



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม

อนุรักษ์วิทยา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประยุกต์แบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter เพื่อประมาณค่า
การคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

Application of Penman, Penman - Monteith and Rutter Model for Estimating
Evapotranspiration of Hill Evergreen Forest at Huai Kog Ma Watershed, Doi Pui,
Chiang Mai Province

นามผู้วิจัย นางสาววิภารัตน์ ทองดี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สการ ทีจันติก, วท.ค.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เอ็จ สโรบล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.รชนี เอมพันธุ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์แบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter เพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำ
ของป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

Application of Penman, Penman - Monteith and Rutter Model for Estimating
Evapotranspiration of Hill Evergreen Forest at Huai Kog Ma Watershed, Doi Pui,
Chiang Mai Province

โดย

นางสาววิภารัตน์ ทองด้ง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์ ทองเชื้อ 2555: การประยุกต์แบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter เพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม) สาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศร ทิจันทร์, วท.ค. 103 หน้า

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อรวมแบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter ประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่วัดด้วยวิธี Eddy - Correlation โดยใช้ค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (model efficiency; NSE) ของ Nash and Sutcliffe (1970) ในการเปรียบเทียบและทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (NSE) น้ำพืชชนิดราย 10 นาที พบว่า มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองใกล้เคียงกับราย 30 นาที คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.8858 และ 0.8890 ตามลำดับ ส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการคายน้ำของพืช พบว่า ราย 10 นาที มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองเฉลี่ยสูงกว่าราย 30 นาที คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3965 และ 0.3181 ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบแบบจำลองกระบวนการน้ำพืชชนิดราย 10 นาทีและ 30 นาที พบว่า ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองลดลง โดยการจำลองแบบราย 10 นาที มีค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบต่ำกว่าราย 30 นาที มีอยู่ระหว่าง 0.5138 – 0.8981 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7661 และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8654 – 0.9559 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.9141 ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการคายน้ำของราย 10 นาที และ 30 นาที พบว่า แบบจำลองราย 30 นาทีมีความถูกต้องมากกว่าราย 10 นาที โดยมีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบอยู่ระหว่าง 0.1395 – 0.5361 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3596 และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2066 – 0.4916 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3433 ตามลำดับ การคายระเหยน้ำที่ประมาณได้จากแบบจำลองจากข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ราย 10 นาที มีค่าเท่ากับ 1,261.97 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีค่าเฉลี่ยรายวันอยู่ระหว่าง 2.82 – 4.52 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วนข้อมูลราย 30 นาที มีค่าเท่ากับ 1,024.39 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีค่าเฉลี่ยรายวันอยู่ระหว่าง 1.86 – 4.63 มิลลิเมตรต่อวัน

Wiparat Thongdet 2012: Application of Penman, Penman - Monteith and Rutter Model for Estimating Evapotranspiration of Hill Evergreen Forest at Huai Kog Ma Watershed, Doi Pui, Chiang Mai Province. Master of Science (Watershed and Environmental Management), Major Field: Watershed and Environmental Management, Department of Conservation. Thesis Advisor: Assistant Professor Sakhan Teejuntuk, Ph.D. 103 pages.

This study was the application of mathematical model coupling the Penman, Penman - Monteith and Rutter's model to estimate evapotranspiration of a hill evergreen forest at Huai Kog Ma, Doipui, Chiang Mai province, northern of Thailand. The results obtained from the model were compared with that measured from the Eddy -Correlation method. Nash and Sutcliffe's parameter showing efficiency of the model (NSE) was employed for calibration and verification of the model. The results were summarized as follows.

The accuracy of model calibration showed that rainfall intercepted water derived from the Rutter's model based on 10 minute data was equal to 0.8858 which was approximate to using 30 minute that was equal to 0.8890. Average NSE of transpiration estimation based on Penman and Penman - Monteith model using 10 minute data was equal to 0.3965 which was higher than using 30 minute (0.3181). Model verification has shown lower accuracy both for rainfall interception and transpiration estimation. NSE using 10 minute data was around 0.5130 – 0.8981 or 0.7661 by average which was lower than using 30 minute data that was equal to 0.8654 – 0.9559 or 0.9141 by average. Verification of transpiration model shows similar result as that from the interception model. NSE using 30 minute data was around 0.1395 – 0.5361 or equal to 0.3596 by average which was higher than the result using 10 minute data that NSE was around 0.266 - 0.4916 or 0.3433 by average. Estimated evapotranspiration of 2008 from the model based on 10 minute data is equal to 1,261.97 mm/year or 2.82 – 4.52 mm/day while using 30 minute was equal to 1,024.39 mm/year or 1.86 – 4.63 mm/day.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จด้วยดี ด้วยคำแนะนำตลอดจนการตรวจแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ จาก ผศ. ดร. ศการ ที่จันทัก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ. ดร. เอ็จ สโรบล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ ผศ. ชัชชัย ดันตสิรินทร์ ที่ให้ออกาสและคำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าในการศึกษาวิจัยมาตั้งแต่ต้น ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างมาก จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง ณ โอกาสนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาอนุรักษวิทยาที่ได้อบรม ประสิทธิ์ประสาทวิชาทั้งในด้านวิชาการ และจริยธรรม ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ นิสิตปริญญาโทสาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวทองเค็งอันเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ซึ่งเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และเป็นผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของข้าพเจ้าเสมอมา จนข้าพเจ้าสามารถก้าวผ่านอุปสรรค ปัญหา และประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ คณาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ หากมีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

วิภารัตน์ ทองเค็ง

สิงหาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	80
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 การศึกษาปริมาณน้ำพืชยึดโดยแบบจำลอง Rutter (R) และ Gash (G) ในต่างประเทศ	19
2 ลักษณะการตกของฝนและกระบวนการน้ำพืชยึด บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552	36
3 สัดส่วนการกระจายของปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอด น้ำฝนผ่านเรือนยอด และน้ำพืชยึดรายครั้ง บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552	38
4 สัดส่วนการกระจายของปริมาณน้ำพืชยึด หน่วยเป็นร้อยละของปริมาณน้ำฝนรายครั้ง บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552	38
5 ค่าพารามิเตอร์การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ราย 10 นาที ในการเปรียบเทียบ บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	44
6 ค่าพารามิเตอร์การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ราย 30 นาที ในการเปรียบเทียบ บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	45
7 ผลการทวนสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลราย 10 นาที ในปี พ.ศ.2552 และพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบด้วยข้อมูลในปี พ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	58
8 ผลการทวนสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที ในปี พ.ศ.2552 และพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบด้วยข้อมูลในปี พ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1 ค่าการคายน้ำและ ปริมาณน้ำพืชอีกราย 10 นาฬิกาของแต่ละเดือน บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2551	81
2 ค่าการคายน้ำและ ปริมาณน้ำพืชอีกรายเดือนจากการตรวจวัด บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2552	82
3 ค่าการคายน้ำและปริมาณน้ำพืชอีกราย 30 นาฬิกาของแต่ละเดือน บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2551	83
4 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณ พื้นที่ป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาฬิกาของเดือน ตุลาคมถึงเดือนธันวาคมในปี พ.ศ. 2551	84
5 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณ พื้นที่ป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาฬิกาของเดือน ตุลาคมถึงเดือนธันวาคมในปี พ.ศ. 2551	85
6 ค่าการคายระเหยน้ำที่ประมาณ ได้ด้วยแบบจำลอง Penman, Penman-Monteith และ Rutter และปัจจัยสิ่งแวดล้อมปี พ.ศ. 2551 รายเดือน	86
7 ค่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ได้จากการตรวจวัด บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอย ปุย จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2552	87
8 ผลการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหย น้ำ กรณีสวนลิ้นจี่ในปี โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาฬิกาในปี พ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	101
9 ผลการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหย น้ำ กรณีสวนลำไยในปี โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาฬิกาในปี พ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แนวความคิดของแบบจำลองเปรียบเทียบระหว่างการระเหยของน้ำในแหล่งน้ำเปิดกับการระเหยของน้ำจากใบไม้	8
2 กรอบแนวคิดของ Rutter model	16
3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการคายระเหยน้ำด้วยวิธี Eddy – Correlation ที่สถานีตรวจวัดอากาศ กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	21
4 แบบจำลองมโนทัศน์กระบวนการคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) ของพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	28
5 ขั้นตอน (algorithm) การจำลองแบบการคายระเหยน้ำ บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	29
6 พื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่	33
7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอดรายครั้งกับร้อยละของปริมาณน้ำพืชยึด บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552	39
8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอดรายครั้งกับน้ำฝนผ่านเรือนยอด บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552	39
9 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมจากการตรวจวัดบริเวณกลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 1 สิงหาคมถึงวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2551	40
10 การคายระเหยน้ำจากการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ในปี พ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	41
11 การคายระเหยน้ำจากการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ในปี พ.ศ. 2552 บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่	42
12 กราฟ 1:1 ระหว่างปริมาณน้ำพืชยึดจากแบบจำลองกับปริมาณน้ำพืชยึดจากการตรวจวัดรายเดือน โดยใช้ข้อมูลราย 10 นาที ในปี พ.ศ. 2551	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	กราฟ 1:1 ระหว่างปริมาณน้ำพืชได้จากแบบจำลองกับปริมาณน้ำพืชจากการตรวจวัดรายเดือน โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที ในปี พ.ศ. 2551	52
14	กราฟ 1:1 ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำจากแบบจำลองกับการคายระเหยน้ำจากวิธี Eddy - Correlation รายเดือน โดยใช้ข้อมูลราย 10 นาที ในปี พ.ศ. 2551	55
15	กราฟ 1:1 ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำจากแบบจำลองกับการคายระเหยน้ำจากวิธี Eddy - Correlation รายเดือน โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที ในปี พ.ศ. 2551	56
16	การประมาณค่าด้วยแบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter ราย 10 นาทีของแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2551	61
17	การประมาณค่าด้วยแบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter ราย 30 นาทีของแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2551	63
18	การคายระเหยน้ำ กรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากป่าเป็นสวนลื่นจี๋และลำไย บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ พ.ศ. 2551	66
19	การคายระเหยน้ำ กรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากป่าเป็นสวนลื่นจี๋และลำไย บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ พ.ศ. 2551	67
20	ร้อยละของผลต่างระหว่างค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขากับสวนลื่นจี๋ พ.ศ. 2551	67
21	ร้อยละของผลต่างระหว่างการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขากับสวนลำไย พ.ศ. 2551	69
ภาพผนวกที่		
1	ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคมในปี พ.ศ. 2551	88
2	ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายนในปี พ.ศ. 2551	89

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
3 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายนในปี พ.ศ. 2551	90
4 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคมในปี พ.ศ. 2551	93
5 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคมในปี พ.ศ. 2551	92
6 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายนในปี พ.ศ. 2551	93
7 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายนในปี พ.ศ. 2551	94
8 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคมในปี พ.ศ. 2551	95
9 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลองและน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัดบริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคมปี พ.ศ. 2551	96
10 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลองและน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัดบริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2551	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
11 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลองและน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2551	98
12 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลองและน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนมกราคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ปี พ.ศ. 2551	98
13 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลอง และน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนมีนาคมถึงเดือนกรกฎาคม ปี พ.ศ. 2551	99
14 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลอง และน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนสิงหาคมถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2551	100

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

R	=	น้ำฝนเหนือเรือนยอด (มิลลิเมตร)
p	=	สัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกบนพื้นดินโดยอิสระ
pR	=	น้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระ (มิลลิเมตร)
$(1-p)R$	=	น้ำฝนที่ตกบนเรือนยอด (มิลลิเมตร)
C_t	=	น้ำฝนที่ค้างบนเรือนยอด (มิลลิเมตร)
S	=	สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด
E_i	=	การระเหยน้ำจากเรือนยอด (มิลลิเมตร)
E_p	=	การระเหยน้ำสูงสุด (มิลลิเมตร)
D_s	=	อัตราการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก
D	=	การระบายน้ำจากเรือนยอด (มิลลิเมตร)
b	=	สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด
Th	=	น้ำฝนผ่านเรือนยอด (มิลลิเมตร)
Th_{obs}	=	น้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ได้จากการตรวจวัด (มิลลิเมตร)
Th_{est}	=	น้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ประมาณได้จากแบบจำลอง (มิลลิเมตร)
I_{obs}	=	น้ำพืชยึดที่ได้จากการตรวจวัด (มิลลิเมตร)
I_{est}	=	น้ำพืชยึดที่ประมาณได้จากแบบจำลอง (มิลลิเมตร)
NSE	=	ค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบ
CF	=	correction factor
C_{leaf}^*	=	สภาพนำน้ำของปากใบสูงสุด

การประยุกต์แบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter เพื่อประมาณค่า
การคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

Application of Penman, Penman - Monteith and Rutter Model for Estimating
Evapotranspiration of Hill Evergreen Forest at Huai Kog Ma Watershed,
Doi Pui, Chiang Mai Province

คำนำ

การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) เป็นกระบวนการทางอุทกวิทยาที่สำคัญ เนื่องจากก่อให้เกิดการสูญเสียน้ำออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ ปริมาณน้ำฝนส่วนหนึ่งที่ตกลงมาจะติดค้างอยู่เรือนยอดของพืช (interception) ซึ่งน้ำส่วนนี้จะระเหยกลับสู่บรรยากาศ (evaporation) และมีน้ำอีกส่วนหนึ่งที่เกิดจากการใช้ของพืชจากกระบวนการคายน้ำ (transpiration) ล้วนเป็นการสูญเสียน้ำจากพื้นที่ลุ่มน้ำ ที่มนุษย์ไม่ได้ใช้ประโยชน์ น้ำส่วนที่เหลือซึ่งเป็นเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่มนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการอุปโภคและบริโภค ตลอดจนการเกษตรกรรม ดังนั้นการประเมินผลกระทบต่อกระบวนการทางอุทกวิทยาที่เกิดจากการสูญเสียน้ำออกจากระบบลุ่มน้ำโดยกระบวนการคายระเหยน้ำมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

การศึกษาการคายระเหยน้ำตั้งแต่อดีตจนกระทั่งปัจจุบันนี้มีหลายวิธีด้วยกัน แบบจำลอง Penman และ Penman - Monteith เป็นแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำที่ได้รับการยอมรับว่ามีความถูกต้องแม่นยำอีกวิธีหนึ่ง โดยที่แบบจำลอง Penman (1948) ใช้เพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำสูงสุด มีแนวคิดโดยใช้ความสัมพันธ์พื้นฐานทางกายภาพมาพิจารณาการคายระเหยน้ำ เป็นการศึกษาถึงความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ผิวหน้าการระเหยร่วมกับความเร็วลม และปัจจัยต่างๆ เช่น รังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบบจำลอง Penman ยังขาดปัจจัยเกี่ยวกับพืช จากเหตุผลดังกล่าว Monteith (1965) ได้นำแบบจำลอง Penman มาเสริม ปัจจัยด้านพืชเป็นแบบจำลอง Penman - Monteith มีความเหมาะสมต่อการประเมินค่าการคายน้ำในแต่ละพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทต่างๆ แต่มีน้ำส่วนหนึ่งที่ไม่สามารถประเมินได้โดยแบบจำลอง Penman และ Penman - Monteith คือ น้ำที่ค้างบนชั้นเรือนยอดซึ่งแบบจำลองของ Rutter *et al.* (1971) สามารถประเมินการสูญเสียน้ำส่วนนี้ได้และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งหากนำแบบจำลองทั้งสามมาประยุกต์รวมกันเพื่อประเมินการคายระเหยน้ำ จะทำให้เกิดเครื่องมือที่มีประโยชน์ยิ่ง

พื้นที่ป่าไม้ทางภาคเหนือของประเทศไทยเป็นพื้นที่ต้นน้ำลำธารที่มีลักษณะเป็นภูเขาสูงชัน ส่วนใหญ่ปกคลุมด้วยป่าดิบเขา มีลักษณะพิเศษคือเป็นแหล่งเก็บกักน้ำตามธรรมชาติและปลดปล่อยน้ำลงสู่พื้นที่ทางตอนล่างให้ใช้ประโยชน์ได้ตลอดทั้งปี การประเมินการสูญเสียน้ำที่เกิดจากกระบวนการคายน้ำจากพื้นที่ลุ่มน้ำจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการจัดการพื้นที่เหล่านั้น พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยปุย จังหวัดเชียงใหม่เป็นลุ่มน้ำหนึ่งทางภาคเหนือที่อยู่บนภูเขาสูง และปกคลุมด้วยป่าดิบเขาธรรมชาติ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทางอุทกวิทยาลุ่มน้ำ และด้วยพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้ามามีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2508 รวมทั้งปัจจุบันมีการติดตั้งเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ มีความพร้อมของข้อมูลทุกๆ ด้านที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำข้อมูลที่ได้ทำการตรวจวัดมาศึกษาการประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาครั้งนี้คือแบบจำลองการคายระเหยน้ำที่สามารถประยุกต์ใช้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมทั้งจะเป็นแบบจำลองต้นแบบสำหรับการศึกษาการคายระเหยน้ำในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทอื่นๆ ต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประยุกต์แบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter ร่วมกันประมาณค่าการคายระเหยน้ำบริเวณป่าดิบเขา พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่
2. เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณค่าการคายระเหยน้ำจากการจำลองแบบกับค่าที่ตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation
3. เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์แบบจำลองที่ได้ประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำ

การตรวจเอกสาร

1. การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration)

การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) หมายถึง การสูญเสียน้ำโดยการระเหยน้ำ (evaporation) จากพื้นที่ต่างๆ ซึ่งเป็นการการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำกลายเป็นไอน้ำ จากผิวน้ำในน้ำอิสระ และจากผิวดินโดยตรง รวมกับการคายน้ำจากพืช (transpiration) ผ่านรูปากใบ การคายระเหยน้ำนี้เป็นกระบวนการทางอุทกวิทยาที่สำคัญอีกกระบวนการหนึ่งในวัฏจักรของน้ำ และมีบทบาทอย่างมากต่ออุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน เพราะมีส่วนทำให้เกิดการแปรสภาวะอากาศไปตามลักษณะการปกคลุมของพืชที่ต่างกัน ด้วยความสำคัญของการคายระเหยน้ำจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการนี้มากกว่า 60 ปีที่ผ่านมา มีเอกสารและงานวิจัยใหม่ๆ ออกมาอย่างมากมาย ซึ่งมีวิธีการแตกต่างกัน ไปตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทำให้การวัดค่าในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำในปัจจุบันได้ถูกต้องยิ่งขึ้น (วิชา, 2535; เกษม, 2539; นิตยา, 2551; Dingman, 2002)

1.1 ประเภทการคายระเหยน้ำ

นักอุตุนิยมวิทยาได้แบ่งประเภทการคายระเหยน้ำออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การคายระเหยน้ำจริง (actual evapotranspiration) หมายถึง ปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการคายน้ำของพืชและการระเหยน้ำสู่บรรยากาศได้จริงในสภาวะอากาศนั้น และการคายระเหยน้ำสูงสุด (potential evapotranspiration) หมายถึง ปริมาณไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการคายน้ำของพืช และการระเหยน้ำสู่บรรยากาศได้สูงสุดในสภาวะอากาศหนึ่ง โดยมีปริมาณน้ำที่เอื้อต่อการคายระเหยอย่างไม่จำกัด ซึ่งปริมาณการสูญเสียน้ำจากการคายระเหยน้ำนี้มีปัจจัยควบคุมหลายอย่าง (วิบูลย์, 2526; วิชา, 2535; เกษม, 2539; นิตยา, 2551; Dingman, 2002)

1.2 ปัจจัยควบคุมการระเหยน้ำ

ปริมาณการสูญเสียน้ำโดยการคายระเหยน้ำจะขึ้นตามปัจจัยควบคุม เช่น ลักษณะพื้นที่ การใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดพืชปกคลุมดิน ชนิดป่า ลักษณะอากาศ และลักษณะสรีรวิทยาของพืช เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งปัจจัยที่ควบคุมการคายระเหยน้ำที่สำคัญออกเป็นลักษณะใหญ่ๆ 3 ปัจจัยด้วยกัน คือ ปัจจัยเกี่ยวกับลักษณะอุตุนิยมวิทยา เช่น รังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นของ

อากาศ การเคลื่อนที่ของลม เป็นต้น ปัจจัยด้านพืช เช่น พืชพรรณที่ปกคลุม ชนิดของพืชพรรณและ สรีรวิทยาของพืช เป็นต้น และปัจจัยสิ่งแวดล้อมและการจัดการพื้นที่ เช่น การจัดการปลูกพืชและ สิ่งที่ปกคลุม เป็นต้น (ปรีชา, 2526; วิชา, 2535; เกษม, 2539; ประคำแก้ว, 2550)

1.3 การประมาณค่าการคายระเหยน้ำ

การประมาณค่าการคายระเหยน้ำเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการศึกษาด้านการชลประทาน การจัดการลุ่มน้ำและอุตุนิยมิวิทยา เพื่อทราบถึงปริมาณน้ำที่สูญเสียไปโดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ซึ่ง การศึกษาการคายระเหยน้ำส่วนใหญ่เป็นการประมาณค่าการคายระเหยน้ำ เนื่องจากการวัดการคาย ระเหยน้ำโดยตรงนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีผู้เสนอสมการหรือแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลที่ทำกรวัดได้ เช่น ข้อมูลอุตุนิยมิวิทยาและปัจจัยด้านพืช เป็นต้น เพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำ ส่วนของการศึกษา การคายน้ำนั้น สามารถวัดได้ ซึ่งการวัดการคายน้ำจะจำกัดเฉพาะเกี่ยวกับตัวอย่างเล็กๆ หรือต้นไม้มักก็ ต้นในห้องทดลองเท่านั้น โดยการวัดปริมาณการคายน้ำส่วนมากใช้เครื่องมือ เรียกว่า phytometer การ ประมาณค่าการคายระเหยน้ำสามารถจำแนกได้เป็น 3 วิธี คือ วิธีสมดุลของน้ำ (water balance method) วิธีลุ่มน้ำจำลอง (lysimeter) และวิธีอุตุนิยมิวิทยาใกล้ผิวดิน (micrometeorological method) โดยแต่ละ วิธีการมีแนวทางในการศึกษาการคายระเหยน้ำแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ตามประเภทของการคาย ระเหยน้ำ คือ การศึกษาการคายระเหยน้ำจริง และการคายระเหยน้ำสูงสุด (วิชา, 2535; สมาน, 2535; เกษม, 2539; Dingman, 2002)

1.3.1 การศึกษาการคายระเหยน้ำจริง

การศึกษาการคายระเหยน้ำจริงเป็นการตรวจวัดข้อมูลเพื่อคำนวณค่าการคาย ระเหยน้ำแบ่งเป็น 3 วิธีใหญ่ๆ ได้แก่ 1) วิธีการสมดุลของน้ำ (water balance method) เป็นการ ประมาณการคายระเหยน้ำจริง โดยใช้หลักสมดุลน้ำ เพื่อประมาณน้ำที่เข้ามาในพื้นที่ลุ่มน้ำจะ เท่ากับปริมาณน้ำที่ออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ 2) วิธีลุ่มน้ำจำลอง (lysimeter) เป็นการเปรียบเทียบวัดน้ำ เสมือนกระถางต้นไม้ขนาดใหญ่ที่ปลูกพืชที่ต้องการวัดการคายระเหย ซึ่งมีสภาพไม่แตกต่างจาก สภาพแวดล้อมภายนอก และ 3) วิธีอุตุนิยมิวิทยาใกล้ผิวดิน (micrometeorological method) เป็น วิธีการวัดการคายระเหยน้ำโดยใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมิวิทยา เช่น วิธีสมดุลพลังงาน (energy balance method) หรือ วิธีของ Bowen (Bowen method) วิธีแอร์โรไดนามิก (aerodynamic method) เป็นต้น

1.3.2 การศึกษาการคายระเหยน้ำสูงสุด

การศึกษาการคายระเหยน้ำสูงสุด แบ่งตามวิธีการศึกษาได้ 2 วิธีใหญ่ๆ ได้แก่ การวัดการคายระเหยน้ำ (pan evapotranspiration) เป็นวิธีที่ค่อนข้างเก่าแต่ง่ายในการศึกษา โดยการใช้ถาดวัดการคายระเหยน้ำแบบมาตรฐานเรียกว่า class A Pan ขนาดความลึก 25 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร และการวัดการคายระเหยน้ำโดยอาศัยเทคนิคทางอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน และสามารถแบ่งตามปัจจัยที่ใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยได้ออกเป็น 3 วิธี คือ 1) วิธีการประมาณโดยใช้ค่าอุณหภูมิอากาศรายเดือนเพียงอย่างเดียว เช่น วิธีธอนเวท (Thornwaite method) วิธีบลานีย์ - คริดเดิล (Blaney - Criddle method) วิธีฮามอน (Hamon method) และวิธีปาปาดากิส (Papadakis method) เป็นต้น 2) วิธีการประมาณโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิร่วมกับรังสีดวงอาทิตย์ เช่น วิธีแกรสซี (Grassi method) วิธีสตีเฟนส์ - สจิวต์ (Stephens - Stewart) วิธีเทอร์ค (Turc method) วิธีเจนเซน - เฮส (Jensen - Haise method) และวิธีแมคคิงค์ (Makkink method) เป็นต้น และ 3) วิธีการประมาณโดยใช้ข้อมูลลมฟ้าอากาศ เช่น วิธีคริสเตียนเซน (Christiansen method) และวิธีเพนแมน (Penman method) เป็นต้น

จากการทบทวนเอกสารข้างต้นเกี่ยวกับการคายระเหยน้ำ การศึกษาการคายระเหยน้ำมักเป็นการประมาณค่าการคายระเหยน้ำ จากข้อมูลที่วัดจริงในภาคสนามบางประเภท เนื่องจากวัดการคายระเหยน้ำโดยตรงนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีผู้เสนอสมการหรือแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดมาประมาณค่า สมการที่นำมาใช้มีตั้งแต่สมการที่ง่ายไปจนถึงสมการที่มีความซับซ้อน มีความถูกต้องและความยากง่ายแตกต่างกันไป เช่น แบบจำลอง Penman และ Penman - Monteith เป็นแบบจำลองที่มีจุดเด่นที่มีปัจจัยด้านพืชเข้ามาเกี่ยวข้อง และสามารถใช้ประมาณค่าการคายระเหยน้ำในแต่ละพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ เป็นต้น

2. การประมาณค่าการคายระเหยน้ำโดยแบบจำลอง Penman และ Penman - Monteith

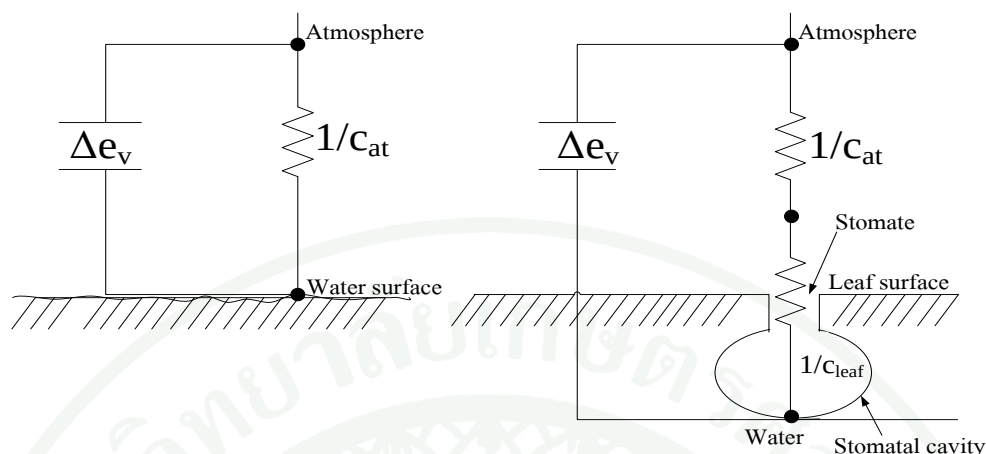
Penman และ Penman - Monteith เป็นวิธีการที่เป็นที่นิยมใช้เพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำและการคายระเหยน้ำ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวคิดโดยใช้ความสัมพันธ์พื้นฐานทางกายภาพมาพิจารณาการคายน้ำ เป็นการศึกษาถึงความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ผิวหน้าการระเหยร่วมกับความเร็วลมและปัจจัยของดัชนีความต้านทานของพืช ซึ่งเป็นแบบจำลองเป็นที่ยอมรับและนำมาใช้เป็นจำนวนมาก ส่วนความเป็นมาของแบบจำลองตั้งแต่อดีตจนปัจจุบันนี้มีรายละเอียด ดังนี้

Penman เป็นวิธีคำนวณค่าปริมาณการระเหยน้ำสูงสุด (potential evaporation) ซึ่งสูตร Penman ได้พัฒนาขึ้น โดย H. L. Penman ในปี 1948 ดังสมการที่ 1 (Dingman, 2002) ข้อดีของสูตร Penman คือ ได้พิจารณาถึงผลของรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์ต่อค่าการคายระเหยน้ำ จึงทำให้เป็นที่ยอมรับว่าสามารถคำนวณการระเหยน้ำ ได้ถูกต้องแม่นยำกว่าสูตรอื่นๆ (สมาน, 2535) ต่อมาในปี 1965 Monteith ได้เสนอสูตร Penman - Monteith ขึ้นมาเพื่ออธิบาย การระเหยน้ำของน้ำจาก ผิวใบ ดังสมการที่ 2 โดยมีสมมติฐานว่า ค่าการคายระเหยน้ำในแหล่งเปิดเป็นกระบวนการที่มีเพียงหนึ่ง ขั้นตอน คือ จากโมเลกุลของน้ำผิวหน้าเปลี่ยนจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำสู่บรรยากาศ แต่สำหรับ กระบวนการคายน้ำเป็นกระบวนการระเหยน้ำจากผิวหน้าของใบจะมี 2 ขั้นตอน คือ น้ำจากช่องภายใน เซลล์ปากใบสู่ผิวหน้าใบ และน้ำจากผิวหน้าใบสู่ชั้นบรรยากาศ ดังภาพที่ 1

$$E = \frac{\Delta \cdot (K + L) + p_a \cdot c_a + C_{at} \cdot e_a^* \cdot (1 - W_a)}{\rho_w \cdot \lambda_v \cdot (\Delta + \gamma)} \quad (1)$$

$$ET = \frac{\Delta \cdot (K + L) + p_a \cdot c_a + C_{at} \cdot e_a^* \cdot (1 - W_a)}{\rho_w \cdot \lambda_v \cdot [\Delta + \gamma \cdot (1 + \frac{C_{at}}{C_{can}})]} \quad (2)$$

เมื่อ E	คือ	อัตราการระเหยน้ำ (มิลลิเมตรต่อวินาที)
ET	คือ	อัตราการคายระเหยน้ำ (มิลลิเมตรต่อวินาที)
Δ	คือ	ค่าความชันของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวกับอุณหภูมิ
K	คือ	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นสุทธิ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
L	คือ	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นยาวสุทธิ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
c_a	คือ	ความจุความร้อนของอากาศ (เมกะจูลล์ต่อกิโลกรัม)
C_{at}	คือ	การนำน้ำของบรรยากาศ (เซนติเมตรต่อวินาที)
e_a^*	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัว (กิโลปาสกาล)
W_a	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
λ_v	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (เมกะจูลล์ต่อกิโลกรัม)
γ	คือ	psychometric constant
C_{can}	คือ	การนำน้ำของเรือนยอดพืช (เซนติเมตรต่อวินาที)



ภาพที่ 1 แนวความคิดของแบบจำลองเปรียบเทียบระหว่างการระเหยของน้ำในแหล่งน้ำเปิดกับการระเหยของน้ำจากใบไม้

ที่มา: Dingman (2002)

โดยที่

$$\gamma = \frac{C_a \cdot T}{0.622 \cdot \lambda_v} \quad (3)$$

เมื่อ P คือ ความดันบรรยากาศ (กิโลปาสกาล)
 λ_v คือ $2.50 - 2.36 \times 10^{-3} \cdot T$

และ

$$\Delta = \frac{de^*}{dT} = \frac{2508.3}{(T + 237.3)^2} \exp\left(\frac{17.3T}{T + 237.3}\right) \quad (4)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)

และ

$$(K + L) = [(K_{in} - K_{out}) + (\epsilon_w L_{in} - L_{out})] \quad (5)$$

เมื่อ K_{in} คือ รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ตกสู่พื้นผิว (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 K_{out} คือ รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นที่สะท้อนกลับจากพื้นผิว (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 ϵ_w คือ emissivity of trees ≈ 0.96
 L_{in} คือ รังสีดวงอาทิตย์คลื่นยาวที่ตกสู่พื้นผิว (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 L_{out} คือ รังสีดวงอาทิตย์คลื่นยาวที่สะท้อนกลับจากพื้นผิว (วัตต์ต่อตารางเมตร)

สามารถหาค่าการนำน้ำของบรรยากาศ (C_{at}) ได้จากสมการที่ 6

$$C_{at} = \frac{V_a}{6.25 \left[\ln \left(\frac{Z_m - Z_d}{Z_0} \right) \right]} \quad (6)$$

โดยที่	Z_m	คือ	$Z_{veg} + 2$
	Z_d	คือ	$0.7 \cdot Z_{veg}$
	Z_0	คือ	$0.1 \cdot Z_{veg}$
	Z_{veg}	คือ	ความสูงของพืชที่ทำการศึกษา (เซนติเมตร)
	V_a	คือ	ความเร็วลม (เซนติเมตรต่อวินาที)

กระบวนการคายน้ำของพืชนั้นนอกเหนือจากจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำน้ำของบรรยากาศ (atmospheric conductance) เช่นเดียวกันกับค่าระเหยของน้ำในแหล่งน้ำเปิดแล้ว การสูญเสียน้ำที่อยู่ในกระบวนการนี้จะต้องขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำน้ำของใบ (leaf conductance; C_{leaf}) อีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งความสามารถในการนำน้ำของใบ สามารถบ่งบอกได้ถึงจำนวนของปากใบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งขนาดการเปิดของปากใบ สามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$C_{leaf} = C_{leaf}^* f_K(K_{in}) f_{Kp}(\Delta p_v) f_T(T_a) f_\theta(\Delta \theta) \quad (7)$$

เมื่อ	C_{leaf}	คือ	ความสามารถในการนำน้ำของใบ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
	C_{leaf}^*	คือ	ความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบ (โมลต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
	K_{in}	คือ	พลังงานรังสีตกกระทบคลื่นสั้น (effect of short-wave)
	Δp_v	คือ	ความชื้นในอากาศที่ห่างจากความอิ่มตัว (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	T_a	คือ	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)
	$\Delta \theta$	คือ	ความชื้นในดินที่ห่างจากความอิ่มตัว (เซนติเมตร)

ส่วนขนาดของเรือนยอดแสดงด้วยค่าดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index; LAI) ซึ่งหาได้จากพื้นที่ทั้งหมดของพื้นผิวใบพืชเหนือพื้นดินต่อพื้นที่ปกคลุมของเรือนยอด (Dingman, 2002) ดังสมการที่ 8 โดยที่ f เป็นอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการนำน้ำของใบพืช (leaf conductance) สามารถอ่านรายละเอียดได้ในการศึกษาของประคำแก้ว (2550)

$$LAI = \frac{\text{Total area of leaf surface above ground area}}{\text{Area}} \quad (8)$$

สภาพความเป็นจริงของเรือนยอดของป่าจะประกอบด้วยใบไม้ในปริมาณมากมาย ดังนั้นค่าการเปิดปิดของปากใบจึงสามารถอธิบายได้โดยการตั้งสมมติฐานว่าพื้นที่ผิวของพืชพรรณเปรียบเสมือนใบไม้ใบใหญ่ 1 ใบ (a single big leaf; C_{can}) ค่าการเปิดปิดของปากใบจากทั้งป่า สามารถหาจากสมการที่ 9

$$C_{can} = f_s \cdot LAI \cdot C_{leaf} \quad (9)$$

เมื่อ C_{can}	คือ	ความสามารถในการนำน้ำของเรือนยอด (canopy conductance)
LAI	คือ	ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index)
f_s	คือ	สัมประสิทธิ์พื้นที่ใบที่ไม่ได้รับแสง หรือเรียกว่าสัดส่วนร่มเงา

แบบจำลอง Panman และ Penman-Monteith มีความถูกต้องค่อนข้างสูงจึงเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาการคายระเหยน้ำในพื้นที่ต่างๆ ในประเทศไทยและต่างประเทศจึงมีการนำสูตรของ Penman มาปรับปรุงและประยุกต์สูตรต่างๆ อีกหลายสูตร ซึ่งในการศึกษาลักษณะนี้เน้นการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่นำเอาแบบจำลองมาใช้ในการงานด้านป่าไม้เป็นหลัก ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง Penman และ Penman - Monteith และการคายระเหยน้ำ

แบบจำลอง Panman และ Penman - Monteith มีความถูกต้องค่อนข้างสูงจึงเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาการคายระเหยน้ำในพื้นที่ต่างๆ ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ แต่การศึกษาลักษณะนี้ได้ตรวจสอบเอกสารเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาในพื้นที่ป่าไม้เท่านั้นสรุปได้ดังนี้

Chunkao (1971) ประเมินการคายระเหยน้ำในพื้นที่ป่าดิบแล้งและพื้นที่โล่งบริเวณสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช จังหวัดนครราชสีมา โดยวิธี Bowen ratio, aerodynamic และ Penman ผลลัพธ์เหล่านี้มาเปรียบเทียบกับค่าวัดโดยตรงจากการสูญเสียความชื้นในดินรายวันและวิธี Class A pan พบว่า การคายระเหยน้ำโดยวิธีสมดุลพลังงานในพื้นที่ป่าดิบแล้งและพื้นที่โล่ง มีค่าเท่ากับ 3.70 และ 3.20 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ การระเหยน้ำจากภาควัดการระเหยน้ำ มีค่าเท่ากับ 4.10 มิลลิเมตรต่อวัน และการสูญเสียความชื้นในดินในพื้นที่ป่าดิบแล้งและพื้นที่โล่ง มีค่าเท่ากับ 3.50 และ 5.30 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วนวิธี aerodynamic มีค่าเท่ากับ 0.19 มิลลิเมตรต่อวัน วิธี Penman มีค่าการคาย

ระเหยน้ำในพื้นที่ป่าดิบแล้ง มีค่าเท่ากับ 10.70 มิลลิเมตรต่อวัน และในพื้นที่โล่งมีค่าเท่ากับ 4.90 มิลลิเมตรต่อวัน

ปิยพงษ์ (2544) ศึกษาการประเมินค่าการคายระเหยน้ำโดยวิธี Bowen ratio ในจังหวัดสุโขทัย บริเวณพื้นที่นาข้าว ไร่อ้อย ไร่ข้าวโพด และป่าเต็งรังผสมเบญจพรรณ พบว่า ในพื้นที่นาข้าวมีค่าการคายระเหยน้ำรายวันเฉลี่ย 4.40 มิลลิเมตร ส่วนพื้นที่ไร่อ้อย และพื้นที่ไร่ข้าวโพด ช่วงต้นฤดูการเพาะปลูกเท่ากับ 3.00 และ 3.10 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ สำหรับป่าเต็งรังผสมเบญจพรรณ มีค่าการคายระเหยน้ำเฉลี่ยรายวันในฤดูหนาว 4.30 มิลลิเมตร และในฤดูฝน 4.90 มิลลิเมตร

