนการเอาน้ำเข้าแปลง เพื่อรอการไถ พบว่า ทุกแปลงเริ่มเอาน้ำเข้าพร้อมกันแต่แล้วเสร็จต่างกัน โดยแปลง “1” และ “2” ทำ แล้วเสร็จพร้อมกัน ส่วนแปลง “3” และ “4” เสร็จช้ากว่า โดยเฉพาะแปลง “4” ทำเสร็จช้าสุด

เมื่อพิจารณาขั้นตอนดำเนินงานในชั้นถัดมา สังเกตว่าทุกแปลงยังทำกิจกรรมลักษณะเหมือนเดิมจนถึงขั้นตอนการเก็บเกี่ยว โดยแปลง “1” และ “2” ยังเป็นแปลงที่เก็บเกี่ยวผลผลิตเร็วสุด ส่วนแปลง “4” แล้วเสร็จช้าสุด เหตุการณ์เช่นนี้ ยังส่งผลต่อการเพาะปลูกในครั้งต่อไป ซึ่งเมื่อพิจารณาการปลูกข้าวในครั้งที่สามเป็นต้นไป ความต่างของการทำกิจกรรมเริ่มแสดงให้เห็นมากขึ้น โดยเฉพาะแปลง “1” และ “2” ซึ่งจากเดิมทำกิจกรรมพร้อมกันตลอด

จากพฤติกรรมการเพาะปลูกของเกษตรกรข้างต้น เห็นว่า ลักษณะที่ตั้งของแปลงต่างกันเป็นผลทำให้เกษตรกรตัดสินใจทำกิจกรรมไม่พร้อมกัน โดยแปลง “1” อยู่ต้นคลองสามารถเอาน้ำเข้าแปลงของตนเองเร็วกว่าทุกแปลง ทำให้สามารถดำเนินกิจกรรมอย่างอื่นต่อได้เร็วกว่าทุกแปลง ส่วนแปลง “4” ซึ่งอยู่ปลายคลองทำกิจกรรมได้ช้าสุด

number of cropping	activity	land							
		1		2		3		4	
		start	stop	start	stop	start	stop	start	stop
1	clearing	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000
	soaking	7/7/2000	10/7/2000	7/7/2000	10/7/2000	7/7/2000	14/7/2000	7/7/2000	19/7/2000
	plowing	11/7/2000	13/7/2000	11/7/2000	13/7/2000	15/7/2000	17/7/2000	20/7/2000	22/7/2000
	harrowing	14/7/2000	20/7/2000	14/7/2000	20/7/2000	18/7/2000	24/7/2000	23/7/2000	29/7/2000
	puddling	21/7/2000	22/7/2000	21/7/2000	22/7/2000	25/7/2000	26/7/2000	30/7/2000	31/7/2000
	smoothing	23/7/2000	23/7/2000	23/7/2000	23/7/2000	27/7/2000	27/7/2000	1/8/2000	1/8/2000
	cropping	24/7/2000	17/11/2000	24/7/2000	17/11/2000	28/7/2000	21/11/2000	2/8/2000	27/11/2000
2	clearing	18/11/2000	22/11/2000	18/11/2000	22/11/2000	22/11/2000	26/11/2000	28/11/2000	2/12/2000
	soaking	23/11/2000	28/11/2000	23/11/2000	28/11/2000	27/11/2000	8/12/2000	3/12/2000	12/12/2000
	plowing	29/11/2000	1/12/2000	29/11/2000	1/12/2000	9/12/2000	11/12/2000	13/12/2000	15/12/2000
	harrowing	2/12/2000	8/12/2000	2/12/2000	8/12/2000	12/12/2000	18/12/2000	16/12/2000	22/12/2000
	puddling	9/12/2000	10/12/2000	9/12/2000	10/12/2000	19/12/2000	20/12/2000	23/12/2000	24/12/2000
	smoothing	11/12/2000	11/12/2000	11/12/2000	11/12/2000	21/12/2000	21/12/2000	25/12/2000	25/12/2000
	cropping	12/12/2000	9/4/2001	12/12/2000	9/4/2001	22/12/2000	17/4/2001	26/12/2000	20/4/2001
3	clearing	10/4/2001	14/4/2001	10/4/2001	14/4/2001	18/4/2001	22/4/2001	21/4/2001	25/4/2001
	soaking	15/4/2001	20/4/2001	15/4/2001	21/4/2001	23/4/2001	3/5/2001	26/4/2001	13/5/2001
	plowing	21/4/2001	23/4/2001	22/4/2001	24/4/2001	4/5/2001	6/5/2001	14/5/2001	16/5/2001
	harrowing	24/4/2001	30/4/2001	25/4/2001	1/5/2001	7/5/2001	13/5/2001	17/5/2001	23/5/2001
	puddling	1/5/2001	2/5/2001	2/5/2001	3/5/2001	14/5/2001	15/5/2001	24/5/2001	25/5/2001
	smoothing	3/5/2001	3/5/2001	4/5/2001	4/5/2001	16/5/2001	16/5/2001	26/5/2001	26/5/2001
	cropping	4/5/2001	23/8/2001	5/5/2001	24/8/2001	17/5/2001	5/9/2001	27/5/2001	15/9/2001
4	clearing	24/8/2001	28/8/2001	25/8/2001	29/8/2001	1/11/2001	5/11/2001	1/11/2001	5/11/2001
	soaking	29/8/2001	3/9/2001	30/8/2001	4/9/2001	6/11/2001	15/11/2001	6/11/2001	15/11/2001
	plowing	4/9/2001	6/9/2001	5/9/2001	7/9/2001	16/11/2001	18/11/2001	16/11/2001	18/11/2001
	harrowing	7/9/2001	13/9/2001	8/9/2001	14/9/2001	19/11/2001	25/11/2001	19/11/2001	25/11/2001
	puddling	14/9/2001	15/9/2001	15/9/2001	16/9/2001	26/11/2001	27/11/2001	26/11/2001	27/11/2001
	smoothing	16/9/2001	16/9/2001	17/9/2001	17/9/2001	28/11/2001	28/11/2001	28/11/2001	28/11/2001
	cropping	17/9/2001	21/1/2002	18/9/2001	22/1/2002	29/11/2001	1/4/2002	29/11/2001	1/4/2002
5	clearing	22/1/2002	26/1/2002	23/1/2002	27/1/2002	2/4/2002	6/4/2002	2/4/2002	6/4/2002
	soaking	27/1/2002	1/2/2002	28/1/2002	2/2/2002	7/4/2002	25/4/2002	7/4/2002	26/4/2002
	plowing	2/2/2002	4/2/2002	3/2/2002	5/2/2002	26/4/2002	28/4/2002	27/4/2002	29/4/2002
	harrowing	5/2/2002	11/2/2002	6/2/2002	12/2/2002	29/4/2002	5/5/2002	30/4/2002	6/5/2002
	puddling	12/2/2002	13/2/2002	13/2/2002	14/2/2002	6/5/2002	7/5/2002	7/5/2002	8/5/2002
	smoothing	14/2/2002	14/2/2002	15/2/2002	15/2/2002	8/5/2002	8/5/2002	9/5/2002	9/5/2002
	cropping	15/2/2002	3/6/2002	16/2/2002	4/6/2002	9/5/2002	28/8/2002	10/5/2002	29/8/2002
6	clearing	4/6/2002	8/6/2002	5/6/2002	9/6/2002	29/8/2002	2/9/2002	30/8/2002	3/9/2002
	soaking	9/6/2002	14/6/2002	10/6/2002	15/6/2002	3/9/2002	12/9/2002	4/9/2002	15/9/2002
	plowing	15/6/2002	17/6/2002	16/6/2002	18/6/2002	13/9/2002	15/9/2002	16/9/2002	18/9/2002
	harrowing	18/6/2002	24/6/2002	19/6/2002	25/6/2002	16/9/2002	22/9/2002	19/9/2002	25/9/2002
	puddling	25/6/2002	26/6/2002	26/6/2002	27/6/2002	23/9/2002	24/9/2002	26/9/2002	27/9/2002
	smoothing	27/6/2002	27/6/2002	28/6/2002	28/6/2002	25/9/2002	25/9/2002	28/9/2002	28/9/2002
	cropping	28/6/2002	19/10/2002	29/6/2002	20/10/2002	26/9/2002		29/9/2002	
7	clearing	1/11/2002	5/11/2002	1/11/2002	5/11/2002				
	soaking	6/11/2002	11/11/2002	6/11/2002	11/11/2002				
	plowing	12/11/2002	14/11/2002	12/11/2002	14/11/2002				
	harrowing	15/11/2002	21/11/2002	15/11/2002	21/11/2002				
	puddling	22/11/2002	23/11/2002	22/11/2002	23/11/2002				
	smoothing	24/11/2002	24/11/2002	24/11/2002	24/11/2002				
	cropping	25/11/2002		25/11/2002					

ภาพที่ 76 ตัวอย่างผลการบันทึกกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของแปลงติดคลองส่งน้ำ
กรณีส่งน้ำตลอดปี

number of cropping	activity	land							
		1		2		3		4	
		start	stop	start	stop	start	stop	start	stop
1	clearing	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000
	soaking	7/7/2000	10/7/2000	7/7/2000	10/7/2000	7/7/2000	14/7/2000	7/7/2000	19/7/2000
	plowing	11/7/2000	13/7/2000	11/7/2000	13/7/2000	15/7/2000	17/7/2000	20/7/2000	22/7/2000
	harrowing	14/7/2000	20/7/2000	14/7/2000	20/7/2000	18/7/2000	24/7/2000	23/7/2000	29/7/2000
	puddling	21/7/2000	22/7/2000	21/7/2000	22/7/2000	25/7/2000	26/7/2000	30/7/2000	31/7/2000
	smoothing	23/7/2000	23/7/2000	23/7/2000	23/7/2000	27/7/2000	27/7/2000	1/8/2000	1/8/2000
	cropping	24/7/2000	17/11/2000	24/7/2000	17/11/2000	28/7/2000	21/11/2000	2/8/2000	27/11/2000
2	clearing	18/11/2000	22/11/2000	18/11/2000	22/11/2000	22/11/2000	26/11/2000	28/11/2000	2/12/2000
	soaking	23/11/2000	18/2/2001	23/11/2000	18/2/2001	27/11/2000	2/3/2001	3/12/2000	3/3/2001
	plowing	19/2/2001	21/2/2001	19/2/2001	21/2/2001	3/3/2001	5/3/2001	4/3/2001	6/3/2001
	harrowing	22/2/2001	28/2/2001	22/2/2001	28/2/2001	6/3/2001	12/3/2001	7/3/2001	13/3/2001
	puddling	1/3/2001	2/3/2001	1/3/2001	2/3/2001	13/3/2001	14/3/2001	14/3/2001	15/3/2001
	smoothing	3/3/2001	3/3/2001	3/3/2001	3/3/2001	15/3/2001	15/3/2001	16/3/2001	16/3/2001
	cropping	4/3/2001	21/6/2001	4/3/2001	21/6/2001	16/3/2001	1/7/2001	17/3/2001	2/7/2001
3	clearing	22/6/2001	26/6/2001	22/6/2001	26/6/2001	2/7/2001	6/7/2001	3/7/2001	7/7/2001
	soaking	27/6/2001	7/7/2001	27/6/2001	7/7/2001	7/7/2001	19/7/2001	8/7/2001	19/7/2001
	plowing	8/7/2001	10/7/2001	8/7/2001	10/7/2001	20/7/2001	22/7/2001	20/7/2001	22/7/2001
	harrowing	11/7/2001	17/7/2001	11/7/2001	17/7/2001	23/7/2001	29/7/2001	23/7/2001	29/7/2001
	puddling	18/7/2001	19/7/2001	18/7/2001	19/7/2001	30/7/2001	31/7/2001	30/7/2001	31/7/2001
	smoothing	20/7/2001	20/7/2001	20/7/2001	20/7/2001	1/8/2001	1/8/2001	1/8/2001	1/8/2001
	cropping	21/7/2001	10/11/2001	21/7/2001	10/11/2001	2/8/2001	25/11/2001	2/8/2001	25/11/2001
4	clearing	11/11/2001	15/11/2001	11/11/2001	15/11/2001	26/11/2001	30/11/2001	26/11/2001	30/11/2001
	soaking	16/11/2001	17/2/2002	16/11/2001	17/2/2002	1/12/2001	28/2/2002	1/12/2001	1/3/2002
	plowing	18/2/2002	20/2/2002	18/2/2002	20/2/2002	1/3/2002	3/3/2002	2/3/2002	4/3/2002
	harrowing	21/2/2002	27/2/2002	21/2/2002	27/2/2002	4/3/2002	10/3/2002	5/3/2002	11/3/2002
	puddling	28/2/2002	1/3/2002	28/2/2002	1/3/2002	11/3/2002	12/3/2002	12/3/2002	13/3/2002
	smoothing	2/3/2002	2/3/2002	2/3/2002	2/3/2002	13/3/2002	13/3/2002	14/3/2002	14/3/2002
	cropping	3/3/2002	19/6/2002	3/3/2002	19/6/2002	14/3/2002	29/6/2002	15/3/2002	30/6/2002
5	clearing	20/6/2002	24/6/2002	20/6/2002	24/6/2002	30/6/2002	4/7/2002	1/7/2002	5/7/2002
	soaking	25/6/2002	6/7/2002	25/6/2002	6/7/2002	5/7/2002	18/7/2002	6/7/2002	18/7/2002
	plowing	7/7/2002	9/7/2002	7/7/2002	9/7/2002	19/7/2002	21/7/2002	19/7/2002	21/7/2002
	harrowing	10/7/2002	16/7/2002	10/7/2002	16/7/2002	22/7/2002	28/7/2002	22/7/2002	28/7/2002
	puddling	17/7/2002	18/7/2002	17/7/2002	18/7/2002	29/7/2002	30/7/2002	29/7/2002	30/7/2002
	smoothing	19/7/2002	19/7/2002	19/7/2002	19/7/2002	31/7/2002	31/7/2002	31/7/2002	31/7/2002
	cropping	20/7/2002	12/11/2002	20/7/2002	12/11/2002	1/8/2002	24/11/2002	1/8/2002	24/11/2002
6	clearing	13/11/2002	17/11/2002	13/11/2002	17/11/2002	25/11/2002	29/11/2002	25/11/2002	29/11/2002
	soaking	18/11/2002		18/11/2002		30/11/2002		30/11/2002	
	plowing								
	harrowing								
	puddling								
	smoothing								

ภาพที่ 77 ตัวอย่างผลการบันทึกกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของแปลงติดคลองส่งน้ำ
กรณีส่งน้ำตามฤดูกาล

การประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน

หัวข้อนี้ นำเสนอผลการประยุกต์แบบจำลองจิเรตในการประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน โดยผลลัพธ์แบ่งออกเป็น (1) การวิเคราะห์พื้นที่ (2) การสร้างแบบจำลอง และ (3) การจำลอง ซึ่งได้แก่ การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลเก็บบันทึก การวิเคราะห์สมดุลน้ำ การวิเคราะห์ความเข้มของการเพาะปลูกและการประเมินสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน

1. การวิเคราะห์พื้นที่

การวิเคราะห์พื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีนตอนบน แบ่งผลการวิเคราะห์เป็น (1) ระบบการชลประทาน (2) แหล่งน้ำต้นทุน และ (3) การศึกษาการใช้น้ำในการทำนา

พื้นที่ศึกษา (ภาพที่ 78) เป็นพื้นที่ใช้น้ำสองฝั่งของแม่น้ำท่าจีนตอนบน มีพื้นที่ราว 1.3 ล้านไร่ อยู่ในเขตโครงการเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งตะวันตกตอนบน ซึ่งเป็นเขตรับผิดชอบของสำนักชลประทานที่ 12 จังหวัดชัยนาท ประกอบด้วยโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา 5 โครงการ ได้แก่ โครงการพลเทพ โครงการท่าโบสถ์ โครงการสามชุก โครงการโพธิ์พระยา และโครงการคอนเจดีย์ ขอบเขตของพื้นที่ ทิศเหนือติดกับแม่น้ำเจ้าพระยา ทิศใต้ติดกับโครงการเจ้าพระยาใหญ่ฝั่งตะวันตกตอนล่าง (โครงการเจ้าเจ็ดบางยี่หน) ทิศตะวันออกติดกับโครงการชลประทานที่ใช้น้ำจากแม่น้ำน้อยเป็นหลัก (โครงการบรมธาตุ โครงการชันสูตร และโครงการผักไห่) ส่วนทิศตะวันตกติดกับพื้นที่ลุ่มน้ำกระเสียว

1.1 ระบบการชลประทาน

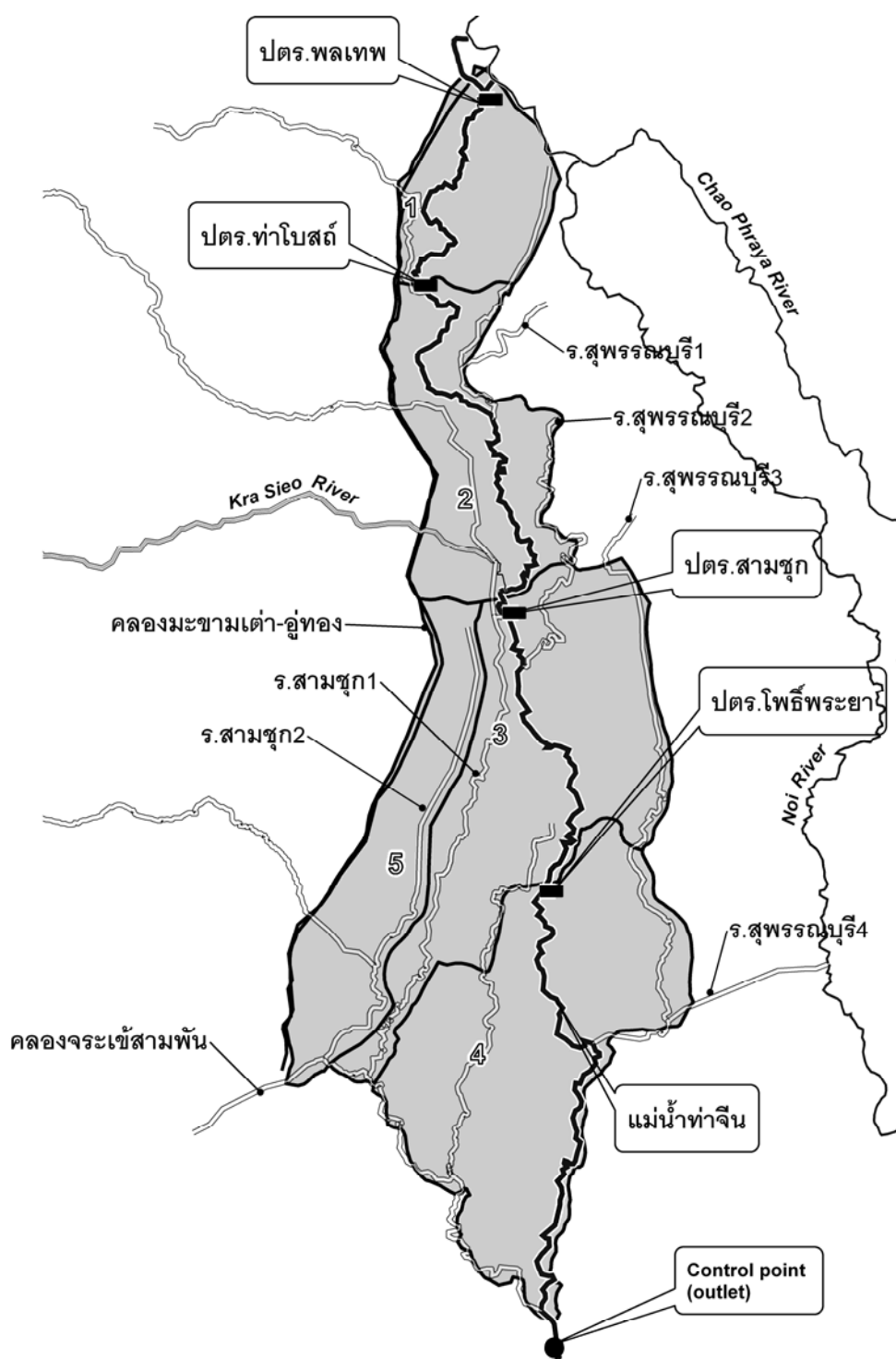
ระบบส่งน้ำชลประทาน จากการวิเคราะห์ระบบชลประทานสามารถสรุปเป็นผังการไหลของน้ำดังภาพที่ 79 ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้ เขื่อนเจ้าพระยาเป็นหัวงาน ทำหน้าที่ทดน้ำเข้าสู่พื้นที่ศึกษาผ่านทางแม่น้ำท่าจีน คลองมะขามเต่า-อุทุมพร (คลอง ม.-อ.) คลองระหาน และแม่น้ำน้อย (แม่น้ำน้อยไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากการศึกษาจำกัดเฉพาะพื้นที่ชลประทานที่ใช้น้ำจากแม่น้ำท่าจีน) แม่น้ำท่าจีนทำหน้าที่เป็นทั้งคลองส่งน้ำและระบายน้ำ มีประตูระบายน้ำ (ปตร.) ในลำน้ำ

4 แห่ง ได้แก่ ปตร. พลเทพ ปตร. ท่าโบสถ์ ปตร. สามชุก และ ปตร. โพธิ์พระยา โดย ปตร. พลเทพ เป็น ปตร. ปากคลองทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำไหลเข้าแม่น้ำท่าจีน

ประตูละบายน้ำทั้งสี่แห่ง ทำหน้าที่เป็นหัวงานส่งน้ำให้แก่ โครงการพลเทพ โครงการท่าโบสถ์ โครงการสามชุก และโครงการโพธิ์พระยา ส่วนคลอง ม.-อ. เป็นคลองวางในแนวเหนือ-ใต้ขนานกับแม่น้ำท่าจีนทางฝั่งขวา คลอง ม.-อ. มีประตูละบายน้ำในลำน้ำ 7 แห่ง ส่งน้ำเฉพาะพื้นที่ทางฝั่งซ้ายของคลอง ซึ่งเป็นพื้นที่ชลประทานโครงการพลเทพ โครงการท่าโบสถ์ และโครงการดอนเจดีย์ ส่วนคลองระหานเป็นคลองส่งน้ำในโครงการพลเทพ ซึ่งรับน้ำโดยตรงจากแม่น้ำจากพระยาและส่งน้ำให้กับพื้นที่ชลประทานฝั่งซ้ายของโครงการ

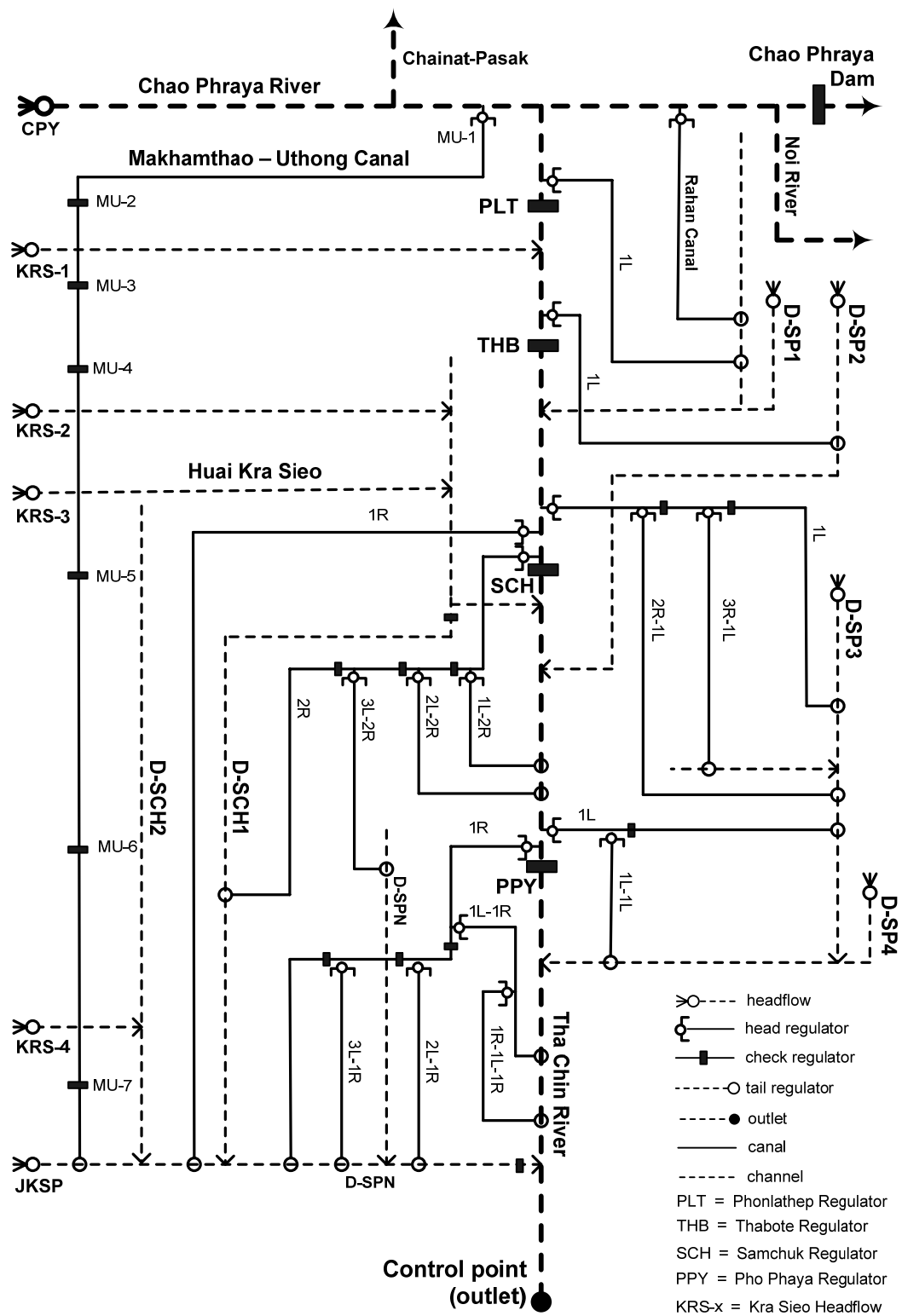
จากการสำรวจภาคสนามประกอบกับศึกษารายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า น้ำท่าไหลเข้าสู่ระบบมีสามทิศทาง ได้แก่ ตอนบน ทางด้านตะวันตกและตะวันออก โดยทางตอนบนเป็นน้ำท่าไหลที่ถูกทดเข้าสู่พื้นที่โดยเขื่อนเจ้าพระยาผ่านทางแม่น้ำท่าจีน คลอง ม.-อ. และคลองระหาน ส่วนทางตะวันตกเป็นน้ำท่าผิวดินของกลุ่มน้ำกระเสียว ซึ่งไหลเป็นลำห้วย 4 แห่งลอดผ่านคลอง ม.-อ. ลงสู่แม่น้ำท่าจีนและยังรวมถึงน้ำท่าจากคลองจระเข้-สามพันทิ่วไหลจากโครงการแม่กลอง

ส่วนทางตะวันออกเป็นน้ำท่าที่ระบายจากพื้นที่ชลประทานที่ใช้น้ำจากแม่น้ำน้อยแล้วระบายลงสู่คลองระบายสี่สาย ได้แก่ ร.สุพรรณบุรี 1 ร.สุพรรณบุรี 2 ร.สุพรรณบุรี 3 และ ร.สุพรรณบุรี 4 โดยคลองระบายเหล่านี้ไหลลงสู่แม่น้ำท่าจีน



ภาพที่ 78 โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบนส่วนที่ใช้ น้ำจากแม่น้ำท่าจีน

หมายเหตุ โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาประกอบด้วย (1) โครงการพลเทพ (2) โครงการท่าโบสถ์ (3) โครงการสามชุก (4) โครงการโพธิ์พระยา และ (5) โครงการดอนเจดีย์



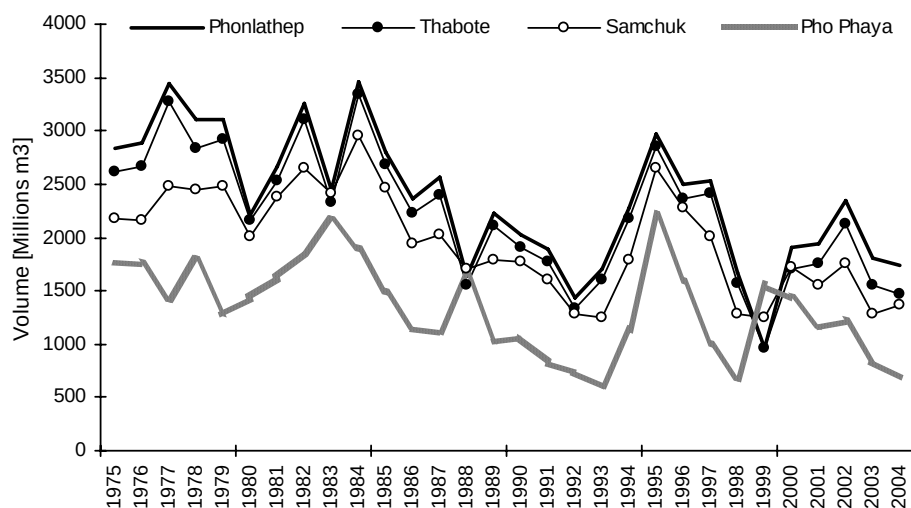
ภาพที่ 79 แผนผังจำลองระบบชลประทาน

1.2 แหล่งน้ำต้นทุน

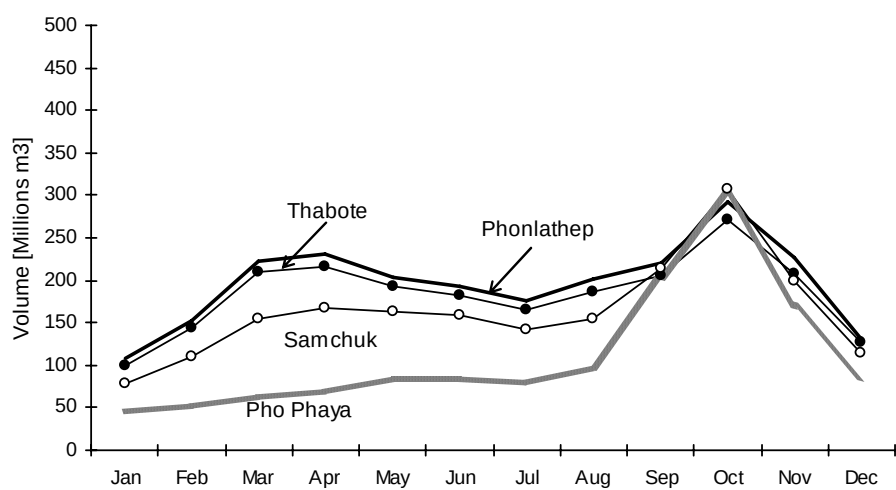
การศึกษาปริมาณน้ำทำเพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลองและใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ การศึกษาพิจารณาปริมาณน้ำท่าไหลเข้าระบบ ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำทั้ง 4 แห่งในแม่น้ำท่าจีน ปริมาณน้ำท่าไหลผ่านคลอง ม-อ และคลองระหาน รวมถึงปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าทางด้านข้างของระบบ

จากข้อมูลปริมาณน้ำผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน 4 แห่งระหว่างปี พ.ศ. 2518 ถึง 2547 รวม 30 ปี (ในภาพที่ 80) พบว่า ปริมาณน้ำรายปีที่ผ่าน ปตร.พลเทพ มีปริมาณเฉลี่ยประมาณ 2,350 ล้าน ลบ.ม. และเมื่อน้ำผ่าน ปตร. ในลำดับถัด ๆ มาจะมีปริมาณลดลงจนกระทั่งเมื่อผ่าน ปตร.โพธิ์พระยา ปริมาณลดลงเหลือ 1,330 ล้าน ลบ.ม. โดยแนวโน้มของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าแม่น้ำท่าจีนมีแนวโน้มลดลง โดยในปี พ.ศ.2542 มีปริมาณน้อยที่สุด น้อยกว่า 1,000 ล้าน ลบ.ม.

พิจารณาข้อมูลรายเดือน (ในภาพที่ 81) พบว่า ปริมาณไหลเข้าแม่น้ำท่าจีนผ่าน ปตร.พลเทพ มีปริมาณใกล้เคียงกันในแต่ละเดือน ประมาณ 200 ล้าน ลบ.ม. โดยช่วงฝนมีปริมาณสูงกว่าช่วงแล้งเล็กน้อย เมื่อพิจารณา ปตร. ในลำดับถัดมา พบว่า ปริมาณน้ำจะลดลงเป็นลำดับ ยกเว้นในช่วงเดือนกันยายน และตุลาคม ปริมาณน้ำที่ผ่าน ปตร.สามชุก และ ปตร.โพธิ์พระยา มีปริมาณมากกว่าน้ำที่ผ่าน ปตร.พลเทพ เนื่องจากได้รับน้ำเพิ่มเติมจากคลองระบาย ส่วนปริมาณน้ำท่าไหลเข้าระบบทางฝั่งตะวันตก และฝั่งตะวันออก เป็นปริมาณน้ำที่ได้จากการประเมินโดยใช้แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า GR (Genie Rural Model) ซึ่งประเมินปริมาณน้ำท่ารายเดือนระหว่าง พ.ศ.2516 ถึง 2548 รวม 32 ปี (เอกสิทธิ์และคณะ, 2550ก) ซึ่งปริมาณน้ำรวมรายปีที่เข้าทางฝั่งตะวันตกรวมประมาณ 1,650 ล้าน ลบ.ม. ส่วนทางฝั่งตะวันออกประมาณ 160 ล้าน ลบ.ม.



ภาพที่ 80 ปริมาณน้ำรายปีที่ระบายผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน



ภาพที่ 81 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำรายเดือนที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน
ระหว่างปี พ.ศ.2518 - พ.ศ.2547

1.3 การศึกษาการทำนา

การศึกษากำหนดเป็นการศึกษาขั้นตอนและวิธีการทำนาของเกษตรกรในเขตพื้นที่โครงการพลเทพ โครงการท่าโบสถ์ โครงการโพธิ์พระยา และโครงการดอนเจดีย์ การศึกษาใช้วิธีการสัมภาษณ์กับเกษตรกรที่ทำนาเกี่ยวกับขั้นตอนการเตรียมแปลง การใช้น้ำชลประทาน และปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ในภาพที่ 82 แสดงตัวอย่างการสำรวจสภาพทั่วไปในพื้นที่ศึกษา ซึ่งผลการสำรวจพอสรุปได้ดังนี้

การเตรียมแปลงเพาะปลูก ในขั้นตอนการเตรียมแปลงได้แสดงภาพตัวอย่างไว้ในภาพที่ 83 ซึ่งเป็นการเก็บบันทึกกิจกรรมการเตรียมแปลงของเกษตรกร โดยภายหลังจากเกษตรกรเก็บเกี่ยวผลผลิตของฤดูกาลที่ผ่านมาแล้วเสร็จ เกษตรกรจะปล่อยฟางและตอซังทิ้งไว้ในแปลงให้แห้ง จากนั้นเกษตรกรจะทำการกำจัดฟางข้าวและตอซังโดยวิธีการเผา หรือไม่เผาตอซังแต่ใช้วิธีสูบน้ำเข้าเพื่อหมักตอซัง ทั้งนี้การเลือกวิธีกำจัดฟางและตอซังจะขึ้นอยู่กับสภาพของแปลง โดยแปลงที่มีสภาพแห้งเกษตรกรส่วนใหญ่จะเผา ส่วนแปลงที่ค่อนข้างเปียกเกษตรกรจะไม่เผาแต่จะใช้วิธีการหมักตอซังแทน ก่อนการไถดำแปลงค่อนข้างแห้งเกษตรกรจะสูบน้ำเข้านาและทิ้งไว้ให้ดินชุ่มหรืออุ่มตัวประมาณ 2-3 วัน เพื่อให้การไถทำได้ง่ายขึ้น จากนั้นจึงเริ่มไถ

การไถเป็นการไถแบบเปียกโดยทำการพลิกหน้าดินและกลบวัชพืช โดยใช้รถไถขนาดเล็กหรือรถไถเดินตามติดตั้งอุปกรณ์พ่วงท้ายซึ่งเรียกว่า หัวหมู จากนั้นเกษตรกรจะปล่อยให้เมล็ดวัชพืชงอกประมาณ 2-3 วัน แล้วจึงทำการไถซ้ำอีกครั้ง ทั้งนี้ ก่อนการไถรอบที่สองนี้ถ้าแปลงค่อนข้างแห้งเกษตรกรจะสูบน้ำเข้านาอีกครั้ง การไถรอบนี้บางแห่งเรียกว่าการปั่นหรือการตีดิน ซึ่งจะติดอุปกรณ์พ่วงท้ายรถไถเรียกว่า ลูกทุบหรือขลุ่ยไม้ อุปกรณ์นี้จะทำการตีดินให้เป็นก้อนเล็ก ๆ เพื่อทำลายวัชพืช โดยเกษตรกรจะทำเช่นนี้ 1-2 ครั้ง โดยทิ้งระยะห่างประมาณ 2-4 วัน จากนั้นจึงทำการตีเทือกซึ่งเป็นการทำลายวัชพืชอีกครั้ง เกษตรกรจะระบายน้ำออกจากนาแล้วทำการปรับระดับแปลงนา ซึ่งเรียกว่า การลูบ

การลูบเทือก หรือการปรับเทือก เพื่อให้ระดับแปลงสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจะทิ้งไว้ 1 วัน เพื่อเตรียมการหว่านข้าว โดยเมื่อจะทำการหว่านเกษตรกรจะระบายน้ำออกและแหวกเป็นร่องน้ำขนาดเล็กเพื่อเป็นร่องระบายน้ำออกจากแปลง และภายหลังจากการหว่านเมล็ดข้าวแล้ว เกษตรกรจะคอยติดตามดูการเจริญเติบโตของข้าว ซึ่งหลังจากหว่านข้าวประมาณ 7-10 วัน หาก

แปลงแห้งเกษตรกรก็จะเอาน้ำเข้าแปลง โดยพยายามรักษาระดับน้ำไม่ให้มากหรือน้อยจนเกินไป การเอาน้ำเข้าแปลงภายหลังการหว่านเกษตรกรจะทำ 3-4 ครั้ง ขึ้นอยู่กับสภาพความแห้งของดิน โดยช่วงสุดท้ายก่อนการเก็บเกี่ยวเกษตรกรจะระบายน้ำออกจากแปลงก่อนประมาณ 20 วัน หลังจากนั้นจึงทำการเก็บเกี่ยว

ในส่วนของการสำรวจเกี่ยวกับการใช้น้ำชลประทาน เกษตรกรใช้น้ำจากคลองชลประทานเป็นหลัก และยังมีแหล่งน้ำอื่นคอยเสริมในช่วงแล้ง อาทิ บ่อน้ำใต้ดินตื้น บึง หรือคลองระบายน้ำ ซึ่งแหล่งน้ำสำรองนี้ส่วนใหญ่อยู่ในเขตโครงการพลเทพและโครงการท่าโบสถ์ โดยแปลงนาของเกษตรกรจะมีบ่อน้ำใต้ดินตื้นไว้ใช้สำรองในช่วงแล้ง รูปแบบการเอาน้ำเข้านาในช่วงฝน ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำในคลองค่อนข้างมาก เกษตรกรที่มีแปลงนาใกล้คลองจะเปิดประตูน้ำให้น้ำไหลเข้าแปลงนาโดยตรง ส่วนแปลงที่อยู่ห่างคลองก็จะลำเลียงน้ำผ่านคูน้ำรัศมีและไปตามแปลงนา จนกว่าจะถึงแปลงของตัวเอง

จากการสำรวจภาคสนามในช่วงฝนบางครั้งพบว่า เกษตรกรที่มีแปลงนาอยู่ใกล้คลอง กลับสูบน้ำจากบ่อน้ำตื้นขึ้นมาปลูกข้าวแทน ส่วนการเอาน้ำเข้าแปลงนาในช่วงแล้ง เกษตรกรจะใช้เครื่องสูบน้ำเป็นหลัก โดยการนำเครื่องสูบน้ำมาติดตั้งที่คลองชลประทาน แล้วทำการสูบน้ำเข้าคูน้ำ โดยในระหว่างลำเลียงน้ำเกษตรกรจะติดตั้งเครื่องสูบน้ำเป็นช่วง ๆ ซึ่งเฉพาะกรณีแปลงนาอยู่ห่างจากคลองส่งน้ำค่อนข้างมาก ในช่วงแล้งนี้ เกษตรกรที่มีบ่อน้ำตื้นมักจะสูบน้ำจากบ่อขึ้นมากปลูกข้าวแทนในกรณีน้ำในคลองชลประทานมีน้อย และในทั้งนี้ช่วงแล้งในเขตโครงการพลเทพกรมชลประทานจะติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำจากแม่น้ำท่าจีนลงคลองชลประทานเพื่อทำเกษตรกรสามารถทำการการเพาะปลูกได้

สภาพดิน เนื่องจากในงานวิจัยนี้กำหนดคุณสมบัติดินให้กับแบบจำลองโดยอ้างอิงจากแผนที่ชุดดินและข้อมูลดินพื้นฐานชุดดินจัดตั้งในเขตภาคกลางของกรมพัฒนาที่ดิน จากข้อมูลในพื้นที่ศึกษาพบว่าการกระจายของชุดดินต่างๆ อยู่หลายชุดดิน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินในที่ต่ำ สอดคล้องกับลักษณะการใช้ประโยชน์ของเกษตรกรในพื้นที่ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการปลูกข้าว และจากข้อมูลพื้นฐานสามารถจัดกลุ่มเนื้อดินที่พบแพร่กระจายอยู่มากในพื้นที่ได้เป็น 8 กลุ่ม ได้แก่ ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง ดินเหนียวปนทรายแป้ง ดินเหนียว ดินเหนียวปนดินร่วน ดินร่วน ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินร่วนปนทราย และดินทรายปนดินร่วน

จากการสำรวจพื้นที่ภาคสนามได้สุ่มทดสอบเนื้อดินในพื้นที่ศึกษาโดยวิธีสัมผัส พบว่าดินส่วนใหญ่มีสมบัติการขึ้นรูปได้ สามารถทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ โดยการบีด้วยหัวแม่มือได้ค่อนข้างยาว โดยที่เนื้อดินไม่แตกและขาดออกจากกัน และเมื่อสัมผัสแล้วจะรู้สึกเหนียวเกาะติดนิ้วมือ ซึ่งเป็นลักษณะของดินที่มีอนุภาคดินเหนียวอยู่ค่อนข้างมาก หรือจัดอยู่ในกลุ่มเนื้อดิน อาทิ ดินร่วนเหนียว ดินร่วนเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง ดินเหนียวปนทรายแป้ง และดินเหนียว ฉะนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าดินส่วนใหญ่มีเนื้อดินค่อนข้างเหนียว สำหรับดินร่วน และดินร่วนปนทรายนั้นโดยทั่วไปมักไม่พบในพื้นที่ปลูกข้าวเนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของการเก็บน้ำ แต่อย่างไรก็ตามในเขตพื้นที่ปลูกข้าวในเขตชลประทานพบว่ามีการปลูกข้าวในดินที่มีเนื้อดินค่อนข้างหยาบอยู่บ้าง

ปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง อาทิ พันธุ์ข้าว โดยพันธุ์ข้าวที่เกษตรกรนิยมปลูก ได้แก่ พันธุ์สุพรรณบุรี พันธุ์หอมปทุม และพันธุ์ชัยนาท ซึ่งการปลูกข้าวแต่ละครั้ง เกษตรกรจะพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบ เช่น พันธุ์ข้าว ช่วงอายุ ฤดูกาล ความเสี่ยงต่อน้ำท่วม และน้ำต้นทุน ปัจจัยดังกล่าวเป็นสิ่งที่เกษตรกรคำนึง ซึ่งแตกต่างกันไปตามสภาพของพื้นที่ เช่น เกษตรกรที่มีแปลงเพาะปลูกอยู่ในเขตพื้นที่ที่เสี่ยงต่อน้ำท่วมขังในช่วงฤดูฝน อาทิ พื้นที่บางส่วนของโครงการโพธิ์พระยา เกษตรกรมักจะหลีกเลี่ยงปลูกข้าวในช่วงนี้ เพราะอาจทำให้ผลผลิตเสียหายได้



การสัมภาษณ์เกษตรกร (ขณะทำการปลูกข้าว)



การทดสอบเนื้อดิน โดยวิธีสัมผัส



การติดตามสภาพน้ำท่วมขังในช่วงฝน (เดือนตุลาคม)



สภาพน้ำท่าที่ปากทางเข้าแม่น้ำท่าจีน (ช่วงฤดูฝน)



การติดตั้งเครื่องสูบน้ำในช่วงแล้ง



ลักษณะการระบายน้ำออกจากแปลงนา



สภาพน้ำที่คลองระบายสามซุก 1 (ช่วงฤดูแล้ง)



สภาพน้ำในแม่น้ำท่าจีน (ช่วงฤดูฝน)

ภาพที่ 82 การสำรวจพื้นที่ชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน



การเผาฟางและตอซัง



ขั้นตอนการไถเปียก



การขังน้ำในแปลงนาเพื่อรอวัชพืชงอก



ขั้นตอนการตีดิน



ขั้นตอนการทำเทือก



การลอบเทือกปรับระดับพื้นที่ให้สม่ำเสมอ



การหว่านเมล็ดข้าว



เมล็ดข้าวเริ่มงอก

ภาพที่ 83 ขั้นตอนการเตรียมแปลงปลูกข้าว

จากผลการวิเคราะห์ในส่วนของการสำรวจภาคสนาม เห็นว่าพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่ใช้น้ำชลประทานเป็นหลัก น้ำต้นทุนสำหรับการเพาะปลูกมาจากเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ซึ่งตั้งอยู่นอกเขตลุ่มน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากลุ่มน้ำนี้ไม่มีแหล่งเก็บกักน้ำต้นทุนเป็นของตนเอง จึงต้องอาศัยน้ำที่ระบายจากเขื่อนทั้งสอง ในลุ่มน้ำท่าจีนตอนบน ข้าวเป็นพืชหลักในการทำเกษตรกรรม

จากการสำรวจสังเกตว่าเกษตรกรในพื้นที่ทำการเพาะปลูกไม่พร้อมกัน โดยสังเกตได้จากอายุพืชและการเจริญเติบโตรวมทั้งระยะห่างของกิจกรรมเพาะปลูก กล่าวคือ พื้นที่บางแห่งปลูกข้าวก่อนแต่บางแห่งกลับกำลังทำการเตรียมแปลง เหตุการณ์ลักษณะนี้พบเห็นค่อนข้างมากในพื้นที่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพื้นที่ให้กว้างขึ้นเป็นรายโครงการสามารถบอกความต่างของพื้นที่ได้เช่นกัน โดยโครงการพลเทพและโครงการท่าโบสถ์ตั้งอยู่ช่วงต้นของแม่น้ำท่าจีนจะทำการเพาะปลูกเร็วกว่าโครงการอื่นโดยการปลูกค่อนข้างสอดคล้องกับช่วงฤดูกาลส่งน้ำ

ในส่วนโครงการโพธิ์พระยา จากการสำรวจสังเกตว่าทำการเพาะปลูกล่าช้ากว่าโครงการอื่น สาเหตุในส่วนนี้เห็นว่ามาจากปัญหาน้ำท่วมขังในช่วงฤดูฝนทำให้เกษตรกรต้องรอให้น้ำลดลงก่อนจึงจะสามารถทำการเพาะปลูกได้

2. การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองเป็นขั้นตอนกำหนดข้อมูลรับเข้าให้กับแบบจำลอง โดยการวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลจากขั้นตอนก่อนหน้านี้ ข้อมูลรับเข้าแบบจำลองมี 2 ลักษณะ คือ ข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลคำอธิบาย

ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่จัดเก็บแบบตารางกริด ได้แก่ ข้อมูลกริดอ้างอิง ภูมิประเทศ ดิน ตำแหน่งสถานีภูมิอากาศ ตำแหน่งอาคารบังคับน้ำ ทางน้ำ ส่วนข้อมูลคำอธิบาย ได้แก่ ข้อมูลชลศาสตร์ของหน้าตัดดิน ข้อมูลคุณสมบัติของอาคารบังคับน้ำ ข้อมูลภูมิอากาศรายวัน และข้อมูลน้ำท่า ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทำการสรุปข้อกำหนดการจำลองไว้ใน ตารางที่ 26 ซึ่งเป็นการสรุปเกณฑ์และเงื่อนไขการจำลอง

จากข้อกำหนดการสร้างจำลอง (ในตารางที่ 26) มีข้อสำคัญพอสรุปได้ดังนี้ ข้อแรก คือ ขนาดของกริด โดยสาเหตุของการแทนพื้นที่ด้วยกริดขนาด 1,000 เมตร มีสองเหตุผล เหตุผลแรกคือ ผลการประเมินขนาดกริดและขึ้นเวลาในหัวข้อการทดสอบแบบจำลอง ซึ่งให้เห็นว่า กริดขนาด 1,000 เมตร ขึ้นเวลา 60 วินาที สามารถจำลองกระบวนการไหลเวียนของน้ำบนผิวดินได้ เหตุผลที่สองคือ เวลาที่ใช้ในการจำลองพอยอมรับได้เมื่อเทียบกับจำนวนขององค์ประกอบในการคำนวณ กล่าวคือ เนื่องจากขนาดของพื้นที่ศึกษามีกว่าล้านไร่ ซึ่งถือว่าค่อนข้างใหญ่

การแทนพื้นที่ดังกล่าวด้วยกริดขนาด 1,000 เมตร เห็นว่าค่อนข้างเหมาะสม ด้วยเหตุที่จำนวนกริดมีไม่มากเกินไป ซึ่งเมื่อคำนวณจำนวนของกริดจากพื้นที่ศึกษาพบว่า มีจำนวนกว่าสองพันกริด แต่ถ้าหากลดขนาดกริดเป็น 500 เมตร จำนวนกริดจะเพิ่มขึ้นเป็นสี่เท่า ทั้งนี้ ยังไม่รวมการจำลองชั้นดินในแนวดิ่ง โดยหนึ่งกริดมีจำนวนชั้นดินทั้งหมดสิบแปดชั้น คิดเป็นทั้งพื้นที่จำนวนกว่าสี่หมื่นชั้น แต่ถ้าหากลดขนาดกริดข้างต้นจำนวนชั้นดินจะเพิ่มขึ้นเป็นสี่เท่าเช่นกัน จากผลการจำลองด้วยกริดขนาด 1000 เมตร พบว่า ใช้เวลาในการจำลองเกือบสี่วัน (3 วัน 22 ชั่วโมง) แต่ถ้าหากแทนกริดด้วยขนาดที่เล็กลง แบบจำลองมีแนวโน้มใช้เวลาคำนวณผลลัพธ์ยาวนานกว่านี้หลายเท่า

ส่วนข้อที่สอง เป็นการจำลองผังระบบส่งน้ำชลประทานในกลุ่มน้ำท่าจีน (ภาพที่ 79) เหตุผลของการจำลองระบบส่งน้ำเฉพาะคลองส่งน้ำสายใหญ่และคลองซอยบางแห่ง ซึ่งอาจทำให้แบบจำลองไม่สามารถแทนสภาพพื้นที่ที่คล้ายจริงได้ ในส่วนนี้เห็นว่า เนื่องจากระบบชลประทานในกลุ่มน้ำท่าจีนมีองค์ประกอบค่อนข้างมากและซับซ้อน การจำลองให้ครบทุกองค์ประกอบกระทำได้ลำบาก เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลและรายละเอียดเกี่ยวกับอาคารและทางน้ำ โดยเฉพาะทางน้ำ การจำลองทางน้ำให้ละเอียดทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับการกำหนดทิศทางการไหล โดยพื้นที่จำลองส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ที่มีการปรับเปลี่ยนสภาพภูมิประเทศทำให้การกำหนดทิศทางการไหลของน้ำเป็นไปได้ลำบากเพราะต้องลงไปทำการสำรวจจริงในพื้นที่ ฉะนั้นปัญหาดังกล่าวเห็นว่า การลดรายละเอียดบางอย่างลงแต่ยังคงองค์ประกอบหลักที่สำคัญไว้ จะทำให้แบบจำลองยังสามารถจำลองสภาพพื้นที่ที่คล้ายจริงได้

ข้อที่สาม เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับเกษตรกร โดยข้อกำหนดเกี่ยวกับขั้นตอนการปลูกข้าว ได้มาจากการประมวลผลโดยการสัมภาษณ์จากเกษตรกร โดยเกษตรกรส่วนใหญ่ทำการเตรียมแปลงทุกขั้นตอน แต่อาจต่างเรื่องเวลาและเครื่องมือในการเตรียมแปลงขึ้นอยู่กับสภาพดินและน้ำในแปลง ฉะนั้นในส่วนของการกำหนดขั้นตอนของกิจกรรมเห็นว่า ควรให้เกษตรกรทำการเตรียมแปลงให้ครบทุกขั้นตอน ส่วนการใช้น้ำชลประทาน ในขั้นตอนการเตรียมแปลง เกษตรกรส่วนใหญ่ไม่สามารถบอกเป็นตัวเลขได้อย่างชัดเจน แต่จะบอกโดยการเปรียบเทียบกับบางสิ่ง เช่น การเอาน้ำเข้าแปลงครั้งแรกเกษตรกรจะเอาน้ำเข้าพอให้ดินชุ่ม บางรายอาจเอาน้ำให้เลयरอยใต้เล็กน้อย

ฉะนั้น ปริมาณน้ำที่ได้ระบุในข้อกำหนดส่วนนี้เห็นว่า การเอาน้ำเข้าแปลงให้เลयरอยดินเล็กน้อยน่าจะสอดคล้องกับคำสัมภาษณ์เกษตรกร ส่วนการเอาน้ำเข้าในขณะพืชกำลังเจริญเติบโตมีลักษณะคล้ายกัน โดยเกษตรกรมักให้สัมภาษณ์ว่าขณะที่ข้าวยังไม่สูงนักจะรักษาระดับน้ำให้เหนือผิวดินเล็กน้อยและเมื่อต้นพืชข้าวสูงเต็มที่จะให้น้ำไม่เกินครึ่งข้อศอก จากข้อมูลนี้จึงเห็นว่า การกำหนดระดับน้ำแก่พืชในช่วงนี้ การใช้ความสูงต้นข้าวเป็นระดับอ้างอิงในการให้น้ำชลประทานน่าจะมีความเหมาะสม

ในตารางที่ 26 การจำลองสถานการณ์แบ่งเป็นสองกรณี คือ กรณีน้ำต้นทุนจำกัดและกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด โดยกรณีน้ำต้นทุนจำกัด หมายถึง การจำลองโดยใช้ข้อมูลน้ำท่าไหลเข้าพื้นที่จากข้อมูลการเก็บบันทึก ส่วนกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด ปริมาณน้ำท่าไหลเข้าขึ้นอยู่กับอาคารควบคุมน้ำ

ข้อมูลสำหรับใช้ประกอบการตัดสินใจปลูกข้าวของเกษตรกรได้แก่ (1) ปริมาณน้ำชลประทาน (2) ปริมาณน้ำฝน (3) พื้นที่เสี่ยงต่อน้ำท่วมขัง (4) ช่วงเวลาเสี่ยงต่อน้ำท่วม และ (5) สภาพภูมิอากาศ ในตารางที่ 25 แสดงช่วงเวลาที่เกษตรกรคาดเดาเหตุการณ์ โดยเครื่องหมายถูกแทนเดือนที่มีโอกาสเกิด ส่วนผิวดแสดงไม่มีโอกาสเกิดขึ้น ตัวแปรที่เกษตรกรคาดการณ์ ได้แก่ ช่วงเวลาที่ฝนมีโอกาสดกอยู่ในราวเดือนเมษายนถึงเดือนตุลาคม ช่วงเวลาที่มีโอกาสเกิดน้ำท่วมขังฤดูฝนในเดือนตุลาคมและพฤศจิกายน และช่วงเวลาที่เกษตรกรปลูกข้าวแล้วมีโอกาสกระทบกับอากาศหนาว กล่าวคือ หากเกษตรกรตัดสินใจปลูกข้าวประมาณเดือนกันยายนและตุลาคม ช่วงการออกดอกของข้าวจะเกิดขึ้นระหว่างเดือนธันวาคมถึงกุมภาพันธ์ซึ่งอากาศค่อนข้างหนาว อาจทำให้ข้าวไม่สามารถออกดอกได้อย่างเต็มที่

ตารางที่ 25 ตัวแปรสำหรับตัดสินใจปลูกข้าวของเกษตรกร

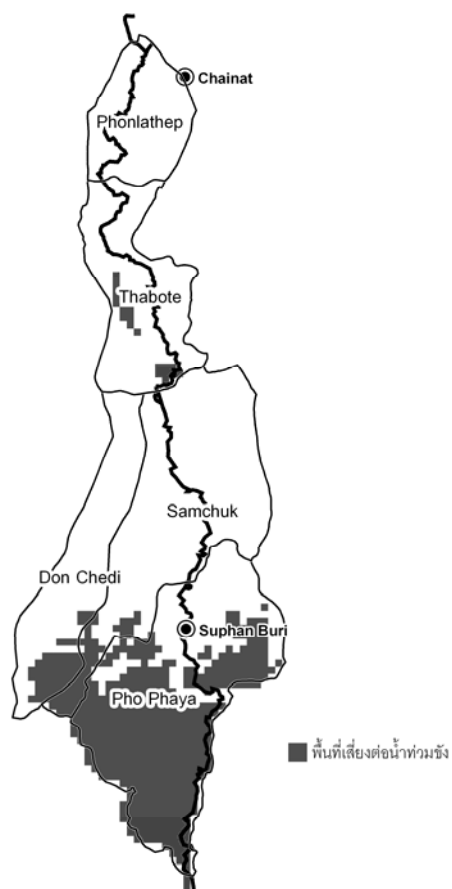
เดือน	ตัวแปร (1)	ตัวแปร (2)	ตัวแปร (3)
ม.ค.	×	×	×
ก.พ.	×	×	×
มี.ค.	×	×	×
เม.ย.	✓	×	×
พ.ค.	✓	×	×
มิ.ย.	✓	×	×
ก.ค.	✓	×	×
ส.ค.	✓	×	×
ก.ย.	✓	×	✓
ต.ค.	✓	✓	✓
พ.ย.	×	✓	×
ธ.ค.	×	×	×

หมายเหตุ สัญลักษณ์ ✓ แทนความหมายมีโอกาสดก ส่วน × แทนความหมายไม่มีโอกาสดก

ตัวแปร (1) เป็นช่วงเดือนที่มีโอกาสดก

ตัวแปร (2) เป็นช่วงเดือนที่มีโอกาสเกิดน้ำท่วมขัง

ตัวแปร (3) เป็นช่วงเดือนที่ปลูกข้าวแล้วมีโอกาสกระทบกับอากาศหนาว



ภาพที่ 84 พื้นที่เสี่ยงต่อน้ำท่วมขังในเขตในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน

ที่มา: ดัดแปลงจากฉันทพล (2551)

ในภาพที่ 84 แสดงของเขตของพื้นที่น้ำท่วมขัง (สีดำ) ในเขตพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นผลลัพธ์บางส่วนจากการศึกษาสภาพน้ำท่วมขังในพื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีน (ฉันทพล, 2551) โดยภาพสังเกตเห็นว่าพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมขังส่วนใหญ่อยู่ในเขตโครงการโพธิ์พระยา และพื้นที่บางส่วนของโครงการท่าโบสถ์ โครงการสามชุก และโครงการดอนเจดีย์

ตารางที่ 26 ข้อกำหนดการจำลองการจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน

รายการ	คำอธิบาย
1. กรณีศึกษา	- กรณีที่ 1 น้ำต้นทุนจำกัด (น้ำต้นทุนใช้ข้อมูลน้ำท่าไหลจากข้อมูลการเก็บบันทึก) - กรณีที่ 2 น้ำต้นทุนไม่จำกัด (น้ำต้นทุนขึ้นอยู่กับความควบคุมของประตูระบายน้ำ)
2. เวลาจำลอง	- รายวัน 2 ปี 6 เดือน (1 ก.ค.43 ถึง 31 ธ.ค.45) - ขั้นเวลา 60 วินาที สำหรับหาคำตอบสมการการไหลของน้ำ
3. ขนาดกริด	- 1,000 เมตร
4. น้ำท่าไหลเข้าระบบ	- กรณีน้ำต้นทุนจำกัด ใช้ข้อมูลน้ำท่าไหลที่มีการเก็บบันทึกตอนบน 3 แห่ง คือ ปตร. พลเทพ ปตร. มะขามเต่า-อุททอง และ ปตร. ระหาน ฝั่งซ้าย 5 แห่ง จากลำน้ำของพื้นที่กระเสียว และฝั่งขวา 4 แห่ง จากคลองระบายน้ำสุพรรณบุรี 1-4 - กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด - น้ำท่าไหลเข้าระบบขึ้นอยู่กับความควบคุมของอาคารบังคับน้ำ
5. ข้อมูลภูมิอากาศ	- ใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจอากาศ จ.ชัยนาท และ จ.สุพรรณบุรี
6. พืช	- ข้าว
7. ภูมิประเทศ	- ทิศทางการไหล - พิจารณาจากการสำรวจภาคสนามร่วมกับแผนที่ระบบชลประทาน - ระดับความสูง - คำนวณจากข้อมูล DEM - พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม - อ้างอิงงานวิจัยของ ฅฐพล (2551)
8. คุณสมบัติดิน	- เนื้อดิน - อ้างอิงจากแผนที่ชุดดินของกรมพัฒนาที่ดิน - หน้าตัดดิน - ใช้หน้าตัดรูปแบบ “D5” ทุกกริด หน้าตัดดินลึก 2 เมตร มี 3 ช่วงชั้น ชั้นบนมีชั้นดินย่อย 2 ชั้นหนาชั้นละ 10 ซม ช่วงชั้นถัดมามี 12 ชั้นย่อย หนาชั้นละ 10 ซม ช่วงชั้นล่างมี 3 ชั้นย่อยหนาชั้นละ 20 ซม.

