



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาล

ออกจากหลุมฝังกลบขยะ

Application of Computer Program to Simulate Contaminant Transport

in Groundwater from Landfills

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.กิจการ พรหมมา

มกราคม 2555

สัญญาเลขที่ R2554B819

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาล
ออกจากหลุมฝังกลบขยะ

Application of Computer Program to Simulate Contaminant Transport
in Groundwater from Landfills

รองศาสตราจารย์ ดร.กิจการ พรหมมา

มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

ชื่อเรื่อง การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาล
ออกจากหลุมฝังกลบขยะ

ผู้วิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.กิจการ พรหมมา

ประเภทนิพนธ์ รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พิสูจน์ผลการทำนายของการจำลองแบบการเคลื่อนที่ของน้ำชะขยะในน้ำบาดาล คำตอบโดเมนนิโคตตีดแปลงถูกใช้ทำนายพลูมน้ำชะขยะในระดับภาคสนามใน พ.ศ. 2544 ที่หลุมฝังกลบขยะบึงกอก อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก พลูมทำนายถูกพิสูจน์ใน พ.ศ. 2546-2552 และพบว่า พลูมจริงตรงกับพลูมทำนายเป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม พลูมจริงมีขนาดใหญ่กว่าพลูมทำนายเล็กน้อยเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการปฏิบัติงานในหลุมฝังกลบขยะ เช่น ความเข้มข้นของแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้นและมีน้ำชะขยะมากขึ้น คำตอบโดเมนนิโคตตีดแปลงได้ผ่านการสาธิตแล้วว่าใช้งานได้ดีระดับภาคสนาม การพิสูจน์ผลการทำนายคือวิธีหนึ่งที่ดีในการยืนยันว่าแบบจำลองการเคลื่อนที่ของมลสารในน้ำบาดาลใช้งานได้ที่หลุมฝังกลบขยะ

Title Application of Computer Program to Simulate Contaminant Transport
in Groundwater from Landfills

Author Associate Professor Kitchakarn Promma, Ph.D.

Type Final Report, Naresuan University, 2012

Abstract

This research post-audited contaminant transport modeling of a leachate plume. The modified Domenico solution was used to predict field-scale leachate plumes in groundwater in 2001 at Buengkok Landfill, Phitsanulok, Thailand. The predicted model was post-audited in 2003-2009 and found that observed plumes well matched the predicted ones. The observed plumes are, however, slightly ahead of the simulation because of changes in landfill operation such as increasing source concentrations and loading. The Domenico solution has demonstrated a good field-scale application. The post-audit of model prediction is a good way to validate application of a contaminant transport model at a landfill.

บทสรุปย่อสำหรับผู้บริหาร

1. รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย

1.1 ชื่อเรื่อง การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาล
ออกจากหลุมฝังกลบขยะ

Application of Computer Program to Simulate Contaminant
Transport in Groundwater from Landfills

1.2 ชื่อคณะผู้วิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.กิจการ พรหมมา

ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

คณะเกษตรศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยนเรศวร

อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 โทรศัพท์ 055-962732

1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำวิจัย

ได้รับงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ 2554 งบประมาณที่
ได้รับ 200,000 บาท ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ธันวาคม 2553 ถึง 30 พฤศจิกายน 2554

2. ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

องค์การบริหารส่วนตำบลยังขาดความรู้ความชำนาญในการจำลองเหตุการณ์การปนเปื้อน
และการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากหลุมฝังกลบขยะ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น
มาจากคำตอบประมาณของโดเมนนิโกมีความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้งาน เพราะคำตอบ
โดเมนนิโกเป็นคำตอบประมาณที่ไม่มีพจน์อินทิกรอลและประยุกต์ใช้ได้ในสเปรดชีท แต่แหล่งกำเนิด
เป็นระนาบแนวตั้งที่วางตั้งฉากกับทิศทางไหลของน้ำบาดาล การวิจัยนี้เน้นตัดแปลงคำตอบโดเมน
นิโกให้แหล่งกำเนิดเป็นสามมิติรูปทรงปริซึม แล้วทดสอบแบบจำลองในสถานที่จริง

3. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อทดลองประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากหลุมฝังกลบขยะ

4. ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยใช้วิธีตัดแปลงคำตอบโดเมนนิโกเดิมให้จำลองแหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมได้ จากนั้นเปรียบเทียบกับคำตอบจริงในอดีตโดยใช้โค้งมลสารและรูปแบบของเส้นชั้นความเข้มข้น แล้วทดลองที่หลุมฝังกลบขยะบึงกอก อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก

5. ผลการวิจัย

คำตอบโดเมนนิโกตัดแปลงจำลองแบบความเข้มข้นในบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดและท้องของพุ่มสูงกว่าค่าที่ได้จากคำตอบโดเมนนิโกเดิม แต่ให้ค่าใกล้เคียงกับคำตอบจริงในอดีต คำตอบโดเมนนิโกตัดแปลงช่วยให้การประมาณค่าความยาวและความเข้มข้นของพุ่มรวดเร็วขึ้น และสะดวกในการทดสอบปฏิกิริยาตอบสนองของความยาวและความเข้มข้นของพุ่มที่มีต่อตัวแปรต่าง ๆ ที่วัดได้จากภาคสนามเมื่อการจำลองแบบแหล่งกำเนิดสามมิติมีความสำคัญ การจำลองแบบ ณ หลุมฝังกลบขยะบึงกอกประสบความสำเร็จทั้งการประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าจริงและการพิสูจน์ผลการทำนาย

6. ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย

การจำลองแบบการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลโดยใช้คำตอบโดเมนนิโกตัดแปลงช่วยให้การจำลองแบบออกจากแหล่งกำเนิดสามมิติใช้งานง่ายและใช้งานได้จริงในภาคสนาม

7. การนำไปใช้ประโยชน์

ได้แบบจำลองโดยวิธีประมาณค่าที่สามารถจำลองแบบแหล่งกำเนิดเป็นสามมิติและจำลองแบบพุ่มเป็นสามมิติ หน่วยงานที่ควรนำผลงานวิจัยนี้ไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ องค์การบริหารส่วนตำบลกรมควบคุมมลพิษ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล และสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคและจังหวัด

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 สมการกำหนดพฤติกรรม	4
2.2 ลักษณะแหล่งกำเนิด	5
2.2.1 ตำแหน่งแหล่งกำเนิด	6
2.2.2 รูปทรงเรขาคณิตและมิติของแหล่งกำเนิด	6
2.2.3 ความเข้มข้นของแหล่งกำเนิด	7
2.3 คำตอบจริงโดยวิธีฟังก์ชันของกรีน	9
2.4 คำตอบของโดเมนนิโก.	13
3 วิธีดำเนินการวิจัย	17
3.1 คำตอบโดเมนนิโกเดิม	17
3.2 คำตอบโดเมนนิโกเดิม Yeh (1981) และ Huyakorn et al. (1987)	17
3.3 คำตอบโดเมนนิโกเดิมและ Park and Zhan (2001)	19
3.4 ความอ่อนไหวของโค้งมลสาร	19
3.5 การทดสอบที่หลุมฝังกลบขยะ	19

4 ผลการวิจัย	28
4.1 คำตอบโดเมนนิโกัดแปลง	28
4.2 การทดสอบกับคำตอบในอดีต	32
4.3 ความอ่อนไหวของตัวแปร	39
4.4 พลูมจำลองที่ผ่านการเปรียบเทียบกับของจริง	44
4.5 พลูมทำนายที่ผ่านการเปรียบเทียบกับของจริง	47
5 บทสรุป	49
5.1 อภิปรายผล	49
5.1.1 สถานการณ์จริง	49
5.1.2 ข้อจำกัดและการวิจัยในอนาคต	50
5.2 สรุป	51
บรรณานุกรม	53
ประวัติผู้วิจัย	57
ภาคผนวก	62

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	คำตอบจริงและประมาณในอดีต	11
2	คำตอบจริงสำหรับแหล่งกำเนิด uniform และ multivariate Gaussian	14
3	ข้อมูลทดสอบกับคำตอบในอดีตและความอ่อนไหวของตัวแปร	18
4	การออกแบบเพื่อจำลองที่หลุมฝังกลบขยะบึงกอก จังหวัดพิษณุโลก	21
5	คุณภาพน้ำบาดาล พ.ศ. 2544	24