สมบุรณ์ (2547) ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองการคายระเหยน้ำโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามวัน และค่าการชักนำปากใบพืชในพื้นที่ทำการเกษตรและสวนป่า โดยศึกษาความผันแปรและเปรียบเทียบการคายระเหยน้ำจริง (E_t) ค่าการชักนำปากใบพืช (g_c) และค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) พบว่า ความผันแปรของ E_t และ g_c รวมทั้งค่า LAI มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และพื้นที่สวนสักมีค่า E_t มากในช่วงต้นสัปดาห์ใบใหม่และทิ้งใบในช่วงฤดูแล้ง เมื่อเปรียบเทียบค่า E_t รายวันตลอดปี พบว่า พื้นที่ไร่มันสำปะหลัง มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.50 มิลลิเมตร รองลงมาคือพื้นที่นาข้าวและสวนสัก มีค่าเท่ากับ 3.40 และ 3.10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

สุรัตน์ (2536) ได้ประยุกต์เทคนิคทางคอมพิวเตอร์ในวิธีแพนแมนดัดแปลงเพื่อประมาณการคายระเหยน้ำสูงสุด โดยใช้ข้อมูลความชื้นของเมฆ ความยาวนานของแสงที่ได้รับจริง และจำนวนวันที่ฝนตก สรุปว่า ชุดคำสั่งที่คำนวณวิธีแพนแมนดัดแปลงโดยใช้ความยาวนานของแสงที่ได้รับจริงมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณโดยวิธีอัตราระเหยมากที่สุด

สุธาณี (2544) ศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุด แต่ละภูมิภาคโดยใช้รังสีดวงอาทิตย์ และเปรียบเทียบค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดจากการจำลองสรุปได้ว่า วิธี Penman เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดทุกภูมิภาคของประเทศไทย

ศิริัญญา (2545) ศึกษาการประเมินอัตราการคายน้ำของเทพทาโรและก่อหม่น ในป่าดิบเขา คอยปุย จังหวัดเชียงใหม่โดยใช้แบบจำลอง Penman - Monteith พบว่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับอัตราการคายระเหยน้ำของต้นเทพทาโรมากที่สุด ในฤดูฝน คือ ความสามารถในการเปิดปิดปากใบ ในฤดู

หนาวและฤดูร้อน คือ ปัจจัยความเข้มแสง และต้นกุ่มจะสัมพันธ์กับปัจจัยความสามารถในการเปิดปิดปากใบมากที่สุดทั้ง 3 ฤดูกาล ส่วนค่าการคายน้ำเฉลี่ยตลอดรอบวันของต้นเทพทาโร และต้นกุ่ม มีค่าสูงสุดในฤดูหนาว โดยมีค่าเท่ากับ 5.105×10^{-4} และ 3.659×10^{-4} มิลลิเมตร ตามลำดับ รองลงมา คือ ช่วงฤดูฝนซึ่งมีค่าการคายน้ำเฉลี่ยตลอดรอบวันของต้นเทพทาโร และต้นกุ่ม เท่ากับ 3.792×10^{-4} และ 2.778×10^{-4} มิลลิเมตร ตามลำดับ การคายน้ำเฉลี่ยตลอดรอบวันของพรรณไม้ทั้ง 2 ชนิด มีค่าน้อยสุดในช่วงฤดูร้อน โดยต้นเทพทาโร และต้นกุ่มมีค่าเท่ากับ 1.964×10^{-4} มิลลิเมตร และ 1.685×10^{-4} มิลลิเมตร ตามลำดับ

พันทิพย์ (2542) ศึกษาเปรียบเทียบอัตราการคายระเหยน้ำของพืชที่คำนวณได้จากสูตรต่างๆ กับค่าที่ได้จากถ่วงน้ำหนักของพืช พบว่า สูตรของ Penman - Monteith มีค่าการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากถ่วงน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาได้แก่ FAO - Penman และ Penman 1963 ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาความไวของตัวแปร (sensitivity) ของข้อมูลภูมิอากาศที่เป็นตัวแปรในสูตร Penman - Monteith ปรากฏว่า ปัจจัยอุณหภูมิมีผลมากที่สุด

วรารุช (2539ก, 2539ข) พัฒนาโปรแกรม Penman - A และ Penman - C เพื่อใช้คำนวณการคายระเหยน้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) ตามวิธี Penman - Monteith โดยห้เป็นพืชอ้างอิง วิธีการคำนวณ ET_o ในโปรแกรมทั้งสองมีหลักการเหมือนกันโดยที่ Penman - A ออกแบบสำหรับข้อมูลในรายงานสถิติภูมิอากาศเกษตรของประเทศไทย ส่วน Penman - C ออกแบบสำหรับข้อมูลในรายงานภูมิอากาศของประเทศไทย

ประคำแก้ว (2550) ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman - Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ โดยทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การชักนำปากใบพืชด้วยแบบจำลอง Jarvis เพื่อนำไปประยุกต์ประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman - Monteith และศึกษาค่าการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation แล้วทำการเปรียบเทียบ Et-Penman - Monteith กับ Et-Eddy - Correlation

Makoto *et al.* (2003) ศึกษาการประเมินการคายระเหยน้ำในระยะยาวบริเวณป่าฝนเขตร้อนใน Peninsular ของประเทศมาเลเซีย โดยประยุกต์แบบจำลอง Penman - Monteith และ Rutter ในปี 1996 - 1999 พบว่ามีค่าการคายน้ำของพืชและการสูญเสียน้ำจากน้ำพืชยืน เท่ากับ 1,218 และ 331

มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ ซึ่งมีปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมได้แก่ น้ำฝน และรังสีดวงอาทิตย์สุทธิตายปี เท่ากับ 1,571 และ 1,744 มิลลิเมตรต่อปี และมีปัจจัยค่าคงที่นำเข้าแบบจำลอง ดังนี้ S เท่ากับ 0.74 มิลลิเมตร p เท่ากับ 0.08 มิลลิเมตร D_s เท่ากับ 0.00014 มิลลิเมตรต่อวินาที b เท่ากับ 5.25 และ LAI เท่ากับ 6.52

Rampisela *et al.* (1990) ประยุกต์ใช้แบบจำลอง Penman - Monteith เพื่อประเมินอัตราการคายระเหยน้ำของพื้นที่ป่าไม้ลุ่มน้ำ ในประเทศญี่ปุ่น โดยได้นำผลการคายระเหยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Penman - Monteith เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Thornthwaite, Penman, Hamon และ water budget มีค่าเท่ากับ 778.40, 764.20, 992.38, 778.81 และ 770.90 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ

Rey (1999) นำเสนอแบบจำลองการประมาณค่าการคายระเหยสูงสุดในพื้นที่ โดยยึดแนวคิดของ Penman - Monteith ซึ่งได้กำหนด parameter ความสูงของพืชที่หลากหลาย และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) และคิดปริมาณการระเหยน้ำที่ตกค้างบนเรือนยอดโดยแนวคิดแบบจำลอง Rutter และ Monteith มาประยุกต์ใช้ พบว่า การคายระเหยสูงสุดของพืชอ้างอิงในตอนเหนือของสเปนมีน้อยกว่า 900 มิลลิเมตร และในเขตภูเขาต่ำกว่า 1,100 มิลลิเมตร ในพื้นที่ที่มีฝนการคายระเหยน้ำจริงของพืชมากกว่าในหญ้า ส่วนในพื้นที่แห้งแล้ง การคายระเหยสูงสุดของพืชน้อยกว่าในหญ้า

Wilson *et al.* (2001) ได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการวัดค่าการคายระเหยน้ำ 4 วิธีการ ได้แก่ sap flow, soil water budget, Eddy covariance และ catchment water balance ในพื้นที่ป่าไม้ผลัดใบหลากหลายอายุ พบว่า ค่าการคายระเหยน้ำโดยวิธี Eddy covariance และ catchment water balance มีค่าสูงกว่าวิธีอื่น ส่วนวิธี sap flow ให้ค่าต่ำสุด ซึ่งทุกวิธีการมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

Tanaka *et al.* (2003) ได้ประมาณการคายระเหยน้ำของพืชในป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ด้วยแบบจำลอง Multilayer พบว่า ค่าการคายระเหยน้ำรายเดือนอยู่ระหว่าง 26 - 88 มิลลิเมตรต่อเดือน โดยที่อัตราการคายระเหยน้ำจะมีค่าสูงในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน และอัตราการคายระเหยน้ำรายวันอยู่ระหว่าง 0.8 - 2.5 มิลลิเมตรต่อวัน

Williams *et al.* (2004) ศึกษาการคายระเหยน้ำโดยเทคนิค stable isotope และ Eddy covariance ในสวนผลไม้ และต้นมะกอก (*Olea europaea* L.) พบว่า การคายระเหยน้ำวิธี stable isotope มีค่าต่ำกว่าวิธี sap flow

Sanchez - Carrillo *et al.* (2004) ศึกษาการคายระเหยน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำกึ่งแห้งของสเปน โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการปกคลุมของพืชต่อพื้นที่ผิวน้ำที่เปิดโล่ง สรุปว่าลักษณะทางกายภาพของพืชมีผลต่อการคายน้ำและในการศึกษาในระยะยาวของการคายน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำแบบภูมิอากาศกึ่งแห้งแล้งนั้นลักษณะของภูมิอากาศมีความสำคัญต่อการประเมินผลถึงหน้าที่ของอุทกวิทยาเป็นอย่างมากและการปกคลุมของพืชที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการสูญเสียน้ำมากเท่าส่วนของพื้นที่น้ำที่เปิดโล่ง

Sun *et al.* (2008) ได้ประมาณค่าการคายระเหยน้ำจากหอคอยด้วยวิธี Eddy - Correlation และแบบจำลองทางอุทกวิทยาเพื่อการจัดการป่าไม้ในทางตะวันออกเฉียงเหนือของเมือง Wisconsin ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าค่าการคายระเหยน้ำที่วัดโดยวิธี Eddy - Correlation มีค่าต่ำกว่าการประมาณค่าโดยแบบจำลอง MIKE - SHE แต่ค่าที่วัดโดยทั้งสองวิธีการมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันในแต่ละชนิดของป่าไม้

Paco *et al.* (2009) ศึกษาการคายระเหยน้ำจากป่าโอ๊กในเขตชวอนนา ของเมดิเตอร์เรเนียน โดยวัดการไหลของน้ำผ่านลำต้นโดยวิธีของ Garnier และศึกษาการคายน้ำของระบบนิเวศโดยวิธี Eddy - Correlation ช่วงเวลา 11 เดือน (เดือนกุมภาพันธ์ถึงธันวาคม 2005) ซึ่งเป็นปีที่มีความแห้งแล้ง พบว่า บริเวณทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์หยุดการคายน้ำในช่วงฤดูร้อนเมื่อพื้นผิวดินแห้ง ในช่วงฤดูอื่น ๆ การคายน้ำในทุ่งหญ้าขึ้นกับปริมาณน้ำฝนและน้ำในดินซึ่งตรงกันข้ามกับต้นไม้ที่สามารถคายน้ำได้ตลอดช่วงฤดูร้อน เนื่องจากมีรากหยั่งลึก และยังมีต้น *Q.ilex* ที่มีการปรับตัวตามฤดูกาลและภัยแล้งประจำปีได้ดี การคายน้ำที่เกิดขึ้นมากกว่าครึ่งหนึ่งของการคายน้ำในระบบนิเวศจึงเกิดจากการคายน้ำของต้น *Q.ilex* แม้ความหนาแน่นของต้นไม้จะอยู่ในระดับต่ำ (30 ต้นต่อเฮกตาร์) และมีเรือนยอดปกคลุม 21 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการคายระเหยน้ำที่เกิดขึ้นมาจากการคายน้ำของพืชถึง 76 เปอร์เซ็นต์ และการสูญเสียน้ำพืชชนิดอื่น 24 เปอร์เซ็นต์

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา การศึกษาการคายระเหยน้ำมีความหลากหลายวิธีการและแบบจำลอง Penman และ Penman - monteith เป็นแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้อย่างมากมาย มีทั้งการนำเอาแบบจำลองมาโดยตรง และประยุกต์แบบจำลองใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ทำการศึกษา หรือการศึกษาในเชิงการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ เนื่องจากจุดเด่นของแบบจำลองที่มีปัจจัยของพืชมาพิจารณาด้วย จึงสามารถใช้ประมาณค่าการคายระเหยน้ำได้ในหลากหลายพื้นที่ที่มีการปกคลุมของพืชที่แตกต่างกัน

4. แบบจำลองกระบวนการการสูญเสียน้ำพืชยึด (Rutter model)

แบบจำลองกระบวนการการสูญเสียน้ำพืชยึด (Rutter model) เป็นการจำลองกระบวนการที่น้ำฝนตกลงมาบนเรือนยอดแล้วค้างอยู่บนใบ และระเหยกลับสู่บรรยากาศ เป็นการสูญเสียน้ำจากกระบวนการอุทกวิทยาซึ่งในการจัดการลุ่มน้ำจำเป็นต้องพิจารณา โดยเฉพาะในไม้ยืนต้นมีการสูญเสียน้ำจากกระบวนการนี้ในปริมาณหนึ่งส่วนของปริมาณน้ำฝนทั้งหมดในหนึ่งปี (Dingman, 2002)

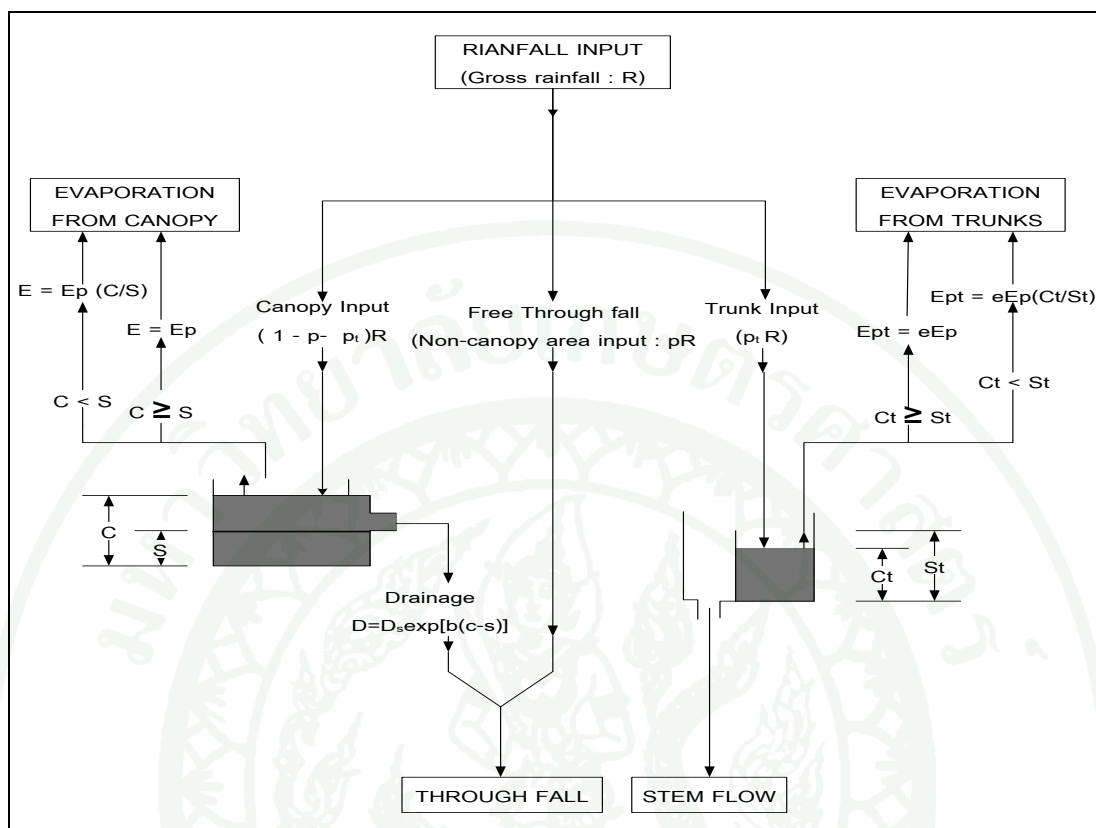
Rutter model เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษากระบวนการน้ำพืชยึด (interception process) ในป่าไม้ โดยเริ่มแรกได้มีการศึกษาถึงโมเดลของแบบจำลองการสูญเสียน้ำพืชยึดโดย Horton ในปี 1919 และต่อมา Rutter *et al.* (1971) ได้นำแนวคิดดังกล่าวมาพัฒนาแบบจำลองให้มีความสัมพันธ์กับน้ำฝนทั้งหมด (gross rainfall) เพื่อเสนอกระบวนการน้ำพืชยึดโดยยึดหลักสมมูลของน้ำฝนที่เข้าสู่ระบบ การกักเก็บ และการสูญเสียน้ำออกจากระบบในรูปของการระเหยน้ำ และการระบายน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้ในเรือนยอด แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในระยะแรกของ Rutter เป็นการประมาณค่าการสูญเสียน้ำพืชยึด (interception loss) และน้ำฝนผ่านเรือนยอด (throughfall) ได้ศึกษากระบวนการน้ำพืชยึดในป่าสนอายุ 18 เดือน ทางตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศอังกฤษ และ Rutter *et al.* (1975) ได้พัฒนาแบบจำลองให้สมบูรณ์โดยการเพิ่มส่วนของน้ำไหลตามลำต้น (stemflow) ในแบบจำลองโดยมีกรอบแนวคิดดังภาพที่ 2

4.1 พารามิเตอร์จากแบบจำลอง

พารามิเตอร์ของแบบจำลอง Rutter ได้แก่ สัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระ (p) สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (D_s) และสัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 Free throughfall coefficient (p) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกสู่พื้นดินโดยตรงซึ่งปราศจากการสัมผัสพื้นผิวใดๆ ของพืช สามารถหาจากค่า coefficient ของสมการการถดถอยของน้ำฝนผ่านเรือนยอดกับปริมาณน้ำฝนทั้งหมด และเมื่อทราบค่า p แล้วสามารถประมาณค่าน้ำฝนที่เข้าสู่เรือนยอดและน้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระได้

4.1.2 Maximum canopy storage capacity (S) เป็นค่าสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอดสูงสุด ซึ่งค่านี้ประเมินได้จากค่าดัชนีผิวใบของพืช (LAI)



ภาพที่ 2 กรอบแนวคิดของ Rutter model

ที่มา: Gash and Morton (1978)

4.1.3 Water on canopy (C_t) เป็นค่าน้ำฝนที่ค้างบนเรือนยอดซึ่งหาได้จากสมการที่ 10

$$C_t = [(C_{t-1}) + (1 - p)R] - (E_i + D) \quad (10)$$

เมื่อ	C_t	คือ	ปริมาณน้ำฝนที่ค้างบนเรือนยอดเวลาใดๆ
	C_{t-1}	คือ	ปริมาณน้ำฝนที่ค้างบนเรือนยอดครั้งก่อน
	$(1 - p)R$	คือ	ปริมาณน้ำฝนที่ตกบนเรือนยอด
	E_i	คือ	ปริมาณการระเหยน้ำจากเรือนยอด
	D	คือ	ปริมาณการระบายน้ำจากเรือนยอด

4.1.4 Evaporation from canopy (E_i) เป็นค่าการระเหยน้ำจากเรือนยอดจากแนวความคิดของ Rutter กำหนดให้ค่าการระเหยน้ำจากเรือนยอดแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

1) เมื่อน้ำฝนที่ค้างบนเรือนยอด น้อยกว่าสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอดสูงสุด ($C < S$) สมการที่ 11

$$E_i = E_p \cdot \frac{C}{S} \quad (11)$$

2) เมื่อน้ำฝนที่ค้างบนเรือนยอดมากกว่าหรือเท่ากับสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอดสูงสุด ($C \geq S$) สมการที่ 12

$$E_i = E_p \quad (12)$$

E_p เป็นค่าการระเหยน้ำสูงสุดจากเรือนยอดพืชใช้สมการจากแบบจำลอง Penman (Penman, 1948) สมการที่ 1

4.1.5 Canopy drainage (D) เป็นค่าการระบายน้ำจากเรือนยอด จากแนวคิดของ Rutter ทำให้ค่าการระบายน้ำของเรือนยอดแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

1) เมื่อน้ำฝนที่ค้างบนเรือนยอดน้อยกว่าสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด ($C < S$) สมการที่ 13

$$D = 0 \quad (13)$$

2) เมื่อน้ำฝนที่ค้างบนเรือนยอดมากกว่าหรือเท่ากับสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอดสูงสุด ($C \geq S$) สมการที่ 14

$$D = D_s \cdot \exp \cdot [b(C - S)] \quad (14)$$

เมื่อ D_s คือ การระบายน้ำจากเรือนยอดเมื่อน้ำที่ค้างบนเรือนยอดเท่ากับสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด หรือการระบายน้ำเริ่มแรก

b คือ drainage coefficient เป็นค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด

4.1.6 Throughfall (Th) เป็นค่าน้ำฝนผ่านเรือนยอดซึ่งเท่ากับผลรวมของค่าระบายน้ำจากเรือนยอดกับค่าน้ำฝนที่ตกบนดิน โดยอิสระ สมการที่ 15

$$Th = D + pR \quad (15)$$

เมื่อ D คือ ปริมาณน้ำที่ระบายน้ำจากเรือนยอด (มิลลิเมตร)
 pR คือ ปริมาณน้ำฝนที่ตกบนดิน โดยอิสระ (มิลลิเมตร)

4.1.7 Intercepted water (I) เป็นค่าน้ำพืชยึดซึ่งเท่ากับผลรวมของปริมาณน้ำที่ระเหยจากเรือนยอดทั้งหมดกับน้ำที่ค้างบนเรือนยอดสุดท้าย ($C_{i\text{final}}$) สมการที่ 16

$$I = \sum E_i + (C_{i\text{final}}) \quad (16)$$

เมื่อ E_i คือ ปริมาณน้ำที่ระบายน้ำจากเรือนยอด (มิลลิเมตร)
 $C_{i\text{final}}$ คือ ปริมาณน้ำฝนที่ตกบนดิน โดยอิสระ (มิลลิเมตร)

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำพืชยึด

Muzylo *et al.* (2009) ได้ทบทวนเอกสารเกี่ยวกับแบบจำลองประเมินกระบวนการน้ำพืชยึดที่เป็นแบบจำลองต้นแบบการอธิบายโนทัศน์ของแบบจำลองที่แตกต่างกันออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ Rutter model, Gash model และ Calder model ต่อมาแบบจำลองเหล่านี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ต่างๆ ทำให้เกิดการพัฒนามาเป็นแบบจำลองย่อยๆ อีกมากโดยอาศัยแนวคิดของแบบจำลองบางส่วน มีผู้ศึกษาดังนี้ ประเภทที่หนึ่ง Rutter-type models ได้แก่ Rutter *et al.* (1971, 1975), Seller and Lockwood (1981), Massman (1983), Liu J. (1988) และ Liu S. (1997) ประเภทที่สอง Gash-type models ได้แก่ Gash (1979), Mulder (1985), Gash spare (1995), Zeng *et al.* (2000), Van Dijk and Bruijnzeel (2001) และ Murakami (2007) ประเภทที่สาม Calder models ได้แก่ Calder (1986) และ Calder (1996) ส่วนการศึกษาที่นำแบบจำลอง Rutter และ Gash ในการศึกษาปริมาณน้ำพืชยึดในพื้นที่ต่างๆ ในต่างประเทศ ตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 กระบวนการศึกษาน้ำพืชยึดในต่างประเทศนั้นการศึกษาระบวนการน้ำพืชยึด ส่วนใหญ่ยึดแนวคิดของ Rutter *et al.* (1971, 1975) และ Gash (1979) มาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่มีการปกคลุมของพืชที่แตกต่างกันไป

ตารางที่ 1 การศึกษาปริมาณน้ำพืชชนิด โดยแบบจำลอง Rutter (R) และ Gash (G) ในต่างประเทศ

In-text reference	Models		Country	Region	Vegetation cover
	R	G			
Rutter <i>et al.</i> (1971)	×		UK	-	Conifer
Rutter <i>et al.</i> (1975)	×		UK	-	Conifer
Gash and Morton (1978)	×		UK	East Anglia	Conifer
Gash <i>et al.</i> (1980)	×	×	UK	Wales, Scotland	Conifer
Pearce <i>et al.</i> (1980)	×	×	UK	Norfolk	Conifer
Calder <i>et al.</i> (1986)	×		Indonesia	W Java	Rainforest
Bringfelt and Lindroth (1987)	×		Sweden	Northern	Conifer
Lloyd <i>et al.</i> (1988)	×	×	Brazil	Manaus	Rainforest
Whitelan and Kelliher (1991)	×		New Zealand	Rotorua	Conifer
Gash <i>et al.</i> (1995)		×	Portugal	Central	Conifer
Eltahir and Bras (1993)	×		Simulated data	-	
Whelan and Anderson (1996)	×		UK	Devon	Conifer
Jetten (1996)	×		Guyana	Georgetown	Mixed
Hall <i>et al.</i> (1996)	×		Sri Lanka	Upper Mahaweli	Rainforest
Tallaksen <i>et al.</i> (1996)	×		Norway	Oslo	Conifer
Valente <i>et al.</i> (1997)	×	×	Portugal	Central	Conifer, Hardwood
Davie and Durocher (1997)	×		Simulated data	-	
Asdak <i>et al.</i> (1998)	×	×		Centr.Kalimantan	Rainforest
Domingo <i>et al.</i> (1998)	×		Spain	S-E	Shrub
Schellekens <i>et al.</i> (1999)	×	×	Puerto Rico	Loquillo	Rainforest
Aboal <i>et al.</i> (1999)	×	×	Spain	Canary Island	Hardwood
Schellekens (2000)	×		Puerto Rico	Loquillo	Rainforest
Zeng <i>et al.</i> (2000)	×		BraZil	Central Amazon	Rainforest
Bibelow (2001)	×		Costa Rica	-	Hardwood
Tani <i>et al.</i> (2003)	×		Malasia	-	Rainforest
Loescher <i>et al.</i> (2005)	×		Casta Rica	Puerto Viejo	Rainforest
Cuartas <i>et al.</i> (2007)	×	×	Brazil	Central Amazons	Rainforest

ที่มา: คัดแปลงจาก Muzylo *et al.* (2009)

สำหรับการศึกษากระบวนการน้ำพืชยึดในประเทศนั้น เริ่มศึกษาเมื่อประมาณ 40 ปีที่แล้ว โดยนิพนธ์ (2513) ศึกษาปริมาณน้ำฝนที่ถูกสกัดกั้นโดยเรือนยอด น้ำฝนที่ผ่านเรือนยอดลงมา น้ำฝนที่ไหลลงตามต้นไม้ บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ สรุปว่า ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดมีค่า 92.44 มิลลิเมตร เมื่อมีฝนตกถึง 100 มิลลิเมตร น้ำฝนที่ถูกสกัดกั้นไว้โดยเรือนยอดมีปริมาณ 6.22 มิลลิเมตร และเป็นปริมาณน้ำที่ไหลตามลำต้น 1.34 มิลลิเมตร

นิพนธ์และคณะ (2545) ได้ทำการรวบรวมผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปริมาณน้ำพืชยึดในประเทศไทยที่ซึ่งนอกจากจะเป็นการศึกษาในป่าธรรมชาติประเภทต่างๆ แล้วมีพื้นที่สวนป่าสวนไม้ผล และพืชไร่ เมื่อแยกข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินแต่ละประเภท ได้แก่ พื้นที่ป่าไม้ สวนป่า และเกษตรกรรม เพื่อทำการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำจากกระบวนการน้ำพืชยึดพบว่าในพื้นที่ป่าไม้มีแนวโน้มสูญเสียน้ำจากกระบวนการน้ำพืชยึดปริมาณมากที่สุดรองลงมา คือ พื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่สวนป่า ตามลำดับ

กฤษดาพร (2548) ศึกษาอิทธิพลของลักษณะการตกของฝนต่อกระบวนการน้ำพืชยึดในป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า พบว่า ฝนที่ตกส่วนใหญ่มีความยาวนานไม่เกิน 0.5 ชั่วโมง ปริมาณน้ำฝนที่ทำให้เกิดน้ำฝนผ่านเรือนยอดต้องมากกว่า 2.5 มิลลิเมตร โดยเฉลี่ย ซึ่งส่วนมากจะเกิดขึ้นหลังฝนตกผ่านไปประมาณ 5 นาที (คิดเป็น 58 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ฝนตก) และน้ำฝนผ่านเรือนยอดหยุดหลังจากที่ฝนหยุดตกไปแล้วมากกว่า 30 นาที (คิดเป็น 32 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ฝนตก) แต่หากฝนมีความหนักเบาต่ำ น้ำฝนผ่านเรือนยอดหยุดตกก่อนที่ฝนหยุดตกประมาณ 10 นาที (คิดเป็น 68 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ฝนตก) กรณีการตกของฝนครั้งก่อนหน้าห่างกันมากกว่า 24 ชั่วโมง จะเกิดน้ำฝนผ่านเรือนยอดเมื่อมีการตกของฝนผ่านไป 6 - 20 นาที

กุลธิดา (2546) ศึกษาผลของการตัดสาขายาระยะไม่ว่าต้นตอปริมาณน้ำพืชยึด บริเวณสถานีเกษตรหลวงอ่างขาง ในแปลงสวนป่าพันธุ์ไม้ 3 ชนิด คือ กระถินดอย เมเปิ้ลหอม และจันทร์ทอง พบว่า แปลงที่ไม่มีการตัดสาขายาระยะ มีปริมาณน้ำพืชยึดเท่ากับ 24 - 27, 20 - 22 และ 17 - 23 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณฝนเหนือเรือนยอด ตามลำดับ เมื่อมีการตัดสาขายาระยะ พบว่า มีปริมาณน้ำพืชยึดเท่ากับ 15 - 27, 13 - 16 และ 13 - 16 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณฝนเหนือเรือนยอด

จักรกริช (2550) ประยุกต์แบบจำลอง Rutter เพื่อศึกษากระบวนการน้ำพืชยึดในสวนลิ้นจี่และปาล์มน้ำมัน บริเวณลุ่มน้ำแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าปริมาณน้ำพืชยึดที่ประมาณได้คิดเป็นร้อยละ 7.19 - 7.81 และพบว่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) ในพื้นที่สวนลิ้นจี่ช่วงต้นฤดูฝน กลางฤดู

ฝน และปลายฤดูฝนมีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.90, 0.96 และ 0.95 ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ป่ารุ่นสองในช่วงต้นฤดูฝน กลางฤดูฝน และปลายฤดูฝน มีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.93, 0.84 และ 0.93 ตามลำดับ

จากการทบทวนเอกสารข้างต้น ทำให้ทราบถึงกระบวนการศึกษาน้ำพืชยึดทั้งในไทยนั้น เป็นการศึกษาในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินต่างกัน เช่น ป่าธรรมชาติต่างๆ พื้นที่สวนป่าและสวนผลไม้ เพื่อประเมินปริมาณน้ำพืชยึดและนำมาเปรียบเทียบในเชิงของการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกันว่ามีโอกาสที่จะเกิดการสูญเสียน้ำออกจากพื้นที่โดยกระบวนการน้ำพืชยึดได้มากหรือน้อยเป็นหลัก ไม่ได้ทำการศึกษาระบวนการคายระเหยน้ำหรือประมาณค่าการคายระเหยน้ำควบคู่ไปด้วย ทำให้ไม่ทราบถึงการสูญเสียน้ำทั้งระบบในพื้นที่ที่ศึกษา

6. Eddy - Correlation

Eddy - Correlation เป็นการตรวจวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศในแนวดิ่ง ส่วนใหญ่จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนในการพาอากาศ (sensible heat flux; H) พลังงานความร้อนในการระเหยน้ำ (latent heat flux; λE) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ภาพที่ 3 เครื่องมือที่ตรวจวัดคือ 3 - D dimensional Ultrasonic anemometer ใช้ในการตรวจวัดองค์ประกอบต่างๆของลม และตรวจวัดอุณหภูมิ โดยมีอุปกรณ์ open path H_2O/CO_2 infrared gas analyzer ใช้ในการตรวจวัดความเข้มข้นของไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการตรวจวัดใน 3 ทิศทางคือ แกน X แกน Y และแกน Z ตรวจวัดสิบครั้งต่อเวลา 1 วินาที (ประจำแก้ว, 2550)



ภาพที่ 3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการคายระเหยน้ำด้วยวิธี Eddy - Correlation ที่สถานีตรวจวัดอากาศ กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ (A คือ 3 - D Dimensional Sonic Anemometer และ B คือ Open Path H_2O/CO_2 Infrared Gas Analysis)

Dingman (2002) อธิบายว่า Eddy – Correlation คืออัตราการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนของไอน้ำจากผิวน้ำการระเหยหนึ่งๆ ในช่วงเวลาสั้นๆ เป็นการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งของการเคลื่อนที่ของอากาศ (u_a) และความชื้นสมบูรณ์ (q') ซึ่งถือว่าการวัดค่าโดยตรงของความเข้มข้นของไอน้ำในอากาศตามหลักการเคลื่อนที่ของมวล หลักการพื้นฐานของความหนาแน่นของมวลและพลังงานระหว่างผิวน้ำกับบรรยากาศ ดังสมการที่ 17

$$E = \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \cdot \overline{u_a \cdot q'} \quad (17)$$

เมื่อ	—	คือ	แทนค่าเฉลี่ย
E		คือ	อัตราการเคลื่อนที่ของไอน้ำ (มิลลิเมตรต่อวินาที)
ρ_a		คือ	ความหนาแน่นของบรรยากาศ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
ρ_w		คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
u_a		คือ	สัดส่วนการเคลื่อนที่ของอากาศในแนวตั้งต่อระยะเวลาเฉลี่ย
q'		คือ	ความชื้นสมบูรณ์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์สำหรับถ่ายโอนข้อมูล
2. โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณและประมวลผล

วิธีการ

การศึกษานี้ดำเนินงานโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดยเครื่องมือตรวจวัดอากาศและด้วยวิธี Eddy - Correlation บริเวณหอคอยตรวจวัดอากาศในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552 มีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังนี้

1. การรวบรวมข้อมูล

การศึกษานี้ดำเนินงานโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดยโครงการวิจัยร่วมระหว่างคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และคณะวิทยาศาสตร์การเกษตรและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552 ได้แก่ การตกของฝน (rainfall) น้ำฝนผ่านเรือนยอด (throughfall) บั๊จจี้ดิ่งแวดล้อม บั๊จจี้ด้านพืช เพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าให้แก่ตัวแปรในแบบจำลอง และค่าการระเหยน้ำของป่าดิบเขา เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง มีรายละเอียดดังนี้

1.1 การตกของฝน (rainfall)

การศึกษาถึงลักษณะการตกของฝนตลอดทั้งปีนั้น ได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลการตกของฝนจากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดน้ำฝนมาตรฐานแบบบันทึกอัตโนมัติด้วยกระดก (tipping bucket) ขนาด 8 นิ้ว จำนวน 1 เครื่อง ที่ติดตั้งไว้บริเวณเหนือเรือนยอดพืชในพื้นที่ศึกษา บนหอคอยตรวจวัดอากาศสูงประมาณ 50 เมตร ที่มีการบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (data logger) ทุกๆ ครั้งที่ถ้วยกระดก เพื่อนำไปศึกษาถึงลักษณะการตกของฝนและกระบวนการน้ำพืชยึดในแบบจำลอง Rutter

1.2 น้ำฝนผ่านเรือนยอด (throughfall)

รวบรวมปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอด โดยใช้เครื่องมือวัดน้ำฝนมาตรฐานแบบอัตโนมัติ ชนิดถ้วยกระดก ขนาด 8 นิ้ว จำนวน 2 เครื่อง ที่ติดตั้งในพื้นที่แปลงทดลอง โดยการสุ่มกระจายห่างจาก ต้นไม้แตกต่างกันครอบคลุมทั้งแปลงน้ำพืชขนาด 30×30 เมตร เพื่อรองรับน้ำฝนที่หยดลงสู่เครื่อง และบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (data logger) ทุกๆ ครั้งที่ถ้วยกระดกเพื่อนำไปตรวจ ความถูกต้องกับค่าน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ได้จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองน้ำพืชของ Rutter (1971)

1.3 ปัจจัยสิ่งแวดล้อม

รวบรวมข้อมูลปัจจัยแวดล้อม บริเวณหอคอยตรวจวัดอากาศของกลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความดันบรรยากาศ รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นและรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ โดยมีช่วงเวลาการตรวจวัด (time interval) ทุกๆ 30 นาที บันทึกลงในเครื่องบันทึกข้อมูล อัตโนมัติ (data logger) เพื่อเป็นข้อมูลนำเข้าในแบบจำลองการประมาณค่าการคายระเหยน้ำ

1.4 ปัจจัยด้านพืช

ข้อมูลด้านพืชที่ปกคลุมพื้นที่ศึกษา โดยดำเนินการรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิจากการศึกษาที่ผ่านมาของศิริธัญญา (2545) ที่ได้ทำการศึกษาการประเมินอัตราการคายน้ำของเทพทาโร และก่อหม่นในป่าดิบเขา ดอยปู่ จังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่ ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index; LAI) และการศึกษาของประคำ แก้ว (2550) ที่ได้ศึกษาการหาความสัมพันธ์การชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของ ป่าดิบเขาด้วยแบบจำลองน้ำด้วยแบบจำลอง Pennan - Monteith ในพื้นที่เดียวกับการศึกษารั้งนี้ ได้แก่ ค่าการชักนำปากใบ (stomatal conductance) และการนำน้ำของเรือนยอดพืช (canopy conductance) เพื่อนำค่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น ไปกำหนดช่วงในการปรับเทียบค่าของปัจจัยดังกล่าวเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ในแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระ (p) ในแต่ละเดือนของข้อมูลราย 10 นาที และข้อมูลราย 30 นาที กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.2 เนื่องจากในพื้นที่ป่าดิบเขาที่มีการปกคลุมของเรือนยอดหนาแน่นและมีการเปลี่ยนแปลงของเรือนยอดน้อย มีปริมาณเปอร์เซ็นต์การปกคลุมของเรือนยอดระหว่างสันเขากับลำห้วยประมาณ 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ (ชุมพล, 2512) ซึ่งมีค่าสอดคล้อง

คล้อยกับผลการศึกษาของ Gash *et al.* (1978) ที่ศึกษาการสูญเสียน้ำพืชียึดจากพื้นที่ป่าไม้ใน Thetford ทางตะวันออกของประเทศอังกฤษ โดยการประยุกต์แบบจำลอง Rutter พบว่ามีค่า p อยู่ระหว่าง 0.26 – 0.32 ส่วน Rutter *et al.* (1975) ศึกษาเรือนยอดของต้นไม้ Hardwood Stands ของประเทศสหราชอาณาจักรอังกฤษ พบว่ามีค่า p อยู่ระหว่าง 0.25 – 0.85 ซึ่งแตกต่างกับการศึกษาของ Mathias *et al.* (2008) ที่ศึกษาการผันแปรตามฤดูกาลของการระเหยน้ำของน้ำพืชียึดจากเรือนยอดในพื้นที่ป่าเบญจพรรณ ประเทศสหราชอาณาจักรอังกฤษ พบว่ามีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระระหว่างเดือนเมษายนถึงเดือนพฤศจิกายน ปี 2006 เท่ากับ $0.19 (\pm 0.13)$ ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างทางด้านโครงสร้างและการปกคลุมของเรือนยอดของพืชพรรณ ป่าเบญจพรรณมีช่วงการทิ้งใบของพืชจึงมีช่องว่างระหว่างเรือนยอดมากกว่าป่าดิบเขาธรรมชาติ