ตารางที่ 26 (ต่อ)

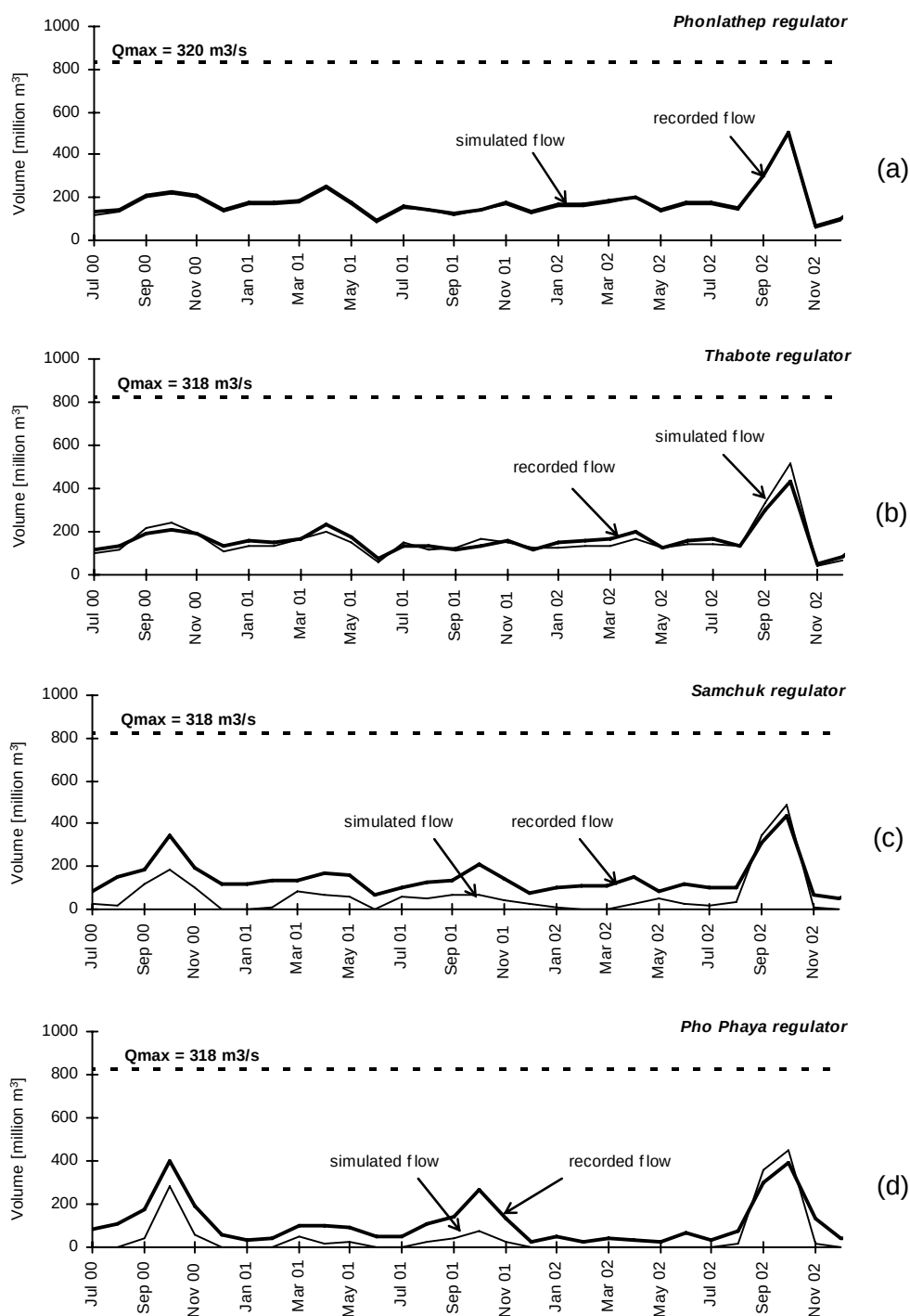
รายการ	คำอธิบาย
9. ระบบชลประทาน	
- ทางน้ำ	- มี 3 ชนิด คือ ผิวดิน คลองชลประทาน และคลองระบายน้ำ
- ปตร.	- จำนวน 61 แห่ง เป็นหัวงาน 6 แห่ง, ปตร.ปากคลอง 20 แห่ง, ปตร.กลางคลอง 15 แห่ง และ ปตร.ปลายคลอง 20 แห่ง
- จุดทางออกของน้ำ	- อยู่ในแม่น้ำท่าจีนที่ตำแหน่งท้ายโครงการโพธิ์พระยา
- การควบคุม	- ใช้ระบบพีชชีควบคุมการปิด-เปิดบานประตูระบายน้ำ
10. เกษตรกร	
	- เกษตรกรในที่นี้ อาจแทนเป็นคน หรือกลุ่ม โดยเกษตรกร 1 กลุ่ม เป็นเจ้าของแปลงเพาะปลูกได้เพียง 1 แปลง
- การใช้น้ำ	- การเลือกแหล่งน้ำให้พิจารณาคลองชลประทานก่อนแหล่งน้ำอื่น - กรณีหาแหล่งน้ำไม่พบ ให้เกษตรกรหาแหล่งน้ำอื่นโดยพิจารณาแหล่งน้ำที่อยู่รอบข้างแปลงของตนเองภายในรัศมีไม่เกิน 5 กิโลเมตร - กรณีพบแหล่งน้ำ 2 แห่ง ให้เลือกแหล่งน้ำใกล้แปลงของตนเองมากที่สุด
- การเตรียมแปลง	
- ระยะเวลา	- การเคลียร์พื้นที่โดยการเผาและกำจัดตอซังไม่เกิน 10 วัน, การไถ 3 วัน, การตีดิน 7 วัน, การทำเทือก 2 วัน, การลущเทือก 1 วัน และ หว่าน 1 วัน
- น้ำชลประทาน	- ช่วงเตรียมแปลงให้เกษตรกรการเอาน้ำเข้าแปลงครั้งแรก ไม่น้อยกว่า 5 มม ส่วนการตีดินให้รักษาระดับน้ำไม่ให้ต่ำกว่า 5 ซม - ช่วงการเจริญเติบโต ให้เกษตรกรรักษาระดับน้ำในแปลงไม่ให้ต่ำกว่า ร้อยละ 20 ของความสูงต้นข้าว - ให้เกษตรกรหยุดให้น้ำชลประทานก่อนการเก็บเกี่ยวผลผลิต 20 วัน

3. การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลจากการเก็บบันทึก

จากการใช้แบบจำลองจีเรส์ประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน ผลลัพธ์จากแบบจำลองในส่วนของปริมาณน้ำรายเดือนไหลผ่านประตูระบายน้ำทั้ง 4 แห่ง ในแม่น้ำท่าจีน ได้แก่ ปตร. พลเทพ ปตร. ท่าโบสถ์ ปตร. สามชุก และ ปตร. โพธิ์พระยา ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณน้ำที่มีการบันทึกไว้

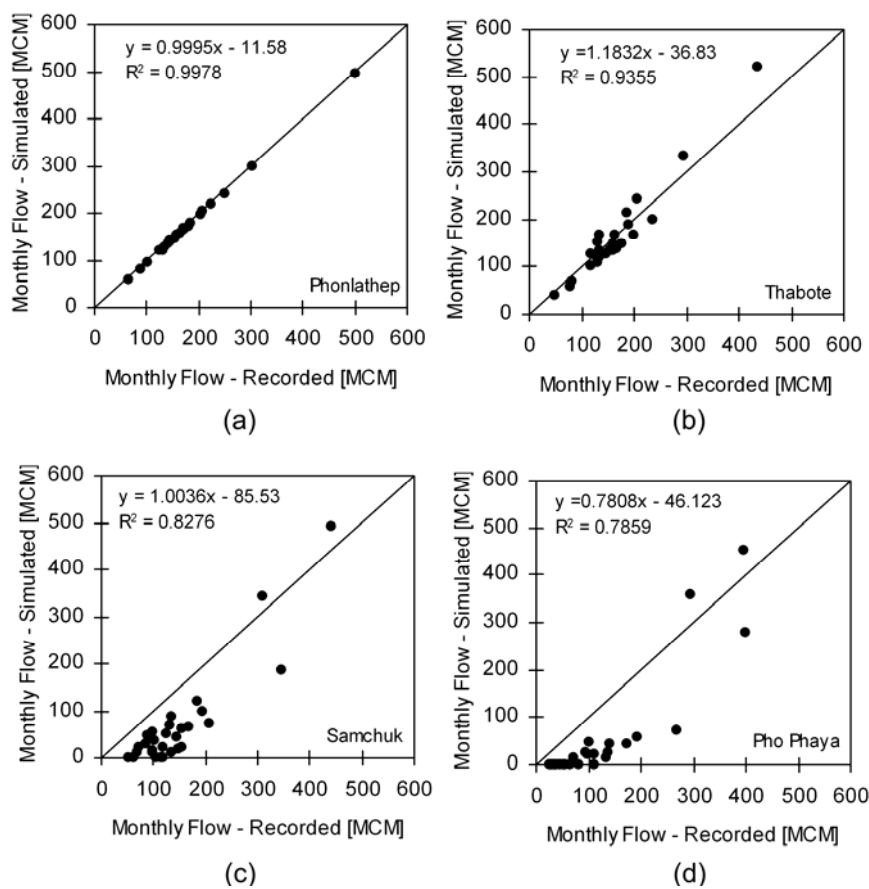
ผลการจำลองในกรณีน้ำต้นทุนจำกัด (ภาพที่ 85) พบว่า ปริมาณน้ำไหลเข้าแม่น้ำท่าจีนไหลผ่าน ปตร. พลเทพ มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณน้ำจากการบันทึก และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน ปตร. ท่าโบสถ์ ซึ่งอยู่ถัดลงมาสังเกตว่าปริมาณน้ำเริ่มต่างกันเล็กน้อย และเมื่อไหลผ่าน ปตร. สามชุก และ ปตร. โพธิ์พระยา ปริมาณน้ำทั้งสองมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ โดยปริมาณน้ำจากการจำลองมีแนวโน้มต่ำกว่าปริมาณน้ำที่บันทึกไว้ค่อนข้างมากโดยเฉพาะในช่วงเดือนที่แล้ง

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำ (ในภาพที่ 86) พบว่า ที่ ปตร.พลเทพ แบบจำลองให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับข้อมูลที่บันทึกไว้ (R^2 เข้าใกล้ 1) และเมื่อพิจารณา ปตร. ท่าโบสถ์ ซึ่งตั้งถัดมาทางด้านท้ายน้ำ ข้อมูลจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดน้อยลง (R^2 ลดลง) และเมื่อพิจารณาประตูระบายน้ำทางด้านท้ายลงมา พบว่า ข้อมูลจากแบบจำลองและการบันทึกมีความสอดคล้องกันน้อยลงมาก ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณน้ำทั้งที่ ปตร.สามชุก และ ปตร.โพธิ์พระยา ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับประตูระบายน้ำที่อยู่ทางต้นน้ำ



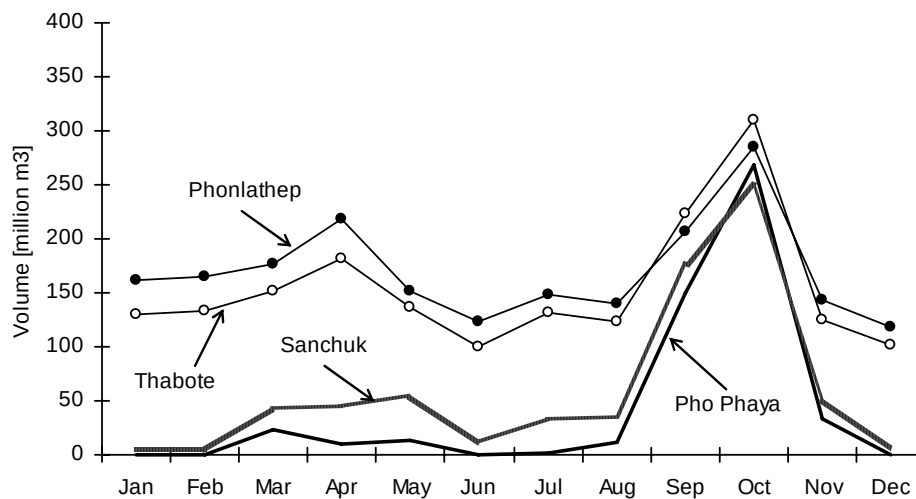
ภาพที่ 85 ปริมาณน้ำท่ารายเดือนไหลผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน กรณีน้ำต้นทุนจำกัด

หมายเหตุ ในภาพ (a) ปตร. พลเทพ (b) ปตร. ท่าโบสถ์ (c) ปตร. สามชุก และ (d) ปตร. โพธิ์พระยา



ภาพที่ 86 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลผ่านประตูระบายน้ำระหว่างข้อมูลสถิติกับข้อมูลจากการจำลอง กรณีน้ำต้นทุนจำกัด

หมายเหตุ (a) ปตร.พลเทพ (b) ปตร.ท่าโบสถ์ (c) ปตร.สามชุก (d) ปตร.โพธิ์พระยา

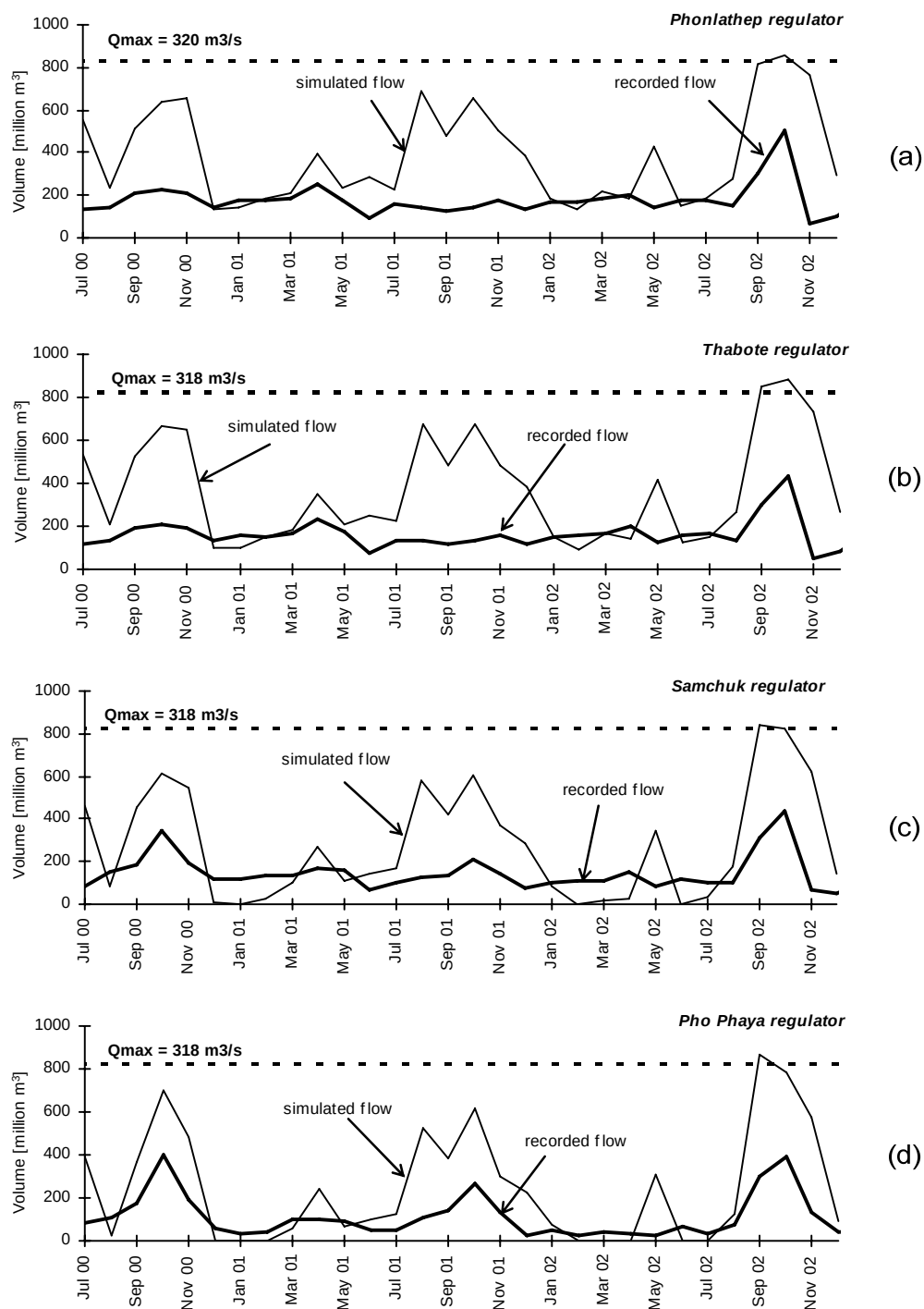


ภาพที่ 87 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำรายเดือนที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน
กรณีจำกัดน้ำต้นทุน (1 ก.ค.43 ถึง 31 ธ.ค.45)

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำเฉลี่ยรายเดือน (ในภาพที่ 87) สังเกตว่าในช่วงฝนในเดือนตุลาคม ปตร.ทั้งสี่แห่งมีปริมาณน้ำไหลผ่านใกล้เคียงกัน ซึ่งคิดเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำไหลผ่านสูงสุดของอาคาร ส่วนในช่วงแล้งปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก โดย ปตร.สองแห่งที่ตั้งอยู่ต้นแม่น้ำท่าจีน ได้แก่ ปตร.พลเทพ และ ปตร.ท่าโบสถ์ มีปริมาณน้ำไหลผ่านสูงกว่า ปตร.สามชุก และ ปตร.โพธิ์พระยา โดย ปตร.โพธิ์พระยา ซึ่งตั้งอยู่ท้ายสุดในช่วงแล้งบางเดือนไม่มีน้ำไหลผ่านอาคาร

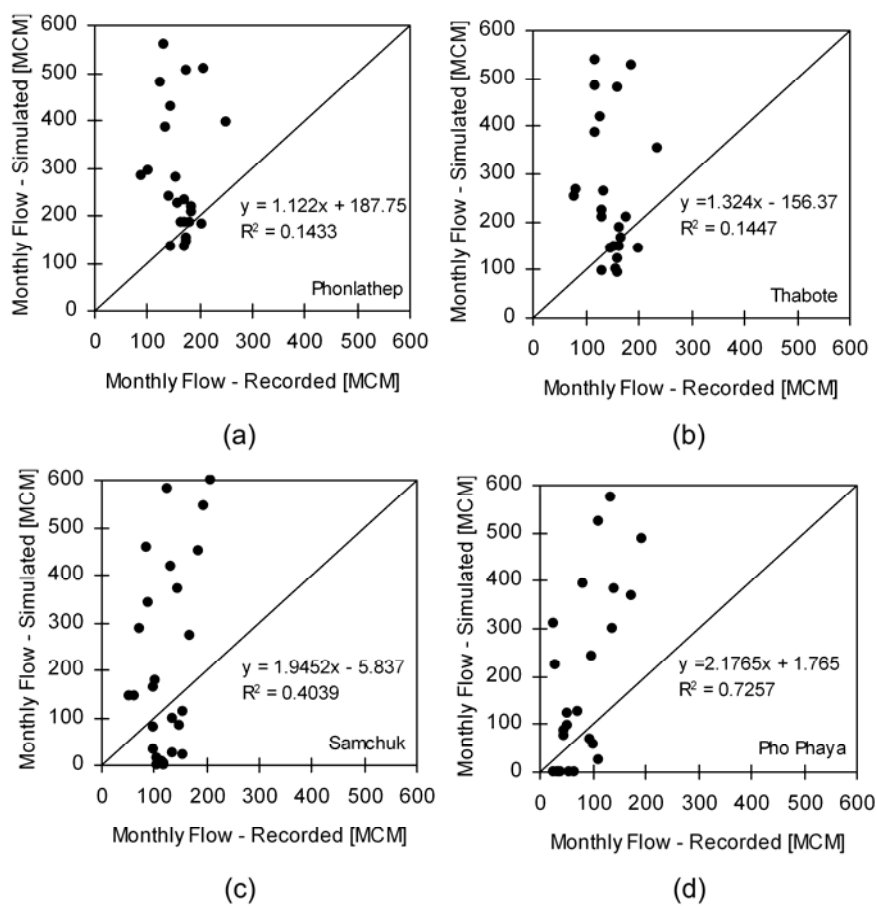
ผลลัพธ์ในกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด (ในภาพที่ 88) มีความแตกต่างจากกรณีแรกค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในช่วงฝน ปริมาณน้ำไหลผ่าน ปตร. พลเทพ ด้วยปริมาณน้ำที่ใกล้เคียงกับความจุสูงสุดของอาคารราว 320 ลบ.ม. ต่อวินาที ปริมาณน้ำส่วนนี้ได้ไหลผ่านประตูระบายน้ำถัดลงมาถึง ปตร. โพธิ์พระยา ส่วนปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารในช่วงแล้งสังเกตว่ามีปริมาณค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะ ปตร. สามชุก และ ปตร. โพธิ์พระยา ซึ่งมีลักษณะคล้ายกรณีแรก เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารจากแบบจำลองและข้อมูลเก็บบันทึก (ในภาพที่ 89) สังเกตว่ามีความสัมพันธ์กันค่อนข้างต่ำ (R^2 ห่างจาก 1) โดยปริมาณน้ำจากแบบจำลองมีแนวโน้มต่ำกว่าข้อมูลเก็บบันทึก

ปริมาณน้ำไหลเข้าแม่น้ำท่าจีนที่ ปตร. พลเทพ พบว่า ปริมาณน้ำจากการจำลองมีค่าสูงกว่าข้อมูลที่บันทึกค่อนข้างมาก โดยเฉพาะช่วงฝน ส่วนในช่วงแล้งมีปริมาณน้ำไหลเข้าใกล้เคียงกัน และเมื่อน้ำไหลผ่าน ปตร. ท่าโบสถ์ ปตร. สามชุก จนถึง ปตร. โพธิ์พระยา สังเกตได้ว่า ปริมาณน้ำไหลผ่านยังคงมีลักษณะไม่ต่างจาก ปตร. เหนื่อน้ำมากนัก โดยเฉพาะช่วงฝน แต่ในช่วงแล้งปริมาณน้ำในแม่น้ำท่าจีนมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำเฉลี่ยรายเดือนในภาพที่ 88 ช่วงเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์มีปริมาณน้ำไหลผ่าน ปตร. สามชุก และ ปตร. โพธิ์พระยา ค่อนข้างน้อย ต่างกับช่วงเดือนตุลาคม ซึ่งมีปริมาณน้ำมากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสี่ประตู



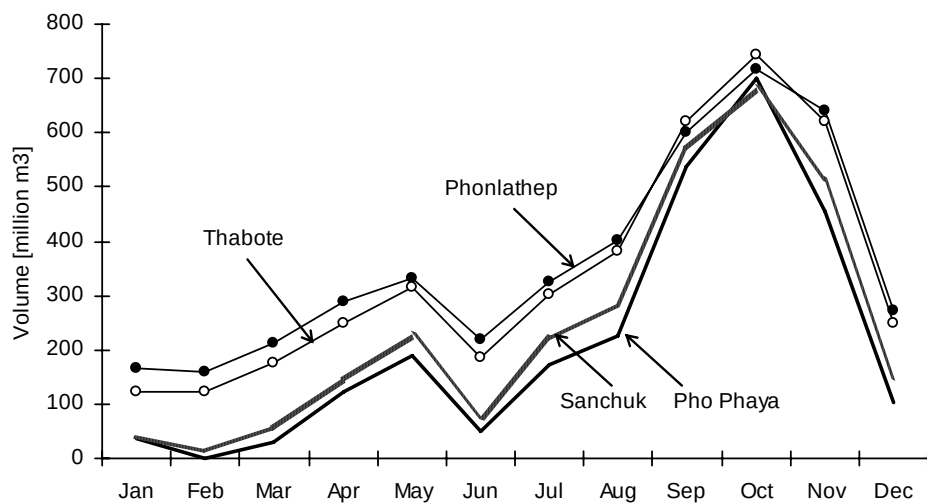
ภาพที่ 88 ปริมาณน้ำรายเดือนไหลผ่านอาคารควบคุมน้ำในแม่น้ำท่าจีน กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

หมายเหตุ ในภาพ (a) ปตร. พลเทพ (b) ปตร. ท่าโบสถ์ (c) ปตร. สามชุก และ (d) ปตร. โพธิ์พระยา



ภาพที่ 89 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำไหลผ่านประตูระบายน้ำระหว่างข้อมูลสถิติกับข้อมูลจากการจำลอง กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

หมายเหตุ (a) ปตร.พลเทพ (b) ปตร.ท่าโบสถ์ (c) ปตร.สามชุก (d) ปตร.โพธิ์พระยา



ภาพที่ 90 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำรายเดือนที่ไหลผ่านประตูระบายน้ำในแม่น้ำท่าจีน
กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด (1 ก.ค.43 ถึง 31 ธ.ค.45)

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำเฉลี่ยรายเดือน (ในภาพที่ 90) สังเกตว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากกรณีแรกประมาณสองเท่า โดยในช่วงฝนปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารสี่แห่งใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงแล้ง ปตร.สามชุก และ ปตร.โพธิ์พระยา มีปริมาณน้ำไหลผ่านน้อยกว่า ปตร. สองแห่งที่ตั้งอยู่ทางต้นแม่น้ำท่าจีน และเมื่อเทียบปริมาณน้ำไหลผ่านอาคารกับปริมาณน้ำสูงสุดของอาคาร พบว่า ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอาคารในช่วงฝนมีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณน้ำสูงสุดของอาคาร

4. ความเข้มของการเพาะปลูก

ความเข้มของการเพาะปลูก (Cropping Intensity หรือ CI) เป็นความถี่ของการใช้พื้นที่เพื่อการเพาะปลูกในรอบปี โดยงานวิจัยนี้ ประเมินค่า CI เป็นความถี่ของการใช้พื้นที่เพื่อการปลูกข้าวในรอบสองปีครึ่งระหว่าง 1 ก.ค.2543 ถึง 31 ธ.ค. 2545

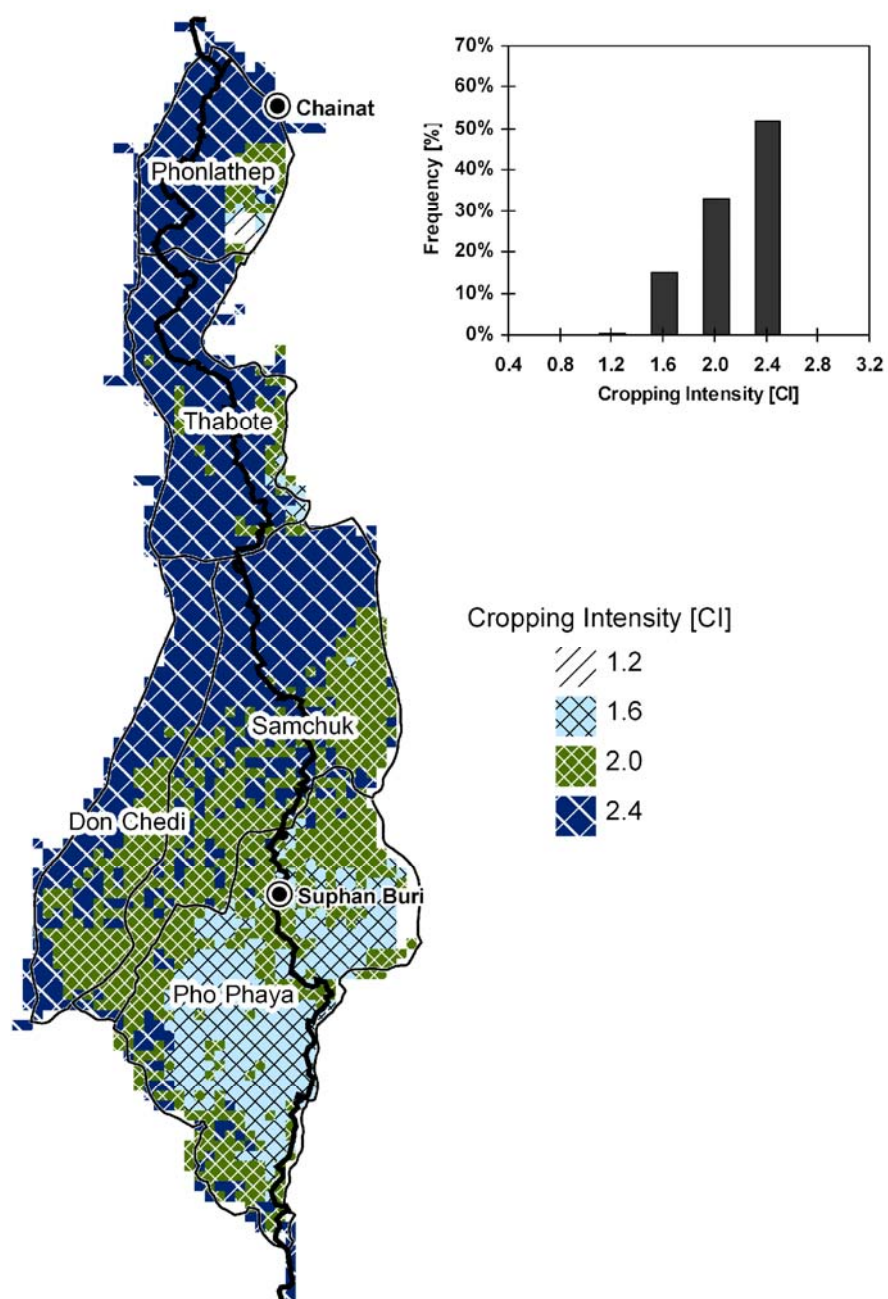
ผลการประเมินความเข้มของการเพาะปลูกแสดงในภาพที่ 91 ซึ่งค่า CI สองกรณี คือ กรณีน้ำต้นทุนจำกัด (ในภาพที่ 91) และกรณีต้นทุนไม่จำกัดน้ำ (ในภาพที่ 92) โดยในภาพแสดงความเข้มการปลูกข้าวสองลักษณะ คือ ฮิสโทแกรมและแผนที่ โดยกราฟฮิสโทแกรมในแกนนอนเป็นค่า CI ส่วนแกนตั้งเป็นความถี่ หรือเป็นร้อยละของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมดราว 1.4 ล้านไร่ ในส่วนของแผนที่ได้แสดงความต่างของค่า CI ไว้ 4 ระดับ ตามคำอธิบายสัญลักษณ์ คือ 1.2, 1.6, 2.0 และ 2.4

ในภาพที่ 91 แสดงความเข้มของการเพาะปลูกกรณีน้ำต้นทุนจำกัด จากฮิสโทแกรม ค่า CI สูงสุดเท่ากับ 2.4 หรือร้อยละ 50 ของพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด รองลงมา CI เท่ากับ 2.0 คิดเป็นร้อยละ 35 ถัดมา CI เท่ากับ 1.6 หรือประมาณร้อยละ 15 ส่วน ทั้งนี้ ยังมีค่า CI ที่ค่อนข้างต่ำ โดยเท่ากับ 1.2 อย่างไรก็ตาม ค่า CI ดังกล่าวมีสัดส่วนของพื้นที่น้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด

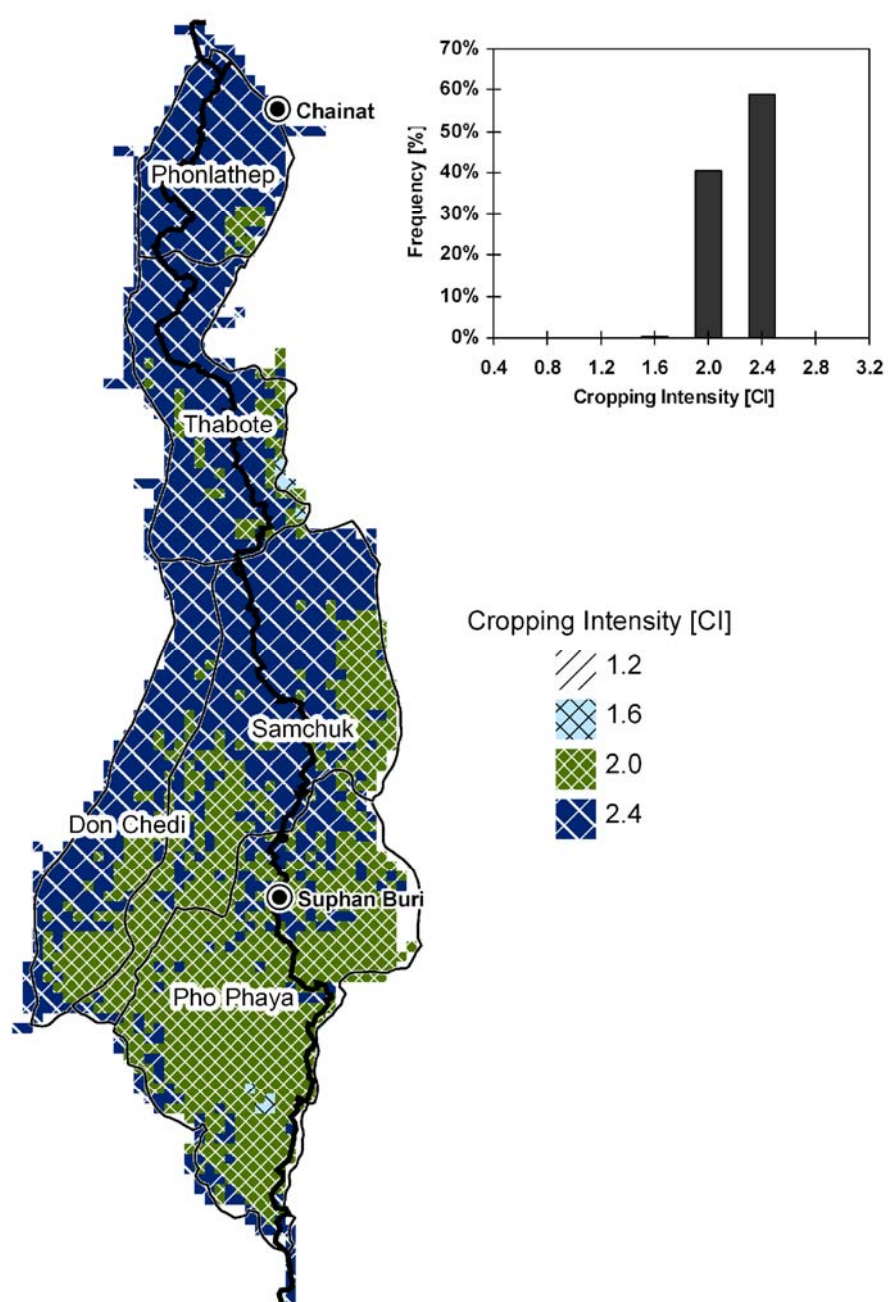
ในส่วนของแผนที่แสดงค่า CI สังเกตได้ว่า บริเวณตอนบนของพื้นที่ศึกษามีค่า CI ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นพื้นที่ของโครงการชลประทานและโครงการทำโบสถ์ โดยค่า CI ส่วนใหญ่เท่ากับ 2.4 ส่วนพื้นที่ทางตอนล่างมีแนวโน้มให้ค่า CI ต่ำกว่าพื้นที่ตอนบน โดยส่วนใหญ่ CI เท่ากับ 2.0 บริเวณตอนล่างของโครงการสามชุกและโครงการดอนเจดีย์ โดยเฉพาะโครงการโพธิ์พระยาส่วนใหญ่มีค่า CI ต่ำกว่า 2.0 ส่วนกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด ในภาพที่ 92 ค่า CI โดยรวมสูงกว่ากรณีแรก โดยประมาณร้อยละ 70 มีค่า CI เท่ากับ 2.4 ส่วนอีกร้อยละ 30 ให้ค่า CI เท่ากับ 2.0 แต่ยังมีบางพื้นที่ที่ค่า CI ต่ำกว่า 2.0 ซึ่งเทียบเป็นพื้นที่แล้วยังมีค่าน้อย โดยต่ำกว่าร้อยละ 1 ในส่วนของแผนที่แสดงค่า CI เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกรณีแรก โดยส่วนใหญ่ CI มีมากกว่าหรือเท่ากับ 2.0

การประเมินความเข้มของการเพาะปลูกทั้งสองกรณี สังกัดได้ว่า พื้นที่ที่ให้ค่า CI สูงสุด เป็นพื้นที่ที่ได้รับน้ำเพียงพอและทันต่อความต้องการ โดยสามารถปลูกข้าวได้เกิน 6 ครั้งในช่วง ระยะเวลาสองปีครึ่ง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ทางตอนบนและอยู่ต้นคลองส่งน้ำ ส่วนพื้นที่ที่มีค่า CI ค่อนข้างต่ำ ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ทางตอนล่างของโครงการสามชุกและโครงการคอนเจดีย์ โดยสามารถปลูกข้าวได้น้อยกว่า 6 ครั้ง โดยเฉพาะโครงการโพธิ์พระยา ซึ่งเป็นโครงการที่อยู่ท้ายน้ำ กรณีจำลองโดยจำกัดน้ำต้นทุนสามารถปลูกข้าวได้เพียง 4 ครั้ง การจำลองสถานการณ์โดยไม่จำกัด น้ำต้นทุน ทำให้พื้นที่ปลูกข้าวโดยรวมมีค่า CI เพิ่มสูงขึ้น แต่ยังมีความต่างของพื้นที่เช่นเดียวกันกับการจำกัดน้ำต้นทุน

จากผลลัพธ์ของค่าความเข้มของการเพาะปลูก สรุปได้ว่า พื้นที่ตอนบนสามารถปลูกข้าวได้ มากกว่า 2 ครั้งต่อปี ส่วนพื้นที่ตอนล่างปลูกข้าวไม่เกิน 2 ครั้งต่อปี โดยข้อสรุปนี้สอดคล้องกับ งานวิจัยของชาณูณรงค์ (2551) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์แบบแผนการปลูกพืชในเขตโครงการ เจ้าพระยาตอนบน และพบว่าพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบนสามารถปลูกข้าวต่อเนื่อง ทั้งปีสามครั้ง ส่วนพื้นที่ตอนล่างปลูกข้าวได้น้อยครั้งกว่า เนื่องจากเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อน้ำท่วมขัง ในช่วงปลายฤดูฝน



ภาพที่ 91 ความเข้มของการเพาะปลูก กรณีน้ำต้นทุนจำกัด



ภาพที่ 92 ความเข้มของการเพาะปลูก กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

5. การวิเคราะห์สมดุลน้ำ

จากการจำลองสถานการณ์การใช้น้ำเป็นระยะเวลา 2 ปี 6 เดือน (1 ก.ค.43 ถึง 31 ธ.ค.45) สามารถทำการวิเคราะห์สมดุลน้ำได้ดังนี้ ผลสรุปของสมดุลน้ำแสดงเป็นตัวเลขปริมาณน้ำในแต่ละองค์ประกอบในตารางที่ 27 ส่วนการเปรียบเทียบสัดส่วนของสมดุลน้ำแสดงในภาพที่ 93

ส่วนประกอบของน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบมีสองส่วนได้แก่ น้ำฝน (rainfall) และน้ำท่าไหลเข้า (surface inflow) ส่วนประกอบของน้ำที่ไหลออกจากระบบมีสี่ส่วนได้แก่ น้ำท่าไหลออก (runoff) การระเหยของน้ำ (evaporation) การคายน้ำ (transpiration) และการซึมลึกลงดิน (deep percolation)

สมดุลน้ำกรณีน้ำต้นทุนจำกัด พบว่า ผลรวมของปริมาณน้ำไหลเข้า (total inflow) และไหลออกจากระบบ (total outflow) มีค่าประมาณ 17,000 ล้าน ลบ.ม. เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำในส่วนที่ไหลเข้าระบบพบว่า ปริมาณน้ำท่าผิวดินมีสัดส่วนสูงกว่าปริมาณน้ำฝน ส่วนปริมาณน้ำในส่วนที่ไหลออกพบว่า ปริมาณน้ำหนึ่งในสามเป็นปริมาณน้ำท่าไหลออกจากระบบ รองลงมาเป็น การคายน้ำของพืช

ในส่วนของสมดุลน้ำในกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด พบว่า สัดส่วนของสมดุลน้ำเพิ่มขึ้นจากกรณีแรกเป็น 24,000 ล้าน ลบ.ม. ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 40 และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำในส่วนที่ไหลเข้าระบบพบว่า สัดส่วนของน้ำที่เพิ่มขึ้นเกิดจากปริมาณน้ำท่าผิวดิน ส่วนปริมาณน้ำฝนมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ในทำนองเดียวกัน ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากระบบพบว่า เป็นปริมาณน้ำท่าไหลออกมากที่สุด ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจากกรณีแรก

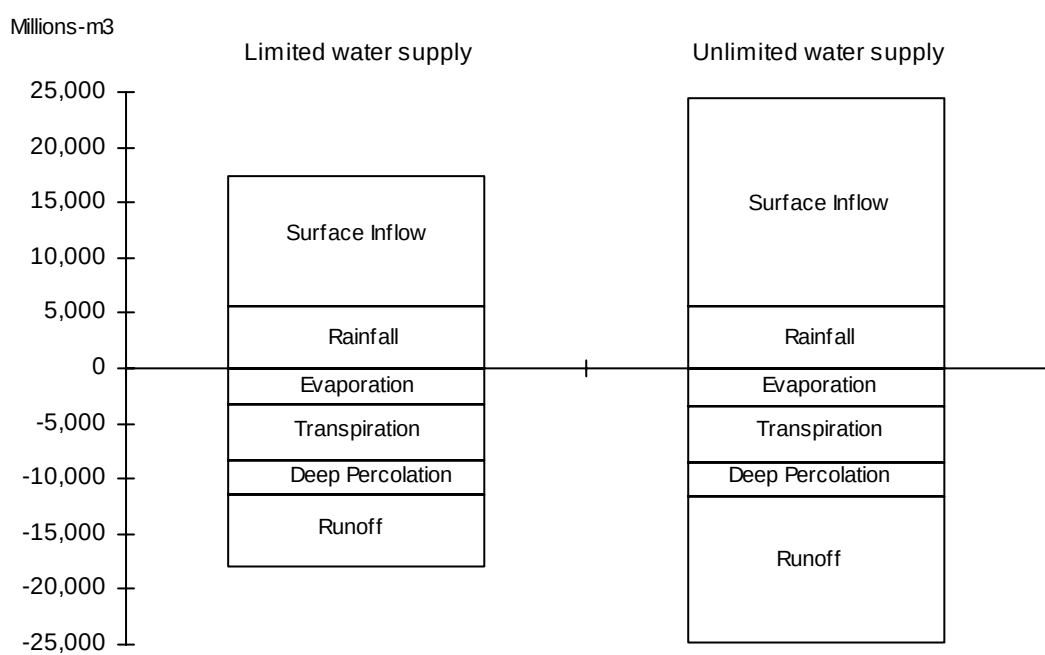
จากการพิจารณาสมดุลน้ำทั้งสองกรณีสังเกตได้ว่า ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นในกรณีที่สองมาจากปริมาณน้ำท่าผิวดินที่ไหลเข้าและไหลออกจากระบบ ส่วนปริมาณน้ำในส่วนอื่นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักได้แก่ ปริมาณฝน การระเหย การคายน้ำ และการซึมลึกลงดิน

ตารางที่ 27 สรุปสมดุลน้ำ

Components	Limited water supply	Unlimited water supply
(1) Rainfall	5,586	5,580
(2) Surface Inflow	11,814	18,809
(3) Runoff	-6,506	-13,139
(4) Evaporation	-3,340	-3,397
(5) Transpiration	-4,910	-5,045
(6) Deep percolation	-3,119	-3,214
Total inflow : (1)+(2)	17,400	24,388
Total outflow : (3)+(4)+(5)+(6)	-17,875	-24,796

หมายเหตุ หน่วย ล้าน ลบ.ม.

ระยะเวลา 2 ปี 6 เดือน (1 ก.ค.43 ถึง 31 ธ.ค.45)



ภาพที่ 93 การเปรียบเทียบสมดุลของน้ำในกรณีน้ำต้นทุนจำกัดกับกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

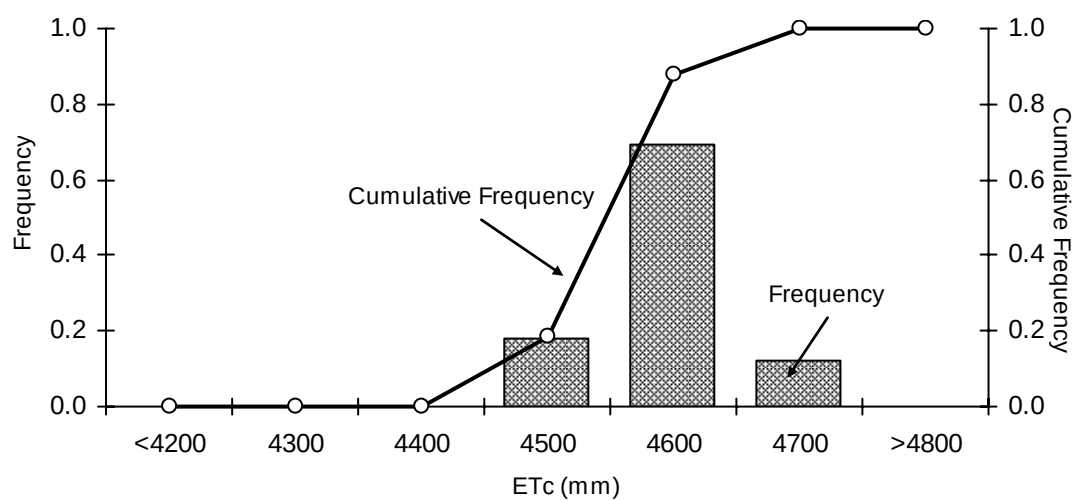
5.1 ปริมาณการใช้น้ำของข้าว

การพิจารณาการใช้น้ำของข้าวมีสองส่วนได้แก่ ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของข้าว (potential evapotranspiration หรือ ET_c) และปริมาณการใช้น้ำของข้าวที่แท้จริง (actual evapotranspiration หรือ ET_a)

สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของข้าว (ET_c) (ในภาพที่ 94 และภาพที่ 95) ส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4,500 มิลลิเมตร โดยกรณีน้ำต้นทุนจำกัด (ภาพที่ 95) ให้สัดส่วนของ ET_c สูงกว่าเล็กน้อย และเมื่อพิจารณา ET_c ในลักษณะเชิงพื้นที่ (ในภาพที่ 96) พบว่า พื้นที่ทางตอนบนโครงการสามชุกมี ET_c ในสัดส่วนที่สูงกว่าพื้นที่ทางตอนล่าง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบในสองกรณี (ในภาพที่ 96(ก)) และ (ในภาพที่ 96(ข)) สังเกตว่ามีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกัน

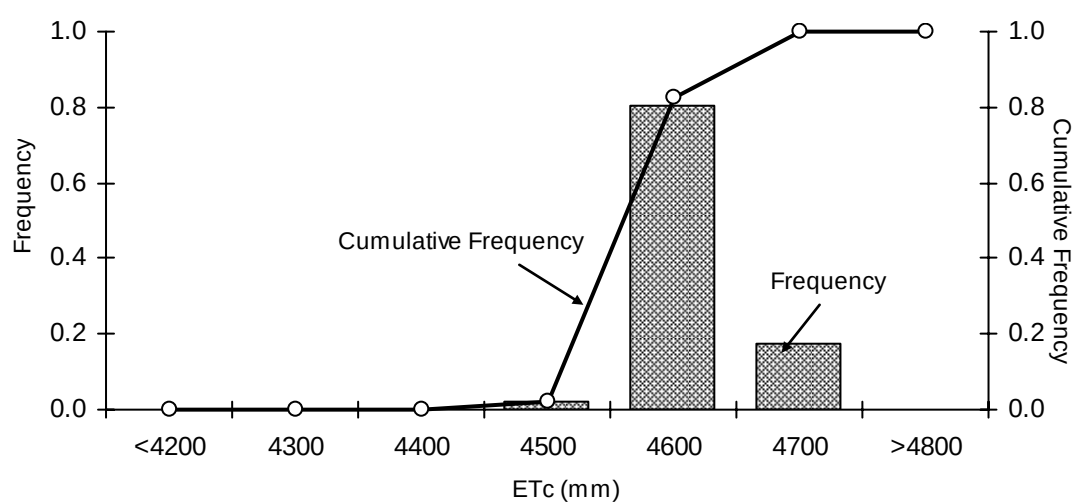
สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำของข้าวที่แท้จริง (ET_a) (ในภาพที่ 97 และภาพที่ 98) กรณีน้ำต้นทุนจำกัดมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3,600 มิลลิเมตร ส่วนกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัดเฉลี่ยราว 3,700 มิลลิเมตร ซึ่งสูงกว่ากรณีแรก

เมื่อพิจารณา ET_a ในลักษณะเชิงพื้นที่ (ในภาพที่ 99) สามารถจำแนกพื้นที่ออกเป็นสองส่วนได้ค่อนข้างชัดเจน คือ พื้นที่ตอนบน (สีเขียวเข้ม) และพื้นที่ตอนล่าง (สีเขียวอ่อน) โดยในภาพรวมพื้นที่ตอนบน ET_a มีค่าสูงกว่าพื้นที่ทางตอนล่าง บริเวณพื้นที่ที่มี ET_a สูงส่วนใหญ่อยู่ใกล้แหล่งน้ำ ส่วนพื้นที่ห่างจากแหล่งน้ำค่า ET_a ต่ำกว่า โดยเฉพาะพื้นที่ตอนกลางของโครงการโพธิ์พระยา



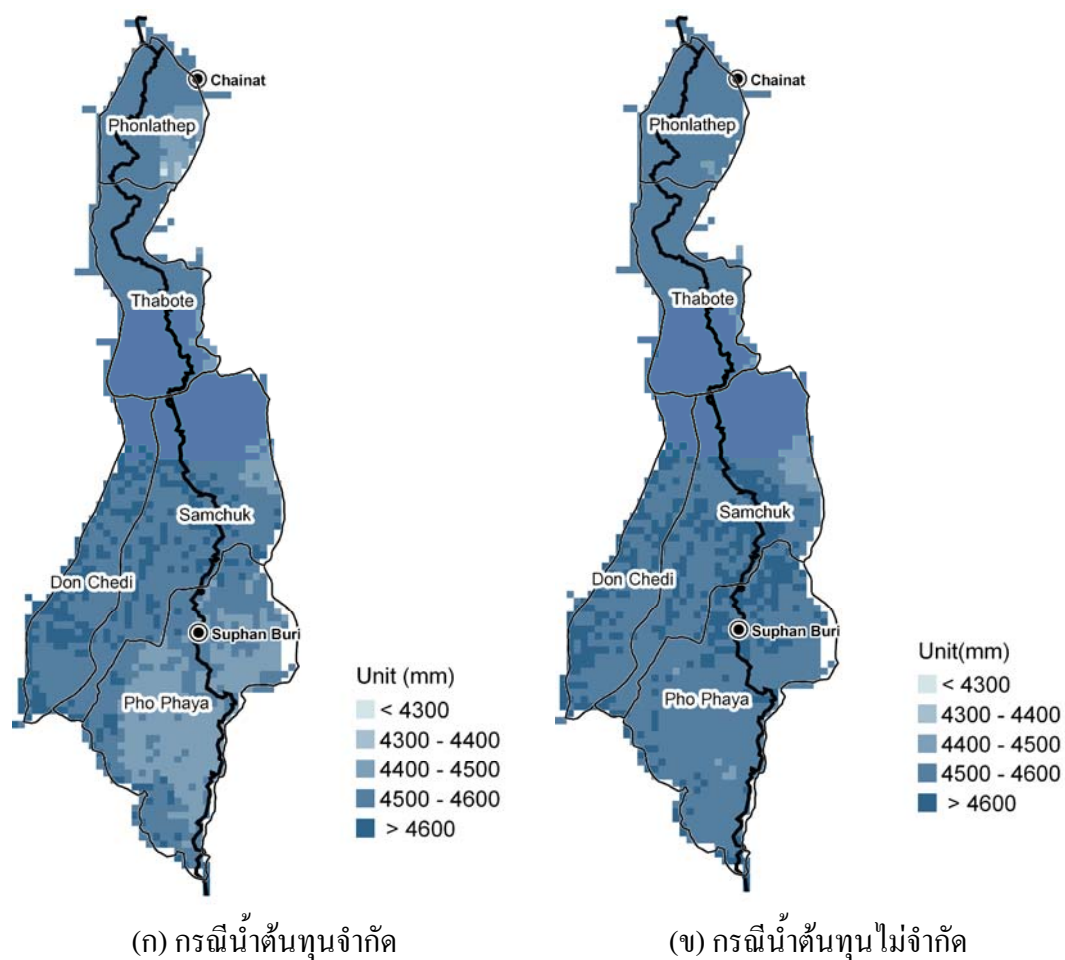
ภาพที่ 94 สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของข้าว กรณีน้ำต้นทุนจำกัด

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)



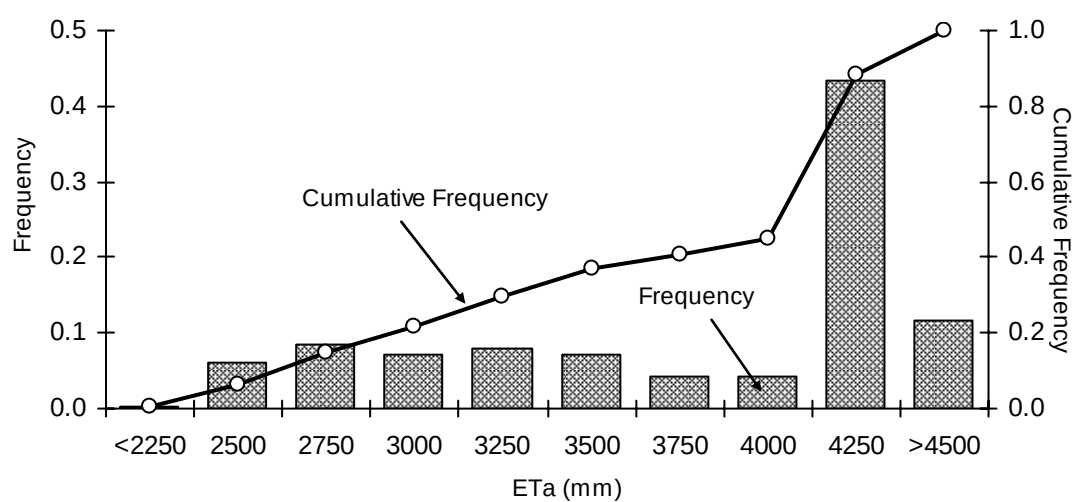
ภาพที่ 95 สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของข้าว กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)



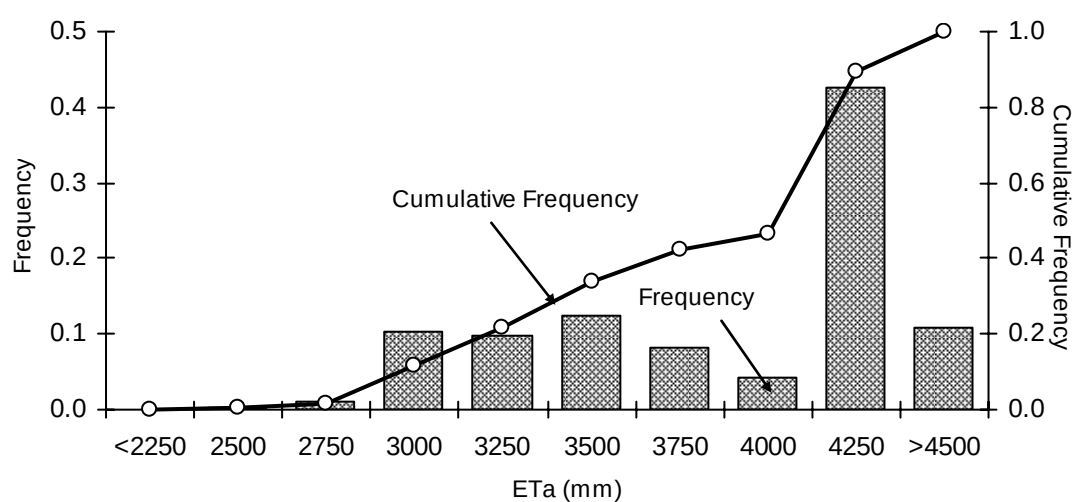
ภาพที่ 96 ปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของข้าว

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)



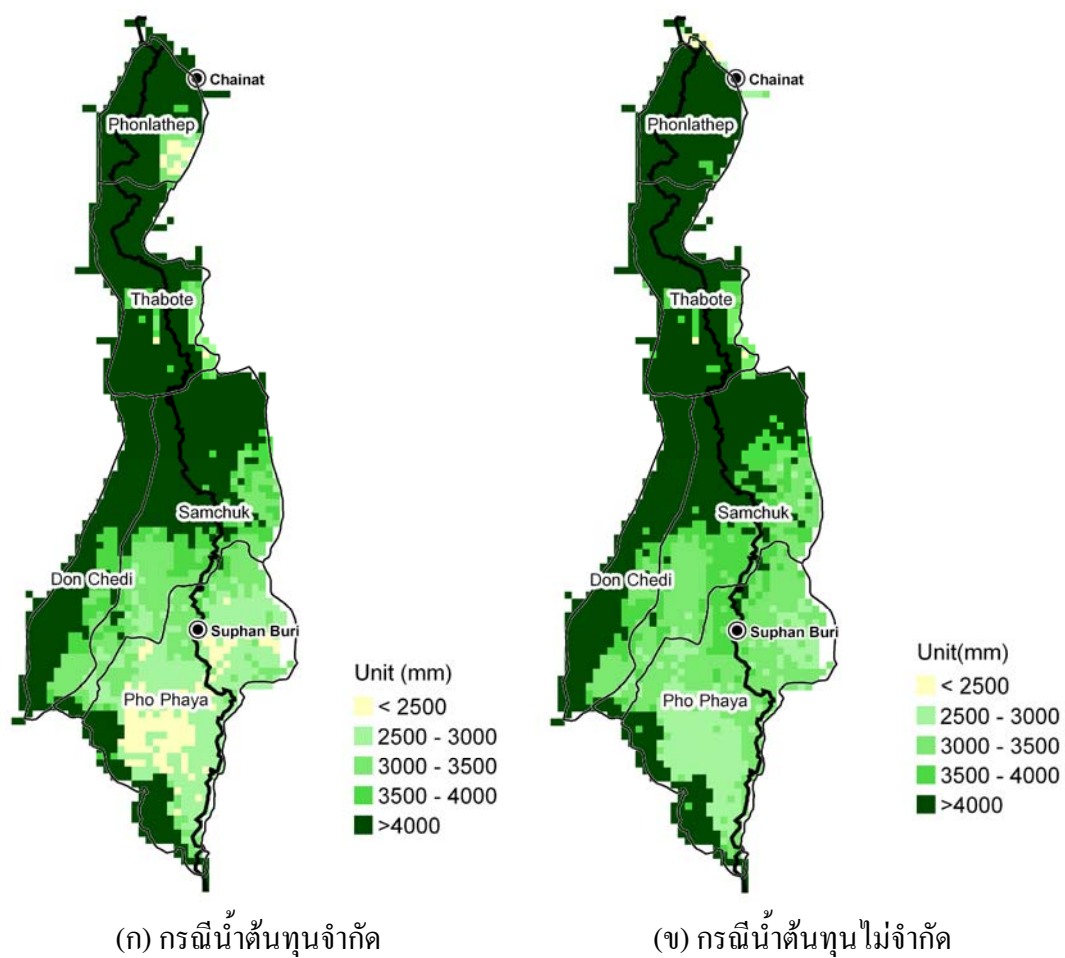
ภาพที่ 97 สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำของข้าวที่แท้จริง กรณีน้ำต้นทุนจำกัด

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)



ภาพที่ 98 สัดส่วนของปริมาณการใช้น้ำของข้าวที่แท้จริง กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)



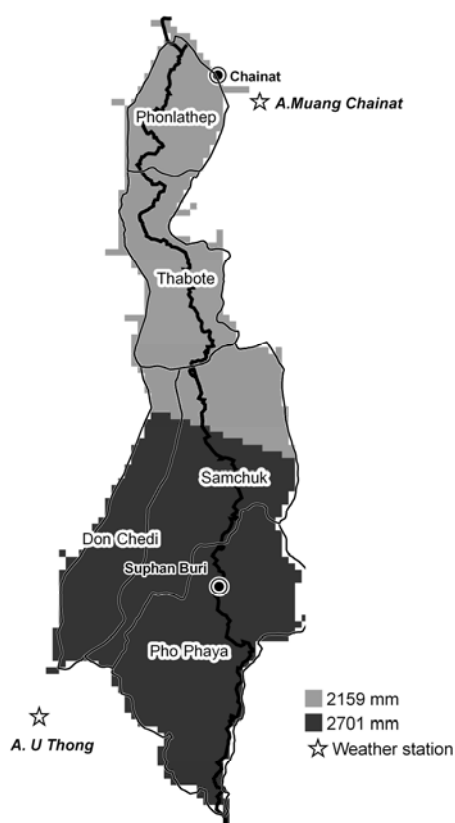
ภาพที่ 99 ปริมาณการใช้น้ำของข้าวที่แท้จริง

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)

5.2 ปริมาณน้ำต้นทุน

ปริมาณน้ำต้นทุน ประกอบด้วยปริมาณน้ำสามส่วนได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำท่าผิวดิน และปริมาณน้ำชลประทาน

ปริมาณน้ำฝน (ในภาพที่ 100) เป็นข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง (แสดงเป็นกราฟข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันในภาคผนวก ค) ซึ่งได้จากการแบ่งพื้นที่ด้วยวิธี Thiessen polygon โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันของสถานีตรวจอากาศที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ศึกษาสองสถานี คือ สถานีตรวจอากาศอำเภอเมืองจังหวัดชัยนาท ซึ่งตั้งอยู่ทางตอนบนของพื้นที่ และสถานีตรวจอากาศอำเภออุทุมพร จังหวัดสุพรรณบุรี ตั้งอยู่ทางตอนล่างของพื้นที่ ผลรวมของปริมาณน้ำฝนตลอดการจำลองพบว่าพื้นที่ตอนบนมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2,100 มิลลิเมตร ส่วนพื้นที่ตอนล่างเฉลี่ยประมาณ 2,700 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำฝนสำหรับจำลองสถานการณ์ในสองกรณีเป็นข้อมูลเดียวกัน



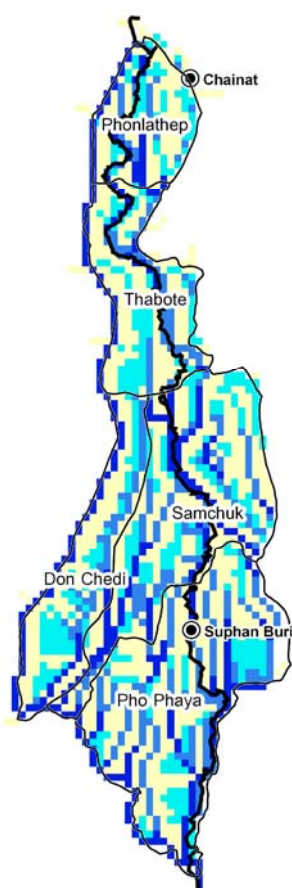
ภาพที่ 100 ปริมาณน้ำฝนรวมตลอดการจำลอง

ปริมาณน้ำท่าผิวดิน ซึ่งเป็นน้ำในส่วนที่ไหลเข้าแปลงเพาะปลูก โดยอาจเกิดจากการระบายน้ำจากแปลงเพาะปลูกที่อยู่ตอนบนไหลเข้ามาสู่แปลง หรืออาจเกิดจากปริมาณน้ำในแม่น้ำหรือทางระบายน้ำที่ไหลล้นเข้ามาในแปลงเพาะปลูก ปริมาณน้ำในส่วนนี้ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝน โดยเฉพาะตำแหน่งแปลงที่อยู่ติดกับทางน้ำในภาพที่ 101 ปริมาณน้ำท่าผิวดินในลักษณะเชิงพื้นที่ โดยสังเกตว่าพื้นที่ที่ได้รับน้ำค่อนข้างมากส่วนใหญ่อยู่ในตำแหน่งของทางน้ำ ส่วนพื้นที่ห่างออกมามีสัดส่วนของปริมาณน้ำน้อยกว่า

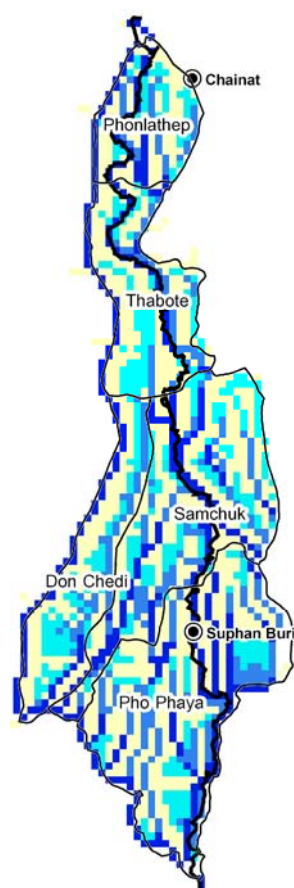
ปริมาณน้ำชลประทาน ผลลัพธ์ในส่วนนี้แบ่งการนำเสนอเป็นสองลักษณะ คือ การใช้ น้ำชลประทานตลอดระยะเวลาการจำลอง และปริมาณการใช้น้ำชลประทานต่อฤดูกาลเพาะปลูก ส่วนแรก การใช้น้ำตลอดการจำลอง (ตั้งแต่ ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45) แสดงในภาพที่ 102 (กรณีน้ำต้นทุนจำกัด) และภาพที่ 103 (กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด) โดยปริมาณการใช้น้ำเฉลี่ยในกรณีน้ำต้นทุนจำกัดประมาณ 3,200 มิลลิเมตร ส่วนกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัดเฉลี่ยประมาณ 3,300 มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาภาพที่ 104 สังเกตได้ว่า กรณีน้ำต้นทุนจำกัด (ภาพที่ 104(ก)) สามารถแบ่งพื้นที่เป็นสองกลุ่มตามปริมาณการใช้น้ำชลประทาน โดยกลุ่มแรกเป็นพื้นที่ตอนบนซึ่งมีสัดส่วนการใช้น้ำสูงกว่าพื้นที่กลุ่มที่สองซึ่งอยู่ทางตอนล่าง เมื่อพิจารณากรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด (ในภาพที่ 103 และภาพที่ 104(ข)) พบว่าสัดส่วนการใช้น้ำชลประทานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีแรก

ส่วนที่สอง เป็นปริมาณการใช้น้ำชลประทานต่อฤดูกาลเพาะปลูก ปริมาณน้ำในส่วนนี้คำนวณจากปริมาณการใช้น้ำชลประทานตลอดระยะเวลาการจำลองกับจำนวนครั้งของการปลูกพืช ผลลัพธ์แสดงเป็นสัดส่วนของการใช้น้ำในภาพที่ 105 (กรณีน้ำต้นทุนจำกัด) และภาพที่ 106 (กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด) โดยปริมาณการใช้น้ำในกรณีแรกเฉลี่ยประมาณ 580 มิลลิเมตร ส่วนกรณีที่สองเฉลี่ยประมาณ 600 มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาการใช้น้ำชลประทานเชิงพื้นที่ในภาพที่ 107 สังเกตได้ว่า พื้นที่เพาะปลูกทางตอนบนมีสัดส่วนการใช้น้ำชลประทานต่อฤดูกาลเพาะปลูกสูงกว่าพื้นที่ทางตอนล่าง

จากปริมาณน้ำทั้งสามส่วนได้แก่ ปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำท่าผิวดิน และปริมาณการใช้น้ำชลประทาน ได้รวมเป็นปริมาณน้ำต้นทุนทั้งหมดที่แปลงเพาะปลูกได้รับ (ในภาพที่ 108) ปริมาณน้ำส่วนนี้เป็นปัจจัยหนึ่งในการคำนวณสมรรถนะระบบชลประทานในหัวข้อถัดไป



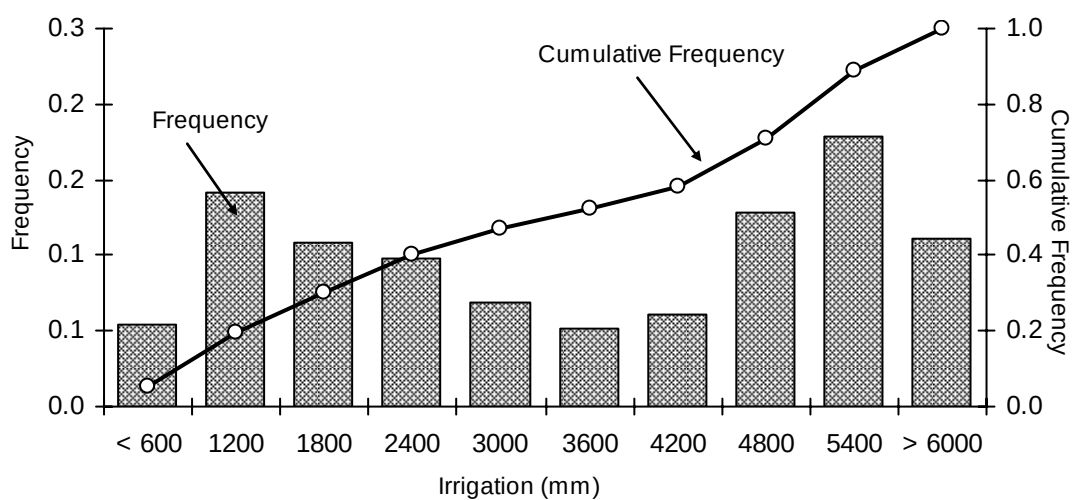
(ก) กรณีน้ำต้นทุนจำกัด



(ข) กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

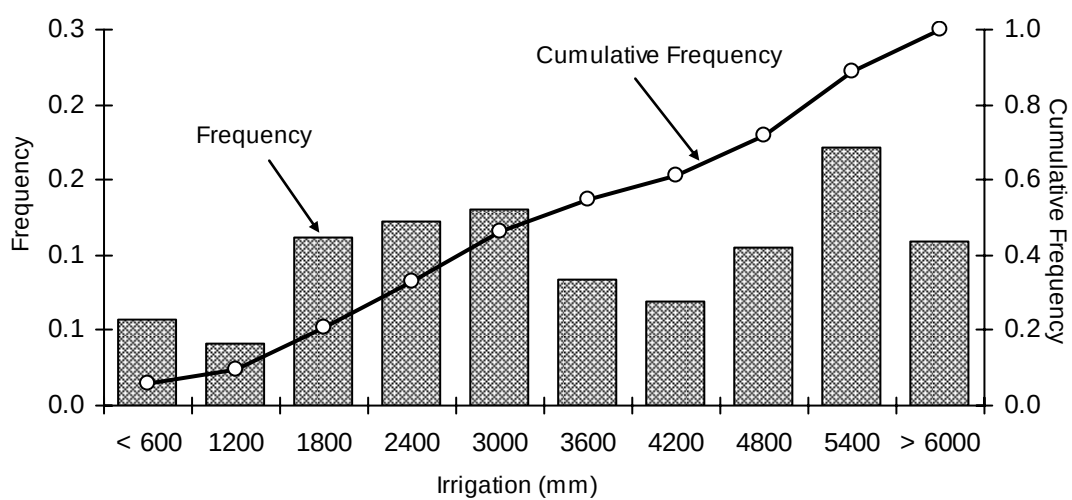
ภาพที่ 101 ปริมาณน้ำท่าผิวดิน

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)



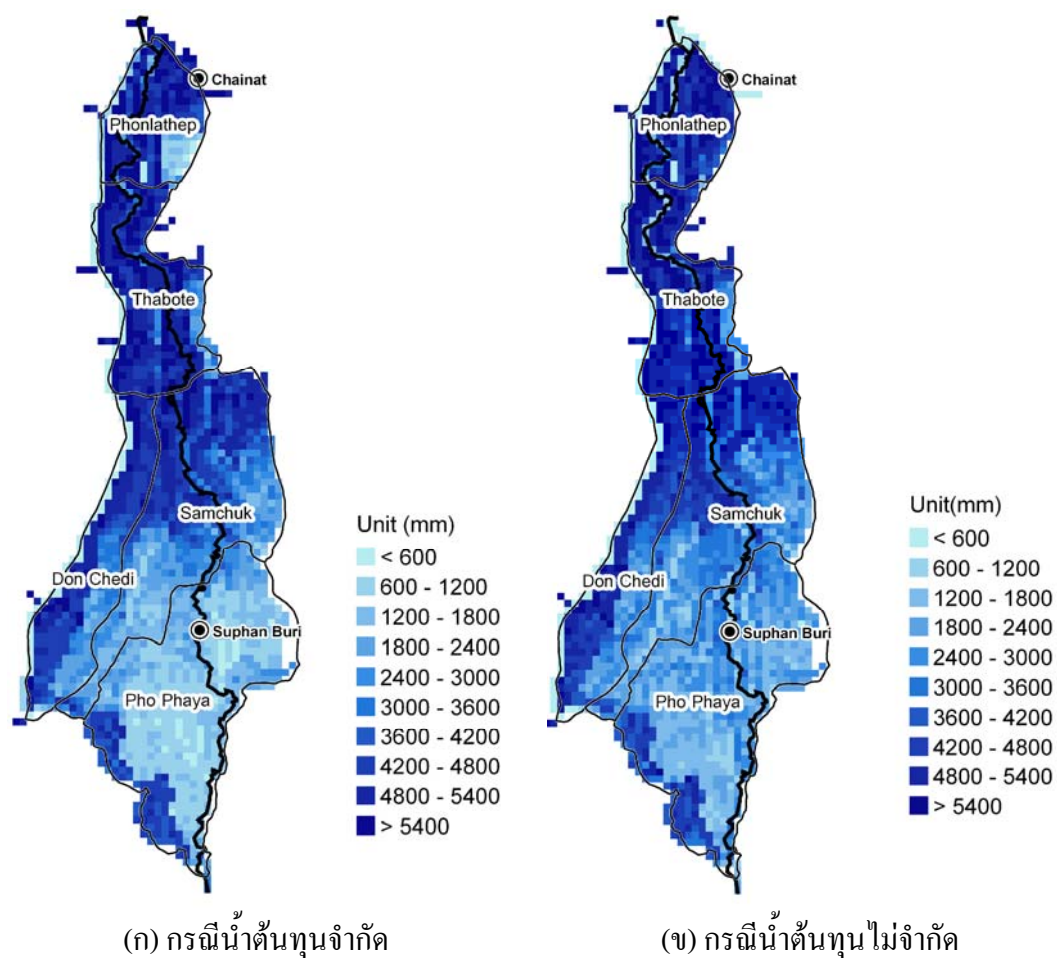
ภาพที่ 102 สัดส่วนการใช้น้ำชลประทาน กรณีน้ำต้นทุนจำกัด

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)



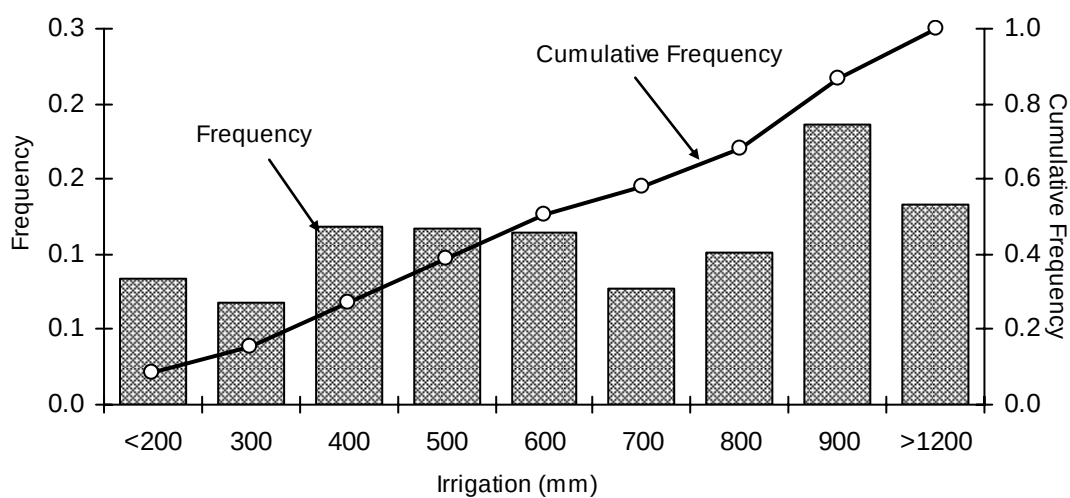
ภาพที่ 103 สัดส่วนการใช้น้ำชลประทาน กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)