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
1	รูปทรงเรขาคณิตของแหล่งกำเนิด	7
2	Parallelepiped source	15
3	พื้นที่ศึกษา	20
4	แบบจำลองกรอบแนวคิด	22
5	กริดสามมิติสำหรับใช้กับคำตอบของโดเมนนิโก	25
6	การวางกริดในพื้นที่ศึกษา	26
7	แหล่งกำเนิดรูปปริซึม	29
8	มุมแหล่งกำเนิดแนวราบและแนวตั้ง	31
9	คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลง (Modified Domenico solution, MDR) กับคำตอบ โดเมนนิโกเดิม (DR) ตามแกนพЛУมที่ $z = 0$ และ 1.5 เมตร	33
10	คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลง (MDR) กับคำตอบโดเมนนิโกเดิม (DR) คำตอบของ Huyakorn et al. (1987) (HUMS) และคำตอบของ Yeh (1981) (YEH)	35
11	คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลง (MDR) กับคำตอบโดเมนนิโกเดิม (DR) และคำตอบ ของ Park and Zhan (2001) (PZ) บนระนาบ xz	36
12	คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลง (MDR) กับคำตอบโดเมนนิโกเดิม (DR) และ คำตอบของ Park and Zhan (2001) (PZ) บนระนาบ yz	37
13	ความอ่อนไหวสูงของ α_x , α_y และ α_z ตามแกนพЛУม	40
14	ความอ่อนไหวสูงของมิติแหล่งกำเนิดตามแกนพЛУม	41
15	ความอ่อนไหวต่ำของ v_{sl}/v ตามแกนพЛУม	43
16	พЛУมจำลองที่ผ่านการเปรียบเทียบกับของจริง พ.ศ. 2544	44
17	โค้งมลสารของคลอไรด์ พ.ศ. 2544	46

18	พุ่มของคลอไรด์ที่ได้มาจากการทำนายและการพิสูจน์ตามแนวแกนพุ่ม	47
19	กราฟ 1:1 ระหว่างการจำลองแบบและของจริง	48

สัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์

ϕ	horizontal source angle [degree]
θ	vertical source angle [degree]
α_x , α_y and α_z	dispersivity in x, y and z directions [L]
b	aquifer thickness [L]
C	concentration of contaminant in groundwater [ML^{-3}]
C_0	source concentration in the aquifer [ML^{-3}]
$D_{x,y,z}$	coefficient of hydrodynamic dispersion in x, y and z directions [L^2T^{-1}]
erf	error function
$erfc$	complimentary error function
n	effective porosity [dimensionless]
t	time [T]
v	longitudinal velocity of contaminant transport [LT^{-1}]
v_{sl}	vertical velocity of source loading [LT^{-1}]
$x, y,$ and z	spatial coordinates or distance from source [L]
$X, Y,$ and Z	width, length, and thickness of source [L]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) ในประเทศไทยมีจำนวน 6,746 แห่ง ในแต่ละแห่งต้องจัดการขยะมูลฝอยกันเองโดยจัดหาหลุมฝังกลบที่ถูกสุขลักษณะและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและประชาชน แต่เนื่องจากงบประมาณจำกัดและการขาดประสบการณ์ในการควบคุมการก่อสร้างหลุมฝังกลบ การปูผ้ายาง การบดอัดดินหรือวัสดุรองกันบ่อที่ไม่มีคุณภาพดีพอจนทำให้เกิดการรั่วซึม ทำให้น้ำชะขยะไหลซึมลงไปปนเปื้อนน้ำบาดาลข้างใต้กองขยะ น้ำชะขยะเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกับน้ำบาดาลและไหลออกนอกพื้นที่ฝังกลบขยะมูลฝอยเข้าสู่ที่ดินข้างเคียงของประชาชนทั่วไปได้

ที่มาของปัญหาในการวิจัยนี้คือ อบต. ยังขาดความรู้ความชำนาญในการจำลองเหตุการณ์การปนเปื้อนและการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากหลุมฝังกลบขยะ ทำอย่างไรบุคลากรของ อบต. จึงจะสามารถจำลองการกระจายตัวและการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง เพื่อที่จะได้วางแผนในการบำบัดหรือจัดการปัญหามลพิษที่เกิดขึ้น หลุมฝังกลบขยะของ อบต. มีจำนวนมากกว่า 6,746 หลุม เพราะว่ามีหลุมเก่าที่ทิ้งขยะเต็มแล้วอีกจำนวนมาก หลุมขยะเหล่านี้เปรียบเสมือนระเบิดเวลาที่รอวันปะทุ ทราบได้ที่ประชาชนในพื้นที่ใกล้เคียงสูบน้ำบาดาลระดับตื้นขึ้นมาใช้ ประชาชนจะมีความเสี่ยงสูงที่ได้รับน้ำบาดาลที่ถูกปนเปื้อนจากสารพิษและใช้การไม่ได้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้จะเหมาะสมกับการนำไปใช้จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากหลุมฝังกลบขยะของ อบต. ได้อย่างเหมาะสม เพื่อหาคำตอบให้กับโจทย์วิจัยนี้ ข้าพเจ้าได้ค้นหาเบื้องต้นแล้วพบว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาจากคำตอบประมาณ (approximate solution) มีความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานนี้ จึงต้องการจะวิจัยอย่างลึกซึ้งต่อไปว่าสมมุติฐานนี้จะจริงหรือไม่