1.5 ค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา

ข้อมูลค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2551 และ พ.ศ. 2552 ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ซึ่งมีช่วงเวลาการตรวจวัด (time interval) ทุกๆ 30 นาที ในปี พ.ศ. 2551 และ พ.ศ. 2552 บันทึกลงในเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (data logger) เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องกับค่าการคายน้ำที่ได้จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองการคายระเหยน้ำที่ประยุกต์ได้

2. การศึกษากระบวนการคายระเหยน้ำจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

แบ่งการศึกษาข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การคำนวณค่าการคายน้ำพืชียึดจากข้อมูลน้ำฝนผ่านเรือนยอดและน้ำฝนเหนือเรือนยอด 2) การศึกษาความผันแปรของการคายระเหยน้ำที่ได้จากวิธี Eddy - Correlation ซึ่งเป็นการศึกษาความผันแปรของข้อมูลในรอบเดือนและแต่ละฤดูกาล มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

2.1 ปริมาณน้ำพืชียึด

ศึกษาการเกิดน้ำพืชียึด (intercepted water; I) โดยเริ่มจากการนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกน้ำฝนแบบอัตโนมัติชนิดด้วยกระดก ที่มีการบันทึกข้อมูลทุกๆ ครั้งที่ถ้วยกระดก มาคำนวณเป็นปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดทุกๆ ช่วงเวลา 10 นาที โดยเขียนชุดคำสั่งด้วยโปรแกรมภาษา Visual Basic for Application (VBA) บนโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นจึงตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลน้ำฝนผ่านเรือนยอด (throughfall; Th) ให้มีความสอดคล้องกับ

ข้อมูลน้ำฝนเหนือเรือนยอด (gross rainfall; R) ที่ได้จากการตรวจวัดในเรื่อง 1) เวลาเริ่มตกของฝน และเวลาหยุดตกของฝนแต่ละครั้ง (storm) กับการเกิดน้ำฝนผ่านเรือนยอด 2) ปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอดแต่ละครั้ง (storm) กับปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอด หมายถึง ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งของฝน ต้องไม่มากกว่าปริมาณน้ำฝนที่ตก ซึ่งมีการแบ่งการตกของฝนแต่ละครั้ง (storm) โดยใช้ช่วงเวลาการตกของฝนที่ห่างกันประมาณ 1 ชั่วโมงเป็นการแบ่งแยกการตกของฝน

จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ตรวจสอบความถูกต้องแล้วมาคำนวณค่าเป็นช่วงเวลา (time interval) 30 นาที โดยเขียนชุดคำสั่งในการคำนวณข้อมูลด้วยโปรแกรมภาษา Visual Basic for Application (VBA) บนโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อเป็นข้อมูลอีกชุดสำหรับใช้เป็นข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง Rutter ในการประมาณค่าน้ำพืชยึดช่วงเวลา 30 นาที สุดท้ายจึงนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าผลรวมของปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอด น้ำฝนผ่านเรือนยอดในรอบเดือน รวมทั้งระยะเวลา ความหนักเบาของฝน จำนวนครั้งที่ตก และปริมาณน้ำพืชยึดรายเดือน บนโปรแกรม Microsoft Excel ปริมาณน้ำพืชยึดคำนวณดังสมการที่ 18

$$\text{น้ำพืชยึด} = \text{น้ำฝนเหนือเรือนยอด} - \text{น้ำฝนผ่านเรือนยอด} \quad (18)$$

2.2 การตรวจความผันแปรของการคายระเหยน้ำ

2.2.1 คัดเลือกข้อมูลความร้อนในการเผาผลาญอากาศ (sensible heat flux; H) และพลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat flux; λE) จากการตรวจวัดโดยวิธี Eddy-Correlation ซึ่งมีช่วงของข้อมูลที่ไม่สามารถนำมาใช้ในการศึกษาได้ คือ ข้อมูลในช่วงเวลากลางคืน (18.00 - 06.00 น.) ข้อมูลที่มีค่าติดลบ เนื่องจากไม่มีรังสีอาทิตย์ และข้อมูลช่วงที่มีฝนตก เนื่องจากช่วงที่มีฝนตกเครื่องมือไม่สามารถตรวจวัดได้

2.2.2 เปรียบเทียบค่าความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ (net radiation; R_n) ระหว่างวิธี Eddy - Correlation ที่คำนวณจากผลรวมของค่าพลังงาน H และ λE ดังสมการที่ 19 กับวิธีสมดุลพลังงานรังสีอาทิตย์ ที่คำนวณจากค่ารังสีคลื่นสั้น (short wave radiation) และรังสีคลื่นยาว (long wave radiation) ดังสมการที่ 20 โดยการพล็อตกราฟระหว่าง R_n กับ λE และ H เพื่อทำการคัดเลือกข้อมูลที่มีความใกล้เคียงกันและปรับแก้ความคลาดเคลื่อน (calibration) ของข้อมูล

$$R_n = \lambda E + H \quad (19)$$

$$R_n = (S_w_d - S_w_u) + (I_w_d - I_w_u) \quad (20)$$

เมื่อ	R_n	คือ	รังสีดวงอาทิตย์สุทธิ
	Sw_d	คือ	ปริมาณรังสีคลื่นสั้นที่ลงมาถึงชั้นบรรยากาศของโลก
	Sw_u	คือ	ปริมาณรังสีคลื่นสั้นที่สะท้อนออกไปจากชั้นบรรยากาศของโลก
	lw_d	คือ	ปริมาณรังสีคลื่นยาวที่ลงมาถึงชั้นบรรยากาศของโลก
	lw_u	คือ	ปริมาณรังสีคลื่นยาวที่สะท้อนออกไปจากชั้นบรรยากาศของโลก

2.2.3 คำนวณค่าความผันแปรของการคายระเหยน้ำ จากค่า H และ λE ที่ทำคัดเลือกแล้ว จากหน่วยพลังงานให้เป็นหน่วยปริมาณน้ำ

3. การจำลองแบบกระบวนการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา

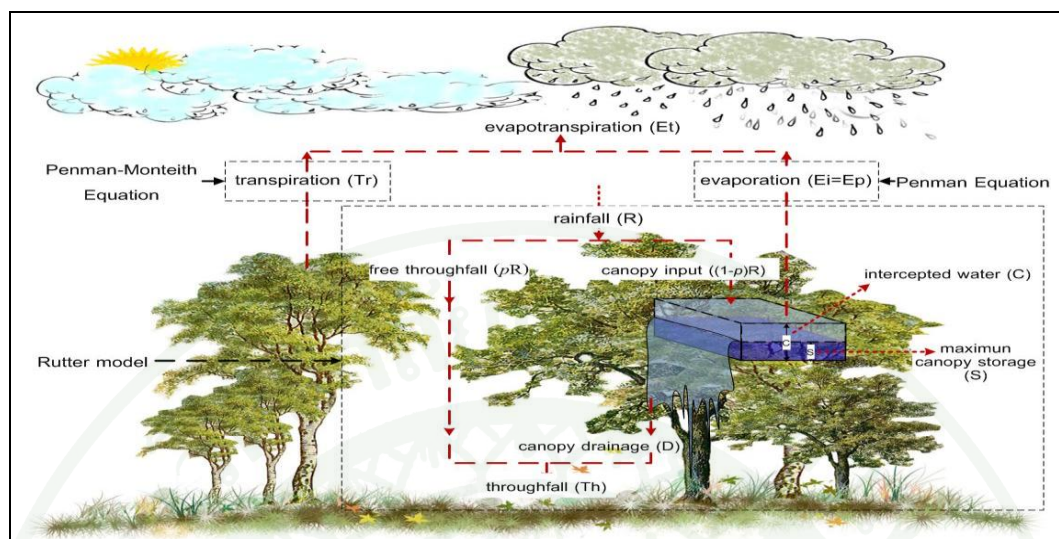
การประยุกต์ใช้แบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter ร่วมกัน เพื่ออธิบายกระบวนการและการประมาณค่าการคายระเหยน้ำ มีกรอบแนวคิดของการจำลองแบบ (conceptual model) และขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 กรอบแนวคิดของแบบจำลอง (conceptual model)

กำหนดแนวคิดในการจำลองแบบโดยรวมแบบจำลองทั้ง 3 แบบเข้าด้วยกัน ดังภาพที่ 4 และมีขั้นตอนวิธีในการจำลองแบบดังภาพที่ 5 ซึ่งใช้แบบจำลอง Penman - Monteith ดังสมการที่ 2 ประมาณค่าการคายน้ำของพืช (Monteith, 1965; Dingman, 2002) และแบบจำลองประมาณปริมาณน้ำพืชยี่สิบของ Rutter *et al.* (1971) ส่วนการระเหยของน้ำที่ติดค้างอยู่บนเรือนยอดประมาณด้วยแบบจำลอง Penman

จากกรอบแนวคิดของแบบจำลองของ Rutter *et al.* (1971) นั้น การศึกษานี้ไม่พิจารณา น้ำฝนในส่วนของน้ำที่ไหลตามลำต้น (stem flow) เนื่องจากน้ำในส่วนนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ น้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระ ซึ่งนิพนธ์ (2513) ได้สรุปไว้ในการศึกษาปริมาณน้ำฝนที่ถูกสกัดกั้น โดยเรือนยอด น้ำฝนที่ผ่านเรือนยอดลงมา น้ำฝนที่ไหลลงตามต้นไม้ บริเวณลุ่มน้ำลุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยบุง ว่าปริมาณน้ำที่ไหลลงมาตามลำต้นไม่มีปริมาณอยู่ระหว่าง 0 - 5 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณ น้ำฝนที่ตกทั้งหมด ซึ่งเป็นส่วนที่น้อยมากหรือไม่มีเลย

การจำลองแบบนี้ได้แบ่งน้ำฝนเหนือเรือนยอด (R) ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ น้ำฝนที่ ตกโดยอิสระโดยไม่ปะทะกับเรือนยอดสู่พื้นดิน (free throughfall; pR) และน้ำฝนที่ตกบนเรือนยอด



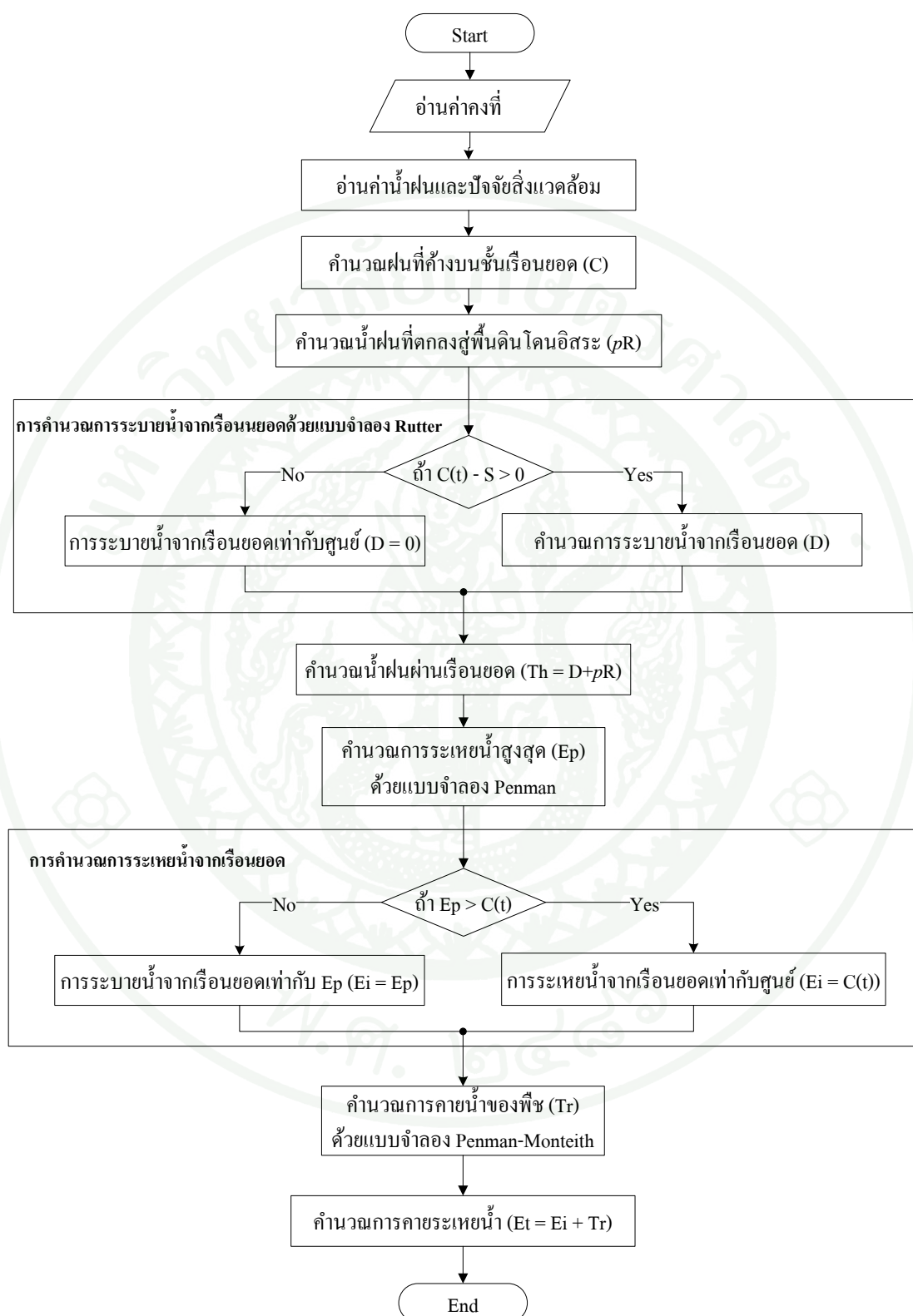
ภาพที่ 4 แบบจำลองโมโนทอร์กระบวนการคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) ของพื้นที่ป่าดิบเขา
กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

(canopy input; $(1 - p)R$) ซึ่งน้ำส่วนนี้จะสูญเสียนอกจากเรือนยอด 2 ทิศทาง คือ 1) เกิดการระบายออกจากเรือนยอด (canopy drainage; D) เมื่อน้ำที่ค้างบนเรือนยอด (canopy storage; C) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (canopy storage capacity; S) และ 2) การระเหยออกจากเรือนยอด (evaporation from canopy; E_i) มีค่าเท่ากับการระเหยสูงสุด (potential evaporation; E_p) ซึ่งส่วนนี้จะเกิดขึ้นพร้อมกับส่วนของการระบายออกจากเรือนยอดและยังเกิดขึ้นตลอดเวลาจนกว่าไม่เหลือน้ำที่กักเก็บไว้โดยเรือนยอด จำนวนได้จากสมการของ Penman (1948)

สุดท้ายน้ำที่ตกโดยอิสระสู่พื้นดิน (pR) รวมกับน้ำที่ระบายออกจากเรือนยอด (D) คือน้ำฝนผ่านเรือนยอด (Th) ส่วนผลรวมน้ำที่เกิดจากการคายน้ำของเรือนยอด (transpiration) ซึ่งเป็นการสูญเสียน้ำที่เกิดขึ้นตลอดเวลาสามารถคิดได้จากสมการของ Penman - Monteith (1965) กับน้ำที่ระเหยออกจากเรือนยอด รวมเป็น การคายระเหยของน้ำทั้งหมด จากที่กล่าวข้างต้น สรุปเป็นโมโนทอร์และขั้นตอนวิธี (algorithm) ในการจำลองแบบการคายระเหยน้ำ แสดงดังภาพที่ 4 และภาพที่ 5

3.2 การสร้างแบบจำลองการคายระเหยน้ำด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

การจำลองแบบการคายระเหยน้ำด้วยสมการทางคณิตศาสตร์แทนความสัมพันธ์ของกระบวนการคายระเหยน้ำ ได้แก่ กระบวนการคายน้ำและกระบวนการน้ำพืชยึด ด้วยโปรแกรมภาษา VBA แล้วจึงนำข้อมูลปัจจัยแวดล้อมช่วงเวลา 10 และ 30 นาที (10 and 30 minute time interval)



ภาพที่ 5 ขั้นตอนวิธี (algorithm) การจำลองแบบการคายระเหยน้ำบริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา คอยบู่ จังหวัดเชียงใหม่

เนื่องจากข้อมูลน้ำฝนผ่านเรือนยอดและน้ำฝนเหนือเรือนยอดทำการตรวจวัด แล้วบันทึกอัตโนมัติ ทุกๆ ช่วงเวลา 10 นาที ส่วนข้อมูล Eddy - Correlation และข้อมูลปัจจัยสิ่งแวดล้อมทำการตรวจวัด แล้วบันทึกอัตโนมัติทุกๆ 30 นาที ดังนั้นจึงทำการนำเข้าข้อมูลเป็น 2 ช่วงเวลา เพื่อเปรียบเทียบผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์และประมาณน้ำพืชที่ได้จากแบบจำลอง Rutter ราย 10 นาที กับ ราย 30 นาที ว่าช่วงเวลาใดได้ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์และการประมาณค่าจากแบบจำลองมีความถูกต้องมากกว่ากัน เมื่อตรวจสอบความถูกต้องด้วยค่าน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ได้จากการตรวจวัด

การปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (model calibration) จะดำเนินการปรับเทียบการจำลองแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยทำการกำหนดช่วงแต่ละของพารามิเตอร์ที่เป็นไปได้ (ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด) และ กำหนดค่าเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์แต่ละครั้งเมื่อสั่งให้โปรแกรมคำนวณค่า RMSE ที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์แต่ละครั้ง จากนั้นจึงเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (root mean square error; RMSE) มีค่าต่ำที่สุดไปใช้เป็นค่าคงที่ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำของแต่ละเดือน

3.3 ประเมินประสิทธิภาพและการทวนสอบความถูกต้องของจำลองแบบ

การศึกษาครั้งนี้ทำการการตรวจสอบความถูกต้อง โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ข้อมูลในปี พ.ศ. 2551 ไว้ใช้ปรับเทียบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละแบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองน้ำพืชยึด โดยการเปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ได้จากการตรวจวัดกับ ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ได้จากแบบจำลอง และแบบจำลองการคายน้ำของพืช โดยเปรียบเทียบค่าการคายน้ำของพืชที่ได้จากการตรวจวัดกับปริมาณการคายน้ำที่ได้จากวิธี Eddy - Correlation

ส่วนข้อมูลอีกชุดสำหรับการทวนสอบความถูกต้องของการจำลองแบบ โดยแบ่งการทวนสอบเป็น 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 ทำการทวนสอบความถูกต้องโดยใช้ข้อมูลจากตรวจวัดในปี พ.ศ. 2552 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของราย 10 นาทีและ 30 นาที ที่ได้จากการปรับเทียบโดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดในปี พ.ศ. 2551 และวิธีที่ 2 โดยใช้ข้อมูลในปีพ.ศ. 2551 ซึ่งเป็นปีเดียวกับการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบเดือนที่ติดกันมาทำการทวนสอบความถูกต้องของการจำลองแบบ เช่น พารามิเตอร์ที่ปรับเทียบในเดือนมีนาคมนำไปใช้ประมาณค่าในเดือนเมษายน และพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบในเดือนเมษายนนำไปใช้ประมาณค่าในเดือนพฤษภาคม เป็นต้น โดยสามารถประเมินประสิทธิภาพการจำลองแบบจากสมการของ Nash และ Sutcliffe ค.ศ. 1970 (NSE)

ดั่งสมการที่ 21 และค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (coefficient of determination; R^2) และค่า correction factor (b) ของสมการเส้นตรง ดั่งสมการที่ 22

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \quad (21)$$

เมื่อ	NSE	คือ	ประสิทธิภาพของแบบจำลอง
	Y_i^{obs}	คือ	ค่าที่ได้จากการตรวจวัด
	Y_i^{sim}	คือ	ค่าที่ได้จากแบบจำลอง
	Y_i^{mean}	คือ	ค่าเฉลี่ยของค่าที่ได้จากการตรวจวัด
	n	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$Y = bx \quad (22)$$

เมื่อ	Y	คือ	ค่าที่ได้จากการตรวจวัด
	X		ค่าที่ได้จากแบบจำลอง
	b	คือ	ค่าความลาดชันของกราฟ 1:1

4. การประยุกต์แบบจำลองประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำ

การประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ต่อการคายระเหยน้ำ ดำเนินการโดย กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่ป่าดิบเขาเป็นพื้นที่สวนลื่นจี และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่ป่าดิบเขาเป็นพื้นที่สวนลำไย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินนั้นจะส่งผลต่อตัวแปรคงที่ในแบบจำลอง ที่มีค่าผันแปรตามลักษณะของการใช้ประโยชน์ที่ดินเปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ ความสูงของต้นพืช (Z_{veg}) ความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (maximum leaf conductance; C_{leaf}^*) และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index; LAI) สัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระ (p) สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (Ds) และสัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) มีรายละเอียดดังนี้

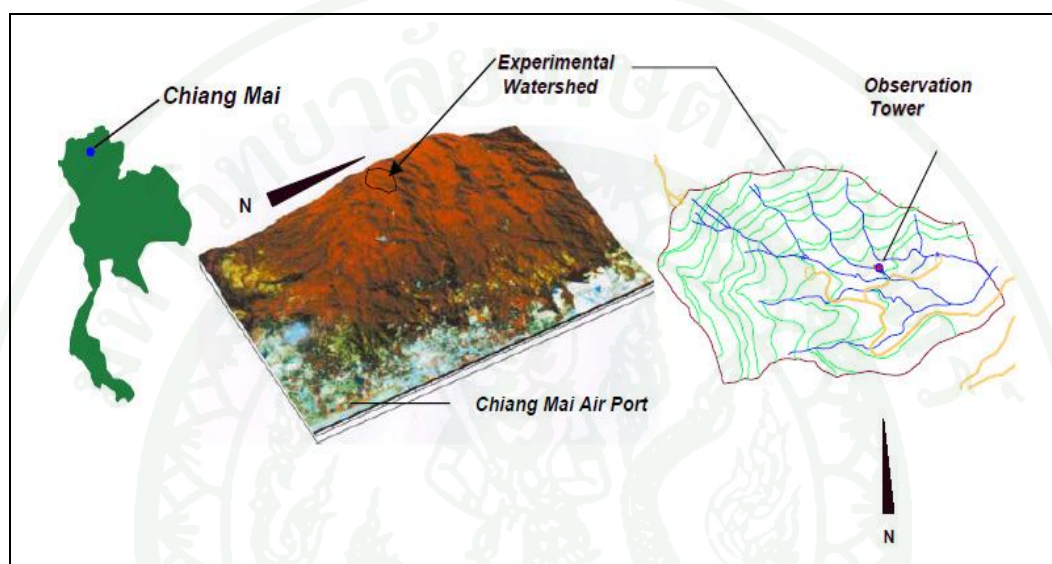
กรณีการเปลี่ยนแปลงใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่ป่าดิบเขาเป็นพื้นที่สวนลื่นจี กำหนดให้ ความสูงของต้นพืช (Z_{veg}) เท่ากับ 12 เมตร ความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (maximum leaf conductance; C_{leaf}^*) เท่ากับ 0.56 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที (Menzel and Simpson, 1986) และจากการศึกษาของจกกริช (2550) พบว่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index; LAI) เท่ากับ 3.5 สัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระ (p) เท่ากับ 0.68 สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) เท่ากับ 0.93 มิลลิเมตร การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (D_s) เท่ากับ 0.31 มิลลิเมตร และ สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) เท่ากับ 0.75

กรณีการเปลี่ยนแปลงใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่ป่าดิบเขาเป็นพื้นที่สวนลำไย กำหนดให้ ความสูงของต้นพืชเท่ากับ 20 เมตร ความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบเท่ากับ 0.56 โมลต่อตาราง เมตรต่อวินาที ดัชนีพื้นที่ผิวใบกรณีที่มีการตัดสาง 40 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 3.49 (สุขใจและคณะ, 2551) สัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกบนดินโดยอิสระเท่ากับ 0.32 สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด เท่ากับ 0.70 มิลลิเมตร การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรกเท่ากับ 0.29 มิลลิเมตร และสัมประสิทธิ์การระบาย น้ำจากเรือนยอดเท่ากับ 0.26 (Rutter, 1975)

อย่างไรก็ตามการศึกษากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำเป็น เพียงการศึกษาเบื้องต้นเพื่อเป็นแนวทางการนำแบบจำลองมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ นำมาใช้เป็นตัวแทนพืชนั้นไม่ได้มาจากการตรวจวัดโดยตรงซึ่งยังไม่ชัดเจน หากต้องการความ ถูกต้องของการประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวต้องทำการศึกษาข้อมูลปัจจัยนำเข้าดังกล่าวเพิ่มเติม แต่ละชนิดพืช

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา ดำเนินการบริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่แสดงดังภาพที่ 6 ซึ่งมีลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษาดังนี้



ภาพที่ 6 พื้นที่ป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ยอำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: ชัชชัย (2549)

ลุ่มน้ำห้วยคอกม้าตั้งอยู่ในเขตอุทยานแห่งชาติดอยสุเทพ ทางทิศใต้ติดกับพระตำหนักภูพิงคราชนิเวศน์ ระหว่างเส้นรุ้งที่ $18^{\circ} 45'$ เหนือ และเส้นแวง $98^{\circ} 54'$ ตะวันออก สภาพภูมิประเทศตั้งอยู่ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 1,268 - 1,620 เมตร มีความสูงเฉลี่ย 1,400 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง มีเนื้อทั้งหมดประมาณ 0.64 ตารางกิโลเมตร มีลักษณะรูปร่างอยู่ระหว่างรูปใบพัด (fan shape) และรูปสี่เหลี่ยม (rectangular shape) มีค่าความลาดชันเฉลี่ยตามน้ำหนักรูปร่างพื้นที่ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ ลำธารมีลักษณะแบบ dendritic pattern อัตราส่วนของจำนวนลำธารต่อพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 33.71 ลำธารต่อตารางกิโลเมตร ความยาวรวมของทุกลำธารประมาณ 9.37 กิโลเมตร ค่า compactness coefficient ของพื้นที่ประมาณ 1.2 ซึ่งแสดงว่ามีการระบายน้ำได้ดี ลุ่มน้ำห้วยคอกม้าเป็นต้นกำเนิดของห้วยแก้ว พื้นที่ทั้งลุ่มน้ำปกคลุมด้วยป่าดิบเขาทำให้ลำธารมีน้ำไหลตลอดทั้งปี (เกษม, 2512)

พื้นที่ปกคลุมไปด้วยป่าดิบเขาธรรมชาติ บริเวณสันเขาบางแห่งปกคลุมไปด้วยไม้ตระกูลก่อระดับต่ำลงมาเป็นไม้พุ่มตระกูลตะเคียนและเหมีียด บริเวณใกล้ริมลำห้วยมีไม้พุ่มขนาดเล็ก และกอน้ำส่วนในลำห้วยที่มีน้ำไหลผ่านประกอบด้วยพรรณไม้พุ่มบอน และตองสาต ซึ่งเป็นพรรณไม้ชอบน้ำขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น ปริมาณเปอร์เซ็นต์การปกคลุมของเรือนยอดโดยเฉลี่ยประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยบริเวณสันเขามีการปกคลุมของเรือนยอดประมาณ 75 - 80 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างสันเขากับลำห้วยประมาณ 80 - 90 เปอร์เซ็นต์ และบริเวณลำห้วยประมาณ 90 - 95 เปอร์เซ็นต์และมีพรรณไม้หลัก คือ ไม้ตระกูลก่อ (Fagaceae) ประกอบด้วย ก่อเดือย ก่อแดง ก่อเม่น ก่อแหลม กอน้ำ ก่อตาหมู เป็นต้น มีชั้นเรือนยอด 3 ชั้น (ชุมพล, 2512)

ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้าอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ฤดูฝนเริ่มจากเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม มรสุมนี้มีผลทำให้ฝนตกมาก โดยเฉพาะในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม มักมีพายุดีเปรสชันเคลื่อนตัวจากทะเลจีนใต้เข้าประเทศไทยทางตอนเหนือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือของประเทศ และในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์เป็นช่วงฤดูหนาว เพราะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้อากาศหนาวเย็นและช่วงฤดูร้อนเริ่มจากเดือนมีนาคมจนถึงเดือนเมษายน ลักษณะอากาศทั่วไปของพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้ามีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปี 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 81.09 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดปีประมาณ 2,043 มิลลิเมตร ลักษณะฝนมีทั้งแบบพายุฝนฟ้าคะนอง (thunderstorm precipitation) มีความหนาแน่นสูง เม็ดใหญ่ ตกนาน ตกตอนต้นของฤดูฝนและฝนลมใต้เขา (orographic precipitation) ความหนักเบาต่ำ (นิพนธ์, 2513)

ผลและวิจารณ์

1. การคายระเหยน้ำจากการตรวจวัด

การศึกษาการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาครั้งนี้ได้แบ่งการคายระเหยน้ำออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการน้ำพืชยึด และกระบวนการคายน้ำของพืช โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับทั้งสองกระบวนการ แล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ มีผลการศึกษาดังนี้

1.1 ปริมาณน้ำพืชยึด

การศึกษาการตกของฝนเหนือเรือนยอด (gross rainfall) และน้ำฝนที่ตกผ่านเรือนยอด (throughfall) ของป่าดิบเขาเพื่อนำมาใช้คำนวณปริมาณน้ำพืชยึด ได้ผลดังตารางที่ 2 พบว่า ตลอดปี พ.ศ. 2551 และ 2552 มีฝนตกทั้งสิ้นจำนวน 210 และ 163 ครั้ง รวมปริมาณน้ำฝนได้ประมาณ 2,012 และ 1,485 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีความหนักเบาของฝนสูงสุด 200 และ 600 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 46.69 และ 66.50 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ มีความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้งเฉลี่ยประมาณ 1 ชั่วโมง 15 นาที และ 1 ชั่วโมง 20 นาที ตามลำดับ

ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในปี พ.ศ. 2551 ดังตารางผนวกที่ 1 โดยมีปริมาณน้ำฝนรายเดือนสูงสุดในเดือนสิงหาคม มีค่าเท่ากับ 416.00 มิลลิเมตร รองลงมาคือเดือนพฤษภาคมและเดือนกันยายน มีค่าเท่ากับ 348.50 มิลลิเมตร สำหรับเดือนที่วัดปริมาณน้ำฝนได้ต่ำสุดคือเดือนธันวาคม และมกราคม มีค่าเท่ากับ 1.00 และ 5.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในปี พ.ศ. 2552 ดังตารางผนวกที่ 2 โดยมีปริมาณน้ำฝนรายเดือนสูงสุดในเดือนมิถุนายน มีค่าเท่ากับ 280.50 มิลลิเมตร รองลงมาคือเดือนพฤษภาคม มีค่าเท่ากับ 248.00 มิลลิเมตร สำหรับเดือนที่วัดปริมาณน้ำฝนได้ต่ำสุดคือเดือนมีนาคม มีค่าเท่ากับ 13.00 มิลลิเมตร

จากผลการศึกษาข้างต้นพบว่าปริมาณน้ำฝน ในปี พ.ศ. 2551 มีปริมาณสูงกว่าปี พ.ศ. 2552 มาก แต่มีความหนักเบาของฝนเฉลี่ยน้อยกว่าปี พ.ศ. 2552 ส่วนความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้งเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับผลการศึกษาของสามัคคีและเกษม (2518) ซึ่งวิเคราะห์ลักษณะฝนและจำนวนเครื่องวัดน้ำฝนในกลุ่มน้ำขนาดเล็ก ดอยปุย เชียงใหม่ พบว่า

ตารางที่ 2 ลักษณะการตกของฝนและกระบวนการน้ำพืชยึดที่เกิดจากการตกของฝนแต่ละครั้ง บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยบูน จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2251 และ พ.ศ. 2552

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับกระบวนการน้ำพืชยึด	พ.ศ. 2551				พ.ศ. 2552			
	รวม	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย	รวม	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
จำนวนครั้งที่ฝนตก (ครั้ง)	210	-	-	-	163	-	-	-
ปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอด (มม.)	2,011.00	1	50.5	9.58	1,484.00	1	113	9.1
ความยาวนานของฝน (ชม:นาท)	-	0:02	8:39	1:14	-	0:01	6:14	1:22
ความหนักเบาเฉลี่ยของฝน (มม./ชม.)	-	1.12	118	12.49	-	0.88	101.68	13.35
ความหนักเบาสูงสุดของฝน (มม./ชม.)	-	1.53 [*]	200	46.69	-	2.21 [*]	600	66.5
ความหนักเบาสูงสุด 5 นาทีของฝน (มม./ชม.)	-	1.60 [*]	150	37.49	-	1.41 [*]	126	30.65
ความหนักเบาสูงสุด 10 นาทีของฝน (มม./ชม.)	-	1.80 [*]	132	19.23	-	1.59 [*]	105	24.89
ความหนักเบาสูงสุด 30 นาทีของฝน (มม./ชม.)	-	1.67 [*]	78	10.27	-	1.21 [*]	62	15.26
ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอด (มม.) ^{**}	1,830.21	0.05 [*]	46	8.93	1,275.40	0.3	111.6	7.85
ระยะเวลาที่เกิดน้ำฝนผ่านเรือนยอด (ชม.:นาท) หลังฝนเริ่มตก)	-	0:00	0:52	0:08	-	0:00	1:39	0.1
ระยะเวลาที่น้ำฝนผ่านเรือนยอดหยุด (ชม.:นาท) หลังฝนหยุดตก)	-	0:00	1:01	0:21	-	0:00	1:09	0:20
ปริมาณน้ำพืชยึด (มม.) ^{**}	180.79	1.65 [*]	33.76	1.25	213.05	7.35 [*]	116.7	47.96
ปริมาณน้ำพืชยึด (ร้อยละของปริมาณน้ำฝน)	8.99	-	-	-	14.36	-	-	-

หมายเหตุ * คือ ค่าต่ำสุดกรณีที่เกิดน้ำฝนผ่านเรือนยอด และ ** คือ คัดผลรวมเฉพาะครั้งที่ไม่เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัด

ปริมาณน้ำฝน ระหว่างปี พ.ศ. 2509 – 2517 มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 2,073.30 มิลลิเมตร ซึ่งในแต่ละปี มีปริมาณน้ำฝนแตกต่างกัน โดยปี พ.ศ. 2509 มีปริมาณน้ำฝนตกน้อยที่สุด คือ 1,557.20 มิลลิเมตร และมากที่สุดในปี พ.ศ. 2510 คือ 2,428.20 มิลลิเมตร และยังมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของกฤษฎาพร (2548) ซึ่งศึกษาอิทธิพลของลักษณะของฝนต่อกระบวนการเกิดน้ำفيضในป่าดิบเขาเดียวกัน พบว่าปริมาณน้ำฝนรายปีที่ตรวจวัดในปี พ.ศ. 2543 มีค่าประมาณ 1,515.00 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำฝนรายเดือนที่วัดได้สูงสุดคือเดือนพฤษภาคม มีค่าประมาณ 324.00 มิลลิเมตรและรองลงมาคือเดือนสิงหาคมมีค่าประมาณ 314.00 มิลลิเมตร ส่วนเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนต่ำสุดคือเดือนมีนาคม มีค่าประมาณ 45.00 มิลลิเมตร

น้ำฝนผ่านเรือนยอด (throughfall) ที่วัดได้ในปี พ.ศ. 2551 และ 2552 มีค่าประมาณ 1,830 และ 1,275 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นหลังฝนตกเฉลี่ยประมาณ 8 - 10 นาที และหมดไปหลังฝนตกเฉลี่ยประมาณ 20 นาที ซึ่งค่าดังกล่าวคิดจากการตกของฝนแต่ละครั้ง (storm rainfall) พบว่าโดยประมาณร้อยละ 20 ของจำนวนครั้งของฝนที่ตกทั้งหมด ค่าน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่วัดได้สูงกว่าปริมาณน้ำฝน ซึ่งส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าปริมาณน้ำفيض (ค่าน้ำفيضเป็นลบ)

ปริมาณน้ำفيض ที่ประมาณจากผลต่างระหว่างปริมาณน้ำฝนที่ตกเหนือเรือนยอดกับปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดแต่ละครั้งพบว่า มากกว่าร้อยละ 90 ของฝนที่ตกทั้งหมด มีค่าน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 3 หรือเมื่อคิดเป็นหน่วยร้อยละของปริมาณน้ำฝน พบว่า ประมาณร้อยละ 30 ของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ฝนตกไม่เกิดน้ำفيض และประมาณร้อยละ 20 ของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ฝนตกมีค่าน้ำفيضระหว่างร้อยละ 15 - 30 ของปริมาณน้ำฝน ดังตารางที่ 4 ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Tanaka *et al.* (2001) ศึกษาปริมาณน้ำفيضของป่าดิบเขาบริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ประเทศไทยพบว่า มีปริมาณน้ำفيضร้อยละ 11.6 ของปริมาณน้ำฝน และปริมาณน้ำفيضมีความแปรผันสูงทั้งนี้บางครั้งปริมาณน้ำفيضที่ได้มีค่าติดลบ ซึ่งอาจจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ตรวจวัด หรือสภาพสิ่งแวดล้อมบริเวณที่ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด เช่น เกิดหยดหมอกขึ้นทำให้ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดมีค่าสูงกว่าน้ำฝนเหนือเรือนยอด แต่อย่างไรก็ตามอิทธิพลของหยดหมอกนั้นไม่พบบ่อยนัก

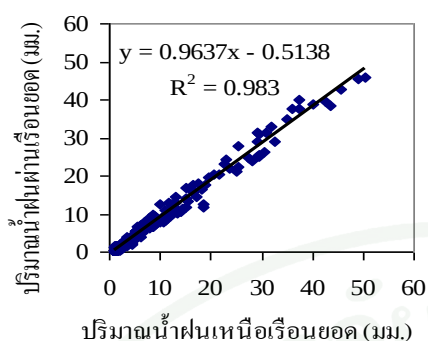
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดและน้ำฝนเหนือเรือนยอด ดังภาพที่ 7 ทำให้ประมาณค่าความสามารถในการรองรับของเรือนยอดจากสัดส่วนของค่าจุดตัดแกนกับความลาดชันของเส้นแนวโน้มได้ ซึ่งพบว่าเรือนยอดของป่าดิบเขามีค่าประมาณ 0.5332 และ 1.1039 มิลลิเมตร ในปี พ.ศ. 2551 และ 2552 ตามลำดับ นั่นหมายความว่าหากฝนที่ตกมีปริมาณน้อยกว่า 0.5332 – 1.1039 มิลลิเมตร น้ำฝนจะติดค้างบนชั้นเรือนยอดเป็นน้ำفيضทั้งหมด

ตารางที่ 3 สัดส่วนการกระจายของปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอด น้ำฝนผ่านเรือนยอด และน้ำฟุ้งยิดที่เกิดจากการตกของฝนแต่ละครั้ง บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 และ 2552