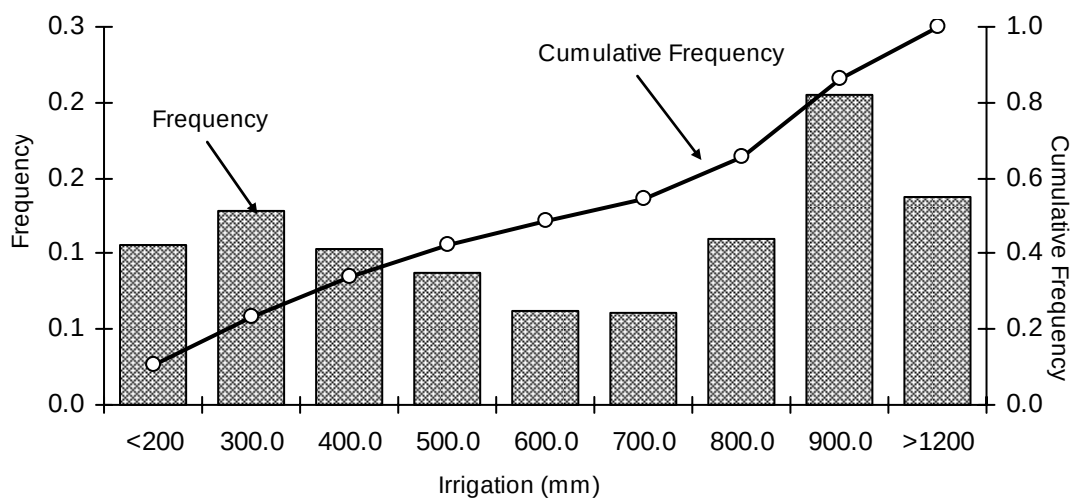


ภาพที่ 104 ปริมาณการใช้น้ำชลประทานตลอดระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)

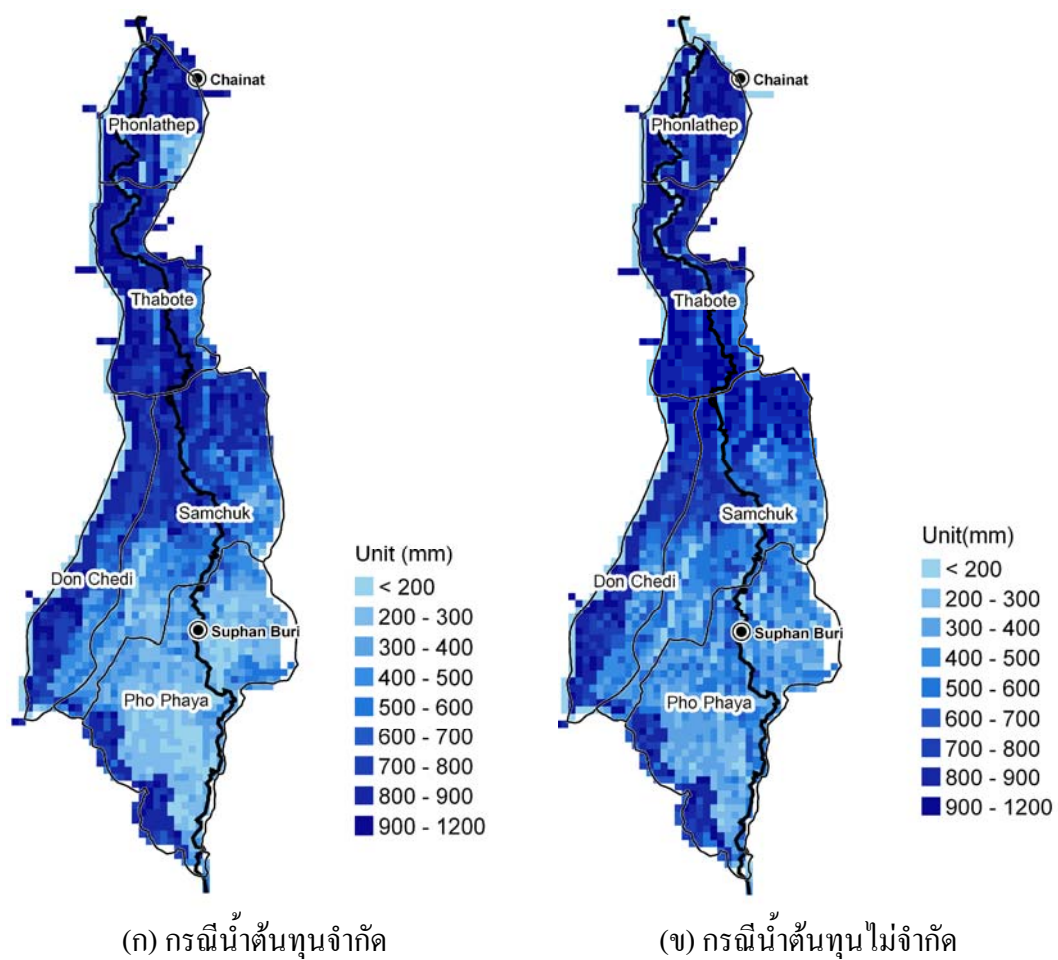
หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)



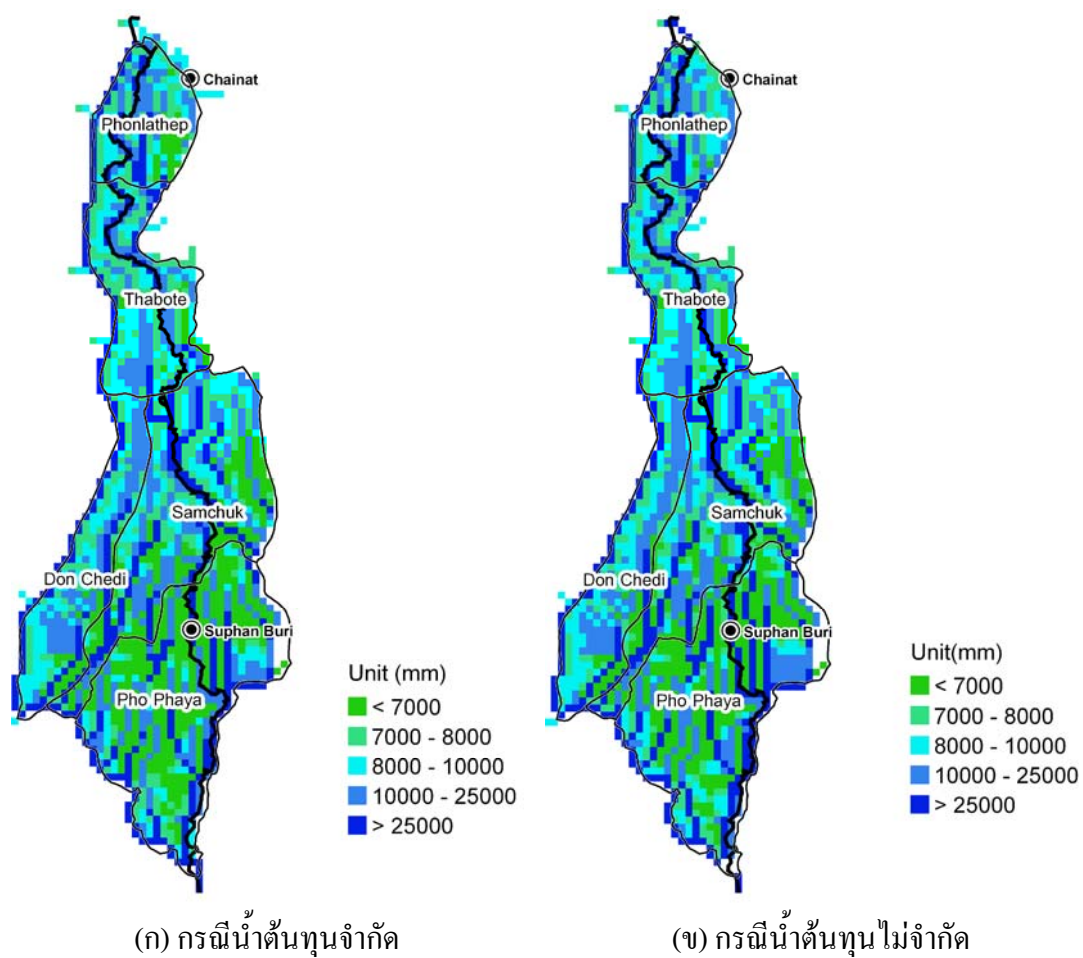
ภาพที่ 105 สัดส่วนของพื้นที่ใช้น้ำชลประทานต่อช่วงฤดูกาลเพาะปลูก กรณีน้ำต้นทุนจำกัด



ภาพที่ 106 สัดส่วนของพื้นที่ใช้น้ำชลประทานต่อช่วงฤดูกาลเพาะปลูก กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด



ภาพที่ 107 ปริมาณน้ำชลประทานต่อช่วงฤดูกาลเพาะปลูก



ภาพที่ 108 ปริมาณน้ำต้นทุนทั้งหมด

หมายเหตุ ระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)

6. การประเมินสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน

การประเมินสมรรถนะแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกอธิบายเกี่ยวกับตัวชี้วัดสำหรับการประเมินสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน ส่วนที่สองเป็นการอธิบายส่วนของผลลัพธ์

6.1 ตัวชี้วัดสำหรับประเมินสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน

งานวิจัยนี้ประเมินสมรรถนะจากตัวชี้วัดการใช้น้ำของพืชสัมพัทธ์ และอัตราส่วนการสูญเสีย (Bandara, 2006) ในตารางที่ 28 แสดงค่าระดับของค่าสมรรถนะได้แก่ ระดับเป้าหมาย (target value) และระดับวิกฤติ (critical value) ระดับเป้าหมายเป็นระดับที่ต้องการ ส่วนระดับวิกฤติเป็นระดับต่ำสุดที่ยอมให้มีการบริหารจัดการ กรณีสมรรถนะมีค่าสูงกว่าระดับวิกฤติแสดงว่าการจัดการน้ำอยู่ในเกณฑ์ดี แต่หากสมรรถนะต่ำกว่าระดับวิกฤติแสดงว่าการจัดการน้ำเกิดปัญหา

ตารางที่ 28 ตัวชี้วัดสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน

Performance indicator	Target value	Critical value
1. Relative evapotranspiration [RE]	0.80	0.65
2. Depleted fraction [DF]	0.50	0.40

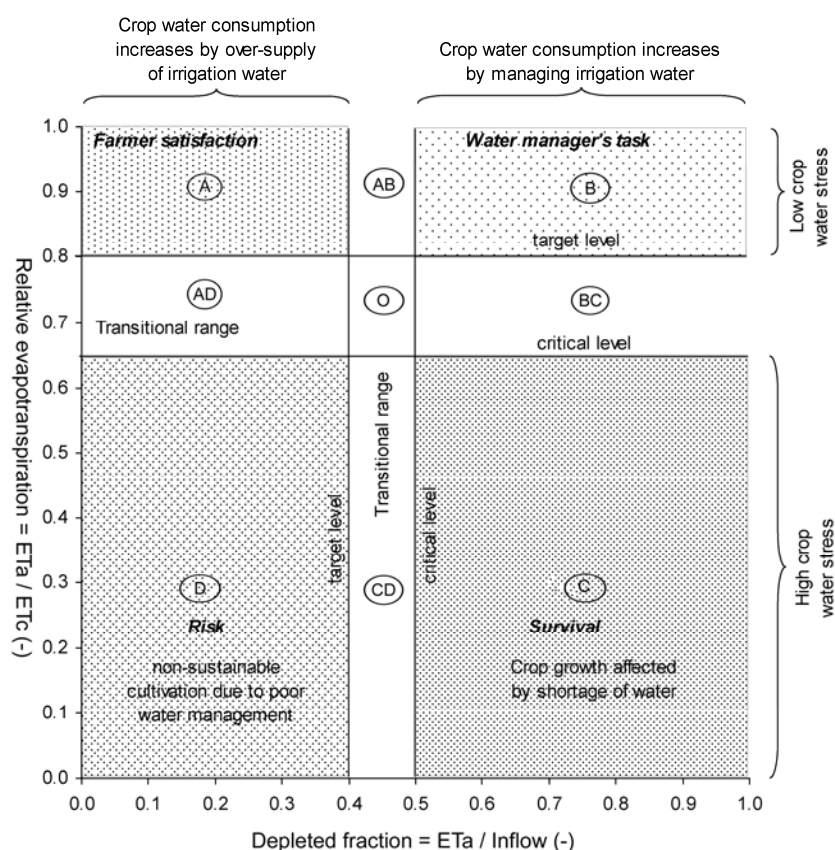
การใช้น้ำของพืชสัมพัทธ์ (relative evapotranspiration หรือ RE) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริง (actual evapotranspiration หรือ ETa) และปริมาณการใช้น้ำสูงสุดของพืช (crop evapotranspiration หรือ ETc)

$$\text{Relative Eevapotranspiration} = \frac{ETa}{ETc} \quad (36)$$

อัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริง (ETa) และน้ำต้นทุนทั้งหมด (Inflow) (depleted fraction หรือ DF) โดย Inflow เป็นน้ำฝน น้ำชลประทาน และน้ำท่าผิวดิน

$$\text{Depleted Fraction} = \frac{ETa}{\text{Inflow}} \quad (37)$$

ผลลัพธ์แสดงเป็นกราฟการกระจายตัวของตัวชี้วัดดังกล่าวที่ 109 โดยแบ่งขอบเขตโซนสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานเป็น 4 โซนหลัก ได้แก่ โซน Farmer satisfaction (“A”), โซน Water manager’s task (“B”), โซน Survival (“C”) และโซน Risk (“D”) ส่วนอีก 5 โซน ได้แก่ โซน “AB” โซน “AD” โซน “O” โซน “BC” และโซน “CD” เป็นโซนการเปลี่ยนแปลงระหว่างโซนหลัก เช่น “AB” เป็นโซนเปลี่ยนแปลงระหว่าง โซน “A” กับโซน “B” เป็นต้น



ภาพที่ 109 การแบ่งโซนสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน

ที่มา: คัดแปลงจาก Bandara (2006)

โซนที่ (1) เป็นโซนเกษตรกรพึงพอใจ (farmer satisfaction) (โซน “A”) สถานการณ์ที่เป็นไปได้ของโซนนี้ อาทิ เจ้าหน้าที่ชลประทานส่งน้ำมากกว่าความต้องการ ทำให้น้ำต้นทุนสำหรับเพาะปลูกมีมาก ด้วยเหตุนี้ เกษตรกรใช้น้ำในการเพาะปลูกมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ทำให้ต้องระบายน้ำส่วนเกินออกจากแปลง เหตุการณ์เช่นนี้ เกษตรกรพึงพอใจ เนื่องจากพืชได้รับน้ำเพียงพอต่อความต้องการ เมื่อพิจารณาอัตราส่วน RE มีค่าสูงกว่าเป้าหมาย โดย ET_a เข้าใกล้ ET_c แสดงว่าพืชได้รับน้ำเพียงพอต่อความต้องการ ขณะเดียวกัน อัตราส่วน DF มีค่าต่ำกว่าวิกฤต โดยค่า Inflow สูงกว่า ET_a ซึ่งหมายถึงน้ำต้นทุนสูงกว่าความต้องการน้ำของพืช

โซนที่ (2) เป็นโซนเป้าหมายสำหรับการจัดการน้ำ (water manager's task) (โซน “B”) สถานการณ์โซนนี้ อาทิ เจ้าหน้าที่ชลประทานมีการควบคุมการส่งน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาณน้ำที่ส่งสอดคล้องกับปริมาณความต้องการ เกษตรกรมีการจัดระบบการจัดการน้ำในแปลงเพาะปลูก ทำให้ลดการสูญเสีย น้ำ ดังนั้น โซนนี้จึงเป็นที่พึงพอใจทั้งสองฝ่าย โดยฝ่ายเจ้าหน้าที่พอใจเนื่องจากส่งน้ำได้ตรงตามความต้องการ ส่วนเกษตรกรได้รับน้ำเพียงพอทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี อัตราส่วน RE มีค่าสูงกว่าระดับเป้าหมาย โดย ET_a ใกล้เคียง ET_c พืชได้รับน้ำเพียงพอต่อความต้องการ ขณะเดียวกัน อัตราส่วนของ DF มีค่าสูงกว่าเป้าหมายเช่นกัน โดย Inflow ใกล้เคียง ET_a ซึ่งหมายถึงน้ำต้นทุนที่ให้แก่พืชใกล้เคียงต่อความต้องการน้ำของพืช

โซนที่ (3) เป็นโซนการเพาะปลูกได้รับผลกระทบจากการขาดน้ำ (survival) (โซน “C”) สถานการณ์ของโซนนี้ อาทิ ในการเพาะปลูกบางฤดูกาล น้ำต้นทุนอาจมีไม่เพียงพอ ทั้งยังประสบปัญหาเกี่ยวกับภัยแล้ง เจ้าหน้าที่ชลประทานจำเป็นต้องจำกัดการส่งน้ำ ซึ่งอาจทำให้กระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช อัตราส่วน RE มีค่าต่ำกว่าวิกฤต โดย ET_a ต่ำกว่า ET_c เล็กน้อย ซึ่งพืชได้รับผลกระทบเนื่องจากการขาดน้ำ ในส่วนของน้ำชลประทานลดน้อยลงเนื่องจากประสบปัญหาภัยแล้งทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนโดยรวมลดลง ค่า ET_a มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน จึงทำให้อัตราส่วนของ DF มีค่าสูงกว่าระดับเป้าหมาย ซึ่งหมายถึงน้ำต้นทุนที่ให้พืชใกล้เคียงต่อความต้องการของพืช

โซนที่ (4) เป็นโซนการเพาะปลูกมีความเสี่ยงต่อความเสียหาย (risk) (โซน “D”) สถานการณ์ที่ทำให้สมรรถนะระบบชลประทานมีค่าอยู่ในโซนนี้ เช่น เกิดภัยแล้ง ปริมาณน้ำต้นทุนมีไม่เพียงพอ ระบบส่งน้ำชลประทานขาดการบำรุงรักษา เกษตรกรไม่มีระบบการจัดการน้ำที่เหมาะสม ดังนี้ อัตราส่วนของ RE และ DF มีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤต

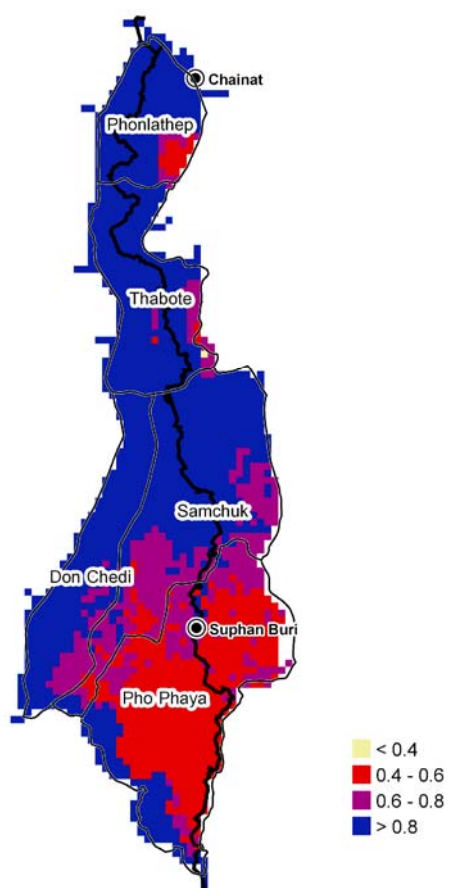
6.2 สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน

จากตัวชี้วัดสำหรับประเมินสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน คือ การใช้น้ำของพืชสัมพัทธ์ (ETa/ETc) และปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริงต่อปริมาณน้ำต้นทุนทั้งหมด (ETa/Inflow) ผลการคำนวณสัดส่วนของตัวชี้วัดทั้งสองแสดงในภาพที่ 110 และภาพที่ 111 ดังนี้

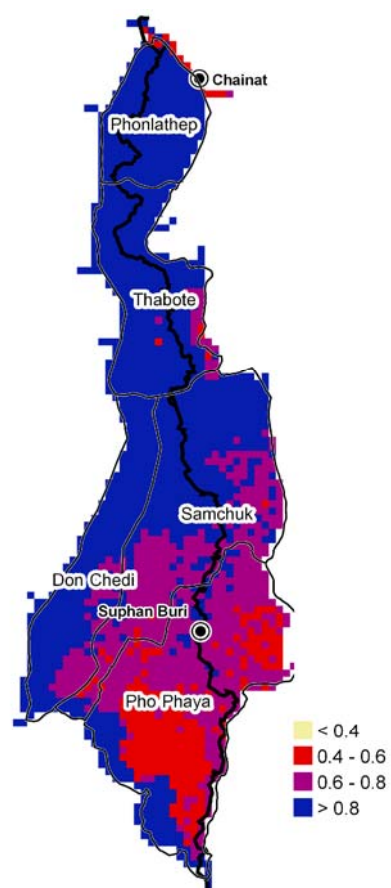
ในภาพที่ 110 แสดงการใช้น้ำของพืชสัมพัทธ์ ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนระหว่าง ETa กับ ETc ผลลัพธ์ที่ได้สังเกตว่า สัดส่วนโดยรวมมีค่ามากกว่า 0.6 โดยพื้นที่เพาะปลูกตอนบนและแปลงเพาะปลูกที่อยู่ใกล้แหล่งน้ำมีสัดส่วนสูงกว่าพื้นที่ทางตอนล่าง ฉะนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า พื้นที่เพาะปลูกตอนบน ข้าวสามารถใช้น้ำได้เพียงพอต่อความต้องการ ส่วนพื้นที่ตอนล่างข้าวสามารถใช้น้ำได้น้อยกว่าโดยเฉพาะพื้นที่ในเขตโครงการโพธิ์พระยา

และภาพที่ 111 แสดงผลลัพธ์ของอัตราส่วนระหว่าง ETa กับ inflow ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่าง ปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริงต่อปริมาณน้ำต้นทุนทั้งหมดที่แปลงเพาะปลูกได้รับ ได้แก่ น้ำฝน น้ำชลประทาน และน้ำท่าผิวดิน โดยสังเกตได้ว่า แปลงเพาะปลูกที่อยู่ใกล้แหล่งน้ำ (โตนสีแดง) มีสัดส่วนต่ำกว่าแปลงที่ตั้งอยู่ห่างคลอง (โตนสีเหลือง) ซึ่งค่าต่ำแสดงว่าปริมาณน้ำที่แปลงเพาะปลูกได้รับมีค่าสูงกว่าความต้องการใช้น้ำของพืช

ปัจจัยทั้งสองข้างต้น ได้ถูกนำไปใช้ในการประเมินสมรรถนะระบบชลประทาน โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์เป็นโซนสมรรถนะระบบชลประทาน 9 โซนดังภาพที่ 109 การนำเสนอผลลัพธ์แสดงเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ แผนภูมิเรดาร์ (ในภาพที่ 112(ก)) แผนภาพของจุดสมรรถนะ (ภาพที่ 112(ข) และภาพที่ 112(ค)) และแผนที่สมรรถนะเชิงพื้นที่ (ภาพที่ 113) โดยแผนภูมิเรดาร์แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะเป็นสัดส่วนโดยหากเส้นกราฟชี้เข้าหาโซนใดแสดงว่าสมรรถนะมีค่าอยู่ในโซนนั้น ส่วนแผนภาพจุดสมรรถนะแสดงขอบเขตการกระจายตัวของสมรรถนะระบบชลประทานว่าจุดใดอยู่สูงหรืออยู่ต่ำกว่าระดับเป้าหมายหรือระดับวิกฤติของตัวชี้วัด ส่วนรูปแบบที่สามเป็นแผนที่สมรรถนะเชิงพื้นที่ โดยใช้แสดงสมรรถนะระบบชลประทานในแต่ละแปลงเพาะปลูก

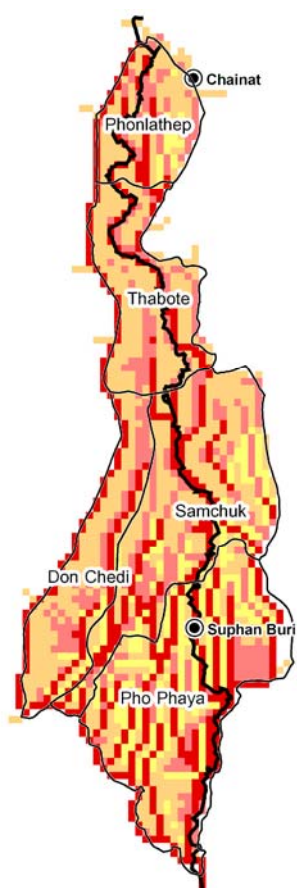


(ก) กรณีน้ำต้นทุนจำกัด

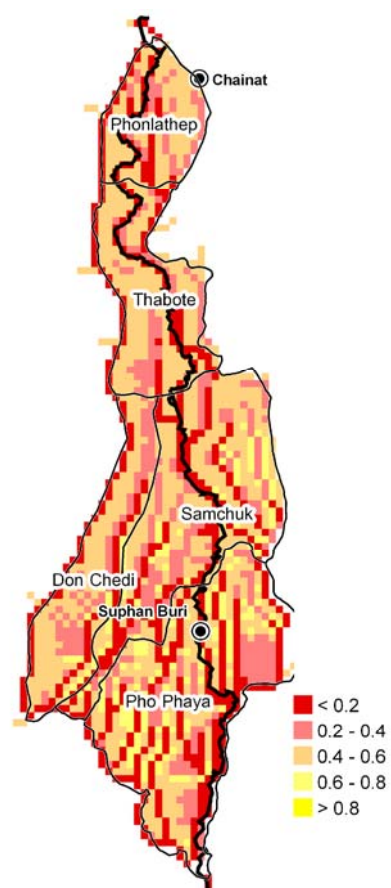


(ข) กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

ภาพที่ 110 การใช้น้ำของพืชสัมพัทธ์



(ก) กรณีน้ำต้นทุนจำกัด



(ข) กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

ภาพที่ 111 อัตราส่วนการใช้น้ำของข้าวกับปริมาณน้ำต้นทุนทั้งหมด

ในภาพที่ 112 แสดงแผนภูมิเรดาร์เปรียบเทียบสัดส่วนของสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานตลอดระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45) ในกรณีน้ำต้นทุนจำกัด (เส้นดำบาง) และน้ำต้นทุนไม่จำกัด (เส้นดำหนา) จากภาพสังเกตได้ว่า สมรรถนะโดยรวมทั้งสองกรณีศึกษาเป็นโซน “A” และโซน “B” โดยโซน “A” มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 25 ส่วนโซน “B” ประมาณร้อยละ 20 การจำลองกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัดค่าสมรรถนะของระบบมีแนวโน้มเข้าสู่โซน “AD” มากขึ้น

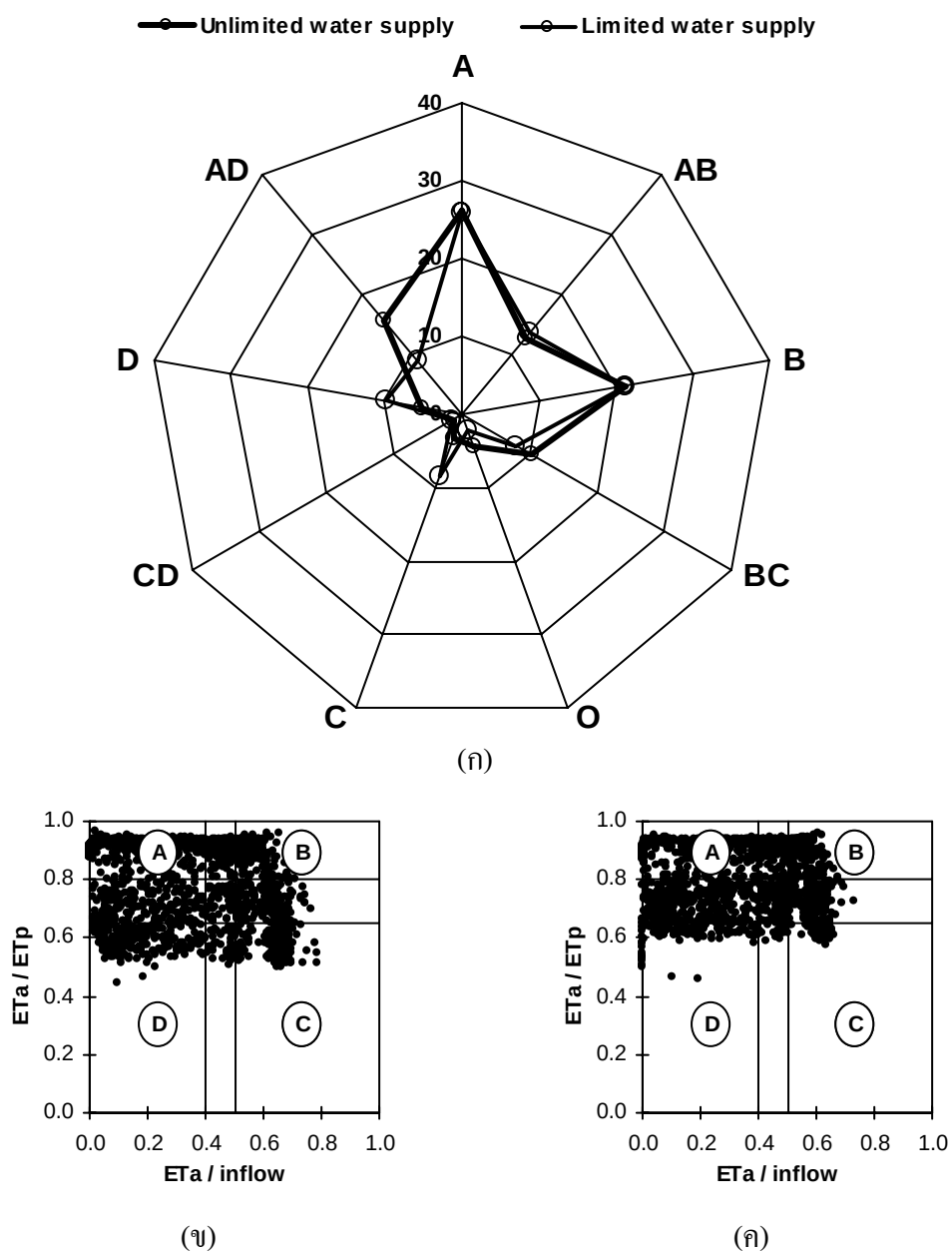
และหากพิจารณาคำแหน่งของจุดสมรรถนะในภาพที่ 112(ก) และภาพที่ 112(ข) สังเกตได้ว่าจุดสมรรถนะโดยรวมทั้งสองกรณีกระจายตัวอยู่เหนือระดับวิกฤติ (0.65) ของตัวชี้วัดการใช้น้ำของพืชสัมพัทธ์ (ETa/ETc) (แกนตั้ง) ซึ่งต่างตัวชี้วัด $ETa/Inflow$ (แกนนอน) โดยจุดสมรรถนะส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ต่ำกว่าระดับวิกฤติ (0.40)

เมื่อพิจารณาแผนที่สมรรถนะในลักษณะเชิงพื้นที่ (ในภาพที่ 113 และภาพที่ 114) สามารถทำการระบุค่าสมรรถนะลงไปในแต่ละแปลงเพาะปลูก โดยสังเกตเห็นว่า พื้นที่เพาะปลูกทางตอนบนส่วนใหญ่มีค่าสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานอยู่ในโซน “B” โซน “A” และ โซน “AB” ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ทางตอนล่างมีการกระจายตัวหลายกลุ่ม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโซน “AD” โซน “C” โซน “D” ตามลำดับ

หากพิจารณาสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานเป็นรายฤดูกาล กรณีน้ำต้นทุนจำกัด ในช่วงฝน (ก.ค.-ธ.ค.) ปี 2000 (ภาพที่ 115(ก)) ปี 2001 (ในภาพที่ 115(ข)) และปี 2002 (ในภาพที่ 115(ค)) ส่วนสมรรถนะในช่วงแล้ง (ม.ค.-มิ.ย.) ปี 2001 (ภาพที่ 116 (ก)) และ ปี 2002 (ภาพที่ 116 (ข)) จากภาพแสดงให้เห็นว่า ค่าสมรรถนะในช่วงฝนส่วนใหญ่เป็นโซน “B” และ โซน “A” ส่วนในช่วงแล้งค่าสมรรถนะเริ่มต่ำลงโดยส่วนใหญ่กระจายตัวในโซน “C” โซน “CD” และโซน “D” ตามลำดับ โดยเฉพาะพื้นที่เพาะปลูกทางตอนล่างของพื้นที่ศึกษา

เมื่อพิจารณาสมรรถนะในลักษณะเดียวกันกับกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด (ในภาพที่ 117 และภาพที่ 118) สังเกตเห็นว่าสมรรถนะกระจายตัวไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีแรก ฉะนั้น อาจกล่าวได้ว่า สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานโดยรวมทั้งสองกรณี ช่วงฝนเป็นโซน “B” และ โซน “A” มากกว่า ส่วนช่วงแล้งส่วนใหญ่เป็นโซน “C” โซน “CD” และโซน “D” ตามลำดับ

จากการประยุกต์แบบจำลองจีเรสในการประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน อาจสรุปได้ว่า ตอนบนของพื้นที่ศึกษาค่าสมรรถนะของระบบชลประทานส่วนใหญ่อยู่ในโซนที่ต้องการสำหรับการจัดการน้ำ (โซน “B”) และโซนเกษตรกรพืชพอใจ (โซน “A”) ส่วนพื้นที่ทางตอนล่างมีค่าสมรรถนะส่วนใหญ่อยู่ในโซนที่ได้รับผลกระทบจากการขาดน้ำ (โซน “C”) และโซนเสี่ยงต่อความเสียหาย (โซน “D”)



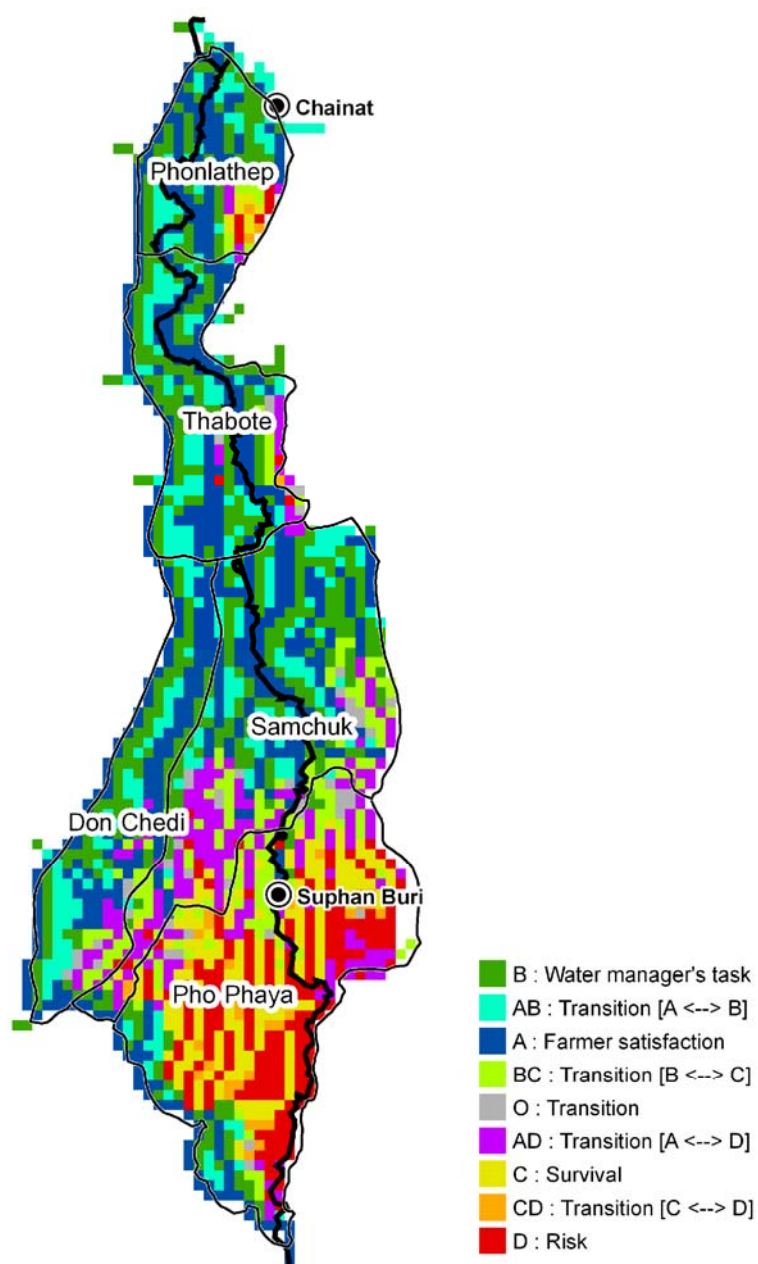
ภาพที่ 112 การเปรียบเทียบสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานกรณีน้ำต้นทุนจำกัด และกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

หมายเหตุ สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานตลอดระยะเวลาการจำลอง (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45)

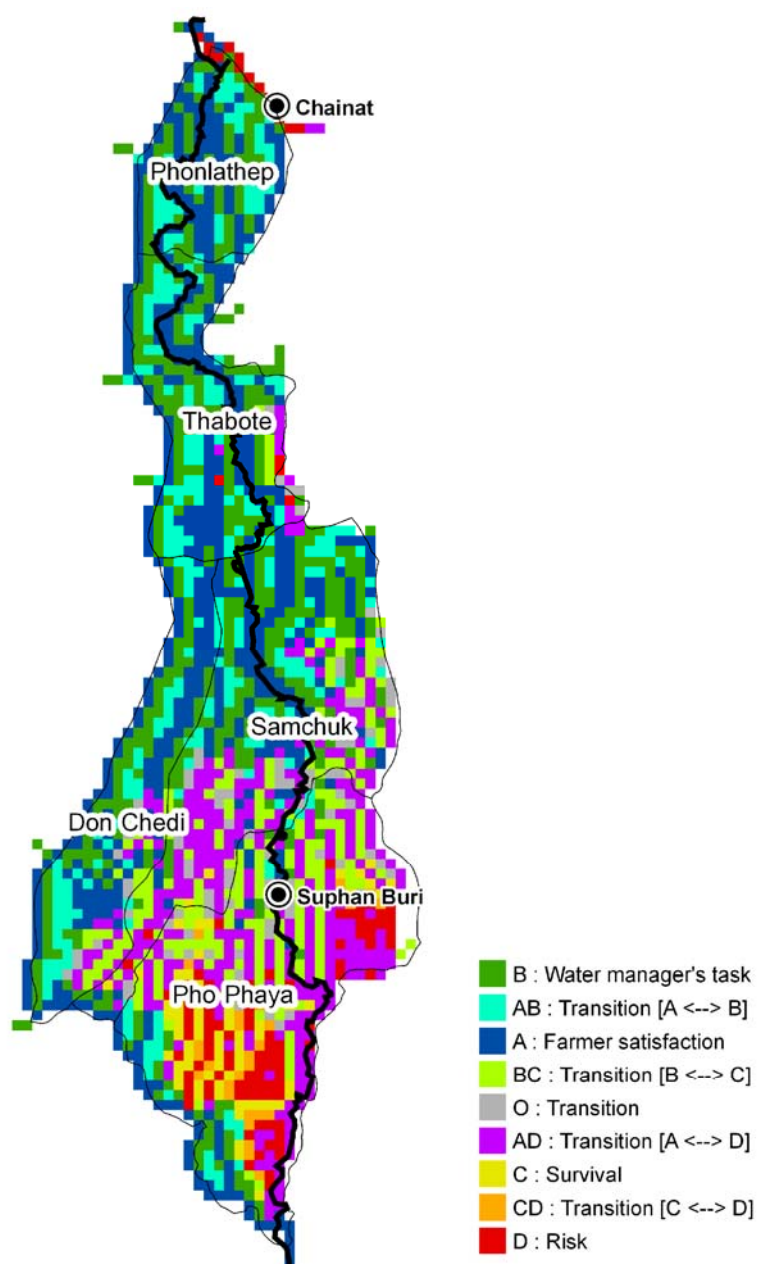
(ก) แผนภูมิเรดาร์เปรียบเทียบโซนสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน

(ข) การกระจายตัวในโซนสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน กรณีน้ำต้นทุนจำกัด

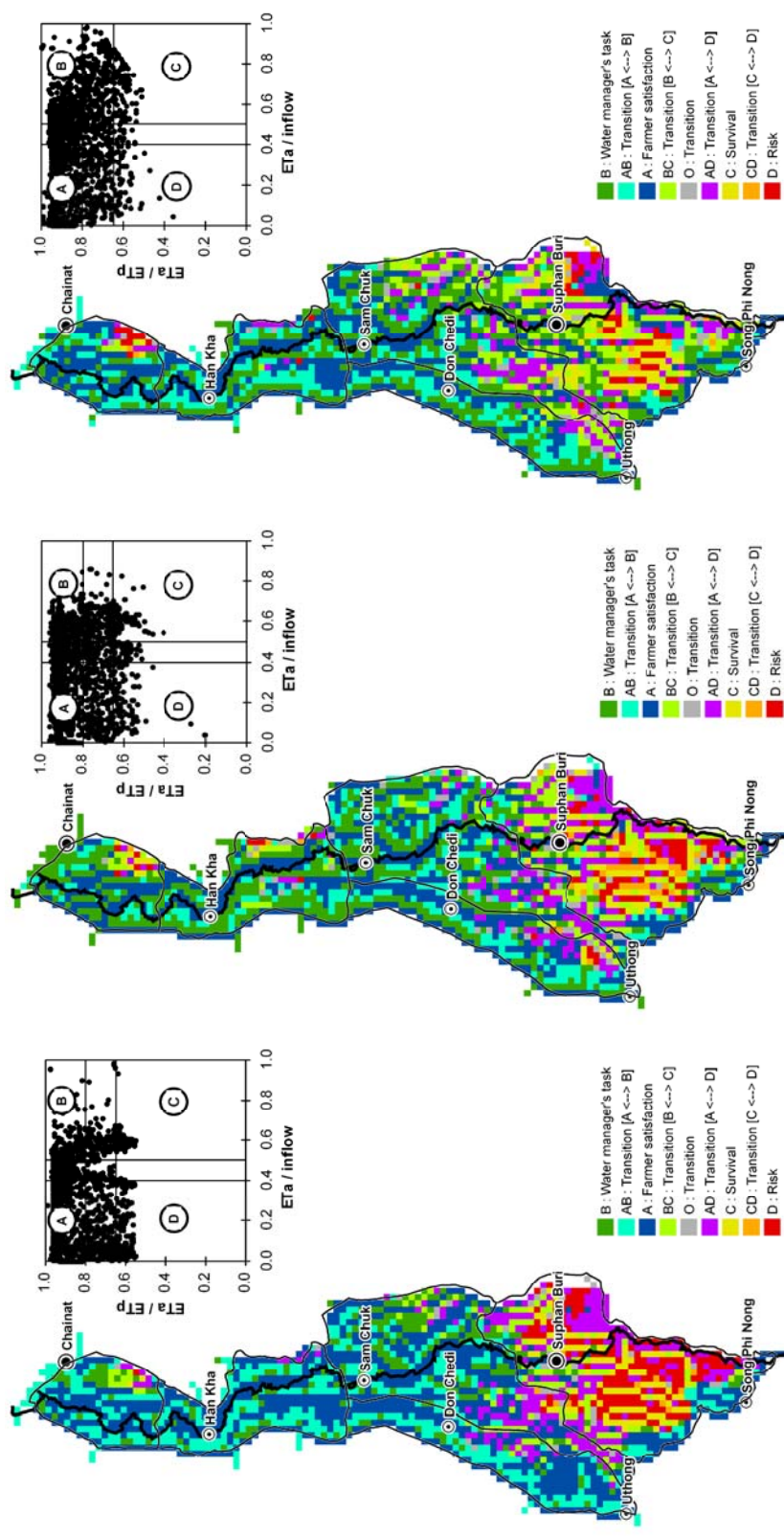
(ค) การกระจายตัวในโซนสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด



ภาพที่ 113 สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานกรณีน้ำต้นทุนจำกัด



ภาพที่ 114 สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

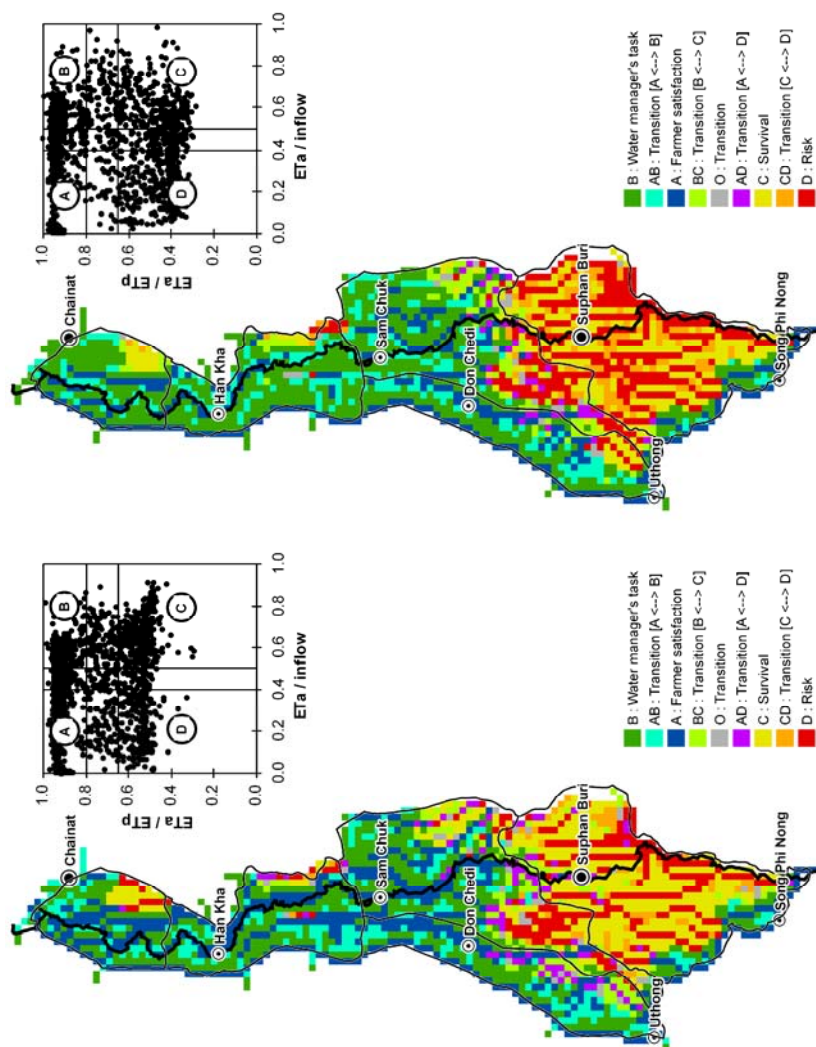


(ก) ช่วงฝน ปี 2000

(ข) ช่วงฝน ปี 2001

(ค) ช่วงฝน ปี 2002

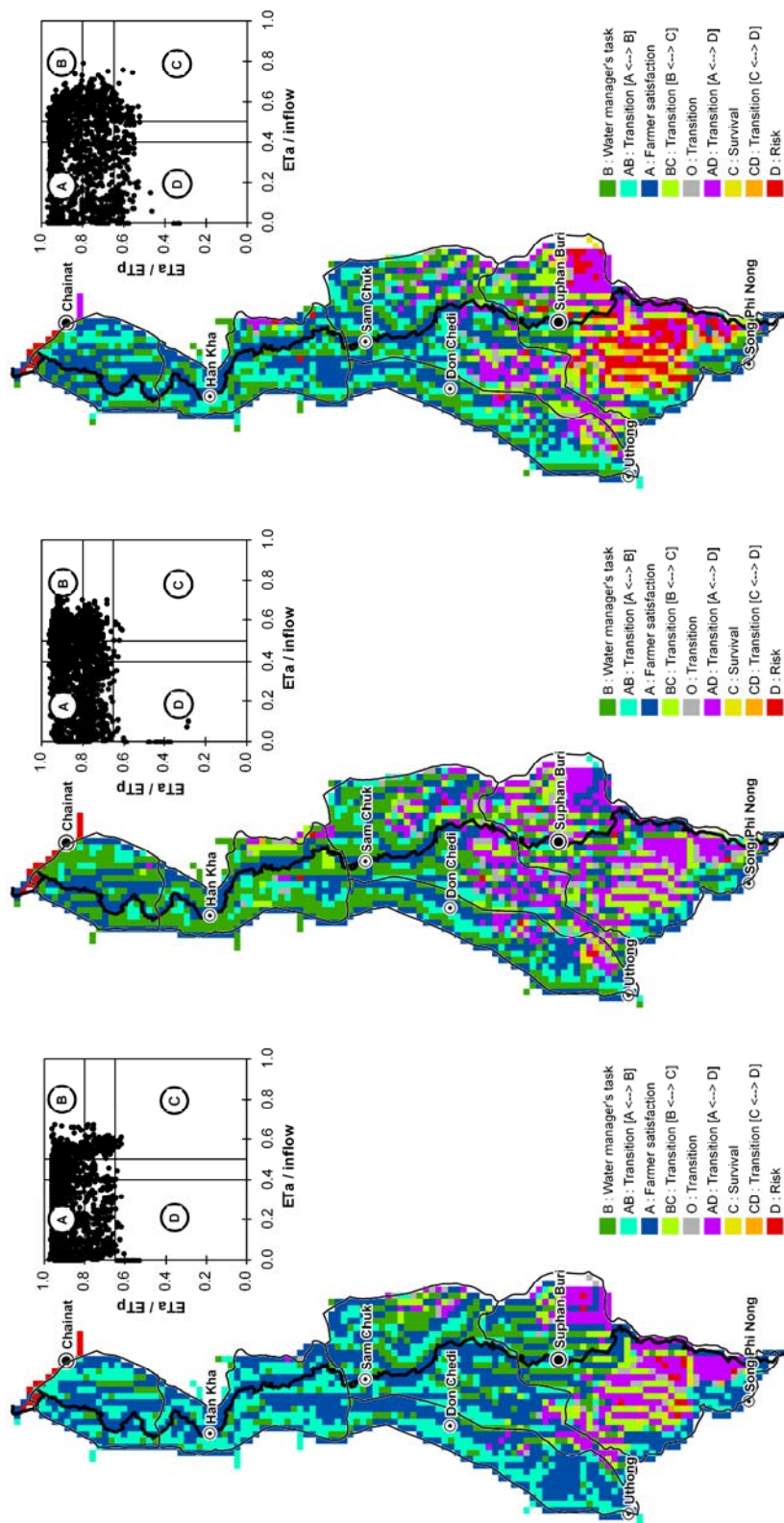
ภาพที่ 115 สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานในช่วงฝน กรณีน้ำต้นทุนจำกัด



(ก) ช่วงแล้ง ปี 2001

(ข) ช่วงแล้ง ปี 2002

ภาพที่ 116 สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานในช่วงแล้ง กรณีที่ต้นทุนจำกัด

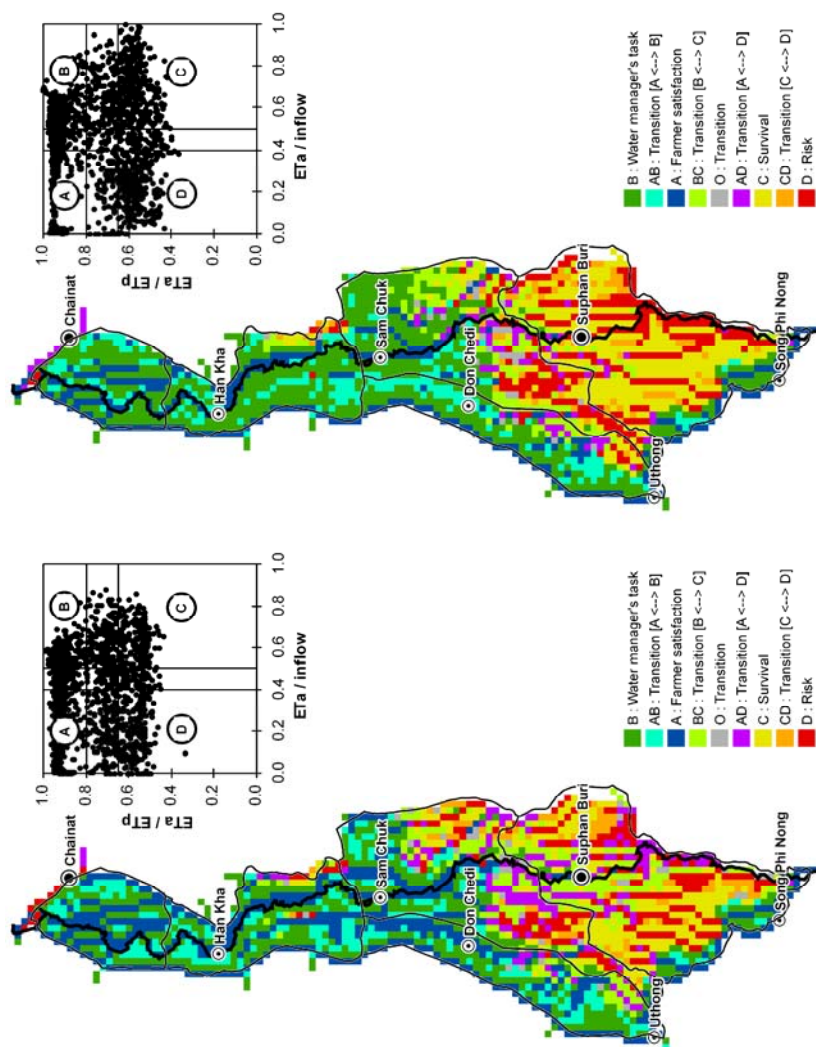


(ก) ช่วงฝน ปี 2000

(ข) ช่วงฝน ปี 2001

(ค) ช่วงฝน ปี 2002

ภาพที่ 117 สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานในช่วงฝน ฤๅษี น้ำต้นทุนไม่จำกัด



(ก) ช่วงแล้ง ปี 2001

(ข) ช่วงแล้ง ปี 2002

ภาพที่ 118 สมรรถนะการจัดการน้ำชลประทานในช่วงแล้ง กรณีที่ต้นทุนไม่จำกัด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยเรื่อง การจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นาโดยแนวทางเชิงออบเจกต์ร่วมกับเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาเครื่องมือสำหรับจำลองการใช้น้ำชลประทานในนาข้าวโดยพิจารณาปัจจัยทั้งด้านกายภาพ-ชีวภาพ และพฤติกรรมการใช้น้ำของเกษตรกร การพัฒนาแบบจำลองใช้แนวทางเชิงออบเจกต์ร่วมกับเทคนิคการจำลองแบบเอเจนต์ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นผ่านการทดสอบการทำงานและประยุกต์สำหรับการประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน การดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. แบบจำลองจิเรสต์

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีชื่อว่า “จิเรสต์ (jIrAIs)” ย่อจาก Java, Irrigation, Artificial Intelligences พัฒนาโดยใช้แนวทางเชิงออบเจกต์ด้วยภาษาจาวา (java) ร่วมกับเทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ แบบจำลองจิเรสต์เป็นแบบจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในพื้นที่เกษตรกรรม มีเป้าหมายที่จะประยุกต์สำหรับงานด้านบริหารจัดการน้ำชลประทาน แบบจำลองมีองค์ประกอบย่อย 4 ส่วน คือ

(1) กระบวนการไหลของน้ำบนผิวดินแบบ 2 มิติ ซึ่งคำนวณด้วยสมการ diffusion wave และหาคำตอบของสมการโดยระเบียบวิธี finite volume

(2) กระบวนการไหลของน้ำในดินแบบ 1 มิติแนวดิ่ง คำนวณด้วยสมการของริชาร์ด (Richards's equation) และหาคำตอบของสมการโดยระเบียบวิธี finite difference

(3) องค์ประกอบของระบบการควบคุมอาคารบังคับน้ำชลประทาน ใช้กฎการควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy rule-based control)

(4) องค์ประกอบของการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูก โดยจำลองด้วยเทคนิคเอเจนต์ (agent-based modeling)

2. การตรวจสอบแบบจำลอง

แบบจำลองจีเรสส์ ถูกตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ 2 ส่วน คือ กระบวนการไหลของน้ำบนผิวดิน และการไหลของน้ำในดิน ผลการตรวจสอบสรุปได้ดังนี้

(1) การตรวจสอบกระบวนการไหลของน้ำบนผิวดิน โดยการจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ ในพื้นที่ตอนบนของกลุ่มน้ำกระเสียว ผลลัพธ์เปรียบเทียบกับแบบจำลอง GSSHA โดยพิจารณากราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำ ผลการตรวจสอบสรุปได้ว่า กราฟน้ำท่าของทั้งสองแบบจำลองมีลักษณะใกล้เคียงกัน ทั้งรูปร่าง ระยะเวลาที่เกิด และอัตราการไหลสูงสุด

แบบจำลองจีเรสส์ ได้ถูกนำไปประเมินขนาดกริดและช่วงเวลา โดยการจำลองการไหลของน้ำผิวดินบนดินกับกริดสามขนาด คือ 250, 500 และ 1,000 เมตร และช่วงเวลา 5 ชั้น ได้แก่ 15, 30, 60, 90 และ 120 วินาที ผลการประเมินพบว่า การแทนพื้นผิวดินการไหลของน้ำด้วยกริดขนาดเดียวกันแต่ใช้ช่วงเวลาจำลองต่างกันผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน การแทนพื้นผิวดินด้วยกริดขนาดเล็กและใช้ช่วงเวลาห่าง ผลลัพธ์แบบจำลองชี้ว่าการคำนวณมีแนวโน้มล้มเหลวได้ง่าย

(2) การตรวจสอบกระบวนการไหลของน้ำในผิวดินกับแบบจำลอง SWAP โดยจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดิน 2 กรณี คือ กรณีดินเปล่า (bare soil) และกรณีปลูกหญ้า (grass cover surface) กับชุดดินนครปฐมและชุดดินสระบุรี ผลการตรวจสอบสรุปว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์การระเหยจากดินและการคายน้ำอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินมีแนวโน้มสอดคล้องกันทั้งในกรณีดินเปล่าและปลูกหญ้า

3. การศึกษาอิทธิพลการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง

การศึกษาอิทธิพลการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง ทำโดยจำลองการไหลของน้ำในดิน ที่กำหนดขนาดของชั้นดินต่างกัน 7 รูปแบบ ผลการศึกษาสรุปว่า การกำหนดขนาดความหนาชั้นดินเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อผลลัพธ์แบบจำลอง โดยการกำหนดช่วงชั้นดินบนให้ละเอียด แบบจำลองมีแนวโน้มให้ค่าการระเหยจากดินสูงกว่าการกำหนดหน้าตัดแบบหยาบ และถ้าหากกำหนดช่วงชั้นดินล่างให้ละเอียด แบบจำลองมีให้ค่าการซึมลึกลงดินต่ำกว่าการกำหนดหน้าตัดแบบหยาบ

4. การจำลองระบบย่อย

การจำลองระบบย่อย เป็นการทดสอบการทำงานร่วมกันของทุกองค์ประกอบแบบจำลอง การจำลองทำโดยจำลองระบบการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำและในแปลงเพาะปลูกระยะเวลา 2 ปี 6 เดือน (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45) สถานการณ์ที่ใช้สำหรับการจำลองระบบย่อยมี 2 กรณี คือ การจำลองโดยการส่งน้ำตลอดปี และการจำลองการส่งน้ำตามฤดูกาล ผลลัพธ์สรุปดังนี้

(1) การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในระบบส่งน้ำ โดยการควบคุมอาคารบังคับน้ำด้วยกฎแบบฟิชชี สรุปได้ว่า แบบจำลองสามารถควบคุมน้ำในคลองชลประทานได้สอดคล้องกับแผนการส่งน้ำ และสามารถควบคุมการปล่อยน้ำให้ไหลผ่านอาคารได้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่เกษตรกรทำกิจกรรมการปลูกข้าว

(2) การจำลองการจัดการน้ำชลประทานในแปลงเพาะปลูกโดยใช้เทคนิคการจำลองเอเจนต์ สรุปได้ว่า แบบจำลองจิเรส์สามารถจำลองเกษตรกรให้เป็นเอเจนต์ที่มีความสามารถในการดำเนินกิจกรรมการเพาะปลูกได้ คือ การตัดสินใจปลูกข้าว การเตรียมแปลง การหาแหล่งน้ำ การใช้น้ำ การระบายน้ำ และการเก็บเกี่ยวผลผลิต เกษตรกรทำการตัดสินใจทำกิจกรรมโดยการรับรู้ข้อมูลแปลงตนเองและแปลงรอบข้าง โดยนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้ในการตัดสินใจตามความต้องการของตนเอง

การจำลองในขั้นนี้ชี้ให้เห็นว่า ตำแหน่งที่ตั้งแปลงเพาะปลูกมีผลทำให้การดำเนินกิจกรรมการเพาะปลูกของเกษตรกรต่างกัน ถึงแม้จะกำหนดปัจจัยนำเข้าอื่นเหมือนกัน โดยพบว่าเกษตรกรที่มีแปลงเพาะปลูกติดคลองและตั้งอยู่ต้นคลองสามารถทำการปลูกข้าวได้จำนวนครั้งมากกว่าเกษตรกรที่อยู่ท้ายคลอง และแปลงที่อยู่ต้นคลองสามารถดึงน้ำชลประทานจากคลองส่งน้ำเข้าแปลงของตนเองได้เร็วกว่าแปลงที่ตั้งอยู่ท้ายคลองและห่างออกไป

4. การประยุกต์แบบจำลอง

ผลการประยุกต์แบบจิเรส์ สำหรับการประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน โดยจำลองการใช้น้ำชลประทานเป็นรายวันระยะเวลา 2 ปี 6 เดือน (ก.ค.43 ถึง ธ.ค.45) การจำลองแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีน้ำต้นทุนจำกัด และกรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด ผลการประเมินการจัดการน้ำสามารถสรุปเป็นสองพื้นที่ได้แก่ พื้นที่ตอนบนและพื้นที่ตอนล่างของโครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน

(1) พื้นที่ตอนบน

พบว่า สามารถปลูกข้าวได้มากกว่า 2 ครั้งต่อปี และมีการใช้น้ำชลประทานโดยรวมและต่อฤดูเพาะปลูกสูงกว่าพื้นที่ตอนล่าง ผลการประเมินสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน พบว่า ข้าวได้รับน้ำเพียงพอต่อความต้องการ และปริมาณน้ำชลประทานที่ส่งใกล้เคียงกับความต้องการ

(2) พื้นที่ตอนล่าง

พบว่า สามารถปลูกข้าวไม่เกิน 2 ครั้งต่อปี และการใช้น้ำชลประทานมีสัดส่วนน้อยกว่าพื้นที่ทางตอนบน การประเมินสมรรถนะการจัดการน้ำชลประทาน สรุปได้ว่า พื้นที่ตอนล่างเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อความเสียหายจากการขาดน้ำ และบางพื้นที่ได้รับน้ำเกินความต้องการ

ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และสามารถนำงานวิจัยไปประยุกต์สำหรับการแก้ปัญหาด้านชลประทานและทรัพยากรน้ำ มีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยต่อดังนี้

1. การจำลองเอเจนต์

การเพิ่มความสามารถจากการจำลองแบบเอเจนต์ (Agent-Based Modeling) ไปสู่การจำลองแบบมัลติเอเจนต์ (Multi-Agent Modeling) แนวทางที่เป็นไปได้ อาจทำได้โดยการเพิ่มความสามารถในการติดต่อสื่อสาร (communication) แลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเอเจนต์ หากสามารถพัฒนาระบบการสื่อสารระหว่างกันได้ ซึ่งอาจเป็นการสื่อสารในลักษณะสอดคล้องกันหรือขัดแย้งกัน จะทำให้แบบจำลองสามารถจำลองระบบที่มีความซับซ้อนได้ อาทิ การสื่อสารระหว่างเกษตรกรกับเจ้าหน้าที่ชลประทาน หรืออาจเป็นการสื่อสารระหว่างเกษตรกรด้วยกันเอง

2. กระบวนการคำนวณ

(1) การหาแนวทางหรือขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น สำหรับจำลองการไหลของน้ำในคลองที่มีอิทธิพลน้ำท่วมเนื่องจากการปิดเปิดบานประตูระบายน้ำ โดยเพิ่มกระบวนการคำนวณทิศทางการไหลของน้ำให้สามารถปรับเปลี่ยนแนวการไหลให้สอดคล้องกับสภาพของน้ำท่วม

(2) การหาขั้นตอนวิธีที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพการคำนวณการไหลของน้ำในดิน ในช่วงการเปลี่ยนสถานะของการไหลระหว่างสถานะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated soil) กับสถานะดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated soil) ซึ่งเป็นสภาพของดินในเขตพื้นที่ชลประทาน

3. การประยุกต์แบบจำลองจิเรศ มีข้อควรพิจารณาดังนี้

(1) เพื่อให้ผลลัพธ์การประเมินการจัดการน้ำในโครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบนถูกต้องมากยิ่งขึ้น ควรเพิ่มรายละเอียดการสำรวจพื้นที่เพื่อเปรียบเทียบกับข้อเท็จจริงในสนามมากยิ่งขึ้น

(2) การกำหนดขนาดกริดและชั้นเวลา มีข้อควรระวัง ในเรื่องความสมจริงของปัญหา เสถียรภาพและเวลาในการคำนวณ การกำหนดขนาดกริดให้เล็กอาจสามารถแทนความสมจริงของพื้นที่ได้แต่อาจทำให้เวลาในการคำนวณยาวนานขึ้น แต่ถ้าหากกำหนดขนาดของกริดหยابเกินไป เวลาในการคำนวณอาจเร็วขึ้น แต่เสถียรภาพการคำนวณและความสมจริงของพื้นที่อาจไม่เหมาะสม

(3) แบบจำลองจีเรสถูกพัฒนาขึ้นสำหรับจำลองการใช้น้ำชลประทานในพื้นที่นา การนำแบบจำลองไปประยุกต์สำหรับพื้นที่เกษตรกรรมอื่นที่ไม่ได้เพาะปลูกข้าว ควรมีการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสม

4. ข้อเสนอแนะด้านอื่น

(1) การหาแนวทางการเพิ่มความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลของแบบจำลอง ให้รองรับผลการจำลองที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้ หากเลือกการบันทึกผลลัพธ์ผ่านฐานข้อมูลแบบแอคเซส (รูปแบบไฟล์ MDB) ไม่สามารถสร้างผลลัพธ์การจำลองมากกว่าสองจีเกไบต์

(2) ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (graphic user interface หรือ GUI) อาจเพิ่มรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองในส่วนของการติดต่อกับผู้ใช้ ให้มีความสะดวกและดึงดูดการใช้งานมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จตุรพิช สมหอม และ พิชชานันท์ พิงคประเสริฐ. 2548. แนวคิดเชิงวัตถุ (Object-oriented concept). สมาคมเวชสารสนเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ชาญณรงค์ ตั้งคณาทรัพย์. 2551. การวิเคราะห์ผลผลิตของน้ำสำหรับการปลูกข้าวในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาใหญ่ตอนบนโดยใช้แบบจำลองพยากรณ์ผลผลิตพืชและเทคนิคการสำรวจระยะไกล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชูพันธุ์ ชมภูจันทร์. 2547. วิธีการสำรวจระยะไกลสำหรับประเมินการใช้น้ำของข้าว: กรณีศึกษาโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2548. การศึกษาปฏิทินเพาะปลูกข้าวช่วงฤดูแล้งด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม NOAA/AVHRR, น. 30-37. ใน รายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ไชยวัฒน์ เจริญจิระตระกูล. 2548. การวิเคราะห์ปัญหาน้ำในโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2548ก. การวิเคราะห์ปัญหาน้ำของโครงการชลประทานพลเทพ, น. 22-29. ใน รายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____ และ _____. 2548ข. การวิเคราะห์ปัญหาน้ำในโครงการชลประทานเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ณัฐพล เกิดสุข. 2551. การศึกษาสภาพน้ำท่วมขังในพื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีนโดยการวิเคราะห์ด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการใช้แบบจำลองลุ่มน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2550ก. การศึกษาสภาพน้ำท่วมขังในพื้นที่ลุ่มน้ำท่าจีนโดยใช้ NDWI จากข้อมูลดาวเทียม MODIS. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

_____ และ _____. 2550ข. การจัดการน้ำท่วมขังในทุ่งสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรีโดยการสำรวจระยะไกลร่วมกับแบบจำลอง. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2545. การจำลองสถานะน้ำท่วม. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ปกรณ์ อึ้งชัยพงษ์. 2550. การติดตามพลวัตของความต้องการน้ำชลประทานในพื้นที่โครงการแม่กลองใหญ่โดยใช้ข้อมูล MODIS และแบบจำลอง WEAP. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2550. การติดตามการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและความต้องการน้ำในพื้นที่ชลประทานแม่กลองใหญ่ด้วยข้อมูลดาวเทียม MODIS หลายช่วงเวลา. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

พงศธร โสภำพันธุ์. 2548. การพัฒนาชุดเรียนรู้เรื่องการจัดการน้ำสำหรับเยาวชน. วิศวกรรมสาร มก. 57: 145-158.