การจำลองแบบมลพิษในน้ำบาดาลโดยใช้คำตอบอนาไลติคัลถูกนำเสนอตั้งแต่วันที่ ค.ศ. 1960s เมื่อเปรียบเทียบกับคำตอบนัมเมอริคัลแล้วคำตอบอนาไลติคัลใช้งานได้ง่ายกว่า ใส่ตัวแปรได้ง่าย ถูกต้องและไม่มี numerical dispersion และ truncation errors และประมาณค่าการกระจายตัวของ plume ของมลพิษได้สำเร็จอย่างรวดเร็ว ดังนั้นแม้ว่าเราจะใช้คำตอบนัมเมอริคัลตั้งแต่วันที่ ค.ศ. 1970s แต่เรายังคงใช้คำตอบอนาไลติคัลอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบความถูกต้องของคำตอบนัมเมอริคัลอีกด้วย

สาขาวิชาการด้านนี้ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1961 เป็นต้นมา (Ogata and Banks, 1961; Schwartz, 1975; Yeh and Tsai, 1976; Cleary and Unga, 1978; Hunt, 1978; Wilson and Miller, 1978; Yeh, 1981; Codell et al., 1982; Domenico and Palciauskas, 1982; Sagar, 1982; Domenico and Robbins, 1985; Domenico, 1987; Galya, 1987; Gureghian, 1987; Huyakorn et al., 1987; Batu, 1989; Leij et al., 1991; Wexler, 1992; Batu, 1993; Leij et al., 1993; Serrano, 1996; Leij et al., 2000; Charbeneau, 2000; Walker and White, 2001; Park and Zhan, 2001; Guyonnet and Neville, 2004; Srinivasan et al., 2007; West et al., 2007; Aziz et al., 2009)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาจาก analytical solution มี 2 ชนิด ได้แก่ (1) คำตอบจริง (exact solution) ซึ่งมีพจน์ของ integration ค้างอยู่ (e.g., Huyakorn et al., 1987; Wexler, 1992; Leij et al., 2000; Walker and White, 2001; Park and Zhan, 2001) และ (2) คำตอบประมาณ (approximate solution) ซึ่งพร้อมใช้งานทันที (Domenico and Robbins, 1985; Domenico, 1987; Promma, 2010) ในที่นี้ Domenico solution (Domenico and Robbins, 1985) เป็นคำตอบประมาณที่นิยมใช้งานมากที่สุดเพราะว่าผู้ใช้งานสามารถใส่ค่าตัวแปรที่ตรวจวัดในภาคสนามได้ ได้แก่ ความเข้มข้นของน้ำชะขยะที่หลุมฝังกลบ ขนาดของหลุมฝังกลบ ความเร็วในการไหลของน้ำบาดาล เวลาที่ปลดปล่อยน้ำชะขยะ และค่า hydrodynamic dispersion coefficients

เมื่อเร็ว ๆ นี้ ข้าพเจ้าได้ตีพิมพ์ผลงานเกี่ยวกับทฤษฎีการจำลองแบบการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลแต่ยังขาดการประยุกต์ใช้งานกับสถานการณ์จริง ดังนั้นข้อเสนอการวิจัยนี้จะทดลอง

ประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากหลุมฝังกลบขยะในพื้นที่ศึกษาในประเทศที่มีข้อมูลมากพอให้ประเมินความเป็นไปได้ นอกจากนี้โจทย์วิจัยจะสอดคล้องกับประเด็นปัญหาที่พบในทุกตำบลของประเทศไทยซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งยวดและเร่งด่วนแล้ว การวิจัยเรื่องนี้ยังจะช่วยเพิ่มพูนองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับ “น้ำบาดาลระดับตื้น” ซึ่งมีข้าพเจ้าและคณะเป็นผู้บุกเบิกวิจัยและได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อทดลองประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากหลุมฝังกลบขยะ สถานที่ทดลองคือหลุมฝังกลบขยะบึงกอก อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยเน้นใช้ Domenico solution ในการจำลองแบบการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากหลุมฝังกลบขยะ ข้อมูลส่วนใหญ่ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองคือข้อมูลที่ได้มาจากหลุมฝังกลบขยะบึงกอก (กิจการ, 2546)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ใน proceedings ของการประชุมวิชาการนานาชาติ จำนวน 1 เรื่อง
2. ได้ทดลองประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองแบบการเคลื่อนที่มลพิษในน้ำบาดาลออกจากหลุมฝังกลบขยะซึ่งจะเลือกสถานที่ทดสอบที่เหมาะสมกับองค์การบริหารส่วนตำบล คำตอบของสมการเช่นนี้สะดวกต่อการนำไปใช้ในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ต้องมีการแก้ Integration ในสมการ
3. หน่วยงานที่สามารถนำผลการวิจัยไปใช้เผยแพร่ ได้แก่ องค์การบริหารส่วนตำบล กรมควบคุมมลพิษ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคและจังหวัด และกรมทรัพยากรน้ำ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการกำหนดพฤติกรรม

สมการแอดเวกชัน-ดิสเพอร์ชันของการเคลื่อนที่ของมลพิษในการไหลของน้ำบาดาลในทิศทางแกน x เขียนได้เป็น (Bear, 1979; Domenico and Schwartz, 1998)

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

โดยมีเงื่อนไขขอบเขตดังนี้ (Domenico and Robbins, 1985)

$$C(\pm\infty, \pm\infty, z, t) = 0 \quad -\infty < z < +\infty \text{ for infinite case} \quad (2)$$

$$0 \leq z < +\infty \text{ for semi-infinite case}$$

$$0 \leq z < b \text{ for finite case}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} C(x, y, 0, t) = 0 \quad \text{for semi-infinite case} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} C(x, y, 0, t) = \frac{\partial}{\partial z} C(x, y, b, t) = 0 \quad \text{for finite case} \quad (3b)$$

และมีเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับโดเมนและแหล่งกำเนิดตามลำดับดังนี้:

$$C(x, y, z, 0) = 0, \quad -\infty < z < +\infty \text{ for infinite case} \quad (4)$$

$$0 \leq z < +\infty \text{ for semi-infinite case}$$

$$0 \leq z < b \text{ for finite case}$$

$$C(x, y, z, 0) = C(\zeta, \eta, \zeta, 0), \quad (x, y, z) \in (\zeta, \eta, \zeta) \quad (5)$$

โดยที่ C ความเข้มข้นของสารมลพิษ [ML^{-3}]

D_x ค่าสัมประสิทธิ์ของไฮโดรไดนามิกดิสเพอร์ชันในทิศทางแกน x y และ z [L^2T^{-1}]

$$D_x = \alpha_x v, \quad D_y = \alpha_y v, \quad D_z = \alpha_z v$$

$\alpha_{x,y,z}$	ดิสเพอร์ซิวิตีตามยาว, ดิสเพอร์ซิวิตีตามขวางแนวราบ และดิสเพอร์ซิวิตีตามขวางแนวตั้ง ตามลำดับ
v	ความเร็วในการเคลื่อนที่ของสารมลพิษตามยาว [LT^{-1}]; $v = v_{gw}/R_f$
v_{gw}	ความเร็วในการไหลของน้ำบาดาล [LT^{-1}]; $v_{gw} = -(K/n)(\partial h/\partial x)$
K	ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้ [LT^{-1}]
n	ความพรุน [ไม่มีหน่วย]
$\partial h/\partial x$	ความลาดชันชลศาสตร์ [ไม่มีหน่วย]
R_f	ปัจจัยหน่วง [ไม่มีหน่วย]
λ	ค่าคงที่ของการสลายตัว [T^{-1}]; $\lambda = -\ln 2/t_{1/2}$
$t_{1/2}$	ครึ่งชีวิต [T]
x, y และ z	พิกัดตามแกนเทนเซอร์ของดิสเพอร์ชัน [L]
t	เวลา [T]

สังเกตว่า $+z$ เป็นทิศทางดิ่งลง สมการที่ 2 แสดงว่าชั้นน้ำมีความหนาไม่จำกัดหรือจำกัดก็ได้ สมการที่ 3 แสดงขอบเขตที่บ้น้ำ (Neumann condition) ที่ระนาบ $z = 0$ สำหรับกรณีชั้นน้ำแบบหนากิ่งอนันต์ โดยมีขอบเขตที่บ้น้ำที่ระนาบ $z = b$ สำหรับชั้นน้ำหนากิ่งอนันต์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้มีสมบัติเนื้อเดียวและไอโซโทรปิก แต่ค่าดิสเพอร์ซิวิตีที่เป็นแอนไอโซโทรปิกได้ เช่น $\alpha_x = 10\alpha_y = 100\alpha_z$