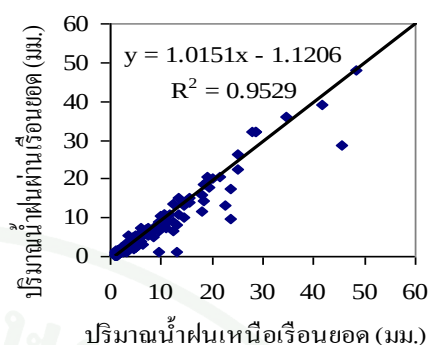
ปริมาณ (มม.)	ร้อยละของจำนวนครั้งทั้งหมด					
	พ. ศ. 2551			พ. ศ. 2552		
	น้ำฝนเหนือ เรือนยอด	น้ำฝนผ่าน เรือนยอด	น้ำฟุ้งยิด	น้ำฝนเหนือ เรือนยอด	น้ำฝนผ่าน เรือนยอด	น้ำฟุ้งยิด
≤ 5	47.14	48.10	99.05	55.83	57.06	94.48
>5 -10	20.95	20.00	0.95	16.56	20.86	2.38
> 10 - 20	17.62	15.24	0.00	17.79	13.50	1.43
> 20 - 30	7.62	7.62	0.00	5.52	3.07	0.00
> 30 - 40	4.29	5.24	0.00	0.61	3.07	0.00
> 40 - 50	1.90	1.43	0.00	1.84	0.61	0.00
>50	0.48	0.00	0.00	1.84	1.23	0.48

ตารางที่ 4 สัดส่วนการกระจายของปริมาณน้ำฟุ้งยิด หน่วยเป็นร้อยละของปริมาณน้ำฝนแต่ละครั้ง บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 และ พ.ศ. 2552

ปริมาณน้ำฟุ้งยิด (ร้อยละของฝนแต่ละครั้ง)	ร้อยละของจำนวนครั้งทั้งหมดที่ฝนตก	
	พ. ศ. 2551	พ. ศ. 2552
ไม่เกิดน้ำฟุ้งยิด	28.57	28.22
≤ 15	23.33	16.56
> 15 - 30	19.52	19.63
> 30 - 45	6.67	17.18
> 45 - 60	12.86	12.88
> 60 - 75	5.24	3.07
> 75 - 90	0.95	0.61
> 90	2.86	1.84



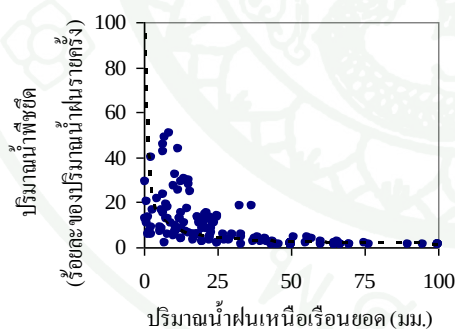
พ.ศ. 2551



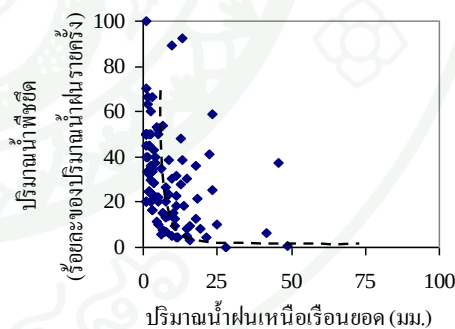
พ.ศ. 2552

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอดรายครั้งกับปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอด บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 และ 2552

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการตกของฝนรายครั้งกับค่าร้อยละของปริมาณน้ำพืชยึด ดังภาพที่ 8 พบว่า เมื่อการตกของฝนมีปริมาณน้อย น้ำพืชยึดมีสัดส่วนที่สูงมากและมีค่าต่ำเมื่อฝนที่ตกมีปริมาณมาก เนื่องจากแรงปะทะระหว่างเม็ดฝนกับเรือนยอดของต้นไม้ส่งผลต่อความสามารถในการเกาะยึดน้ำของเรือนยอดพืช แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการกระจายของจุดมีความผันแปรสูงมากจนทำให้เส้นแนวโน้มที่ได้จากวิธีวิเคราะห์ความถดถอยไม่นับย่สำคัญทางสถิติ



(ก) พ.ศ. 2551

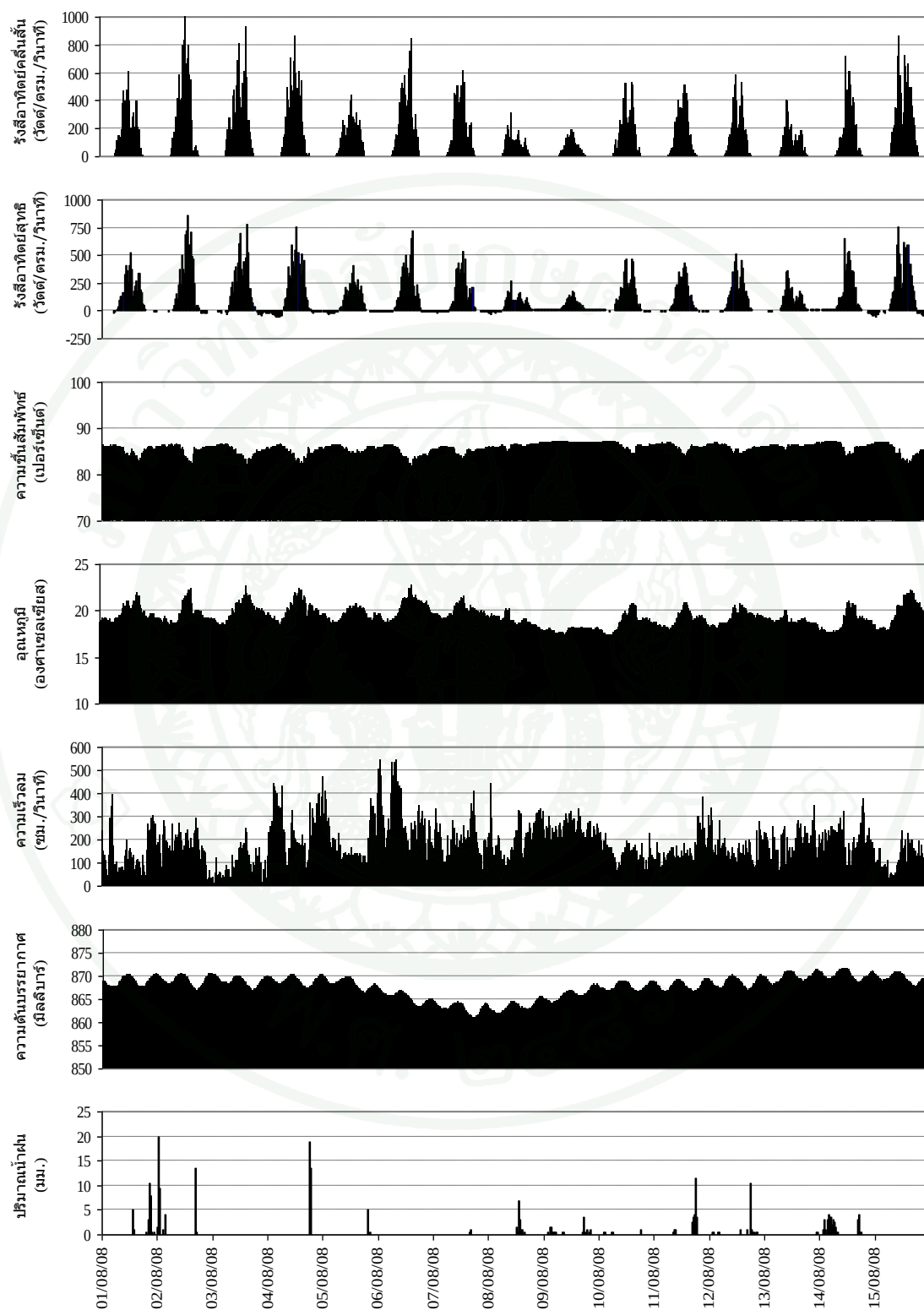


(ข) พ.ศ. 2552

ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนยอดรายครั้งกับร้อยละของปริมาณน้ำพืชยึด บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง 2552

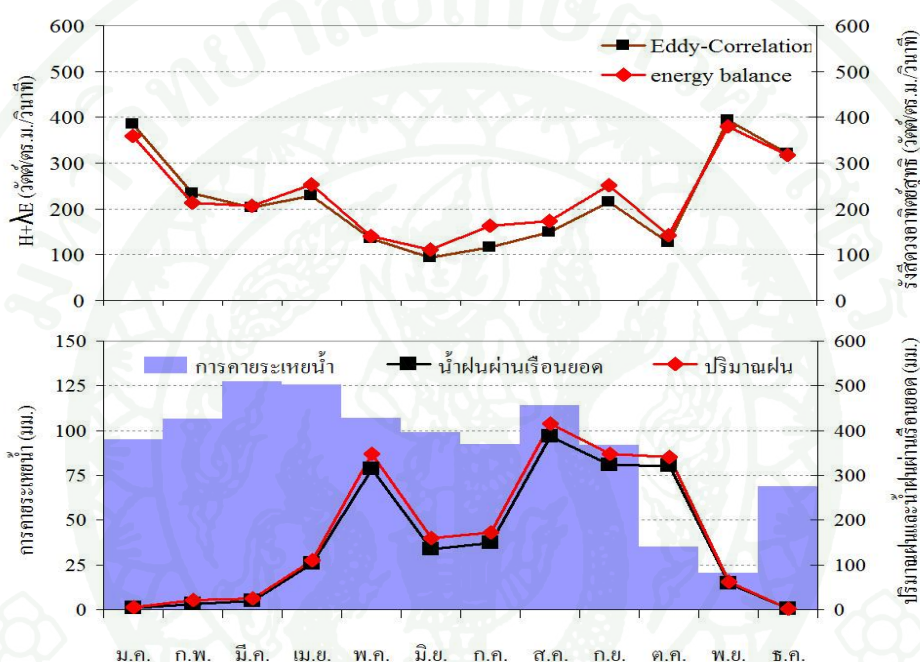
1.2 ความผันแปรของการคายระเหยน้ำ

ความผันแปรในรอบวัน (diurnal variation) ของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ได้จากการตรวจวัด มีลักษณะดังแสดงจากข้อมูลตัวอย่างในเดือนสิงหาคม ดังภาพที่ 9 ส่วนความผันแปรในรอบวันของการสูญเสียน้ำจากเรือนยอดของป่าดิบเขา ในรูปของค่าพลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ



ภาพที่ 9 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการคายระเหยน้ำจากการตรวจวัดบริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า
คอกปุ๋ย จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 1 สิงหาคม ถึงวันที่ 15 สิงหาคม ปีพ.ศ. 2551

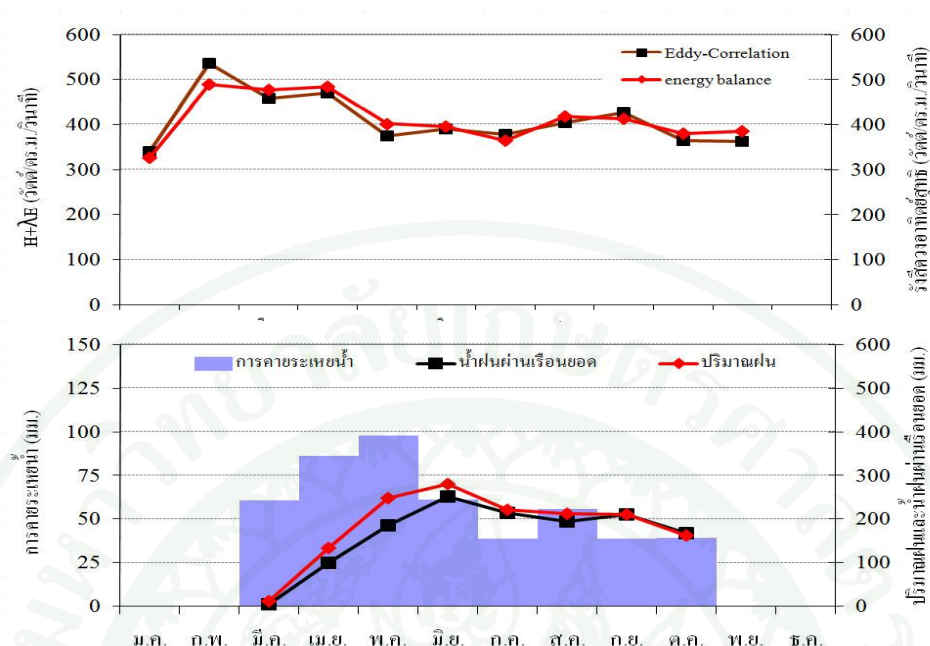
(latent heat of vaporization; λE) จากวิธี Eddy - Correlation ในปี พ. ศ. 2551 ดังภาพที่ 10 พบว่า ปริมาณการสูญเสียน้ำที่วัดได้มีค่ารายเดือนเฉลี่ยประมาณ 90.31 มิลลิเมตร หรือเฉลี่ยประมาณ 3.27 มิลลิเมตรต่อวัน โดยเดือนที่มีการคายระเหยน้ำสูง คือ เดือนมีนาคม เดือนเมษายน และเดือน สิงหาคม มีค่าเท่ากับ 127.51, 125.59 และ 114.06 มิลลิเมตร ตามลำดับ หรือเฉลี่ยเท่ากับ 4.11, 4.15 และ 3.68 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ



ภาพที่ 10 การคายระเหยน้ำจากการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ในปี พ.ศ. 2551 บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่

การคายระเหยน้ำในปี พ. ศ. 2552 ดังภาพที่ 11 (บางเดือนข้อมูลไม่สมบูรณ์เนื่องจากเกิดปัญหาเกี่ยวกับสภาพสิ่งแวดล้อมมีผลต่อเครื่องวัด จึงไม่สามารถตรวจวัดข้อมูลได้) ปริมาณการสูญเสียน้ำที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าปี พ. ศ. 2551 มาก โดยมีค่ารายเดือนเฉลี่ยประมาณ 59.78 มิลลิเมตร หรือประมาณ 1.97 มิลลิเมตรต่อวัน เนื่องจากปี พ.ศ. 2552 มีปริมาณฝนตกในช่วงเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคมปริมาณน้อยกว่าในปี พ.ศ. 2551 โดยเดือนที่มีการคายระเหยน้ำสูงสุด คือเดือน พฤษภาคม มีค่าเท่ากับ 97.85 มิลลิเมตร หรือมีค่าเท่ากับ 3.16 มิลลิเมตรต่อวัน

ผลการศึกษาข้างต้นในปี พ.ศ. 2551 และ พ. ศ. 2552 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาร่วมในพื้นที่เดียวกัน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของสามัคคีและคณะ (2524) ที่ศึกษาสมดุลของน้ำในพื้นที่ป่าดิบเขาธรรมชาติ ดอยปู่ย เชียงใหม่ พบว่าการคายระเหยน้ำรายเดือนมีค่าเท่ากับ



ภาพที่ 11 การคายระเหยน้ำจากการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ในปี พ.ศ. 2552 บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

86.40 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 2.80 มิลลิเมตรต่อวัน และยังพบว่า การคายระเหยน้ำในพื้นที่กลุ่มน้ำห้วยคอกม้ามียอดมากที่สุดในเดือนกันยายน ซึ่งเป็นเดือนที่ฝนตกมากที่สุด ผู้ศึกษาได้อธิบายว่า อาจเป็นไปได้ตามความคิดเห็นของ Penman (1967) ที่กล่าวว่า การคายระเหยน้ำจะเกิดขึ้นเสมอไม่มีการหยุดเมื่อมีน้ำให้ระเหยตลอดเวลา ซึ่งในช่วงฝนตกมากนั้น การคายระเหยมีน้ำให้ตลอดเวลา เป็นลักษณะการคายระเหยน้ำในรูปของการคายระเหยน้ำสูงสุด (potential evapotranspiration) อีกทั้งพื้นที่กลุ่มน้ำห้วยคอกม้ามียอดของฝนแต่ละครั้ง และปริมาณน้ำพืชยึดไว้ (intercepted water) ที่เอื้ออำนวยให้น้ำตลอดเวลา จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้น้ำระเหยได้มากด้วย นอกจากนี้ยังคล้อยกับการศึกษาของ Tanaka *et al.* (2002) ที่ได้ประมาณการคายระเหยน้ำของพืชในป่าดิบเขา บริเวณพื้นที่เดียวกันด้วยแบบจำลอง Multilayer พบว่า ค่าการคายระเหยน้ำรายวันอยู่ระหว่าง 0.80 - 2.50 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าการคายระเหยน้ำรายเดือนอยู่ระหว่าง 26.00 - 88.00 มิลลิเมตร โดยที่อัตราการคายระเหยน้ำจะมีค่าสูงในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน

2. แบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ

การจำลองแบบกระบวนการคายระเหยน้ำที่ได้จากการประยุกต์แบบจำลอง Penman - Monteith เพื่อประมาณค่าการคายน้ำของพืช และแบบจำลอง Rutter เพื่อประมาณค่าน้ำพืชยึด รวมทั้งประมาณค่า

การระเหยของน้ำพืชวัดด้วยแบบจำลอง Penman แล้วทำการปรับเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลอง โดยการปรับเทียบผลการจำลองแบบจากข้อมูลที่มีช่วงเวลา (time interval) แตกต่างกัน คือ 10 และ 30 นาที จากนั้นจึงทำการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองแบบโดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดใน พ.ศ. 2551 แล้วทำการทวนสอบความถูกต้องในการประมาณค่าของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลที่ได้อีกจากการตรวจวัดในปี พ.ศ. 2552 ได้ผลการศึกษาดังนี้

2.1 การปรับเทียบแบบจำลอง

แบบจำลองการคายระเหยน้ำที่ได้ปรับเทียบโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละเดือนของช่วงเวลา 10 นาที ได้ผลดังตารางที่ 5 และช่วงเวลา 30 นาที ได้ผลดังตารางที่ 6 ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ทำการปรับเทียบในแบบจำลอง Rutter ได้แก่ สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (Ds) สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) และสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) ส่วนแบบจำลอง Penman - Monteith ได้แก่ สัมประสิทธิ์สภาพนำของปากใบสูงสุด (C^*_{leaf}) และดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ค่าพารามิเตอร์จากการปรับเทียบ

1) สภาพนำน้ำของปากใบสูงสุด (C^*_{leaf})

สภาพนำน้ำของปากใบสูงสุด (C^*_{leaf}) ราย 10 นาที พบว่าค่า C^*_{leaf} ช่วงฤดูแล้งสูงกว่าช่วงฤดูฝน คือ ฤดูฝน (เดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายน) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4479 – 0.6747 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนฤดูแล้ง (เดือนตุลาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8023 – 1.1306 เซนติเมตรต่อวินาที เนื่องจากช่วงฤดูฝนในบรรยากาศมีความชื้นสูง ความดันไอน้ำในอากาศห่างจากความดันไอน้ำอิ่มตัวน้อย สภาพการนำน้ำของปากใบจึงมีค่าน้อย ทำให้เกิดการคายน้ำน้อย ในขณะที่ในช่วงฤดูแล้งความชื้นในบรรยากาศมีน้อย ส่งผลให้ค่าสภาพนำน้ำของปากใบพืชสูง การคายน้ำของพืชจะเพิ่มขึ้น

สภาพนำน้ำของปากใบสูงสุด (C^*_{leaf}) ราย 30 นาที พบว่า C^*_{leaf} ช่วงฤดูแล้งมีค่าสูงกว่าช่วงฤดูฝน คือ ฤดูฝน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3647 – 0.5106 เซนติเมตรต่อวินาที และฤดูแล้ง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4012 – 0.8023 เซนติเมตรต่อวินาที เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำในอากาศกับความดันไอน้ำอิ่มตัว ช่วงฤดูแล้งมีมากกว่าช่วงฤดูฝน

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ราย 10 นาที ในการเปรียบเทียบ
บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

เดือน	Cleaf*	LAI	Ds	b	S	การประมาณค่าการคายน้ำ				การประมาณค่าน้ำพืชยึด			
						RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R ² _{CF}	CF	RMSE	NSE	R ² _{CF}	CF
มกราคม	1.1306	3.8500	0.5150	0.1100	1.0200	4.1356	0.3684	0.3685	1.0042	0.1511	-0.0106	0.2682	0.6863
กุมภาพันธ์	0.9482	3.8500	0.5500	0.1900	1.4000	3.0595	0.5783	0.5785	1.0071	0.2596	-1.0644	0.0357	0.5649
มีนาคม	0.6747	4.1250	1.2500	0.2500	1.4000	4.0419	0.4030	0.4032	1.0076	0.5720	0.8831	0.8832	1.0095
เมษายน	0.5926	3.9750	1.0900	0.2150	1.2300	3.9228	0.5446	0.5446	1.0019	0.4689	0.9233	0.9260	1.0490
พฤษภาคม	0.6029	3.9750	1.0650	0.1450	1.2100	3.8052	0.4015	0.4018	1.0096	0.6475	0.8448	0.9136	0.9010
มิถุนายน	0.4920	4.0000	1.5600	0.2050	1.4000	2.9472	0.4639	0.3684	0.9277	0.6619	0.8982	0.9190	0.8821
กรกฎาคม	0.4479	3.8750	1.0900	0.1450	1.2500	2.6391	0.3708	0.3708	0.9958	0.9840	0.8814	0.8830	1.0389
สิงหาคม	0.5649	3.9750	1.2400	0.1750	1.3300	3.3467	0.2993	0.3004	1.0185	0.7037	0.8966	0.8966	0.9966
กันยายน	0.6473	4.0250	1.2800	0.2050	1.0000	3.9822	0.2924	0.2908	1.0046	0.8177	0.9025	0.9026	1.0085
ตุลาคม	0.8023	4.0000	0.9360	0.1750	1.3700	-	-	-	-	0.8266	0.8566	0.8585	1.0403
พฤศจิกายน	0.9118	4.0250	0.8400	0.1200	1.1000	3.4060	0.3401	0.3424	0.9774	0.5415	0.1205	0.5689	0.6552
ธันวาคม	0.9118	3.8500	0.5150	0.1100	1.0000	-	-	-	-	0.1479	-0.4398	0.2917	4.0000
เฉลี่ย	0.5746 ^{1/}	3.9929 ^{1/}	1.1889 ^{2/}	1.1894 ^{2/}	1.2738 ^{2/}	3.5264 ^{1/}	0.3965 ^{1/}	0.3829 ^{1/}	0.9951 ^{1/}	0.7103 ^{2/}	0.8858 ^{2/}	0.8978 ^{2/}	0.9907 ^{2/}

หมายเหตุ ^{1/} คือ ค่าเฉลี่ยของเดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายน และ ^{2/} คือค่าเฉลี่ยของเดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม (เนื่องจากเป็นเดือนที่มีข้อมูลครบทั้งเดือน)

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ราย 30 นาที ในการเปรียบเทียบ
บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่

เดือน	Clear* (cm/s)	LAI	Ds	b	S (mm)	การประมาณค่าการคายน้ำ				การประมาณค่าน้ำพืช			
						RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R ² _{CF}	CF	RMSE	NSE	R ² _{CF}	CF
มกราคม	0.8023	5.4000	1.0219	0.1563	0.8000	4.4094	0.2748	0.3932	1.2096	0.3590	0.1037	0.6354	0.5772
กุมภาพันธ์	0.6929	5.4000	1.0219	0.1563	0.8500	3.3731	0.4874	0.6266	1.2079	0.4323	0.3225	0.7146	0.6590
มีนาคม	0.5106	5.5000	1.2500	0.2250	0.8500	4.4070	0.3414	0.4737	1.2190	0.9125	0.9306	0.9065	0.9367
เมษายน	0.4376	5.5000	0.8750	0.2000	0.8250	4.3765	0.4332	0.6247	0.9541	1.0297	0.9045	0.9447	0.7327
พฤษภาคม	0.4376	5.5000	0.8250	0.1250	0.7250	3.8526	0.4136	0.4900	1.2119	1.5954	0.8297	0.7870	1.1211
มิถุนายน	0.3647	4.5000	0.6000	0.1250	0.5000	3.4523	0.2644	0.4622	1.3764	2.0241	0.7424	0.9299	1.7020
กรกฎาคม	0.4012	5.5000	0.6000	0.1250	0.5000	2.5740	0.3949	0.4695	1.1988	1.3185	0.9490	0.9378	1.0046
สิงหาคม	0.4012	4.8000	1.4500	0.1500	0.8000	3.4569	0.2679	0.4320	1.2860	1.8909	0.9336	0.8443	0.8670
กันยายน	0.3647	5.1000	1.1250	0.1750	0.8250	4.4816	0.1113	0.4775	1.1942	1.5780	0.8907	0.8948	0.9516
ตุลาคม	0.5835	5.5000	1.4500	0.1250	0.7000	-	-	-	-	1.3891	0.9313	0.8535	0.9985
พฤศจิกายน	0.4012	5.5000	1.0219	0.1563	0.7156	5.0523	-0.4520	-0.2369	1.3166	1.0250	0.0182	0.7109	0.6113
ธันวาคม	0.6200	5.5000	1.0219	0.1563	0.7156	-	-	-	-	0.2449	0.0854	-0.1000	3.0000
เฉลี่ย	0.4168 ^{1/}	5.2000 ^{1/}	1.0219 ^{2/}	0.1563 ^{2/}	0.7156 ^{2/}	3.8001 ^{1/}	0.3181 ^{1/}	0.4899 ^{1/}	1.2058 ^{1/}	1.4673 ^{2/}	0.8890 ^{2/}	0.8873 ^{2/}	1.0393 ^{2/}

หมายเหตุ ^{1/} คือ ค่าเฉลี่ยของเดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายน และ ^{2/} คือค่าเฉลี่ยของเดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม (เนื่องจากเป็นเดือนที่มีข้อมูลครบทั้งเดือน)

การศึกษาค้นคว้าพบว่าสภาพน้ำของปากใบสูงสุด (C^*_{leaf}) ราย 10 นาที และ ราย 30 นาที มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับ Dingman (2002) ที่ได้สรุปค่า C^*_{leaf} ของป่าสน ป่าไม้ใบกว้าง มีค่าเท่ากับ 0.53 เซนติเมตรต่อวินาที แต่ผลการศึกษาแตกต่างกับการศึกษาของประคำแก้ว (2550) ที่ได้หาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา ในพื้นที่เดียวกัน พบว่า C^*_{leaf} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.36 – 0.39 เซนติเมตรต่อวินาที เนื่องจากการศึกษาของประคำแก้ว (2550) เป็นการวัดค่าการชักนำปากใบพืชระดับใบ (leaf scale) โดยใช้เครื่องมือวัดแบบใบเดี่ยว ซึ่งเป็นการสุ่มตัวอย่างใบไม้ ค่าที่ได้จึงเป็นค่าการชักนำปากใบพืชเพียงค่าเดียว แต่ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลจากวิธี Eddy – Correlation เพื่อเปรียบเทียบหาค่า C^*_{leaf} ระดับเรือนยอด (canopy scale) จึงทำให้มีค่า C^*_{leaf} สูงกว่า

2) ดัชนีพื้นที่ผิวใบพืช (LAI)

ดัชนีพื้นที่ผิวใบพืช (LAI) ราย 10 นาที พบว่า LAI ของแต่ละเดือนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบพืชอยู่ระหว่าง 3.8500 – 4.1250 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.9929 เนื่องจากพื้นที่ป่าดิบเขามีโครงสร้างของเรือนยอดหนาแน่นตลอดทั้งปี รวมทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้าปกคลุมด้วยต้นไม้ขนาดใหญ่ที่เจริญเติบโตเต็มที่จำนวนมากทำให้สัดส่วนของพื้นที่ทั้งหมดของพื้นที่ผิวใบพืชเหนือพื้นดินต่อพื้นที่รับเงาของเรือนยอดมีการเปลี่ยนแปลงน้อยในรอบปี

ดัชนีพื้นที่ผิวใบพืช ราย 30 นาที พบว่า LAI ของแต่ละเดือนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบอยู่ระหว่าง 4.5000 – 5.5000 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.2000

การศึกษาค้นคว้าพบว่า ดัชนีพื้นที่ผิวใบ ราย 10 นาที มีค่าต่ำกว่า ราย 30 นาที แต่มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงแต่ละช่วงฤดูที่เหมือนกัน เนื่องจากการศึกษาพื้นที่เดียวกัน ช่วงเวลาเดียวกัน และ LAI เป็นตัวแปรไม่สามารถเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้นๆ ได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยาและโครงสร้างของพุ่มใบของพืช ซึ่งการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Tanaka *et al.* (2003) ที่ได้ศึกษาการคายน้ำสูงสุดของพืชในพื้นที่ป่าดิบเขาเดียวกันนี้ พบว่า LAI มีค่าระหว่าง 3.50 – 5.50 และยังสอดคล้องกับการศึกษาของสำโรง (2548) พบว่า ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่าเขตร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 - 4.00

3) อัตราการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (Ds)

อัตราการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (Ds) ราย 10 นาที ของเดือนต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกัน ยกเว้นเดือนมีนาคม เดือนมิถุนายน เดือนสิงหาคมและเดือนกันยายนที่มีค่า Ds สูงกว่า

เดือนอื่นๆ เนื่องจากเดือนมีนาคมอยู่ในช่วงฤดูแล้ง ส่วนเดือนมิถุนายน เดือนสิงหาคมและเดือนกันยายนเป็นช่วงฝน มีปริมาณฝนตกมากทำให้เรือนยอดชุ่มด้วยน้ำเป็นผลให้ความสามารถในการรองรับน้ำเพิ่มมีน้อยลง ดังนั้นเมื่อมีฝนตกอัตราการระบายน้ำเริ่มแรกจึงมาก ส่วนในช่วงฤดูแล้งไม่ค่อยมีการตกของฝนทำให้ไม่สามารถประเมินค่า D_s ได้ โดยมีอัตราการการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรกอยู่ระหว่าง 0.5150 – 1.5600 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.1889

อัตราการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก ราย 30 นาที ของเดือนต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกัน ยกเว้นเดือนมิถุนายน เดือนกรกฎาคม ที่มี D_s ต่ำกว่าเดือนอื่นๆ เนื่องจากเดือนมิถุนายน เดือนกรกฎาคมเป็นช่วงฝน โดยมีอัตราการการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรกอยู่ระหว่าง 0.6000 – 1.4500 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.0219

การศึกษาค้นคว้าพบว่าอัตราการการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก ราย 10 นาที และ 30 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการศึกษาแตกต่างจาก Makoto *et al.* (2003) ที่ศึกษาการคายระเหยน้ำของพื้นที่ป่าฝนเขตร้อนในคาบสมุทรประเทศมาเลเซีย โดยใช้แบบจำลอง Penman - Monteith-Rutter พบว่ามี D_s เท่ากับ 0.0014 มิลลิเมตรต่อนาที ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างและสรีระวิทยาของพืช

4) สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b)

สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) ทั้งราย 10 นาที และ 30 นาทีของเดือนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีการปกคลุมด้วยพืชชนิดเดียวกันประกอบด้วยโครงสร้างของชั้นเรือนยอดเดียวกัน ทำให้การระบายน้ำมีอัตราความเร็วเหมือนกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอดเฉลี่ย อยู่ระหว่าง 0.1100 – 0.2500 และ 0.1250 – 0.2250 ตามลำดับ และทั้งราย 10 นาที และ 30 นาที มีค่า b สูงในเดือนมีนาคมและเมษายน เนื่องจากเป็นช่วงแล้งฝนและต้นฝนตามลำดับ จึงอาจมีคุณลักษณะของโครงสร้างของเรือนยอดที่เบาบางลงเนื่องจากพืชมีใบร่วงหล่น ซึ่งมีค่าแตกต่างจากการศึกษาของจักรกริช (2550) ที่ศึกษากระบวนการน้ำพืชชนิดในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน บริเวณลุ่มน้ำแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ โดยแบบจำลอง Rutter พบว่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอดเฉลี่ยของพื้นที่สวนลิ้นจี่และพื้นที่ป่ารุ่นสอง อยู่ระหว่าง 0.84 – 1.42 และ 0.74 – 1.34 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของปัจจัยด้านพืชโดยเฉพาะสรีระวิทยาของพืชและความหนาแน่นของพืช ลักษณะการปกคลุมของเรือนยอด ซึ่งสวนลิ้นจี่มีใบเกลี้ยงและมีพืชชนิดเดียวจะทำให้มีการระบายน้ำจากเรือนยอดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ป่าดิบเขาที่มีความ

หนาแน่นของเรือนยอด และมี 4 ชั้นเรือนยอด ได้แก่ ไม้เรือนยอดเด่น ไม้เรือนยอดรอง ไม้พุ่ม และ ไม้พื้นล่าง การระบายน้ำจากเรือนยอดจึงเกิดขึ้นช้า

5) สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอดสูงสุด (maximum canopy capacity; S)

สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) จากการจำลองแบบราย 10 นาทีของแต่ละเดือน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0000 – 1.4000 มิลลิเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.2728 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากป่าดิบเขาจัดอยู่ในประเภทป่าไม้ไม่ผลัดใบ จึงมีการผันแปรของความหนาแน่นใบแตกต่างกันน้อยในแต่ละช่วงเวลา

สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) ราย 30 นาที พบว่าในแต่ละช่วงฤดูมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.5000 – 0.8500 มิลลิเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7156 มิลลิเมตร เนื่องจากการปกคลุมด้วยชั้นเรือนยอดเหมือนกัน และมีการผันแปรของความหนาแน่นใบแตกต่างกันน้อยในแต่ละช่วงเวลา

การศึกษาค้นคว้าพบว่าสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอดเฉลี่ยราย 10 นาที มีค่าสูงกว่าราย 30 นาที คือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.2738 และ 0.7156 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับภาพที่ 7 ที่ประมาณค่าความสามารถรองรับน้ำฝนของเรือนยอดจากสัดส่วนของค่าจุดตัดแกนกับความชันของเส้นแนวโน้ม พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.5332 – 1.1039 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับการเปรียบเทียบทั้ง 2 ช่วงเวลา อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้ยังมีค่าสอดคล้องกับกับ Rutter *et al.* (1975) ศึกษาเรือนยอดของต้นไม้ Hardwood Stands ในประเทศสหราชอาณาจักร อังกฤษ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 – 1.50 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้กว้างมากเนื่องจากได้ศึกษาในต้นฤดูใบไม้ผลิและกลางฤดูใบไม้ผลิ และยังมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Mathias *et al.* (2008) ที่ศึกษาการผันแปรตามฤดูกาลของการระเหยน้ำของน้ำพืชชนิดจากเรือนยอดในพื้นที่ป่าเบญจพรรณประเทศสหราชอาณาจักรอังกฤษ อยู่ระหว่าง 0.50 – 1.58 มิลลิเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.20 (± 0.31)

2.1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การศึกษาค้นคว้านี้ทำการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองของแต่ละเดือนด้วยค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) ซึ่งได้แบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 แบบจำลองย่อย คือ แบบจำลองน้ำพืชชนิด ตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ประมาณได้กับปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่คำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาณน้ำฝนเหนือเรือนและน้ำพืชชนิดดังสมการที่ 1

ส่วนแบบจำลองการคายน้ำตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับค่าจากการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy – Correlation ซึ่งได้ผลการศึกษาดังภาพที่ 12 ถึงภาพที่ 15

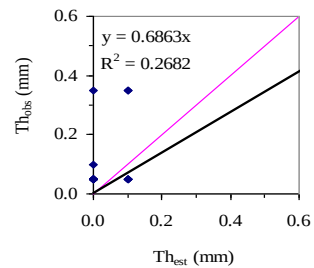
1) แบบจำลองน้ำพืชยึด

ค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบน้ำพืชยึดราย 10 นาที่ ดังตารางที่ 5 พบว่าค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) ที่ได้จากการประมาณค่าน้ำฝนผ่านเรือนยอดของเดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8448 – 0.9233 ส่วนเดือนมกราคม เดือนกุมภาพันธ์ และเดือนธันวาคม ค่า NSE ที่ประมาณได้มีค่าติดลบ และเดือนพฤศจิกายนมีค่า NSE เท่ากับ 0.1205 เนื่องจากเป็นช่วงฤดูแล้งที่ไม่มีการตกของฝนหรือมีฝนตกน้อยมาก จึงไม่สามารถประมาณน้ำพืชยึดได้

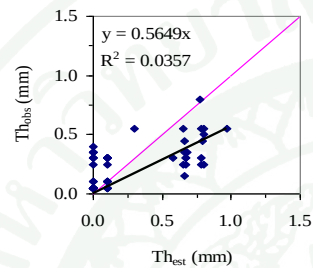
ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 (R^2_{CF}) ระหว่างน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการประมาณค่า (Th_{est}) กับน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด (Th_{obs}) ซึ่งเป็นค่าอธิบายว่า Th_{est} มีค่าใกล้เคียงค่า Th_{obs} มากหรือน้อย โดยที่ค่า Th_{est} มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุดจะเป็นค่าที่มีความถูกต้องสูง เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับค่า Th_{obs} มากที่สุด ซึ่งจากผลการศึกษครั้งนี้ ดังภาพที่ 12 พบว่าค่า R^2_{CF} ของเดือนเมษายนถึงเดือนพฤศจิกายนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5689 – 0.9260 แสดงว่าค่า Th_{est} มีค่าใกล้เคียงค่า Th_{obs} มากถึงร้อยละ 56 ถึงร้อยละ 93 ส่วนเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์มีค่า R^2_{CF} อยู่ระหว่าง 0.0036 - 0.2917 เนื่องจากเดือนดังกล่าวมีฝนตกปริมาณน้อยมาก จึงประมาณปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดได้น้อยมากหรือไม่ได้

ค่า correction factor (CF) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าค่าที่ประมาณได้สูงหรือต่ำกว่าค่าที่วัดจริง โดยค่าที่สูงกว่า 1 แสดงว่าค่าที่ประมาณได้ต่ำกว่าค่าที่วัดจริง และถ้ามีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าค่าที่ประมาณได้มีค่าสูงกว่าค่าที่วัดจริง ซึ่งจากการศึกษครั้งนี้ ดังตารางที่ 5 และภาพที่ 12 พบว่าค่า correction factor ของเดือนมีนาคม เดือนเมษายน เดือนกรกฎาคม เดือนกันยายน และเดือนตุลาคมมีค่าสูงกว่า 1 แสดงว่า Th_{est} มีค่าต่ำกว่า Th_{obs} ส่วนเดือนอื่นๆ พบว่าค่า correction factor มีค่าต่ำกว่า 1 แสดงว่า Th_{est} มีค่าสูงกว่า Th_{obs} โดยมี correction factor เฉลี่ยเท่ากับ 0.9907

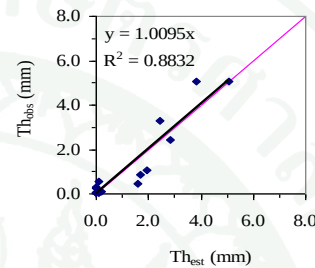
ค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบน้ำพืชยึดราย 30 นาที่ดังตารางที่ 6 พบว่าค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) ที่ได้จากการประมาณค่าน้ำฝนผ่านเรือนยอดของเดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7424 – 0.9490 และเดือนมกราคม เดือนกุมภาพันธ์ เดือนพฤศจิกายน และเดือนธันวาคม มีค่า NSE เท่ากับ 0.1037, 0.3225, 0.0182 และ 0.0854 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นช่วงฤดูแล้งที่ไม่มีการตกของฝนหรือมีฝนตกน้อยมาก