พงศธร โสภานันท์, สมชาย ดอนเจดีย์, เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย และ ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์.

2548. การพัฒนาชุดเรียนรู้เรื่องการจัดการน้ำสำหรับเยาวชน, บทความในหัวข้อ น้ำเพื่อการเกษตร. ใน การประชุมรื่องน้ำของประเทศไทย ครั้งที่ 1, ศูนย์ประชุมสหประชาชาติ, กรุงเทพฯ.

ภาณุวัฒน์ ปิ่นทอง. 2546. การใช้เกณฑ์แบบฟิชชีในการจัดการอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาสกร ภูพันธ์ศรี. 2550. การประเมินการจัดการระบบอ่างเก็บน้ำของกลุ่มน้ำแม่กลองโดยวิธี DEA.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2550. การประเมินการจัดการระบบอ่างเก็บน้ำของกลุ่มน้ำแม่กลองโดยวิธี DEA. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

เมธี เอกะสิงห์. 2548. การจำลองและวิเคราะห์สถานการณ์ในระบบสนับสนุนการตัดสินใจทาง การเกษตร, น. 369-388. ใน เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการระบบเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 3, โรงแรมโลตัสปางสวนแก้ว, เชียงใหม่.

ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์. 2545. การพัฒนาแบบจำลองความต้องการน้ำชลประทานโดยใช้ฟิชชีลอจิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2546ก. การพัฒนาแบบจำลองความต้องการน้ำชลประทาน ใช้ฟิชชีลอจิก. น 560-567. ใน เรื่องเติมการประชุมวิชาการประจำปี 2546 สมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย เรื่อง วิศวกรรมเกษตรและเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อ สิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ยุทธนา พันธุ์มลศิลป์ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2546ข. การหาปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยใช้พืชซีลอจิก. น. 89-96. ใน เรื่องเติมการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____และ_____. 2547. การพัฒนาแบบจำลองความต้องการน้ำชลประทานใช้พืชซีลอจิก. น. WRE7-WRE12. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

_____และ_____. 2550. การจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติในพื้นที่ลาดชัน ด้วยระเบียบวิธี Finite Volume, น. 221-227. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

_____และ_____. 2551. แบบจำลองเชิงอ้อมเจกต์สำหรับการไหลของน้ำในดิน "jIrAIs-SW". วิทยาสารกำแพงแสน 6(1): 44-56.

วีระศักดิ์ ชิงदार. 2545. **Java Programming Volume I**. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

สถิระ อุดมศรี, ขนิษฐศรี อุ้นตระกูล และ สุมิตรา วัฒนา. 2547. การกำหนดลักษณะของชุดดินที่จัดตั้งในภาคกลางของประเทศไทยจำแนกใหม่ตามระบบอนุกรมวิธานดิน 2546. กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.

สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2549. **สมุดสถิติรายปีประเทศไทย พ.ศ.2549**. สำนักสถิติพยากรณ์, กรุงเทพฯ.

สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์. 2535. **ชลศาสตร์ในระบบดิน-พืช**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน, นครปฐม.

- เอกสิทธิ์ โสติดสกุลชัย. 2547. **อุทกวิทยา**, เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- _____. 2551. **วิศวกรรมชลประทานเบื้องต้น**, เอกสารคำสอน, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- _____และคณะ. 2550ก. **การวินิจฉัยการจัดการน้ำในลุ่มน้ำแม่ท่าจีน**. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- _____และคณะ. 2550ข. **โครงการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำในการเพาะปลูก เรื่องแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชสำหรับการประเมินผลผลิตและการใช้น้ำของพืชในเขตชลประทาน**. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์. โครงการความร่วมมือระหว่างกรมชลประทานกับมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Abbott, M.B. 1999. Introducing hydroinformatics. **Journal of Hydroinformatics**, 1: 3-20.
- _____, A.E. Mynett and J. P. O'Kane. 2005. Hydroinformatics and its contributions to hydrology: From computation to communication, Volume 1, pp 223-238. *In*: M.G. Anderson and J.J. McDonnell, eds. **Encyclopedia of hydrological sciences**. John Wiley & Sons, West Sussex, England.
- _____, J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell and J. Rasmussen. 1986a. An introduction to the European Hydrological System — Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrology** 87: 45-59.
- Acutis, M. and M. Donatelli. 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. **European Journal of Agronomy** 18: 373-377.

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. **Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements**, FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Athanasiadis, I.N., A.K. Mentis, P.A. Mitkas and Y.A. Mylopoulos. 2005. A Hybrid agent-based model for estimating residential water demand. **Simulation** 81: 175-187.
- Bahat, M., Inbar, G., Yaniv, O. and Schneidar, M. 2000. A fuzzy irrigation controller system. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. 13: 137-145.
- Bandara, K.M.P.S. 2006. **Assessing Irrigation Performance by Using Remote Sensing**. Ph.D. Thesis, Wageningen University, The Netherlands.
- Barnaud, C., F. Bousquet and G. Trebil. 2008. Multi-agent simulations to explore rules for rural credit in a highland farming community of Northern Thailand. **Ecological Economics** 66: 615-627.
- Barreteau, O. 2003. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of associations. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation** 6(2): <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/6/2/3.html>.
- _____, C. Le Page and P.D. Aquino. 2003. Role-playing games, Model and Negotiation processes. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation** 6(2): <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/6/2/10.html>.
- _____, F. Bousquet, C. Millier and J. Weber. 2004. Suitability of Multi-Agent Simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley. **Agricultural Systems** 80(3): 255-275.

- Batty, M., Y. Xie and Z. Sun. 1999. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. **Computers, Environment and Urban Systems** 23: 205-233.
- Becu, N., P. Perez, A. Walker, O. Barreteau and C.L. Page. 2003. Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand: Description of the CATCHSCAPE model. **Ecological Modelling** 170(2-3): 319-331.
- Berger, T. 2001. Agent-based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. **Agricultural Economics** 25: 245-260.
- Beven, K.J. 2005. Rainfall-runoff modeling : Introduction, pp. 1857-1868. *In* M.G. Anderson and J.J. McDonnell, eds. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. John Wiley & Sons, West Sussex, England.
- _____ and M.J. Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin** 24(1): 43-69.
- Boote, K.J., J.W. Jones and G. Hoogenboom. 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model, pp 651-692. *In* R.M. Peart and R.B. Curry, eds. **Agricultural Systems Modeling and Simulation**. Maecel Dekker, New York.
- Bouillot, A.P. 1994. **Application of the Fuzzy Set Theory to the Control of the Large Canal**. ASCE-AFEID Meeting. Aix-en-Provence, France.
- Bouman, B.A.M., M.J. Kropff, T.P. Tuong, M.C.S. Wopereis, H.F.M. ten Berge and H.H. van Laar. 2001. **ORYZA2000: Modeling Lowland Rice**. International Rice Research Institute (IRRI), Los Banos, Philippines.

- Bousquet, F. and C. Le Page. 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. **Ecological Modelling** 176: 313-332.
- _____, I. Bakam, H. Proton and C. Le Page. 1998. Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems, Tasks and Methods, pp. 826-837. *In* **Applied Artificial Intelligence** 1416. n.p.
- Bradbrook, K.F., S.N. Lane, S.G. Waller and P.D. Bates. 2004. Two dimension diffusion wave modeling of flood inundation using a simplified channel representation. **International Journal of River Basin Management** 2(3): 211-223.
- Bradford, S.F. and N. Katopodes. 2001. Finite volume model for non level basin irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 127(4): 216-223.
- Brassel, K.H. 2001. Flexible Modelling with VSEit, the Versatile Simulation Environment for the Internet. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation** 4(3): <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/3/10.html>.
- Buyalaki, C.P., D.G. Ehler, H.T. Falvey, D.C. Rogers and E.A. Serfozo. 1991. **Canal Systems automation manual, Volume1**. U.S.Bureau of Reclamation., Denver.
- Buyalaki, C.P., D.G. Ehler, H.T. Falvey, D.C. Rogers and E.A. Serfozo. 1995. **Canal Systems Automation Manual, Volume2**. U.S.Bureau of Reclamation., Denver.
- Casper, M., P. Gemmar, O. Gronz, M. Johst and M. Stüber. 2007. Fuzzy logic-based rainfall–runoff modelling using soil moisture measurements to represent system state. **Hydrological Sciences Journal** 52 (3): 478-490.

- Cazemier, D.R., Lagacherie, P. and Martin-Clouaire, R. 2001. A Possibility Theory Approach for Estimating Available Water Capacity from Imprecise Information Contained in Soil Databases. **Geoderma**. 103: 113–132.
- Celia, M.A., E.T. Bouloutas and R.L. Zarba. 1990. A General mass conservation numerical solution for the unsaturated flow equation. **Water Resources Research** 26: 1483-1496.
- Chaudhry, M.H. 1993. **Open-Channel Flow**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays. 1988. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill, New York, NY.
- Clemmens, A.J., T.F. Kacerek, B. Grawitz and W. Schuurmans. 1998. Test cases for canal control algorithm. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 124(1): 23-30.
- Coppola, E., B. Tomassetti, L. Mariotti, M. Verdecchia and G. Visconti. 2007. Cellular automata algorithms for drainage network extraction and rainfall data assimilation. **Hydrological Sciences Journal** 52(3): 579-592.
- Crooks, A.T. 2006. **Exploring Cites Using Agent-Based Models and GIS, Working Papers Series 109**. Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London, London.
- D'Ambrosio, D., S. Di Gregorio, S. Gabriele and R. Gaudio. 2001. A Cellular Automata model for soil erosion by water. Physics and Chemistry of the Earth, Part B. **Hydrology, Oceans and Atmosphere** 26: 33-39.

- Dare, W. and O. Barreteau. 2003. A role-playing game in irrigated system negotiation: between play and reality. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation** 6(3): <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/3/6.html>.
- De Wit, C.T., J. Goudriaan, H.H. van Laar Penning, F.W.T. de Vries, R. Rabbinge, H. van Keulen, L. Sibma and C. de Jonge. 1978. **Simulation of Assimilation, Respiration and Transpiration of Crops, Simulation Monographs**. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), Wageningen, The Netherlands.
- Downer, C.W. and F.L. Ogden. 2002. GSSHA User's Manual, Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis Version 1.43 for WMS 6.1, ERDC Technical Report. US Army Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- _____ and F.L. Ogden. 2004. GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes. **Journal of Hydrologic Engineering** 9(3): 161-174.
- Dragicevic, S. 2004. Coupling fuzzy sets theory and GIS-based cellular automata for land-use change modeling, pp. 203-207. *In Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society - NAFIPS 1*. USA.
- Ducrot, R., C. Le Page, P. Bommel and M. Kuper. 2004. Articulating land and water dynamics with urbanization: an attempt to model natural resources management at the urban edge. **Computers, Environment and Urban Systems** 28: 85-106.
- Durner, W. and H. Fluhler. 2005. Soil hydraulic properties, Volume 2, pp. 1103-1119. *In* M.G. Anderson and J.J. McDonnell, eds. **Encyclopedia of hydrological sciences**. John Wiley & Sons, West Sussex, England.

Engelbrecht, A.P. 2002. **Computational Intelligence: An Introduction**. John Wiley & Sons, West Sussex, England.

_____. 2005. **Fundamentals of Computation Swarm Intelligence**. John Wiley & Sons, West Sussex, England.

Espinasse, B. and N. Franchesquin. 2005. Multiagent modeling and simulation of hydraulic management of the camargue. **Simulation** 81: 201-221.

Falvey, H.T. 1990. Cavitation in Chutes and Spillways, Engineering Monograph No. 42. U.S.Bureau of Reclamation., Denver, Colo.

Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny. 1978. **Simulation of Field Water Use and Crop Yield, Simulation Monographs**. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), Wageningen, The Netherlands.

Feng, K. and F.J. Molz. 1997. A 2D, diffusion-based wetland flow model. **Journal of Hydrology**. 196: 230-250.

Ferber, J. 1999. **Multi-Agent Systems**. An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison-Wesley, Singapore.

Feuillette, S., F. Bousquet and P. Le Goulven. 2003. SINUSE: a multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table. **Environmental Modelling & Software** 18: 413-427.

Gardner, M. 1970. Mathematical game the fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". **Scientific American** 223: 120-123.

- Gomez, M., J. Rodellar and J.A. Mantecn. 2002. Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals. **Applied Mathematical Modelling** 26: 1039-1056.
- Gurung, T.R. 2004. **Use of Multi-Agent System to Improve Irrigation Water Sharing in Lingmuteychu Watershed, Bhutan.** M.S Thesis, Chiang Mai University.
- Hirsch, C. 1988. **Numerical Computation of Internal and External, Volume1: Fundamentals of Numerical Discretization.** John Wiley & Sons, Chichester.
- Hopmans, J.W. and G. Schoups. 2005. Soil water flow at different spatial scales, Volume 2, pp 999-1009. *In* M.G. Anderson and J.J. McDonnell, eds. **Encyclopedia of Hydrological Sciences.** John Wiley & Sons, West Sussex, England.
- Horritt, M.S., P.D. Bates and M.J. Mattinson. 2006. Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow. **Journal of Hydrology** 329: 306-314.
- Hromadka, T.V. and C.C.Yen. 1987. A Diffusion Hydrodynamic Model (DHM), pp. 87-4137. *In* **Water-Resources Investigation Report.** Water Resources Division, US Geological Survey (USGS), NSTL, Mississippi.
- Huang, K., B.P. Mohanty and M.T. van Genuchten. 1996. A new convergence criterion for the modified Picard iteration method to solve the variably saturated flow equation. **Journal of Hydrology** 178: 69-91.
- Itami, R.M. 1994. Simulating spatial dynamics: cellular automata theory. **Landscape and Urban Planning** 30(1-2): 27-47.

Jain, M.K. and V.P. Singh. 2003. **Water Resources Systems Planning and Management**. Elsevier, Amsterdam.

_____ and _____. 2005. DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation. **Journal of Hydrology** 302: 107-126.

_____, U.C. Kothiyari and K.G. Ranga Raju. 2004. A GIS based distributed rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology** 299: 107-135.

Jones, J.W., B.A. Keating and C.H. Porter. 2001. Approaches to modular model development. **Agricultural Systems** 70: 421-443.

Jones, J.W., G. Hoogenboom., C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman and J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy** 18: 235-265.

Jurriens, M. and K.J.Lenselink. 1996. **Irrigation Software Information; How to find and evaluate the program you need**. ILRI Special Report., Montpellier.

Jury, W., W.R. Gardner and W.H. Gardner. 1991. **Soil Physics**. 5th ed. John Wiley & Sons, New York.

Keating *et al.* 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy** 18: 267-288.

Kennedy, J., Eberhart, R.C. and Y. Shi. 2007. **Swarm Intelligence**. Elsevier., Available Source: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9781558605954>, January 15, 2008

Kroes, J.G. and J.C. van Dam. 2003. **Reference Manual SWAP Version 3.0.3, Alterra-Report 773**. Alterra, Green World Research, Wageningen, The Netherlands.

- Lankford, B., C. Sokile, D. Yawson and H. Levite. 2004. **The River Basin Game: A Water Dialogue Tool, Working Paper 75**. International Water Management Institute (IWMI), Colombo.
- Le Bars, M., J.M. Attonaty, S. Pinson and N. Ferrand. 2005. An agent-based simulation testing the impact of water allocation on farmers' collective behaviors. **Simulation** 81: 223-235.
- Liang, Y.D. 2005. **Introduction to JAVA Programming**. Comprehensive version. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Ligtenberg, A., A. Bregt and R. Lammeren. 2001. Multi-actor based land use modelling: spatial planning using agents. **Landscape and Urban Planning** 56: 21-33.
- _____, M. Wachowicz, A.K. Bregt, A. Beulens and D.L. Kettenis. 2004. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. **Journal of Environmental Management** 72: 43-55.
- Liu, D. and T.J. Stewart. 2004. Integrated object-oriented framework for MCDM and DSS modelling. **Decision Support Systems** 38: 421-434.
- Liu, F., J. Feyen and J. Berlamont. 1992. Computation method for regulating unsteady flow in open channels. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 118(10): 674-689.
- _____, _____ and J. Berlamont. 1994. Downstream control algorithm for irrigation canals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 120(3): 468-483.
- _____, _____, P.O. Malaterre, J.P. Baume and P. Kosuth. 1998. Developments and evaluation of canal automation algorithm CLIS. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 124(1): 40-46.

- Lopez-Paredes, A., D. Sauri and J.M. Galan. 2005. Urban water management with artificial societies of agents: The FIRMABAR simulator. **Simulation** 81: 189-199.
- Malaterre, P.O., D.C. Rogers and J. Schuurmans. 1998. Classification of canal control algorithms. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 124(1): 3-10.
- Martinez, C.J. 2006. **Object-Oriented Hydrologic and Water-Quality Model for High-Water-Table Environments**. Ph.D. Thesis, University of Florida.
- Mathey, A.H., E. Krcmar, S. Dragicevic and I. Vertinsky. 2008. An object-oriented cellular automata model for forest planning problems. **Ecological Modelling** 212: 359-371.
- McBratney, A.B., B. Minasny, S.R. Cattle and R.W. Vervoort. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma** 109: 41-73.
- Minar, N., R. Burkhart, C. Langton and M. Askenazi. 1996. **The Swarm Simulation System: a Toolkit for Building Multi-Agent Simulations**, Working Paper 96-06-042. Santa Fe Institute, Santa Fe.
- Monteith, J.L. and M.H. Unsworth. 1990. **Principles of Environmental Physics**. 2nd ed. Edward Arnold, London.
- Moroney, T.J. and I.W. Turner. 2006. A finite volume method based on radial basis functions for two-dimensional nonlinear diffusion equation. **Journal of Hydrology** 30: 1118-1133.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research** 22(supplement): 89S-108S.

- Nilsson, N.J. 1998. **Artificial Intelligence. A New Synthesis**. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.
- North, M.J., N.T. Collier and J.R. Vos. 2006. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. **ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation** 16(1): 1-25.
- Odhiambo, L.O. and V.V.N. Murty. 1996. Modeling water balance components in relation to field layout in lowland paddy fields. I. Model development. **Agricultural Water Management** 30: 185-199.
- Pan, X., J.D. Hesketh and M.G. Huck. 2000. OWSimu: an object-oriented and web-based simulator for plant growth. **Agricultural Systems** 63:33-47.
- Panigrahi, D.P. and Mujumdar, P.P. 2000. Reservoir operation modeling with Fuzzy Logic. **Journal of Water Resources Planning and Management**. 14: 89–109.
- Papajorgji, P. and P.M. Pardalos. 2006. **Software Engineering Techniques Applied To Agricultural Systems: an Object-Oriented and UML Approach**. Springer, New York.
- Parker, D.C., T. Berger and S.M. Manson. 2001. **Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change**. Report and Review of an international workshop Land Use and Cover Change (LUCC), California.
- Penning de Vries, F.W.T. 1982. System analysis and models of crop growth. In F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar, eds. **Simulation of Plant Growth and Crop Production**. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), Wageningen, The Netherlands.

- Penning de Vries, D.M. Jansen, H.F.M. ten Berge and A.Bakema. 1989. **Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops**. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), Wageningen, The Netherlands.
- Ranatunga, K., E.R. Nation and D.G. Barratt. 2008. Review of soil water models and their application in Australia. **Environmental Modelling and Software** 15: 215-224.
- Rinaldi, P.R., D.D. Dalponte, M.J. Vnere and A. Clausse. 2007. Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains. **Simulation Modelling Practice and Theory** 15: 315-327.
- Ritzema, H.P. 1994. **Drainage Principles and Applications**. ILRI publication 16. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Roger, D.C. and J. Goussard. 1998. Canal control algorithms currently in use. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 124(1): 11-15.
- Ruiz-Carmoma, V.M., A.J. Clemmens and J. Schuurmans. 1998. Canal control algorithms formulation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 124(1): 31-39.
- Saruwatari, N. and Yomota, A. 1995. Forecasting system of irrigation water on paddy field by fuzzy theory. **Agricultural Water Management**. 28: 163–167.
- Schaap, M.G., F.J. Leij and M.T. van Genuchten. 2001. ROSETTA : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology** 251: 163-176.
- Shrestha, B.P. Duckstein, L. and Stakhiv, E.Z. 1996. Fuzzy rule based modeling of reservoir operation. **Journal of Water Resources Planning and Management**. 4: 262–269.

Schultz, G.A. and E.T. Engman. 2000. **Remote Sensing in Hydrology and Water Management**. Springer, Berlin.

Singh, V.P. 1996. **Kinematic Wave Modeling in Water Resources: Surface-Water Hydrology**. John Wiley & Sons, New York.

_____ and S.M. Bhallamudi. 1997. Hydrodynamic modeling of basin irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 123(6): 407-414.

_____ and M. Fiorentino. 1996. **Geographical Information Systems in Hydrology**. Kluwer, Dordrecht.

_____ and D.A. Woolhiser. 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering** 7: 270-292.

Smith, M. 1992. **CROPWAT: A computer Program for Irrigation Planning and Management**, FAO Irrigation and Drainage Paper No 46. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Strelkoff, T.S., J.L. Deltour, C.M. Burt, A.J. Clemmens and J.P. Baume. 1998. Influence of canal geometry and dynamics on controllability. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 124(1): 16-22.

Supit, I., A.A. Hooijer and C.A. van Diepen. 1994. **System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS. Volume 1: Theory and Algorithms**, EUR Publication 15956. Office for Official Publications of the European Communities, Brussels.

- Tobias, E. and C. Hofmann. 2004. Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation** 7(1): 1-36.
- Toffoli, T. and N. Margolus. 1989. **Cellular Automata Machines; A New Environment for Modeling**. The MIT Press, MA.
- Torrens, P.M. 2000. **How Cellular Model of Urban Systems, Working Paper (1.Theory)**. Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London.
- Toudeft, A., P. Kosuth and P.Gallinari. 1994. **A PID Neural Controller for Unstable Delayed Linear Systems, OCANN'94 Proc.** University of Salerno, Italy.
- Tsai, T.L. and J.C. Yang. 2005. Kinematic wave modeling of overland flow using characteristics method with cubic-spline interpolation. **Advances in Water Resources** 28: 661–670.
- Tuteja, N.K., J. Vaze, B. Murphy and G. Beale. 2004. **CLASS: Catchment Scale Multiple-Landuse Atmosphere Soil Water and Solute Transport Model, Technical Report 04/12**. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Available Source: <http://www.toolkit.net.au>, May 15, 2006.
- USGS. 2006. **The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Available Source: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, June 14, 2007.
- Valbuena, D., P.H. Verburg and A.K. Bregt. 2008. A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 128: 27-36.

- Van Dam, J.C. 2000. **Field-Scale Water Flow and Solute Transport: SWAP Model Concepts, Parameter Estimation and Case Studies**. PhD. Thesis, Wageningen University, The Netherlands.
- _____, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. Van Walsum, P. Groenendijk and C.A. Van Diepen. 1997. **Theory of SWAP version 2.0: Simulation of Water Flow, Solute Transport and Plant Growth in The Soil-Water-Atmosphere-Plant Environment**. Technical Document 45. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal** 44: 892-898.
- Van Laar H.H., J. Goudriaan and H. van Keulen. 1997. **SUCROS97: Simulation of Crop Growth for Potential and Water-Limited Production Situations**. As applied to spring wheat. AB-DLO, Wageningen, The Netherlands. Available Source: <http://www.dpw.wageningen-ur.nl/cwe/downloads/sucros.htm>, August 20, 2005.
- Vieux, B.E. 2001. **Distributed Hydrologic Modeling Using GIS**. Kluwer Academic, Netherlands.
- Warrick, A.W. 2003. **Soil Water Dynamics**. Oxford University Press, New York.
- Water Systems automation Term. 1973. **Water system Automation A state of the art report by the water systems automation team**. US Department of the Interior.
- Wooldridge, M. 2002. **An Introduction to Multiagent Systems**. John Wiley & Sons, West Sussex, England.

Wootton, J.T. 2001. Local interactions predict large-scale pattern in empirically derived cellular automata. **Nature** 78: 2004-2017.

Wosten, J. H.M., Y.A. Pachepsky and W.J. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology** 251: 123-150.

Zhang, Z. and C. Zhang. 2004. **Agent-Based Hybrid Intelligent Systems. An Agent-based Framework for Complex Problem Solving.** Springer-Verlag, Berlin.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
แบบจำลองจีเรสส์

แบบจำลองจิเร่

ส่วนแรก เป็นการติดตั้งและการใช้งานแบบจำลองจิเร่ แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ (1) องค์ประกอบที่ต้องการ (2) การใช้งานแบบจำลองผ่าน MS-Dos Prompt window และ (3) การใช้งานแบบจำลองผ่าน Eclipse ส่วนที่สอง เป็นรายละเอียดของแบบจำลองจิเร่ แบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ โครงสร้างแบบจำลอง

1. การติดตั้งและการใช้งานแบบจำลองจิเร่

1.1 องค์ประกอบที่ต้องการ

1) Java 2 Platform System Development Kit หรือ J2SDK v.1.6.0 เป็นชุดสำหรับสร้างแบบจำลองจากภาษาจาวา ซึ่งมีเครื่องมือและ library มาตรฐานของจาวาที่ใช้สร้าง application สามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://java.sun.com/j2se/>

2) Java Runtime Environment หรือ JRE เป็นองค์ประกอบที่ใช้สนับสนุนการทำงานของระบบ ซึ่งส่วนใหญ่มักจะถูกติดตั้งพร้อมกับ J2SDK ตั้งแต่ v1.6 ขึ้นไป การนำแบบจำลองไปใช้งานควรติดตั้ง JRE เวอร์ชันเดียวกับแบบจำลองหรือสูงกว่า

สามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://java.sun.com/j2se/>

3) แบบจำลองจิเร่ jIrais.jar ในรูปแบบของไฟล์ดำเนินงานแบบจาวา ไฟล์นี้เป็นตัวจัดการเกี่ยวกับไฟล์ jar archive (JAR) โดยรวมไฟล์คลาสต่าง ๆ ในแบบจำลองโดยการบีบอัดไฟล์หลาย ๆ ไฟล์รวมถึงระดับใดเรกเทอรีให้เป็นไฟล์เดียว เพื่อความสะดวกในการใช้งาน ไฟล์นี้บรรจุอยู่ใน CD

4) Repast (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) เป็นชุดเครื่องมือสำหรับสร้างแบบจำลองบนพื้นฐานของตัวกระทำหรือเอเจนต์ (Agent-Based Modeling หรือ ABM) สามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://repast.sourceforge.net/>

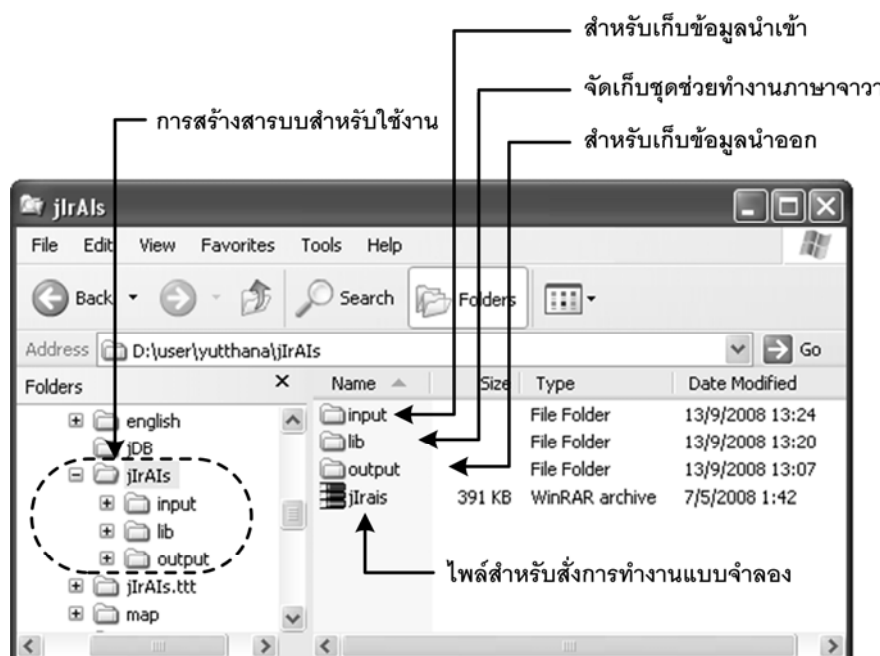
1.2 การใช้งานแบบจำลองผ่าน MS-Dos Prompt window

การใช้งานแบบจำลองผ่าน MS-Dos Prompt window เป็นการทำงานผ่านคอมไพเลอร์ (compiler) วิธีนี้จะเรียกใช้งานไฟล์ “jIrais.jar” โดยตรง ซึ่งค่อนข้างสะดวกและรวดเร็ว แต่การใช้งานไม่ยืดหยุ่นมากนัก เนื่องจากไม่สามารถปรับเปลี่ยนส่วนใดของชุดคำสั่งได้ การดำเนินงานดังนี้

1) การสร้างไคเรกทอรีสำหรับใช้งาน

การสร้างไคเรกทอรี เป็นการสร้างแหล่งเก็บรวบรวมข้อมูลนำเข้า (input) และข้อมูลนำออก (output) ของแบบจำลอง การสร้างเริ่มจากไคเรกทอรีชื่อ “jIrais” ซึ่งถูกระบุให้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน (“...\jIrais”) จากนั้น ดำเนินการสร้างไคเรกทอรีย่อยอีก 3 ชนิด

- (1) “input” สร้างใน “...\jIrais\input” สำหรับเก็บข้อมูลนำเข้า
- (2) “output” สร้างใน “...\jIrais\output” สำหรับเก็บข้อมูลนำออก
- (3) “lib” “...\jIrais\lib” สำหรับเก็บชุดเครื่องมือช่วยภาษาจาวา



ภาพผนวกที่ ก1 การสร้างไคเรกทอรีสำหรับใช้งานแบบจำลอง

2) กำหนดข้อมูลนำเข้า

แบบจำลองจีเรีส์มีข้อมูลนำเข้าจำนวน 29 ชนิด ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลในรูปแบบกริดเชิงพื้นที่ (*.acs) จำนวน 25 ชนิด และข้อมูลคำอธิบายในรูปแบบของ (*.xls) จำนวน 4 ชนิด ข้อมูลเหล่านี้จัดเก็บอยู่ที่ตำแหน่งไดเรกทอรี “...\jIraIs\input”

no	file name	file format	file description
1	idReference	asc	reference code
2	idElevation	asc	surface elvation
3	idFldRiskArea	asc	flood risk area
4	idGate	asc	regulator attribute
5	idHydroSta	asc	inflow station code
6	idLand	asc	land code
7	idLanduse	asc	landuse code
8	idLatitude	asc	latitude
9	idSoil	asc	soil code
10	idWeather	asc	weather station code
11	canDmax	asc	canal
12	canFlowD	asc	canal
13	canN	asc	canal
14	canSo	asc	canal
15	canWidth	asc	canal
16	chnDmax	asc	channel
17	chnFlowD	asc	channel
18	chnN	asc	channel
19	chnSo	asc	channel
20	chnWidth	asc	channel
21	surfDmax	asc	surface
22	surfFlowD	asc	surface
23	surfN	asc	surface
24	surfSo	asc	surface
25	surfWidth	asc	surface
26	descGate	xls	regulator
27	descHeadflow	xls	runoff data
28	descSoil	xls	soil description
29	descWeather	xls	climate data

ภาพผนวกที่ ก2 รายชื่อไฟล์ที่จัดเก็บอยู่ในไดเรกทอรี

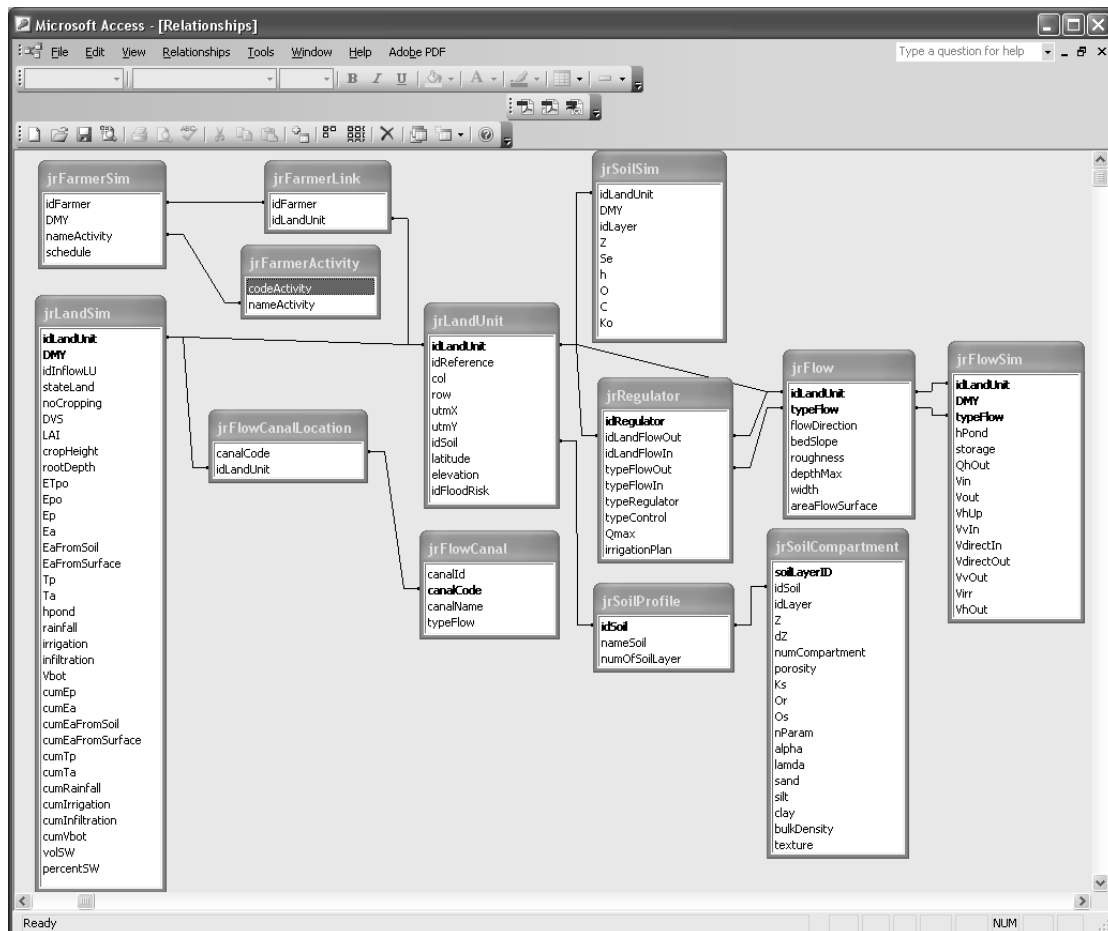
3) การสร้างไฟล์สำหรับบันทึกข้อมูลผลการจำลอง

หัวข้อนี้ เป็นการสร้างไฟล์ฐานข้อมูลชื่อ “jrOutput.mdb” ซึ่งทำหน้าที่เก็บรวบรวมผลการจำลองในแต่ละขั้นเวลา ไฟล์นี้ประกอบด้วยตารางข้อมูล (ตารางผนวกที่ ก1) จำนวน 14 ตาราง โดย 10 ตารางแรกทำหน้าที่เก็บข้อมูลคุณสมบัติของรายละเอียดในแต่ละส่วนของแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองจะเขียนผลลัพธ์เข้ามายังส่วนนี้ในครั้งแรกก่อนการดำเนินงาน หรือเป็นช่วงที่แบบจำลองได้กำหนดค่าองค์ประกอบเรียบร้อยแล้ว และเมื่อแบบจำลองได้ถูกสั่งให้ดำเนินการ (running) แบบจำลองจะเขียนผลลัพธ์เข้ามายัง 4 ตารางท้ายสุดเมื่อสิ้นสุดการจำลองในแต่ละขั้นเวลา อาทิ แบบจำลองเขียนผลลัพธ์เมื่อสิ้นสุดวัน

- (1) “jrFarmerSim” เก็บบันทึกกิจกรรมของเกษตรกร
- (2) “jrFlowSim” เก็บบันทึกการไหลของน้ำผิวดินและในทางน้ำ
- (3) “jrLandSim” เก็บบันทึกข้อมูลแปลงเพาะปลูก
- (4) “jrSoilSim” เก็บบันทึกข้อมูลการไหลของน้ำในดิน

ตารางผนวกที่ ก1 รายชื่อตารางข้อมูลจัดเก็บข้อมูลผลการจำลอง

ชื่อไฟล์ตารางฐานข้อมูล	ข้อมูลการจัดเก็บ
1. jrFarmerActivity	กิจกรรมของเกษตรกร
2. jrFarmerLink	รหัสเกษตรกรกับรหัสแปลงเพาะปลูก
3. jrFlow	คุณสมบัติของทางน้ำ 3 ชนิด
4. jrFlowCanal	รหัสคลองส่งน้ำ
5. jrFlowCanalLocation	ตำแหน่งของคลองส่งน้ำ
6. jrLandUnit	คุณสมบัติของแปลงเพาะปลูก
7. jrRegulator	คุณสมบัติของประตูระบายน้ำ
8. jrSoilCompartment	คุณสมบัติศาสตร์ของชั้นดิน
9. jrSoilLayer	ข้อมูลช่วงชั้นดิน
10. jrSoilProfile	ข้อมูลหน้าตัดดิน
11. jrFarmerSim	ผลการจำลองกิจกรรมของเกษตรกร
12. jrFlowSim	ผลการจำลองการไหลของน้ำผิวดิน
13. jrLandSim	ผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงของแปลงเพาะปลูก
14. jrSoilSim	ผลการจำลองการไหลของน้ำในดิน



ภาพผนวกที่ ๓3 ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์สำหรับบันทึกผลการจำลอง

4) การสร้างระบบการติดต่อระหว่างระบบปฏิบัติการกับฐานข้อมูล

แบบจำลองจีเรสบันทึกข้อมูลผลการจำลองลงในฐานข้อมูลแบบ microsoft access ซึ่งก็คือไฟล์ฐานข้อมูล “jrOutput.mdb” ที่สร้างไว้แล้วก่อนหน้านี้ กระบวนการบันทึกผลการจำลองลงในฐานข้อมูลนี้ เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแบบจำลองจีเรสกับระบบปฏิบัติการ windows ซึ่งเรียกว่า “JDBC-ODBC bridge” โดย JDBC หรือ java database connectivity ทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่ใช้ติดต่อระหว่างแบบจำลองจีเรสซึ่งเขียนโดยภาษาจาวากับฐานข้อมูล ส่วน ODBC หรือ open database connectivity เป็นตัวกลางที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างฐานข้อมูลกับระบบปฏิบัติการ ซึ่งในขั้นนี้เป็นการสร้างแสดงระบบการติดต่อแบบ ODBC

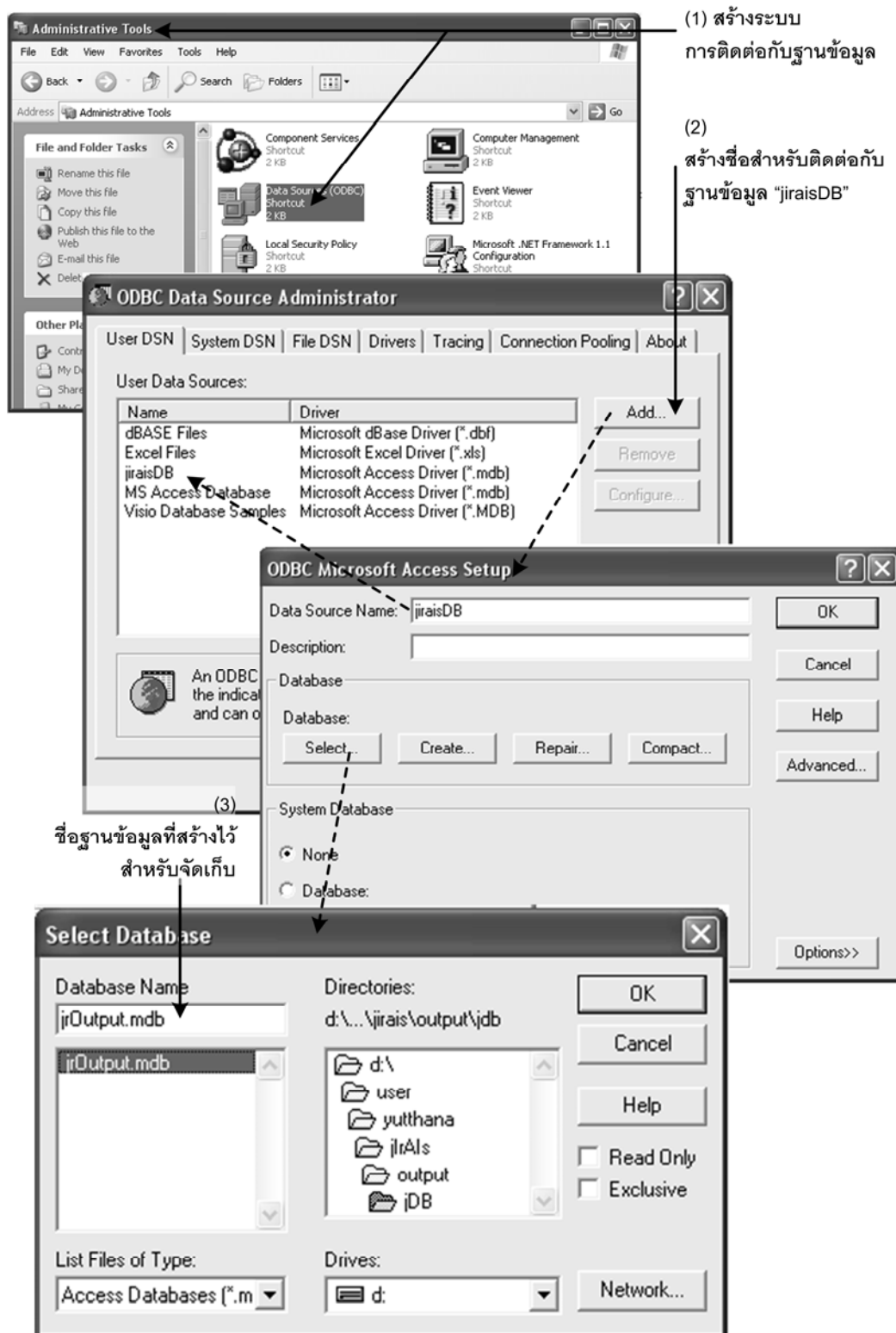
(1) สร้างไฟล์ฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บผลการจำลอง ในที่นี้คือไฟล์ “jrOutput.mdb” ซึ่งเป็นไฟล์ที่สร้างไว้แล้วในหัวข้อก่อนนี้

(2) ที่หน้าต่าง control panel ของ windows เลือก administrative tools แล้วเลือก data sources (ODBC)

(3) สร้างชื่อสำหรับติดต่อกับฐานข้อมูล ในที่นี้ใช้ชื่อ “jiraisDB”

(4) เลือกไฟล์ “jrOutput.mdb” ในไดเรกทอรี “...\\JrAIs\\output\\jrOutput.mdb” ซึ่งเป็นไฟล์ที่จะถูกแบบจำลองเขียนข้อมูลผลการจำลองลงมาเก็บรวบรวมไว้ในตารางฐานข้อมูล

ในภาพผนวกที่ ก4 แสดงตัวอย่างการสร้างระบบการติดต่อระหว่างฐานข้อมูลกับระบบปฏิบัติการ windows



ภาพผนวกที่ 4 การสร้างระบบติดต่อกับฐานข้อมูลเพื่อรองรับข้อมูลนำออกจากแบบจำลอง

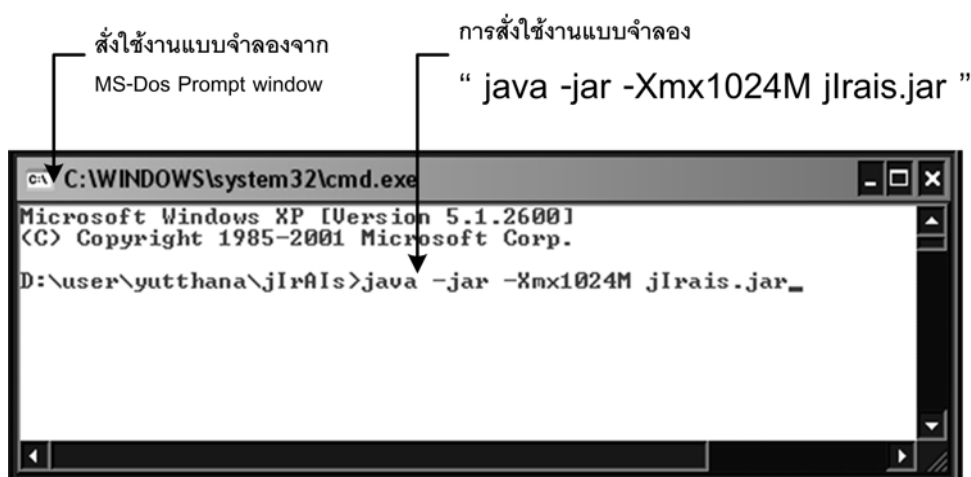
5) การเรียกแบบจำลองจีเรย์

หลังจากสร้างองค์ประกอบการใช้งานแล้วเสร็จ ซึ่งได้แก่ การกำหนดข้อมูลนำเข้า และการกำหนดข้อมูลนำออกผ่านทางระบบเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล ถัดมา เป็นขั้นตอนสุดท้าย คือ การเรียกใช้งานแบบจำลอง

การเรียกแบบจำลองจีเรย์กระทำผ่าน MS-Dos Prompt window ซึ่งเป็นตัวคอมพิวเตอร์ ในการนี้ มีเครื่องมืออื่นที่สามารถใช้แทนได้ อาทิ Notepad และ Editplus

วิธีเรียกแสดงในภาพผนวกที่ ก5 ซึ่งเขียนเป็นคำสั่ง “java -jar -Xmx1024 jIrais.jar” ในที่นี้ “Xmx1024” เป็นการระบุขนาดของหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่เรียกใช้ สาเหตุที่ต้องกำหนดข้อความนี้ เนื่องจากกรณีแบบจำลองมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ซึ่งจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำค่อนข้างมากเพื่อดำเนินการ ฉะนั้น การเรียกใช้งานแบบจำลองควรกำหนดขนาดของการใช้ให้มากกว่าความต้องการของแบบจำลอง แต่ถ้าหากไม่กำหนดไว้การดำเนินงานของแบบจำลองที่ค่อนข้างใหญ่อาจพบกับปัญหาเรื่องหน่วยความจำไม่พอ (“java heap memory”)

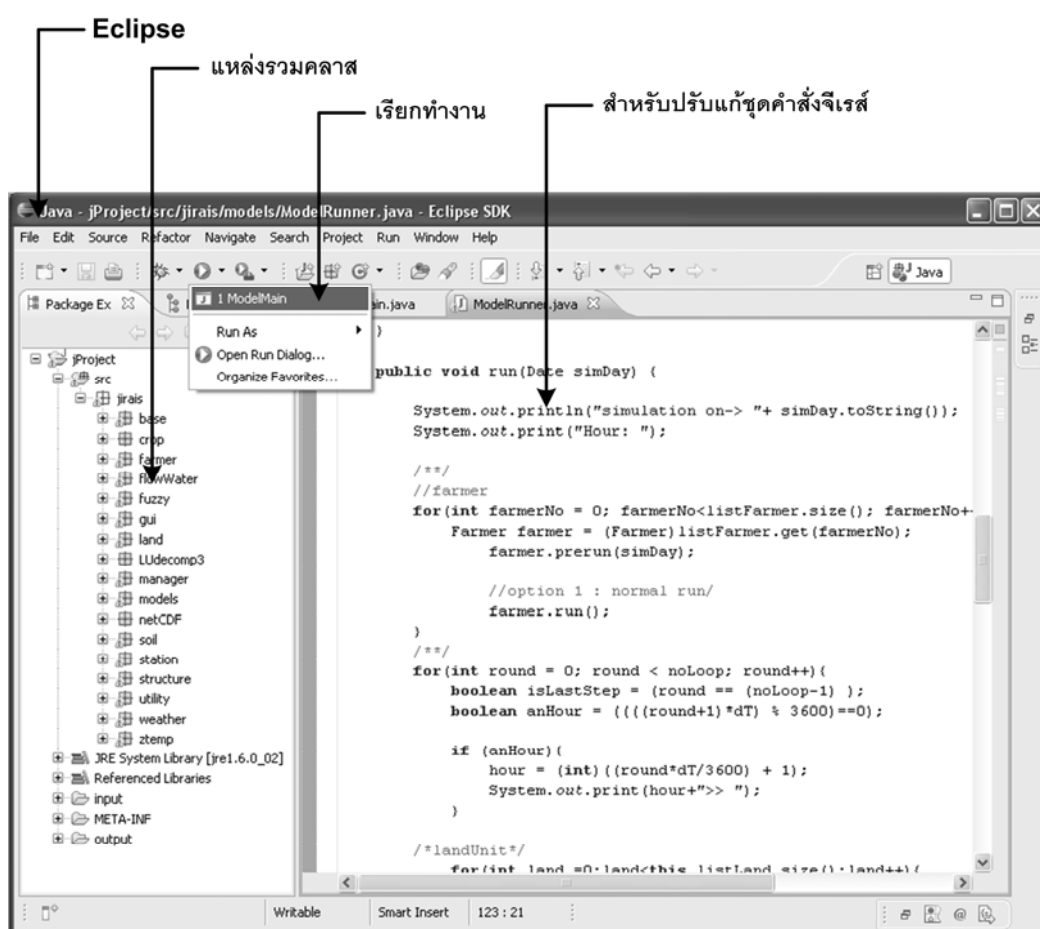
หลังจากเรียกแบบจำลองแล้วเสร็จจะปรากฏแบบจำลองจีเรย์ ดังภาพผนวกที่ ก7



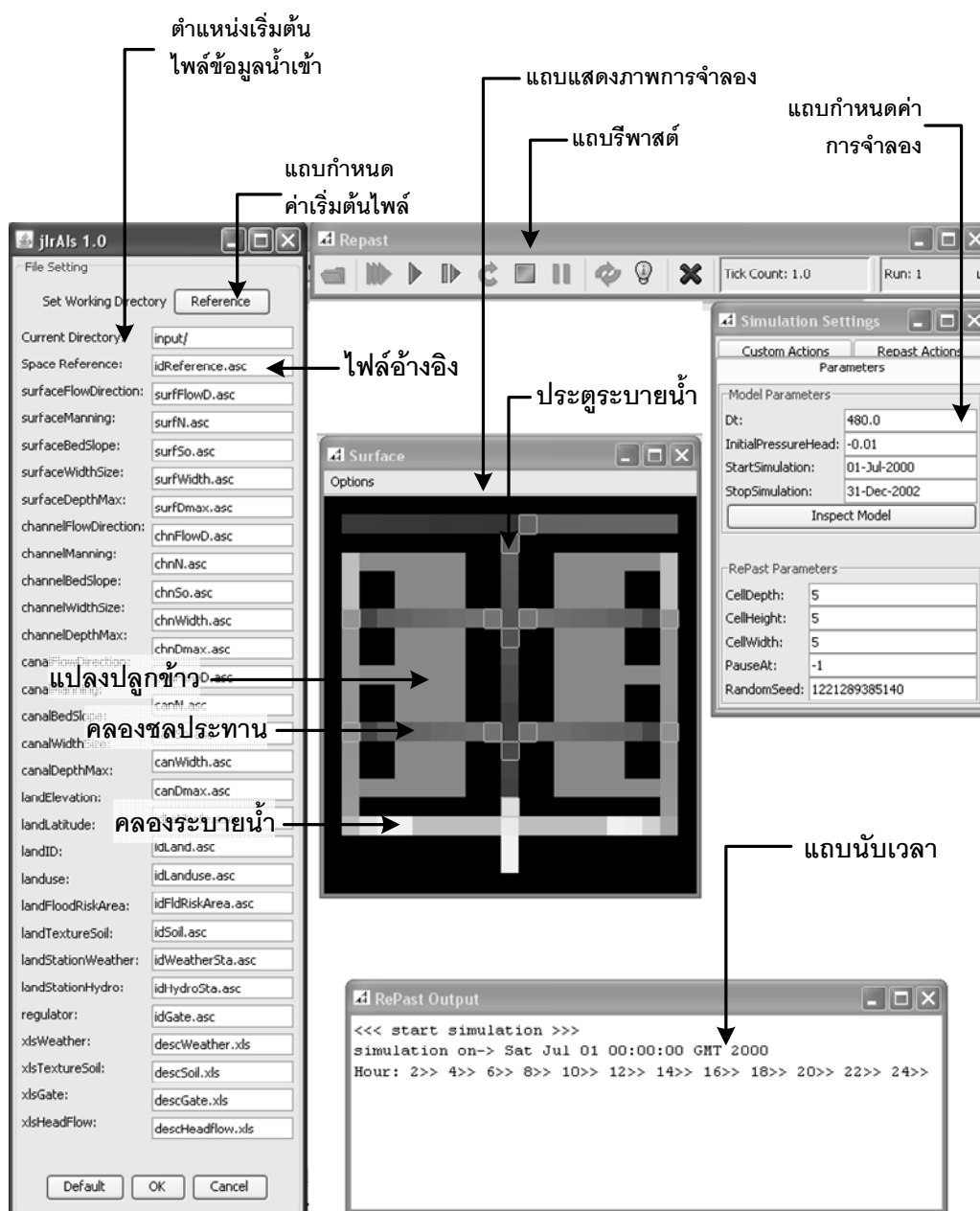
ภาพผนวกที่ ก5 การเรียกใช้งานแบบจำลองจาก MS-Dos Prompt window

1.3 การใช้งานแบบจำลองผ่าน Eclipse

การใช้งานแบบจำลองผ่าน Eclipse เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งค่อนข้างยืดหยุ่นกว่าวิธีแรก เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนส่วนต่าง ๆ ของชุดคำสั่งจีเรสได้ ในการนี้ เมื่อไฟล์ “jIrais.jar” ถูกเปิดใช้งานใน Eclipse จะปรากฏคลาสต่าง ๆ ของแบบจำลอง ซึ่งแบ่งเป็น package ในแต่ละกลุ่มงาน การปรับแก้ชุดคำสั่งสามารถทำได้โดยง่าย และเมื่อปรับเปลี่ยนแล้วเสร็จ สามารถส่งดำเนินงานผ่านเมนู run ซึ่งจะปรากฏส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ดังภาพผนวกที่ ก7



ภาพผนวกที่ ก6 การใช้งานแบบจำลองจีเรสผ่าน Eclipse

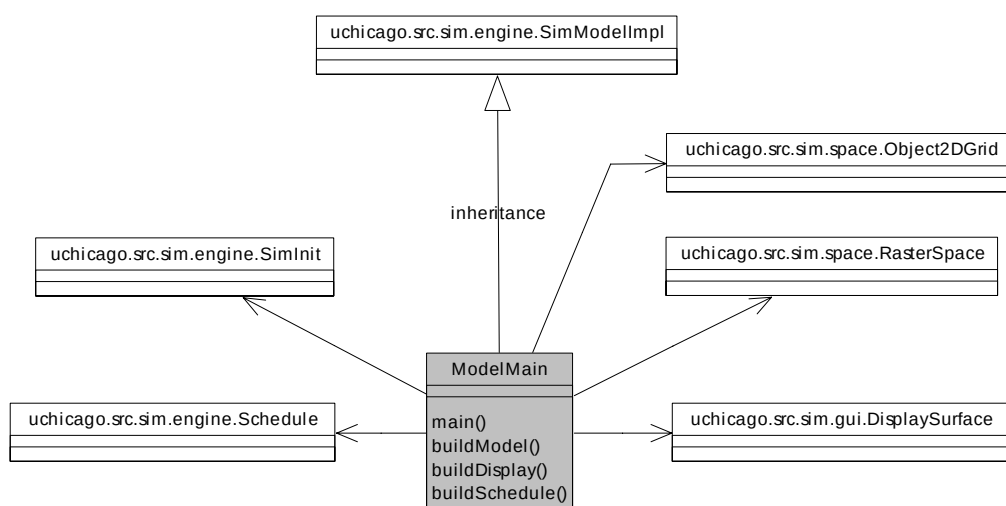


ภาพผนวกที่ ก7 องค์ประกอบการทำงานของแบบจำลองจีเรสส์

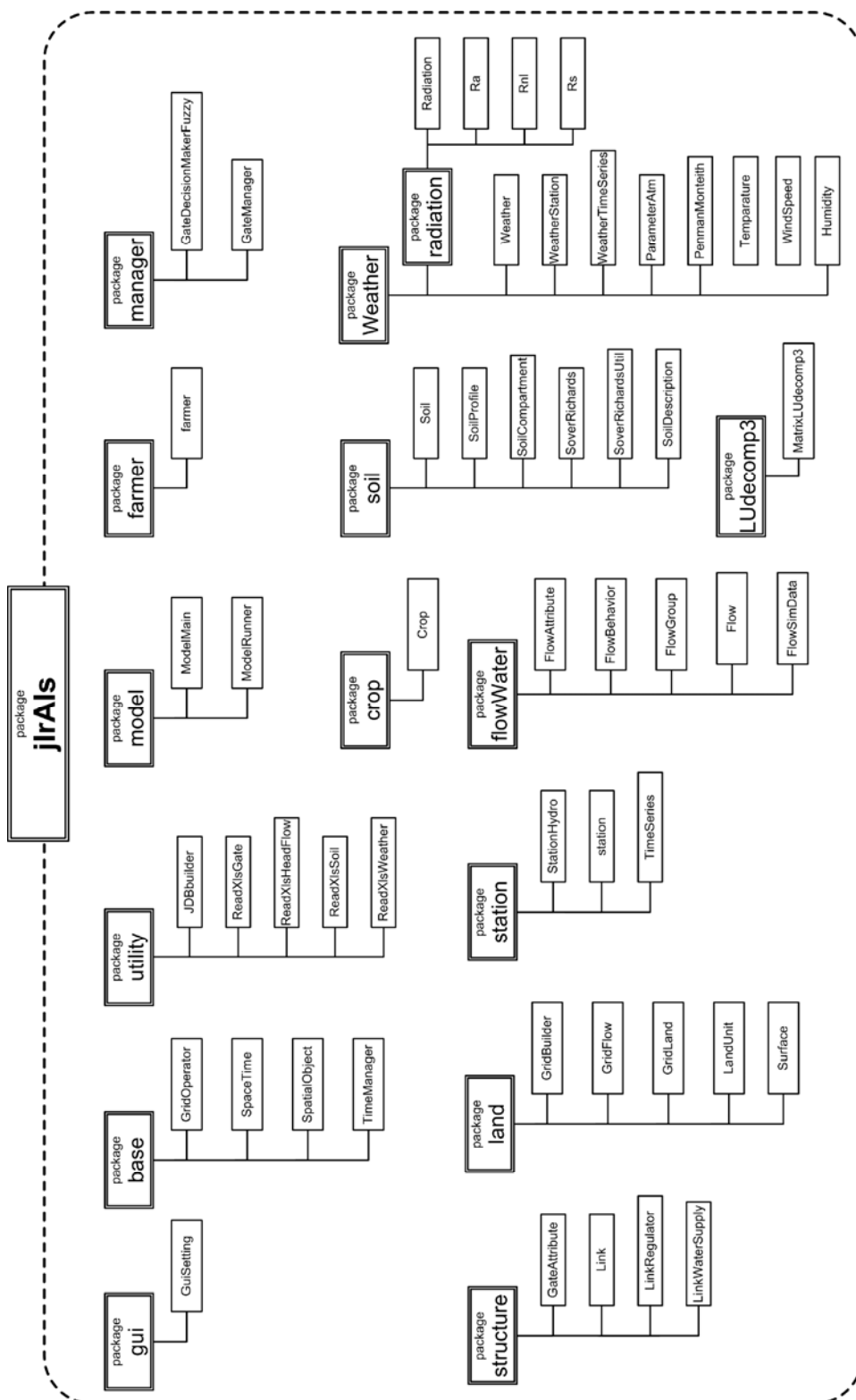
2. รายละเอียดของแบบจำลองจิเรลล์

รายละเอียดของแบบจำลองจิเรลล์ แบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่

- (1) โครงสร้างแบบจำลอง
- (2) ข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง



ภาพผนวกที่ ก8 คลาสไดอะแกรมสำหรับแสดงการเชื่อมโยงระหว่างคลาส “ModelMain” กับคลาสจากจีพาร์ท



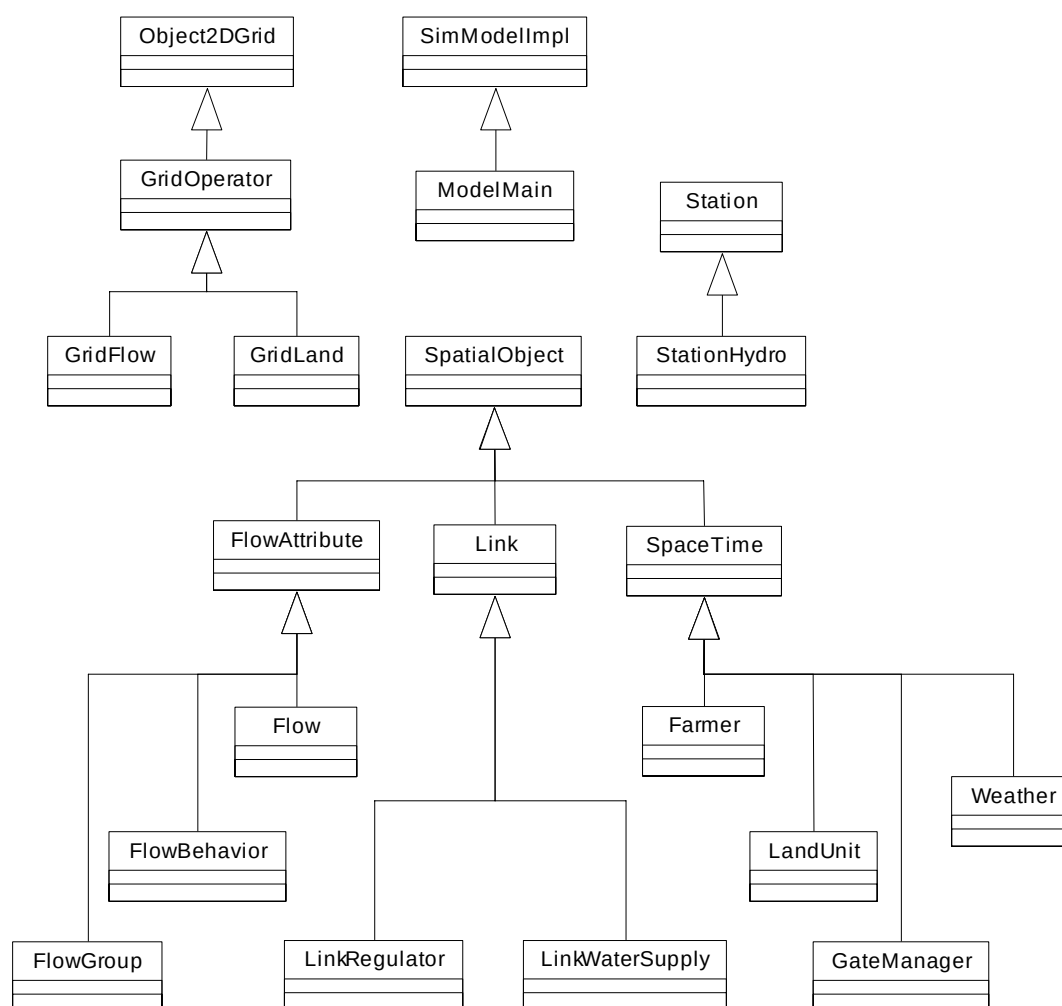
ภาพผนวกที่ ก9 แพ็กเกจและคลาสในรูปแบบจำลองจิรส์วันที่ 14 พฤศจิกายน 52 คลาส

ตารางผนวกที่ ก2 คำอธิบายคลาสในแบบจำลองจิเรศ

แพ็คเกจ	คลาส	คำอธิบายคลาส
1. model	1. ModelMain	คลาสหลักควบคุมการทำงานทั้งหมด
	2. ModelRunner	ลำดับการดำเนินงานแบบจำลอง
2. base	1. GridOperator	เก็บคุณสมบัติกริด
	2. SpaceTime	เก็บข้อมูลเวลา
	3. SpaceObject	เก็บตำแหน่งของกริด
	4. TimeManager	จัดการเกี่ยวกับเวลา
3. Utility	1. JDBbuilder	เชื่อมต่อระหว่างฐานข้อมูล
	2. ReadXlsGate	อ่านข้อมูลประตูระบายน้ำจาก MS excel
	3. ReadXlsHeadFlow	อ่านข้อมูลประตูน้ำท่าไหลเข้าจาก MS excel
	4. ReadXlsSoil	อ่านข้อมูลชลศาสตร์ของดินจาก MS excel
	5. ReadXlsWeather	อ่านข้อมูลภูมิอากาศรายวันจาก MS excel
4. gui	1. GuiSetting	กำหนดแถบการติดต่อกับผู้ใช้
5. farmer	1. Farmer	จำลองเกษตรกร
6. manager	1. GateManager	ควบคุมอาคารบังคับน้ำ
	2. GateDecisionMarkerFuzzy	ตัดสินใจโดยกฎการควบคุมแบบฟัซซี่
7. structure	1. GateAttribute	เก็บข้อมูลประตูระบายน้ำ
	2. Link	คลาสแม่ทำหน้าที่เชื่อมแหล่งน้ำ
	3. LinkRegulator	ประตูระบายน้ำ
	4. LinkWaterSupply	เชื่อมระหว่างแหล่งน้ำกับแปลงเพาะปลูก
8. land	1. GridBuilder	อ่านข้อมูลกริด
	2. GridFlow	กริดการไหลของน้ำ
	3. GridLand	กริดแปลงเพาะปลูก
	4. LandUnit	แปลงเพาะปลูกหรือแปลงที่ดิน
	5. Surface	คำนวณสมมูลน้ำผิวดิน
9. station	1. Station	ตำแหน่งสถานีน้ำท่า
	2. StaionHydro	เรียกเก็บข้อมูลอัตราการไหลของน้ำ
	3. TimeSeries	เก็บข้อมูลเป็นช่วงเวลา

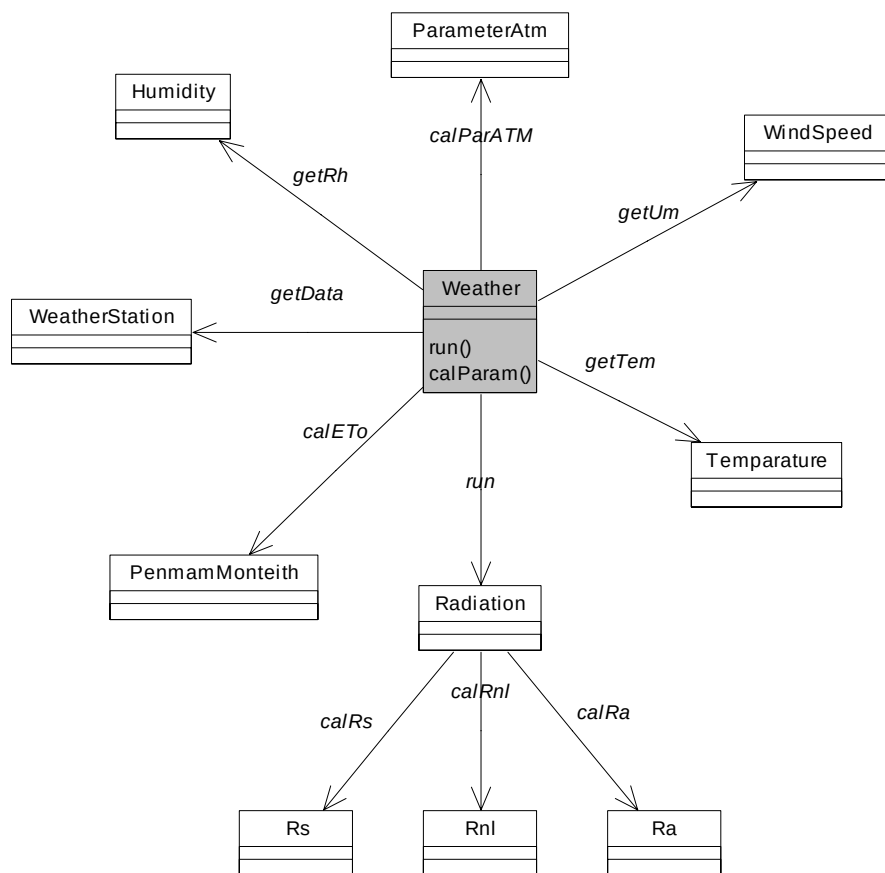
ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