2.2 ลักษณะแหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิดมลพิษควบคุมรูปร่าง การกระจายตัว และความเข้มข้นในสามมิติ เขตแหล่งกำเนิดต้องพิจารณารูปร่างเรขาคณิต ความคงที่ของความเข้มข้นของแหล่งกำเนิด และประวัติการปล่อยมลพิษ รูปร่างเรขาคณิตของแหล่งกำเนิดที่จำลองแบบในอดีต ได้แก่ ไม่มีมิติ (จุด) หนึ่งมิติ (เส้น) สองมิติ (ระนาบ) และสามมิติ (ลูกบาศก์) คำตอบส่วนใหญ่ในอดีตใช้แหล่งกำเนิดที่มีความเข้มข้นคงที่ ส่วนแหล่งกำเนิดที่ไม่คงที่มีการศึกษาน้อยมากประมาณ 1 ครั้งในรอบ 1 ทศวรรษ

(Cleary and Ungs, 1978; Gureghian, 1987; Huyakorn et al., 1987; Serano, 1996; Walker and White, 2001)

2.2.1 ตำแหน่งแหล่งกำเนิด

กรอบแนวคิดของแบบจำลองส่วนใหญ่คือ วางแหล่งกำเนิดไว้ที่หรือใกล้เคียงกับขอบเขตด้านต้นน้ำบาดาล ในทางปฏิบัตินั้นแหล่งกำเนิดวางอยู่บนพื้นดินและมลพิษแพร่กระจายออกไปตามทิศทางทำynnน้ำบาดาลจากแหล่งกำเนิดในสามมิติ ตามแนวแกน x (longitudinal direction) แกน y (horizontal transverse direction) และแกน z (vertical transverse direction) เรานิยมจำลองการไหลเข้าของมลพิษโดยกำหนดให้ขอบเขตด้านหนึ่งเป็นขอบเขตไหลเข้าที่มีลักษณะการปลดปล่อยมลพิษที่จำลองตามสภาพความเป็นจริง

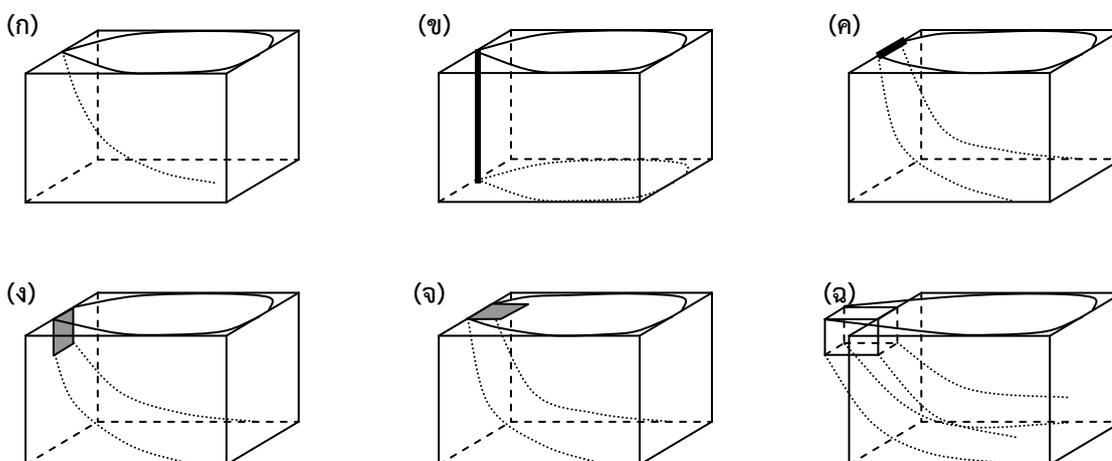
2.2.2 รูปทรงเรขาคณิตและมิติของแหล่งกำเนิด

มีแนวทางในการจำลองแหล่งกำเนิด 2 แบบ ดังนี้

- 1) ใส่แหล่งกำเนิดไว้ในสมการกำหนดพฤติกรรม
- 2) กำหนดให้แหล่งกำเนิดเป็นส่วนหนึ่งของขอบเขตไหลเข้า

ผลจากการจำลองแตกต่างกัน ดังนั้น ผู้จำลองแบบต้องตัดสินใจเลือกวิธีการจำลองแหล่งกำเนิดที่เหมาะสมกับสถานการณ์