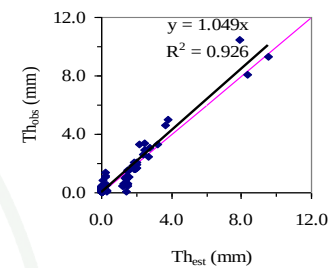
มกราคม



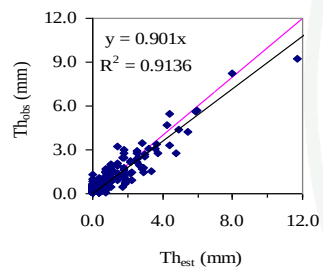
กุมภาพันธ์



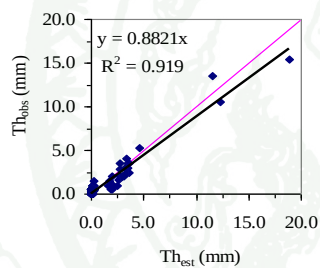
มีนาคม



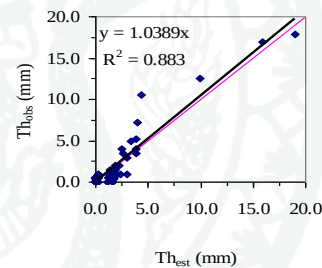
เมษายน



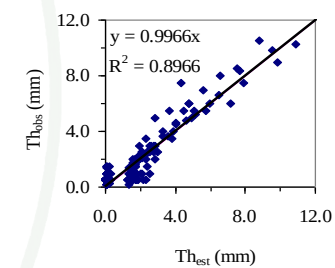
พฤษภาคม



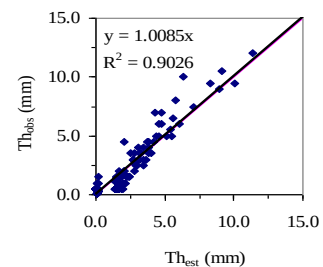
มิถุนายน



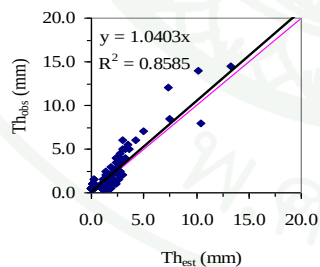
กรกฎาคม



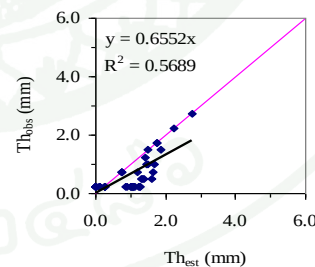
สิงหาคม



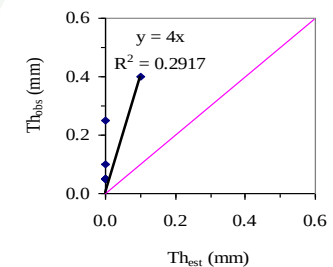
กันยายน



ตุลาคม



พฤศจิกายน



ธันวาคม

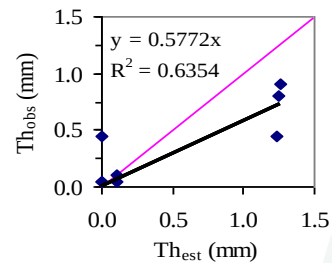
ภาพที่ 12 กราฟ 1:1 ระหว่างปริมาณน้ำพืชได้จากแบบจำลอง (Th_{est}) กับปริมาณน้ำพืชจากการตรวจวัด (Th_{obs}) รายเดือน โดยใช้ข้อมูลราย 10 นาที ปี พ.ศ. 2551

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 (R^2_{CF}) ระหว่างน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการประมาณค่า (Th_{est}) กับน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด (Th_{obs}) ดังตารางที่ 6 และภาพที่ 13 พบว่าค่า R^2_{CF} ของเดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6354 – 0.9447 แสดงว่าค่า Th_{est} มีค่าใกล้เคียงค่า Th_{obs} มาก คิดเป็นร้อยละ 63 ถึงร้อยละ 94 ส่วนเดือนธันวาคมมีค่าติดลบเท่ากับ - 0.1000 เนื่องจากเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์มีฝนตกปริมาณน้อย

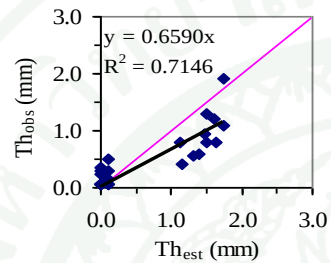
ส่วนค่า correction factor ของกราฟ 1:1 ระหว่างค่า Th_{est} กับ ค่า Th_{obs} ดังภาพที่ 13 พบว่าค่า correction factor ของเดือนมิถุนายนถึงเดือนกรกฎาคมมีค่า correction factor สูงกว่า 1 แสดงว่า Th_{est} มีค่าต่ำกว่า Th_{obs} ส่วนเดือนอื่นๆ มีค่า correction factor ต่ำกว่า 1 แสดงว่า Th_{est} มีค่าสูงกว่า Th_{obs} โดยมีค่า correction factor เฉลี่ยในช่วงฤดูฝน คือ เดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคมเท่ากับ 1.0393

การศึกษาครั้งนี้พบว่าการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (NSE) ของแบบจำลองน้ำพืชยี่ดราย 10 นาทีที่มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองใกล้เคียงกับราย 30 นาที คือมีค่าเท่ากับ 0.8858 และ 0.8890 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 (R^2_{CF}) พบว่ามีค่ามากกว่าร้อยละ 85 ทั้ง 2 ช่วงเวลา ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) พบว่าข้อมูลราย 10 นาที มีค่า RMSE ต่ำกว่า ราย 30 นาที มีค่าเท่ากับ 0.7103 และ 1.4763 ตามลำดับ แสดงว่าค่าน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ประมาณได้จากแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลราย 10 นาที มีความถูกต้องมากกว่าราย 30 นาที เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับน้ำฝนผ่านเรือนยอดที่ได้จากการตรวจวัดจริงมากกว่า ส่วนค่า correction factor พบว่าค่า correction factor เฉลี่ยของราย 10 นาทีมีค่าสูงกว่า 1 ส่วนราย 30 นาทีมีค่าต่ำกว่า 1 แสดงว่าค่าที่ประมาณจากแบบจำลองน้ำพืชยี่ดราย 10 นาที มีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดจริง ส่วนแบบจำลองน้ำพืชยี่ดราย 30 นาที มีค่าสูงกว่าค่าที่วัดจริง

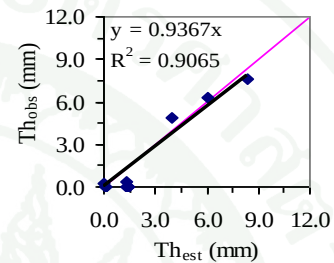
ผลการศึกษานี้มีค่า NSE ใกล้เคียงกับการศึกษาของจักรกริช (2550) ที่ศึกษากระบวนการน้ำพืชยี่ดในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินต่างกัน บริเวณลุ่มน้ำแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าในพื้นที่สวนลิ้นจี่ช่วงต้นฤดูฝน กลางฤดูฝน และปลายฤดูฝนมีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.90, 0.96 และ 0.95 ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ป่ารุ่นสองในช่วงต้นฤดูฝน กลางฤดูฝน และปลายฤดูฝน มีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.93, 0.84 และ 0.93 ตามลำดับ และ Moriasi *et al.* (2007) ได้สรุปแนวทางในการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองในระบบลุ่มน้ำ และจัดช่วงการให้คะแนนประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองทางสถิติโดยทั่วไปสำหรับรายเดือนที่มีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 0.00 ถึง 0.50 และมีค่าประสิทธิภาพการจำลองแบบของ Nash และ Sutcliffe ปี ค.ศ. 1970 (NSE) อยู่ระหว่าง 0.75 - 1.00 จัดว่าประสิทธิภาพของแบบจำลองอยู่ในระดับที่ดีมาก



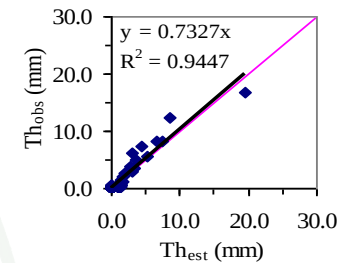
มกราคม



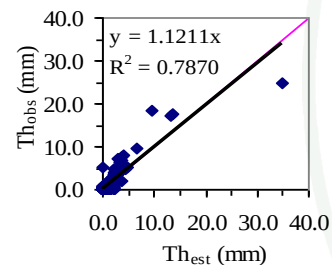
กุมภาพันธ์



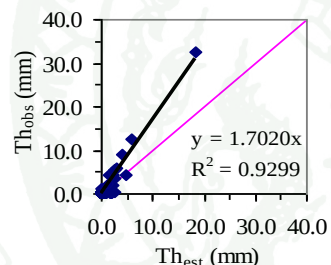
มีนาคม



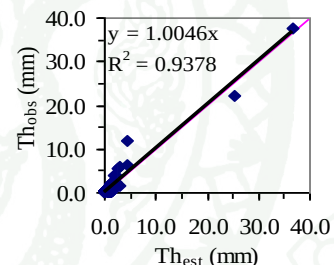
เมษายน



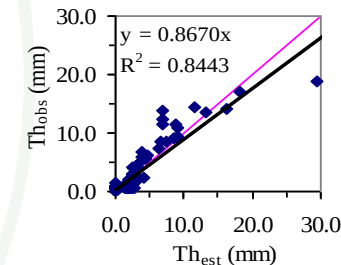
พฤษภาคม



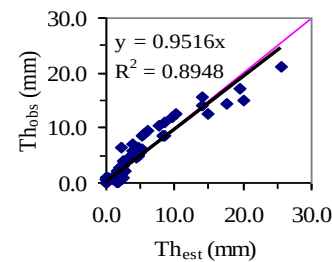
มิถุนายน



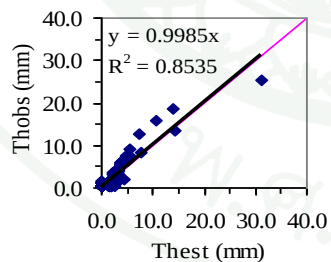
กรกฎาคม



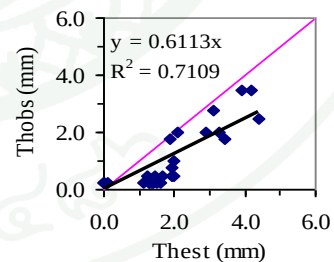
สิงหาคม



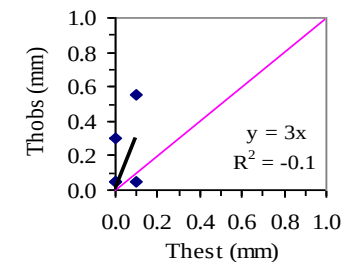
กันยายน



ตุลาคม



พฤศจิกายน



ธันวาคม

ภาพที่ 13 กราฟ 1:1 ระหว่างปริมาณน้ำพืชจากแบบจำลอง (Th_{est}) กับปริมาณน้ำพืชจากการตรวจวัด (Th_{obs}) รายเดือน โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที ปี พ.ศ. 2551

2) แบบจำลองการคายน้ำของพืช

ค่าประสิทธิภาพของการจำลองการคายน้ำของพืชราย 10 นาที ได้แสดงดังตารางที่ 5 พบว่า ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) ที่ได้จากการประมาณค่าการคายน้ำของพืชของเดือนต่างๆ มีค่า NSE ใกล้เคียงกันคือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2924 – 0.5783 ส่วนเดือนตุลาคมและธันวาคม มีค่า NSE ที่ประมาณได้มีค่าติดลบ เนื่องจากข้อมูลการคายระเหยน้ำในช่วงเดือนตุลาคมที่วัดด้วยวิธี Eddy – Correlation ที่มีความผันแปรสูงมาก ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (sum square error; SSE) มีค่าสูงกว่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยกำลังสองมาก (mean square error; MSE)

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 (R^2_{CF}) ระหว่างค่าการคายน้ำของพืชจากการประมาณค่า ($Tran_{(est)}$) กับการวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ($Tran_{(Eddy)}$) ดังภาพที่ 14 พบว่าค่า R^2_{CF} ของเดือนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2908 – 0.5785 แสดงว่าค่า $Tran_{(est)}$ มีค่าใกล้เคียงค่า $Tran_{(Eddy)}$ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 29 – 57

ส่วนค่า correction factor (CF) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าค่าที่ประมาณได้สูงหรือต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัด ดังภาพที่ 14 พบว่าค่า correction factor ของเดือนเดือนมิถุนายน เดือนกรกฎาคม และเดือนพฤศจิกายน มีค่าต่ำกว่า 1 แสดงว่า $Tran_{(est)}$ มีค่าสูงกว่า $Tran_{(Eddy)}$ ส่วนเดือนอื่นๆ พบว่าค่า correction factor มีค่าสูงกว่า 1 แสดงว่า $Tran_{(est)}$ มีค่าต่ำกว่า $Tran_{(Eddy)}$ โดยมี correction factor เฉลี่ยเท่ากับ 0.9951

ค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบการคายน้ำของพืชราย 30 นาที ได้แสดงดังตารางที่ 6 พบว่า ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) ที่ได้จากการประมาณค่าคายน้ำของพืชของเดือนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันคือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1113 – 0.4874

ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 (R^2_{CF}) ระหว่างค่าการคายน้ำของพืชจากการประมาณค่า ($Tran_{(est)}$) กับการคายน้ำของพืชจากวิธี Eddy – Correlation ($Tran_{(Eddy)}$) ดังภาพที่ 15 พบว่าค่า R^2_{CF} ของเดือนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3932 – 0.6266 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟเฉลี่ยตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายนเท่ากับ 0.4899 แสดงว่าค่า $Tran_{(est)}$ มีค่าใกล้เคียงค่า $Tran_{(Eddy)}$ ร้อยละ 38.00

ค่า correction factor (CF) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าค่าที่ประมาณได้สูงหรือต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัด ดังภาพที่ 15 พบว่าค่า correction factor ของเดือนต่างๆ ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่า 1

แสดงว่า $Tran_{(est)}$ มีค่าต่ำกว่า $Tran_{(Eddy)}$ ยกเว้นเดือนเมษายน มีค่า correction factor ต่ำกว่า 1 แสดงว่าค่า $Tran_{(est)}$ มีค่าต่ำกว่า $Tran_{(Eddy)}$ โดยมี correction factor เฉลี่ยเท่ากับ 1.2054

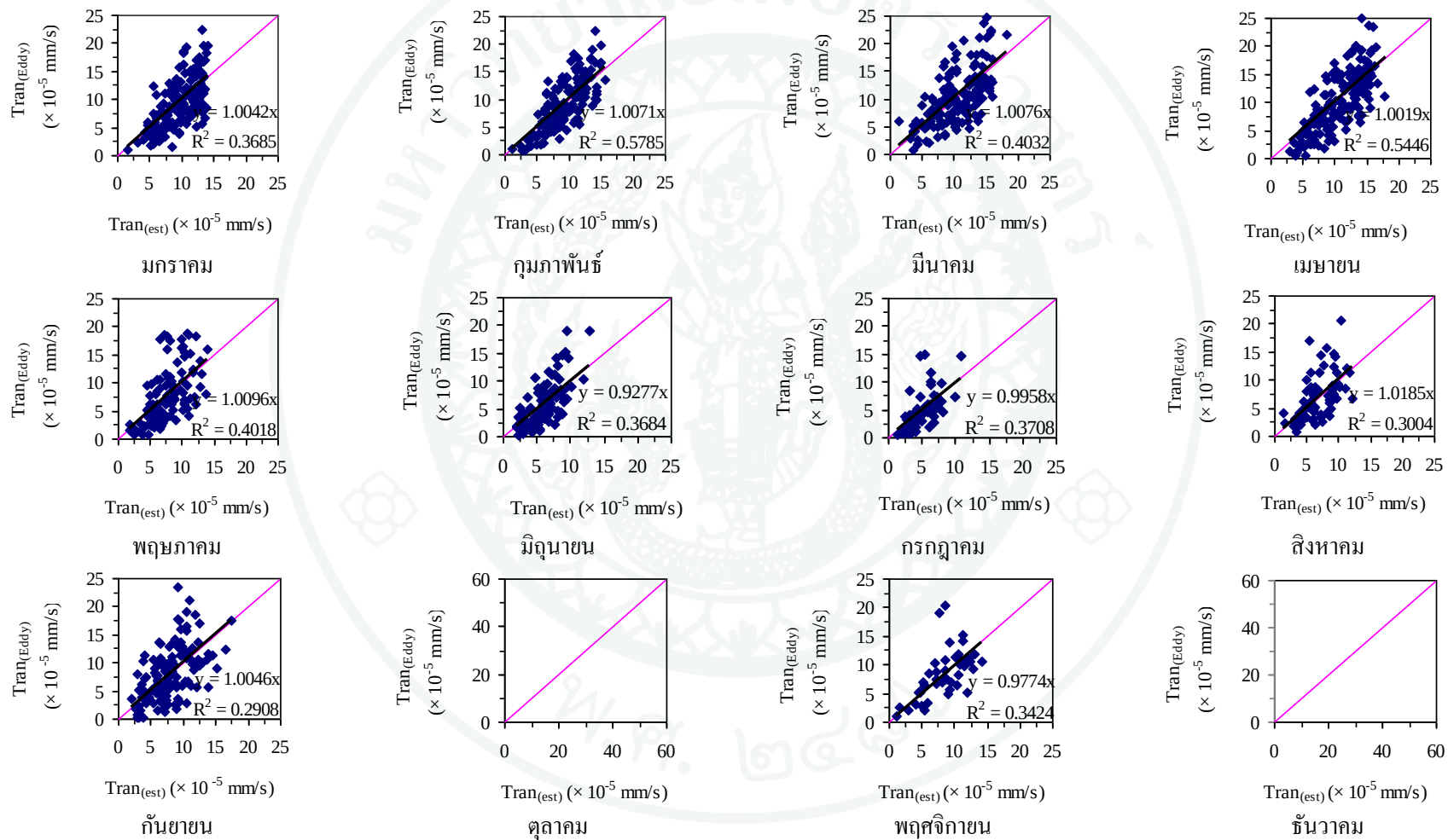
การศึกษารุ่นนี้พบว่า การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการคายน้ำของพืชราย 10 นาที มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองเฉลี่ยสูงกว่าราย 30 นาที คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3965 และ 0.3181 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 เฉลี่ยพบว่า ราย 10 นาที มีค่าต่ำกว่าราย 30 นาที คือ ร้อยละ 38.29 และ 48.99 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ของแต่ละเดือน พบว่า ราย 10 นาที และราย 30 นาที มีค่า RMSE เฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ มีค่าเท่ากับ 3.5264×10^{-5} และ 3.8001×10^{-5} ตามลำดับ ส่วนค่า correction factor พบว่าค่า correction factor ของราย 10 นาที มีค่าต่ำกว่า 1 คือ มีค่าเท่ากับ 0.9951 ส่วนราย 30 นาที มีค่าสูงกว่า 1 คือ มีค่าเท่ากับ 1.2058 ตามลำดับ

จากการพิจารณาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องในการจำลองแบบราย 10 นาที และราย 30 นาทีข้างต้น จึงสรุปได้ว่า แบบจำลองการคายน้ำของพืชราย 30 นาที มีความถูกต้องใกล้เคียงกับราย 10 นาที อีกทั้งผลการศึกษาราย 30 นาที มีค่า NSE ต่ำกว่าการศึกษาของประจำแก้ว (2550) ที่ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบ ในพื้นที่ศึกษาเดียวกับการศึกษารุ่นนี้ พบว่า NSE ของเดือนพฤศจิกายน เดือนธันวาคม และเดือนมกราคม มีค่าเท่ากับ 0.60, 0.62 และ 0.54 ตามลำดับ

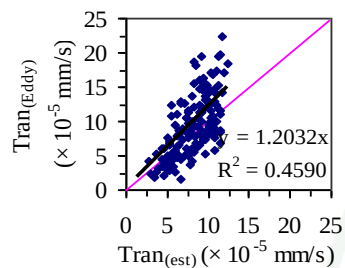
2.2 การทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การศึกษารุ่นนี้ได้ทำการทวนสอบความถูกต้องแบบจำลองของแต่ละเดือนด้วยค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) โดยใช้ข้อมูลจากตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ในปี พ.ศ. 2552 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ราย 10 นาที และ 30 นาที ที่ได้จากการเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ในปี พ.ศ. 2551 ผลแสดงในตารางผนวกที่ 4 และตารางผนวกที่ 5 ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองน้ำพืชราย 10 นาที และ 30 นาที มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 0.6001 และ 0.8148 หรือมีค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบลดลงจากการเปรียบเทียบด้วยข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ร้อยละ 32.25 และ ร้อยละ 10.42 ตามลำดับ

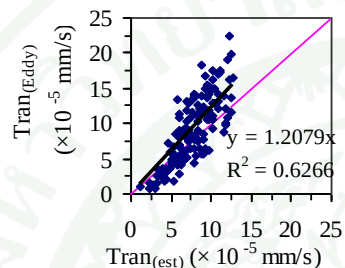
ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองคายน้ำของพืชราย 10 นาที และ 30 นาที พบว่า ประสิทธิภาพของแบบจำลองของเดือนต่างๆ มีค่าลดลง เนื่องจากข้อมูลในปี พ.ศ. 2552 มีปัจจัยด้านสภาพอากาศที่แตกต่างกับ พ.ศ. 2551 มาก เช่น ปริมาณน้ำฝน พลังงานแสงอาทิตย์คลื่นสั้น เป็นต้น



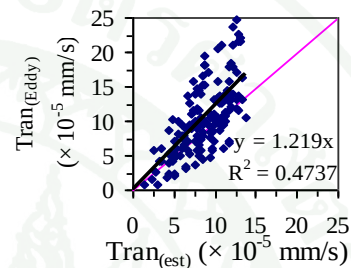
ภาพที่ 14 กราฟ 1:1 ระหว่างค่าการคายน้ำจากแบบจำลองกับการคายระเหยน้ำจากวิธี Eddy - Correlation รายเดือน โดยใช้ข้อมูลราย 10 นาที ในปี พ.ศ. 2551



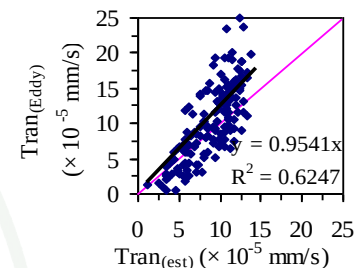
มกราคม



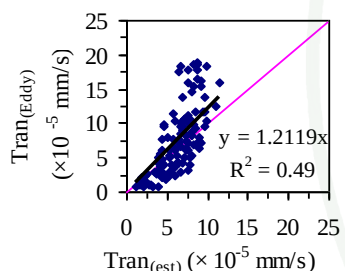
กุมภาพันธ์



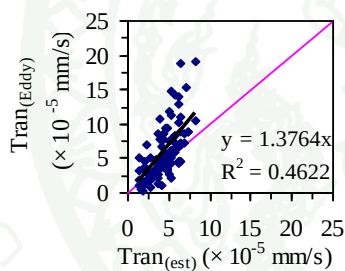
มีนาคม



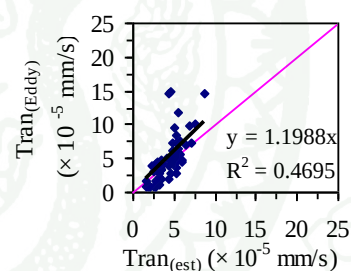
เมษายน



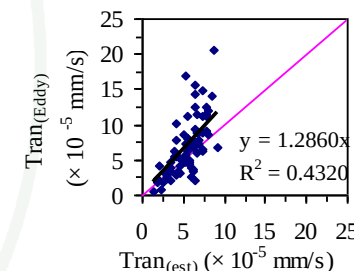
พฤษภาคม



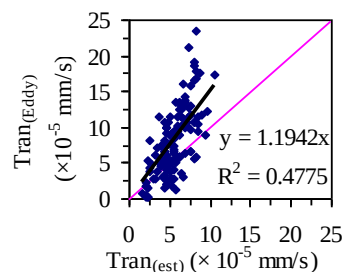
มิถุนายน



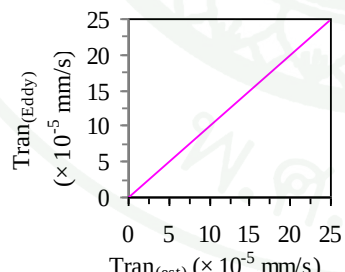
กรกฎาคม



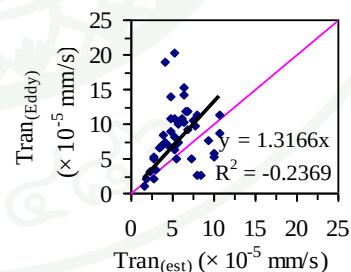
สิงหาคม



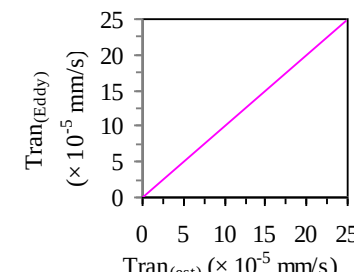
กันยายน



ตุลาคม



พฤศจิกายน



ธันวาคม

ภาพที่ 15 กราฟ 1:1 ระหว่างค่าการคายน้ำจากแบบจำลองกับการคายระเหยน้ำจากวิธี Eddy - Correlation รายเดือน โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที ในปี พ.ศ. 2551

(ผลการศึกษาข้อที่ 1) ด้วยความแตกต่างของปัจจัยสภาพอากาศนี้เป็นผลให้เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบจากปี พ.ศ. 2551 ไปใช้กับข้อมูลปี พ.ศ. 2552 ค่า RMSE และ MSE ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงมาก ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองจึงมีค่าติดลบ ดังนั้นจึงได้ทำการทวนสอบความถูกต้องของการจำลองแบบโดยใช้ข้อมูลในปี พ.ศ. 2551 ซึ่งเป็นปีเดียวกันการปรับเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลอง โดยนำค่าพารามิเตอร์ของเดือนที่มีลักษณะปัจจัยแวดล้อมใกล้เคียงกันมาทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เช่น พารามิเตอร์จากการปรับเทียบในเดือนมกราคมใช้ทวนสอบความถูกต้องด้วยข้อมูลเดือนกุมภาพันธ์ และพารามิเตอร์จากการปรับเทียบในเดือนกุมภาพันธ์ใช้ทวนสอบความถูกต้องด้วยข้อมูลเดือนมีนาคม เป็นต้น ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 7 และ 8 มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 แบบจำลองน้ำพีชชีด

1) ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองเมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบ (NSE) น้ำพีชชีดราย 10 นาที ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2551 ดังตารางที่ 7 พบว่า มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 0.7661 หรือมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 13.51 และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 (R^2_{CF}) พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.1674–0.9118 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 เฉลี่ยเท่ากับ 0.8343 หรือมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 7.08 ส่วนค่า correction factor มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.0212 แสดงว่าค่าที่ประมาณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัด

2) ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองเมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบ (NSE) น้ำพีชชีดราย 30 นาที ดังตารางที่ 8 พบว่ามีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 0.9141 หรือมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 2.82 และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 พบว่าเดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคมอยู่ระหว่าง 0.7870–0.9467 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 เฉลี่ยเท่ากับ 0.8883 หรือมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 0.11 ส่วนค่า correction factor มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.0853 แสดงว่าค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าที่ตรวจวัด

การศึกษารุ่นนี้เมื่อพิจารณาผลการทวนสอบแบบจำลองราย 10 นาทีและ 30 นาที พบว่าค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองลดลง โดยแบบจำลองราย 30 นาทีมีค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบ สูงกว่าราย 10 นาที ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 และค่า correction factor มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าที่ประมาณจากแบบจำลองน้ำพีชชีดทั้ง 2 ช่วงเวลามีค่าสูงกว่าที่ตรวจวัด

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ราย 10 นาทีและพารามิเตอร์ได้จากการปรับเทียบ ด้วยข้อมูลเดือนก่อนหน้าในปีเดียวกัน บริเวณป่าดิบเขาหล่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

เดือน	แบบจำลองการคายระเหยน้ำ				แบบจำลองน้ำพืชยึด			
	RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R_{CF}^2	CF	RMSE	NSE	R_{CF}^2	CF
มกราคม	-	-	-	-	-	-	-	-
กุมภาพันธ์	3.2399	0.5271	0.5729	0.9056	0.2449	-0.8381	0.1674	0.0584
มีนาคม	4.4650	0.2714	0.4052	0.8532	1.0997	0.5679	0.7195	1.5517
เมษายน	4.1448	0.4916	0.5424	0.8975	0.5405	0.8981	0.9118	0.9033
พฤษภาคม	3.8087	0.4004	0.4016	1.0218	1.1460	0.5138	0.7702	0.6749
มิถุนายน	3.1148	0.4012	0.3684	0.9277	0.9235	0.8018	0.8119	1.1081
กรกฎาคม	2.6915	0.3456	0.3727	0.9061	1.0780	0.8577	0.8638	0.9305
สิงหาคม	3.5611	0.2066	0.3208	1.2267	0.8265	0.8574	0.8696	1.1002
กันยายน	4.0787	0.2865	0.0287	1.1095	1.0080	0.8519	0.8652	1.1041
ตุลาคม	28.0232	-25.3390	-0.4987	0.0707	1.0226	0.7806	0.8620	0.7966
พฤศจิกายน	3.4804	0.3110	0.3262	1.0634	0.5367	0.1360	0.5757	0.6579
ธันวาคม	26.6077	-42.5944	0.3319	0.2070	0.1479	-0.4398	0.2917	4.0000
เฉลี่ย	3.6949 ^{1/}	0.3433 ^{1/}	0.3485 ^{1/}	0.9918 ^{1/}	0.9556 ^{2/}	0.7661 ^{2/}	0.8343 ^{2/}	1.0212 ^{2/}

หมายเหตุ ^{1/} คือ ค่าเฉลี่ยของเดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายน ^{2/} คือ ค่าเฉลี่ยของเดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ราย 30 นาทีและพารามิเตอร์ได้จากการปรับเทียบ ด้วยข้อมูลเดือนก่อนหน้าในปีเดียวกัน บริเวณป่าดิบเขาหล่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่

เดือน	แบบจำลองการคายระเหยน้ำ				แบบจำลองน้ำพืชยึด			
	RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R ² _{CF}	CF	RMSE	NSE	R ² _{CF}	CF
มกราคม	-	-	-	-	-	-	-	-
กุมภาพันธ์	3.0515	0.5805	0.6232	1.0955	0.3590	0.3225	0.7146	0.6590
มีนาคม	3.9243	0.4777	0.4778	1.0050	0.4323	0.8139	0.8101	1.3276
เมษายน	3.9591	0.5361	0.6247	0.9541	1.4944	0.9439	0.9447	0.7327
พฤษภาคม	3.9754	0.3756	0.4900	1.2710	0.7893	0.9464	0.7870	1.1211
มิถุนายน	2.9304	0.4700	0.4712	1.0224	0.8953	0.8654	0.9467	1.3692
กรกฎาคม	2.6998	0.3343	0.4699	1.2881	1.4631	0.9495	0.9384	0.9968
สิงหาคม	3.7477	0.1395	0.4338	1.4239	1.3120	0.9218	0.8572	1.1318
กันยายน	4.2949	0.1838	0.4783	1.4194	2.0519	0.9159	0.9163	1.0171
ตุลาคม	5.0038	0.2994	0.6745	1.6777	1.3847	0.9559	0.9062	0.9858
พฤศจิกายน	4.7168	-0.2656	-0.2631	1.0264	1.1131	0.1299	0.8268	0.6183
ธันวาคม	4.1566	-0.1740	0.4434	1.6948	0.9649	0.0854	-0.1000	3.0000
เฉลี่ย	3.6474 ^{1/}	0.3596 ^{1/}	0.4922 ^{1/}	1.1977 ^{1/}	1.2279 ^{2/}	0.9141 ^{2/}	0.8883 ^{2/}	1.0853 ^{2/}

หมายเหตุ ^{1/} คือ ค่าเฉลี่ยของเดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายน ^{2/} คือ ค่าเฉลี่ยของเดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม

2.2.2 แบบจำลองการคายน้ำของพืช

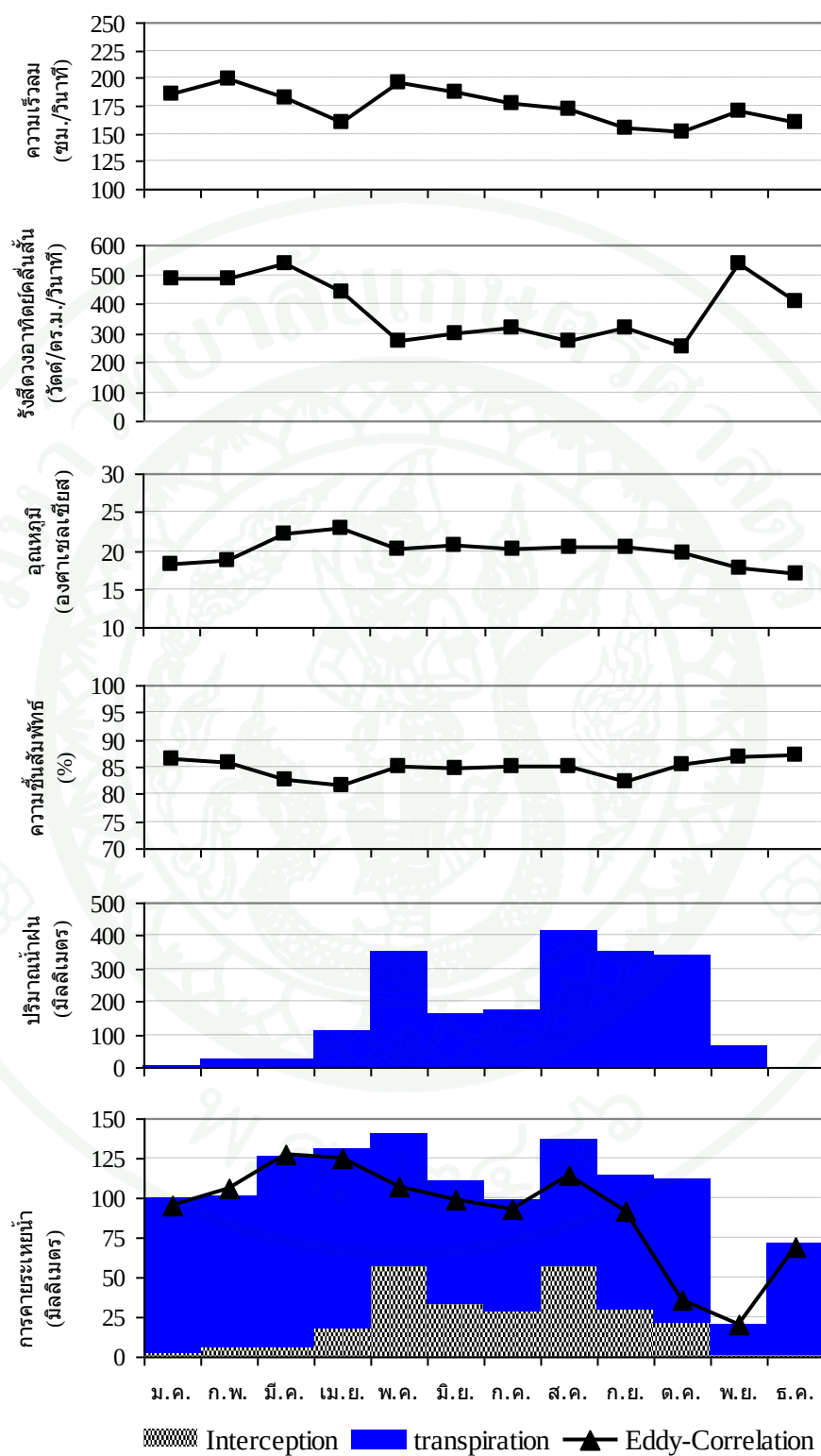
1) ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองเมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบการคายน้ำของพืชราย 10 นาฬิกา ดังตารางที่ 7 พบว่ามีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองของเดือนมีนาคมถึงกันยายน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2066 – 0.4916 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3433 และมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 เฉลี่ยเท่ากับ 0.3485 หรือมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 8.96 ส่วนค่า correction factor มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.9918

2) ผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองเมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบการคายน้ำของพืชราย 30 นาฬิกา ดังตารางที่ 8 พบว่ามีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองของเดือนมีนาคมถึงเดือนกันยายน มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1395 – 0.5361 หรือ มีค่า NSE เฉลี่ยตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม เท่ากับ 0.3596 หรือมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 13.05 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.4992 หรือมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 0.46 ส่วนค่า correction factor มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.1977 แสดงว่าค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าที่ตรวจวัด

การศึกษาค้นคว้าพบว่าผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองการคายน้ำของราย 10 นาฬิกา และ 30 นาฬิกา มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองลดลงเฉลี่ยร้อยละ 58.34 และ เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 13.05 ตามลำดับ โดยค่า NSE เฉลี่ยราย 30 นาฬิกา มีค่าสูงกว่าราย 10 นาฬิกา ประมาณร้อยละ 4.75 ส่วนค่า RMSE ราย 10 นาฬิกา และ 30 นาฬิกา มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันเล็กน้อย เท่ากับ 3.6949×10^{-5} และ 3.6474×10^{-5} ตามลำดับ ค่า R^2_{CF} เฉลี่ยเท่ากับ 0.3485 และ 0.4922 ตามลำดับ ส่วนค่า correction factor ราย 30 นาฬิกามีค่าสูงกว่า 1 ส่วนราย 10 นาฬิกามีค่าต่ำกว่า 1 แสดงว่าการปรับเทียบแบบจำลองราย 30 นาฬิกาที่มีความถูกต้องมากกว่าราย 10 นาฬิกา ทั้งนี้เนื่องจากการประมาณค่าช่วงเวลาในการนำเข้าสู่ข้อมูลราย 30 นาฬิกา มีค่า NSE สูงกว่า และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริงมากกว่าราย 10 นาฬิกา เพราะช่วงเวลาที่นำเข้าสู่ข้อมูลที่กว้างขึ้นทำให้จำนวนข้อมูลน้อยลง ความแปรปรวนของข้อมูลจึงน้อยลง และทำให้มีค่า RMSE ลดลงด้วย

2.3 การประมาณค่าการคายระเหยน้ำ พ.ศ. 2551 ราย 10 นาฬิกาและ 30 นาฬิกา

2.3.1 การประมาณค่าการคายระเหยน้ำปี พ.ศ. 2551 ราย 10 นาฬิกาของแต่ละเดือน ดังภาพที่ 16 และตารางผนวกที่ 6 พบว่า ปริมาณการคายระเหยน้ำในปี พ.ศ. 2551 ช่วงฤดูฝน ได้แก่ เดือนเมษายนถึงเดือนตุลาคม มีค่าการคายระเหยน้ำสูง 2 ช่วง คือ เดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม เท่ากับ 131.17 และ 140.05 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 4.37 และ 4.52 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ และ