แพ็คเกจ	คลาส	คำอธิบายคลาส
10. crop	1. Crop	จำลองการเจริญเติบโตของข้าว
11. soil	1. Soil	แทนดิน
	2. SoilProfile	แทนหน้าตัดดิน
	3. SoilCompartment	แทนชั้นดินย่อย
	4. SoverRichards	จำลองขั้นตอนคำนวณสมการของริชาร์ด
	5. SoverRichardUtil	จำลองระเบียบวิธี finite difference
	6. SoilDescription	เก็บข้อมูลคุณสมบัติดิน
12. ludecomp3	1. MatrixLUdecomp3	หาค่าตอบสมการเมทริกซ์
13. flowWater	1. FlowAttribute	เก็บข้อมูลคุณสมบัติการไหลของน้ำ
	2. FlowBehavior	เก็บการคำนวณการไหลของน้ำ
	3. FlowGroup	ลำดับการคำนวณระเบียบวิธี finite volume
	4. Flow	เก็บขั้นตอนการคำนวณการไหลของน้ำ
	5. FlowSimData	เก็บข้อมูลการไหลของน้ำ
14. weather	1. Weather	คำนวณข้อมูลภูมิอากาศ
	2. WeatherStation	เก็บข้อมูลสถานีตรวจอากาศ
	3. WeatherTimeSeries	เก็บข้อมูลภูมิอากาศรายวัน
	4. ParameterAtm	คำนวณพารามิเตอร์ภูมิอากาศ
	5. PenmanMonteith	คำนวณสมการเพนแมน
	6. Temperature	คำนวณอุณหภูมิ
	7. WindSpeed	คำนวณความเร็วลม
	8. Humidity	คำนวณความชื้น
	- radiation	
	9. Radiation	คำนวณพลังงานการแผ่รังสีสุทธิ
	10. Ra	คำนวณพลังงานการแผ่รังสีที่ชั้นนอกบรรยากาศ
	11. Rnl	คำนวณพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นยาวสุทธิ
	12. Rs	คำนวณพลังงานการแผ่รังสีช่วงคลื่นสั้นสุทธิ

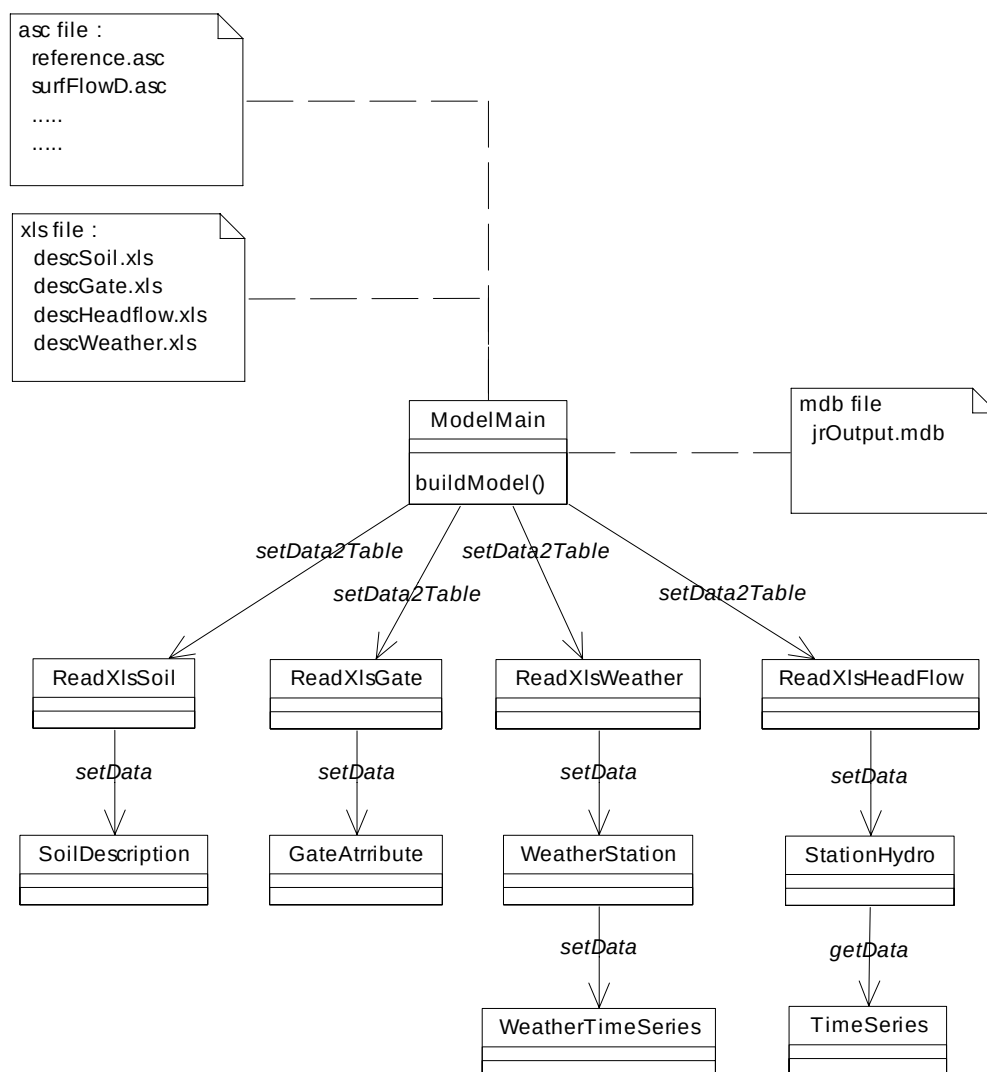


ภาพผนวกที่ ก10 การสืบทอดรายละเอียดของคลาส

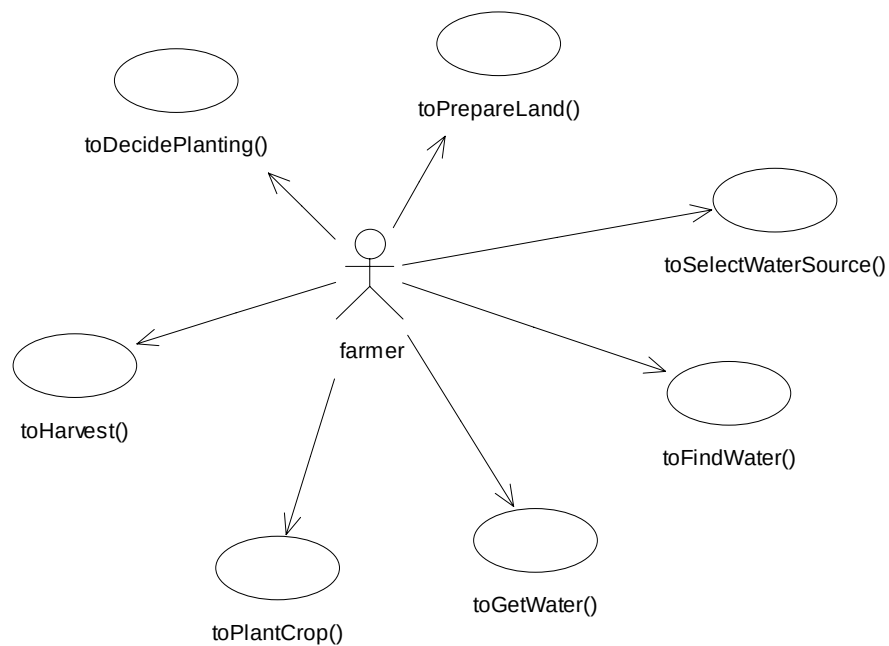
หมายเหตุ การสืบทอดรายละเอียดคลาส เป็นการสืบทอดสมบัติบางประการจากคลาสแม่ เพื่อนำคุณสมบัติที่สืบทอดนั้นไปใช้งานต่อไปหรือนำมาปรับเปลี่ยนเพิ่มรายละเอียดตามความต้องการ ตัวอย่างเช่น คลาส “GridOperator” ได้สืบทอดรายละเอียดของคลาส “Object2DGrid” ซึ่งเป็นคลาสแม่ โดยนำคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างกริดมาใช้ และให้คลาส “GridFlow” และคลาส “GridLand” สืบทอดรายละเอียดต่ออีกครั้ง



ภาพผนวกที่ ก11 คลาสไดอะแกรมคำนวณข้อมูลเกี่ยวกับภูมิอากาศ



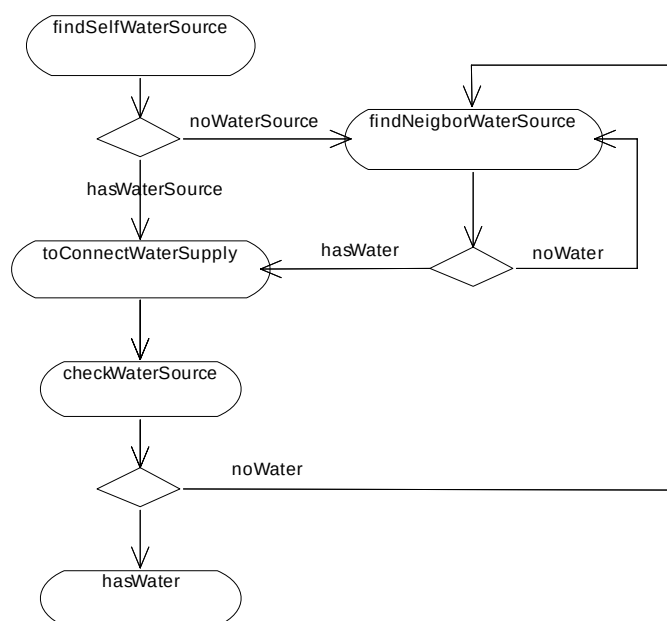
ภาพผนวกที่ ก12 คลาสไดอะแกรมของการอ่านข้อมูล



ภาพผนวกที่ ก13 ไดอะแกรมแสดงกิจกรรมของเกษตรกร

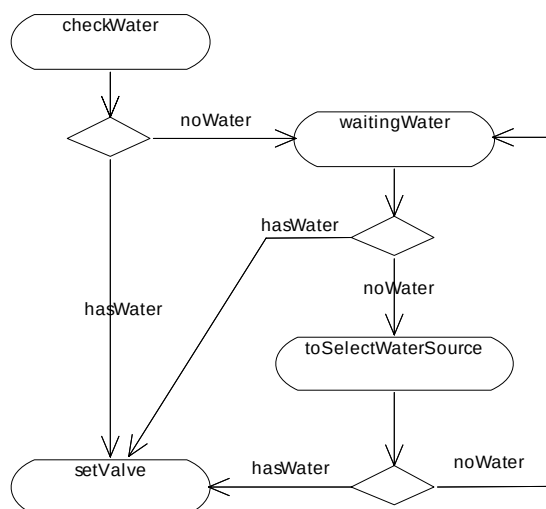
หมายเหตุ กิจกรรมการปลูกข้าวของเกษตรกร ได้แก่

- (1) การตัดสินใจปลูกข้าว “toDecidePlantingr()”
- (2) การเตรียมแปลงปลูกข้าว “toPrepareLan()”
- (3) การเลือกแหล่งน้ำ “toSectWaterSourcer()”
- (4) การหาแหล่งน้ำ “toFindWater()”
- (5) การใช้น้ำชลประทาน “toGetWater()”
- (6) การเตรียมปลูกข้าว “toPlantCrop()”
- (7) การเก็บเกี่ยวผลผลิต “toHarvest()”



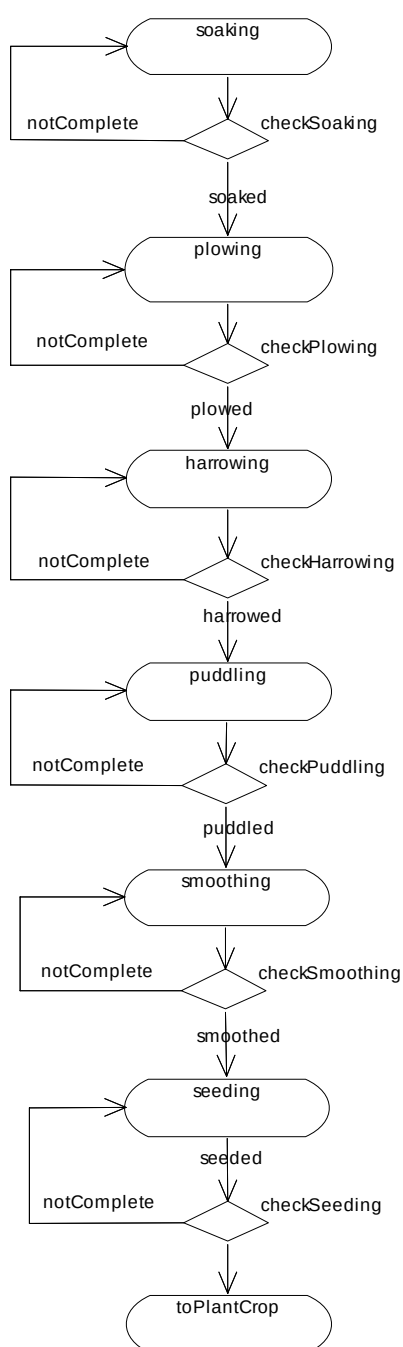
ภาพผนวกที่ ก14 โค้ดอะแกรมแสดงกระบวนการเลือกหาแหล่งน้ำ

การเลือกแหล่งน้ำกระทำผ่านเมทอด “*toSelectWaterSource()*” ซึ่งเกษตรกรจะเลือกแหล่งน้ำที่เป็นคลองชลประทานก่อน แต่ถ้าหากคลองชลประทานไม่มี เกษตรกรจะเปลี่ยนไปเลือกแหล่งน้ำอื่นซึ่งอาจเป็นแม่น้ำหรือคลองระบายน้ำ สมมติกรณีเลือกแหล่งน้ำได้แล้ว เกษตรกรจะทำการตรวจสอบว่าน้ำมีเพียงพอต่อความต้องการหรือไม่ ถ้าน้ำมีพอเกษตรกรจะนำน้ำจากแหล่งนั้นไปใช้ในการเพาะปลูก แต่ถ้าหากน้ำมีไม่เพียงพอ เกษตรกรจะทำการเลือกแหล่งน้ำใหม่อีกครั้ง ในการเลือกแหล่งน้ำครั้งใหม่นั้น จะกระทำผ่านเมทอด “*toFindWater()*” กล่าวคือ ในขั้นแรกของการเลือกแหล่งน้ำ เกษตรกรจะเลือกแหล่งน้ำที่อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกับแปลงที่ดินของตนเองก่อน ซึ่งถ้าหากไม่มีแหล่งน้ำหรือน้ำมีไม่พอแล้ว เกษตรกรจะหาแหล่งใหม่รอบ ๆ แปลงที่ดินของตนเอง และถ้าหากยังไม่สามารถหาแหล่งน้ำได้อีก เกษตรกรจะขยายการหาแหล่งน้ำรอบแปลงตนเองไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะพบแหล่งน้ำ



ภาพผนวกที่ ก15 ไคอะแกรมแสดงกระบวนการใช้น้ำชลประทาน

การทำงานของเมทอด “*toGetWater()*” เป็นการเอน้ำหรือการดึงน้ำชลประทานไปทำการเพาะปลูก ซึ่งหลังจากเกษตรกรตรวจแหล่งน้ำว่ามีเพียงพอต่อความต้องการแล้ว เกษตรกรจะทำการเปิดเอน้ำหรือดึงน้ำไปใช้ ซึ่งขั้นตอนการดึงน้ำต้องทำผ่านเมทอด “*setValve()*” ในคลาส “*LinkWaterSupply*” น้ำจึงจะไหลเข้าแปลง ในทางตรงข้าม ถ้าหากพบว่าน้ำไม่เพียงพอต่อความต้องการ เกษตรกรจะรอน้ำเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งถ้าน้ำเริ่มมีเพียงพอต่อความต้องการแล้วก็จะทำการดึงน้ำแต่ถ้าหารอน้ำแล้วพบว่าไม่มี เกษตรกรจะกลับไปใช้เมทอด “*toSelectWaterSource()*” เลือกแหล่งน้ำใหม่อีกครั้ง

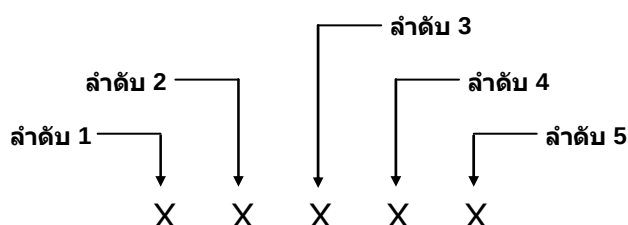


ภาพผนวกที่ ก16 ไคอะแกรมแสดงกระบวนการเตรียมแปลง

หมายเหตุ จำลองขั้นตอนการเตรียมแปลงของเกษตรกรตามลำดับ 7 ขั้นตอน ได้แก่

- (1) การเอาน้ำเข้าแปลงขั้นแรก (soaking), (2) การไถ (plowing),
- (3) การตีดิน (harrowing) (4) การทำเทือก (puddling), (5) การลูบเทือก (smoothing) และ
- (6) การหว่านเมล็ดข้าว (seeding)

แบบจำลอง jIraIs กำหนดกริดอ้างอิงเพื่อทำหน้าที่เชื่อมโยงข้อมูลในแบบจำลอง กริดอ้างอิง (idReference.asc) สร้างขึ้นจากเลขรหัสทั้งหมด 5 หลัก (xxxxx) ซึ่งตัวเลขทั้ง 5 หลัก สามารถอธิบายได้โดยเริ่มจากซ้ายไปขวา ดังนี้



ภาพผนวกที่ ก17 ลำดับเลขรหัสของกริดอ้างอิง

ตัวเลขลำดับที่ 1 มีเลขรหัสสองตัว คือ 0 และ 1 โดย

0 [0xxxx] หมายถึง ตำแหน่งกริดที่กำหนดให้ไม่ทำงาน(inactive) หรือไม่ตอบสนอง

1 [1xxxx] แทนตำแหน่งกริดที่ทำงาน (active)

ตัวเลขลำดับที่ 2 มีเลขรหัสเดียว คือ 1 โดย

1 [x1xxx] หมายถึง ตำแหน่งกริดที่เป็นพื้นผิว (surface) แบบจำลอง jIraIs กำหนดให้ทุกตำแหน่งของกริดต้องมีคุณสมบัติของพื้นผิว

ตัวเลขลำดับที่ 3 แทนชนิดของทางน้ำ มีเลขรหัสสองตัว คือ 1 และ 2 โดย

1 [xx1xx] หมายถึงทางน้ำธรรมชาติ (channel) ซึ่งอาจเป็นแม่น้ำหรือทางระบายน้ำ

2 [xx2xx] เป็นคลองชลประทาน (canal)

ตัวเลขลำดับที่ 4 แทนชนิดของทางน้ำที่เป็นตำแหน่งของประตูละบายน้ำ มีเลขรหัสสองตัว คือ 1 และ 2 โดย

1 [xxx1x] หมายถึง ประตูละบายน้ำตั้งอยู่บนทางน้ำธรรมชาติ

2 [xxx2x] หมายถึง ประตูละบายน้ำตั้งอยู่บนคลองชลประทาน

ตัวเลขลำดับที่ 5 แทนกริดสองชนิด ได้แก่ ประตูปะบายน้ำ (regulator) มีเลขรหัสสองตัว คือ 2 และ 3 โดย

2 [xxxx2] แทนทางเข้าของน้ำ (inlet)

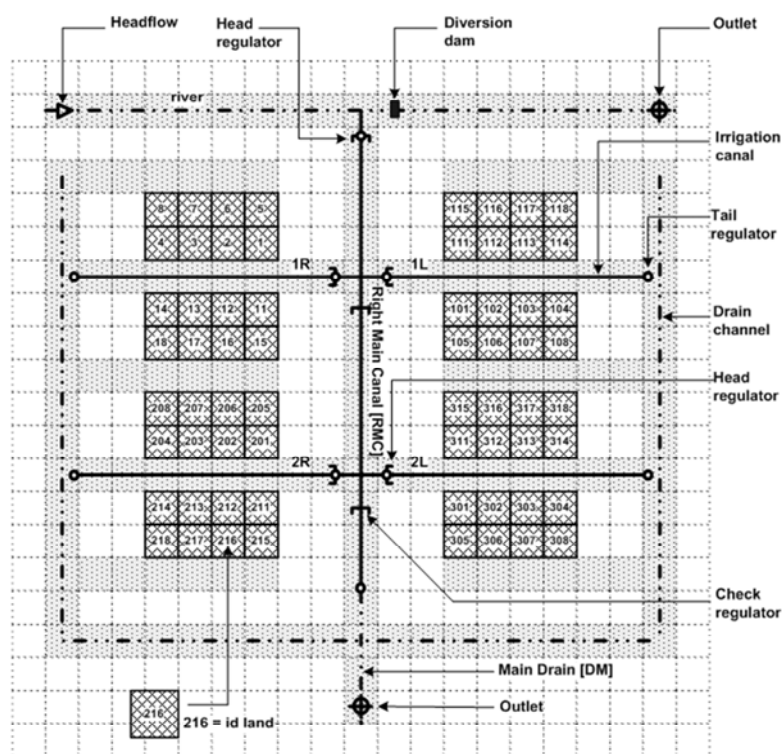
3 [xxxx3] แทนทางออกของน้ำ (outlet)

กริดที่เป็นตำแหน่งของน้ำที่ไหลเข้า-ออกโดย

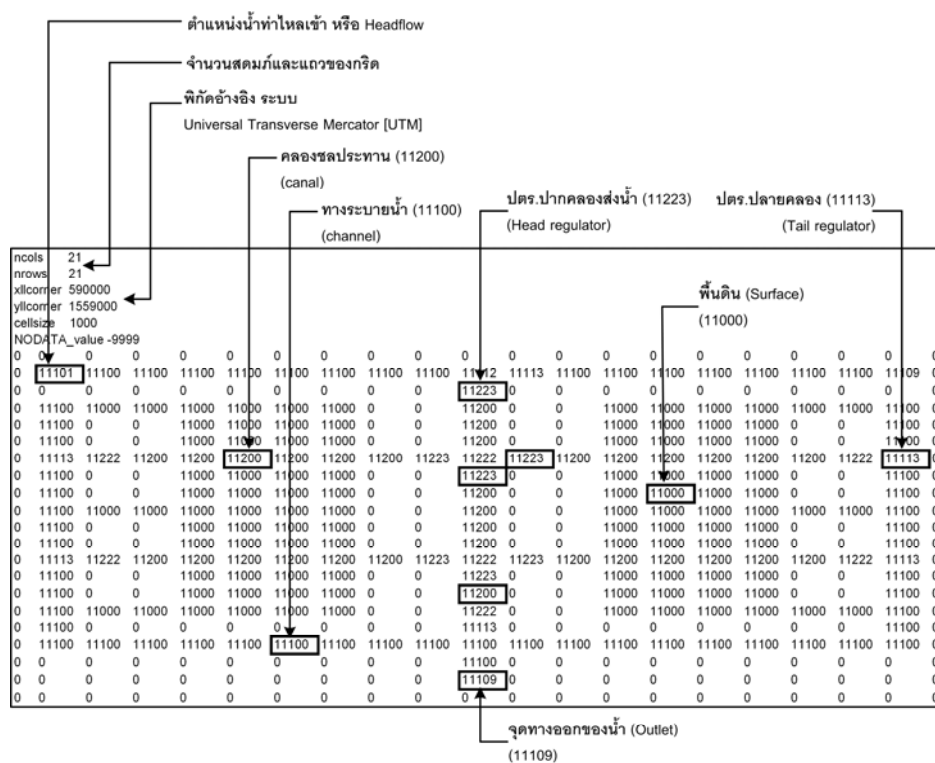
1 [xxxx1] แทนกริดที่มีน้ำไหลเข้า (headflow)

9 [xxxx9] แทนกริดที่มีน้ำไหลออก (outlet)

ตัวอย่างการสร้างข้อมูลกริดอ้างอิงแสดงไว้ในภาพผนวกที่ ก18



(a) ผังระบบชลประทาน



(b) ข้อมูลกริดอ้างอิง (idReference.asc)

ภาพผนวกที่ ก18 ตัวอย่างการสร้างข้อมูลกริดอ้างอิง

ภาคผนวก ข
การทดสอบแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลอง

ภาคผนวกที่ ข แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง และการทดสอบระบบย่อย

การศึกษาอิทธิพลของการกำหนดชั้นดินต่อผลลัพธ์แบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วย

ตารางผนวกที่ ข1 ถึง ตารางผนวกที่ ข8

ภาพผนวกที่ ข1 ถึง ภาพผนวกที่ ข20

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าชลศาสตร์ของดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง

Soil Layerdepth below			soil	Number of	Porosity	Ks	Ores	Os	n	alfa lamda	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk	
profile	id	surface	depth	compartment										density	
		(m)	(m)		(-)	(mm/d)	(m3/m3)	(m3/m3)	(-)	(1/cm)	(-)			(g/cm3)	
D1	1	0.20	0.20	1	0.490	17.6	0.092	0.490	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.28
	2	1.00	0.80	1	0.479	14.1	0.091	0.479	1.490	0.009	0.5	10	55	35	1.32
	3	2.00	1.00	1	0.474	12.6	0.091	0.474	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.34
D2	1	0.20	0.20	1	0.490	17.6	0.092	0.490	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.28
	2	1.00	0.20	4	0.482	14.9	0.091	0.482	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.31
	3	2.00	0.20	5	0.476	13.3	0.091	0.476	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.33
D3	1	0.20	0.05	4	0.493	18.6	0.092	0.493	1.488	0.009	0.5	10	55	35	1.27
	2	1.00	0.20	4	0.482	14.9	0.091	0.482	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.31
	3	2.00	1.00	1	0.474	12.6	0.091	0.474	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.34
D4	1	0.05	0.01	5	0.495	19.7	0.093	0.495	1.488	0.009	0.5	10	55	35	1.26
	2	0.20	0.05	3	0.495	19.7	0.093	0.495	1.488	0.009	0.5	10	55	35	1.26
	3	1.00	0.20	4	0.482	14.9	0.091	0.482	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.31
	4	2.00	1.00	1	0.474	12.6	0.091	0.474	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.34
D5	1	0.20	0.10	2	0.493	18.6	0.092	0.493	1.488	0.009	0.5	10	55	35	1.27
	2	1.00	0.10	8	0.482	14.9	0.091	0.482	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.31
	3	2.00	0.20	5	0.476	13.3	0.091	0.476	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.33
D6	1	0.20	0.10	2	0.493	18.6	0.092	0.493	1.488	0.009	0.5	10	55	35	1.27
	2	1.00	0.10	8	0.482	14.9	0.091	0.482	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.31
	3	2.00	0.10	10	0.476	13.3	0.091	0.476	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.33
D7	1	0.20	0.05	4	0.493	18.6	0.092	0.493	1.488	0.009	0.5	10	55	35	1.27
	2	1.00	0.05	16	0.482	14.9	0.091	0.482	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.31
	3	2.00	0.05	20	0.476	13.3	0.091	0.476	1.489	0.009	0.5	10	55	35	1.33

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าชลศาสตร์ของดินเหนียวปนทรายแป้ง

Soil Layerdepth below			soil	Number of	Porosity	Ks	Ores	Os	n	alfa lamda	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk	
profile	id	surface	depth	compartment										density	
		(m)	(m)		(-) (mm/d)	(m3/m3)	(m3/m3)		(-) (1/cm)		(-)			(g/cm3)	
D1	1	0.20	0.20	1	0.524	19.0	0.101	0.524	1.382	0.013	0.5	5	50	45	1.24
	2	1.00	0.80	1	0.512	15.1	0.100	0.512	1.384	0.013	0.5	5	50	45	1.28
	3	2.00	1.00	1	0.506	13.5	0.100	0.506	1.385	0.013	0.5	5	50	45	1.30
D2	1	0.20	0.20	1	0.524	19.0	0.101	0.524	1.382	0.013	0.5	5	50	45	1.24
	2	1.00	0.20	4	0.515	16.0	0.100	0.515	1.384	0.013	0.5	5	50	45	1.27
	3	2.00	0.20	5	0.509	14.3	0.100	0.509	1.385	0.013	0.5	5	50	45	1.29
D3	1	0.20	0.05	4	0.530	21.3	0.102	0.530	1.381	0.013	0.5	5	50	45	1.22
	2	1.00	0.20	4	0.515	16.0	0.100	0.515	1.384	0.013	0.5	5	50	45	1.27
	3	2.00	1.00	1	0.506	13.5	0.100	0.506	1.385	0.013	0.5	5	50	45	1.30
D4	1	0.05	0.01	5	0.530	21.3	0.102	0.530	1.381	0.013	0.5	5	50	45	1.22
	2	0.20	0.05	3	0.530	21.3	0.102	0.530	1.381	0.013	0.5	5	50	45	1.22
	3	1.00	0.20	4	0.515	16.0	0.100	0.515	1.384	0.013	0.5	5	50	45	1.27
	4	2.00	1.00	1	0.506	13.5	0.100	0.506	1.385	0.013	0.5	5	50	45	1.30
D5	1	0.20	0.10	2	0.527	20.1	0.101	0.527	1.382	0.013	0.5	5	50	45	1.23
	2	1.00	0.10	8	0.518	17.0	0.101	0.518	1.384	0.013	0.5	5	50	45	1.26
	3	2.00	0.20	5	0.509	14.3	0.100	0.509	1.385	0.013	0.5	5	50	45	1.29
D6	1	0.20	0.10	2	0.527	20.1	0.101	0.527	1.382	0.013	0.5	5	50	45	1.23
	2	1.00	0.10	8	0.518	17.0	0.101	0.518	1.384	0.013	0.5	5	50	45	1.26
	3	2.00	0.10	10	0.509	14.3	0.100	0.509	1.385	0.013	0.5	5	50	45	1.29
D7	1	0.20	0.05	4	0.530	21.3	0.102	0.530	1.381	0.013	0.5	5	50	45	1.22
	2	1.00	0.05	16	0.518	17.0	0.101	0.518	1.384	0.013	0.5	5	50	45	1.26
	3	2.00	0.05	20	0.509	14.3	0.100	0.509	1.385	0.013	0.5	5	50	45	1.29

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าศาสตร์ของดินเหนียว

Soil Layerdepth below			soil	Number of	Porosity	Ks	Ores	Os	n	alfa lamda	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk	
profile	id	surface	depth	compartment										density	
		(m)	(m)		(-)	(mm/d)	(m3/m3)	(m3/m3)	(-)	(1/cm)	(-)			(g/cm3)	
D1	1	0.20	0.20	1	0.4876	13.43	0.10127	0.48756	1.258	0.019	0.5	20	20	60	1.36
	2	1.00	0.80	1	0.475	11.44	0.0998	0.47501	1.252	0.019	0.5	20	20	60	1.40
	3	2.00	1.00	1	0.4688	10.58	0.09904	0.46875	1.248	0.019	0.5	20	20	60	1.42
D2	1	0.20	0.20	1	0.4876	13.43	0.10127	0.48756	1.258	0.019	0.5	20	20	60	1.36
	2	1.00	0.20	4	0.4781	11.91	0.10017	0.47814	1.253	0.019	0.5	20	20	60	1.39
	3	2.00	0.20	5	0.4688	10.58	0.09904	0.46875	1.248	0.019	0.5	20	20	60	1.42
D3	1	0.20	0.05	4	0.4907	13.98	0.10164	0.4907	1.26	0.02	0.5	20	20	60	1.35
	2	1.00	0.20	4	0.4781	11.91	0.10017	0.47814	1.253	0.019	0.5	20	20	60	1.39
	3	2.00	1.00	1	0.4688	10.58	0.09904	0.46875	1.248	0.019	0.5	20	20	60	1.42
D4	1	0.05	0.01	5	0.4939	14.56	0.10199	0.49385	1.261	0.02	0.5	20	20	60	1.34
	2	0.20	0.05	3	0.4939	14.56	0.10199	0.49385	1.261	0.02	0.5	20	20	60	1.34
	3	1.00	0.20	4	0.4781	11.91	0.10017	0.47814	1.253	0.019	0.5	20	20	60	1.39
	4	2.00	1.00	1	0.4688	10.58	0.09904	0.46875	1.248	0.019	0.5	20	20	60	1.42
D5	1	0.20	0.10	2	0.4907	13.98	0.10164	0.4907	1.26	0.02	0.5	20	20	60	1.35
	2	1.00	0.10	8	0.4781	11.91	0.10017	0.47814	1.253	0.019	0.5	20	20	60	1.39
	3	2.00	0.20	5	0.4688	10.58	0.09904	0.46875	1.248	0.019	0.5	20	20	60	1.42
D6	1	0.20	0.10	2	0.4907	13.98	0.10164	0.4907	1.26	0.02	0.5	20	20	60	1.35
	2	1.00	0.10	8	0.4781	11.91	0.10017	0.47814	1.253	0.019	0.5	20	20	60	1.39
	3	2.00	0.10	10	0.4719	11.00	0.09942	0.47188	1.25	0.019	0.5	20	20	60	1.41
D7	1	0.20	0.05	4	0.4907	13.98	0.10164	0.4907	1.26	0.02	0.5	20	20	60	1.35
	2	1.00	0.05	16	0.4781	11.91	0.10017	0.47814	1.253	0.019	0.5	20	20	60	1.39
	3	2.00	0.05	20	0.4719	11.00	0.09942	0.47188	1.25	0.019	0.5	20	20	60	1.41

ตารางผนวกที่ ๔ ค่าชลศาสตร์ของดินเหนียวปนดินร่วน

Soil Layerdepth below			soil	Number of Porosity		Ks	Ores	Os	n	alfa lamda	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk	
profile	id	surface	depth	compartment										density	
		(m)	(m)		(-)	(mm/d)	(m3/m3)	(m3/m3)	(-)	(1/cm)	(-)			(g/cm3)	
D1	1	0.20	0.20	1	0.428	7.6	0.082	0.428	1.381	0.014	0.5	35	30	35	1.46
	2	1.00	0.80	1	0.417	6.1	0.080	0.417	1.365	0.014	0.5	35	30	35	1.50
	3	2.00	1.00	1	0.412	5.5	0.079	0.412	1.356	0.014	0.5	35	30	35	1.52
D2	1	0.20	0.20	1	0.428	7.6	0.082	0.428	1.381	0.014	0.5	35	30	35	1.46
	2	1.00	0.20	4	0.420	6.5	0.081	0.420	1.369	0.014	0.5	35	30	35	1.49
	3	2.00	0.20	5	0.414	5.8	0.080	0.414	1.361	0.014	0.5	35	30	35	1.51
D3	1	0.20	0.05	4	0.433	8.4	0.083	0.433	1.388	0.014	0.5	35	30	35	1.44
	2	1.00	0.20	4	0.420	6.5	0.081	0.420	1.369	0.014	0.5	35	30	35	1.49
	3	2.00	1.00	1	0.412	5.5	0.079	0.412	1.356	0.014	0.5	35	30	35	1.52
D4	1	0.05	0.01	5	0.433	8.4	0.083	0.433	1.388	0.014	0.5	35	30	35	1.44
	2	0.20	0.05	3	0.433	8.4	0.083	0.433	1.388	0.014	0.5	35	30	35	1.44
	3	1.00	0.20	4	0.420	6.5	0.081	0.420	1.369	0.014	0.5	35	30	35	1.49
	4	2.00	1.00	1	0.412	5.5	0.079	0.412	1.356	0.014	0.5	35	30	35	1.52
D5	1	0.20	0.10	2	0.430	8.0	0.082	0.430	1.385	0.014	0.5	35	30	35	1.45
	2	1.00	0.10	8	0.420	6.5	0.081	0.420	1.369	0.014	0.5	35	30	35	1.49
	3	2.00	0.20	5	0.414	5.8	0.080	0.414	1.361	0.014	0.5	35	30	35	1.51
D6	1	0.20	0.10	2	0.430	8.0	0.082	0.430	1.385	0.014	0.5	35	30	35	1.45
	2	1.00	0.10	8	0.420	6.5	0.081	0.420	1.369	0.014	0.5	35	30	35	1.49
	3	2.00	0.10	10	0.414	5.8	0.080	0.414	1.361	0.014	0.5	35	30	35	1.51
D7	1	0.20	0.05	4	0.433	8.4	0.083	0.433	1.388	0.014	0.5	35	30	35	1.44
	2	1.00	0.05	16	0.420	6.5	0.081	0.420	1.369	0.014	0.5	35	30	35	1.49
	3	2.00	0.05	20	0.414	5.8	0.080	0.414	1.361	0.014	0.5	35	30	35	1.51

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าชลศาสตร์ของดินร่วน

Soil Layerdepth below			soil	Number of Porosity		Ks	Ores	Os	n	alfa lamda	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk	
profile	id	surface	depth	compartment										density	
		(m)	(m)		(-)	(mm/d)	(m3/m3)	(m3/m3)	(-)	(1/cm)	(-)			(g/cm3)	
D1	1	0.20	0.20	1	0.383	9.5	0.059	0.383	1.494	0.010	0.5	40	40	20	1.49
	2	1.00	0.80	1	0.374	8.1	0.058	0.374	1.472	0.011	0.5	40	40	20	1.53
	3	2.00	1.00	1	0.370	7.5	0.057	0.370	1.460	0.011	0.5	40	40	20	1.55
D2	1	0.20	0.20	1	0.383	9.5	0.059	0.383	1.494	0.010	0.5	40	40	20	1.49
	2	1.00	0.20	4	0.376	8.4	0.058	0.376	1.478	0.011	0.5	40	40	20	1.52
	3	2.00	0.20	5	0.372	7.8	0.058	0.372	1.466	0.011	0.5	40	40	20	1.54
D3	1	0.20	0.05	4	0.387	10.2	0.060	0.387	1.503	0.010	0.5	40	40	20	1.47
	2	1.00	0.20	4	0.376	8.4	0.058	0.376	1.478	0.011	0.5	40	40	20	1.52
	3	2.00	1.00	1	0.370	7.5	0.057	0.370	1.460	0.011	0.5	40	40	20	1.55
D4	1	0.05	0.01	5	0.387	10.2	0.060	0.387	1.503	0.010	0.5	40	40	20	1.47
	2	0.20	0.05	3	0.387	10.2	0.060	0.387	1.503	0.010	0.5	40	40	20	1.47
	3	1.00	0.20	4	0.376	8.4	0.058	0.376	1.478	0.011	0.5	40	40	20	1.52
	4	2.00	1.00	1	0.370	7.5	0.057	0.370	1.460	0.011	0.5	40	40	20	1.55
D5	1	0.20	0.10	2	0.385	9.9	0.060	0.385	1.498	0.010	0.5	40	40	20	1.48
	2	1.00	0.10	8	0.376	8.4	0.058	0.376	1.478	0.011	0.5	40	40	20	1.52
	3	2.00	0.20	5	0.372	7.8	0.058	0.372	1.466	0.011	0.5	40	40	20	1.54
D6	1	0.20	0.10	2	0.385	9.9	0.060	0.385	1.498	0.010	0.5	40	40	20	1.48
	2	1.00	0.10	8	0.376	8.4	0.058	0.376	1.478	0.011	0.5	40	40	20	1.52
	3	2.00	0.10	10	0.372	7.8	0.058	0.372	1.466	0.011	0.5	40	40	20	1.54
D7	1	0.20	0.05	4	0.387	10.2	0.060	0.387	1.503	0.010	0.5	40	40	20	1.47
	2	1.00	0.05	16	0.379	8.8	0.059	0.379	1.483	0.011	0.5	40	40	20	1.51
	3	2.00	0.05	20	0.372	7.8	0.058	0.372	1.466	0.011	0.5	40	40	20	1.54

ตารางผนวกที่ ข6 ค่าศาสตร์ของดินร่วนปนดินเหนียวปนทราย

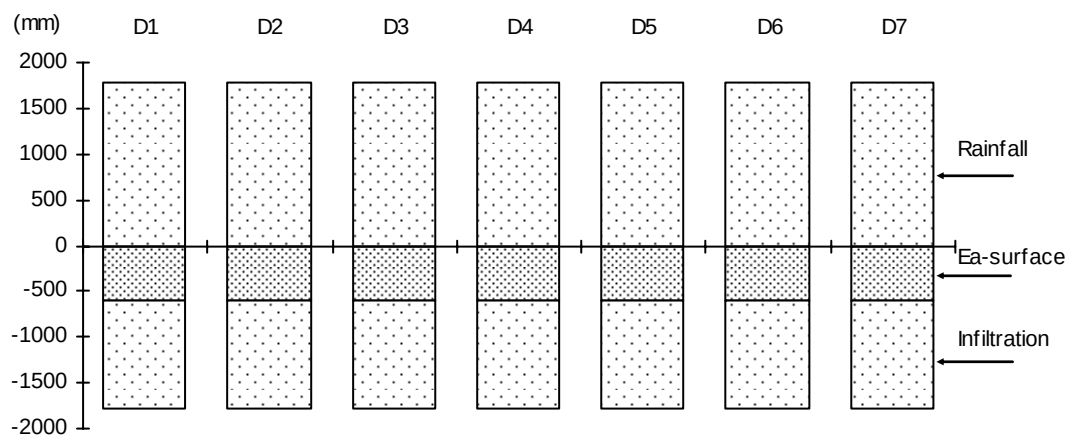
Soil Layerdepth below			soil	Number of	Porosity	Ks	Ores	Os	n	alfa lamda	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk	
profile	id	surface	depth	compartment										density	
		(m)	(m)		(-) (mm/d)	(m3/m3)	(m3/m3)		(-) (1/cm)		(-)			(g/cm3)	
D1	1	0.20	0.20	1	0.398	15.4	0.070	0.398	1.275	0.024	0.5	60	10	30	1.56
	2	1.00	0.80	1	0.383	11.9	0.068	0.383	1.247	0.026	0.5	60	10	30	1.61
	3	2.00	1.00	1	0.380	11.3	0.067	0.380	1.242	0.026	0.5	60	10	30	1.62
D2	1	0.20	0.20	1	0.398	15.4	0.070	0.398	1.275	0.024	0.5	60	10	30	1.56
	2	1.00	0.20	4	0.386	12.5	0.068	0.386	1.253	0.025	0.5	60	10	30	1.60
	3	2.00	0.20	5	0.380	11.3	0.067	0.380	1.242	0.026	0.5	60	10	30	1.62
D3	1	0.20	0.05	4	0.400	16.2	0.071	0.400	1.281	0.024	0.5	60	10	30	1.55
	2	1.00	0.20	4	0.386	12.5	0.068	0.386	1.253	0.025	0.5	60	10	30	1.60
	3	2.00	1.00	1	0.380	11.3	0.067	0.380	1.242	0.026	0.5	60	10	30	1.62
D4	1	0.05	0.01	5	0.403	17.1	0.071	0.403	1.286	0.024	0.5	60	10	30	1.54
	2	0.20	0.05	3	0.403	17.1	0.071	0.403	1.286	0.024	0.5	60	10	30	1.54
	3	1.00	0.20	4	0.386	12.5	0.068	0.386	1.253	0.025	0.5	60	10	30	1.60
	4	2.00	1.00	1	0.380	11.3	0.067	0.380	1.242	0.026	0.5	60	10	30	1.62
D5	1	0.20	0.10	2	0.400	16.2	0.071	0.400	1.281	0.024	0.5	60	10	30	1.55
	2	1.00	0.10	8	0.389	13.2	0.069	0.389	1.258	0.025	0.5	60	10	30	1.59
	3	2.00	0.20	5	0.380	11.3	0.067	0.380	1.242	0.026	0.5	60	10	30	1.62
D6	1	0.20	0.10	2	0.400	16.2	0.071	0.400	1.281	0.024	0.5	60	10	30	1.55
	2	1.00	0.10	8	0.389	13.2	0.069	0.389	1.258	0.025	0.5	60	10	30	1.59
	3	2.00	0.10	10	0.380	11.3	0.067	0.380	1.242	0.026	0.5	60	10	30	1.62
D7	1	0.20	0.05	4	0.400	16.2	0.071	0.400	1.281	0.024	0.5	60	10	30	1.55
	2	1.00	0.05	16	0.389	13.2	0.069	0.389	1.258	0.025	0.5	60	10	30	1.59
	3	2.00	0.05	20	0.380	11.3	0.067	0.380	1.242	0.026	0.5	60	10	30	1.62

ตารางผนวกที่ ข7 ค่าชลศาสตร์ของดินร่วนปนทราย

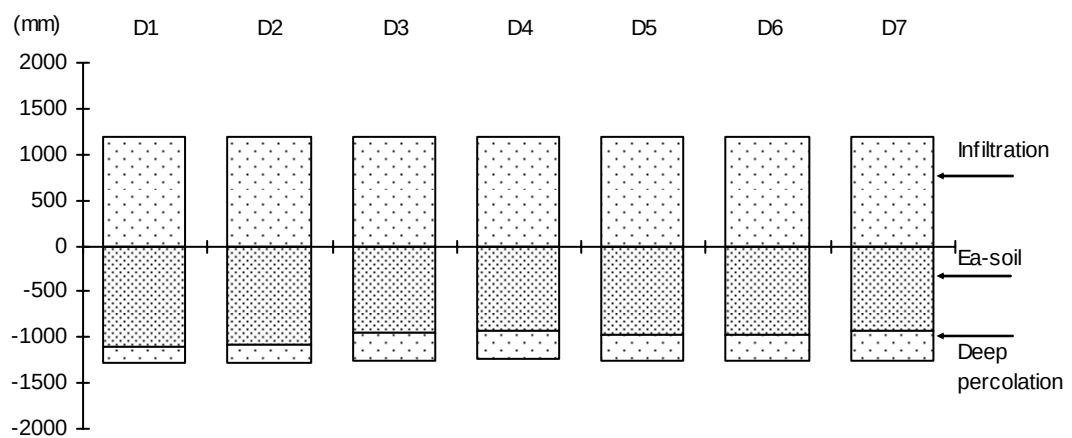
Soil Layer			depth below	soil	Number of		Porosity	Ks	Ores	Os	n	alfa	lamda	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk
profile	id	surface	depth	compartment													density
		(m)	(m)			(-) (mm/d)	(m3/m3)	(m3/m3)		(-) (1/cm)		(-)					(g/cm3)
D1	1	0.20	0.20	1	0.359	30.5	0.040	0.359	1.414	0.034	0.5	65	25	10			1.58
	2	1.00	0.80	1	0.349	26.1	0.039	0.349	1.391	0.037	0.5	65	25	10			1.62
	3	2.00	1.00	1	0.344	24.0	0.038	0.344	1.379	0.038	0.5	65	25	10			1.64
D2	1	0.20	0.20	1	0.359	30.5	0.040	0.359	1.414	0.034	0.5	65	25	10			1.58
	2	1.00	0.20	4	0.352	27.1	0.039	0.352	1.397	0.036	0.5	65	25	10			1.61
	3	2.00	0.20	5	0.347	25.0	0.039	0.347	1.385	0.037	0.5	65	25	10			1.63
D3	1	0.20	0.05	4	0.364	33.0	0.040	0.364	1.423	0.033	0.5	65	25	10			1.56
	2	1.00	0.20	4	0.352	27.1	0.039	0.352	1.397	0.036	0.5	65	25	10			1.61
	3	2.00	1.00	1	0.344	24.0	0.038	0.344	1.379	0.038	0.5	65	25	10			1.64
D4	1	0.05	0.01	5	0.364	33.0	0.040	0.364	1.423	0.033	0.5	65	25	10			1.56
	2	0.20	0.05	3	0.364	33.0	0.040	0.364	1.423	0.033	0.5	65	25	10			1.56
	3	1.00	0.20	4	0.352	27.1	0.039	0.352	1.397	0.036	0.5	65	25	10			1.61
	4	2.00	1.00	1	0.344	24.0	0.038	0.344	1.379	0.038	0.5	65	25	10			1.64
D5	1	0.20	0.10	2	0.362	31.7	0.040	0.362	1.419	0.034	0.5	65	25	10			1.57
	2	1.00	0.10	8	0.354	28.2	0.039	0.354	1.403	0.035	0.5	65	25	10			1.60
	3	2.00	0.20	5	0.347	25.0	0.039	0.347	1.385	0.037	0.5	65	25	10			1.63
D6	1	0.20	0.10	2	0.362	31.7	0.040	0.362	1.419	0.034	0.5	65	25	10			1.57
	2	1.00	0.10	8	0.354	28.2	0.039	0.354	1.403	0.035	0.5	65	25	10			1.60
	3	2.00	0.10	10	0.347	25.0	0.039	0.347	1.385	0.037	0.5	65	25	10			1.63
D7	1	0.20	0.05	4	0.364	33.0	0.040	0.364	1.423	0.033	0.5	65	25	10			1.56
	2	1.00	0.05	16	0.354	28.2	0.039	0.354	1.403	0.035	0.5	65	25	10			1.60
	3	2.00	0.05	20	0.347	25.0	0.039	0.347	1.385	0.037	0.5	65	25	10			1.63

ตารางผนวกที่ ข8 ค่าชลศาสตร์ของดินทรายปนดินร่วน

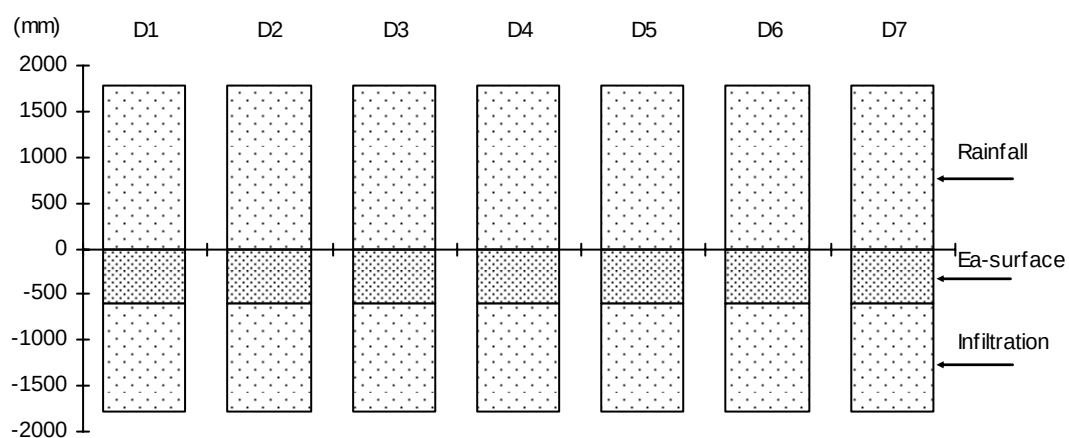
Soil Layerdepth below			soil	Number of Porosity		Ks	Ores	Os	n	alfa lamda	%Sand	%Silt	%Clay	Bulk	
profile	id	surface	depth	compartment										density	
		(m)	(m)		(-) (mm/d)	(m3/m3)	(m3/m3)		(-) (1/cm)		(-)			(g/cm3)	
D1	1	0.20	0.20	1	0.359	91.6	0.040	0.359	1.776	0.043	0.5	80	15	5	1.59
	2	1.00	0.80	1	0.345	76.3	0.040	0.345	1.747	0.044	0.5	80	15	5	1.64
	3	2.00	1.00	1	0.342	73.5	0.039	0.342	1.740	0.045	0.5	80	15	5	1.65
D2	1	0.20	0.20	1	0.359	91.6	0.040	0.359	1.776	0.043	0.5	80	15	5	1.59
	2	1.00	0.20	4	0.351	82.2	0.040	0.351	1.760	0.044	0.5	80	15	5	1.62
	3	2.00	0.20	5	0.342	73.5	0.039	0.342	1.740	0.045	0.5	80	15	5	1.65
D3	1	0.20	0.05	4	0.362	94.9	0.040	0.362	1.781	0.043	0.5	80	15	5	1.58
	2	1.00	0.20	4	0.351	82.2	0.040	0.351	1.760	0.044	0.5	80	15	5	1.62
	3	2.00	1.00	1	0.342	73.5	0.039	0.342	1.740	0.045	0.5	80	15	5	1.65
D4	1	0.05	0.01	5	0.365	98.3	0.041	0.365	1.785	0.042	0.5	80	15	5	1.57
	2	0.20	0.05	3	0.365	98.3	0.041	0.365	1.785	0.042	0.5	80	15	5	1.57
	3	1.00	0.20	4	0.351	82.2	0.040	0.351	1.760	0.044	0.5	80	15	5	1.62
	4	2.00	1.00	1	0.342	73.5	0.039	0.342	1.740	0.045	0.5	80	15	5	1.65
D5	1	0.20	0.10	2	0.362	94.9	0.040	0.362	1.781	0.043	0.5	80	15	5	1.58
	2	1.00	0.10	8	0.351	82.2	0.040	0.351	1.760	0.044	0.5	80	15	5	1.62
	3	2.00	0.20	5	0.342	73.5	0.039	0.342	1.740	0.045	0.5	80	15	5	1.65
D6	1	0.20	0.10	2	0.362	94.9	0.040	0.362	1.781	0.043	0.5	80	15	5	1.58
	2	1.00	0.10	8	0.351	82.2	0.040	0.351	1.760	0.044	0.5	80	15	5	1.62
	3	2.00	0.10	10	0.342	73.5	0.039	0.342	1.740	0.045	0.5	80	15	5	1.65
D7	1	0.20	0.05	4	0.362	94.9	0.040	0.362	1.781	0.043	0.5	80	15	5	1.58
	2	1.00	0.05	16	0.351	82.2	0.040	0.351	1.760	0.044	0.5	80	15	5	1.62
	3	2.00	0.05	20	0.342	73.5	0.039	0.342	1.740	0.045	0.5	80	15	5	1.65



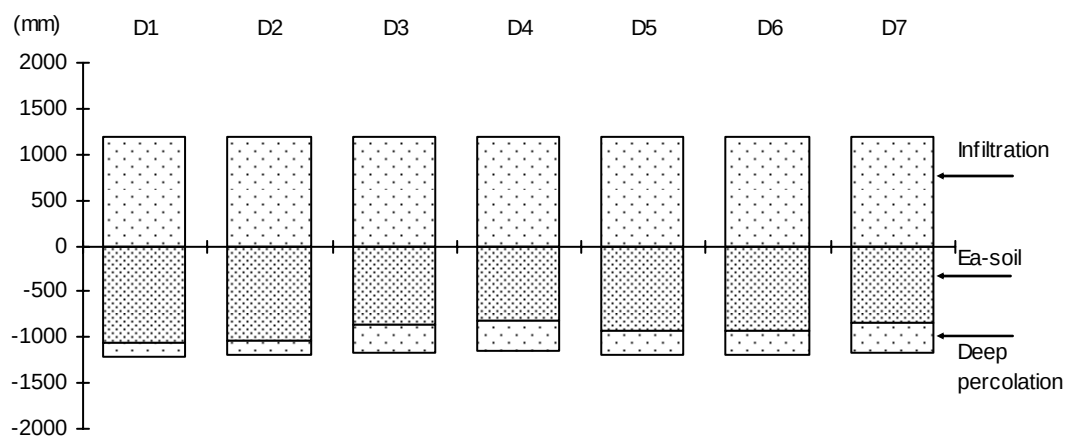
ภาพผนวกที่ ข1 การเปรียบเทียบสมดุลน้ำบนผิวดินในดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง



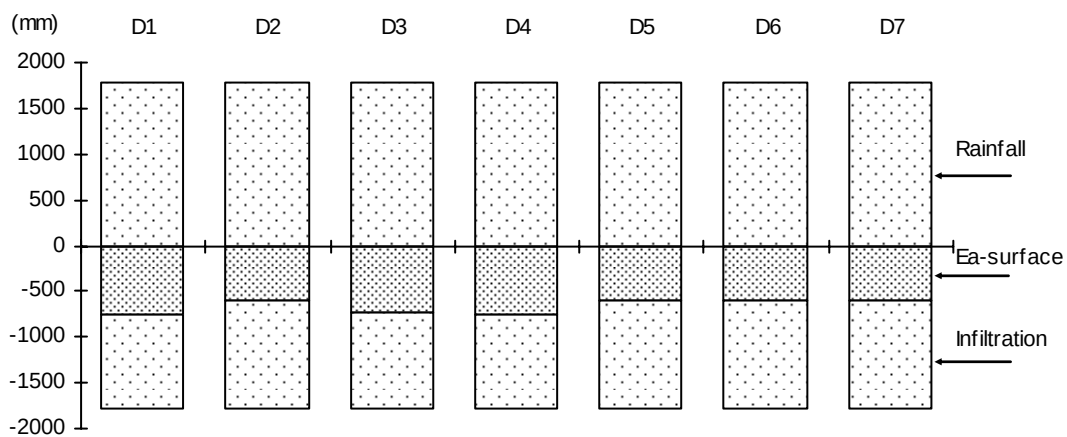
ภาพผนวกที่ ข2 การเปรียบเทียบสมดุลน้ำในดิน ของในดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง



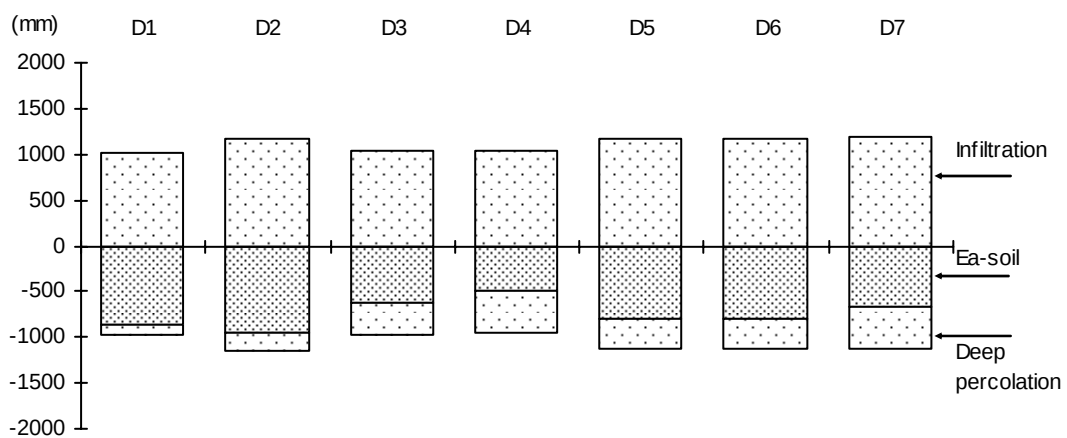
ภาพผนวกที่ ข3 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินเหนียวปนทรายแป้ง



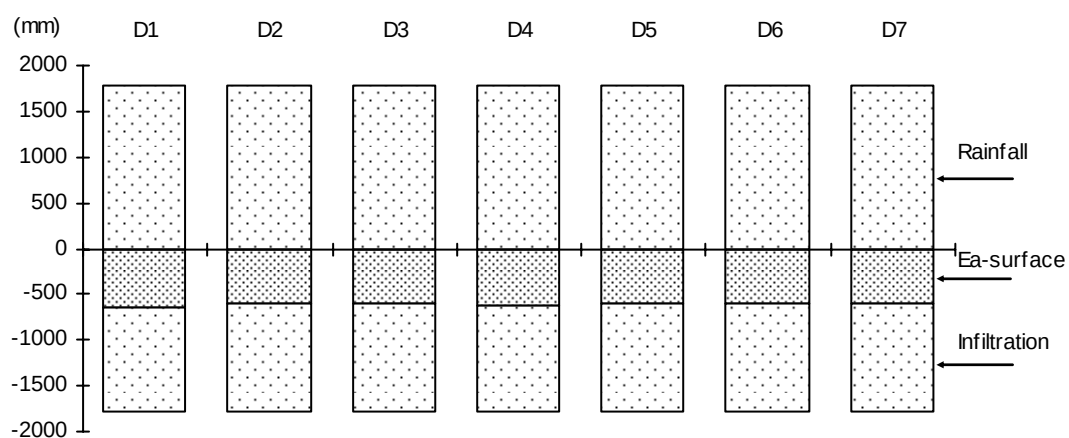
ภาพผนวกที่ ข4 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินเหนียวปนทรายแป้ง



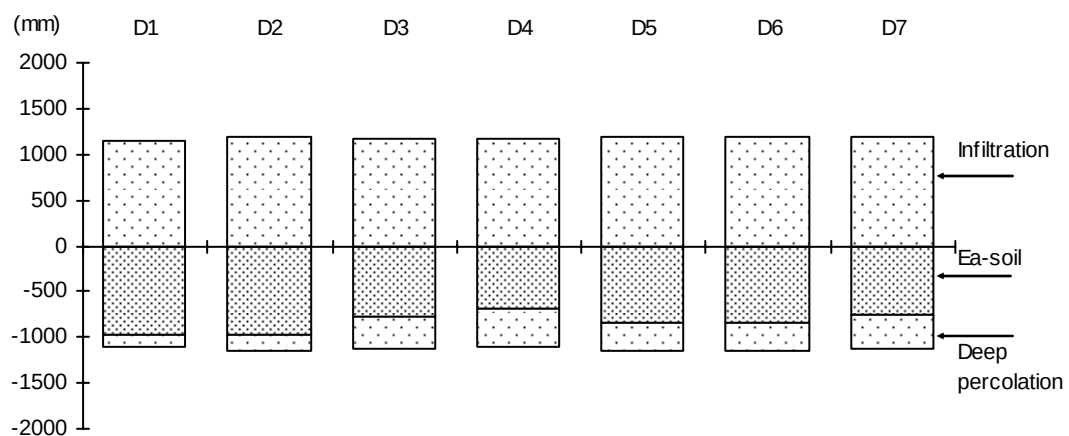
ภาพผนวกที่ ข5 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินเหนียว



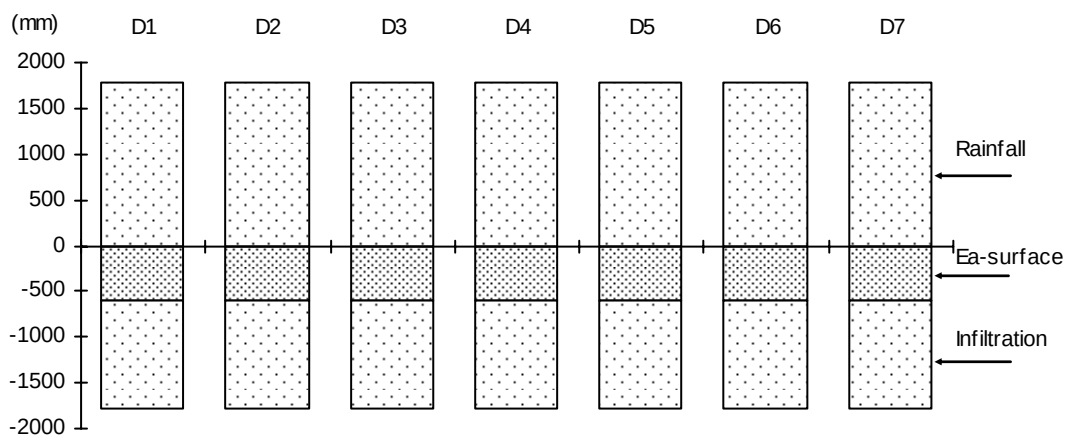
ภาพผนวกที่ ข6 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินเหนียว



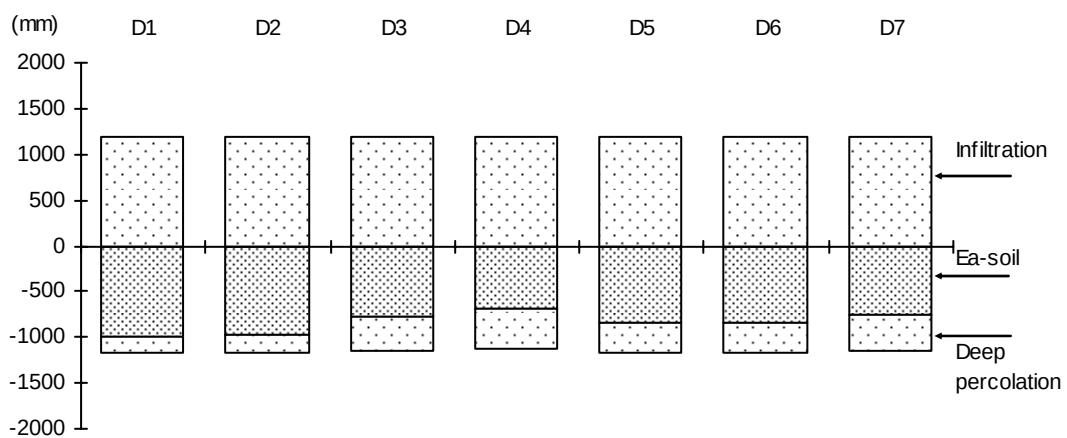
ภาพผนวกที่ ข7 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินเหนียวปนดินร่วน



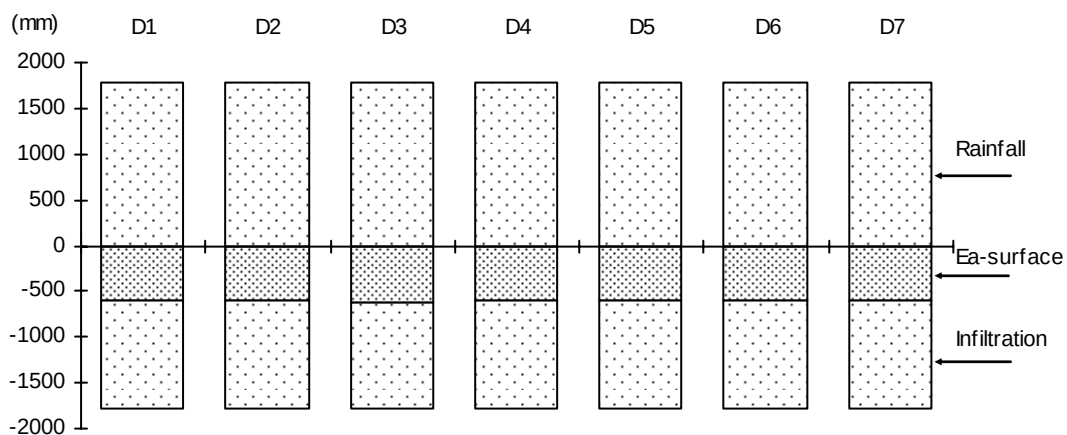
ภาพผนวกที่ ข8 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินเหนียวปนดินร่วน



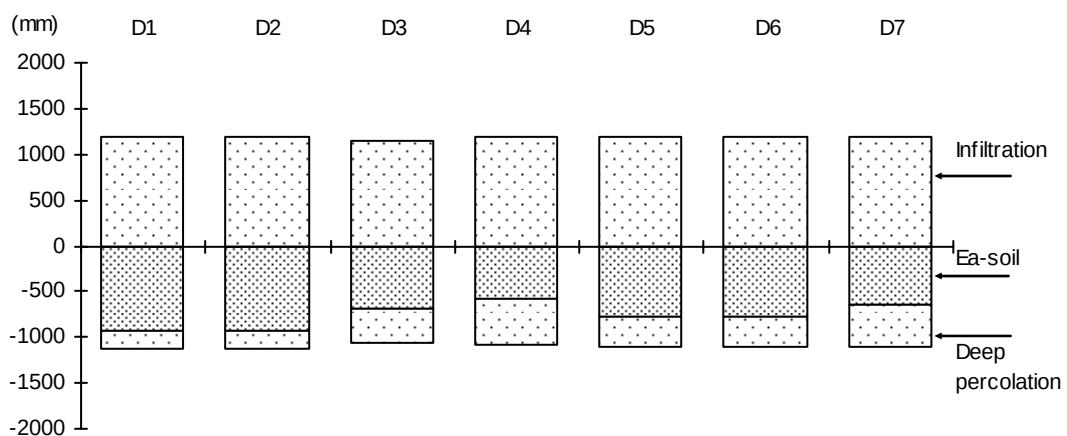
ภาพผนวกที่ ข9 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินร่วน



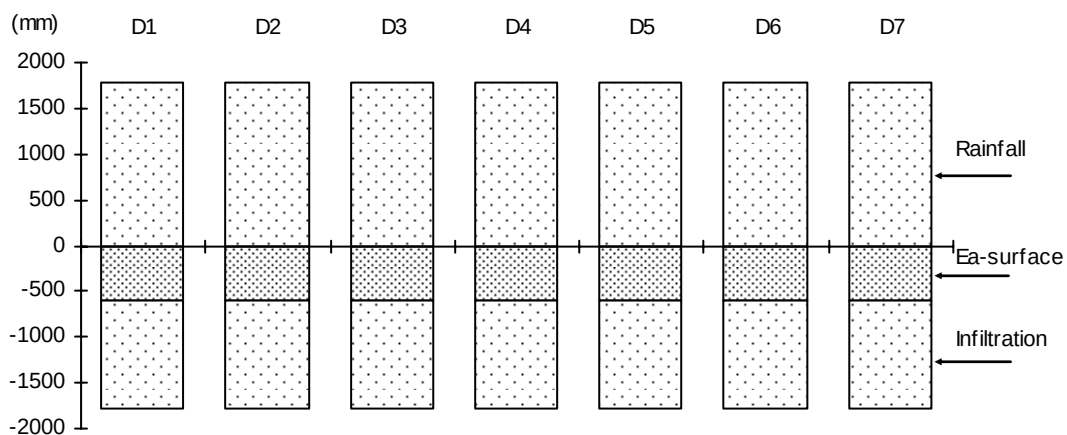
ภาพผนวกที่ ข10 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินร่วน