แหล่งกำเนิดมีความสำคัญเพราะมันควบคุมรูปร่าง ขนาด และความเข้มข้นของพลุม มีการจำลองแหล่งกำเนิดหลายรูปทรง ได้แก่ (1) จุด (2) เส้นแนวตั้ง (3) เส้นแนวราบ (4) ระนาบแนวตั้ง (5) ระนาบแนวราบ และ (6) ลูกบาศก์ (รูปที่ 1) แต่ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาแหล่งกำเนิดสามมิติน้อย เช่น หลุมฝังกลบขยะและบ่อเหมืองทิ้งร้าง เพราะว่ายากเกินไปที่จะรวมข้อมูลนอกโดเมนในคำตอบหรือในแบบจำลอง



รูปที่ 1. รูปทรงเรขาคณิตของแหล่งกำเนิด (ก) จุด (ข) เส้นแนวตั้ง (ค) เส้นแนวราบ (ง) ระนาบแนวตั้ง (จ) ระนาบแนวราบ (ฉ) ลูกบาศก์ (ดัดแปลงจาก Huyakorn et al., 1987; Galya, 1987)

2.2.3 ความเข้มข้นของแหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิดมลพิษมีทั้งชนิดความเข้มข้นคงที่และไม่คงที่ เราอธิบายแหล่งกำเนิดที่ปล่อยมลพิษอย่างฉับพลันและมีความเข้มข้นคงที่ได้ดังนี้ (ดัดแปลงจาก Domenico and Robbins, 1985; Huyakorn et al., 1987)

$$F(x,y,z,t) = M, \quad -L < x < L, -W < y < W, z = 0, t > 0 \text{ (horizontal plane)} \quad (6a)$$

$$x = 0, -W < y < W, -H < z < H, t > 0 \text{ (vertical plane)}$$

$$L < x < -L, -W < y < W, -H < z < H, t > 0 \text{ (L-shaped plane)}$$

$$= 0, \quad \text{otherwise} \quad (6b)$$

โดยที่ F contaminant source term (Heaviside function)

M steady-state source strength [$ML^{-2}T^{-1}$]

L ความยาวของแหล่งกำเนิด [L]

W ความกว้างของแหล่งกำเนิด [L]

H ความหนาของแหล่งกำเนิด [L]

Gaussian distribution มีค่ามากที่สุดที่จุดศูนย์กลางแล้วมีค่าลดลงออกไปทางด้านนอก คำตอบสำหรับแหล่งกำเนิดที่ปล่อยมลพิษอย่างฉับพลันและมีความเข้มข้นไม่สม่ำเสมอแบบ univariate Gaussian distribution แสดงใน **สมการที่ 7** คำตอบสำหรับ bivariate Gaussian distribution ในทิศทาง xy, yz และ xz แสดงใน **สมการที่ 8** และคำตอบสำหรับ trivariate Gaussian distribution แสดงใน **สมการที่ 9** (ดัดแปลงจาก Huyakorn et al., 1987; Walker and White, 2001)

$$C(\xi,0) = C_x \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (7a)$$

$$C(\eta,0) = C_y \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (7b)$$

$$C(\zeta,0) = C_z \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (7c)$$

$$C(\xi,0)C(\eta,0) = C_x \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_x^2}\right) C_y \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_y^2}\right) = C_x C_y \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\eta^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (8a)$$

$$C(\eta,0)C(\zeta,0) = C_y C_z \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma_y^2} - \frac{\zeta^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (8b)$$

$$C(\xi,0)C(\zeta,0) = C_x C_z \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\zeta^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (8c)$$

$$C(\xi,0)C(\eta,0)C(\zeta,0) = C_x C_y C_z \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_x^2} - \frac{\eta^2}{2\sigma_y^2} - \frac{\zeta^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (9)$$

คำตอบสำหรับแหล่งกำเนิดที่ปล่อยมลพิษอย่างต่อเนื่องและมีความเข้มข้นคงที่แสดงใน **สมการที่ 10** สำหรับแหล่งกำเนิดที่ปล่อยมลพิษอย่างต่อเนื่องและมีความเข้มข้นไม่คงที่ $C_x = C_y = C_z = C_0$ โดยที่ความเข้มข้นสูงที่สุดอยู่ที่จุดกำเนิด **สมการที่ 7-9** เปลี่ยนเป็น

$$C(0,0,0,t) = C_0 \quad (10)$$

$$C(x,0) = C_0 \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (11a)$$

$$C(y,0) = C_0 \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (11b)$$

$$C(z,0) = C_0 \exp\left(\frac{-z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (11c)$$

$$C(x,y,0) = C_0^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (12a)$$

$$C(y,z,0) = C_0^2 \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (12b)$$

$$C(x,z,0) = C_0^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (12c)$$

$$C(x,y,z,0) = C_0^3 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (13)$$

2.3 คำตอบจริงโดยวิธีฟังก์ชันของกรีน

มีวิธีการ 2 อย่างที่ใช้แก้ **สมการที่ 1-5** (Walker and White, 2001)