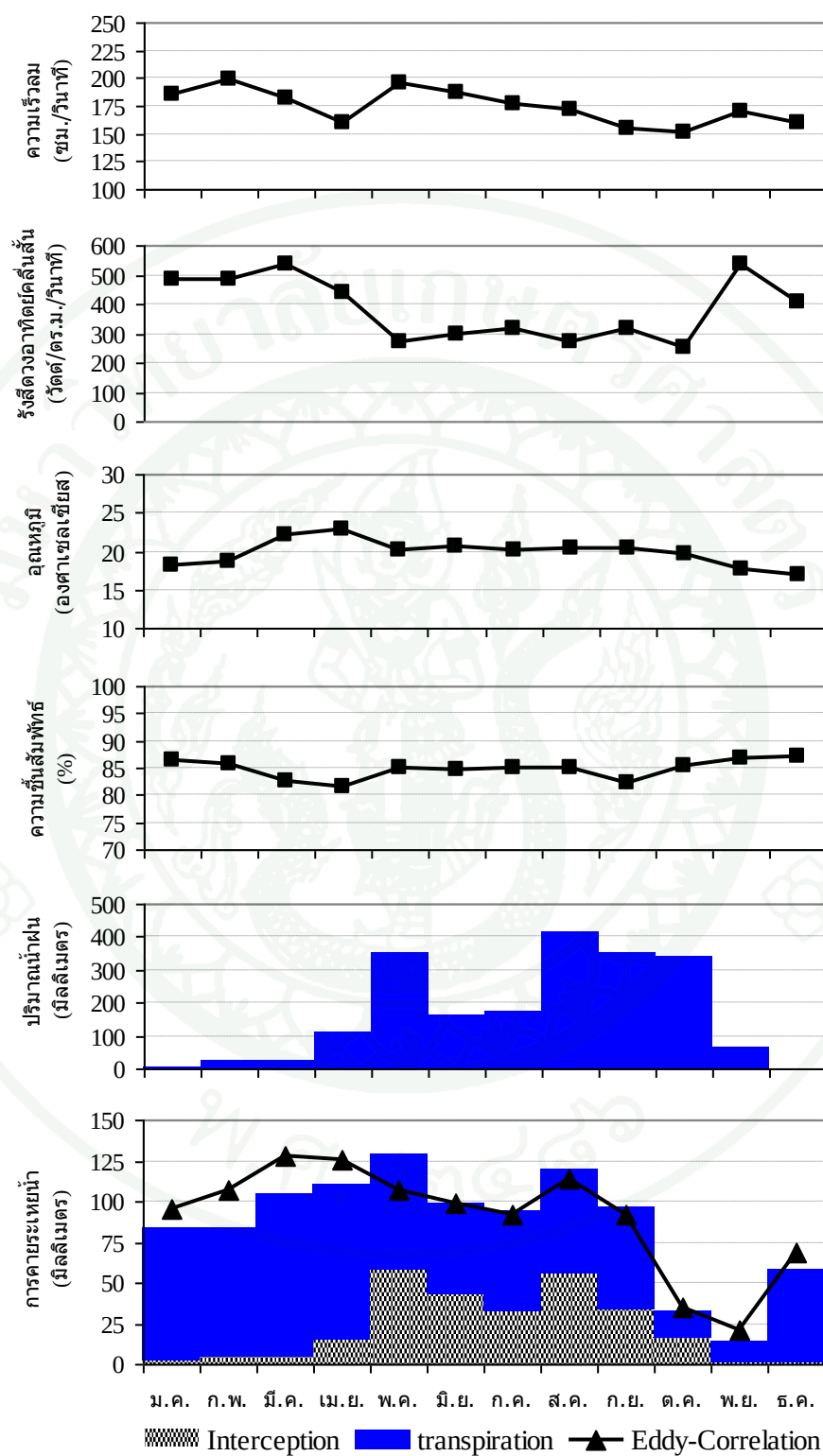
ภาพที่ 16 การประมาณค่าการคายระเหยน้ำด้วยแบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter ราย 10 นาทีของแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2551

เดือนสิงหาคม มีค่าเท่ากับ 136.41 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 4.40 มิลลิเมตรต่อวัน ดังตารางผนวกที่ 1 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเดือนเมษายน มีอุณหภูมิสูง และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และรังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นสูง ดังตารางผนวกที่ 6 ส่งผลให้มีความแตกต่างของความดันไอน้ำอิ่มตัวกับค่าความดันไอน้ำในบรรยากาศ (vapor pressure deficit; VPD) มีค่ามาก ทำให้การระเหยน้ำและการคายน้ำของพืชเกิดขึ้นสูง ส่วนเดือนพฤษภาคมเป็นเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนมาก มีความเร็วลมสูง ลมอาจส่งผลให้น้ำที่ค้างบนเรือนยอดพืชระเหยกลายเป็นไอน้ำหลุดลอยในบรรยากาศ และพัดพาไปยังบริเวณอื่นได้สูงขึ้น ก่อให้เกิดความแตกต่างของ VPD สูงขึ้น ทำให้ระเหยน้ำได้เพิ่มขึ้นอีก ส่วนเดือนสิงหาคมและเดือนกันยายน มีปริมาณฝนตกมากที่สุด ทำให้มีน้ำเอื้ออำนวยต่อการคายระเหยน้ำตลอดเวลา การคายระเหยน้ำที่เกิดขึ้นจึงมาจากการระเหยน้ำรวมกับการคายน้ำของพืช จึงมีค่าการคายระเหยน้ำสูง

ช่วงฤดูแล้ง ได้แก่ เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม พบว่าการคายระเหยน้ำที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการคายน้ำของพืช การคายระเหยน้ำสูงในเดือนมีนาคม มีค่าเท่ากับ 126.57 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 4.08 มิลลิเมตรต่อวัน เนื่องจากเดือนมีนาคม มีอุณหภูมิสูง ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ มีปริมาณฝนตกน้อยและมีรังสีอาทิตย์คลื่นสั้นสูง ซึ่งเป็นปัจจัยที่เหมาะสมต่อการคายน้ำของพืช ส่วนเดือนที่มีการคายระเหยน้ำต่ำสุด คือ เดือนพฤศจิกายน มีค่าเท่ากับ 19.73 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 2.82 มิลลิเมตรต่อวัน เนื่องจากเป็นช่วงต้นฤดูแล้ง มีการทิ้งช่วงของฝนไม่นาน มีความชื้นสัมพัทธ์สูง อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีค่าการคายน้ำต่ำ แม้จะมีรังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นสูงก็ตาม เพราะมีค่า VPD น้อยในบรรยากาศจึงสามารถรับไอน้ำเพิ่มขึ้นได้น้อย

2.3.2 การคายระเหยน้ำจากแบบจำลองปี พ.ศ. 2551 ราย 30 นาทีของแต่ละเดือน ภาพที่ 17 และตารางผนวกที่ 6 พบว่า ปริมาณการคายระเหยน้ำในปี พ.ศ. 2551 ช่วงฤดูฝน ได้แก่ เดือนเมษายนถึงเดือนตุลาคม มีค่าการคายระเหยน้ำสูง 2 ช่วง คือ เดือนพฤษภาคม มีค่าเท่ากับ 128.99 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 4.16 มิลลิเมตรต่อวัน และเดือนสิงหาคม มีค่าเท่ากับ 119.45 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 3.85 มิลลิเมตรต่อวัน ดังตารางผนวกที่ 3 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเดือนพฤษภาคมเป็นเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนมาก มีความเร็วลมสูง ลมอาจส่งผลให้น้ำที่ค้างบนเรือนยอดพืชระเหยกลายเป็นไอน้ำหลุดลอยในบรรยากาศ และพัดพาไปยังบริเวณอื่นได้สูงขึ้น ก่อให้เกิดความแตกต่างของ VPD สูงขึ้น ทำให้ระเหยน้ำได้เพิ่มขึ้นอีก ส่วนเดือนสิงหาคม มีปริมาณฝนตกมากที่สุด การคายระเหยน้ำที่เกิดขึ้นจึงมาจากการระเหยน้ำรวมกับการคายน้ำของพืช จึงมีค่าการคายระเหยน้ำสูง

ช่วงฤดูแล้ง ได้แก่ เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม พบว่า การคายระเหยน้ำส่วนใหญ่เกิดจากการคายน้ำของพืช ปริมาณการคายระเหยน้ำสูงในเดือนมีนาคม มีค่าเท่ากับ 104.88



ภาพที่ 17 การประมาณค่าการคายระเหยน้ำด้วยแบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter ราย 30 นาทีของแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2551

มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 3.38 มิลลิเมตรต่อวัน เนื่องจากเดือนมีนาคม มีความเร็วลม รังสีอาทิตย์คลื่นสั้น สูง และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ซึ่งเป็นปัจจัยที่เหมาะสมต่อการคายน้ำของพืช ส่วนเดือนที่มีการคายระเหยน้ำต่ำสุด คือ เดือนพฤศจิกายน มีค่าเท่ากับ 13.43 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นช่วงต้นฤดูแล้ง มีการทิ้งช่วงของฝนไม่นาน มีความชื้นสัมพัทธ์สูง อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีค่าการคายน้ำต่ำ แม้จะมีรังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นสูงก็ตาม เพราะมีค่า VPD น้อย บรรยากาศจึงสามารถรับไอน้ำเพิ่มขึ้นได้น้อย

จากผลการศึกษาค่าการคายระเหยน้ำรายเดือนโดยใช้ข้อมูลราย 10 นาที และราย 30 นาที ข้างต้น มาเปรียบเทียบกับค่าการคายระเหยน้ำอื่นๆ ในพื้นที่เดียวกัน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของของสามัคคีและคณะ (2524) ซึ่งได้ศึกษาสมดุลของน้ำในพื้นที่ป่าดิบเขาธรรมชาติ ดอยปู่ เชียงใหม่ พบว่า การคายระเหยน้ำเฉลี่ย 1,036.60 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีค่าอยู่ระหว่าง 21.70 – 145.30 มิลลิเมตรต่อเดือน โดยเฉลี่ยรายเดือนเท่ากับ 86.40 มิลลิเมตรหรือเท่ากับ 2.80 มิลลิเมตรต่อวัน และยังพบว่าค่าการคายระเหยน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้ามีมากที่สุดในเดือนกันยายน มีค่าเท่ากับ 145.30 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 4.84 มิลลิเมตรต่อวัน ซึ่งเป็นเดือนที่ฝนตกมากที่สุด ซึ่งผู้ศึกษาได้อธิบายว่า อาจเป็นไปได้ตามความคิดเห็นของ Penman (1967) ที่กล่าวว่า การคายระเหยน้ำจะเกิดขึ้นเสมอไม่มีการหยุดเมื่อมีน้ำให้ระเหยตลอดเวลา ในช่วงฝนตกมากนั้น การคายระเหยมีน้ำให้ตลอดเวลา เป็นลักษณะการคายระเหยน้ำในรูปของการคายระเหยน้ำสูงสุด (potential evapotranspiration) และในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้ามีช่วงของฝนแต่ละครั้ง รวมทั้งปริมาณน้ำพืชยึดไว้ (intercepted water) ที่เอื้ออำนวยให้มีน้ำตลอดเวลา จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้น้ำระเหยได้มากด้วย

Tanaka *et al.* (2008) ได้ทบทวนการประมาณค่าการคายระเหยน้ำจากป่าเขตร้อนในประเทศไทยและภูมิภาคอื่นที่อยู่ติด พบว่า ค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาระหว่างปี 1998 - 1999 มี ค่าเท่ากับ 2.00 – 3.00 มิลลิเมตรต่อวันในช่วงฤดูฝน มีค่าเท่ากับ 1.00 – 2.00 มิลลิเมตรต่อวัน ช่วงต้นฤดูแล้ง และค่าเท่ากับ 3.00 – 4.00 มิลลิเมตรต่อวันในฤดูแล้ง และค่าการคายระเหยน้ำเท่ากับ 812.00 มิลลิเมตรต่อปี และ Tanaka *et al.* (2008) ยังอ้างถึง Chunkao *et al.* (1981) มีค่าเท่ากับ 734.00 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนค่าการคายระเหยน้ำของป่าฝนในภูมิภาคอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 3.90 มิลลิเมตรต่อวัน (Bruijnzeel, 1990) 3.00 มิลลิเมตรต่อวัน (Takanashi *et al.*, 2005) และ 4.20 มิลลิเมตรต่อวัน (Kummagai *et al.*, 2004)

3. การประยุกต์แบบจำลองประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำ

การศึกษผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำการโดยดำเนินการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการคายระเหยน้ำ กรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้

ประโยชน์ที่ดินจากป่าเป็นพืชตระกูลถั่วได้แก่ ความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (maximum leaf conductance; C^*_{leaf}) ความสูงของต้นพืช (Z_{veg}) ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index; LAI) สมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (D_s) และสัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที ในปี พ.ศ. 2551 เนื่องจากผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในข้อที่ 2.2 ข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการจำลองแบบการคายระเหยน้ำโดยใช้ข้อมูลราย 30 นาทีมีความถูกต้องมากกว่าราย 10 นาที ดังนั้นในการประยุกต์ใช้แบบจำลองนี้จึงใช้ข้อมูลราย 30 นาที ซึ่งได้ผลการศึกษาดังนี้

3.1 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำ กรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากป่าดิบเขาเป็นสวนถั่ว ในปี พ.ศ. 2551 (เดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม) ดังภาพที่ 18 (ก) ภาพที่ 19 และตารางผนวกที่ 8 มีรายละเอียดดังนี้

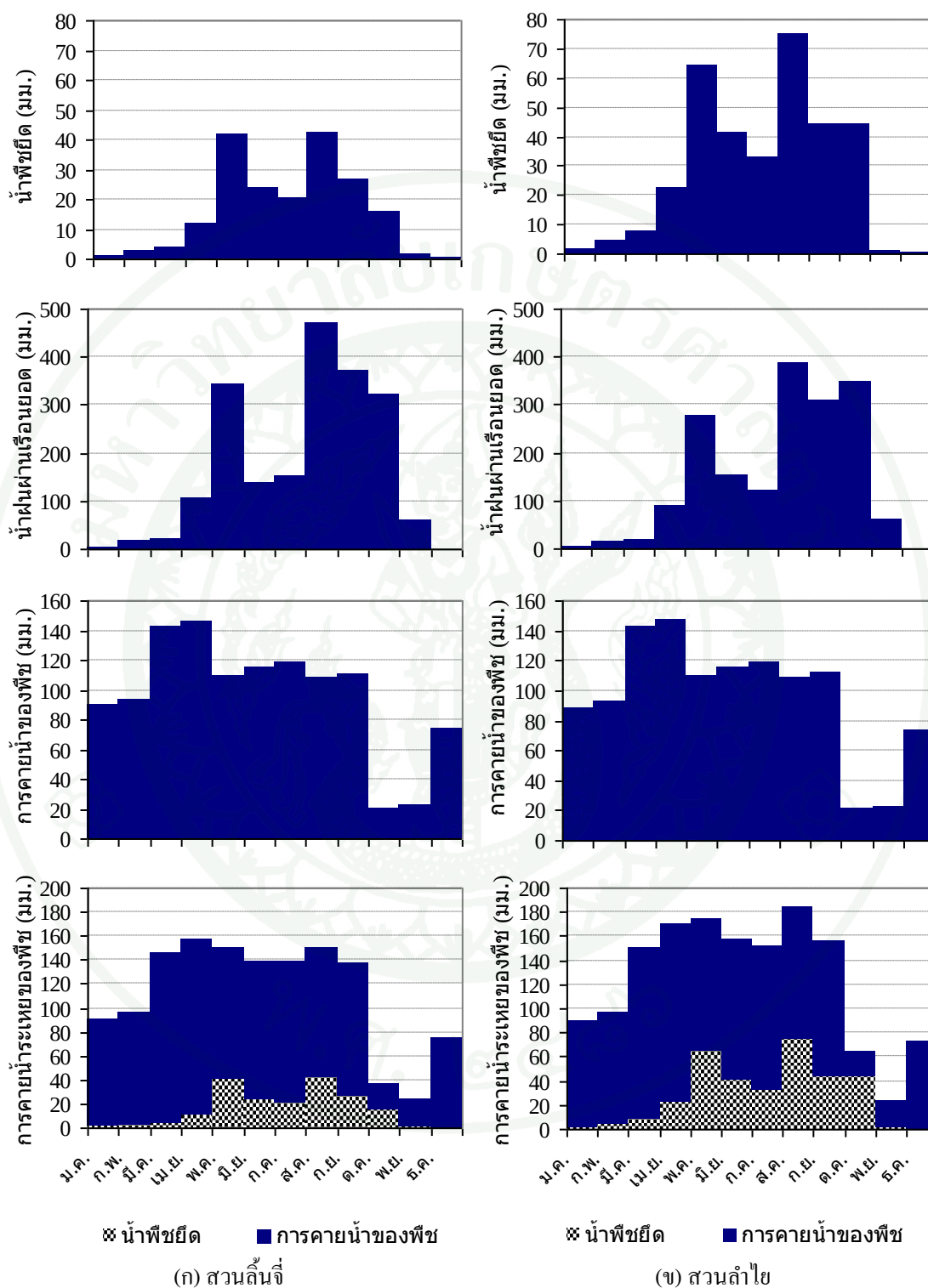
ปริมาณน้ำพืชขีด พบว่า มีปริมาณน้ำพืชขีดมีค่าลดลงจากป่าดิบเขาที่มีผลรวมประมาณ 259 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 32 มิลลิเมตรต่อเดือน เหลือเพียง 186.85 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 23 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังภาพที่ 18 (ก) โดยรวมปริมาณน้ำพืชขีดลดลงร้อยละ 27.83 ดังภาพที่ 20 (ก)

ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอด พบว่า น้ำฝนผ่านเรือนยอดทุกเดือนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สรุปโดยรวมคือจากเดิมประมาณ 1,731 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 216 มิลลิเมตรต่อเดือน เพิ่มขึ้นเป็น 1,926 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 240 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังภาพที่ 18 (ก) ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดโดยรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.26 ดังภาพที่ 20 (ข)

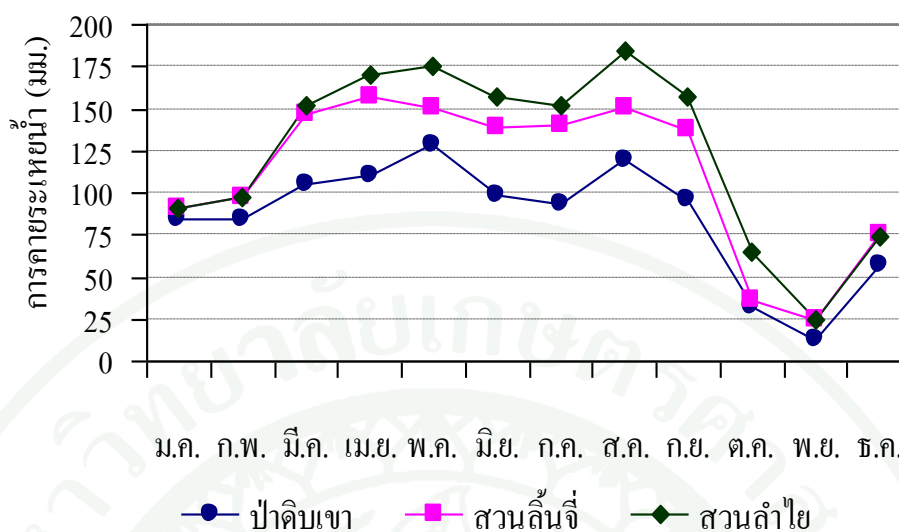
การคายน้ำของพืช พบว่า ปริมาณการคายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นมากจากเดิมประมาณ 526 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 66 มิลลิเมตรต่อเดือน เพิ่มขึ้นเป็น 872 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 109 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังภาพที่ 18 (ก) การคายน้ำของพืชโดยรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 65.72 ดังภาพที่ 20 (ค)

การคายระเหยน้ำ พบว่า โดยรวมแล้วการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากป่าดิบเขาเป็นสวนถั่วส่งผลให้การคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้น จากเดิมประมาณ 785 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 98 มิลลิเมตรต่อเดือน เพิ่มขึ้นเป็น 1,059 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 132 มิลลิเมตรต่อเดือนดังภาพที่ 19 (ก) โดยรวมแล้วการคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.87 ดังภาพที่ 18 (ก) และภาพที่ 20 (ง)

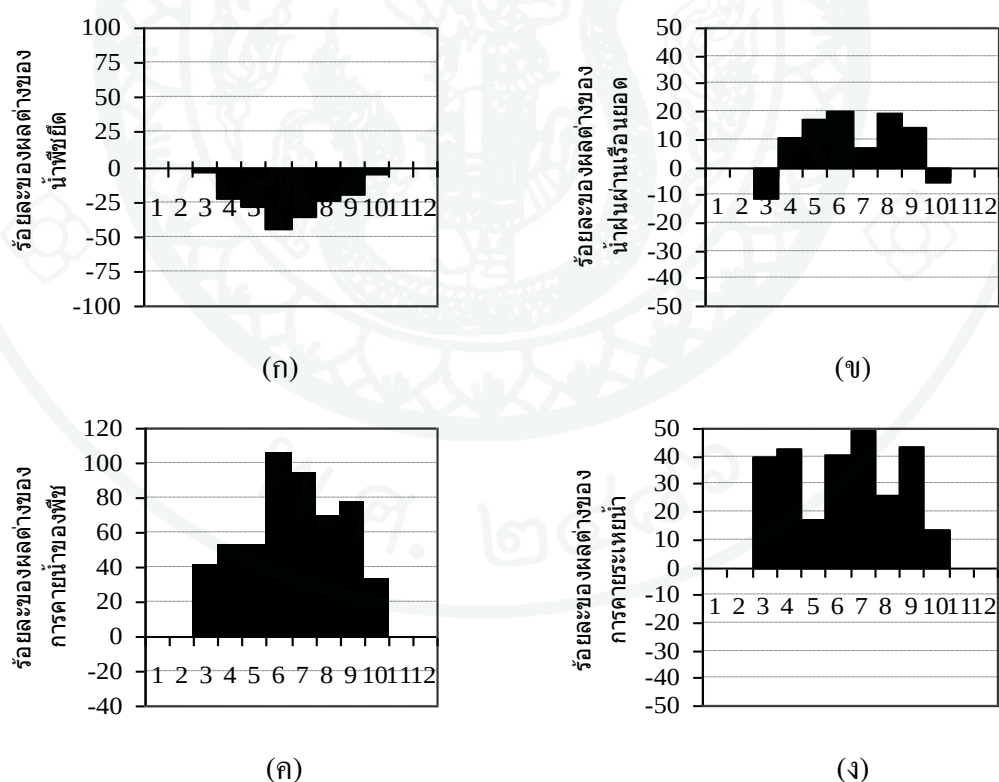
การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีผลต่อการคายระเหยน้ำ กรณีการเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ดิบเขาเป็นพื้นที่สวนถั่วในปี พ.ศ. 2551 เป็นผลให้ค่าปริมาณน้ำพืชขีดลดลง



ภาพที่ 18 การคายระเหยน้ำ กรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากป่าดิบเขาเป็นพืชลิ้นจี่และลำไย บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยขลุ่ย จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2551



ภาพที่ 19 การคายระเหยน้ำจากพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทป่าดิบเขา ลันจี่และลำไย บริเวณป่าดิบเขา คุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยบูน จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2551



ภาพที่ 20 ร้อยละของผลต่างระหว่างค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขากับสวนลันจี่ในปี พ.ศ. 2551

ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดเพิ่มขึ้น และการคายน้ำของพืชเพิ่มขึ้น และการคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากสวนลันจี่ มีค่าความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (C^*_{leaf}) เพิ่มขึ้น จากเดิมประมาณ

0.156 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เพิ่มขึ้นเป็น 0.56 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที จึงทำให้ค่าการคายน้ำเพิ่มขึ้น แต่ค่า น้ำพืชยืดลดลงเนื่องจากค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (LAI) ลดลง จากประมาณ 5.20 ลดลงเป็น 3.50 ส่วนปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การตกของฝนอิสระ (p) เพิ่มขึ้น จากเดิมประมาณ 0.2 เพิ่มขึ้นเป็น 0.68 รวมทั้งมีค่าอัตราการระเหยน้ำเริ่มแรก (D_s) ลดลงอีกด้วย ค่าปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจึงเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีน้ำลงสู่ผิวดินมากขึ้น พืชจึงมีการคายน้ำมากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาผลรวมแล้วจึงทำให้ค่าการคายระเหยน้ำในสวนล้นจี่เพิ่มขึ้น

3.2 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำ กรณีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินจากป่าดิบเขาเป็นสวนลำไย ในปี พ.ศ. 2551 (เดือนมีนาคมถึงเดือนตุลาคม) ดังภาพที่ 18 (ข) ภาพที่ 19 และตารางผนวกที่ 9 มีรายละเอียดดังนี้

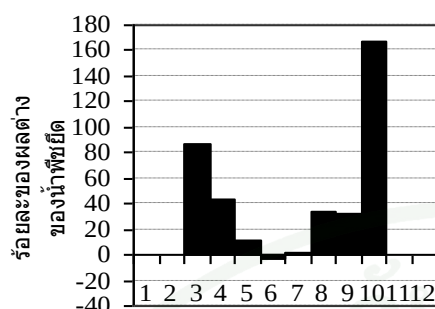
ปริมาณน้ำพืชยืด พบว่า มีปริมาณน้ำพืชยืดมีค่าเพิ่มขึ้นจากป่าดิบเขาที่มีผลรวมประมาณ 258 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 32 มิลลิเมตรต่อเดือน เพิ่มขึ้นเป็น 332 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 42 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังภาพที่ 18 (ข) โดยรวมปริมาณน้ำพืชยืดเพิ่มขึ้นร้อยละ 28.40 ดังภาพที่ 21 (ก)

ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอด พบว่า น้ำฝนผ่านเรือนยอดทุกเดือนมีค่าลดลงเล็กน้อย สรุปโดยรวมคือจากเดิมประมาณ 1,731 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 216 มิลลิเมตรต่อเดือน เพิ่มขึ้นเป็น 1,699 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 212 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังภาพที่ 18 (ข) ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดโดยรวมลดลงร้อยละ 1.88 ดังภาพที่ 21 (ข)

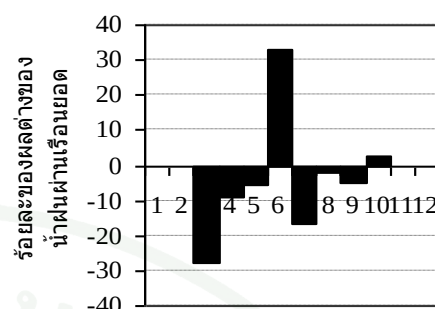
การคายน้ำของพืช พบว่า ปริมาณการคายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นมาก จากเดิมประมาณ 526 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 66 มิลลิเมตรต่อเดือน เพิ่มขึ้นเป็น 880 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 110 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังภาพที่ 18 (ข) การคายน้ำของพืชโดยรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 67.19 ดังภาพที่ 21 (ค)

การคายระเหยน้ำ พบว่า โดยรวมแล้วการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินจากป่าดิบเขาเป็นสวนล้นจี่ส่งผลให้การคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้น จากเดิมประมาณ 785 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 98 มิลลิเมตรต่อเดือน เพิ่มขึ้นเป็น 1,212 มิลลิเมตรต่อปี หรือประมาณ 151 มิลลิเมตรต่อเดือน ดังภาพที่ 18 (ข) โดยรวมแล้วการคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 54.40 ดังภาพที่ 21 (ง)

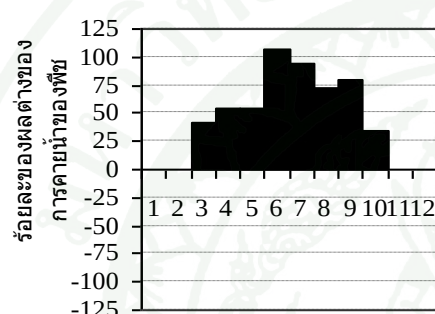
การเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ดิบเขาเป็นพื้นที่สวนลำไยในปี พ.ศ. 2551 ดังภาพที่ 19 เป็นผลให้ค่าปริมาณน้ำพืชยืดเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดลดลง และการคายน้ำของพืชเพิ่มขึ้น



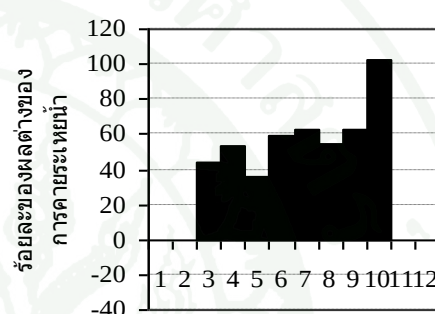
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 21 ร้อยละของผลต่างระหว่างค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขากับสวนลำไยในปี พ.ศ. 2551

และการคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสวนลำไยมีค่าความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (C^*_{leaf}) เพิ่มขึ้น จากเดิมประมาณ 0.1560 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที เพิ่มขึ้นเป็น 0.5600 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที จึงทำให้ค่าการคายน้ำเพิ่มขึ้น และค่าการคายน้ำเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำผ่านเรือนยอดมีค่าลดลง เป็นผลให้มิน้ำลงสู่ผิวดินลดลง เนื่องจากมีค่าอัตราการระเหยน้ำเริ่มแรก (Ds) ลดลงจากเดิม 1.0219 เหลือเพียง 0.2900 มิลลิเมตร

อย่างไรก็ตามผลการประมาณค่าการคายระเหยน้ำด้วยแบบจำลองเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแต่ละประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน กรณีศึกษาการใช้ประโยชน์ที่ดินของสวนลำไยโดยภาพรวมพบว่าการคายระเหยน้ำลดลงจากป่าดิบเขา ส่วนสวนลำไย พบว่าการคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้นจากป่าดิบเขา ซึ่งเป็นเพียงค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง ณ เวลาที่ศึกษาเท่านั้น ไม่ได้รวมถึงผลกระทบในระยะยาวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน เช่น ระยะเวลาการไหลของน้ำ สมรรถนะการกักเก็บน้ำของพื้นที่ การปลดปล่อยน้ำสู่พื้นที่ตอนล่าง เป็นต้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1) ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกระบวนการคายระเหยน้ำราย 10 นาที พบว่าค่าความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (C^*_{leaf}) อยู่ระหว่าง 0.4479 – 1.1306 เซนติเมตรต่อวินาที ดัชนีพื้นผิวใบพืช (LAI) อยู่ระหว่าง 3.8500 – 4.0250 การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (Ds) อยู่ระหว่าง 0.5150 – 1.5600 สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) อยู่ระหว่าง 0.1100 – 0.2500 และสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) อยู่ระหว่าง 1.0000 – 1.4000 ส่วนผลการเปรียบเทียบแบบจำลองกระบวนการคายระเหยน้ำราย 30 นาที มีค่าความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (C^*_{leaf}) อยู่ระหว่าง 0.3647 – 0.8023 เซนติเมตรต่อวินาที ค่าดัชนีพื้นผิวใบพืช (LAI) อยู่ระหว่าง 4.5000 – 5.5000 การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (Ds) อยู่ระหว่าง 0.6000 – 1.2500 สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) อยู่ระหว่าง 0.1250 – 1.1563 และสมรรถนะการกักเก็บน้ำของเรือนยอด (S) อยู่ระหว่าง 0.5000 – 0.8500

2) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (NSE) ของแบบจำลองน้ำพืชราย 10 นาที มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองใกล้เคียงกับราย 30 นาที คือ 0.8858 และ 0.8890 ตามลำดับ ส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการคายน้ำของพืช พบว่าราย 10 นาที มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองเฉลี่ยต่ำกว่าราย 30 นาที คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3965 และ 0.8140 ตามลำดับ

3) ผลการทวนสอบแบบจำลองกระบวนการน้ำพืชราย 10 นาทีและ 30 นาที พบว่า ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองลดลง โดยการจำลองแบบราย 10 นาทีมีค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบต่ำกว่าราย 30 นาที โดยมีอยู่ระหว่าง 0.5138 – 0.8981 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7661 และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8139 – 0.9559 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.9141 ตามลำดับ ส่วนผลการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองการคายน้ำของราย 10 นาที และ 30 นาที พบว่าแบบจำลองราย 10 นาทีมีความถูกต้องต่ำกว่าราย 30 นาที โดยมีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบอยู่ระหว่าง 0.2066 – 0.4916 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3433 และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1395 – 0.5361 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3181 ตามลำดับ

4) การคายระเหยน้ำที่ประมาณได้จากแบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter จากข้อมูลปี พ.ศ. 2551 ราย 10 นาที ในปี พ.ศ. 2551 มีค่าเท่ากับ 1,261.97 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีค่าเฉลี่ยรายวันอยู่ระหว่าง 2.82 – 4.52 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วนข้อมูลราย 30 นาทีมีค่าเท่ากับ 1,024.39 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีค่าเฉลี่ยรายวันอยู่ระหว่าง 1.86 – 4.63 มิลลิเมตรต่อวัน

5) ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน กรณีการเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ดิบเขาเป็นสวนลื่นจีและสวนลำไยที่มีผลต่อการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2551 พบว่า สวนลื่นจีค่าปริมาณน้ำพืชลดลง ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดเพิ่มขึ้น ส่วนสวนลำไยน้ำพืชเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดลดลง ส่วนการคายน้ำของพืชและการคายระเหยน้ำเพิ่มขึ้นทั้ง 2 กรณี โดยสรุปการคายระเหยน้ำของสวนลื่นจีมีค่าเท่ากับ 1,059.10 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีค่าเท่ากับ 132.39 มิลลิเมตรต่อเดือน หรือเท่ากับ 4.84 มิลลิเมตรต่อวัน โดยมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 34.87 ส่วนสวนลำไยมีปริมาณการคายระเหยน้ำเท่ากับ 1,212.43 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีค่าเท่ากับ 151.55 มิลลิเมตรต่อเดือน หรือเท่ากับ 3.15 มิลลิเมตรต่อวัน โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 54.40

ข้อเสนอแนะ

1) การปรับเทียบแบบจำลองในการศึกษาครั้งต่อไป ควรเปรียบเทียบด้วยวิธีสมดุลน้ำ หรือถ้าวัดการระเหยน้ำ เนื่องจากมีความผันแปรของข้อมูลน้อยกว่าวิธี Eddy - Correlation และการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy - Correlation ที่มีข้อจำกัดการตรวจวัดข้อมูลในช่วงที่มีฝน และในสภาพอากาศที่มีการปกคลุมของเมฆหมอก

2) การเก็บข้อมูลน้ำฝนผ่านเรือนยอดควรทำการดาวน์โหลดข้อมูลจากเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (data logger) ทุกๆ เดือน และทำการตรวจสอบสภาพเครื่องมือวัดน้ำฝนมาตรฐานแบบบันทึกอัตโนมัติชนิดถ้วยกระดก (tipping bucket) อย่างสม่ำเสมอ เพื่อไม่ให้เกิดการอุดตันของเครื่องรับน้ำฝน เนื่องจากใบไม้หรือตะกอนดิน เพื่อจะทำให้การตรวจได้ข้อมูลที่ดียิ่งขึ้น

3) เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ได้ประเมินสัมประสิทธิ์ของน้ำฝนที่ตกโดยอิสระ (p) โดยการปรับเทียบจากแบบจำลองด้วยการดำเนินการกำหนดช่วงขอบเขต p ที่เป็นไปได้จากค่าที่ได้จากการศึกษาในอดีตที่ผ่านมา การศึกษาครั้งต่อไปจึงควรทำการศึกษาในช่วงเวลาที่ศึกษาเนื่องจากค่า p เป็นพารามิเตอร์ที่ผันแปรตามช่วงเวลา

4) การประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำ ควรทำการศึกษาปัจจัยด้านพืชแต่ละประเภทให้ครอบคลุมทุกพารามิเตอร์ที่นำเข้าแบบจำลอง ได้แก่ ความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (maximum leaf conductance; C^*_{leaf}) ความสูงของต้นพืช (Z_{veg}) ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index; LAI) สมรรถนะการกักเก็บน้ำของ

เรือนยอด (S) การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มแรก (Ds) และสัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) เพื่อเป็นตัวแทนของพืชประเภทนั้นๆ



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- เกษม จันทร่แก้ว. 2512. รูปร่างและลักษณะของกลุ่มน้ำ, น. 40-48. ใน เกษม จันทร่แก้ว, บรรณาธิการ. การวิจัยลุ่มน้ำที่ห้วยคอกม้า เล่มที่ 1. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- _____. 2539. หลักการจัดการลุ่มน้ำ. ครั้งที่ 1. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กุลธิดา แพทย์พันธุ์. 2546. ผลของการตัดสาขายาระยะไม้ต่างถิ่นต่อปริมาณน้ำพืชยึด บริเวณ สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กฤษดาพร บัวแสง. 2548. อิทธิพลของลักษณะการตกของฝนต่อกระบวนการเกิดน้ำพืชยึดในป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จักรกริช ไชยเนตร. 2550. การประยุกต์แบบจำลอง Rutter เพื่อศึกษากระบวนการนำพืชยึดในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินต่างกัน บริเวณลุ่มน้ำแม่สา จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชุมพล งามผ่องใส. 2512. ลักษณะพืชพรรณ, น. 98-124. ใน เกษม จันทร่แก้ว, บรรณาธิการ. การวิจัยลุ่มน้ำที่ห้วยคอกม้า เล่มที่ 1. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ซัชชัย ดันตสิรินทร์. 2549. Kog-Ma Experimental Watershed. เอกสารประกอบการสอนวิชา อุทกวิทยาป่าไม้ประยุกต์. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2513. การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับปริมาณน้ำฝนที่ถูกสกัดกั้นโดยเรือนยอด น้ำฝนที่ตกผ่านเรือนยอดลงมา น้ำฝนที่ไหลลงตามลำต้นไม้ และการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารจากเรือนยอดลงมาตามลำต้น และการชะล้างลงมาจากใบไม้ในป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยบุย เชียงใหม่. งานวิจัยห้วยคอกม้า เล่มที่ 5. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____, ชัชชัย ตันตสิรินทร์, กุลธิดา แพทย์พันธุ์ และสมาน ณ ลำปาง. 2545. รายงาน
การวิจัยฉบับสมบูรณ์: ปริมาณน้ำพืชในสวนป่าไม้โตเร็วต่างถิ่น บริเวณสถานีเกษตร
หลวงอ่างขาง จังหวัดเชียงใหม่. มุลนิธิโครงการหลวง.