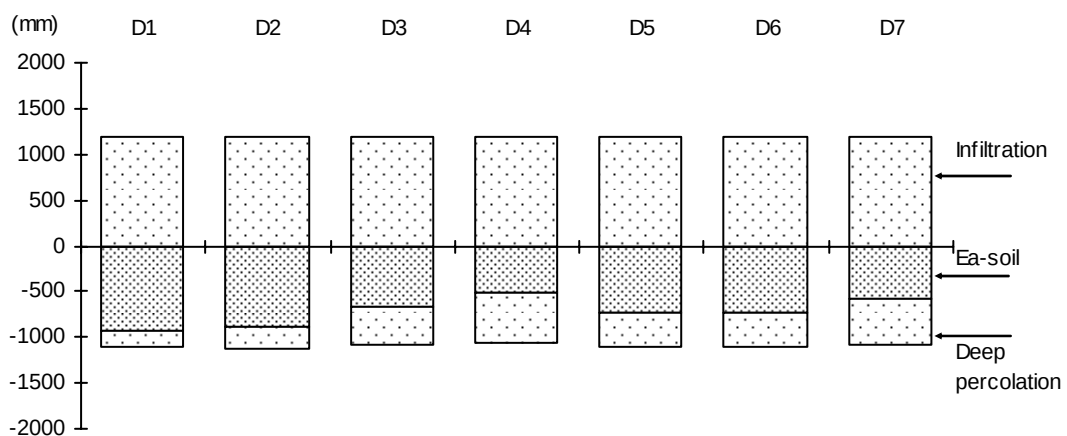
ภาพผนวกที่ ข11 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินร่วนปนดินเหนียวปนทราย



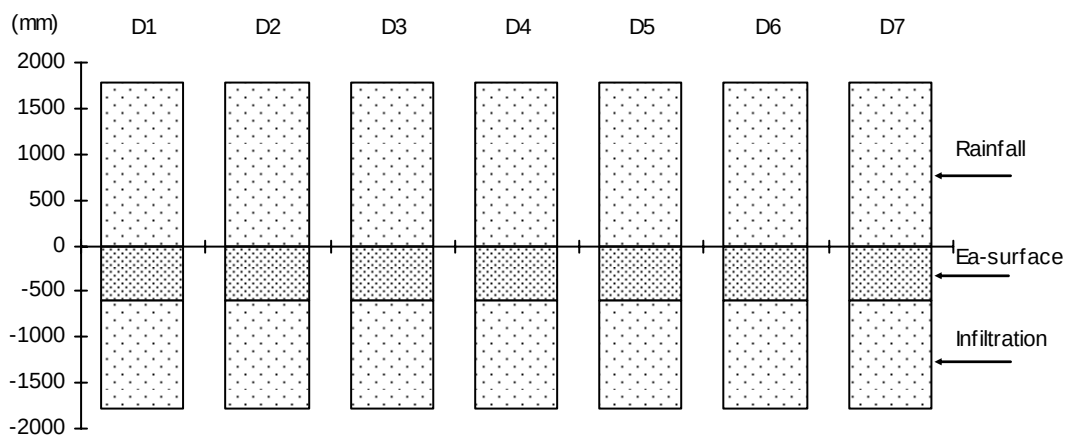
ภาพผนวกที่ ข12 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินร่วนปนดินเหนียวปนทราย



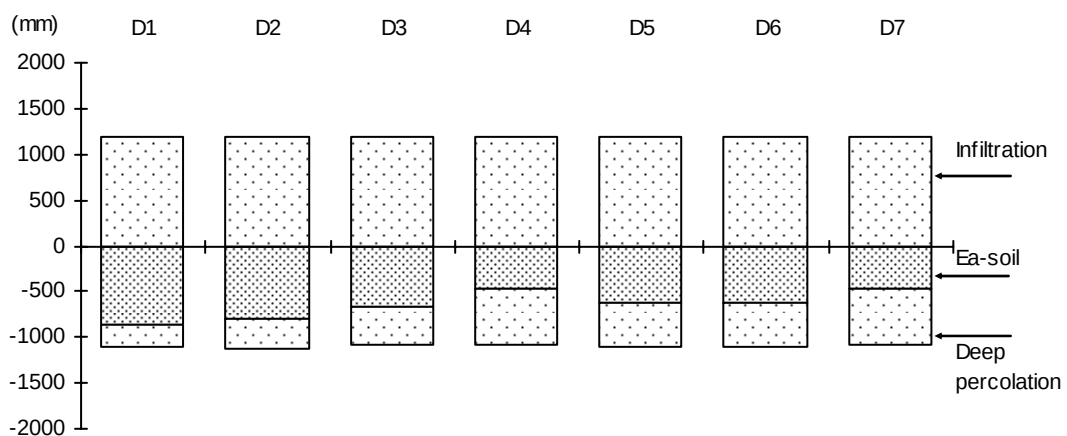
ภาพผนวกที่ ข13 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินร่วนปนทราย



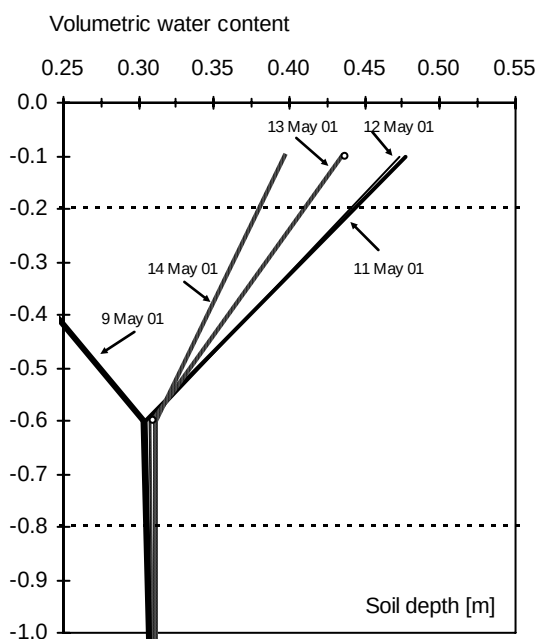
ภาพผนวกที่ ข14 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินร่วนปนทราย



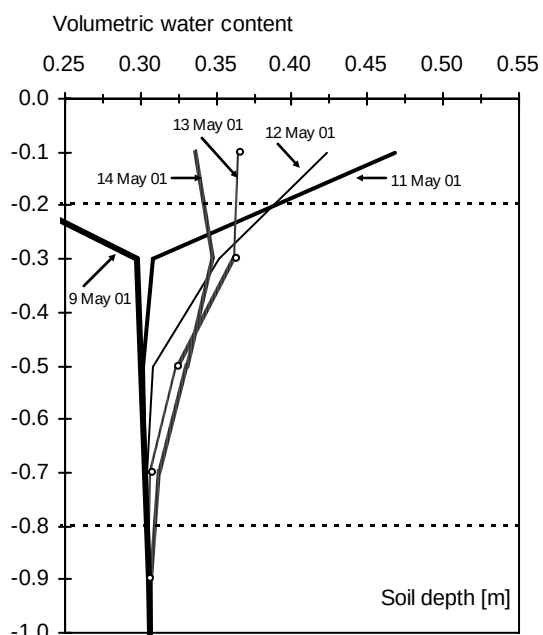
ภาพผนวกที่ ข15 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำบนผิวดินในดินทรายปนดินร่วน



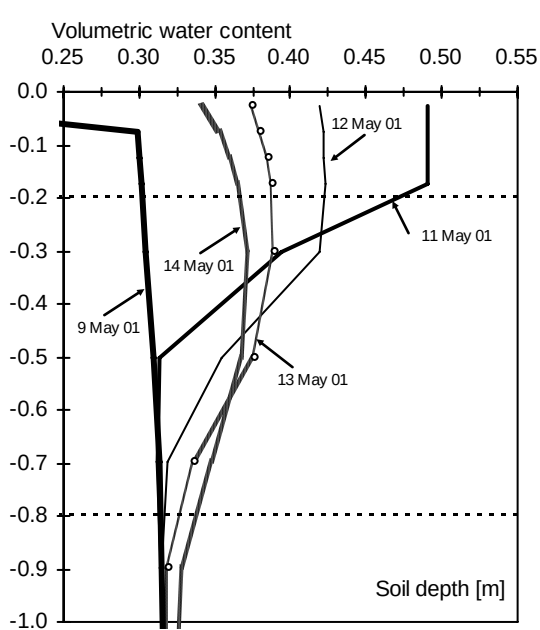
ภาพผนวกที่ ข16 การเปรียบเทียบสมมูลน้ำในดินในดินทรายปนดินร่วน



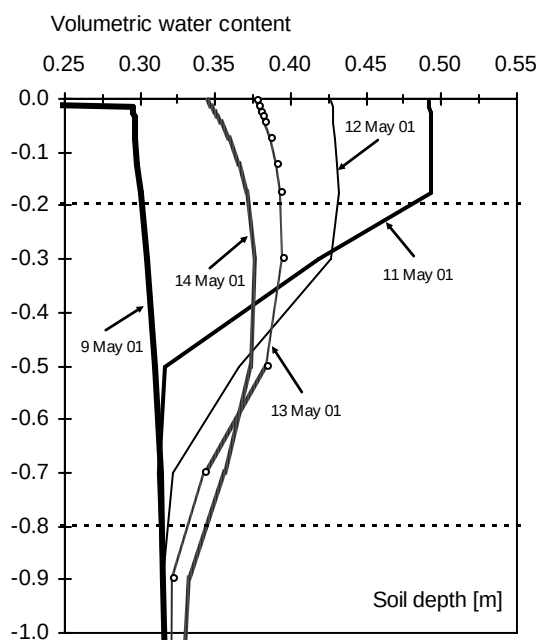
(a) Soil profile "D1"



(b) Soil profile "D2"

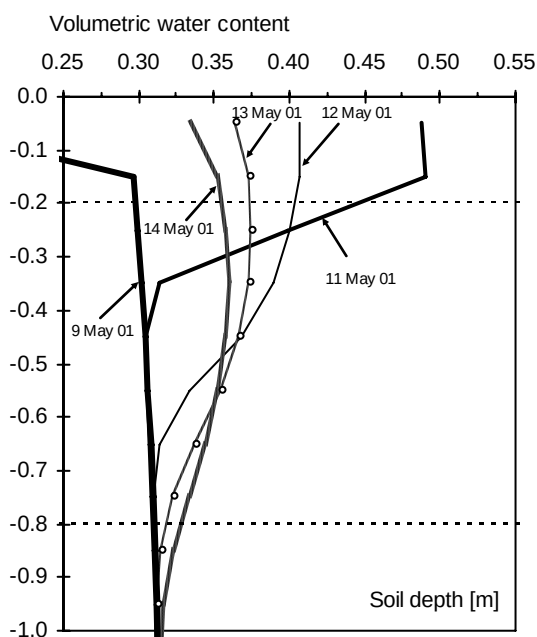


(c) Soil profile "D3"

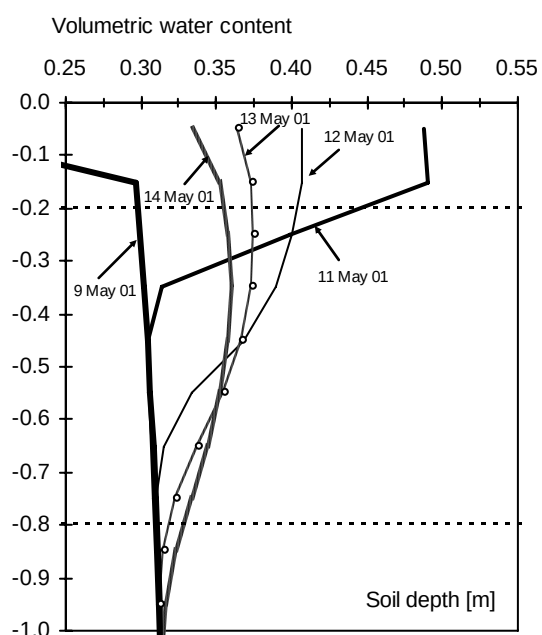


(d) Soil profile "D4"

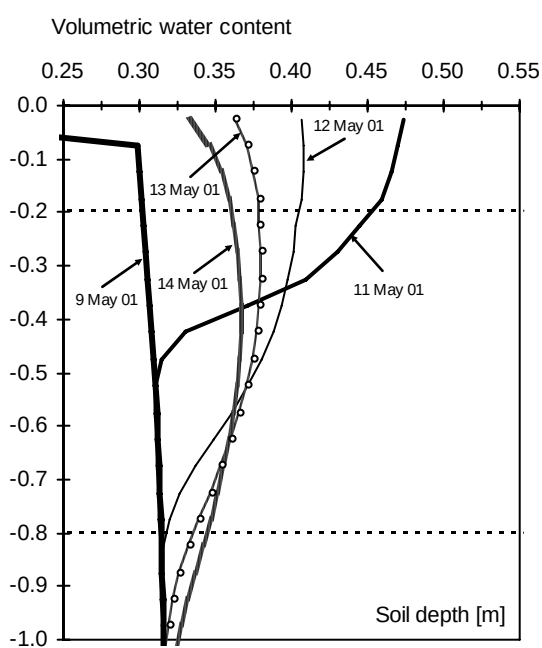
ภาพผนวกที่ ข17 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดิน
ในกรณีดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง



(e) Soil profile "D5"

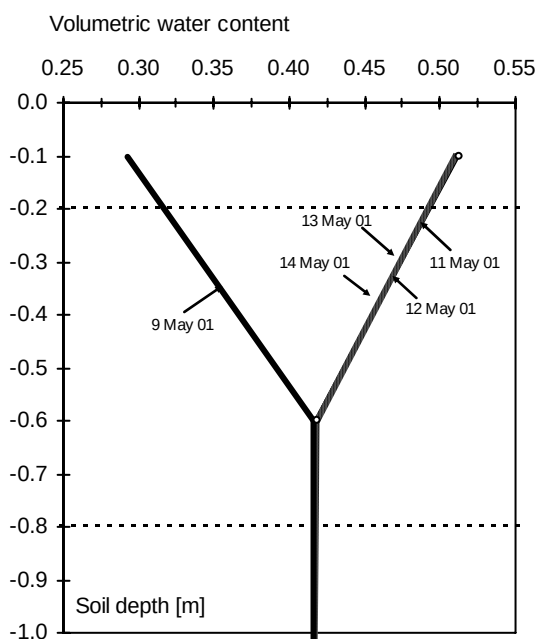


(f) Soil profile "D6"

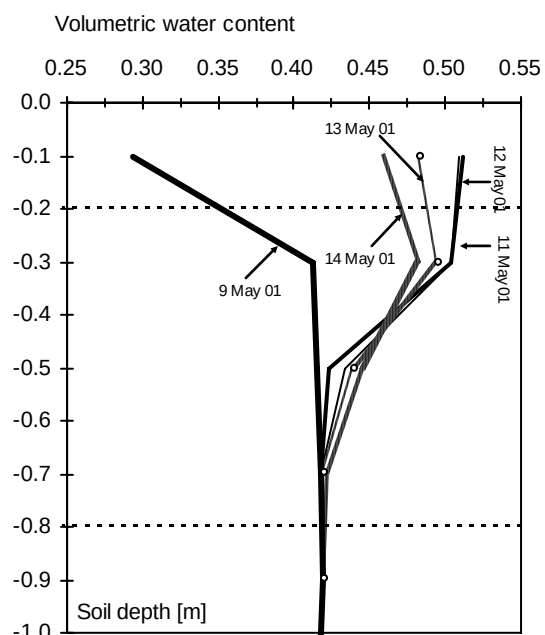


(g) Soil profile "D7"

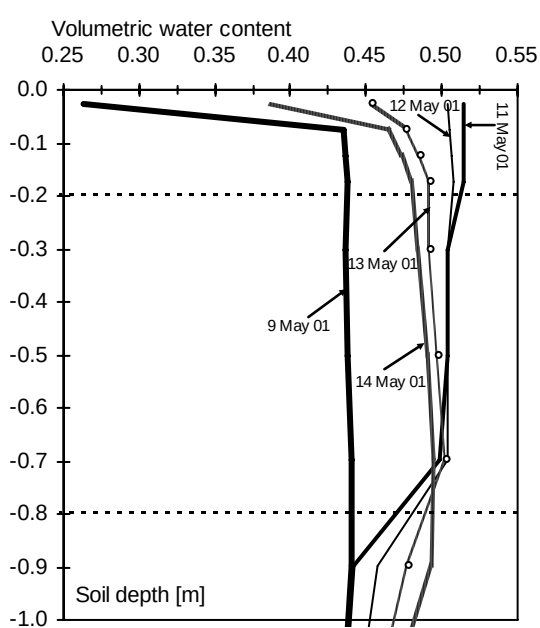
ภาพผนวกที่ ข17 (ต่อ)



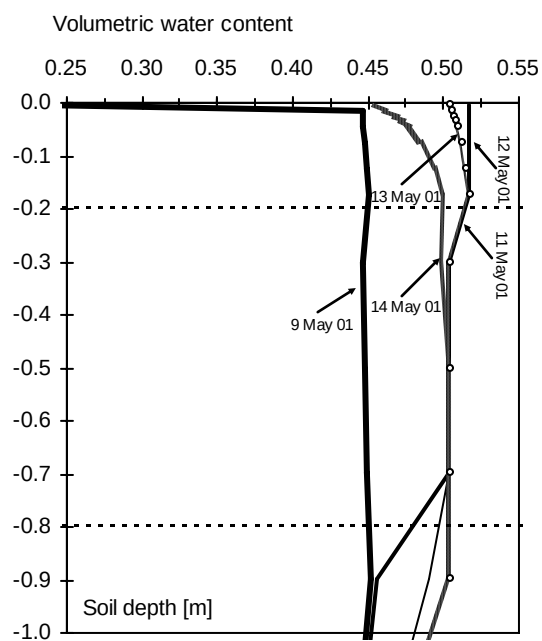
(a) Soil profile "D1"



(b) Soil profile "D2"

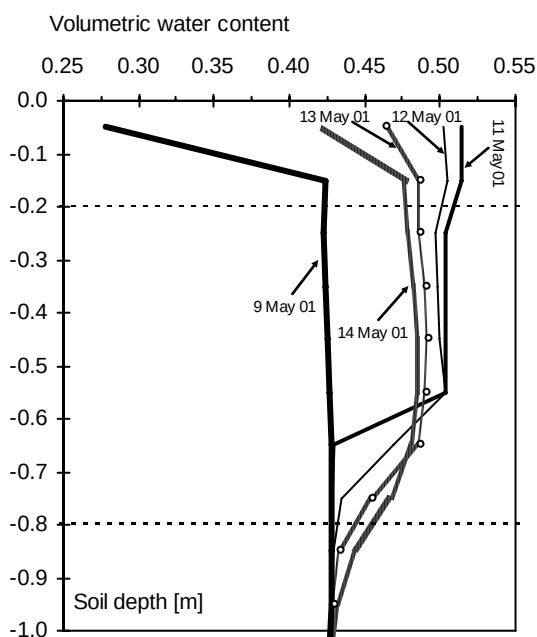


(c) Soil profile "D3"

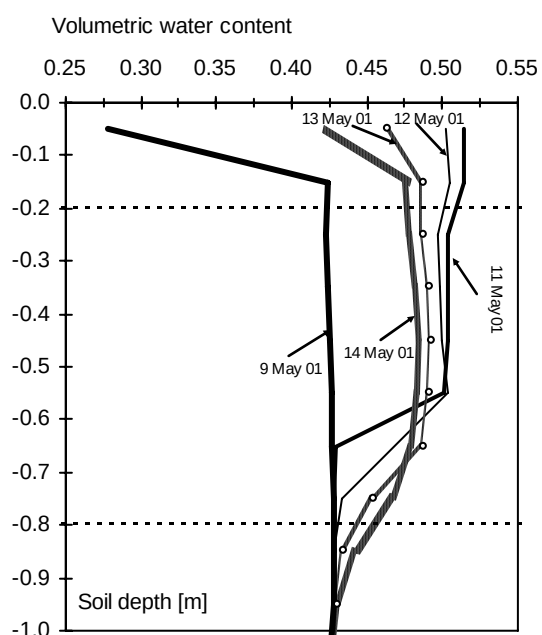


(d) Soil profile "D4"

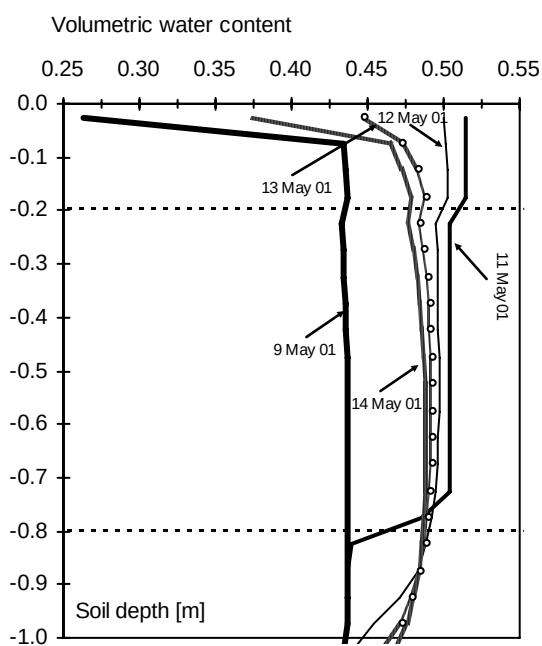
ภาพผนวกที่ ข18 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดิน
ในกรณีดินเหนียว



(e) Soil profile "D5"

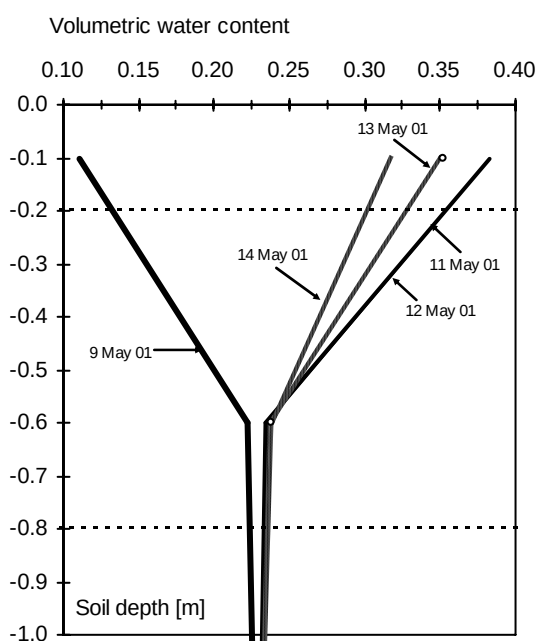


(f) Soil profile "D6"

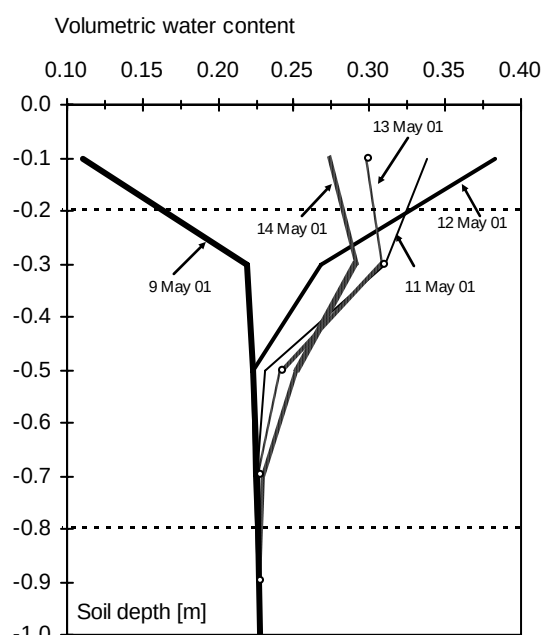


(g) Soil profile "D7"

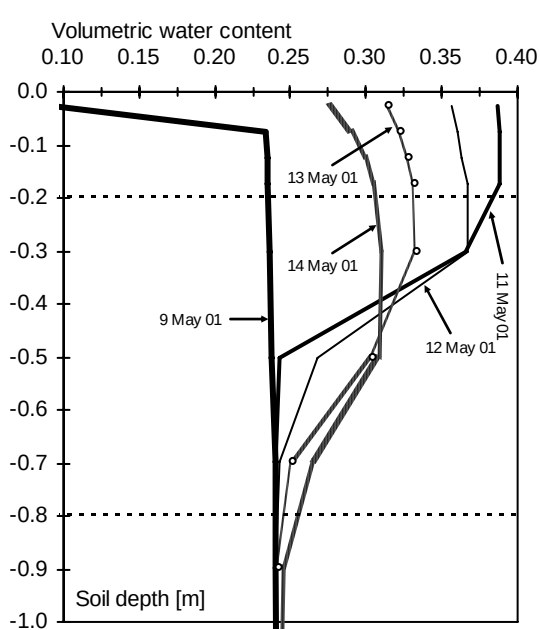
ภาพผนวกที่ ข18 (ต่อ)



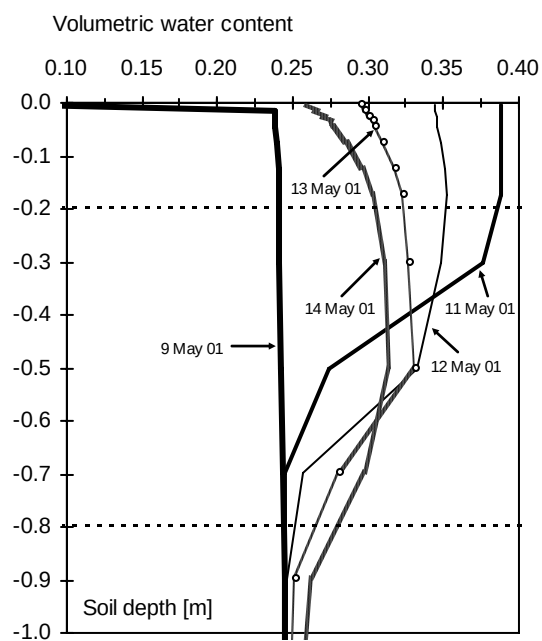
(a) Soil profile "D1"



(b) Soil profile "D2"

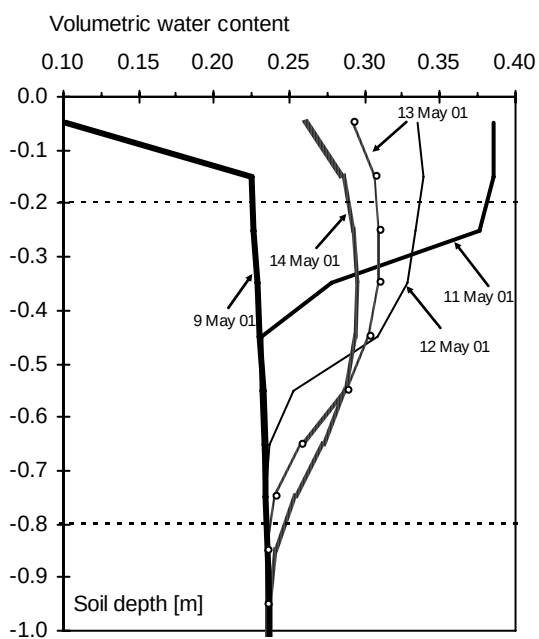


(c) Soil profile "D3"

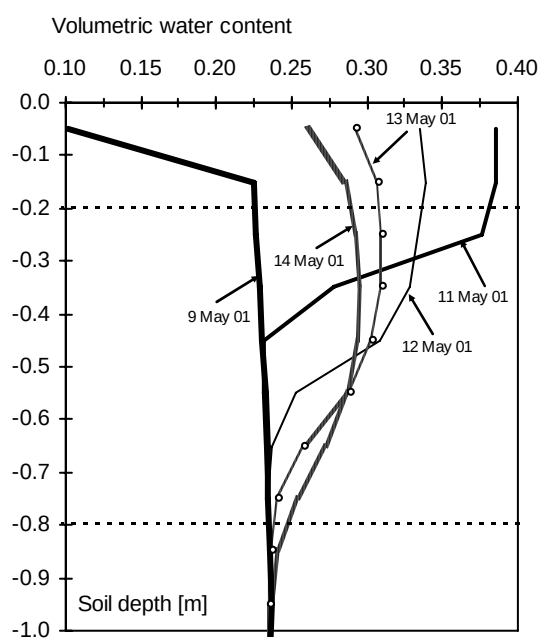


(d) Soil profile "D4"

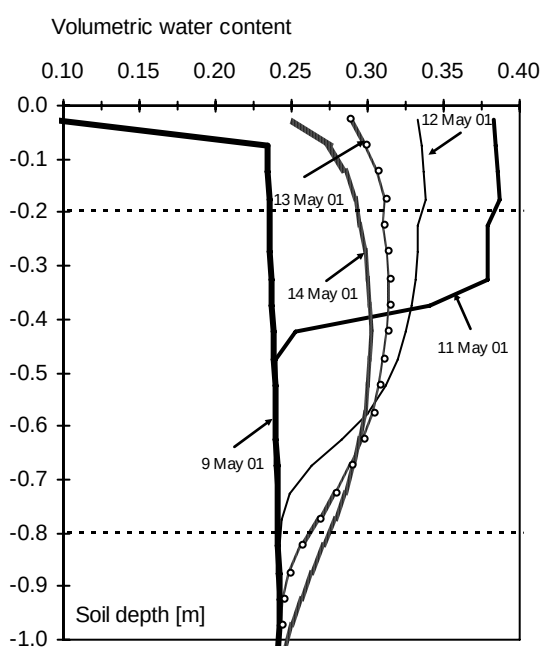
ภาพผนวกที่ ข19 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดินในกรณีดินร่วน



(e) Soil profile "D5"

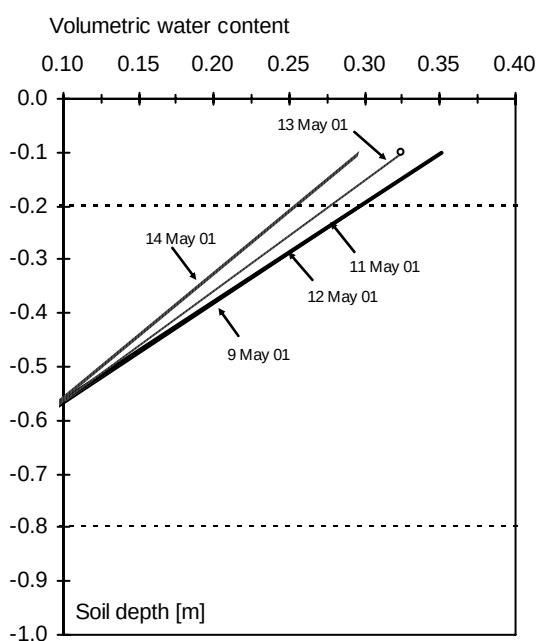


(f) Soil profile "D6"

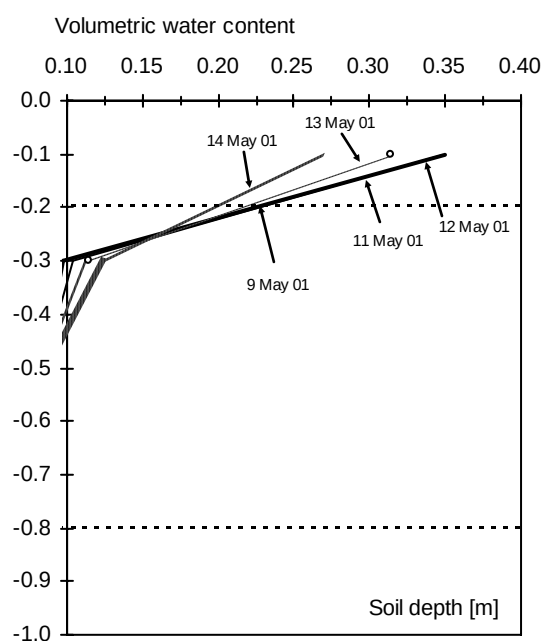


(g) Soil profile "D7"

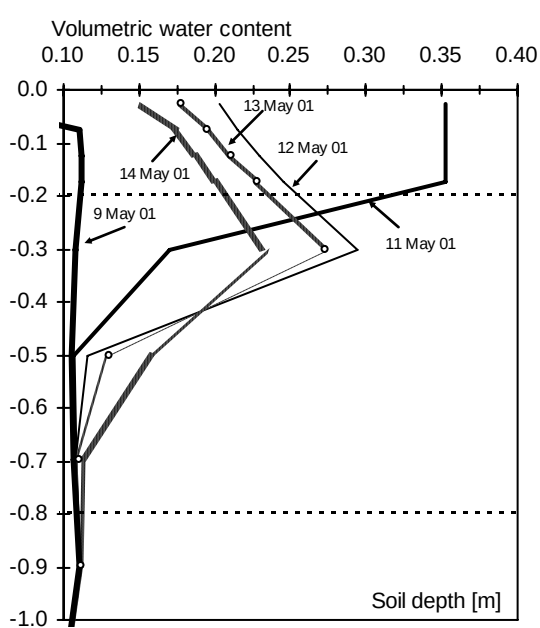
ภาพผนวกที่ ข19 (ต่อ)



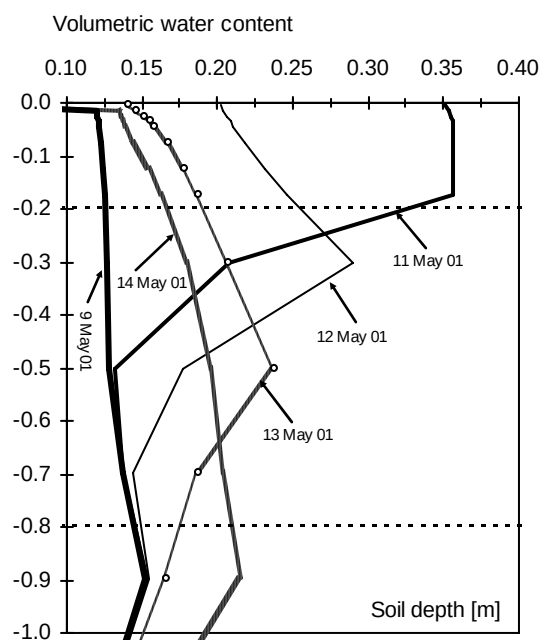
(a) Soil profile "D1"



(b) Soil profile "D2"

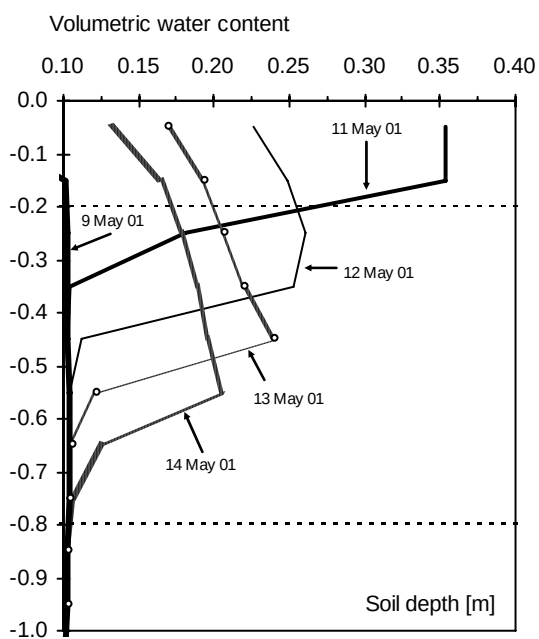


(c) Soil profile "D3"

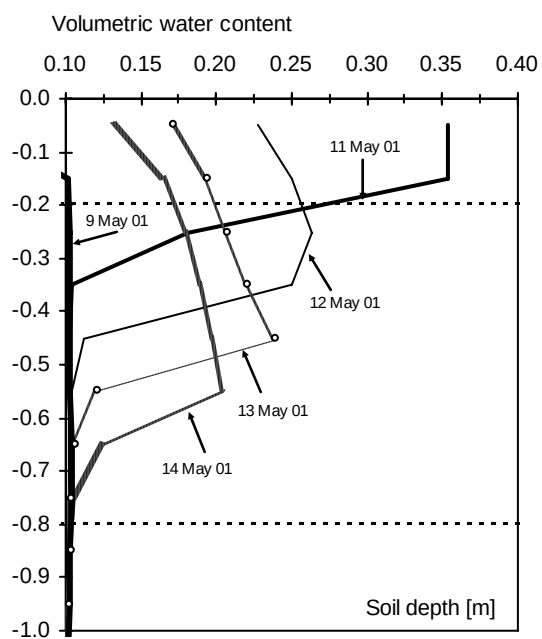


(d) Soil profile "D4"

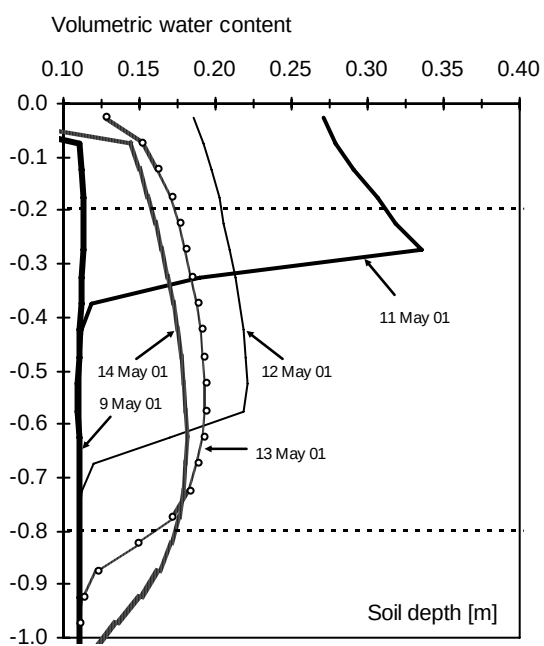
ภาพผนวกที่ ข20 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแต่ละหน้าตัดดิน
ในกรณีดินทรายปนดินร่วน



(e) Soil profile "D5"



(f) Soil profile "D6"



(g) Soil profile "D7"

ภาพผนวกที่ ข20 (ต่อ)

(2) การทดสอบระบบย่อย ซึ่งประกอบด้วย

ตารางผนวกที่ ข9

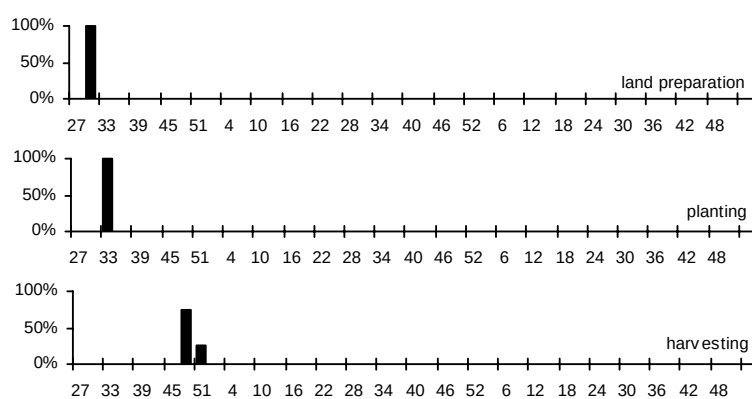
ภาพผนวกที่ ข21 ถึง ภาพผนวกที่ ข25

ตารางผนวกที่ ข9 ค่าชลศาสตร์ดิน

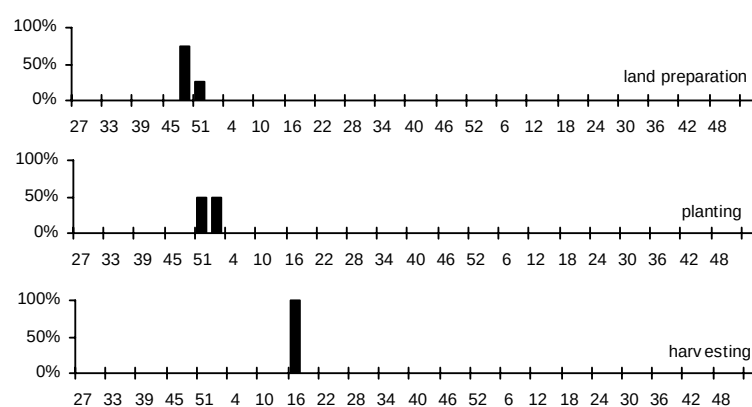
Layer id	depth below surface (m)	soil depth (m)	Number of compartment	Porosity (-)	Ks (cm/d)	Ores (m ³ /m ³)	Os (m ³ /m ³)	n (-)	alfa (1/cm)	lamda (-)
1	0.2	0.10	2	0.436	8.60	0.0698	0.4364	1.2707	0.0135	0.5
2	1	0.10	8	0.426	6.59	0.0674	0.4265	1.2678	0.0125	0.5
3	2	0.20	5	0.336	0.24	0.0446	0.3363	1.2311	0.0054	0.5

gateID	gateCode	gateNo	typeID	regulatorType	Qmax	IdControl	ControlType	canalID	canalCode	canalName	projectID	projectName	gateManCode	gateMan_US	gateMan_DS	irrigationPlan
10101	19999999.01.0.1	1	1	headwork	10	1	upstream	1	9999999	River	1	prj1	19999999.01.0.1	NaN	NaN	0
10201	1R000000.01.0.2	1	2	head	10	2	downstream	2	R000000	RMC	1	prj1	1R000000.01.0.2	NaN	1R000000.02.1.1	0
10202	1R000000.02.1.1	2	3	check	5	1	upstream	2	R000000	RMC	1	prj1	1R000000.02.1.1	1R000000.01.0.2	1R000000.03.2.1	0
10203	1R000000.03.2.1	3	3	check	5	1	upstream	2	R000000	RMC	1	prj1	1R000000.03.2.1	1R000000.02.1.1	1R000000.04.0.1	0
10204	1R000000.04.0.1	4	4	tail	0.1	1	upstream	2	R000000	RMC	1	prj1	1R000000.04.0.1	1R000000.03.2.1	NaN	0
10301	1RL01000.01.1.2	1	2	head	2.5	2	downstream	3	RL01000	1L	1	prj1	1RL01000.01.1.2	NaN	1RL01000.02.1.1	0
10302	1RL01000.02.1.1	2	4	tail	0.1	1	upstream	3	RL01000	1L	1	prj1	1RL01000.02.1.1	1RL01000.01.1.2	NaN	0
10401	1RL02000.01.2.2	1	2	head	2.5	2	downstream	4	RL02000	2L	1	prj1	1RL02000.01.2.2	NaN	1RL02000.02.2.1	0
10402	1RL02000.02.2.1	2	4	tail	0.1	1	upstream	4	RL02000	2L	1	prj1	1RL02000.02.2.1	1RL02000.01.2.2	NaN	0
10501	1RR01000.01.1.2	1	2	head	2.5	2	downstream	5	RR01000	1R	1	prj1	1RR01000.01.1.2	NaN	1RR01000.02.1.1	0
10502	1RR01000.02.1.1	2	4	tail	0.1	1	upstream	5	RR01000	1R	1	prj1	1RR01000.02.1.1	1RR01000.01.1.2	NaN	0
10601	1RR02000.01.2.2	1	2	head	2.5	2	downstream	6	RR02000	2R	1	prj1	1RR02000.01.2.2	NaN	1RR02000.02.2.1	0
10602	1RR02000.02.2.1	2	4	tail	0.1	1	upstream	6	RR02000	2R	1	prj1	1RR02000.02.2.1	1RR02000.01.2.2	NaN	0

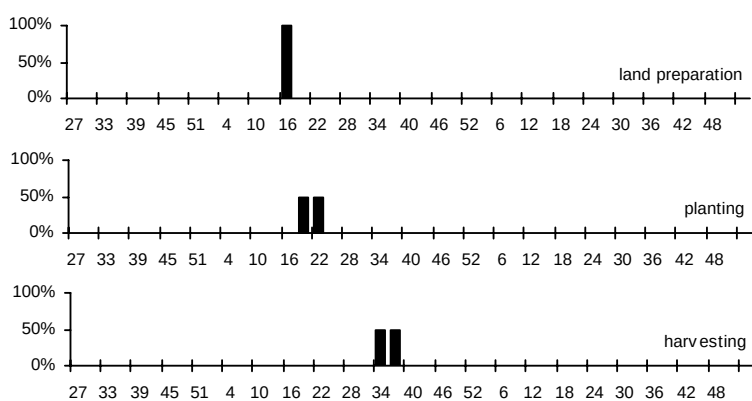
ภาพหน้าที่ 21 คุณสมบัติของประตูระบายน้ำในระบบย่อย



(ก) การปลูกข้าวครั้งที่ 1

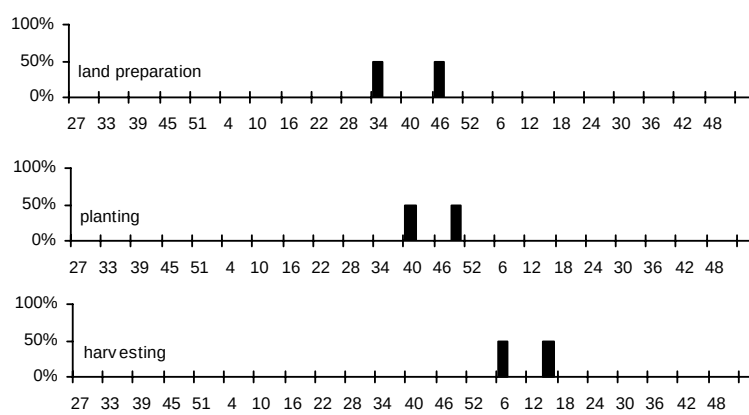


(ข) การปลูกข้าวครั้งที่ 2

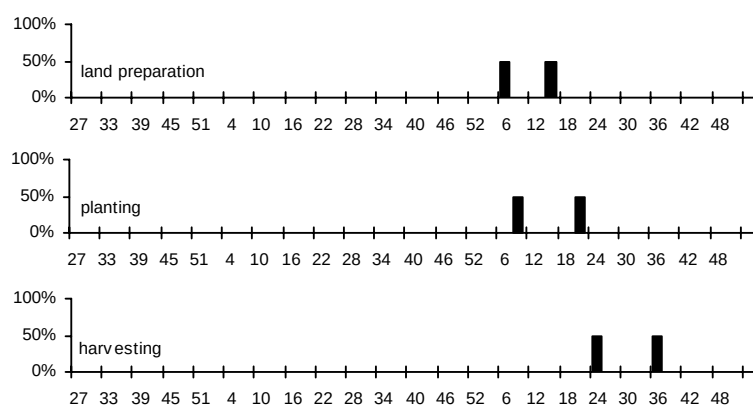


(ค) การปลูกข้าวครั้งที่ 3

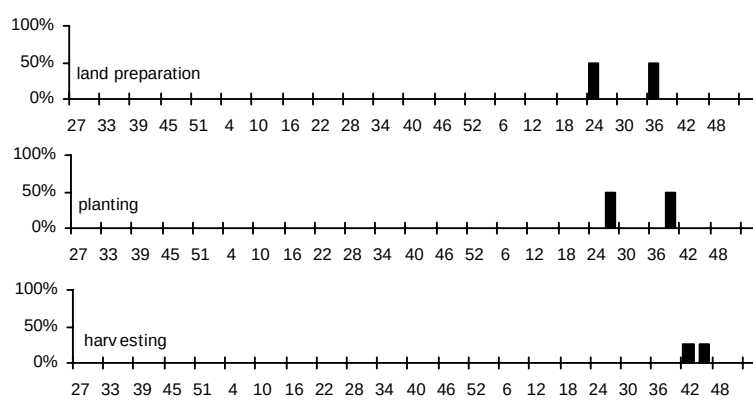
ภาพผนวกที่ ข22 สัดส่วนของพื้นที่ปลูกข้าว กรณีส่งน้ำตลอดปี



(ง) การปลูกข้าวครั้งที่ 4

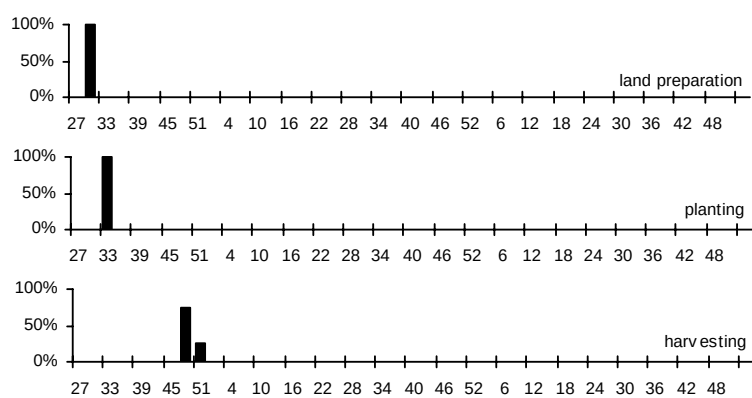


(จ) การปลูกข้าวครั้งที่ 5

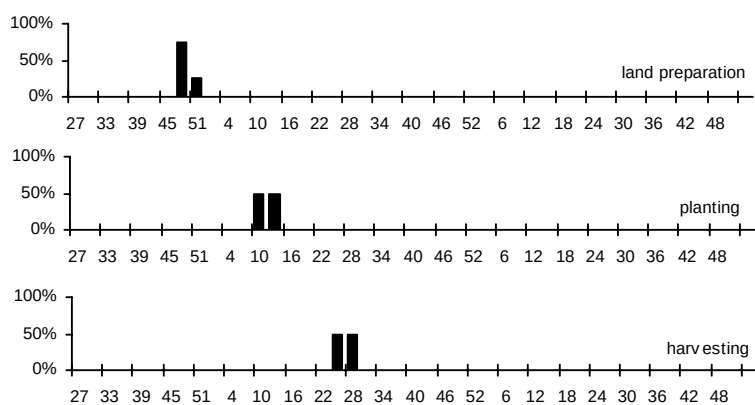


(ฉ) การปลูกข้าวครั้งที่ 6

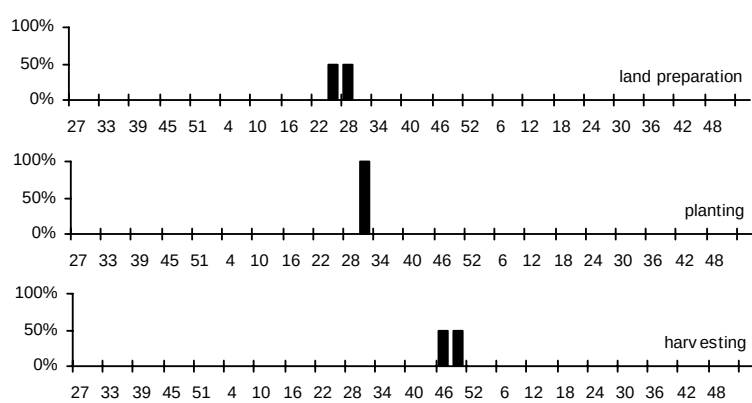
ภาพผนวกที่ ข22 (ต่อ)



(ก) การปลูกข้าวครั้งที่ 1

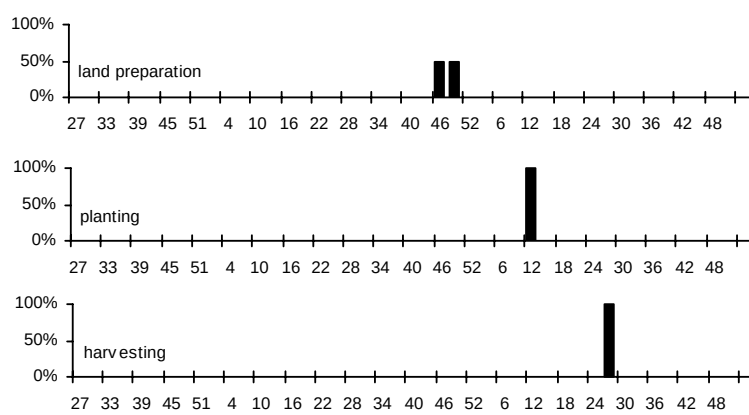


(ข) การปลูกข้าวครั้งที่ 2

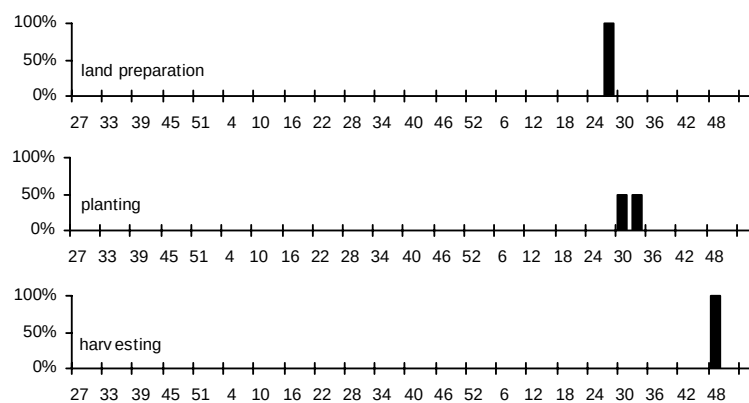


(ค) การปลูกข้าวครั้งที่ 3

ภาพผนวกที่ ข23 สัดส่วนของพื้นที่ปลูกข้าว กรณีส่งนํารายฤดูกาล



(ง) การปลูกข้าวครั้งที่ 4



(จ) การปลูกข้าวครั้งที่ 5

ภาพผนวกที่ ข23 (ต่อ)

number of cropping	activity	land							
		1		2		3		4	
		start	stop	start	stop	start	stop	start	stop
1	clearing	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000
	soaking	7/7/2000	10/7/2000	7/7/2000	10/7/2000	7/7/2000	14/7/2000	7/7/2000	19/7/2000
	plowing	11/7/2000	13/7/2000	11/7/2000	13/7/2000	15/7/2000	17/7/2000	20/7/2000	22/7/2000
	harrowing	14/7/2000	20/7/2000	14/7/2000	20/7/2000	18/7/2000	24/7/2000	23/7/2000	29/7/2000
	puddling	21/7/2000	22/7/2000	21/7/2000	22/7/2000	25/7/2000	26/7/2000	30/7/2000	31/7/2000
	smoothing	23/7/2000	23/7/2000	23/7/2000	23/7/2000	27/7/2000	27/7/2000	1/8/2000	1/8/2000
	cropping	24/7/2000	17/11/2000	24/7/2000	17/11/2000	28/7/2000	21/11/2000	2/8/2000	27/11/2000
2	clearing	18/11/2000	22/11/2000	18/11/2000	22/11/2000	22/11/2000	26/11/2000	28/11/2000	2/12/2000
	soaking	23/11/2000	28/11/2000	23/11/2000	28/11/2000	27/11/2000	8/12/2000	3/12/2000	12/12/2000
	plowing	29/11/2000	1/12/2000	29/11/2000	1/12/2000	9/12/2000	11/12/2000	13/12/2000	15/12/2000
	harrowing	2/12/2000	8/12/2000	2/12/2000	8/12/2000	12/12/2000	18/12/2000	16/12/2000	22/12/2000
	puddling	9/12/2000	10/12/2000	9/12/2000	10/12/2000	19/12/2000	20/12/2000	23/12/2000	24/12/2000
	smoothing	11/12/2000	11/12/2000	11/12/2000	11/12/2000	21/12/2000	21/12/2000	25/12/2000	25/12/2000
	cropping	12/12/2000	9/4/2001	12/12/2000	9/4/2001	22/12/2000	17/4/2001	26/12/2000	20/4/2001
3	clearing	10/4/2001	14/4/2001	10/4/2001	14/4/2001	18/4/2001	22/4/2001	21/4/2001	25/4/2001
	soaking	15/4/2001	20/4/2001	15/4/2001	21/4/2001	23/4/2001	3/5/2001	26/4/2001	13/5/2001
	plowing	21/4/2001	23/4/2001	22/4/2001	24/4/2001	4/5/2001	6/5/2001	14/5/2001	16/5/2001
	harrowing	24/4/2001	30/4/2001	25/4/2001	1/5/2001	7/5/2001	13/5/2001	17/5/2001	23/5/2001
	puddling	1/5/2001	2/5/2001	2/5/2001	3/5/2001	14/5/2001	15/5/2001	24/5/2001	25/5/2001
	smoothing	3/5/2001	3/5/2001	4/5/2001	4/5/2001	16/5/2001	16/5/2001	26/5/2001	26/5/2001
	cropping	4/5/2001	23/8/2001	5/5/2001	24/8/2001	17/5/2001	5/9/2001	27/5/2001	15/9/2001
4	clearing	24/8/2001	28/8/2001	25/8/2001	29/8/2001	1/11/2001	5/11/2001	1/11/2001	5/11/2001
	soaking	29/8/2001	3/9/2001	30/8/2001	4/9/2001	6/11/2001	15/11/2001	6/11/2001	15/11/2001
	plowing	4/9/2001	6/9/2001	5/9/2001	7/9/2001	16/11/2001	18/11/2001	16/11/2001	18/11/2001
	harrowing	7/9/2001	13/9/2001	8/9/2001	14/9/2001	19/11/2001	25/11/2001	19/11/2001	25/11/2001
	puddling	14/9/2001	15/9/2001	15/9/2001	16/9/2001	26/11/2001	27/11/2001	26/11/2001	27/11/2001
	smoothing	16/9/2001	16/9/2001	17/9/2001	17/9/2001	28/11/2001	28/11/2001	28/11/2001	28/11/2001
	cropping	17/9/2001	21/1/2002	18/9/2001	22/1/2002	29/11/2001	1/4/2002	29/11/2001	1/4/2002
5	clearing	22/1/2002	26/1/2002	23/1/2002	27/1/2002	2/4/2002	6/4/2002	2/4/2002	6/4/2002
	soaking	27/1/2002	1/2/2002	28/1/2002	2/2/2002	7/4/2002	25/4/2002	7/4/2002	26/4/2002
	plowing	2/2/2002	4/2/2002	3/2/2002	5/2/2002	26/4/2002	28/4/2002	27/4/2002	29/4/2002
	harrowing	5/2/2002	11/2/2002	6/2/2002	12/2/2002	29/4/2002	5/5/2002	30/4/2002	6/5/2002
	puddling	12/2/2002	13/2/2002	13/2/2002	14/2/2002	6/5/2002	7/5/2002	7/5/2002	8/5/2002
	smoothing	14/2/2002	14/2/2002	15/2/2002	15/2/2002	8/5/2002	8/5/2002	9/5/2002	9/5/2002
	cropping	15/2/2002	3/6/2002	16/2/2002	4/6/2002	9/5/2002	28/8/2002	10/5/2002	29/8/2002
6	clearing	4/6/2002	8/6/2002	5/6/2002	9/6/2002	29/8/2002	2/9/2002	30/8/2002	3/9/2002
	soaking	9/6/2002	14/6/2002	10/6/2002	15/6/2002	3/9/2002	12/9/2002	4/9/2002	15/9/2002
	plowing	15/6/2002	17/6/2002	16/6/2002	18/6/2002	13/9/2002	15/9/2002	16/9/2002	18/9/2002
	harrowing	18/6/2002	24/6/2002	19/6/2002	25/6/2002	16/9/2002	22/9/2002	19/9/2002	25/9/2002
	puddling	25/6/2002	26/6/2002	26/6/2002	27/6/2002	23/9/2002	24/9/2002	26/9/2002	27/9/2002
	smoothing	27/6/2002	27/6/2002	28/6/2002	28/6/2002	25/9/2002	25/9/2002	28/9/2002	28/9/2002
	cropping	28/6/2002	19/10/2002	29/6/2002	20/10/2002	26/9/2002		29/9/2002	
7	clearing	1/11/2002	5/11/2002	1/11/2002	5/11/2002				
	soaking	6/11/2002	11/11/2002	6/11/2002	11/11/2002				
	plowing	12/11/2002	14/11/2002	12/11/2002	14/11/2002				
	harrowing	15/11/2002	21/11/2002	15/11/2002	21/11/2002				
	puddling	22/11/2002	23/11/2002	22/11/2002	23/11/2002				
	smoothing	24/11/2002	24/11/2002	24/11/2002	24/11/2002				
	cropping	25/11/2002		25/11/2002					

ภาพผนวกที่ ข24 ตัวอย่างผลการบันทึกกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของแปลงติดคลองส่งน้ำ
กรณีส่งน้ำตลอดปี

number of cropping	activity	land							
		1		2		3		4	
		start	stop	start	stop	start	stop	start	stop
1	clearing	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000	2/7/2000	6/7/2000
	soaking	7/7/2000	10/7/2000	7/7/2000	10/7/2000	7/7/2000	14/7/2000	7/7/2000	19/7/2000
	plowing	11/7/2000	13/7/2000	11/7/2000	13/7/2000	15/7/2000	17/7/2000	20/7/2000	22/7/2000
	harrowing	14/7/2000	20/7/2000	14/7/2000	20/7/2000	18/7/2000	24/7/2000	23/7/2000	29/7/2000
	puddling	21/7/2000	22/7/2000	21/7/2000	22/7/2000	25/7/2000	26/7/2000	30/7/2000	31/7/2000
	smoothing	23/7/2000	23/7/2000	23/7/2000	23/7/2000	27/7/2000	27/7/2000	1/8/2000	1/8/2000
	cropping	24/7/2000	17/11/2000	24/7/2000	17/11/2000	28/7/2000	21/11/2000	2/8/2000	27/11/2000
2	clearing	18/11/2000	22/11/2000	18/11/2000	22/11/2000	22/11/2000	26/11/2000	28/11/2000	2/12/2000
	soaking	23/11/2000	18/2/2001	23/11/2000	18/2/2001	27/11/2000	2/3/2001	3/12/2000	3/3/2001
	plowing	19/2/2001	21/2/2001	19/2/2001	21/2/2001	3/3/2001	5/3/2001	4/3/2001	6/3/2001
	harrowing	22/2/2001	28/2/2001	22/2/2001	28/2/2001	6/3/2001	12/3/2001	7/3/2001	13/3/2001
	puddling	1/3/2001	2/3/2001	1/3/2001	2/3/2001	13/3/2001	14/3/2001	14/3/2001	15/3/2001
	smoothing	3/3/2001	3/3/2001	3/3/2001	3/3/2001	15/3/2001	15/3/2001	16/3/2001	16/3/2001
	cropping	4/3/2001	21/6/2001	4/3/2001	21/6/2001	16/3/2001	1/7/2001	17/3/2001	2/7/2001
3	clearing	22/6/2001	26/6/2001	22/6/2001	26/6/2001	2/7/2001	6/7/2001	3/7/2001	7/7/2001
	soaking	27/6/2001	7/7/2001	27/6/2001	7/7/2001	7/7/2001	19/7/2001	8/7/2001	19/7/2001
	plowing	8/7/2001	10/7/2001	8/7/2001	10/7/2001	20/7/2001	22/7/2001	20/7/2001	22/7/2001
	harrowing	11/7/2001	17/7/2001	11/7/2001	17/7/2001	23/7/2001	29/7/2001	23/7/2001	29/7/2001
	puddling	18/7/2001	19/7/2001	18/7/2001	19/7/2001	30/7/2001	31/7/2001	30/7/2001	31/7/2001
	smoothing	20/7/2001	20/7/2001	20/7/2001	20/7/2001	1/8/2001	1/8/2001	1/8/2001	1/8/2001
	cropping	21/7/2001	10/11/2001	21/7/2001	10/11/2001	2/8/2001	25/11/2001	2/8/2001	25/11/2001
4	clearing	11/11/2001	15/11/2001	11/11/2001	15/11/2001	26/11/2001	30/11/2001	26/11/2001	30/11/2001
	soaking	16/11/2001	17/2/2002	16/11/2001	17/2/2002	1/12/2001	28/2/2002	1/12/2001	1/3/2002
	plowing	18/2/2002	20/2/2002	18/2/2002	20/2/2002	1/3/2002	3/3/2002	2/3/2002	4/3/2002
	harrowing	21/2/2002	27/2/2002	21/2/2002	27/2/2002	4/3/2002	10/3/2002	5/3/2002	11/3/2002
	puddling	28/2/2002	1/3/2002	28/2/2002	1/3/2002	11/3/2002	12/3/2002	12/3/2002	13/3/2002
	smoothing	2/3/2002	2/3/2002	2/3/2002	2/3/2002	13/3/2002	13/3/2002	14/3/2002	14/3/2002
	cropping	3/3/2002	19/6/2002	3/3/2002	19/6/2002	14/3/2002	29/6/2002	15/3/2002	30/6/2002
5	clearing	20/6/2002	24/6/2002	20/6/2002	24/6/2002	30/6/2002	4/7/2002	1/7/2002	5/7/2002
	soaking	25/6/2002	6/7/2002	25/6/2002	6/7/2002	5/7/2002	18/7/2002	6/7/2002	18/7/2002
	plowing	7/7/2002	9/7/2002	7/7/2002	9/7/2002	19/7/2002	21/7/2002	19/7/2002	21/7/2002
	harrowing	10/7/2002	16/7/2002	10/7/2002	16/7/2002	22/7/2002	28/7/2002	22/7/2002	28/7/2002
	puddling	17/7/2002	18/7/2002	17/7/2002	18/7/2002	29/7/2002	30/7/2002	29/7/2002	30/7/2002
	smoothing	19/7/2002	19/7/2002	19/7/2002	19/7/2002	31/7/2002	31/7/2002	31/7/2002	31/7/2002
	cropping	20/7/2002	12/11/2002	20/7/2002	12/11/2002	1/8/2002	24/11/2002	1/8/2002	24/11/2002
6	clearing	13/11/2002	17/11/2002	13/11/2002	17/11/2002	25/11/2002	29/11/2002	25/11/2002	29/11/2002
	soaking	18/11/2002		18/11/2002		30/11/2002		30/11/2002	
	plowing								
	harrowing								
	puddling								
	smoothing								
	cropping								

ภาพผนวกที่ ข25 ตัวอย่างผลการบันทึกกิจกรรมการเพาะปลูกพืชของแปลงติดคลองส่งน้ำ
กรณีส่งน้ำตามฤดูกาล

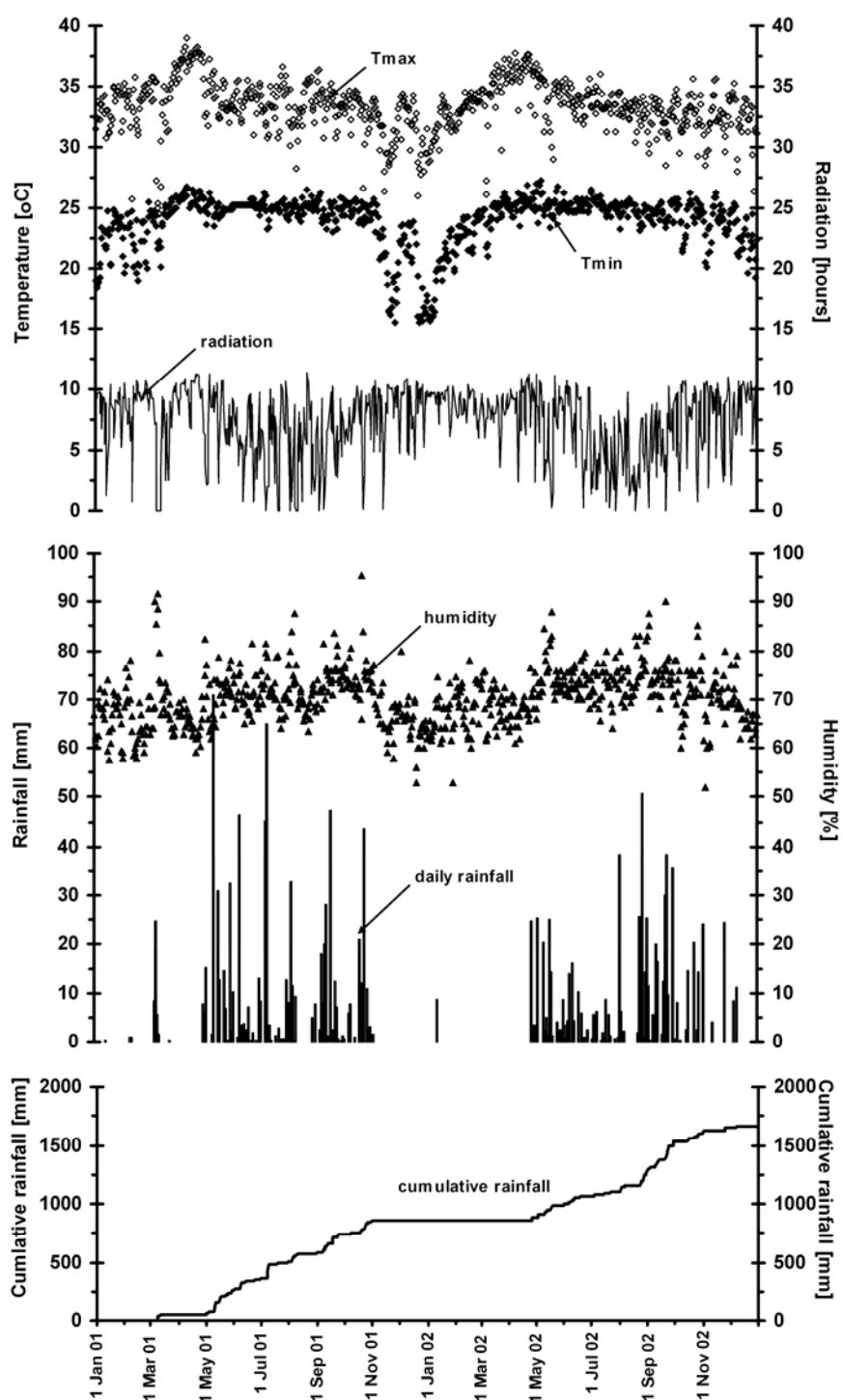
ภาคผนวก ค

ข้อมูลการประเมินการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาฝั่งตะวันตกตอนบน

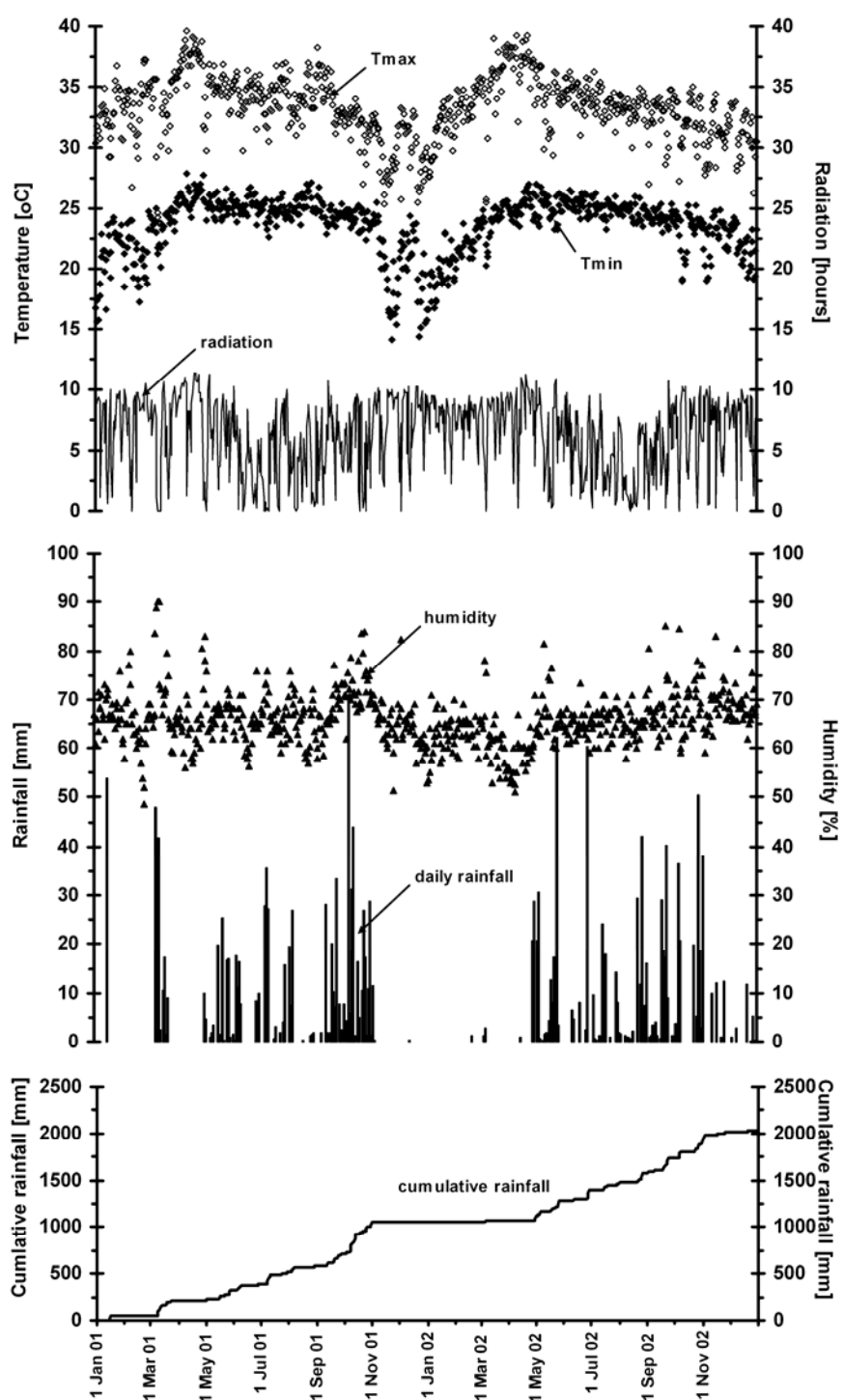
ข้อมูลการประเมินการจัดสรรน้ำในกลุ่มน้ำท่าจีน

ข้อมูลการประเมินการจัดสรรน้ำในกลุ่มน้ำท่าจีน เป็นข้อมูลรายละเอียดที่ใช้สำหรับจำลองสถานการณ์จริงในกลุ่มน้ำท่าจีน ซึ่งประกอบด้วย

- ข้อมูลภูมิอากาศรายวัน
- ข้อมูลชลศาสตร์ของดิน
- ข้อมูลน้ำท่า
- ข้อมูลปัจจัยการตัดสินใจปลูกข้าวของเกษตรกร
- ข้อมูลคุณสมบัติประตุนะบายน้ำ
- ข้อมูลกฎการควบคุมน้ำแบบฟิชซี



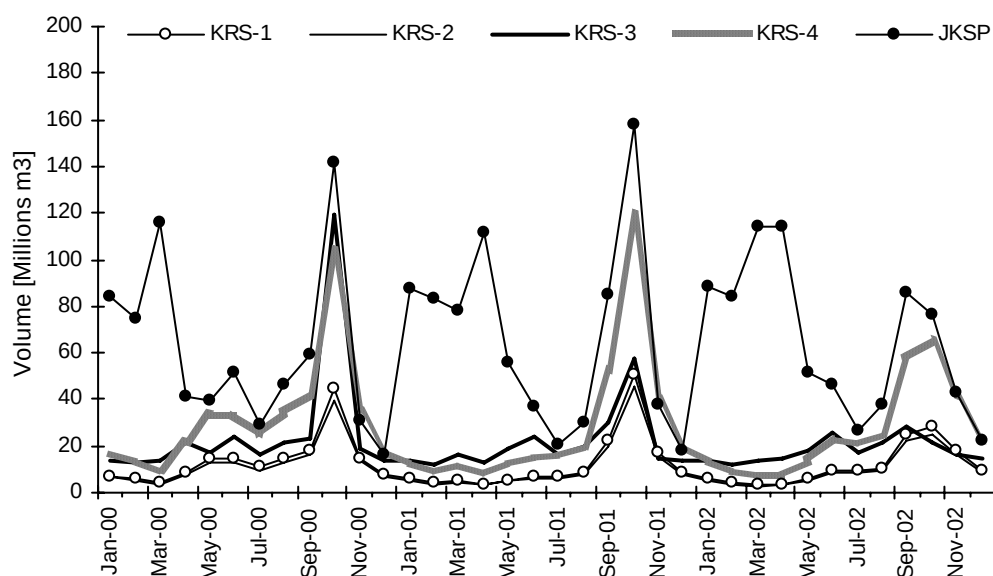
ภาพผนวกที่ ๑ ข้อมูลภูมิอากาศรายวันของสถานีตรวจอากาศ จังหวัดเชียงใหม่ ประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ชั่วโมงแสงแดด ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน



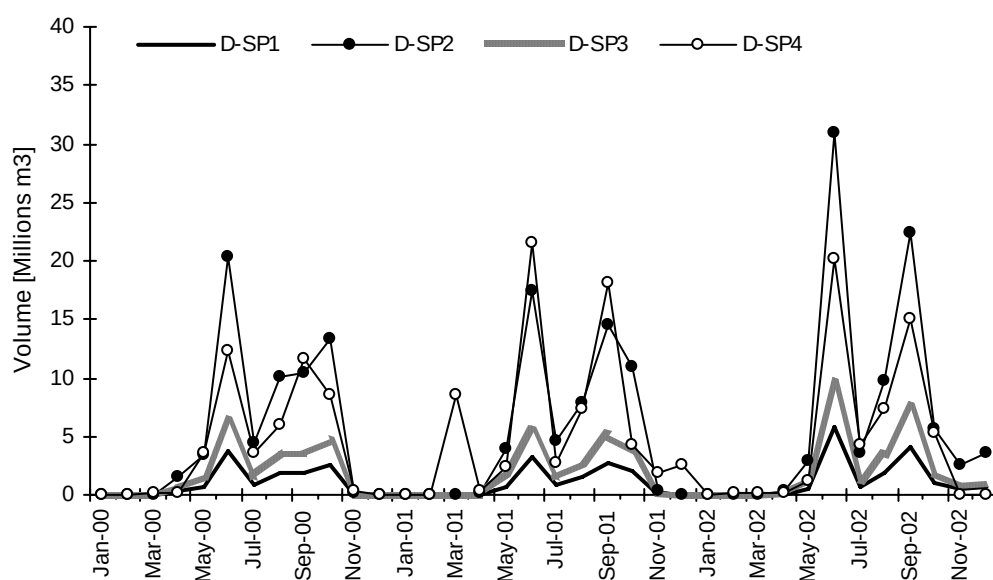
ภาพผนวกที่ ค2 ข้อมูลภูมิอากาศรายวันของสถานีตรวจอากาศอำเภออุ้มทอง จังหวัดสุพรรณบุรี
ประกอบด้วยอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ชั่วโมงแสงแดด ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลด้านชลศาสตร์ของชั้นดิน

(-)	(-)	(-)	m	m	(-)	(-)	(m/sec)	(m ³ /m ³)	(m ³ /m ³)	(-)	(1/cm)	(-)
soilLayerID	soilID	layerNo	z	t	noComp	porosity	Ks	Or	Os	n	alpha	L
125.1	125	1	0.2	0.1	2	0.565	5.4E-07	0.100	0.565	1.100	0.037	0.5
125.2	125	2	1.0	0.1	8	0.554	3.7E-07	0.098	0.554	1.100	0.035	0.5
125.3	125	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5
225.1	225	1	0.2	0.1	2	0.514	8.1E-07	0.080	0.514	1.150	0.013	0.5
225.2	225	2	1.0	0.1	8	0.504	5.7E-07	0.077	0.504	1.150	0.012	0.5
225.3	225	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5
325.1	325	1	0.2	0.1	2	0.526	2.2E-06	0.096	0.526	1.258	0.012	0.5
325.2	325	2	1.0	0.1	8	0.519	1.8E-06	0.094	0.519	1.258	0.012	0.5
325.3	325	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5
425.1	425	1	0.2	0.1	2	0.385	1.8E-06	0.045	0.385	1.355	0.014	0.5
425.2	425	2	1.0	0.1	8	0.377	1.5E-06	0.044	0.377	1.353	0.014	0.5
425.3	425	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5
525.1	525	1	0.2	0.1	2	0.436	1.0E-06	0.070	0.436	1.271	0.014	0.5
525.2	525	2	1.0	0.1	8	0.427	7.6E-07	0.067	0.427	1.268	0.013	0.5
525.3	525	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5
625.1	625	1	0.2	0.1	2	0.490	2.4E-06	0.083	0.490	1.363	0.008	0.5
625.2	625	2	1.0	0.1	8	0.482	1.9E-06	0.081	0.482	1.364	0.008	0.5
625.3	625	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5
725.1	725	1	0.2	0.1	2	0.405	3.0E-06	0.069	0.405	1.263	0.030	0.5
725.2	725	2	1.0	0.1	8	0.394	2.4E-06	0.066	0.394	1.256	0.029	0.5
725.3	725	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5
825.1	825	1	0.2	0.1	2	0.353	6.2E-06	0.031	0.353	1.395	0.043	0.5
825.2	825	2	1.0	0.1	8	0.345	5.5E-06	0.030	0.345	1.390	0.042	0.5
825.3	825	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5
925.1	925	1	0.2	0.1	2	0.353	2.0E-05	0.029	0.353	1.667	0.058	0.5
925.2	925	2	1.0	0.1	8	0.342	1.8E-05	0.029	0.342	1.653	0.057	0.5
925.3	925	3	2.0	0.2	5	0.336	2.9E-08	0.045	0.336	1.231	0.005	0.5



ภาพผนวกที่ ค3 ปริมาณน้ำท่าไหลจากพื้นที่กระเสี้ยว ประกอบด้วย ลำน้ำกระเสี้ยว 4 แห่ง และ คลองจรเข้สามพัน (JKSP)



ภาพผนวกที่ ค4 ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยจากคลองระบายน้ำสุพรรณบุรีทั้ง 4 สาย

gateID	gateCode	gateNo	typeID	regulatorType	Qmax	IdControl	ControlType	canalID	canalCode	canalName	projectID	projectName	gateManCode	gateMan US	gateMan DS	irrigationPlan
1100122	1MU.12.0.2	12	2 head		46.14		2 downStream	100 MU		MU	1 MU	1 MU	1MU.12.0.2	NaN	1MU.22.0.2	0
1100223	1MU.22.0.2	22	3 check		44.89		2 downStream	100 MU		MU	1 MU	1 MU	1MU.22.0.2	1MU.12.0.2	1MU.22.0.2	0
1100323	1MU.32.0.2	32	3 check		43.65		2 downStream	100 MU		MU	1 MU	1 MU	1MU.32.0.2	1MU.32.0.2	1MU.42.0.2	0
1100423	1MU.42.0.2	42	3 check		35.26		2 downStream	100 MU		MU	1 MU	1 MU	1MU.42.0.2	1MU.32.0.2	1MU.52.0.2	0
1100523	1MU.52.0.2	52	3 check		28.037		2 downStream	100 MU		MU	1 MU	1 MU	1MU.52.0.2	1MU.42.0.2	1MU.62.0.2	0
1100623	1MU.62.0.2	62	3 check		28.037		2 downStream	100 MU		MU	1 MU	1 MU	1MU.62.0.2	1MU.52.0.2	1MU.72.0.2	0
1100723	1MU.72.0.2	72	3 check		22.299		2 downStream	100 MU		MU	1 MU	1 MU	1MU.72.0.2	1MU.62.0.2	1MU.81.0.1	0
1100814	1MU.81.0.1	81	4 tail		0.2		1 upStream	100 MU		MU	1 MU	1 MU	1MU.81.0.1	1MU.72.0.2	NaN	0
2100122	2L01.12.0.2	12	2 head		3.3		2 downStream	100 L01		L01	2 PLT	2 PLT	2L01.12.0.2	NaN	2L01.21.0.1	0
2100214	2L01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	100 L01		L01	2 PLT	2 PLT	2L01.21.0.1	2L01.12.0.2	NaN	0
2200122	2Rahan.12.0.2	12	2 head		5.3		2 downStream	200 Rahan		Rahan	2 PLT	2 PLT	2Rahan.12.0.2	NaN	2Rahan.21.0.1	0
2200214	2Rahan.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	200 Rahan		Rahan	2 PLT	2 PLT	2Rahan.21.0.1	2Rahan.12.0.2	NaN	0
8800211	8TCH.21.0.2	21	1 headwork		320		2 downStream	800 TCH		TCH	8 PLT	8 PLT	8TCH.21.0.2	NaN	NaN	0
8800311	8TCH.31.0.2	31	1 headwork		318		2 downStream	800 TCH		TCH	8 THB	8 THB	8TCH.31.0.2	NaN	NaN	0
8800411	8TCH.41.0.2	41	1 headwork		318		2 downStream	800 TCH		TCH	8 SCH	8 SCH	8TCH.41.0.2	NaN	NaN	0
8800511	8TCH.51.0.2	51	1 headwork		318		2 downStream	800 TCH		TCH	8 PPY	8 PPY	8TCH.51.0.2	NaN	NaN	0
3100122	3L01.12.0.2	12	2 head		2.8		2 downStream	100 L01		L01	3 THB	3 THB	3L01.12.0.2	NaN	3L01.21.0.1	0
3100214	3L01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	100 L01		L01	3 THB	3 THB	3L01.21.0.1	3L01.12.0.2	NaN	0
4100122	4L01.12.0.2	12	2 head		18		2 downStream	100 L01		L01	4 SCH	4 SCH	4L01.12.0.2	NaN	4L01.22.0.2	0
4100223	4L01.22.0.2	22	3 check		18		2 downStream	100 L01		L01	4 SCH	4 SCH	4L01.22.0.2	4L01.12.0.2	4L01.32.0.2	0
4110323	4L01.32.0.2	32	3 check		18		2 downStream	110 L01		L01	4 SCH	4 SCH	4L01.32.0.2	4L01.22.0.2	4L01.41.0.1	0
4100414	4L01.41.0.1	41	4 tail		0.05		1 upStream	100 L01		L01	4 SCH	4 SCH	4L01.41.0.1	4L01.32.0.2	NaN	0
4110122	4R02L01.12.0.2	12	2 head		10		2 downStream	110 R02L01		R02L01	4 SCH	4 SCH	4R02L01.12.0.2	NaN	4R02L01.21.0.1	0
4110214	4R02L01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	110 R02L01		R02L01	4 SCH	4 SCH	4R02L01.21.0.1	4R02L01.12.0.2	NaN	0
4112122	4R03L01.12.0.2	12	2 head		5		2 downStream	112 R03L01		R03L01	4 SCH	4 SCH	4R03L01.12.0.2	NaN	4R03L01.21.0.1	0
4112214	4R03L01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	112 R03L01		R03L01	4 SCH	4 SCH	4R03L01.21.0.1	4R03L01.12.0.2	NaN	0
4200122	4R01.12.0.2	12	2 head		12		2 downStream	200 R01		R01	4 SCH	4 SCH	4R01.12.0.2	NaN	4R01.21.0.1	0
4200214	4R01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	200 R01		R01	4 SCH	4 SCH	4R01.21.0.1	4R01.12.0.2	NaN	0
4300122	4R02.12.0.2	12	2 head		10		2 downStream	300 R02		R02	4 SCH	4 SCH	4R02.12.0.2	NaN	4R02.22.0.2	0
4300223	4R02.22.0.2	22	3 check		10		2 downStream	300 R02		R02	4 SCH	4 SCH	4R02.22.0.2	4R02.12.0.2	4R02.32.0.2	0
4300323	4R02.32.0.2	32	3 check		10		2 downStream	300 R02		R02	4 SCH	4 SCH	4R02.32.0.2	4R02.22.0.2	4R02.42.0.2	0
4300423	4R02.42.0.2	42	3 check		10		2 downStream	300 R02		R02	4 SCH	4 SCH	4R02.42.0.2	4R02.32.0.2	4R02.51.0.1	0
4300514	4R02.51.0.1	51	4 tail		0.05		1 upStream	300 R02		R02	4 SCH	4 SCH	4R02.51.0.1	4R02.42.0.2	NaN	0
4310122	4L01R02.12.0.2	12	2 head		3		2 downStream	310 L01R02		L01R02	4 SCH	4 SCH	4L01R02.12.0.2	NaN	4L01R02.21.0.1	0
4310214	4L01R02.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	310 L01R02		L01R02	4 SCH	4 SCH	4L01R02.21.0.1	4L01R02.12.0.2	NaN	0
4320122	4L02R02.12.0.2	12	2 head		3		2 downStream	320 L02R02		L02R02	4 SCH	4 SCH	4L02R02.12.0.2	NaN	4L02R02.21.0.1	0
4320214	4L02R02.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	320 L02R02		L02R02	4 SCH	4 SCH	4L02R02.21.0.1	4L02R02.12.0.2	NaN	0
4330122	4L03R02.12.0.2	12	2 head		3		2 downStream	330 L03R02		L03R02	4 SCH	4 SCH	4L03R02.12.0.2	NaN	4L03R02.21.0.1	0
4330214	4L03R02.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	330 L03R02		L03R02	4 SCH	4 SCH	4L03R02.21.0.1	4L03R02.12.0.2	NaN	0
47700111	4DSCH1.11.0.2	11	1 headwork		20		2 downStream	700 DSCH1		DSCH1	4 SCH	4 SCH	4DSCH1.11.0.2	NaN	NaN	0

ภาพผนวกที่ คร อุณหภูมิประตุน้ำในลุ่มน้ำทำกิน

gateID	gateCode	gateNo	typeID	regulatorType	Qmax	IdControl	ControlType	canalID	canalCode	canalName	projectID	projectName	gateManCode	gateMan US	gateMan DS	irrigationPlan
5100122	5101.12.0.2	12	2 head		6.8		2 downStream	100 L01	L01	L01	5 PPY		5101.12.0.2	NaN	5101.22.0.2	0
5100223	5101.22.0.2	22	3 check		6.8		2 downStream	100 L01	L01	L01	5 PPY		5101.22.0.2	NaN	5101.31.0.1	0
5100314	5101.31.0.1	31	4 tail		0.05		1 upStream	100 L01	L01	L01	5 PPY		5101.31.0.1	NaN	NaN	0
5110122	5101.01.12.0.2	12	2 head		5.5		2 downStream	110 L01L01	L01L01	L01L01	5 PPY		5101.01.12.0.2	NaN	5101.01.21.0.1	0
5110214	5101.01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	110 L01L01	L01L01	L01L01	5 PPY		5101.01.21.0.1	NaN	NaN	0
5200112	5R01.11.0.2	11	2 head		20		2 downStream	200 R01	R01	R01	5 PPY		5R01.11.0.2	NaN	5R01.22.0.2	0
5200223	5R01.22.0.2	22	3 check		20		2 downStream	200 R01	R01	R01	5 PPY		5R01.22.0.2	NaN	5R01R01.12.0.2	0
5200314	5R01.31.0.1	31	4 tail		0.05		1 upStream	200 R01	R01	R01	5 PPY		5R01.31.0.1	NaN	NaN	0
5210122	5102R01.12.0.2	12	2 head		6.2		2 downStream	210 L02R01	L02R01	L02R01	5 PPY		5102R01.12.0.2	NaN	5102R01.22.0.2	0
5210223	5102R01.22.0.2	22	3 check		6.2		2 downStream	210 L02R01	L02R01	L02R01	5 PPY		5102R01.22.0.2	NaN	5102R01.21.0.1	0
5210214	5102R01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	210 L02R01	L02R01	L02R01	5 PPY		5102R01.21.0.1	NaN	NaN	0
5250122	5R01L02R01.12.0.2	12	2 head		2.7		2 downStream	250 R01L02R01	R01L02R01	R01L02R01	5 PPY		5R01L02R01.12.0.2	NaN	5R01L02R01.21.0.1	0
5250214	5R01L02R01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	250 R01L02R01	R01L02R01	R01L02R01	5 PPY		5R01L02R01.21.0.1	NaN	NaN	0
5220122	5103R01.12.0.2	12	2 head		7.1		2 downStream	220 L03R01	L03R01	L03R01	5 PPY		5103R01.12.0.2	NaN	5103R01.21.0.1	0
5220214	5103R01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	220 L03R01	L03R01	L03R01	5 PPY		5103R01.21.0.1	NaN	NaN	0
5230122	5R01R01.12.0.2	12	2 head		6.5		2 downStream	230 R01R01	R01R01	R01R01	5 PPY		5R01R01.12.0.2	NaN	5R01R01.22.0.2	0
5230223	5R01R01.22.0.2	22	3 check		6.5		2 downStream	230 R01R01	R01R01	R01R01	5 PPY		5R01R01.22.0.2	NaN	5R01R01.31.0.1	0
5230314	5R01R01.31.0.1	31	4 tail		0.05		1 upStream	230 R01R01	R01R01	R01R01	5 PPY		5R01R01.31.0.1	NaN	NaN	0
5240122	5101R01R01.12.0.2	12	2 head		4.2		2 downStream	240 L01R01R01	L01R01R01	L01R01R01	5 PPY		5101R01R01.12.0.2	NaN	5101R01R01.21.0.1	0
5240214	5101R01R01.21.0.1	21	4 tail		0.05		1 upStream	240 L01R01R01	L01R01R01	L01R01R01	5 PPY		5101R01R01.21.0.1	NaN	NaN	0
5700111	5DSPN.11.0.2	11	1 headwork		30		2 downStream	700 DSPN	DSPN	DSPN	5 PPY		5103R01.21.0.1	NaN	NaN	0

ตารางผนวกที่ ค2 กฎการควบคุมแบบฟuzzy สำหรับอาคารบังคับน้ำปากคลอง

no	self regulator	downstream regulator	gateCoefficient
1	insufficient	insufficient	moreIncreased
2	insufficient	sufficient	slightlyIncreased
3	insufficient	excess	notChanged
4	sufficient	insufficient	moreIncreased
5	sufficient	sufficient	notChanged
6	sufficient	excess	slightlyDecreased
7	excess	insufficient	notChanged
8	excess	sufficient	slightlyDecreased
9	excess	excess	moreDecreased

ตารางผนวกที่ ค3 กฎการควบคุมแบบฟuzzy สำหรับอาคารบังคับน้ำปลายคลอง

no	self regulator	upstream regulator	gateCoefficient
1	insufficient	insufficient	moreDecreased
2	insufficient	sufficient	moreDecreased
3	insufficient	excess	moreDecreased
4	sufficient	insufficient	slightlyDecreased
5	sufficient	sufficient	notChanged
6	sufficient	excess	notChanged
7	excess	insufficient	slightlyIncreased
8	excess	sufficient	slightlyIncreased
9	excess	excess	moreIncreased

ตารางผนวกที่ ค4 กฎการควบคุมแบบพีชชี สำหรับอาคารท่อน้ำกลางคลอง

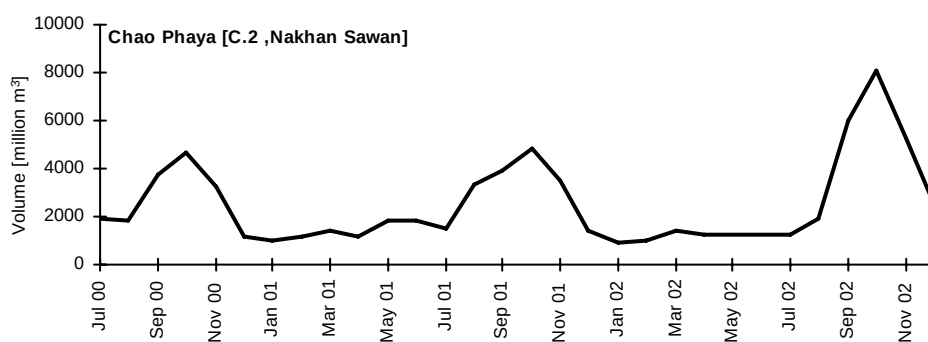
no	self regulator	upstream regulator	downstream regulator	gateCoefficient
1	insufficient	insufficient	insufficient	slightlyDecreased
2	insufficient	insufficient	insufficient	moreDecreased
3	insufficient	insufficient	excess	moreDecreased
4	insufficient	sufficient	insufficient	slightlyIncreased
5	insufficient	sufficient	insufficient	slightlyDecreased
6	insufficient	sufficient	excess	moreDecreased
7	insufficient	excess	insufficient	slightlyIncreased
8	insufficient	excess	insufficient	slightlyDecreased
9	insufficient	excess	excess	moreDecreased
10	sufficient	insufficient	insufficient	slightlyIncreased
11	sufficient	insufficient	insufficient	notChanged
12	sufficient	insufficient	excess	slightlyDecreased
13	sufficient	sufficient	insufficient	moreIncreased
14	sufficient	sufficient	insufficient	notChanged
15	sufficient	sufficient	excess	slightlyDecreased
16	sufficient	excess	insufficient	slightlyIncreased
17	sufficient	excess	insufficient	notChanged
18	sufficient	excess	excess	slightlyDecreased
19	excess	insufficient	insufficient	slightlyIncreased
20	excess	insufficient	insufficient	slightlyIncreased
21	excess	insufficient	excess	slightlyIncreased
22	excess	sufficient	insufficient	moreIncreased
23	excess	sufficient	insufficient	slightlyIncreased
24	excess	sufficient	excess	slightlyIncreased
25	excess	excess	insufficient	moreIncreased
26	excess	excess	insufficient	slightlyIncreased
27	excess	excess	excess	slightlyIncreased

1. วันที่สำรวจ.....
2. หมายเลขแบบสอบถาม.....
3. เพศ ชาย..... หญิง.....
4. ช่วงอายุ.....
5. ข้อมูลแปลงเพาะปลูก
 - 5.1. พืช.....
 - 5.2. ที่อยู่.....
 - 5.3. สภาพดิน.....
 - 5.4. การจัดการที่ดิน.....
6. พืชที่ปลูก.....
- 6.1. พันธุ์.....
- 6.2. เริ่มปลูก.....
- 6.3. วิธีปลูก.....
- 6.4. สารเคมี.....
- 6.5. การเก็บเกี่ยว.....
- 6.6. ขนาดพื้นที่.....
- 6.7. ผลผลิต.....
- 6.8. การขาย.....
7. ปฏิทินเพาะปลูก.....
8. ลักษณะที่ดัดแปลงเพาะปลูก

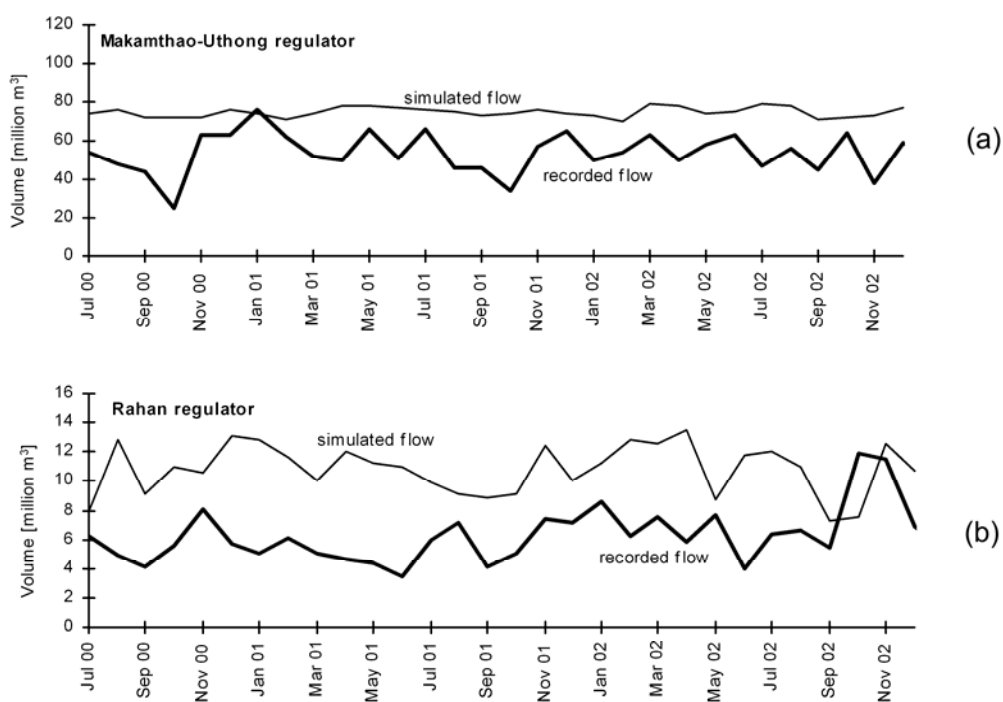
ภาพผนวกที่ ค6 แบบสอบถามเกษตรกร

9. แหล่งน้ำ.....
.....
.....
10. วิธีรับน้ำ.....
.....
.....
11. การใช้น้ำช่วงเตรียมแปลง
11.1. วิธีการเตรียมแปลง.....
.....
.....
.....
- 11.2 จำนวนครั้งที่ให้น้ำ.....
.....
- 11.3. ปริมาณน้ำที่ให้.....
.....
.....
.....
- 11.4. ระยะเวลาที่ให้น้ำ.....
.....
.....
.....
12. การใช้น้ำช่วงเจริญเติบโต
12.1. จำนวนครั้งให้น้ำ/ช่วงอายุพืช.....
.....
.....
.....
- 12.2 เวลาเริ่มให้น้ำ.....
.....
- 12.3. ระยะเวลาให้น้ำ/ครั้ง.....
.....
13. กรณีน้ำไม่พอ
13.1. แหล่งน้ำ.....
.....
.....
- 13.2 วิธีการจัดหาแหล่งน้ำ.....
.....
.....
.....
14. กรณีน้ำมากเกินไป
14.1. ที่มาของน้ำ.....
.....
.....
- 14.2 วิธีการระบายน้ำ.....
.....
.....
.....
15. การสูบน้ำ
15.1. กำลังเครื่องสูบน้ำ.....
.....
.....
- 15.2 ขนาดท่อสูบน้ำ.....
.....
.....
- 15.2 ระยะเวลาการสูบน้ำ.....
.....
.....

ภาพผนวกที่ ค6 (ต่อ)



ภาพผนวกที่ ๗ ปริมาณน้ำรายเดือนไหลผ่านจังหวัดนครสวรรค์



ภาพผนวกที่ ๘ ปริมาณน้ำรายเดือนไหลผ่านอาคารควบคุมน้ำ กรณีน้ำต้นทุนไม่จำกัด

หมายเหตุ (a) ปตร. มะขามเต่า-อุทุมทอง และ (b) ปตร. ระหาน

ภาคผนวก ง
การเผยแพร่ผลงาน

การเผยแพร่ผลงาน

งานวิจัยนี้ ได้จัดทำบทความทางวิชาการเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย ดังนี้

ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2550. การจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติในพื้นที่ลาดชัน ด้วยระเบียบวิธี Finite Volume, น. 221-227. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12 (เล่มที่ 9). มหาวิทยาลัยขอนแก่นและสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท), กรุงเทพฯ.

ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์ และ เอกสิทธิ์ โสมิตสกุลชัย. 2551. แบบจำลองเชิงอ้อมเจกต์สำหรับการไหลของน้ำในดิน "jIrAIs-SW". วิทยาสารกำแพงแสน 6(1): 44-56.



การจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ ในพื้นที่ลาดชัน ด้วยระเบียบวิธี Finite Volume Modeling of 2-D Overland Flow in Sloped Area by Finite Volume Method

ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์ (Yutthana Phankamolsil)¹
เอกสิทธิ์ โนลิตสกุลชัย (Ekasit Kositsakulchai)²

¹นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, g4685003@ku.ac.th.
²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ekasit.k@ku.ac.th.

บทคัดย่อ: บทความนี้ นำเสนอผลของการพัฒนาและการทดสอบแบบจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ ซึ่งแทนพื้นผิวการไหลเป็นกริดและหาผลลัพธ์ของสมการ diffusion wave ด้วยระเบียบวิธี finite volume การพัฒนาแบบจำลองใช้การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุด้วยภาษา Java การทดสอบแบบจำลองได้เลือกพื้นที่ตอนบนของลุ่มน้ำกระเสียวเป็นตัวแทนพื้นที่ลาดชัน ลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำเตรียมจากข้อมูลภูมิประเทศเชิงตัวเลข (DTM) โดยระบบภูมิสารสนเทศ การตรวจสอบผลกระทำโดยเปรียบเทียบแบบจำลอง GSSHA ที่กำหนดพารามิเตอร์และข้อมูลนำเข้าเหมือนกัน โดยพิจารณาจากรูปร่างของกราฟน้ำท่า ระยะเวลาที่เกิด และอัตราการไหลสูงสุด นอกจากนี้ ยังได้ประเมินการแบ่งขนาดของกริดและช่วงเวลา ที่มีผลต่อการทำงานของแบบจำลอง และได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความลาดชันและสัมประสิทธิ์ความขรุขระ ผลการทดสอบแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า กริดที่มีขนาดเล็กและขั้นเวลาที่ห่ามมีผลทำให้การคำนวณมีแนวโน้มล้นเร็วได้ง่าย ส่วนในกรณีที่กริดมีขนาดเดียวกันแต่ใช้ขั้นเวลาการจำลองต่างกันผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ กราฟน้ำท่าที่คำนวณจากกริดขนาดเล็กเกิดขึ้นเร็วกว่ากริดขนาดใหญ่ เนื่องจากค่าความลาดชันที่คำนวณจากกริดขนาดเล็กมีค่าสูงกว่าที่คำนวณได้จากกริดขนาดใหญ่ การเพิ่มค่าความลาดชันมีผลให้กราฟน้ำท่าเกิดเร็วขึ้น ส่วนการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระทำให้กราฟน้ำท่าเกิดขึ้นช้าและค่าอัตราการไหลสูงสุดลดลง แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นที่โครงสร้างสอดคล้องกับระบบภูมิสารสนเทศ ช่วยให้เตรียมข้อมูลได้สะดวกขึ้น อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณยังเป็นข้อจำกัดของการนำแบบจำลองไปใช้งานจริง

ABSTRACT: The paper presented the development and evaluation of a 2-dimensional overland flow model. The model represented flow surface in squared grid, and resolved the diffusion wave equation by the Finite Volume method. Java programming language was selected as development tool. In this study, the upper part of Kra Sieo river basin was selected as a representative sloped area, which used for model evaluation. Physical characteristics of the basin derived from Digital Terrain Model (DTM) by Geographic Information System (GIS). In order to examine the performance of the model, the results were compared with those of the well-known GSSHA (formerly CASC2D) model. Both models were configured with identical parameters and input variables. The evaluation criteria were shape of hydrograph, time to peak, and peak discharge. Moreover, the impacts of grid sizes and time steps on model outputs were investigated. The model was also applied for studying the effects of bed slope and roughness coefficient. It was found that the model was likely to crash in case of fine grid size, or long time-step. The same grid size models with different time step gave similar results. The finer-grid model generated more rapid hydrograph. The bed slopes derived from the fine grid were steeper than those from the coarse grid. Consequently, the steeper slope produced faster hydrograph. The higher roughness coefficient retarded the hydrograph generation, and also the peak discharge. The GIS-oriented structure of the model also shows an advantage because it is very effective in data preparation. However, the CPU-time requirement still limits applications of model.

KEYWORDS: Surface runoff, Diffusion wave approximation, Distributed model, Object-oriented programming

1. บทนำ

การไหลของน้ำผิวดินเป็นกระบวนการทางอุทกวิทยาที่สำคัญที่สุดกระบวนการหนึ่ง การคำนวณการไหลกระทำโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการ hydrodynamics ซึ่งเป็นสมการคำนวณการไหลของน้ำเต็มรูปแบบ [13] อย่างไรก็ตาม การนำสมการรูปแบบนี้ไปใช้โดยตรงไม่สามารถหาคำตอบได้โดยง่าย ดังนั้น การคำนวณการไหลของน้ำจึงนิยมลดรูปของสมการ hydrodynamics [12, 32] โดยอาจอยู่ในรูปของสมการ

kinematic wave, diffusion wave หรือ dynamic wave เต็มรูปแบบ สมการ kinematic wave ไม่ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมเนื่องจาก local acceleration, convective acceleration และ pressure สมการนี้สามารถใช้คำนวณการไหลในพื้นที่ที่มีความลาดชันและไม่มีอิทธิพลของน้ำท่วม (backwater) [2, 34, 37] ส่วนสมการ diffusion wave พิจารณาอิทธิพลจากแรงดันน้ำ ทำให้สามารถใช้สำหรับการไหลในพื้นที่ราบหรือมีอิทธิพลจากน้ำท่วม [10, 17, 24, 25]

การหาคำตอบของสมการการไหลอาจทำได้โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข อาทิ finite difference, finite element หรือ finite volume โดยวิธี finite difference มีระเบียบวิธีที่ไม่ซับซ้อนเหมาะกับกริดรูปสี่เหลี่ยมสม่ำเสมอ [10, 17] ส่วนวิธี finite element มีขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อนกว่า สามารถแบ่งการคำนวณเป็นรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ [20, 41] ส่วนวิธี finite volume [14, 40] เริ่มมีการประยุกต์ใช้ในการศึกษาการไหลในระดับลุ่มน้ำมากขึ้น [11, 21, 26] วิธีนี้คล้ายคลึงกับวิธี finite element เนื่องจากใช้ได้กับขอบเขตรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ และมีระเบียบวิธีที่ไม่ซับซ้อนคล้ายกับวิธี finite difference [32]

แบบจำลองเป็นเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับศึกษากระบวนการทางอุทกวิทยาในพื้นที่ลุ่มน้ำ แบบจำลองที่ใช้ศึกษาอาจเป็นชนิด lumped หรือ distributed โดยแบบจำลองชนิด lumped มีพารามิเตอร์ของแบบจำลองสม่ำเสมอทั้งลุ่มน้ำ ซึ่งต่างจากแบบจำลองชนิด distributed ที่ได้พิจารณาความแตกต่างทางกายภาพของพื้นที่ [7] ในอดีตที่ผ่านมาแบบจำลอง distributed ได้รับความนิยมน้อย เนื่องจากการประมวลผลต้องการระบบคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงและใช้ข้อมูลมาก ในปัจจุบันแบบจำลอง distributed ถูกนำไปศึกษาลุ่มน้ำมากขึ้น [18, 19, 30, 35] อันเป็นผลมาจากเทคโนโลยีสารสนเทศที่พัฒนาอย่างรวดเร็วและข้อมูลปริภูมิจากระบบภูมิสารสนเทศและการสำรวจระยะไกลสามารถจัดหาได้ง่ายขึ้น [31, 33] แบบจำลองชนิด distributed ที่ถูกนำมาใช้ศึกษาในระดับลุ่มน้ำ เช่น CASC2D [15], GSSHA [16], DHM [22], r.water.fea [41], TOPMODEL [6] และ SHE [5] เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การปรับแบบจำลองให้ตรงตามวัตถุประสงค์หรือให้รองรับการจำลองกระบวนการที่ซับซ้อนเพิ่มขึ้นกระทำได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากแบบจำลองถูกพัฒนาโดยใช้ภาษาเขียนโปรแกรมและระบบปฏิบัติการแบบดั้งเดิม นอกจากนี้แบบจำลองบางอันยังมีค่าลิขสิทธิ์การใช้งานในราคาสูง ด้วยเหตุนี้วิธีการโปรแกรมเชิงวัตถุ (object-oriented programming) [1, 4] ซึ่งมีความยืดหยุ่นในการพัฒนาแบบจำลองและการนำ code ของโปรแกรมกลับมาใช้ใหม่มีแนวโน้มได้รับความนิยมมากขึ้น [3, 9, 28, 29, 36]

บทความนี้ เสนอผลการพัฒนาและการทดสอบการทำงานของแบบจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ ซึ่งประยุกต์แนวทางเชิงวัตถุโดยใช้ภาษา Java ร่วมกับ Repast [27] ในการคำนวณการไหลของน้ำด้วยสมการ diffusion wave และหาคำตอบด้วยระเบียบวิธี finite volume

2. วิธีวิจัย

2.1 สมการการไหลของน้ำ

สมการการไหลของน้ำแบบ 2 มิติ ในรูปของเวกเตอร์ [13] เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = \mathbf{G} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix}; \mathbf{E} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{bmatrix}; \mathbf{F} = \begin{bmatrix} uh \\ uvh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} r-f \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix}$$

สมการที่ (1) ถูกลดรูปสมการเป็น 1 มิติ ในรูปแบบสมการ diffusion wave [24] เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = G \quad (2)$$

$$\text{โดย } \mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{E} = \begin{bmatrix} uh \\ h \end{bmatrix}; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} r-f \\ S_{ox} - S_{fx} \end{bmatrix}$$

สมการข้างต้นประกอบด้วย สมการการไหลต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัมตามแกน x และ y โดยที่ h เป็นความลึกน้ำ, u และ v เป็นความเร็วในทิศทาง x และ y, r เป็นความเข้มข้น, f เป็นอัตราการเข้มข้น, S_{ox} เป็นความลาดชันพื้นผิว, S_{fx} เป็นความลาดชันพลังงาน

การหาคำตอบการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ ได้เลือกแนวทางของ Jain และคณะ [24, 25] ซึ่งใช้สมการ diffusion wave แบบ 1 มิติ ในการหาคำตอบการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ โดยกำหนดทิศทางการไหลของน้ำล้นหน้าจากข้อมูล DEM

2.2 ระเบียบวิธี finite volume

วิธี finite volume เป็นวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขโดยการอินทิเกรตสมการ partial differential equation ดังนี้

$$\int_V \frac{\partial U}{\partial t} dv + \oint_S (\mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\omega}) ds = \int_V \mathbf{G} dv \quad (3)$$

หรือ จัดสมการที่ (3) ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$A \frac{\Delta U}{\Delta t} + \sum_{jj=1}^{sd} \mathbf{E}^{jj} L^{jj} = A \mathbf{G} \quad (4)$$

โดย $\mathbf{E}$ เป็น Flux ของพื้นที่ควบคุม, $\boldsymbol{\omega}$ เป็นเวกเตอร์การไหล, A เป็นพื้นที่กริด, sd เป็นจำนวนเวกเตอร์การไหล, jj เป็นลำดับของเวกเตอร์การไหล, L^{jj} เป็นความยาวด้านของการไหล

การหาคำตอบของสมการมี 2 ขั้นตอน คือ predictor และ corrector โดยขั้น predictor เป็นการหาค่าของ $\mathbf{U}^*$ จากพารามิเตอร์ที่ทราบค่าที่เวลา t ดังสมการ

$$\mathbf{U}_i^* = \mathbf{U}_i^t - \frac{\Delta t}{A_i} \left[\sum_{jj=1}^{sd} (\mathbf{E}_i^{jj})^t \cdot L_i^{jj} \right] + \Delta t \mathbf{G}_i^t \quad (5)$$

ขั้น corrector เป็นการปรับแก้ผลลัพธ์ โดยใช้พารามิเตอร์ที่ทราบจากขั้น predictor ดังสมการ

$$\mathbf{U}_i^{t+1} = 0.5 \left\{ \mathbf{U}_i^t + \mathbf{U}_i^* - \frac{\Delta t}{A_i} \left[\sum_{jj=1}^{sd} (\mathbf{E}_i^{jj})^* \cdot L_i^{jj} \right] + \Delta t \mathbf{G}_i^* \right\} \quad (6)$$

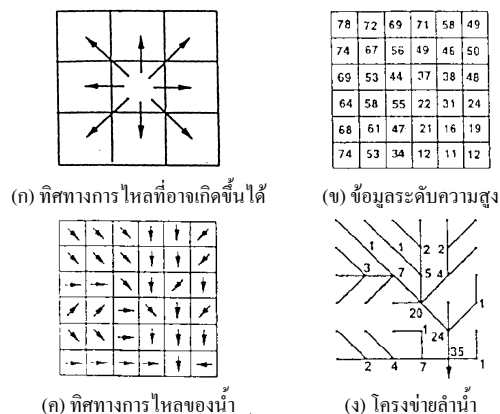
เสถียรภาพการคำนวณพิจารณาจากค่า Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) ซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 1

$$\max((u + \sqrt{gh}) \cdot \Delta t / L) \leq 1 \quad (7)$$

2.3 การกำหนดทิศทางการไหลจากข้อมูล DEM

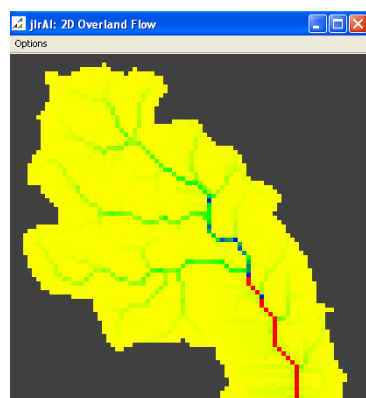
ทิศทางการไหลของน้ำกำหนดจากข้อมูลระดับความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model, DEM) โดยประมวลผลด้วยระบบภูมิสารสนเทศ ข้อมูล DEM เป็นข้อมูล SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ซึ่งได้จากการสำรวจด้วยเรดาร์โดยกระสวยอวกาศ Endeavour ในปี 2543 [38] หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางการไหลโดยระบบภูมิสารสนเทศ คือ กำหนดให้ทิศทางการไหลของน้ำแต่ละกริดมีทิศทางเป็นไปได้ 8 ทิศทาง โดยทิศทางการไหลจะไปยังกริดรอบข้างที่ต่ำสุด ซึ่งทิศ

ทางการไหลที่กำหนดไว้จะถูกนำไปใช้หาโครงข่ายของลำน้ำต่อไป ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1 โดยรูปที่ 1ก เป็นทิศทางการไหลของกริดซึ่งเป็นไปได้ 8 ทิศทาง ส่วนรูปที่ 1ข เป็นระดับความสูง รูปที่ 1ค เป็นทิศทางการไหลของน้ำ และรูปที่ 1ง เป็นโครงข่ายลำน้ำ



รูปที่ 1 การกำหนดการไหลของน้ำจาก DEM [23]

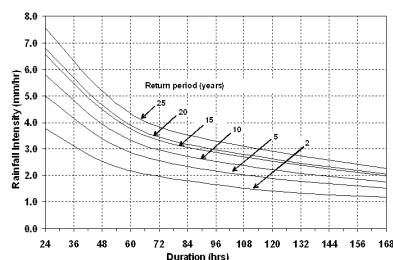
3. ผลและวิจารณ์



รูปที่ 2 แบบจำลอง jIrrAI:2DFlow

แบบจำลอง jIrrAI:2DFlow (รูปที่ 2) เป็นแบบจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติที่พัฒนาขึ้นด้วยใช้ภาษา Java โดยแบบจำลองนี้เป็นโมดูลหนึ่งของแบบจำลอง jIrrAI (Java, Irrigation, Artificial Intelligence) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางด้านการจัดการน้ำชลประทานที่ใช้แนวคิดเชิงวัตถุร่วมกับระบบปัญญาประดิษฐ์ แบบจำลอง jIrrAI:2DFlow ถูกทดสอบการทำงานในพื้นที่ของกลุ่มน้ำกระเสียว ซึ่งเป็นลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำท่าจีน พื้นที่นี้อยู่ทางตอนบนของกลุ่มน้ำกระเสียว มีพื้นที่รับน้ำ 870 ตร.กม. สภาพภูมิประเทศลาดชัน พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าดิบและป่าเสื่อมโทรม การทดสอบแบบจำลองกระทำโดยจำลองการไหลของน้ำบนพื้นที่กริด 3 ขนาด ได้แก่ 250, 500 และ 1000 เมตร และใช้ช่วงเวลาในการทดสอบ 5 ระดับ ได้แก่ 15, 30, 60, 90 และ 120 วินาที ข้อกำหนดในการจำลอง ประกอบด้วยระยะเวลาจำลองการไหลของน้ำ 120 ชั่วโมง, ความเข้มของฝน

กำหนดจากโค้ง IDF ของ อ. บ้านไร่ จ.อุทัยธานี ที่ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง รอบปีการเกิดซ้ำ 5 ปี เท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง (รูปที่ 3), ทิศทางการไหลของน้ำและความลาดชันเตรียมจากข้อมูล DEM โดยระบบภูมิสารสนเทศ, สัมประสิทธิ์ความขรุขระกำหนดจากสิ่งปกคลุมพื้นผิวตามวิธีของ USGS [39] โดยจำแนกพื้นผิวเป็นป่าดิบ ป่าเสื่อมโทรม และพืชไร่ ซึ่งเท่ากับ 0.104, 0.084 และ 0.059 ตามลำดับ ส่วนสัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำเท่ากับ 0.032 ตลอดลำน้ำ



รูปที่ 3 โค้งความเข้ม-ระยะเวลาการตก-ความถี่ ของฝน (IDF) อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี

3.1 การประเมินขนาดกริดและขั้นเวลา

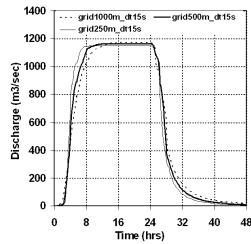
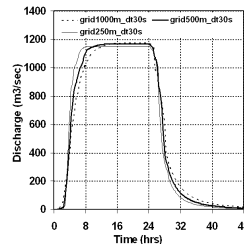
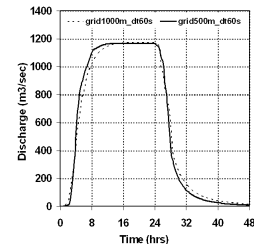
ผลการจำลองการไหลของน้ำดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงผลสำเร็จของการจำลองของกริดขนาด 250, 500 และ 1000 เมตร และขั้นเวลาที่ 15, 30, 60 และ 120 วินาที ในกรณีกริดขนาด 1000 เมตรแบบจำลองสามารถให้ผลลัพธ์การคำนวณทุกขั้นเวลา ส่วนกริดขนาดเล็กลงมาแบบจำลองให้ผลลัพธ์กรณี Δt สั้นเท่านั้น ในกรณีที่การคำนวณไม่ได้ผลลัพธ์ สังเกตได้ว่า ก่อนการคำนวณจะล้มเหลว ความเร็วของการไหลในกริดและในทางน้ำมีค่าค่อนข้างสูง มีผลให้เกิดการแกว่งตัวของผลลัพธ์เล็กน้อย และรุนแรงขึ้นเมื่อค่า CFL เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งเป็นช่วงที่กราฟน้ำท่าเข้าใกล้จุดสูงสุด โดยสาเหตุอาจเกิดจากขั้นเวลาไม่เหมาะสมกับขนาดของกริด โดยกริดขนาดเล็กที่คำนวณด้วยขั้นเวลากว้างเกินไปมีผลให้แบบจำลองไม่สามารถให้ผลลัพธ์ได้

ตารางที่ 1 ผลสำเร็จของการจำลองที่ขนาดกริดและขั้นเวลาต่าง ๆ

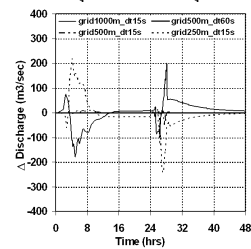
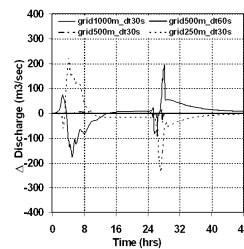
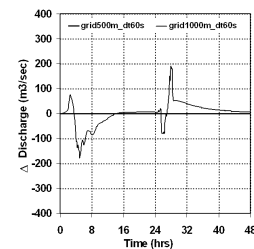
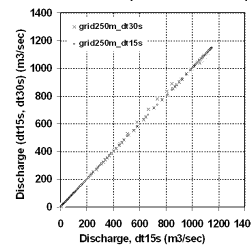
ขั้นเวลา Δt (วินาที)	ขนาดกริด (เมตร)		
	250	500	1000
120	×	×	✓
90	×	×	✓
60	×	✓	✓
30	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓

× คือ การคำนวณไม่ได้ผลลัพธ์, ✓ คือ การคำนวณได้ผลลัพธ์

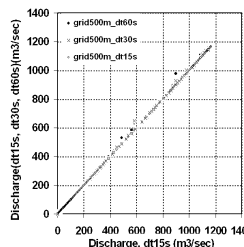
ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำ โดยรูปที่ 4ก เป็นกราฟน้ำท่ากรณีขั้นเวลา Δt เท่ากับ 15 วินาที, รูปที่ 4ข Δt 30 วินาที และรูปที่ 4ค Δt 60 วินาที จากการพิจารณารูปร่างกราฟน้ำท่าในทุกขั้นเวลาพบว่า มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยกริดขนาด 250 เมตร ให้ระยะเวลาที่เกิดน้ำท่าสูงสุดเร็วกว่ากริดขนาด 500 และ 1000 เมตร เล็กน้อย กริดขนาด 1000 เมตร ให้ระยะเวลาที่เกิดน้ำท่า

(ก) $\Delta t = 15$ วินาที(ข) $\Delta t = 30$ วินาที(ค) $\Delta t = 60$ วินาที

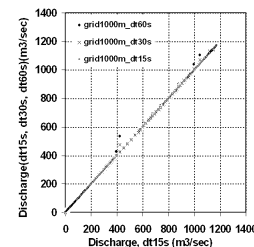
รูปที่ 4 กราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำ

(ก) $\Delta t = 15$ วินาที(ข) $\Delta t = 30$ วินาที(ค) $\Delta t = 60$ วินาทีรูปที่ 5 ผลต่างกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำ (ใช้กริดขนาด 500 เมตร Δt 60 วินาที)

(ก) ขนาดกริด 250 เมตร



(ข) ขนาดกริด 500 เมตร



(ง) ขนาดกริด 1000 เมตร

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ขึ้นเวลา 15, 30 และ 60 วินาที

ส่วนในรูปที่ 5 แสดงผลต่างของกราฟน้ำท่าเปรียบเทียบกับกราฟน้ำท่าอ้างอิงซึ่งเป็นผลลัพธ์ของกริดขนาด 500 เมตร ที่ Δt 60 วินาที โดยรูปที่ 5ก เป็นผลต่างกรณี Δt 15 วินาที, รูปที่ 5ข Δt 30 วินาที และรูปที่ 5ค Δt 60 วินาที จากรูปเห็นได้ว่า ในช่วงไค้การเพิ่มขึ้นค่าผลต่างของกริดขนาด 250 เมตรให้ค่าเป็นบวก ส่วนกริดขนาด 1000 เมตรให้ค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงกราฟน้ำท่าของกริดขนาดเล็กเกิดขึ้นเร็วกว่ากราฟน้ำท่าของกริดขนาดใหญ่ ในช่วงการลดลง ค่าผลต่างของกริดขนาด 250 เมตรให้ค่าเป็นลบ ส่วนกริดขนาด 1000 เมตรให้ค่าเป็นบวก ซึ่งแปลความหมายได้ว่ากราฟน้ำท่าของกริดขนาดเล็กลดลงเร็วกว่ากราฟน้ำท่าของกริดขนาดใหญ่

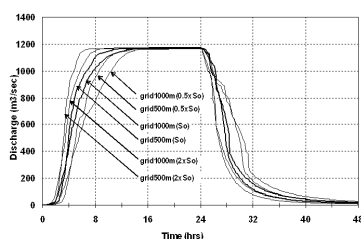
นอกจากนี้ ได้เปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราการไหลของกริดแต่ละขนาดที่ขึ้นเวลาต่างกัน ดังแสดงรูปที่ 6ก เป็นกริดขนาด 250 เมตร, รูปที่ 6ข ขนาด 500 เมตร และ รูปที่ 6ค ขนาด 1000 เมตร โดยใช้ขึ้นเวลา Δt 15 วินาที เป็นข้อมูลอ้างอิง ผลการเปรียบเทียบแสดงกราฟความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การจำลองการไหลของน้ำโดยใช้กริดขนาดเดียวกันแต่ขึ้นเวลาต่างกันให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน

3.2 ผลของความลาดชันและสัมประสิทธิ์ความขรุขระ

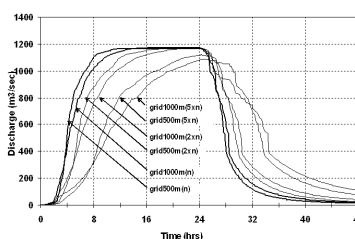
การศึกษาส่วนนี้เป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์เนื่องจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง โดยเลือกทดสอบกับกริดขนาด 500 และ 1000 เมตร ที่ Δt 60 วินาที ในรูปที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบกราฟน้ำท่า เมื่อความลาดชัน เป็น 0.5 เท่า และ 2 เท่า จากค่าเดิม ซึ่งพบว่า เมื่อความลาดชันเพิ่มขึ้น กราฟน้ำท่าเกิดเร็วขึ้น และในทางตรงข้าม เมื่อความลาดชันลดลง กราฟน้ำท่าเกิดช้าลง โดยอัตราการไหลสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีให้ค่าไม่แตกต่างกัน

ส่วนในรูปที่ 8 เป็นกราฟน้ำท่ากรณีเพิ่มสัมประสิทธิ์ความขรุขระ เป็น 2 เท่า และ 5 เท่าจากค่าเดิม พบว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระเพิ่มสูงขึ้น กราฟน้ำท่ามีแนวโน้มเกิดช้าลง ส่วนค่าอัตราการไหลสูงสุดมีแนวโน้มลดลง

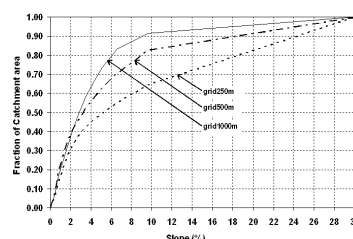
จากข้อสังเกตว่าการจำลองการไหลด้วยกริดขนาดต่างกันทำให้ผลลัพธ์ต่างกัน ในกรณีนี้จึงได้วิเคราะห์ข้อมูลค่าความลาดชันจากข้อมูล DEM ของกริดขนาด 250, 500 และ 1000 เมตร โดยในรูปที่ 9 แสดงค่าความลาดชันและสัดส่วนของพื้นที่ ซึ่งพบว่า ผลการคำนวณความลาดชันจากกริดขนาด 250 เมตร ให้สัดส่วนพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงมากกว่ากริดขนาด 500 เมตร และ 1000 เมตร โดยกริดขนาด 1000 เมตร ให้สัดส่วนพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงน้อยสุด ด้วยเหตุนี้ กราฟน้ำท่าที่คำนวณได้จากกริดขนาดเล็กจึงมีแนวโน้มเกิดเร็วกว่ากริดขนาดใหญ่



รูปที่ 7 กราฟน้ำท่าเมื่อค่าความลาดชันเป็น 0.5 เท่า และ 2 เท่าจากค่าเดิม



รูปที่ 8 กราฟน้ำท่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ เป็น 2 เท่า และ 5 เท่าจากค่าเดิม



รูปที่ 9 เปอร์เซนต์สะสมของความลาดชันของพื้นที่

3.3 การตรวจสอบและแนวทางการปรับเทียบแบบจำลอง

การตรวจสอบแบบจำลอง jIrAIs-2DFlow กระทำโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลอง GSSHA [15] ซึ่งเป็นแบบจำลองชนิด distributed เช่นเดียวกัน แบบจำลองนี้พัฒนามาจากแบบจำลอง CASC2D การคำนวณการไหลของน้ำของ GSSHA ใช้สมการ diffusive wave แบบ 2 มิติ และหาคำตอบโดยวิธี finite difference ในการจำลองการไหลเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ ได้กำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้งสองเหมือนกัน และเลือกจำลองการไหลบนพื้นที่กริดสองขนาด (500 และ 1000 เมตร) และขั้นเวลา Δt 60 วินาที

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วย อัตราการไหลสูงสุด, ปริมาณน้ำท่าเทียบเป็นความลึก และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับปริมาณน้ำฝนสุทธิ ซึ่งพบว่า ค่าอัตราการไหลสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณน้ำท่าแบบจำลอง jIrAIs จากกริดขนาด 500 เมตรให้ค่าใกล้เคียงกับปริมาณน้ำฝนสุทธิ (12 ซม.) มากที่สุด ในขณะที่ แบบจำลอง GSSHA ซึ่งให้ค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ส่วนผลการเปรียบเทียบกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำของกริดขนาด 500 และ 1000 เมตร ที่ Δt 60 วินาที ดังรูปที่ 10 ซึ่งจากกราฟรูปร่างโดยรวมของกราฟน้ำท่าใกล้เคียงกันแต่ระยะเวลาที่เกิดขึ้นน้ำท่า แบบจำลอง jIrAIs-2DFlow ให้ค่าระยะเวลาการเกิดเร็วกว่าแบบจำลอง GSSHA

สำหรับการปรับเทียบแบบจำลอง jIrAIs-2DFlow อาจทำได้ตามแนวทางของ Bolster และ Saiers [8] ซึ่งเสนอให้ปรับค่าเลขยกกำลังของพารามิเตอร์สมการ Manning ($q = (h^{\beta} S_f^{\frac{1}{3}})/n$) ในกรณีนี้ได้ทดสอบแนวทางดังกล่าว โดยปรับค่า λ จากเดิม 0.5 เป็น 0.6 มีผลให้กราฟน้ำท่าจากแบบจำลอง jIrAIs-2DFlow มีรูปร่างใกล้เคียงกับแบบจำลอง GSSHA มากขึ้น โดยระยะเวลาการเกิดน้ำท่าช้าลง (รูปที่ 11) การปรับค่า λ ในลักษณะดังกล่าวนี้ ถ้าหาค่า λ ถูกปรับให้สูงขึ้นอีกก็จะทำให้ระยะเวลาการเกิดกราฟน้ำท่าช้าลงมาก

4 สรุป

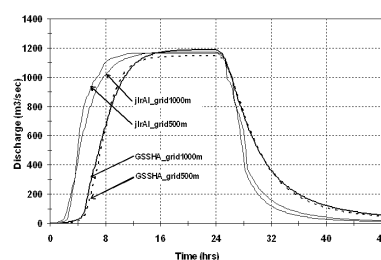
แบบจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติ ด้วยวิธี finite volume พัฒนาด้วยแนวทางการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุและถูกทดสอบการทำงานในพื้นที่ของกลุ่มน้ำกระเสี้ยว การทดสอบกระทำโดยจำลองการไหลของน้ำบนพื้นที่กริด 3 ขนาด ได้แก่ 250, 500 และ 1000 เมตร และใช้ขั้นเวลาในการทดสอบ 5 ระดับ ได้แก่ 15, 30, 60, 90 และ 120 วินาที ผลการจำลองพบว่าแบบจำลองให้ผลลัพธ์ทุกขั้นเวลาที่ทดสอบสำหรับกริดขนาด

1000 เมตร ส่วนกริดขนาดเล็กลงมาแบบจำลองไม่สามารถให้ผลลัพธ์กรณีใช้ Δt มาก การจำลองการไหลของน้ำด้วยกริดขนาดเดียวกันแต่ใช้ขั้นเวลาต่างกันพบว่าให้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกันมากนัก กราฟน้ำท่าที่คำนวณจากกริดขนาดเล็กมีแนวโน้มเกิดขึ้นเร็วกว่ากริดขนาดใหญ่ เนื่องจากค่าความลาดชันที่คำนวณได้จากข้อมูล DEM ของกริดขนาดเล็กให้สัดส่วนพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงมากกว่ากริดขนาดใหญ่ การเพิ่มค่าความลาดชันทำให้กราฟน้ำท่าเกิดเร็วขึ้น ส่วนการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระทำให้กราฟน้ำท่ามีแนวโน้มเกิดขึ้นช้าและค่าอัตราการไหลสูงสุดลดลง การตรวจสอบผลลัพธ์จากแบบจำลอง jIrAI กับแบบจำลอง GSSHA มีค่าใกล้เคียงกัน

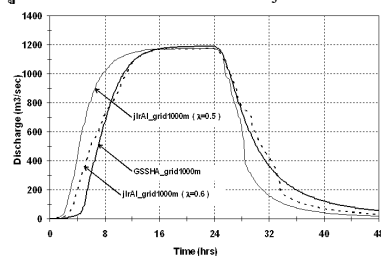
แบบจำลอง jIrAIs มีจุดเด่นที่โครงสร้างสอดคล้องกับระบบภูมิสารสนเทศ ช่วยให้เตรียมข้อมูลได้สะดวกขึ้น อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณยังเป็นข้อจำกัดของการนำแบบจำลองไปใช้งานจริง

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการไหลสูงสุด ปริมาณน้ำท่า และความคลาดเคลื่อน

แบบจำลอง/ขนาดกริด	jIrAIs 500m	jIrAIs 1000m	GSSHA 500m	GSSHA 1000m
อัตราการไหลสูงสุด(m³/sec)	1,166	1,173	1,149	1,191
ปริมาณน้ำท่า (cm)	11.98	11.63	11.76	11.74
% คลาดเคลื่อน	0.2%	3.1%	2.0%	2.2%



รูปที่ 10 กราฟน้ำท่าจากแบบจำลอง jIrAIs และแบบจำลอง GSSHA



รูปที่ 11 การปรับเทียบแบบจำลองด้วยการปรับค่า λ

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนพัฒนาอาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, ทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา และ ทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และเป็นผลงานส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่องการวิจัยการจัดการน้ำในลุ่มน้ำท่าจีน สถาบันวิจัยและพัฒนา มก.