นิตยา หวังวงศ์โรจน์. 2551. อุทกวิทยา. ครั้งที่ 1. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

ประคำแก้ว บุญธรรม. 2550. การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่า
การคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอก
ม้า จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ปิยพงษ์ ทองดินนอก. 2544. การประเมินค่าการคายระเหยน้ำโดยวิธี Bowen ratio ในพื้นที่ที่มีการ
ใช้ประโยชน์ที่ดินหลายรูปแบบของจังหวัดสุโขทัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ปรีชา พรหมณีย์. 2526. การวัดค่าการคายระเหยของข้าวฟ่างและข้าวโพดหวาน และวิธีใช้ข้อมูล
ภูมิอากาศเพื่อประมาณค่าการคายระเหย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พันธ์พิทย์ พืชมงคล. 2542. การศึกษาความเหมาะสมและความสำคัญของตัวแปรของสูตรเพน
แมนในสภาวะลมฟ้าอากาศของสถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรารุช วุฒินิชย์. 2539ก. โปรแกรม Penman - A สำหรับคำนวณ ETo โดยใช้ข้อมูลจากรายงาน
ภูมิอากาศเกษตรของประเทศไทย. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

วรารุช วุฒินิชย์. 2539ข. โปรแกรม Penman - A สำหรับคำนวณ ETo โดยใช้ข้อมูลจากรายงาน
ภูมิอากาศของประเทศไทย. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

วิบูลย์ บุญยธโรกุล. 2526. หลักการชลประทาน. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิชา นิยม. 2535. อุทกวิทยาป่าไม้. ครั้งที่ 1. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมบูรณ์ พรหมเสน. 2547. การพัฒนาแบบจำลองการคายระเหยน้ำโดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและ
ค่าการชักนำของปากใบพืชในพื้นที่ทำการเกษตรและสวนป่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมาน ปราการรัตน์. 2535. เอกสารวิชาการ การประมาณค่าศักยภาพการคายน้ำโดยวิธี Thornthwaite.
กรมอุตุนิยมวิทยา, กรุงเทพฯ.

สามัคคี บุญยะวัฒน์, เกษม จันทรแก้ว, นิพนธ์ ตั้งธรรม, เรณู สุวรรณรัตน์ และวิชา นิยม. 2524.
สมดุลของน้ำในป่าดิบเขาธรรมชาติ ดอยปู่ย เชียงใหม่. การวิจัยลุ่มน้ำห้วยคอกม้า เล่มที่
36. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุธาณี โพธิ์สุนทร. 2544. การหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการประเมินค่าการคาย
ระเหยน้ำสูงสุดแต่ละภูมิภาคโดยใช้รังสีดวงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุรัตน์ บัวเลิศ. 2536. การประยุกต์เทคนิคทางคอมพิวเตอร์ในวิธีเพนแมนดัดแปลงเพื่อการ
ประมาณการคายระเหยน้ำสูงสุดบริเวณอำเภอสามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุขใจ จินอ่อน, พาวิน มะโนชัย, อนันต์ ปินตารักษ์ และนพดล จรัสสัมฤทธิ์. 2551. การพัฒนา
คุณภาพผลผลิตลำไยพันธุ์ดอโดยการปลิดใบแก่. วิทยาศาสตร์การเกษตร 39 (3). 1-4.

สำเร็จ ปานอุทัย. 2548. การศึกษา CO₂ Flux ในป่าเขตร้อนของประเทศไทย, น. 193. .ใน การ
ประชุมวิชาการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้ “ศักยภาพของป่าไม้ในการ
สนับสนุนพิธีสารเกียวโต”. กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

ศิริัญญา พิมาณ. 2545. การประเมินอัตราการคายระเหยน้ำของเทพทาโร และก่อหม่นในป่าดิบเขา
ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้แบบจำลอง Penman-Monteith. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- Calder, I. 1986. A stochastic model of rainfall interception. **Journal of Hydrology** (89):65–71.
- _____. 1996. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two-layer stochastic model. **Journal of Hydrology** (185): 363–378.
- Chunkao, K. 1971. An Analysis of Evapotranspiration of Dry-Evergreen Forest at Sakkaerat, Thailand. **Forest Research Bulletin Numbe** (16). (OCTOBER 1971).
- Dingman, S.L. 2002. **Physical Hydrology**. 2nd ed. University of New Hampshire . Prentice Hall, New Jersey.
- Gash, J. and A.J. Morton. 1978. An Application of The Rutter Model to The Estimation of The Interception Loss from Thetford Forest. **Journal of Hydrology** (38): 49-58.
- _____. 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society** (105): 43–55.
- _____, C. Lloyd and G. Lachaud. 1995. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology** (170): 79–86.
- Liu, J., 1988. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. **Ecological Modelling** (42): 111–123.
- Liu, S. 1997. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. **Ecological Modelling** (99): 151–159.
- Makoto, T., R. N. Abdul., Y. Yukio., N. Shoji., A. S. Siti., M. S. Mohd and T. Satoru. 2003. Long-term estimation of evaporation from a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. **Water Resources Systems JAHS Publ** 280.
- Massman, W. 1983. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forest. **Agricultural Meteorology** (28): 261–286.

- Mathias, H., T.W.R. Paul., D.M. David., J.H. Richard and J.G. David. 2008. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of mixed deciduous forest. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology** (148):I655 - I667
- Menzel ,C.M. and D.R. Simpson. 1986. Description and performance for major lychee cultivars in subtropical Queensland. **Queensland Agr. J.** (112):125-136.
- Monteith, J.L. 1965. **Evaporation and Environment**. Cambridge University, NewYork.
- Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model Evalution Guideling for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agriculture and Biological Engineers** (50): 885-900.
- Mulder, J. 1985. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: Hutchison, B., Hicks, B. (Eds.), **The Forest–Atmosphere Interaction**. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 77–196.
- Murakami, S. 2007. Application of three canopy interception models to a young stand of Japanese cypress and interpretation in terms of interception mechanism. **Journal of Hydrolgy** (342): 305–319.
- Muzylo, A., P. Lloren, F. Valente, J.J. Keizer, F. Domingo and J.H.C. Gash. 2009. A Review of Rainfall Interception Modelling. **Journal of Hydrology** (370): 191-206.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting Through Conceptual Models. Part I: A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology** (10): 282-290
- Paco, Teresa A., S. D. Teresa, O. H. Manuel, S. P. Joao. V. Fernanda, B. Joao, L. P. Fernando, P. Clara and S. D. Jorge. 2009. Evapotranspiration from a Medit Erranean Evergreen Oak Savannah: The Role of Tree and Pasture. **Journal of Hydrolog** (369): 98-106.
- Penman, H.L. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. **Proceeding Royal Science London** (193): 120-146.

Rampisela, D.A., M. Suzukin and Y. Fukushima. 1990. Application of the Penman-Monteith Model to the Estimation of the Evapotranspiration Rate of a Forested Watershed.

Journal. Jpn.For.Soc (72): 1-10.

Rey and M. Jose. 1999. Modelling Potential Evapotranspiration of Potential Vegetation.

Ecological Modelling (123): 141-159.

Rutter, A.J., K.A. Kershaw, P.C. Robin and A.J. Morton. 1971. A Predictive Model of Rainfall Interception in Forest. I. Derivation of the Model from Observations in Plantation of Corsican Pine. **Agriculture Meteorol** (9): 367-383.

_____. Morton and P.C. Robin. 1975. A Predictive Model of Rainfall Interception in Forest. II. Generalization of the Model and Comparison with Observation in some Coniferous and Hardwood Stand. **Journal Appl.Ecol** (12):36-380

Sanchez-Carrillo, S., D.G. Angeler, R. Sanchez-Andres, M. Alvarez-Codelas and J. Garatuza-Payan. 2004. Evapotranspiration in Semi-Arid Wetland: Relationships between Inundation and the Macrophyte-Cover:open-Water Ratio. **Advances in Water resources** (27): 643-655.

Sellers, P. and J. Lockwood. 1981. A computer simulation of the effects of differing crop types on the water balance of small catchments over a long time periods. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society** (107): 395-414.

Sun,G., A. Noormets, J. Chen and S.G. McNulty. 2008. Evapotranspiration Estimates From Eddy Covariance Tower and Hydrologic Modeling in Managed Forests in Northe Wiscosin, USA. **Agricultural and Forest Meteorology** (148): 257-267.

Tanaka N., C. Tantasirin, M. Suzuki and N. Tangtham. 2001. Rainfall Interception by a Hill Evergreen Forest in Northern Thailand. **In The Fifth International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME Vol. 2**, pp. 410-414. Proc. GAME International Science Panal, Hydrospheric Atmospheric Research Center.

Tanaka, K., N. Yoshifuji, C. Tantasirin, M. Suzuki and N. Tangtham. 2003. Transpiration Peak over a Hill Evergreen Forest in Northern Thailand in Late Dry Season: Assessing the Seasonal Changes in Evapotranspiration Using a Multilayer Model. **Journal of Geophysical Research** (108): 41-55.

Tanaka, N., K., Y. Tomonori, T. Natsuko, T. Katsunori, S.Hideki, S.Katsushige, C.Tantasirin, N. Tangthum and S. Masakazu. 2008. A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions. **Agricultural and Forest Meteorology** (148): 807-819.

Dijk, V. and A. L. Bruijnzeel. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model, part 1. Model description. **Journal of Hydrology** (247): 230–238.

William, D.G., K. Cable, W. Hultine, J.C.B. Hoedjes, E.A.Yeppez, V. Simonneaux, S.Er-Raki, G. Boulet, H.A.R. Bruin, , A. Chehbouni, O.K. Hartogensis and F. Timouk. 2004. Evapotranspiration Components Determined by Stable Isotope, Sap Flow and Eddy Covariance Techniques. **Agricultural and Forest Meteorology** (125): 241-258.

Wilson, K.B., P.J., Hanson, P.J., Mulholland, D.D., Baldocchi and S.D. Wullschleger. 2001. Acomparison of Methods for Determining Forest Evapotranspiration and its Components: Sap-Flow Soil Water Budget, Eddy Covariance and Cathment Water Balance. **Agricultural and Forest Meteorology** (106): 153-168

Zeng, N., J. Shuttleworth and J. Gash. 2000. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part 1. Point analysis. **Journal of Hydrology** (228): 228–241.



ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณการคายน้ำและน้ำพืชยึดราย 10 นาฬิกาของแต่ละเดือน บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2551

เดือน	การตรวจวัด						แบบจำลอง				
	น้ำฝนเหนือ	น้ำฝนผ่าน	การคายน้ำ	น้ำพืชยึด	การคายระเหยน้ำ		น้ำฝนผ่าน	น้ำพืชยึด	การคายน้ำ	การคายระเหยน้ำ	
	เรือนยอด	เรือนยอด			(น้ำพืชยึด+การคายน้ำ)		เรือนยอด			(น้ำพืชยึด+การคายน้ำ)	
	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม./วัน)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม./วัน)
มกราคม	5.50	3.85	93.51	1.65	95.16	3.02	2.56	2.10	98.33	100.43	3.24
กุมภาพันธ์	21.50	12.50	97.48	9.00	106.48	3.48	16.11	6.39	94.91	101.30	3.62
มีนาคม	25.50	19.70	121.71	5.80	127.51	3.93	20.08	5.42	121.15	126.57	4.08
เมษายน	110.00	103.55	119.14	6.45	125.59	3.97	92.69	17.31	113.87	131.17	4.37
พฤษภาคม	348.50	314.74	73.11	33.76	106.87	2.36	291.70	56.80	83.24	140.05	4.52
มิถุนายน	159.00	135.55	75.68	23.45	99.13	2.52	131.06	33.86	76.57	110.42	3.68
กรกฎาคม	173.00	148.55	67.98	24.45	92.43	2.19	144.92	28.08	71.27	99.35	3.20
สิงหาคม	416.00	387.12	85.18	28.88	114.06	2.75	359.45	56.65	79.76	136.41	4.40
กันยายน	348.50	323.66	67.17	24.84	92.01	2.24	328.44	29.76	83.94	113.71	3.79
ตุลาคม	340.00	322.00	17.25	18.00	35.25	2.46	317.03	21.84	89.47	111.31	3.59
พฤศจิกายน	62.50	58.00	16.10	4.50	20.60	2.30	60.89	1.61	18.11	19.73	2.82
ธันวาคม	1.00	1.00	68.68	-	68.68	2.22	0.20	0.80	70.74	71.54	10.22
รวม	2,011.00	1,830.21	902.99	180.79	1,083.78	-	1,765.14	260.61	1,001.36	1,261.97	-
เฉลี่ย	167.58	152.52	75.25	15.07	90.31	2.79	147.09	21.72	83.45	105.16	4.29

ตารางผนวกที่ 2 ค่าการคายน้ำและ ปริมาณน้ำพืชขีดราเดือนจากการตรวจวัด บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2552

เดือน	น้ำฝนเหนือเรือนยอด (มม.)	น้ำฝนผ่านเรือนยอด (มม.)	การคายน้ำ (มม.)	น้ำพืชขีด (มม.)	การคายระเหยน้ำ (น้ำพืชขีด + การคายน้ำ) (มม.)	(มม./วัน)
มกราคม	-	-	-	-	-	-
กุมภาพันธ์	-	-	-	-	-	-
มีนาคม	13.00	5.65	53.35	7.35	60.70	2.09
เมษายน	134.50	100.01	51.48	34.49	85.97	2.87
พฤษภาคม	248.00	131.30	34.79	116.7	97.85	3.16
มิถุนายน	280.50	251.45	32.04	29.05	61.09	2.04
กรกฎาคม	222.00	213.85	30.65	8.15	38.80	1.25
สิงหาคม	213.00	194.15	36.99	18.85	55.84	1.80
กันยายน	210.50	210.50	38.82	0.0	38.82	1.29
ตุลาคม	162.50	168.50	39.16	0.0	39.16	1.26
พฤศจิกายน	-	-	-	-	-	-
ธันวาคม	-	-	-	-	-	-
รวม	1,484.00	1,275.41	317.28	214.59	478.23	-
เฉลี่ย	185.50	166.13	20.12	35.53	59.78	1.97

ตารางผนวกที่ 3 ค่าการคายน้ำและปริมาณน้ำพืชยึดทราย 30 นาทีของแต่ละเดือน บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยบู่ จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2551

เดือน	การตรวจวัด						แบบจำลอง				
	น้ำฝนเหนือ	น้ำฝนผ่าน	น้ำพืชยึด	การคายน้ำ	การคายระเหยน้ำ		น้ำฝนผ่าน	น้ำพืชยึด	การคายน้ำ	การคายระเหยน้ำ	
	เรือนยอด	เรือนยอด			(น้ำพืชยึด+การคายน้ำ)		เรือนยอด			(น้ำพืชยึด+การคายน้ำ)	
	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม./วัน)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม./วัน)
มกราคม	5.50	3.85	1.65	93.51	95.16	3.07	4.14	1.77	82.03	83.80	2.70
กุมภาพันธ์	21.50	12.50	9.00	97.48	106.48	3.80	18.30	4.64	79.63	84.27	3.01
มีนาคม	25.50	19.70	5.80	121.71	127.51	4.11	24.19	4.30	100.57	104.88	3.38
เมษายน	110.00	103.55	6.45	119.14	125.59	4.19	96.57	15.50	95.14	110.63	3.69
พฤษภาคม	348.50	314.74	33.76	73.11	106.87	3.45	294.37	57.76	71.23	128.99	4.16
มิถุนายน	159.00	135.55	23.45	75.68	99.13	3.30	115.71	43.01	56.01	99.02	3.30
กรกฎาคม	173.00	148.55	24.45	67.98	92.43	2.98	142.29	32.44	61.31	93.75	3.02
สิงหาคม	416.00	387.12	28.88	85.18	114.06	3.68	394.02	55.81	63.64	119.45	3.85
กันยายน	348.50	323.66	24.84	67.17	92.01	3.07	324.49	33.48	62.66	96.14	3.20
ตุลาคม	340.00	322.00	18.00	17.25	35.25	2.46	339.72	16.59	15.80	32.39	4.63
พฤศจิกายน	62.50	58.00	4.50	16.10	20.60	2.94	62.34	0.60	12.83	13.43	1.92
ธันวาคม	1.00	1.00	-	68.68	68.68	2.22	0.20	0.80	56.85	57.65	1.86
รวม	2,011.00	1,830.21	180.79	902.99	1,083.78	-	1,816.35	266.70	757.69	1,024.39	-
เฉลี่ย	167.58	152.52	15.07	75.25	90.31	3.27	1,707.18	22.23	63.14	85.37	3.23

ตารางผนวกที่ 4 สัมประสิทธิ์การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2552 ราย 10 นาทีและพารามิเตอร์ได้จากการปรับเทียบด้วยข้อมูลปีพ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขาหล่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

เดือน	แบบจำลองการคายระเหยน้ำ				แบบจำลองน้ำพืชชนิด			
	RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R ² _{CF}	CF	RMSE	NSE	R ² _{CF}	CF
มกราคม	-	-	-	-	-	-	-	-
กุมภาพันธ์	-	-	-	-	-	-	-	-
มีนาคม	8.5500	-0.0080	0.0001	1.0636	0.1936	-0.5068	-0.4665	1.2424
เมษายน	6.6500	0.0940	0.1575	1.1557	1.5593	0.5994	0.7338	0.7430
พฤษภาคม	7.1700	-0.3154	-0.3105	1.0437	1.4066	0.5643	0.5644	1.0031
มิถุนายน	6.6300	-0.2835	-0.0510	1.3843	0.7343	0.6395	0.7161	0.7998
กรกฎาคม	9.3900	-1.0225	-0.7365	1.5527	0.4152	0.3550	0.3741	0.8968
สิงหาคม	9.7300	-0.2282	-0.0708	1.4317	1.1477	0.7845	0.7854	0.9738
กันยายน	9.0800	-0.4105	-0.1934	1.4059	0.9734	0.6320	0.6320	0.9937
ตุลาคม	7.1000	-0.3881	-0.3331	1.1454	1.2710	0.6262	0.7051	1.3266
พฤศจิกายน	-	-	-	-	-	-	-	-
ธันวาคม	-	-	-	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	8.0375	-0.3203	-0.1900	1.2729	1.0900	0.6001	0.6444	0.8630

ตารางผนวกที่ 5 สัมประสิทธิ์การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองประมาณค่าการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2552 ราย 30 นาทีและพารามิเตอร์ได้จาก การเปรียบเทียบด้วยข้อมูลปีพ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขาห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่

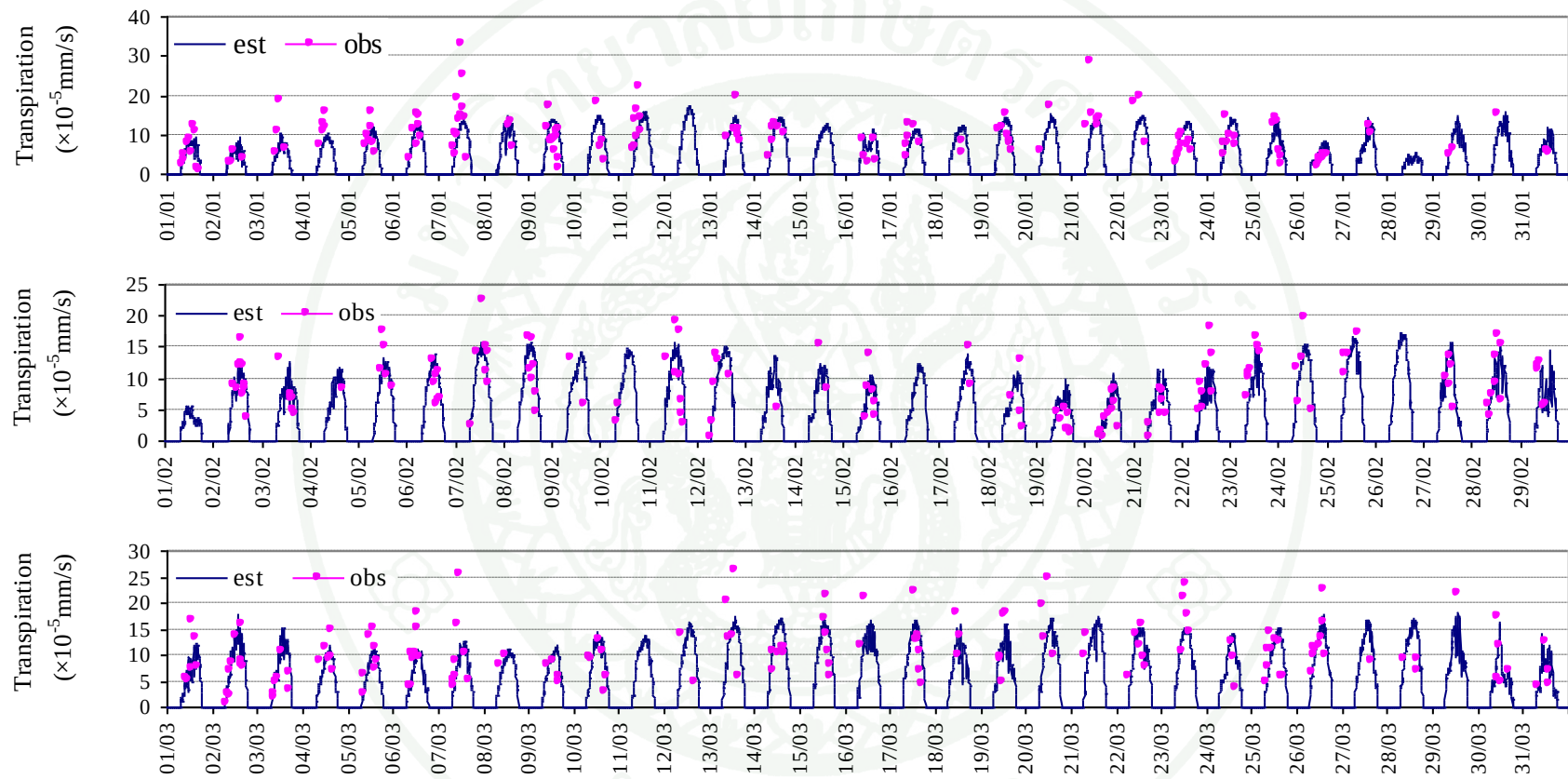
เดือน	แบบจำลองการคายระเหยน้ำ				แบบจำลองน้ำพืชชนิด			
	RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R^2_{CF}	CF	RMSE	NSE	R^2_{CF}	CF
มกราคม	-	-	-	-	-	-	-	-
กุมภาพันธ์	-	-	-	-	-	-	-	-
มีนาคม	3.0515	0.9095	0.4778	1.0050	0.4323	0.3225	0.8101	1.3276
เมษายน	3.9243	0.8871	0.6247	0.9541	1.4944	0.8139	0.9447	0.7327
พฤษภาคม	3.9591	0.8934	0.4900	1.2710	0.7893	0.9439	0.7870	1.1211
มิถุนายน	3.9754	0.7925	0.4712	1.0224	0.8953	0.9464	0.9467	1.3692
กรกฎาคม	2.9304	0.8335	0.4699	1.2881	1.4631	0.8654	0.9384	0.9968
สิงหาคม	2.6998	0.7946	0.4338	1.4239	1.3120	0.9495	0.8572	1.1318
กันยายน	3.7477	0.7786	0.4783	1.4194	2.0519	0.9218	0.9163	1.0171
ตุลาคม	4.2949	0.7904	0.6745	1.6777	1.3847	0.9159	0.9062	0.9858
พฤศจิกายน	-	-	-	-	-	-	-	-
ธันวาคม	-	-	-	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	3.5729	0.8349	0.5150	1.2577	1.2279	0.8349	0.8883	1.0853

ตารางผนวกที่ 6 ค่าการคายระเหยน้ำที่ประมาณได้ด้วยแบบจำลอง Penman, Penman - Monteith และ Rutter และปัจจัยสิ่งแวดล้อมปี พ.ศ. 2551 รายเดือน

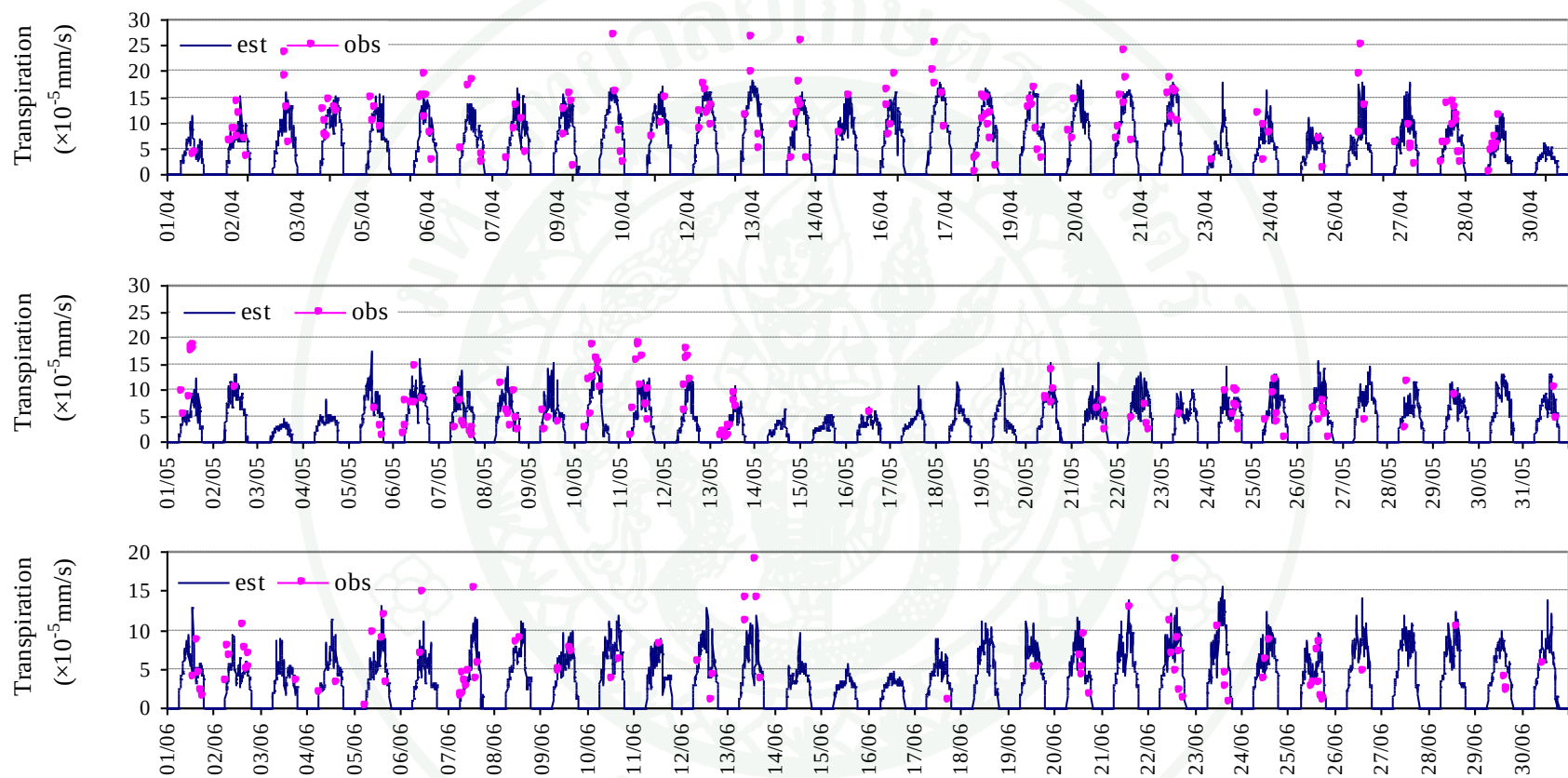
เดือน	รังสีดวง	รังสีดวง	ความชื้น	น้ำฝน	อุณหภูมิ	ความเร็วลม	การคายระเหยน้ำ		
	อาทิตย์คลื่นสั้น (วัตต์/ตร.ม./วินาที)	อาทิตย์สุทธิ (วัตต์/ตร.ม./วินาที)	สัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	เหนือเรือนยอด (มม.)	(°ซ)	(ชม./วินาที)	ราย 10 นาที (มม.)	ราย 30 นาที (มม.)	ตรวจวัด (มม.)
มกราคม	484.64	358.11	86.26	5.50	18.25	184.51	100.43	83.80	95.16
กุมภาพันธ์	485.34	213.43	85.85	21.50	18.76	199.02	101.30	84.27	106.48
มีนาคม	534.82	206.30	82.46	25.50	22.14	181.93	126.57	104.88	127.51
เมษายน	439.71	254.03	81.55	110.00	22.77	158.85	131.17	110.63	125.59
พฤษภาคม	270.34	140.78	85.01	348.50	20.03	195.15	140.05	128.99	106.87
มิถุนายน	294.86	110.47	84.61	159.00	20.52	187.28	110.42	99.02	99.13
กรกฎาคม	315.09	162.82	84.98	173.00	20.20	176.62	99.35	93.75	92.43
สิงหาคม	269.13	174.04	84.92	416.00	20.25	171.00	136.41	119.45	114.06
กันยายน	314.95	251.86	82.09	348.50	20.31	154.50	113.71	96.14	92.01
ตุลาคม	251.74	142.58	85.38	340.00	19.73	150.39	111.31	32.39	35.25
พฤศจิกายน	533.92	380.25	86.91	62.50	17.67	170.59	19.73	13.43	20.60
ธันวาคม	407.30	318.00	87.03	1.00	16.93	159.59	71.54	57.65	68.68
รวม	-	-	-	-	-	-	1,261.97	1,024.39	1,083.78
เฉลี่ย	383.49	226.05	84.75	167.58	19.80	174.12	65.92	57.38	90.31

ตารางผนวกที่ 7 ค่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ได้จากการตรวจวัด บริเวณป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2552

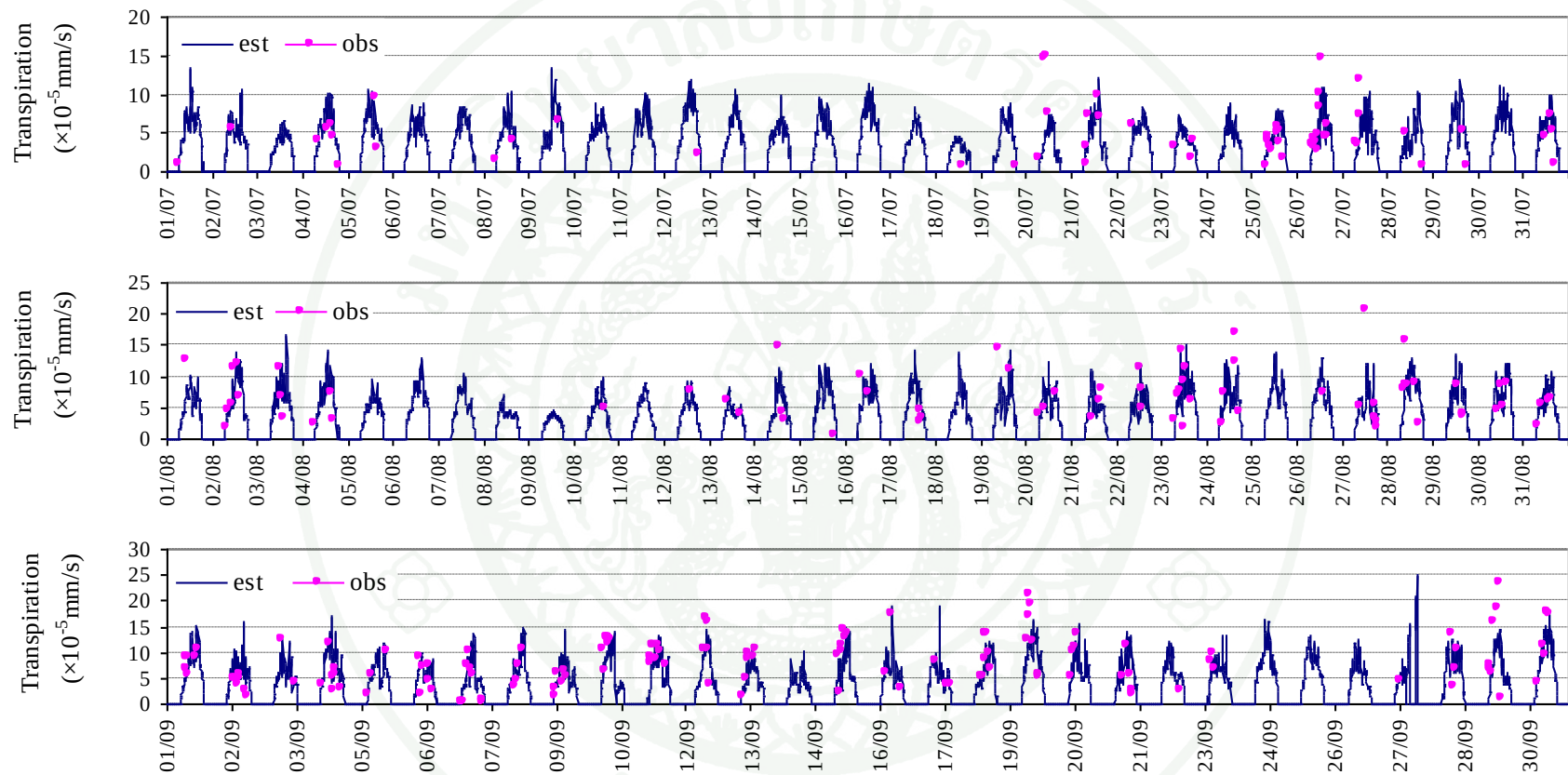
เดือน	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้น (วัตต์/ตร.ม./วินาที)	รังสีดวงอาทิตย์สุทธิ (วัตต์/ตร.ม./วินาที)	อุณหภูมิ (°ซ)	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	น้ำฝนเหนือเรือนยอด (มม.)	ความเร็วลม (ชม/วินาที)
มกราคม	394.94	326.76	16.64	87.09	-	-
กุมภาพันธ์	589.37	488.89	23.23	81.04	-	-
มีนาคม	545.49	477.62	22.94	81.48	13.00	179.77
เมษายน	338.59	484.86	22.08	82.57	134.5	166.37
พฤษภาคม	338.59	401.69	22.08	82.57	248	166.37
มิถุนายน	294.89	395.27	20.52	84.34	280.5	187.69
กรกฎาคม	273.67	364.61	20.65	84.38	222	175.18
สิงหาคม	347.41	418.45	20.9	83.96	213	165.4
กันยายน	344.35	413.09	20.81	84.28	210.5	162.89
ตุลาคม	329.83	380.19	20.45	84.71	162.5	146.91
พฤศจิกายน	460.01	384.55	19.54	85.37	-	-
ธันวาคม	-	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	387.013	412.36	20.89	83.80	185.50	168.82



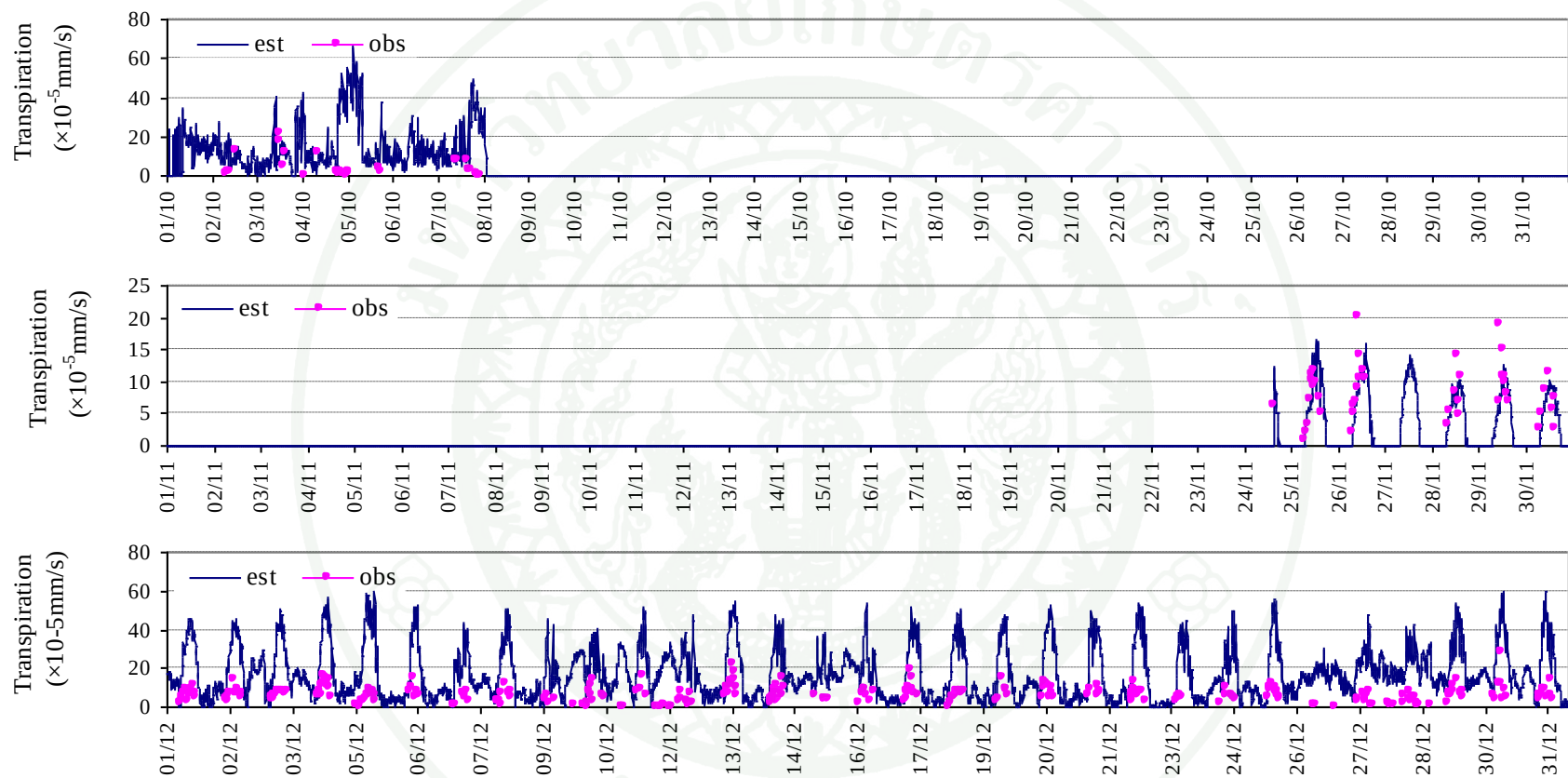
ภาพผนวกที่ 1 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2551