6 เอกสารอ้างอิง

- [1] จตุรพิช สมหอม และ พิษานันท์ พิงคประเสริฐ, 2548. แนวคิดเชิงวัตถุ (Object-Oriented Concept). กรุงเทพฯ: สมาคมวิศวกรรมศาสตร์ไทย.
- [2] นุชนารถ ศรีวงศ์ตานนท์, 2545. การจำลองสภาวะน้ำท่วม. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] ยุทธนา พันธุ์มคศิลป์ และ เอกสิทธิ์ โมเสตสกุลชัย, 2548. การพัฒนาแบบจำลองสมดุลของน้ำในดินโดยแนวทางแบบเชิงวัตถุ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10. ชลบุรี: วสท. น. WRE148-WRE153.
- [4] รัชนิ กัลยาณีย์ และวราภรณ์ สุทธิโรจน์อำไพ, 2548. ความรู้เบื้องต้นเทคโนโลยีเชิงอ็อบเจกต์. กรุงเทพฯ: การศึกษา.
- [5] Abbott, M.B. *et al.*, 1986a. An introduction to the European Hydrological System Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.*, 87:45-59
- [6] Beven, K.J., and M.J. Kirkby., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1):43-69.
- [7] Beven, K.J., 2005. Chapter 122. Rainfall-runoff modeling: Introduction. Volume 3. In: Anderson, M.G., and J.J. McDonnell (eds). *Encyclopedia of Hydrological Sciences.*, West Sussex, England: John Wiley & Sons. p. 1857-1868.
- [8] Bolster, C.H., and J.E. Saier., 2002. Development and evaluation of a mathematical model for surface-water flow with the Shark River slough of the Florida Everglades. *J. Hydrol.*, 259: 221-235.
- [9] Bolte, J., 1998. Object-oriented programming for decision systems. In: Peart, R.M., and R.B. Curry (eds). *Agricultural Systems Modeling and Simulation.*, New York: Maecel Dekker. p. 629-650.
- [10] Bradbrook, K.F. *et al.*, 2004. Two dimension diffusion wave modelling of flood inundation using a simplified channel representation. *Intl. J. River Basin Management.*, 2(3):211-223.
- [11] Bradford, S.F., and N. Katopodes., 2001. Finite volume model for nonlevel basin irrigation. *J. Irrig. and Drain.*, 127(4):216-223.
- [12] Bradford, S.F., and N. Katopodes., 1999. Hydrodynamic of turbid underflows. I: Formulation and numerical analysis. *J. Hydrologic Eng.*, 125(10):1006-1028.
- [13] Chaudhry, M.H., 1993. *Open-channel flow.* Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. 483 p.
- [14] Chung, T.J., 2002. *Computational fluid dynamics.* Cambridge: Cambridge University. 1012 p.
- [15] Downer, C.W., and F.L. Ogden., 2002. *GSSHA user's manual.* Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis version 1.43 for WMS 6.1. ERDC Technical Report. Mississippi: Vicksburg.
- [16] Downer, C.W., and F.L. Ogden., 2004. GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes. *J. Hydrologic Engng.*, 9(3):161-174.
- [17] Feng, K., and F.J. Molz., 1997. A 2-D diffusion-based wetland flow model. *J. Hydrol.*, 196:230-250.
- [18] Fortin, J.P. *et al.*, 2001. Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. *J. Hydrologic Eng.*, 6:91-99.
- [19] Fortin, J.P. *et al.*, 2001. Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. II: Application to Chaudière Watershed. *J. Hydrologic Eng.*, 6:100-108.
- [20] Hirsch, C., 1988. *Numerical computation of internal and external.* Chichester: John Wiley & Sons. 515 p.
- [21] Horritt, M.S., P.D. Bates, and M.J. Mattinson., 2006. Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow. *J. Hydrol.*, 329:306-314.
- [22] Hromadka, T.V., and C.C. Yen., 1987. *A Diffusion Hydrodynamic Model (DHM).* Water-Resources Investigation Report 87-4137. Mississippi: USGS. 135 p.
- [23] Jain, M.K., and V.P. Singh., 2003. *Water resources systems planning and management.* Amsterdam: Elsevier. 858 p.
- [24] Jain, M.K., and V.P. Singh., 2005. DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation. *J. Hydrol.*, 302:107-126.
- [25] Jain, M.K., U.C. Kothiyari, and K.G. Ranga Raju., 2004. A GIS based distributed rainfall-runoff model. *J. Hydrol.*, 299:107-135.
- [26] Moroney, T.J., and I.W. Turner., 2006. A finite volume method based on radial basis functions for two-dimensional nonlinear diffusion equation. *J. Hydrol.*, 30:1118-1133.
- [27] North, M.J., N.T. Collier, and J.R. Vos., 2006. Experiences creating three implementations of the Repast agent modeling toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation.*, 16:1-25. <URL: <http://repast.sourceforge.net/>>
- [28] Papajorgji, P.J., and T.M. Shatar., 2004. Using the Unified Modeling Language to develop soil water-balance and irrigation-scheduling models. *Environmental Modelling & Software.*, 19:451-459.
- [29] Papajorgji, P.J., and P.M. Pardalos., 2006. *Software engineering techniques applied to agricultural systems.* : An object-oriented and UML approach. New York, NY: Springer. 247 p.
- [30] Schellekens, J., and P. Reggiani., 2005. Chapter 127. Rainfall-runoff Modeling: Distributed Models, Volume 3. In: Anderson, M.G., and J.J. McDonnell (eds). *Encyclopedia of Hydrological Sciences.*, West Sussex, England: John Wiley & Sons. p. 1967-1983.
- [31] Schultz, G.A., and E.T. Engman (eds.), 2000. *Remote sensing in hydrology and water management.* Berlin: Springer. 483 p.
- [32] Singh, V.P., and S.M. Bhallamudi., 1997. Hydrodynamic modeling of basin irrigation. *J. Irrig. and Drain.*, 123(6):407-414.
- [33] Singh, V.P., and M. Fiorentino., 1996. *Geographical information systems in hydrology.* Dordrecht: Kluwer Academic. 443p.
- [34] Singh, V.P., 1996. *Kinematic wave modeling in water resources.* Surface-water hydrology. New York: John Wiley & Sons. 940 p.
- [35] Singh, V.P., and D.A. Woolhiser., 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *J. Hydrologic Eng.*, 7:270-292.
- [36] Smithers, J., and R. Schulze., 2004. *ACRU - Agrohydrological modelling system.* User Manual Version 4.00. Pietermaritzburg, South Africa: University of KwaZulu-Natal.
- [37] Tsai, T.L., and J.C. Yang., 2005. Kinematic wave modeling of overland flow using characteristics method with cubic-spline interpolation. *Adv. Water. Resour.*, 28:661-670.
- [38] USGS., 2006. *The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).* <URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>
- [39] USGS., *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains.* Report 2339. <URL: <http://water.usgs.gov/admin/memo/SW/sw90.16.html>>
- [40] Versteeg, H.K., and W. Malalasekera., 1995. *An introduction to computational fluid dynamics.* the finite volume method. Harlow Essex: Longman Scientific & Technical. 257 p.
- [41] Vieux, B.E., 2001. *Distributed hydrologic modeling using GIS.* Dordrecht: Kluwer Academic. 293 p.

แบบจำลองเชิงอ็อบเจกต์ “JlrAls-SW” สำหรับจำลองการไหลของน้ำในดิน

JlrAls-SW: An Object-Oriented Model for Soil-Water Flow Simulation

ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์¹ และเอกสิทธิ์ โสสิตสกุลชัย^{1*}

Yutthana Phankamolsil¹ and Ekasit Kositsakulchai^{1*}

ABSTRACT

This paper applied the object-oriented approach for developing a soil-water flow model. Java and Repast, an agent-based modeling toolkit, were selected as development tools. The JlrAls (Java, Irrigation, Artificial Intelligences) model was designed for simulating hydrological processes in agricultural land; JlrAls-SW was a module of the main model. JlrAls-SW model simulated 1-D soil-water flow processes using Richards' equation and solved the equation by finite difference method. The model structure consisted of three main objects: "Weather", "Crop" and "Soil". These objects were linked by message passing. The object "Soil" was the core component for simulating soil-water flow. In order to test the model, daily soil water movement was simulated during the period of two years (January 2001 – December 2002) in Nakhon Pathom and Saraburi soil series. The simulation options included 2 cases, bare soil and grass covered surface. For validating, the results of JlrAls-SW model were compared with those of SWAP model. Both models were configured with identical parameters and input variables. It was found that, soil evaporation and transpiration estimated by the JlrAls-SW and SWAP model were in good agreement. Moreover, a good consistency could be observed from soil moisture variation curve in cases of bare soil and grass covered surface. Finally, the object-oriented approach is applicable for developing complex soil-water flow model. However the model application in large scale area requires appropriate processes in object analysis and design, and high performance computer.

Key words: Field water management, Unsaturated soil water flow, Soil-plant-water relations, Object orientation, Simulation modeling.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองการไหลของน้ำในดิน โดยใช้แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ด้วยภาษาจาวา (Java) และใช้ชุดเครื่องมือรีพาสต์ (Repast) ซึ่งเป็นชุดเครื่องมือสำหรับสร้างแบบจำลองบนพื้นฐานของเอเจนต์ (agent-based modeling) แบบจำลองจีเรส (Java, Irrigation, Artificial Intelligences, JlrAls) ถูกออกแบบสำหรับจำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในพื้นที่เกษตรกรรม โดย JlrAls-SW เป็นโมดูลหนึ่งของแบบจำลองหลัก ที่ทำหน้าที่จำลองกระบวนการไหลของน้ำในดินด้วยสมการของริชาร์ดแบบ 1 มิติ และหาคำตอบสมการโดยวิธี finite difference โครงสร้างแบบจำลองประกอบด้วยอ็อบเจกต์หลัก คือ อากาศ (Weather), พืช (Crop) และดิน (Soil) ซึ่งเชื่อมโยงกันผ่านการแลกเปลี่ยนข้อมูล โดยมีอ็อบเจกต์ "Soil" เป็นกลไก

¹ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University,

Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* Corresponding author: Tel. 0-3435-1897.Fax. 0-3435-1414, Email address: fengesk@ku.ac.th.

หลักของการจำลองการไหลของน้ำในดิน การทดสอบแบบจำลองกระทำโดยการจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินเป็นรายวัน ระยะเวลา 2 ปี (ม.ค.2544 ถึง ธ.ค.2545) ในกรณีดินเปล่าและกรณีปลูกหญ้ากับชุดดินนครปฐมและชุดดินสระบุรี การทดสอบผลลัพธ์ทำโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลอง SWAP ด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้งสองให้เหมือนกัน จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ของปริมาณการระเหยจากดินและปริมาณการคายน้ำอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินมีแนวโน้มสอดคล้องกัน ทั้งกรณีดินเปล่าและกรณีปลูกหญ้า ท้ายสุด แนวทางเชิงอ็อบเจกต์สามารถประยุกต์ใช้และพัฒนาแบบจำลองการไหลของน้ำที่ซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์แบบจำลองในพื้นที่ขนาดใหญ่ยังคงต้องการกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบเชิงอ็อบเจกต์ที่เหมาะสมและคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงในการทำงาน

คำสำคัญ : การจัดการน้ำระดับแปลง การไหลของน้ำในดินไม่อิ่มตัว ความสัมพันธ์ ดิน-น้ำ-พืช แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ การจำลองสถานการณ์

คำนำ

ปริมาณความชื้นในดิน เป็นข้อมูลที่สำคัญที่สุดอันหนึ่งสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทาน เนื่องจาก เป็นข้อมูลที่ใช้ทราบถึงความต้องการน้ำรวมถึง ประสิทธิภาพของการบริหารจัดการ การวิเคราะห์การไหลของน้ำในดินด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้สำหรับการประเมินปริมาณความชื้นในดิน โดยทั่วไปการวิเคราะห์การไหลของน้ำในดินมีขั้นตอนค่อนข้างยุ่งยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการไหลของน้ำในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากการหาคำตอบของสมการควบคุมการไหลจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงเลข

ในปัจจุบันมีซอฟต์แวร์สำเร็จรูปสำหรับช่วยในการวิเคราะห์การไหลของน้ำในดิน โดยอาจแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มแรกเป็นแบบจำลองทางด้านอุทกวิทยาการเกษตร (agro-hydrology) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ในระบบ ดิน-น้ำ-พืช อาทิ แบบจำลอง SWAP (Kroes and van Dam, 2003) แบบจำลอง ORYZA2000 (Bouman *et al.*, 2001) ที่มีโมดูลย่อยสำหรับการเคลื่อนที่ของน้ำในดินสำหรับพื้นที่สูง SAHEL (Wopereis *et al.*, 1996) และสำหรับพื้นที่ลุ่ม SAWAH (ten Berge *et al.*, 1992), PADDY (Wopereis *et al.*, 1996) หรือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เฉพาะการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายในดิน เช่น HYDRUS (Simunek *et al.*, 1998) ซึ่งมีรุ่นที่วิเคราะห์การไหลทั้งแบบ 1 มิติ (HYDRUS1D), 2 มิติ (HYDRUS2D) และ 3 มิติ (HYDRUS3D) ส่วนกลุ่มที่สองเป็นแบบจำลองทางด้านอุทกธรณีวิทยา (geo-hydrology) เช่น แบบจำลอง SEEP2D (Jones, 1999) ที่เน้นการวิเคราะห์การไหลของน้ำลอดอาคาร หรือแบบจำลองระบบน้ำใต้ดินแบบ 3 มิติ อาทิ MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) ที่ใช้ระเบียบวิธี finite difference คำนวณการไหลของ

น้ำ ส่วน FEMWATER (Lin *et al.*, 1996) ใช้ระเบียบวิธี finite element

แบบจำลองส่วนใหญ่ใช้วิธีเขียนโปรแกรมด้วยภาษาเชิงกระบวนการ (procedure-oriented language) อาทิ ภาษาฟอร์แทรนหรือภาษาซี ถึงแม้ว่าแบบจำลองที่กล่าวมาข้างต้นมีการใช้งานในปัจจุบันแต่การปรับแบบจำลองให้ตรงตามวัตถุประสงค์หรือให้รองรับการจำลองกระบวนการที่ซับซ้อนเพิ่มขึ้นกระทำได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากแบบจำลองถูกพัฒนาโดยใช้ภาษาเขียนโปรแกรมและระบบปฏิบัติการแบบดั้งเดิม นอกจากนี้บางแบบจำลองยังมีค่าลิขสิทธิ์การใช้งานในราคาสูง (ยุทธนาและเอกสิทธิ์, 2550) ด้วยเหตุนี้แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์ (object orientation) จึงมีแนวโน้มได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากแนวคิดนี้มีจุดเด่นหลายประการ ได้แก่ (1) การพัฒนาซอฟต์แวร์สามารถนำชุดคำสั่งกลับมาใช้ และขยายขีดความสามารถได้ง่าย (2) ชุดคำสั่งที่นำมาใช้ซ้ำได้ผ่านการตรวจสอบมาก่อนแล้ว จึงทำให้ทำงานได้อย่างรวดเร็วและน่าเชื่อถือมากขึ้น (3) ระเบียบวิธีเชิงอ็อบเจกต์เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการทำงานกับระบบที่ซับซ้อน (4) วิธีการเชิงอ็อบเจกต์ให้แนวทางสำหรับการสร้างแบบจำลองที่สอดคล้องกับโลกตามความเป็นจริงได้โดยง่าย (Liu and Stewart, 2004) ในส่วนการประยุกต์แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์ Pan *et al.*, (2000) ได้พัฒนาแบบจำลองการเจริญเติบโตของพืชผ่านทางอินเทอร์เน็ตเพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้ ส่วน Papajorgji and Shatar (2004) ได้นำเสนอแนวคิดเชิงอ็อบเจกต์สำหรับการพัฒนาแบบจำลองโดยผนวกองค์ประกอบของดิน พืช และภูมิอากาศเข้าด้วยกัน

งานวิจัยชิ้นนี้ มีเป้าหมายเพื่อประยุกต์วิธีเชิงอ็อบเจกต์สำหรับแทนโครงสร้างดินและกระบวนการไหลของน้ำในดิน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ต่อไปนี้ (1) พัฒนาแบบจำลองเชิงอ็อบเจกต์สำหรับจำลองการไหลของน้ำ

ในดิน (2) ทดสอบการทำงานของแบบจำลองและทวนสอบผลลัพธ์โดยเทียบกับแบบจำลอง SWAP

เครื่องมือและวิธีการ

สมการการไหลของน้ำในดิน

การจำลองกระบวนการไหลของน้ำในดินใช้สมการของริชาร์ด (Richards' equation) ซึ่งคำนวณการไหลของน้ำในดินแบบ 1 มิติ ในแนวดิ่ง สมการนี้มีพื้นฐานจากหลักการอนุรักษ์มวลสารและสมการของ Darcy (Jury *et al.*, 1991) ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (1)$$

โดย θ เป็นปริมาณน้ำในดิน [$L^3 L^{-3}$], h เป็นแรงดึงดูดความชื้นในดิน [L], z เป็นระดับในแนวดิ่ง [L] (มีค่าเป็นบวกในทิศขึ้น), K เป็นค่าการนำน้ำของดิน [$L T^{-1}$], S เป็นอัตราการดูดซึมน้ำของรากพืชออกจากดิน [$L^3 L^{-3} T^{-1}$]

จากรูปของสมการที่ (1) ยังไม่สามารถหาคำตอบได้เนื่องจาก มีตัวแปร θ และ h ซึ่งเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าสองตัว การหาคำตอบจึงทำโดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง θ และ h ซึ่งเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า water retention curve (WRC) หรือ เส้นอัตลักษณ์ของน้ำในดิน (soil water characteristic) ในการศึกษาใช้สมการของ van Genuchten (1980) ดังนี้

$$\theta(h) = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2)$$

ค่าการนำน้ำของดินตามความชื้น (hydraulic conductivity curve) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง K และ h ตามสมการ Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) ดังนี้

$$K(h) = K_{sat} S_c^\lambda [1 - (1 - S_c^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

โดย K_{sat} เป็นค่าการนำน้ำของดินอิ่มตัว, θ_{sat} เป็นปริมาณน้ำในดินขณะดินอิ่มตัว, θ_{res} เป็นปริมาณน้ำในดินขณะดินแห้งในอากาศ, S_c เป็นระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน $S_c = (\theta - \theta_{res}) / (\theta_{sat} - \theta_{res})$, ส่วน α , n , m และ λ เป็นพารามิเตอร์ของสมการ โดย $m = 1 - 1/n$ และ λ ใช้เท่ากับ 0.50 (Mualem, 1976)

สมการที่ (1) สามารถเขียนในรูปอนุพันธ์ของ h โดยการกำหนดค่า water capacity (C) ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินเทียบกับแรงดึงดูดของน้ำในดิน หรือ $C = \partial \theta / \partial h$ เมื่อแทนลงในสมการที่ (1) สามารถเขียนเป็นสมการ (4)

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (4)$$

ค่า water capacity หาจากค่าอนุพันธ์ของสมการ WRC ของ van Genuchten ดังสมการ (5)

$$C(h) = \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res}) \alpha^n n m |h|^{n-1}}{(1 + |\alpha h|^n)^{2-1/n}}; h < 0 \quad (5)$$

การหาคำตอบสมการด้วยวิธีเชิงเลข

การหาคำตอบสมการริชาร์ดด้วยวิธีเชิงเลขใช้แนวทางที่เสนอโดย van Dam and Feddes (2000) ซึ่งใช้ระเบียบวิธี finite difference กับสมการริชาร์ดรูปแบบผสม θ และ h และหาคำตอบด้วยวิธี modified Picard iteration scheme (Celia *et al.*, 1990) เกณฑ์การรู้เข้าของคำตอบกำหนดด้วยผลต่างของ θ (Huang *et al.*, 1996) สมการริชาร์ดในรูปแบบไม่ต่อเนื่องของชั้นดิน i (compartment i) เขียนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} C_i^{j+1,p-1} (h_i^{j+1,p} - h_{i-1}^{j+1,p-1}) + \theta_i^{j+1,p-1} - \theta_i^j \\ = \frac{\Delta t^j}{\Delta z_i} \left[K_{i-(1/2)}^j \left(\frac{h_{i-1}^{j+1,p} - h_i^{j+1,p}}{\Delta z_u} \right) + K_{i-(1/2)}^j \right. \\ \left. - K_{i+(1/2)}^j \left(\frac{h_{i-1}^{j+1,p} - h_{i+1}^{j+1,p}}{\Delta z_l} \right) - K_{i+(1/2)}^j \right] \end{aligned} \quad (6)$$

โดย ดัชนีล่าง i เป็นตัวชี้ตำแหน่งของชั้นดิน โดยชั้นดินที่อยู่ด้านบนจะเป็น $i-1$ ชั้นดินด้านล่างจะเป็น $i+1$ เช่น h_i เป็นแรงดึงน้ำของชั้นดิน i ส่วนของชั้นดินด้านบนเป็น h_{i-1} หรือชั้นดินด้านล่างเป็น h_{i+1} ส่วนดัชนีบน j เป็นตัวชี้เวลาในขั้นปัจจุบัน โดยเวลาในขั้นถัดไปจะเป็น $j+1$

Δt^j เป็นขั้นเวลา (time step), Δz_i เป็นความหนาของชั้นดิน i ส่วน Δz_u เป็นผลต่างระหว่างความลึกที่จุดกึ่งกลางชั้นดินด้านบนกับชั้นดิน i ($\Delta z_u = z_{i-1} - z_i$) และ Δz_l เป็นผลต่างระหว่างความลึกที่จุดกึ่งกลางชั้นดิน i กับชั้นดินด้านล่าง ($\Delta z_l = z_i - z_{i+1}$), K^j เป็นค่าการนำน้ำของดินที่ชั้น

เวลาปัจจุบัน j โดยเป็นค่าเฉลี่ยของชั้นดินที่ i กับชั้นดินด้านบน ($K_{i-(1/2)}^j$) หรือ ชั้นดินด้านล่าง ($K_{i+(1/2)}^j$) ทั้งนี้ สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมจาก van Dam *et al* (1997) เนื่องจาก ค่า water capacity C ในสมการ (6) มีการเปลี่ยนแปลงมากในแต่ละรอบของการหาคำตอบ ซึ่งมีผลต่อความถูกต้องในการหาปริมาณความชื้น θ ดังนั้น van Dam and Feddes (2000) จึงเสนอให้ใช้วิธีทำนายค่า C ที่ชั้นเวลา $j+1, p-1$ หรือ $C_{j+1,p-1}^i$ ขึ้นมาก่อน จากนั้น จึงหาคำตอบในชั้นเวลา $j+1, p$ โดยการคำนวณจะทำซ้ำจนกระทั่ง $\theta_{j+1,p-1}^i$ (ปริมาณน้ำในชั้นดิน i ที่ชั้นเวลา $j+1, p-1$) และ $\theta_{j+1,p}^i$ (ปริมาณน้ำที่ชั้นเวลา $j+1, p$) มีผลต่างไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด การระเหยและการคายน้ำ

การระเหยและการคายน้ำคำนวณจากสมการของ Penman-Monteith (Monteith and Unsworth, 1990) ดังนี้

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \{ (e_s - e_a) / r_a \}}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (7)$$

โดย R_n พลังงานรังสีแสงอาทิตย์สุทธิที่ได้รับ, G เป็นพลังงานความร้อนถ่ายเทลงดิน, ρ_a เป็นความหนาแน่นของอากาศ, c_p เป็นค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $(e_s - e_a)$ เป็นผลต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวกับความดันไอน้ำจริง, Δ เป็นความชันของโค้งอุณหภูมิและความดันไอน้ำ, γ เป็นค่าคงที่ของเครื่องวัดความชื้น, r_s และ r_a เป็นความต้านทานของพื้นผิว และของการเคลื่อนที่ของอากาศ

แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์

แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์ (object orientation) มีที่มาจากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาเชิงอ็อบเจกต์ (object-oriented programming, OOP) โดยภาษา Simula นับได้ว่าเป็นภาษาแรกที่ใช้นี้แนวคิดนี้ในการเขียนโปรแกรมสำหรับแบบจำลองสถานการณ์แบบแยกหน่วย (discrete-event simulation) จากนั้นได้มีการพัฒนาการต่อมาเป็นการวิเคราะห์และการออกแบบเชิงอ็อบเจกต์ (object-oriented analysis and design) (Liu and Stewart, 2004)

องค์ประกอบมูลฐานของแนวคิดเชิงอ็อบเจกต์คือ “อ็อบเจกต์” นั่นเอง โดยในที่นี้จะหมายถึง สิ่งที่มีปรากฏอยู่ทั้งในโลกของความเป็นจริง (เป็นวัตถุจับต้องได้) และที่เป็นนามธรรม โดยอ็อบเจกต์ประกอบด้วย ข้อมูลคุณลักษณะของตัวเอง (attribute)

และ รายละเอียดประกอบการทำงานกับข้อมูล (method) ส่วนคำว่า “คลาส” (class) หมายถึง แม่แบบสำหรับสร้างอ็อบเจกต์ที่มีคุณลักษณะและการทำงานที่เหมือนกัน (Papajorgji and Pardalos, 2006) อ็อบเจกต์ถูกสร้างจากคลาส (หรือเป็น instance ของคลาส) ผ่านกลไกที่เรียกว่า instantiation การสร้างคลาสหนึ่งๆ ขึ้นมากระทำโดยการกำหนดสาระสำคัญของสิ่งที่กำลังพิจารณา เน้นรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับปัญหา หรือที่เรียกว่า abstraction

นอกจากนี้ การประยุกต์แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์ยังต้องการเครื่องมือที่สามารถรองรับคุณสมบัติของอ็อบเจกต์อีก 3 ประการ คือ encapsulation, inheritance และ polymorphism (1) การห่อหุ้ม ปกปิดโครงสร้างภายใน (encapsulation) เป็นเทคนิคการออกแบบให้ข้อมูลและการทำงานกับข้อมูลรวมอยู่ในอ็อบเจกต์เดียวกัน และปกปิดรายละเอียดโดยจำกัดให้เข้าถึงได้เฉพาะส่วนที่กำหนดไว้ (2) กลไกการสืบทอด (inheritance) เป็นความสามารถในการสืบทอดรายละเอียดประกอบของคลาสหนึ่งไปยังคลาสอื่นๆ ได้ และ (3) ภาวะพหุสัณฐาน (polymorphism) เป็นความสามารถในการสร้างคลาสจากฐานเดียวกันให้มีบทบาทต่างกันเพื่อการตอบสนองอย่างเหมาะสมกับข้อมูล

ภาษาจาวา (Java) และ Repast

ภาษาเขียนโปรแกรมจาวา (Java programming) มีต้นกำเนิดมาจากบริษัท Sun Microsystems โดยทีมงานของ James Gosling การพัฒนาเริ่มในปี พ.ศ. 2534 (ค.ศ. 1991) ซึ่งเดิมออกแบบเพื่อใช้ควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก เรียกว่า “โอ๊ค” (Oak) และ เปลี่ยนเป็น “จาวา” ในปี พ.ศ. 2538 (ค.ศ. 1995) (Liang, 2005) จาวาเริ่มเป็นที่สนใจ เมื่อบริษัท Sun ประกาศให้จาวาเป็นภาษาสำหรับสร้างโปรแกรมบนอินเทอร์เน็ต โดยโปรแกรมถูกสร้างขึ้นบนคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่ง แล้วนำไปทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ต่างระบบได้โดยไม่ต้องคอมไพล์โปรแกรมใหม่ (วีระศักดิ์, 2543)

จาวาถูกออกแบบให้มีลักษณะ ดังนี้ (1) ง่ายต่อการเรียนรู้และใช้งาน (simple) (2) เป็นภาษาเชิงอ็อบเจกต์โดยสมบูรณ์ (object-oriented) (3) ทำงานโดยเชื่อมโยงกันผ่านเครือข่ายได้ (distributed) (4) ทำงานผ่านตัวแปลภาษา (interpreted) (5) คงทนต่อข้อผิดพลาดของโปรแกรม (robust) (6) ปลอดภัยในการประมวลผล (secure) (7) ทำงานบนเครื่องต่างระบบได้ (architecture-neutral) (8) ย้ายระบบได้โดยไม่ต้องทำการคอมไพล์ (portable) (9) มีสมรรถนะสูง

(high performance) ด้วยเทคโนโลยี JIT (just-in-time) (10) ประมวลผลได้หลายงานพร้อมกัน (multithreaded) (11) ปรับเปลี่ยนได้ง่าย (dynamic) (Liang, 2005)

Repast (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) เป็นชุดเครื่องมือสำหรับสร้างแบบจำลองบนพื้นฐานของตัวกระทำหรือเอเจนต์ (agent-based modeling [ABM]) (North *et al.*, 2006) การพัฒนา Repast ใช้แนวคิดเชิงอ็อบเจกต์ และได้ผนวกแนวคิดหลายอย่างจากชุดเครื่องมือ Swarm (Kennedy *et al.*, 2001) ชุดเครื่องมือของ Repast ได้แก่ เครื่องมือสำหรับจำลองกระบวนการเชิงพื้นที่ที่รองรับการใช้งานร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เครื่องมือสำหรับบันทึกและแสดงผลการจำลองสถานการณ์รวมทั้งอนุญาตให้ผู้ผู้ใช้ปรับเปลี่ยนข้อมูลระหว่างการจำลองสถานการณ์ นอกจากนี้ยังมีคลังชุดคำสั่งสำหรับการพัฒนาแบบจำลองหลายรูปแบบ อาทิ วิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithms) โครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (artificial neural networks) พลวัตของระบบ (system dynamics) การจำลองแบบ Monte Carlo การใช้งาน Repast สามารถเลือกใช้ภาษาโปรแกรมได้หลายภาษา การพัฒนาแบบจำลองขั้นพื้นฐานสามารถเลือกใช้ Repast Py ที่เขียนชุดคำสั่งด้วยภาษา Python ส่วนการพัฒนาแบบจำลองในขั้นสูงอาจเลือกใช้ Repast J ที่เขียนชุดคำสั่งด้วยภาษา Java หรือ Repast.NET ที่เขียนชุดคำสั่งด้วยภาษาที่รองรับ .NET framework (เช่น C#, VB.NET)

ผลและวิจารณ์

แบบจำลอง jlrAls

แบบจำลอง jlrAls (จีเรลส์) ย่อมาจาก Java, Irrigation, Artificial Intelligences เป็นแบบจำลองที่พัฒนาโดยใช้แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ (object orientation) ร่วมกับเทคนิคด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI) ชุดคำสั่งของแบบจำลองใช้ภาษา Java และชุดเครื่องมือ Repast แบบจำลอง jlrAls จำลองกระบวนการทางอุทกวิทยาในพื้นที่เกษตรกรรม โดยมีเป้าหมายที่จะประยุกต์สำหรับงานด้านบริหารจัดการน้ำชลประทาน โดยแบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้เป็นโมดูลส่วนหนึ่งของแบบจำลอง jlrAls โดยใช้ชื่อว่า jlrAls-SW (soil-water flow) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่จำลองกระบวนการไหลของน้ำในดินด้วยสมการของริชาร์ดแบบ 1 มิติ โครงสร้างของแบบจำลอง jlrAls-SW ใน Figure 1 ประกอบด้วยอ็อบเจกต์ weather, crop และ soil โดยอ็อบเจกต์ทั้งสามเชื่อมโยงกันผ่าน

กลไกการแลกเปลี่ยนข้อมูล (message passing) อ็อบเจกต์ soil เป็นองค์ประกอบหลักของแบบจำลองที่ทำหน้าที่จำลองการไหลของน้ำในดินโดยรับข้อมูลภูมิอากาศจากอ็อบเจกต์ weather ส่วนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพืชจะรับผ่านอ็อบเจกต์ crop อ็อบเจกต์ weather ทำหน้าที่เก็บข้อมูลและคำนวณพารามิเตอร์ของภูมิอากาศ และ อ็อบเจกต์ crop ทำหน้าที่จำลองกระบวนการเจริญเติบโตของพืชโดยใช้แบบจำลองพืชอย่างง่าย (simple crop model) (Kroes and van Dam, 2003) ในบทความนี้ นำเสนอรายละเอียดของอ็อบเจกต์ soil เป็นหลัก

Figure 2 แสดงแบบจำลองเชิงแนวคิดของ jlrAls-SW โดยในภาพเป็นหน้าตัดดิน (soil profile) ซึ่งแบ่งเป็นชั้นดินย่อย (soil compartment) เรียงต่อกันในแนวดิ่ง ม้องค์ประกอบของน้ำที่หมุนเวียน ได้แก่ ฝน (rainfall), การซึมลงดิน (infiltration), น้ำท่าผิวดิน (surface runoff), การระเหยจากดิน (soil evaporation), การคายน้ำ (transpiration) และการดูดซับน้ำของรากพืช (root water extraction) กระบวนการไหลเวียนของน้ำในดินเกิดขึ้นตามแนวดิ่ง กรณีมีน้ำบนผิวดินน้ำจากผิวดินจะไหลซึมลงดินผ่านชั้นดินย่อย กรณีผิวดินแห้งน้ำในดินจะระเหยขึ้นจากผิวดิน กรณีมีพืช พืชจะดูดซับน้ำผ่านรากและจะคายน้ำสู่บรรยากาศ และกรณีมีน้ำฝนส่วนเกินจากการซึมลงดินจะเกิดน้ำท่าไหลออกไปทางผิวดิน

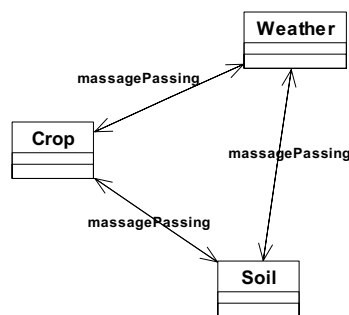


Figure 1 Relation of Class Soil-Weather-Crop.

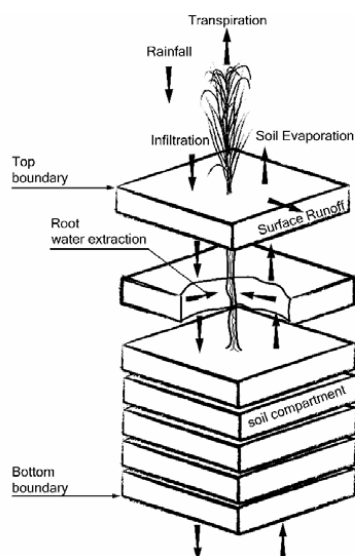


Figure 2 Conceptual model of soil water flow

การแทนโครงสร้างของดินดังกล่าวด้วยแนวทางเชิงอ็อบเจกต์ ทำโดย กำหนดอ็อบเจกต์ soil แทนดินและกระบวนการไหลของน้ำในดิน กำหนดอ็อบเจกต์ soilProfile แทนหน้าตัดดิน และกำหนดอ็อบเจกต์ soilCompartment แทนชั้นดินย่อย ซึ่งอ็อบเจกต์ soilCompartment มีจำนวนหลายชั้น แต่ละชั้นมีโครงสร้างเชื่อมต่อกันตามแนวตั้งจากบนลงล่าง โดยอ็อบเจกต์ soilProfile ห่อหุ้มอ็อบเจกต์ soilCompartment อีกครั้งหนึ่ง

ใน Figure 3 เป็นแผนภาพของคลาส Soil และคลาสประกอบของ Soil ได้แก่ SoilProfile, SoilCompartment และ SolverRichards แต่ละคลาสอธิบายด้วยคุณลักษณะของคลาส (attribute) และรายละเอียดประกอบการทำงาน (method) ในกรอบสี่เหลี่ยมแต่ละกรอบ กรอบด้านบนสุดแทนชื่อคลาส ถัดลงมาเป็น attributes ส่วนกรอบด้านล่างแทน method คลาส Soil มีความสัมพันธ์กับคลาส SoilProfile และคลาส SolverRichards เนื่องจากคลาสทั้งสองเป็นคุณลักษณะของคลาส Soil ส่วนของคลาส SoilProfile ยังมีความสัมพันธ์กับคลาส SoilCompartment เช่นกัน เนื่องจาก คลาส SoilCompartment เป็นคุณลักษณะหนึ่งของคลาส SoilProfile

แผนภาพของคลาสใน Figure 3 แสดงรายละเอียดหลัก ๆ ของคลาส ดังนี้ (1) คลาส Soil ประกอบด้วย attribute ชนิดอ็อบเจกต์ ได้แก่ crop, weather, solverRichards และ soilProfile ในส่วน method อาทิ run ทำหน้าที่จำลองการไหลของน้ำ

getH ทำหน้าที่อ่านค่าแรงดึงความชื้น เป็นต้น (2) คลาส SoilProfile ประกอบด้วย attribute ได้แก่ อ็อบเจกต์ soilCompartment และจำนวน soilCompartment ส่วน method เช่น setH ทำหน้าที่กำหนดค่าแรงดึงความชื้นให้แก่อ็อบเจกต์ soilCompartment ส่วน isSaturated ทำหน้าที่ตรวจสอบสภาพการอิ่มตัวของน้ำของหน้าตัดดิน (3) คลาส SoilCompartment ประกอบด้วย attribute อาทิ ความหนา (dZ), ค่าการนำน้ำ (K0) ค่าความชื้นในขณะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Osat) และการดูดซึมน้ำของรากพืช (Sa) เป็นต้น ในส่วน method ได้แก่ calO ทำหน้าที่คำนวณปริมาณน้ำในดิน setC คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น เป็นต้น (4) คลาส SolverRichards เป็นคลาสสำหรับแทนกระบวนการหาคำตอบสมการของริชาร์ดด้วยระเบียบวิธี finite difference โดย method ที่ทำหน้าที่คำนวณ ได้แก่ setTopBoundary ทำหน้าที่กำหนดเงื่อนไขการไหลเข้าของน้ำลงสู่ชั้นดิน checkConvergence ทำหน้าที่ตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบสมการ run ทำหน้าที่สั่งการ method ย่อยทั้งหมดทำงาน

การทดสอบแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลอง jlrAIs-SW ทำโดย การจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินเป็นสองกรณี คือ กรณีดินเปล่า (bare soil) และ กรณีปลูกหญ้า (grass covered surface) โดยใช้ข้อมูลรายวันระหว่าง 1 มกราคม 2544 ถึง 31 ธันวาคม 2545 รวม 2 ปี ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วย ข้อมูลภูมิอากาศ ข้อมูลดิน และข้อมูลพืช

(1) ข้อมูลภูมิอากาศรายวันจากสถานีตรวจอากาศเกษตรชัยนาทของกรมอุตุนิยมวิทยา ประกอบด้วย อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด, ความยาวนานของแสงแดด, ความชื้นสัมพัทธ์, ความเร็วลม, และปริมาณน้ำฝน ใน Figure 4 แสดงปริมาณน้ำฝนรายวันและปริมาณน้ำฝนสะสมระหว่างปี พ.ศ. 2544 ถึง พ.ศ. 2545 (2001 ถึง 2002) โดยปริมาณน้ำฝนในปี 2544 เท่ากับ 850 มิลลิเมตร และปี 2545 เท่ากับ 820 มิลลิเมตร

(2) ข้อมูลดินเลือกใช้ชุดดินนครปฐม (NakhonPathom soil series, Np) เป็นตัวแทนดินร่วน และชุดดินสระบุรี (Saraburi soil series, Sb) เป็นตัวแทนดินเหนียว ซึ่งชุดดินทั้งสองพบมากในพื้นที่จังหวัดชัยนาท ในแบบจำลองกำหนดหน้าตัดดินลึก 2 เมตร และเนื้อดินเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ตลอดหน้าตัด การประมาณค่าพารามิเตอร์ทางศาสตร์ของดินใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนคุณสมบัติดิน

(pedotransfer function) (Wosten *et al.*, 2001) โดยใช้ข้อมูลเนื้อดิน (soil texture) ค่าอินทรีย์วัตถุ (organic matter) และค่าความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) จากกรมพัฒนาที่ดิน (สเถียร และคณะ, 2547) การกำหนดโครงสร้างชั้นดิน แบ่งดินออกเป็น 18 ชั้นดินย่อย (compartments) มีความหนาต่างกัน 7 ขนาด ได้แก่ 1, 2, 5, 10, 20, 40 และ 75 เซนติเมตร โดยแต่ละความหนามีจำนวนชั้นย่อย 5, 5, 2, 2, 1 และ 1 ชั้น ตามลำดับ

(3) ข้อมูลพืช ใช้เฉพาะกรณีปลูกหญ้า โดยกำหนดความสูงคงที่ 12 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับพืชข้าวฮาง (Allen *et al.*, 1998) และปลูกตลอดช่วงเวลาที่ยาลองสถานการณ์

การทวนสอบผลลัพธ์ของแบบจำลอง (model validation) ทำโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลอง SWAP โดยการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้งสองเหมือนกัน แบบจำลอง SWAP ย่อจาก Soil-Water-Atmosphere-Plant model เป็นแบบจำลองระบบ ดิน-น้ำ-บรรยากาศ-พืช ที่มีการจำลองกระบวนการคล้ายคลึงกับแบบจำลอง jlrAls โดยรายละเอียดของแบบจำลอง SWAP อาจดูได้จากเอกสารอ้างอิง (van Dam, J.C. *et al.* 1997; van Dam and Feddes. 2000; Kroes and van Dam, 2003)

การระเหยจากดินกรณีดินเปล่า

การเปรียบเทียบผลการประมาณค่าปริมาณการระเหยระหว่างแบบจำลอง jlrAls-SW และ SWAP ในกรณีดินเปล่าของชุดดินนครปฐม แสดงใน Figure 5 โดย Figure 5(a) เป็นศักยภาพการระเหยของดิน (potential soil evaporation) และ Figure 5(b) เป็นการระเหยของดินที่แท้จริง (actual soil evaporation) ส่วนใน Figure 6 แสดงค่าศักยภาพการระเหย และการระเหยจริงเทียบกับเวลา

ศักยภาพการระเหยของดินจากแบบจำลอง jlrAls-SW มีค่าระหว่าง 3.1 ถึง 7.5 มิลลิเมตรต่อวัน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.89 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วน ผลจากแบบจำลอง SWAP มีค่าระหว่าง 3.2 ถึง 7.4 มิลลิเมตรต่อวัน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.99 มิลลิเมตรต่อวัน ค่าศักยภาพการระเหยของดินสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนเมษายน ซึ่งตรงกับหน้าแล้ง ส่วนค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเดือนธันวาคม

การประมาณค่าการระเหยของดินที่แท้จริง โดยแบบจำลอง jlrAls-SW มีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 6.5 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.99 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วนจากแบบจำลอง SWAP มีค่าระหว่าง 0.2

ถึง 6.6 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.94 มิลลิเมตรต่อวัน ปริมาณการระเหยของดินที่แท้จริง สูงสุดอยู่ในช่วงเดือนกันยายนและเดือนตุลาคม ซึ่งตรงกับช่วงฝนชุกทำให้ปริมาณน้ำในดินมีค่าสูง ส่วนค่าต่ำสุดอยู่ในเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงหน้าแล้งปริมาณน้ำในดินต่ำ

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าสูงใกล้เคียง 1 (Figure 5(a) และ (b)) ซึ่งหมายถึงแบบจำลองทั้งสองให้ผลการประมาณค่าศักยภาพการระเหยและปริมาณการระเหยจริงได้ใกล้เคียงกัน ในกรณีของการระเหยของดินที่แท้จริง (Figure 5(b)) สามารถสังเกตค่าการประมาณได้เป็นสองกลุ่ม คือกลุ่มที่มีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าศักยภาพการระเหย และกลุ่มที่มีค่าต่ำ โดยกลุ่มแรกแบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน ส่วนกลุ่มที่สองแบบจำลอง jlrAls-SW มีแนวโน้มให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย

การระเหยและคายน้ำกรณีปลูกหญ้า

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลอง jlrAls-SW และ SWAP ในกรณีปลูกหญ้าของชุดดินนครปฐมแสดงใน Figure 7 และ Figure 9 โดยใน Figure 7(a) เป็นศักยภาพการระเหยของดิน (potential soil evaporation) และ Figure 7(b) เป็นการระเหยของดินที่แท้จริง (actual soil evaporation) ส่วนใน Figure 9(a) เป็นศักยภาพการคายน้ำ (potential transpiration) และ Figure 9(b) เป็นการคายน้ำจริง (actual transpiration) ใน Figure 8 แสดงศักยภาพการระเหย และการระเหยจริงเป็นรายวัน ส่วน Figure 10 แสดงศักยภาพการคายน้ำ และการคายน้ำจริงเป็นรายวัน

ผลการประมาณค่าในส่วนของการประมาณการระเหย พบว่า ศักยภาพการระเหยของดินจากแบบจำลอง jlrAls-SW มีค่าระหว่าง 0.6 ถึง 1.4 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.90 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วนจากแบบจำลอง SWAP มีค่าระหว่าง 0.6 ถึง 1.4 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 มิลลิเมตรต่อวัน การระเหยของดินที่แท้จริงจากแบบจำลอง jlrAls-SW มีค่าระหว่าง 0.02 ถึง 1.24 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.49 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วนจากแบบจำลอง SWAP มีค่าระหว่าง 0.02 ถึง 1.27 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.48 มิลลิเมตรต่อวัน

ส่วนผลลัพธ์ของปริมาณการคายน้ำ พบว่า ศักยภาพการคายน้ำจากแบบจำลอง jlrAls-SW มีค่าระหว่าง 1.86 ถึง 6.85 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วนจากแบบจำลอง SWAP มีค่าระหว่าง 1.55 ถึง 6.69 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.81 มิลลิเมตรต่อวัน ปริมาณการ

คายน้ำจริงจากแบบจำลอง jlrAls-SW มีค่าระหว่าง 0.13 ถึง 5.30 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.97 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วนจากแบบจำลอง SWAP มีค่าระหว่าง 0.13 ถึง 5.25 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.81 มิลลิเมตรต่อวัน

ผลการประมาณค่าจากแบบจำลอง jlrAls-SW และ SWAP ในกรณีปลูกหญ้า ให้ค่าการระเหยจากดินและการคายน้ำใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เข้าใกล้ 1 ในทุกกรณี (Figure 7 และ Figure 9) ถึงกระนั้นแบบจำลอง SWAP ประมาณปริมาณการระเหยจากดินต่ำกว่าแบบจำลอง jlrAls-SW เล็กน้อย (Figure 7) ส่วนปริมาณการคายน้ำแบบจำลอง jlrAls-SW ประมาณค่าสูงกว่าแบบจำลอง SWAP เล็กน้อย (Figure 9) นอกจากนี้จากการพิจารณาผลลัพธ์ของศักยภาพการระเหย (Figure 7(a)) กับภาระระเหยจริง (Figure 7(b)) สังเกตได้ว่าศักยภาพการระเหยมีการกระจายตัวเรียงกันเป็นเส้นตรง แต่ภาระระเหยจริงมีบางค่ากระจายตัวออกจากแนวเส้นตรง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าบางกรณีแบบจำลอง jlrAls-SW ให้ค่าสูงกว่า แต่เกิดขึ้นไม่บ่อยนักจึงทำให้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยังคงมีค่าสูงใกล้เคียง 1

การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน

ใน Figure 11 เป็นปริมาณความชื้นในดินจากแบบจำลอง jlrAls-SW และ SWAP ในดินชุดดินนครปฐม (Np) และชุดดินสระบุรี (Sb) กรณีดินเปล่า ส่วน Figure 12 เป็นกรณีปลูกหญ้า

นับตั้งแต่เริ่มต้นการจำลองสถานการณ์ในเดือนมกราคม ปริมาณความชื้นในดินมีปริมาณลดลงช้าๆ จนกระทั่งฝนตกก็ขึ้นหลังเดือนเมษายน ปริมาณความชื้นจึงกลับเพิ่มขึ้นและมีการแกว่งตัวในช่วงไม่กว้างตลอดฤดูฝน เมื่อฝนหยุดตกหลังเดือนตุลาคม ทำให้ปริมาณความชื้นค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเดือนเมษายนในปีถัดไป ปริมาณน้ำในดินจึงกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า ในช่วงปลายฤดูฝนของ

รอบปีที่สองระหว่างเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม ปริมาณความชื้นในดินมีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก จนทำให้หน้าตัดดินอิ่มตัวด้วยน้ำทั้งหน้าตัดในการจำลองสถานการณ์บางกรณี

จากการพิจารณาปริมาณน้ำฝนรายปี พบว่าทั้งสองปีมีปริมาณน้ำฝนรวมใกล้เคียงกัน แต่ในปีแรก (พ.ศ. 2544) การกระจายของฝนค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดช่วงฤดูฝน ส่วนในปีหลัง (พ.ศ. 2545) ฝนจะตกชุกในช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม (Figure 4) ซึ่งจากผลการจำลองสถานการณ์ชี้ให้เห็นว่าการกระจายของฝนที่ตกในรูปแบบของปีหลัง จะมีปริมาณน้ำซึมลงดินมากกว่า

ในภาพรวมผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินมีแนวโน้มสอดคล้องกัน ทั้งผลจากแบบจำลอง jlrAls-SW และ SWAP ทั้งกรณีดินเปล่าและกรณีปลูกหญ้า โดยผลลัพธ์จากแบบจำลอง jlrAls-SW ให้ค่าปริมาณความชื้นในดินโดยเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อย ชุดดินสระบุรีซึ่งเป็นดินเหนียวมีปริมาณความชื้นในดินโดยเฉลี่ยสูงกว่าชุดดินนครปฐมซึ่งเป็นดินร่วน และท้ายสุดผลการจำลองกรณีปลูกหญ้ามีปริมาณน้ำในดินโดยเฉลี่ยน้อยกว่ากรณีดินเปล่า

แต่มีข้อสังเกตสำหรับผลลัพธ์ของแบบจำลอง SWAP ในการจำลองกรณีปลูกหญ้าของชุดดินสระบุรี (Figure 12) ซึ่งให้ผลไม่สอดคล้องกับผลของแบบจำลอง jlrAls-SW โดยปริมาณความชื้นในดินมีค่าค่อนข้างต่ำกว่ามาก และมีการตอบสนองต่อปริมาณน้ำฝนที่ซึมลงดินน้อย ทั้งนี้เนื่องจากชุดดินสระบุรีเป็นดินเหนียวมีค่าการนำน้ำค่อนข้างต่ำ เมื่อฝนตกในปริมาณมากมีผลให้น้ำซึมลงดินไม่หมด จึงเกิดเป็นผืนส่วนเกินขึ้น แบบจำลอง SWAP กำหนดให้ผืนส่วนเกินไหลเป็นน้ำท่าผิวดินออกจากหน่วยที่พิจารณา ส่วนแบบจำลอง jlrAls-SW กำหนดให้เป็นน้ำซังบนผิวดินและไหลซึมลงดินในวันถัดมา

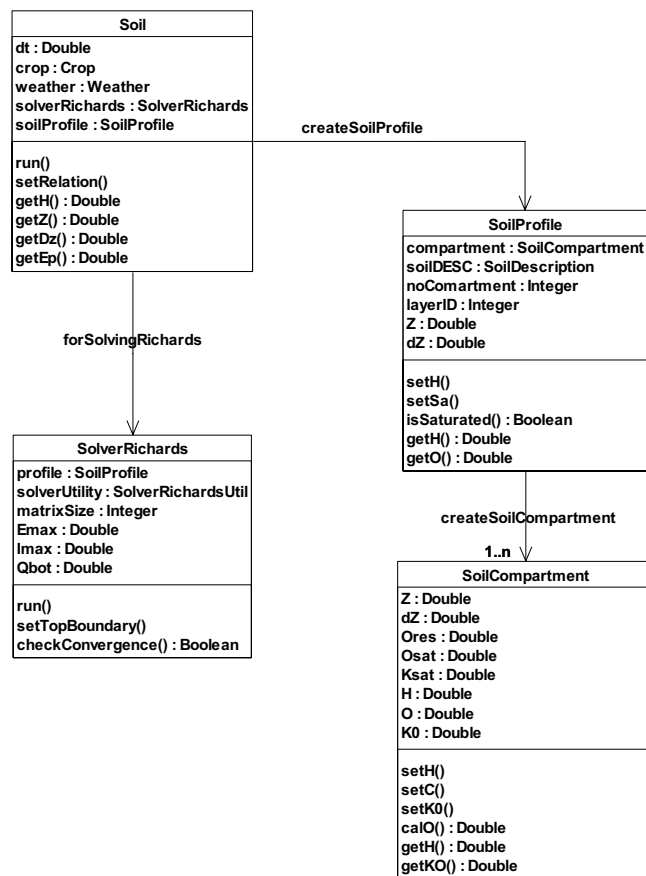


Figure 3 Class diagrams of class "Soil" and its composite classes.

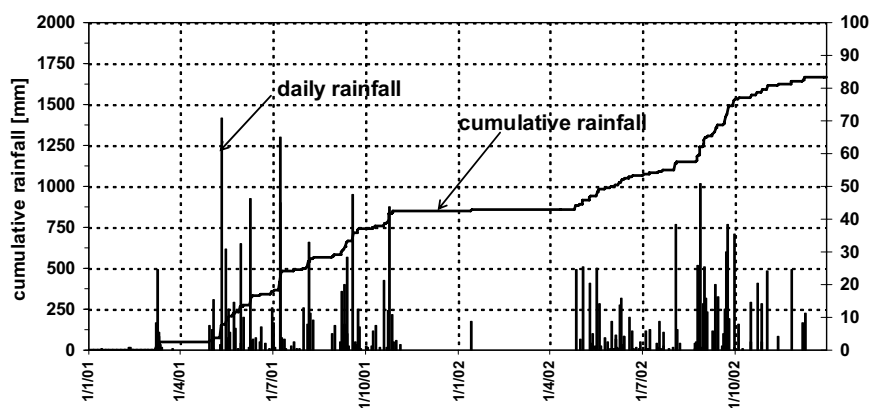


Figure 4 Daily rainfall and cumulative rainfall at Chainat station (January 2000 – December 2001)

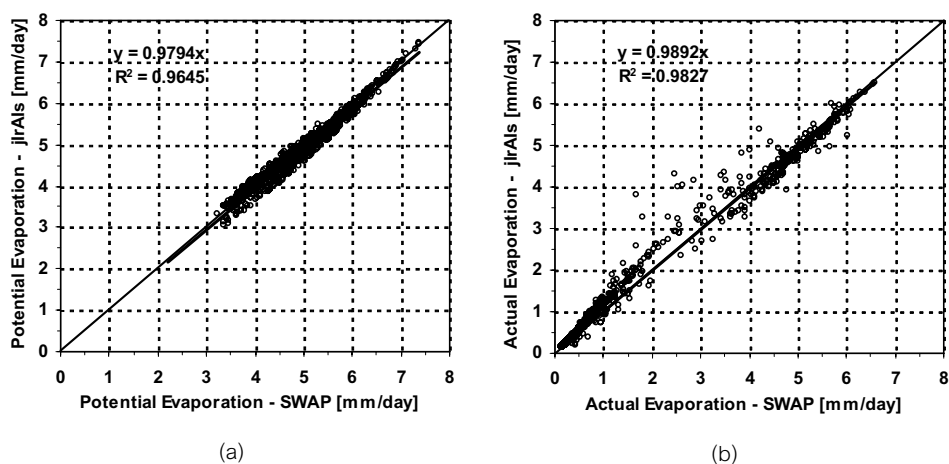


Figure 5 Comparison of soil evaporation estimated by SWAP and jlrAls models in case of bare soil:
(a) potential evaporation (b) actual evaporation.

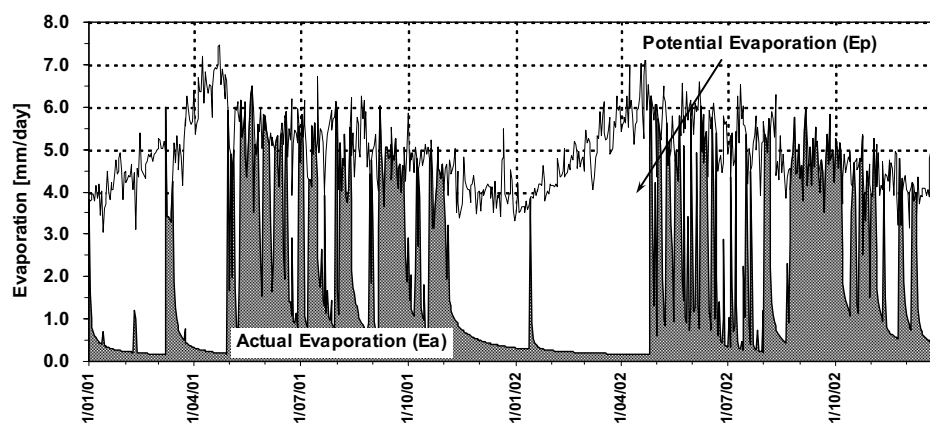


Figure 6 Soil evaporation estimated by jlrAls-SW model in case of bare soil.

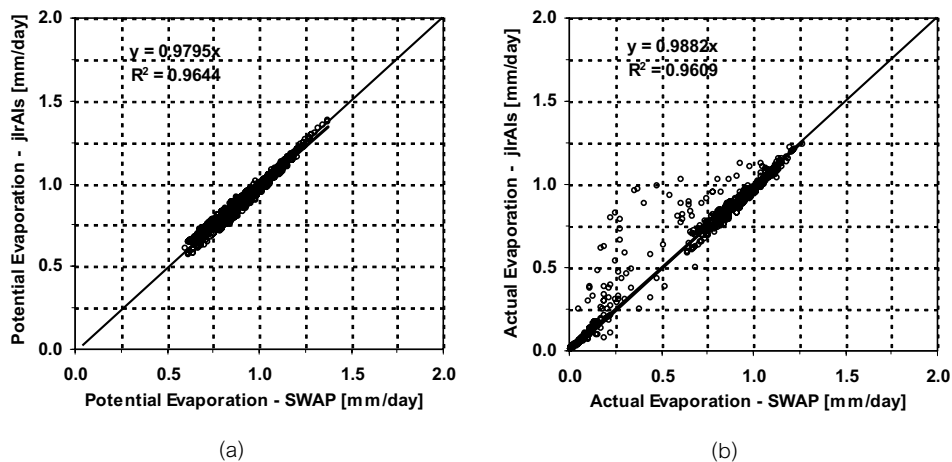


Figure 7 Comparison of soil evaporation estimated by SWAP and jlrAls models in case of grass covered surface (a) potential evaporation (b) actual evaporation.

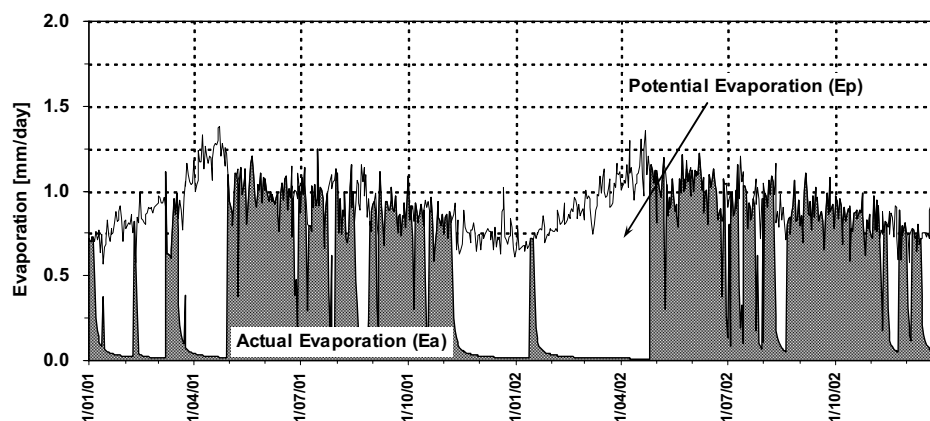


Figure 8 Soil evaporation estimated by jlrAls-SW model in case of grass covered surface.

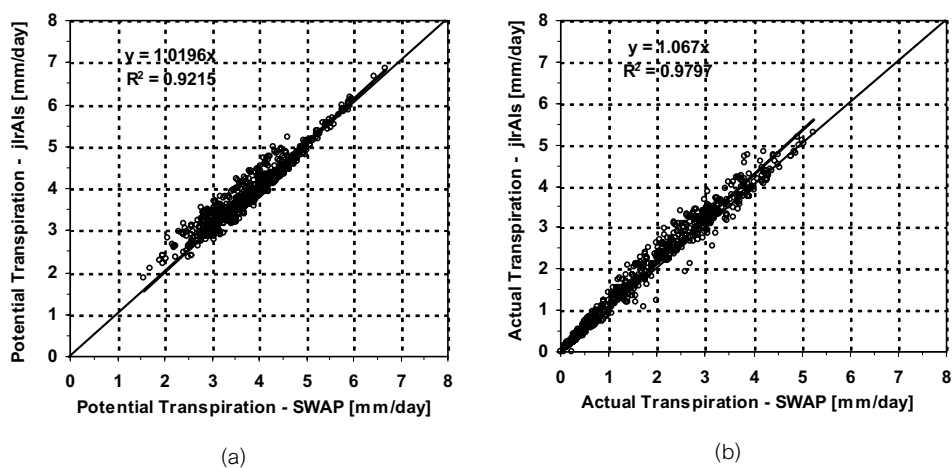


Figure 9 Comparison of transpiration estimated by SWAP and jlrAls models in case of grass covered surface : (a) potential transpiration (b) actual transpiration.

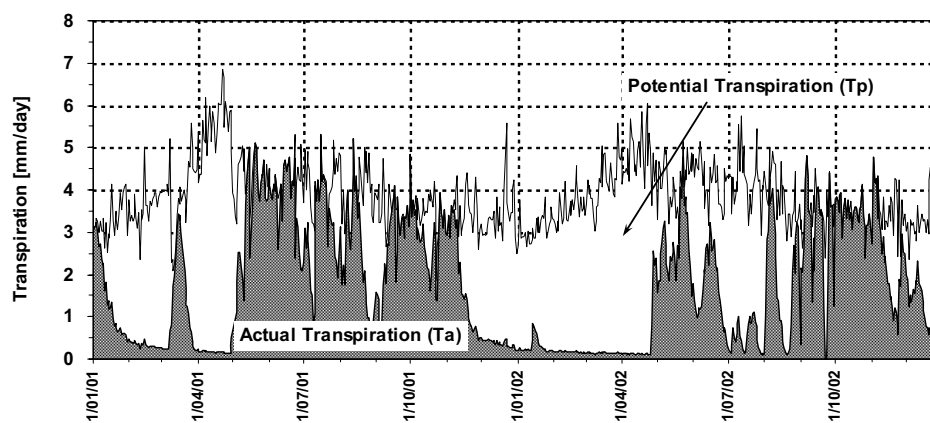


Figure 10 Transpiration estimated by jlrAls-SW model in case of grass covered surface

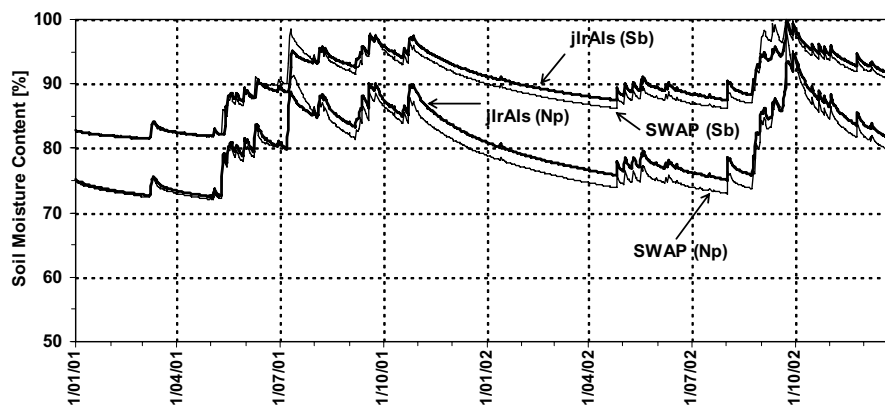


Figure 11 Dynamics of moisture in soil column in case of bare soil.

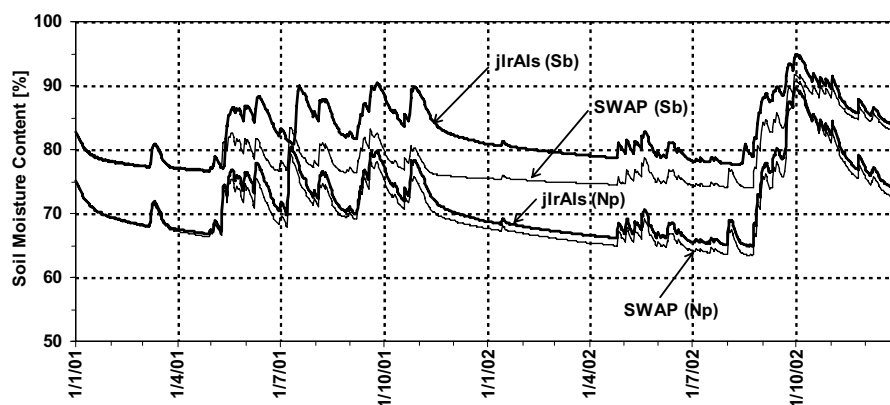


Figure 12 Dynamics of moisture in soil column in case of grass covered surface

สรุปและข้อเสนอแนะ

แบบจำลอง jlrAls-SW (soil-water flow) พัฒนาโดยใช้แนวทางเชิงอ็อบเจกต์ด้วยภาษา Java และชุดเครื่องมือ Repast ซึ่งเป็นชุดเครื่องมือสำหรับสร้างแบบจำลองบนพื้นฐานของเอเจนต์ (agent-based modeling) โครงสร้างแบบจำลองนี้ ประกอบด้วยอ็อบเจกต์หลัก คือ weather, crop และ soil ซึ่งเชื่อมโยงกันผ่านกลไกการแลกเปลี่ยนข้อมูล โดยอ็อบเจกต์ soil เป็นองค์ประกอบหลักของการจำลองการไหลของน้ำในดิน การทดสอบแบบจำลองกระทำโดยการจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินโดยใช้ข้อมูลรายวัน ระยะเวลา 2 ปี (ม.ค.2544 ถึง ธ.ค.2545) กับชุดดินนครปฐมและชุดดินสระบุรี ในกรณีดินเปล่าและกรณีปลูกหญ้า การทวนสอบผลลัพธ์ทำโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับแบบจำลอง SWAP โดยกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้งสองเหมือนกัน จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่า แบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ของปริมาณการระเหยจากดินและปริมาณการคายน้ำอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในดินมีแนวโน้มสอดคล้องกัน ทั้งกรณีดินเปล่าและกรณีปลูกหญ้า โดยความชื้นในดินจากแบบจำลอง jlrAls-SW โดยเฉลี่ยสูงกว่า SWAP เล็กน้อย ในกรณีปลูกหญ้าโดยเฉลี่ยมีปริมาณน้อยกว่ากรณีดินเปล่า และท้ายสุดความชื้นในชุดดินสระบุรีมีปริมาณโดยเฉลี่ยสูงกว่าชุดดินนครปฐม แนวทางเชิงอ็อบเจกต์สามารถประยุกต์ใช้และพัฒนาแบบจำลองการไหลของน้ำใน

ดินที่มีความซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์แบบจำลองในพื้นที่ขนาดใหญ่ยังคงต้องการกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบเชิงอ็อบเจกต์ที่เหมาะสมและคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงในการทำงาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย ทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุนพัฒนาอาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และเป็นผลงานส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง การวินิจัยการจัดการน้ำในลุ่มแม่น้ำท่าจีน

เอกสารอ้างอิง

- ยุทธนา พันธุ์กมลศิลป์ และ เอกสิทธิ์ ไชยสิทธิ์. 2550. การจำลองการไหลของน้ำผิวดินแบบ 2 มิติในพื้นที่ลาดชัน ด้วยระเบียบวิธี Finite Volume, น. 221-227. ใน: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก. วสท, กรุงเทพฯ.
- วีระศักดิ์ ซึ่งถาวร. 2545. Java programming volume I. ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ. 432 น.

- สถิระ อุดมศรี, ขนิษฐศรี ชื่นตระกูล และ สมิตรา วัฒนา. 2547. การกำหนดลักษณะของชุดดินที่จัดตั้งในภาคกลางของประเทศไทยจำแนกใหม่ตามระบบอนุกรมวิธานดิน. 2546. กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.
- Allen, R. G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage paper 56. FAO, Rome.
- Bouman, B.A.M., M.J. Kropff, T.P. Tuong, M.C.S. Wopereis, H.F.M. ten Berge and H.H. van Laar. 2001. ORYZA2000: modeling lowland rice. IRRI, Los Banos.
- Celia, M.A., E.T. Bouloutas and E.L. Zarba. 1990. A general mass conservation numerical solution for the unsaturated flow equation. Water Resour. Res. 26:1483-1496.
- Huang, K., B.P. Mohanty and M.T. van Genuchten. 1996. A new convergence criterion for the modified picard iteration method to solve the variably saturated flow equation. J. Hydrol. 178:69-91.
- Jones, N.L. 1999. SEEP2D primer environmental modeling research laboratory. Brigham Young University. Provo, UT.
- Jury, W., W.R. Gardner and W.H. Gardner. 1991. Soil physics, John Wiley&Sons, New York, NY. 328 p.
- Kennedy, J., R.C. Eberhart and Y. Shi. 2007. Swarm intelligence. Elsevier. URL: www.sciencedirect.com/science/book/9781558605954.
- Kroes, J.G. and J.C. van Dam. 2003. Reference manual SWAP version 3.0.3. Alterra-report 773. Alterra, Green World Research, Wageningen. 211 p.
- Liang, Y.D. 2005. Introduction to JAVA programming, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 1162 p.
- Lin, H.C., D.R. Richards, G.T. Yeh, J.R. Cheng, H.P. Cheng and N.L. Jones. 1996. FEMWATER. A three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport. US Army Engineering Research and Development Center, Vicksburg, MS. 129 p.
- Liu, D. and T.J. Stewart. 2004. Integrated object-oriented framework for MCDM and DSS modeling. Decision Support Systems. 38:421-434.
- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. USGS, Reston, VA.
- Monteith, J.L. and M.H. Unsworth. 1990. Principles of environmental physics. 2nd ed. Edward Arnold, London. 291 p.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 22(supplement): 89S-108S.
- North, M.J., N.T. Collier and J.R. Vos. 2006. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. ACM T. Modell. Comput. Simul. 16(1):1-25.
- Pan, X., J.D. Hesketh and M.G. Huck. 2000. OWSimu: an object-oriented and web-based simulator for plant growth. Agr. Syst. 63:33-47.
- Papajorgji, P. and T.M. Shatar. 2004. Using the Unified Modeling Language to develop soil water-balance and irrigation-scheduling models. Environ. Modell. Soft. 19:451-459.
- Papajorgji, P.J. and P.M. Pardalos. 2006. Software engineering techniques applied to agricultural systems: an object-oriented and UML Approach, Springer, New York, NY. 247 p.
- Simunek, J., M. Sejna and M.Th. van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-

- dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. U.S. Salinity Laboratory Agricultural Research Service, USDA, Riverside, CA.
- ten Berge, H.F.M., D.M. Jansen, K. Rappoldt and W. Stol. 1992. The soil water balance model SAWAH: User's guide and outline. CABO-TPE Simulation Report Series 22, CABO, Wageningen.
- van Dam, J.C. and R.A. Feddes. 2000. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. J. Hydrol. 233:72-85.
- van Dam, J.C., J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk and C.A. van Diepen. 1997. Theory of SWAP version 2.0: Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. DLO Winand Staring Centre, Wageningen.
- van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.
- Wopereis, M.C.S., B.A.M. Bouman, T.P. Tuong, H.F.M. ten Berge and M.J. Kropff. 1996. ORYZA_W: rice growth model for irrigated and rainfed environments. SARP Res. Proc. IRRI/AB-DLO, Wageningen.
- Wosten, J.H.M., Y.A. Pachepsky and W.J. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. J. Hydrol. 251:123-150.

Received 17 Noember 2007

Accepted 1 April 2008