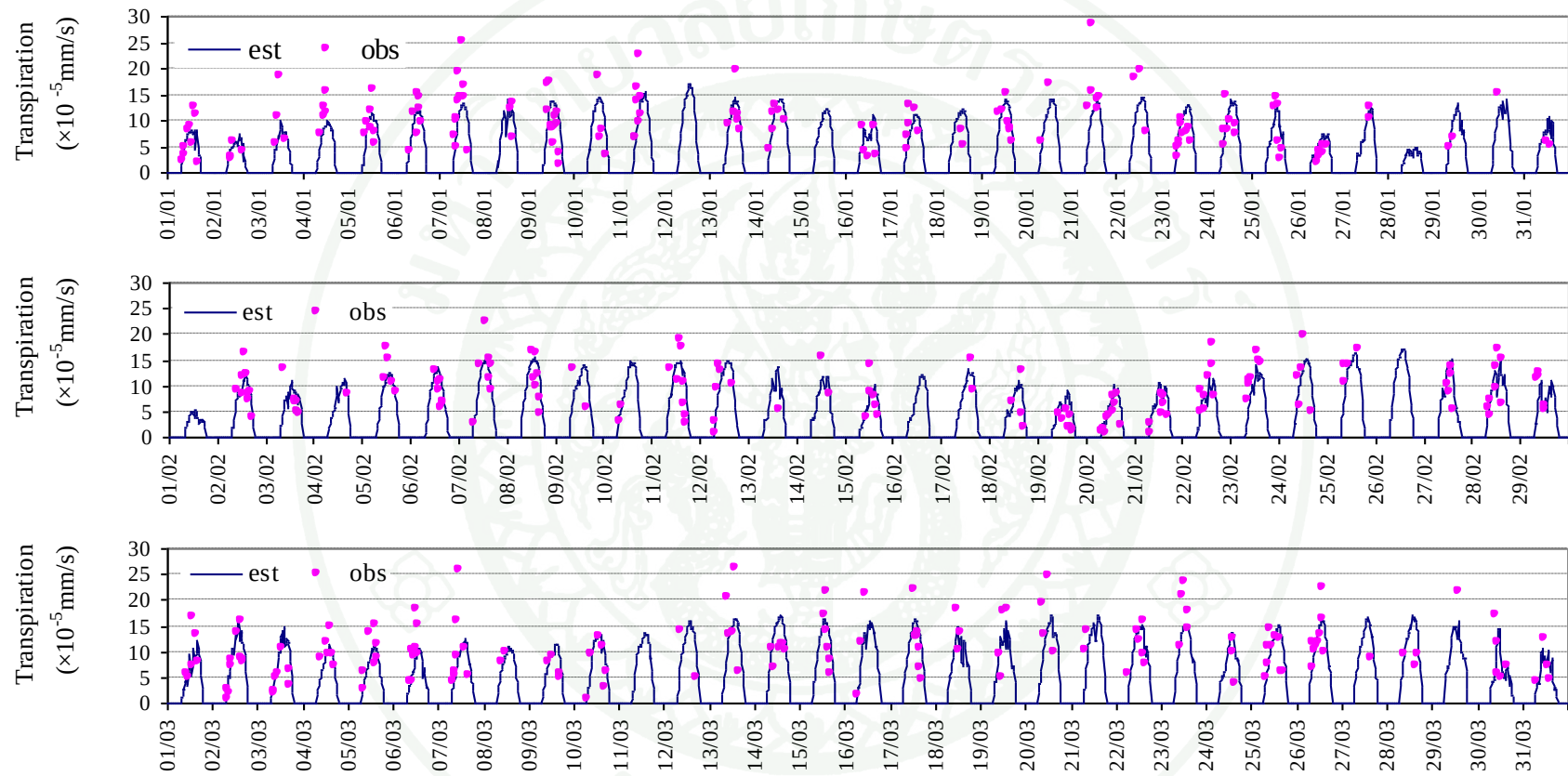
ภาพผนวกที่ 2 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน ปีพ.ศ. 2551



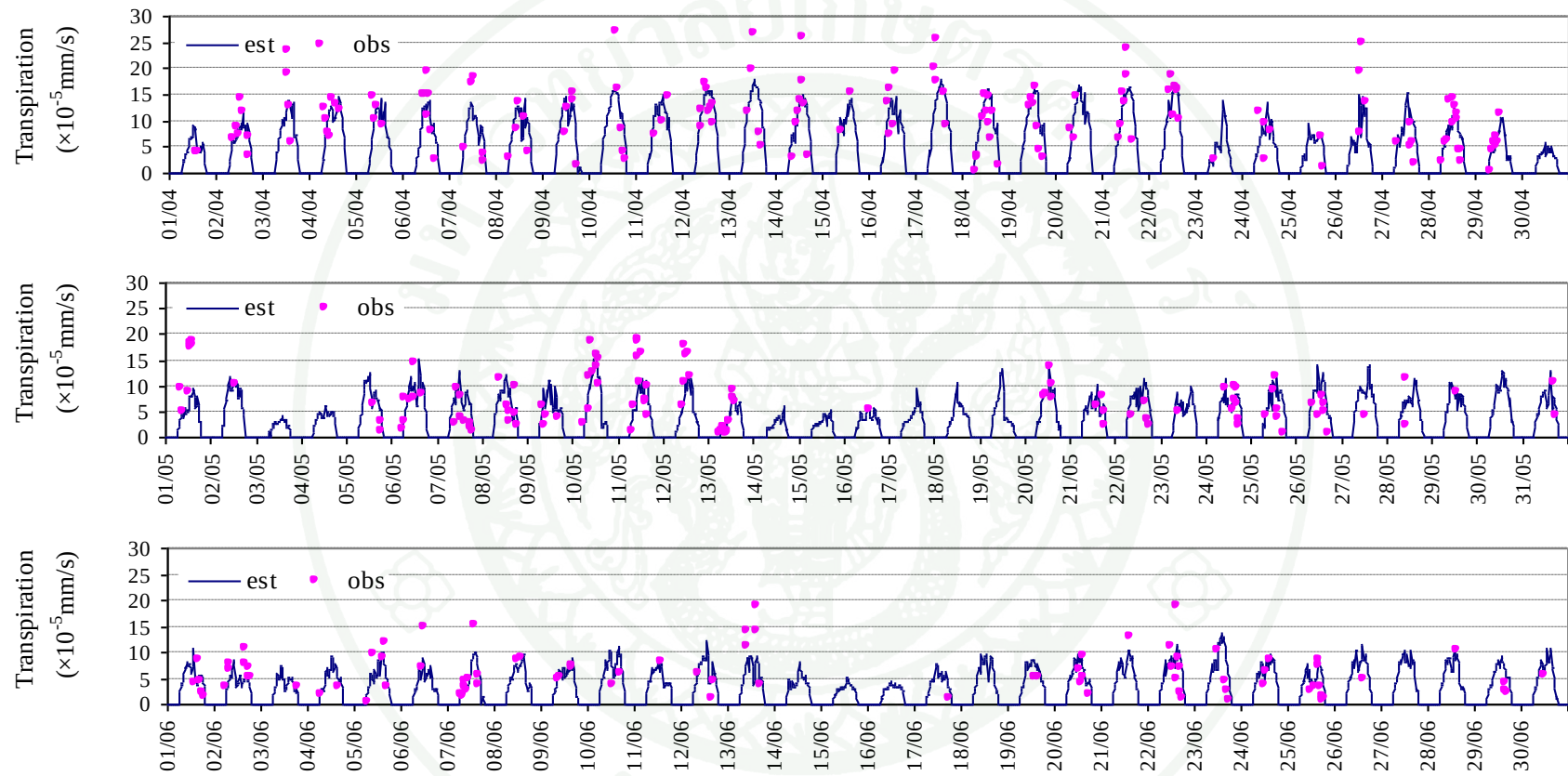
ภาพผนวกที่ 3 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน ปีปี พ.ศ. 2551



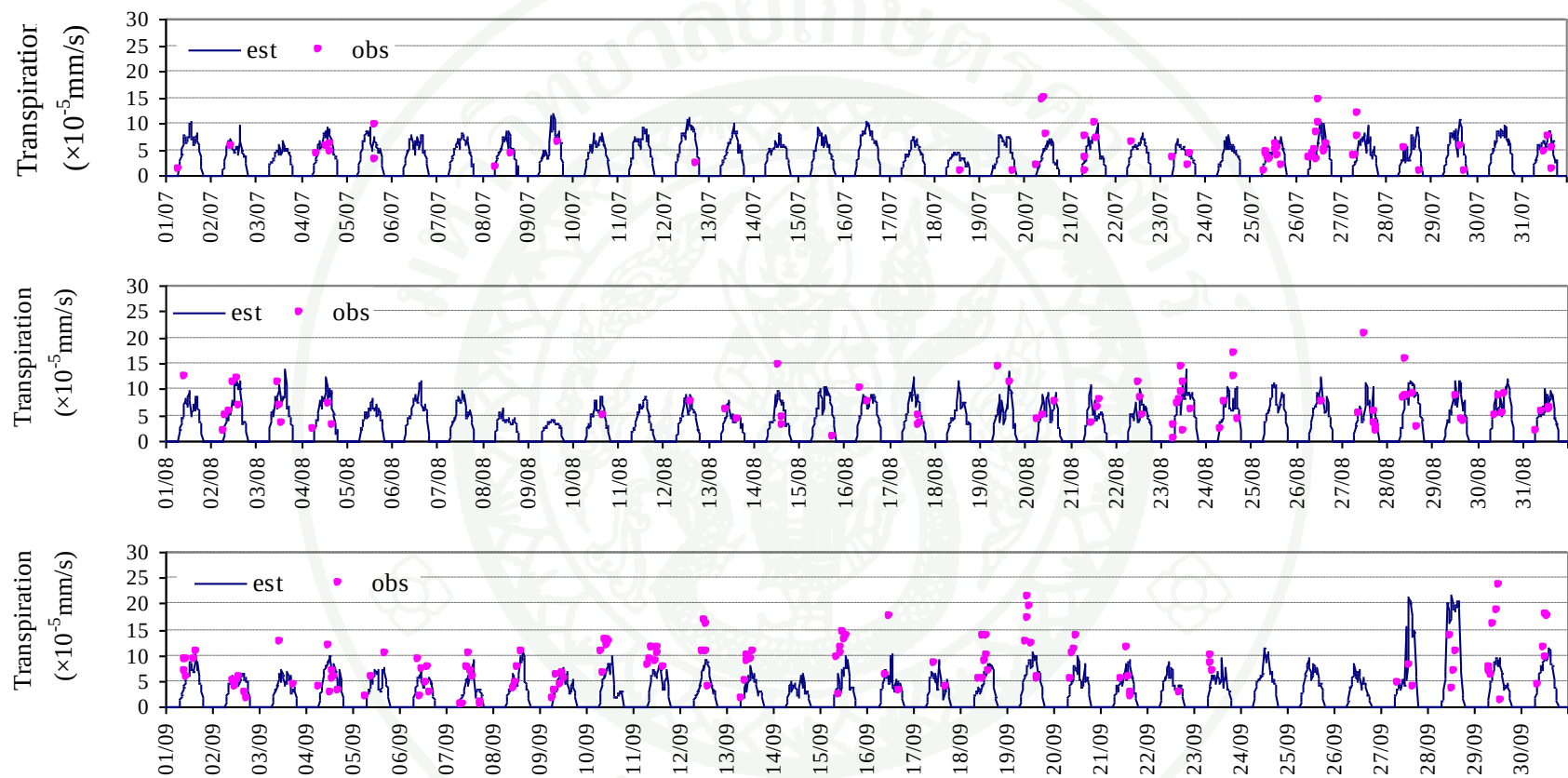
ภาพผนวกที่ 4 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคมในปี พ.ศ. 2551



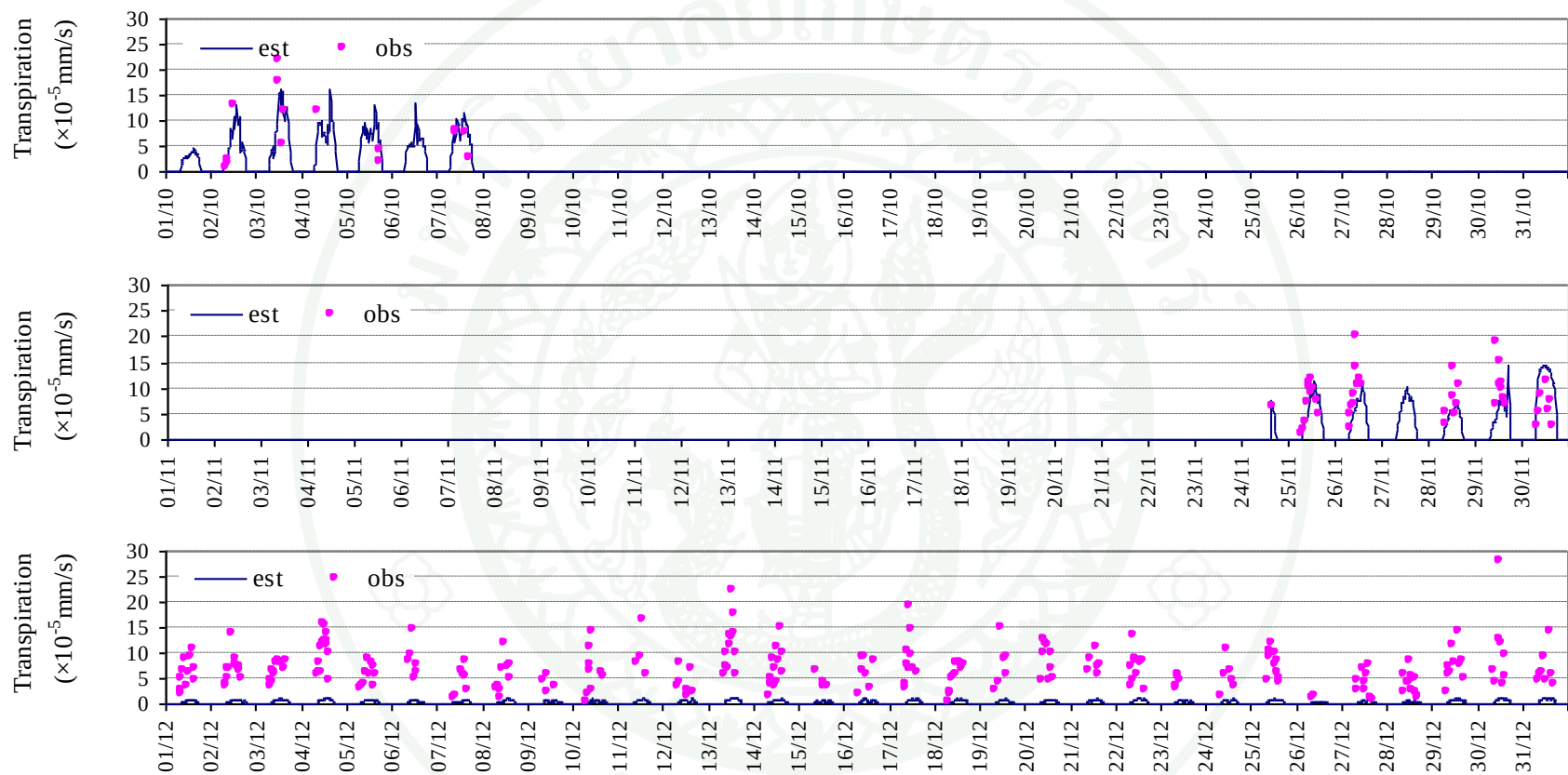
ภาพผนวกที่ 5 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคมในปี พ.ศ. 2551



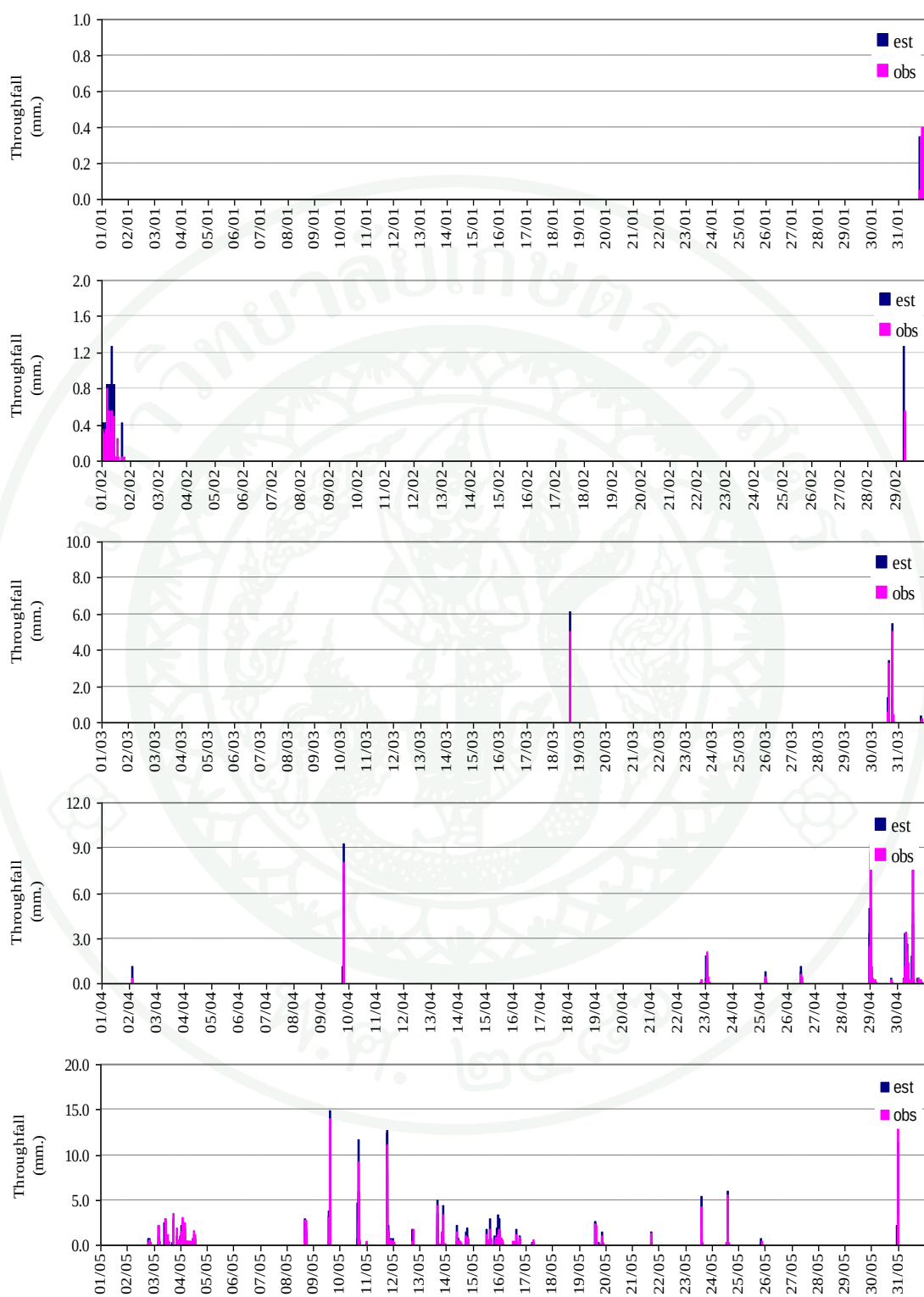
ภาพผนวกที่ 6 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน ปีปี พ.ศ. 2551



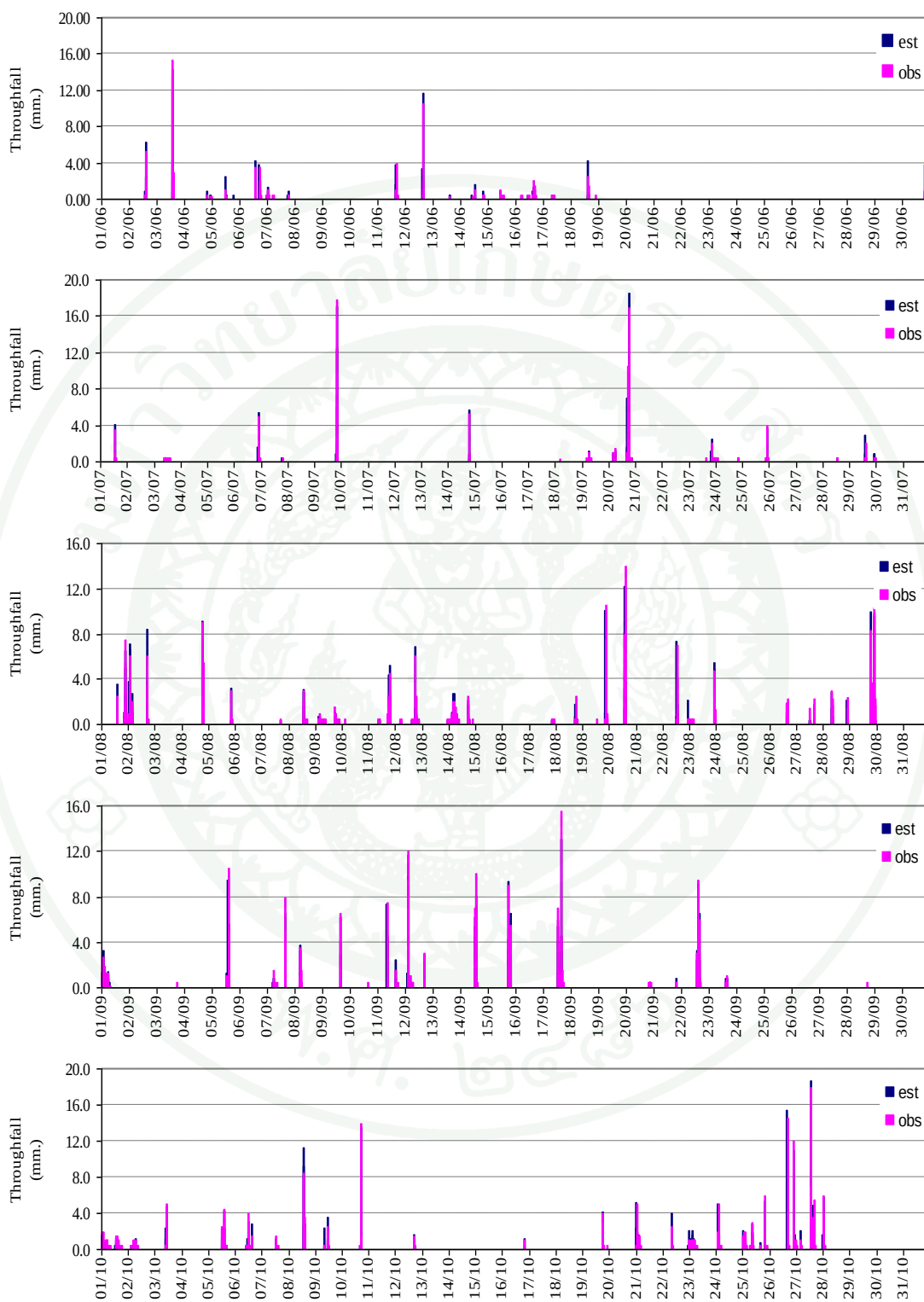
ภาพผนวกที่ 7 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายนในปี พ.ศ. 2551



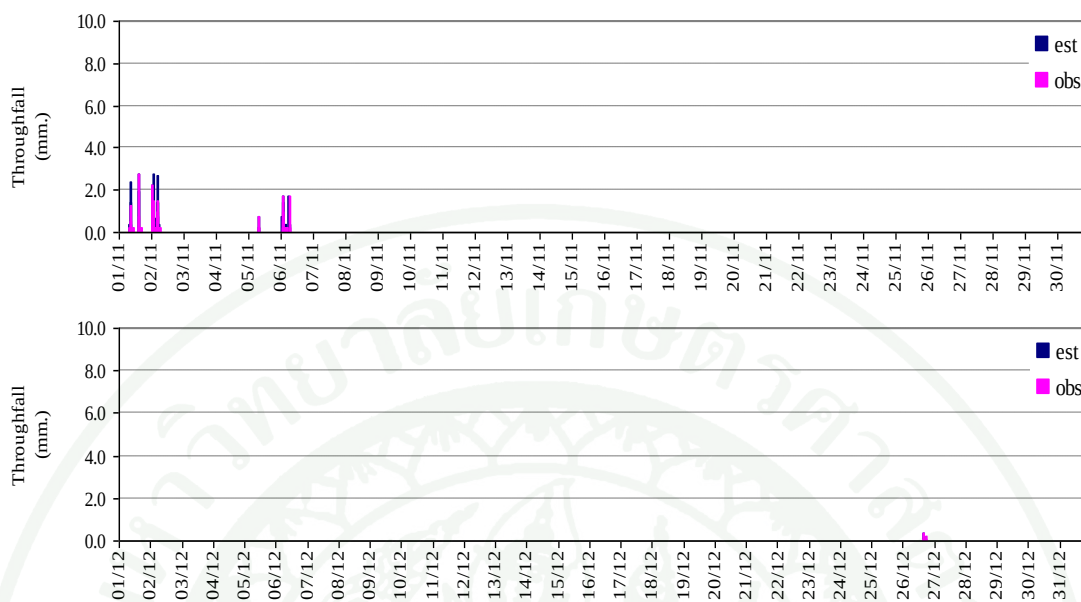
ภาพผนวกที่ 8 ค่าการคายน้ำจากแบบจำลอง (est) และการคายน้ำจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2551



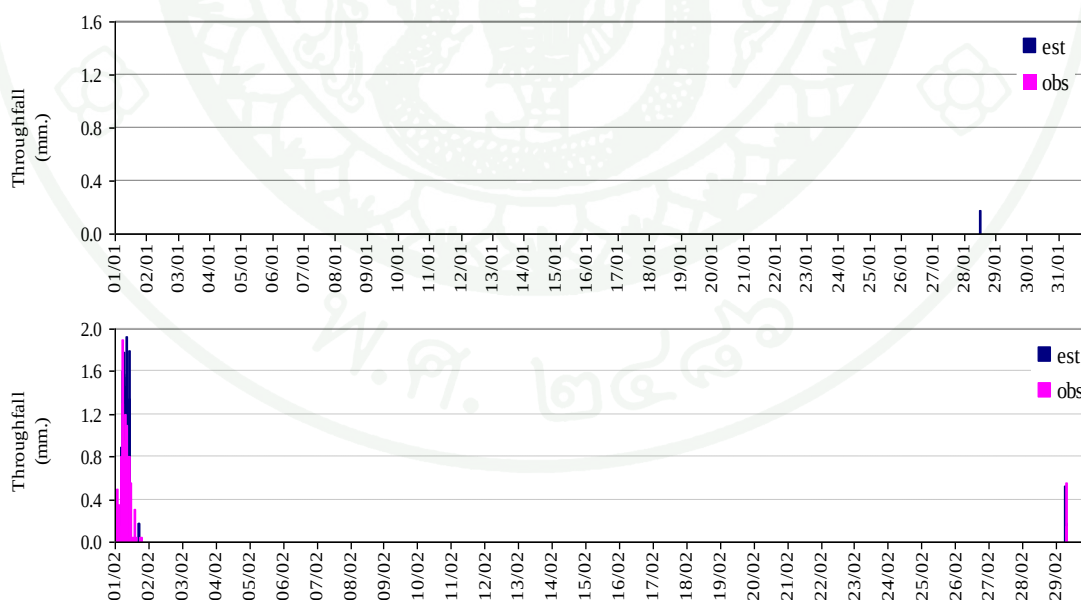
ภาพผนวกที่ 9 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลอง (est) และน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยบุยุ จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคมปี พ.ศ. 2551



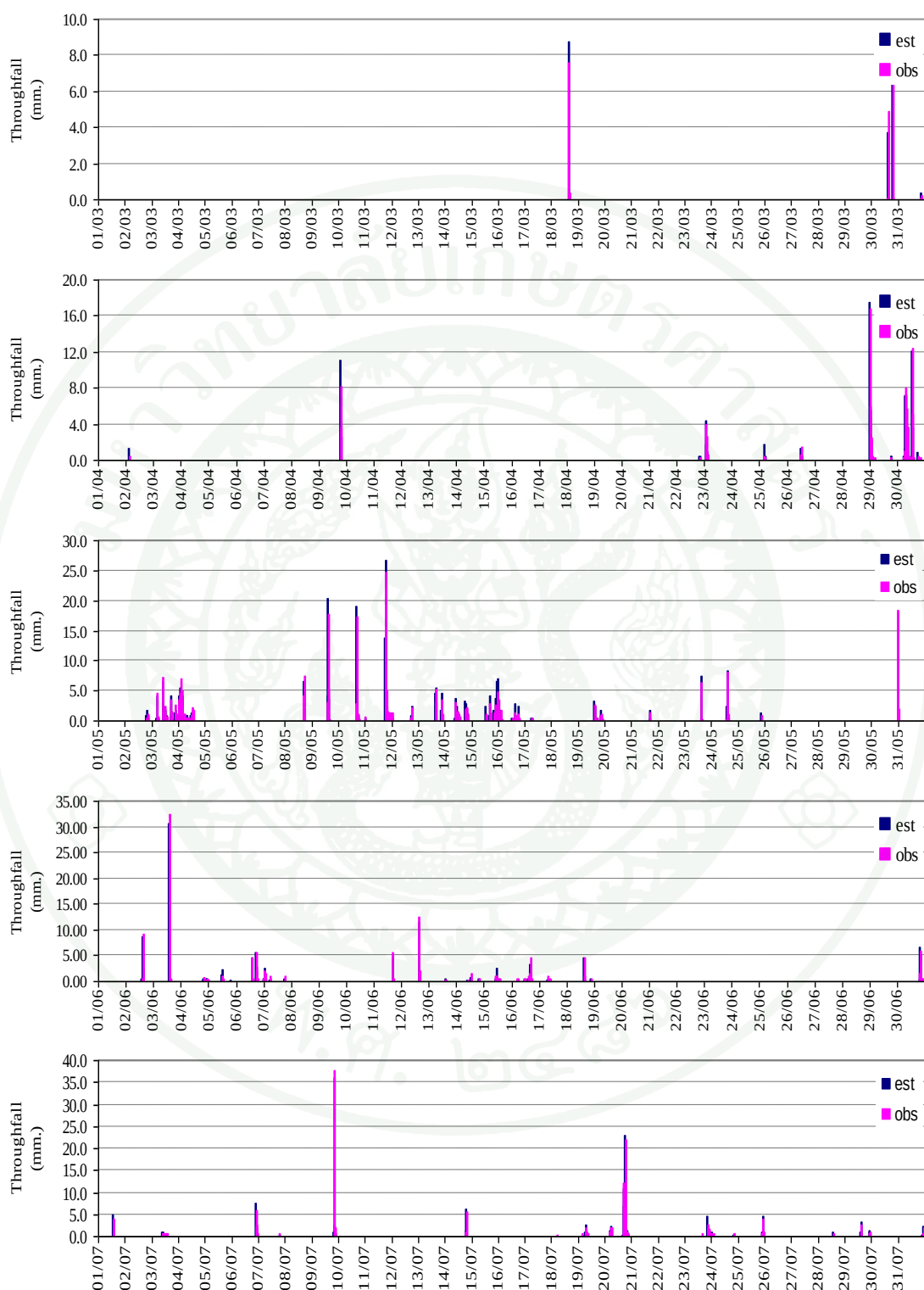
ภาพผนวกที่ 10 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลอง (est) และน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า คอยุ่ จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2551



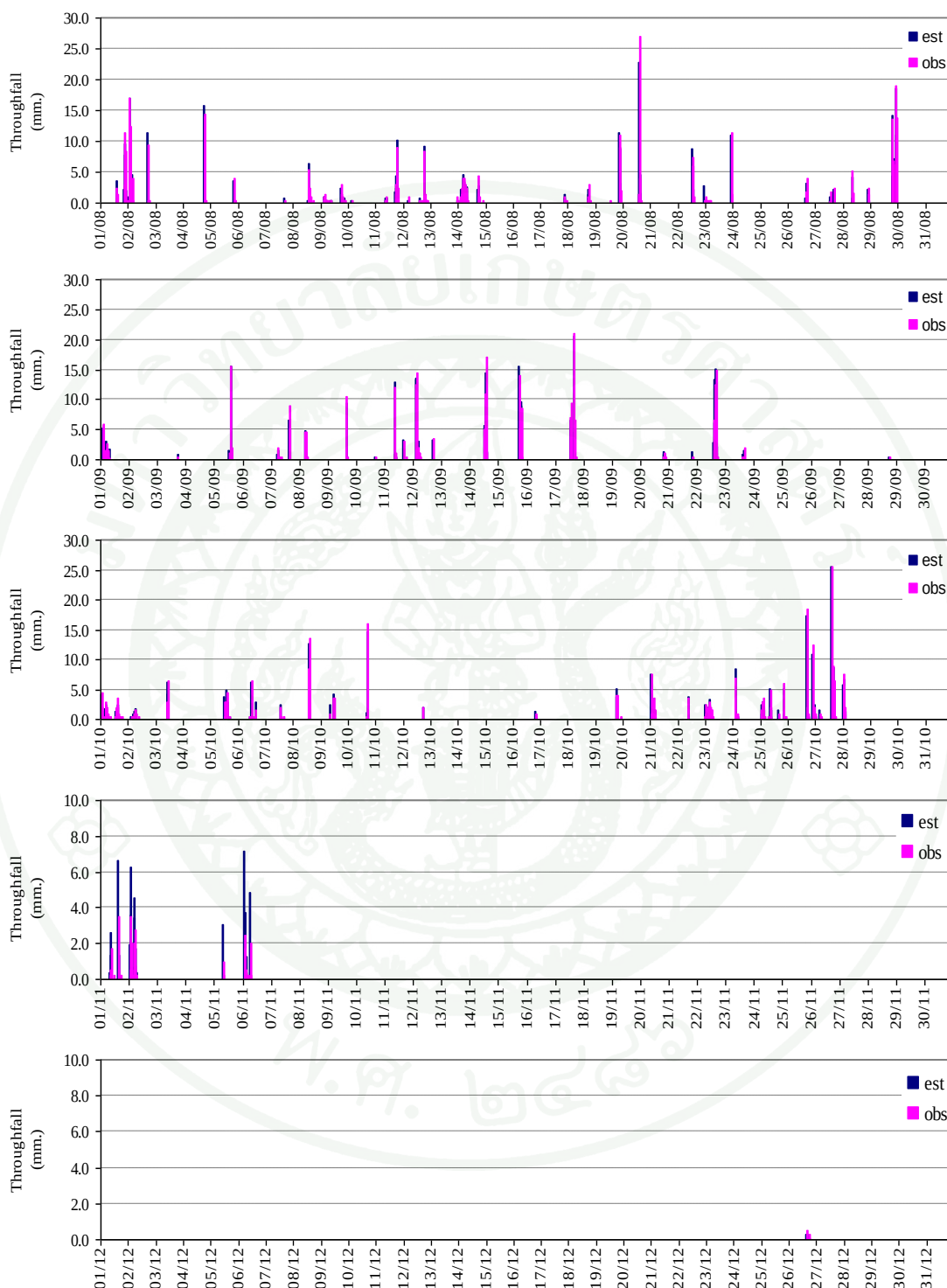
ภาพผนวกที่ 11 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลอง (est) และน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยบุญ จังหวัดเชียงใหม่ ราย 10 นาทีของเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2551



ภาพผนวกที่ 12 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลอง (est) และน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยบุญ จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนมกราคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ปี พ.ศ. 2551



ภาพผนวกที่ 13 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลอง (est) และน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยขุย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนมีนาคมถึงเดือนกรกฎาคม ปี พ.ศ. 2551



ภาพผนวกที่ 14 ปริมาณน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากแบบจำลอง (est) และน้ำฝนผ่านเรือนยอดจากการตรวจวัด (obs) บริเวณพื้นที่ป่าดิบเขา กลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่ ราย 30 นาทีของเดือนสิงหาคมถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2551

ตารางผนวกที่ 8 ผลการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำ กรณีสวนลื่นจีในปี โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาทีในปี พ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่

เดือน	พื้นที่ป่าดิบ				สวนลื่นจี				ร้อยละของผลต่างค่าการคายระเหยน้ำ				
	น้ำพืชชนิด	น้ำฝนผ่าน	การคายน้ำ	การคาย	น้ำพืชชนิด	น้ำฝนผ่าน	การคายน้ำ	การคายระเหยน้ำ	น้ำพืชชนิด	น้ำฝนผ่าน	การคายน้ำ	การคาย	ระเหยน้ำ
	(มม.)	เรือนยอด (มม.)	(มม.)	ระเหยน้ำ (มม.)	(มม.)	เรือนยอด (มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม./วัน)	(มม.)	เรือนยอด (มม.)	(มม.)	ระเหยน้ำ (มม.)
มกราคม	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
กุมภาพันธ์	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
มีนาคม	4.30	24.19	100.57	104.88	4.12	21.38	142.46	146.58	4.73	-4.21	-11.64	41.65	39.77
เมษายน	15.50	96.57	95.14	110.63	11.94	107.01	145.79	157.74	5.26	-22.91	10.80	53.25	42.58
พฤษภาคม	57.76	294.37	71.23	128.99	41.46	343.96	109.33	150.79	4.86	-28.22	16.85	53.50	16.91
มิถุนายน	43.01	115.71	56.01	99.02	24.01	138.63	115.08	139.08	4.64	-44.19	19.81	105.46	40.46
กรกฎาคม	32.44	142.29	61.31	93.75	20.67	151.80	119.03	139.70	4.51	-36.27	6.68	94.14	49.01
สิงหาคม	55.81	394.02	63.64	119.45	42.18	471.06	108.15	150.33	4.85	-24.43	19.55	69.94	25.85
กันยายน	33.48	324.49	62.66	96.14	26.72	371.58	111.40	138.11	4.60	-20.21	14.51	77.78	43.66
ตุลาคม	16.59	339.72	15.80	32.39	15.75	321.00	21.01	36.76	5.25	-5.04	-5.51	32.95	13.50
พฤศจิกายน	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ธันวาคม	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
รวม	258.89	1,731.37	526.36	785.25	186.85	1,926.40	872.25	1,059.10	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	32.36	216.42	65.79	98.16	23.36	240.80	109.03	132.39	4.84	-27.83	11.26	65.72	34.87

หมายเหตุ - คือ ค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองพื้นที่สวนลื่นจีที่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางลดลงจากพื้นที่ป่าดิบเขา

ตารางผนวกที่ 9 ผลการประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อการคายระเหยน้ำ กรณีสวนลำไยในปี โดยใช้ข้อมูลราย 30 นาทีในปี พ.ศ. 2551 บริเวณป่าดิบเขา ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่

เดือน	พื้นที่ป่าดิบ				สวนลำไย				ร้อยละของผลต่างค่าการคายระเหยน้ำ				
	น้ำพืชชนิด	น้ำฝนผ่าน	การคายน้ำ	การคาย	น้ำพืชชนิด	น้ำฝนผ่าน	การคายน้ำ	การคายระเหยน้ำ	น้ำพืชชนิด	น้ำฝนผ่าน	การคายน้ำ	การคาย	
	เรือนยอด (มม.)	เรือนยอด (มม.)	ระเหยน้ำ (มม.)	ระเหยน้ำ (มม.)	เรือนยอด (มม.)	เรือนยอด (มม.)	(มม.)	(มม.)	(มม./วัน)	เรือนยอด (มม.)	เรือนยอด (มม.)	ระเหยน้ำ (มม.)	ระเหยน้ำ (มม.)
มกราคม	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
กุมภาพันธ์	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
มีนาคม	4.30	24.19	100.57	104.88	8.04	17.46	143.30	151.34	4.88	86.90	-27.84	42.49	44.31
เมษายน	15.50	96.57	95.14	110.63	22.31	87.69	147.67	169.98	5.67	44.00	-9.20	55.22	53.64
พฤษภาคม	57.76	294.37	71.23	128.99	64.61	278.17	110.40	175.01	5.65	11.85	-5.50	55.00	35.68
มิถุนายน	43.01	115.71	56.01	99.02	41.36	154.07	116.13	157.49	5.25	-3.85	33.15	107.35	59.05
กรกฎาคม	32.44	142.29	61.31	93.75	32.84	118.82	119.45	152.30	4.91	1.24	-16.50	94.82	62.44
สิงหาคม	55.81	394.02	63.64	119.45	74.85	387.03	109.18	184.04	5.94	34.12	-1.77	71.56	54.07
กันยายน	33.48	324.49	62.66	96.14	44.19	307.82	112.69	156.88	5.23	31.99	-5.13	79.84	63.17
ตุลาคม	16.59	339.72	15.80	32.39	44.19	347.73	21.20	65.39	9.34	166.46	2.36	34.17	101.92
พฤศจิกายน	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ธันวาคม	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
รวม	258.89	1,731.37	526.36	785.25	332.41	1,698.79	880.02	1,212.43	-	-	-	-	-
เฉลี่ย	32.36	216.42	65.79	98.16	41.55	212.35	110.00	151.55	5.86	28.40	-1.88	67.19	54.40

หมายเหตุ - คือ ค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองพื้นที่สวนลำไยที่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางลดลงจากพื้นที่ป่าดิบเขา

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววิภารัตน์ ทองแดง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	23 พฤษภาคม 2527
สถานที่เกิด	สงขลา
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-