1) แก้ **สมการที่ 1** ทั้งหมดตามขอบเขตที่กำหนดโดยใช้การแปลงอินทิกรัล (e.g., Gureghian, 1987; Leij et al., 1991; Wexler, 1992)

2) แยก สมการที่ 1-5 เป็นพจน์ x, y และ z จากนั้นแก้สมการในแต่ละพจน์แยกกันโดยใช้วิธีฟังก์ชันของกรีน (Green's function method, GFM) และสร้างคำตอบสามมิติโดยใช้หลักการคูณคำตอบหนึ่งมิติ (e.g., Carslaw and Jaeger, 1959; Haberman, 1983)

หลักการนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางการจำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลหลายครั้ง (Gringarten and Ramey, 1973; Yeh and Tsai, 1976; Yeh, 1981; Codell et al., 1982; Galya, 1987; Park and Zhan, 2001; Walker and White, 2001) ข้อดีของวิธีฟังก์ชันของกรีนคือ ความสะดวกในการสร้างคำตอบในหนึ่ง สอง หรือสามมิติตามความต้องการ

จาก สมการที่ 5 สำหรับชั้นน้ำความหนาที่อนันต์ การปรากฏขึ้นทันทีของแหล่งกำเนิดที่มีมวล (M) ในตำแหน่งแหล่งกำเนิดเขียนแสดงได้ว่า (Charbeneau, 2000; Walker and White, 2001)

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} C(\xi, \eta, \zeta, 0) d\xi d\eta d\zeta \quad (14a)$$

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} C(\xi, 0) d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} C(\eta, 0) d\eta \int_0^{+\infty} C(\zeta, 0) d\zeta \quad (14b)$$

ตามเงื่อนไขใน สมการที่ 2-4-14b คำตอบเป็นดังนี้

$$C(x, y, z, t) = X_d Y_d Z_d e^{-\lambda t} \quad (15)$$

$$C(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(\xi, 0) G(x, t | \xi, 0) d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} C(\eta, 0) G(y, t | \eta, 0) d\eta$$

$$\int_0^{+\infty} C(\zeta, 0) G(z, t | \zeta, 0) d\zeta e^{-\lambda t} \quad (16)$$

$$G(x, t | \xi, 0) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left[-\frac{(x - vt - \xi)^2}{4D_x t}\right] \quad (17a)$$

$$G(y, t | \eta, 0) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_y t}} \exp\left[-\frac{(y - \eta)^2}{4D_y t}\right] \quad (17b)$$

$$G(z, t | \zeta, 0) = \frac{2}{\sqrt{4\pi D_z t}} \exp\left[-\frac{(z - \zeta)^2}{4D_z t}\right] \quad (17c)$$

โดยที่ X_d, Y_d, Z_d คือ คำตอบหนึ่งมิติในทิศทางแกน x, y และ z ตามลำดับ

ตัวห้อย d แสดงหมายเลขของคำตอบจากการวิจัยต่าง ๆ (1 = Codell et al. (1982); 2 = Yeh (1981); 3 = Walker and White (2001); 4 = Domenico and Robbins (1985))

ตารางที่ 1 แสดงชุดของคำตอบชนิดสามมิติที่สะท้อนรูปทรงเรขาคณิตรูปแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 1. คำตอบจริงและประมาณในอดีต

แหล่ง	โดเมน	คำตอบ	แหล่งที่มา
จุด	$0 < x < \infty$	$X_1 = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_x t}} \exp\left[\frac{-(x-vt)^2}{4D_x t}\right]$	Codell et al. (1982)
จุด	$-\infty < y < \infty$	$Y_1 = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_y t}} \exp\left[\frac{-y^2}{4D_y t}\right]$	Codell et al. (1982)
จุด	$0 < z < b$	$Z_1 = \frac{1}{b} \left\{ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(m\pi \frac{z_s}{b}\right) \cos\left(m\pi \frac{z}{b}\right) \exp\left[-\left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 D_z t\right] \right\}$	Codell et al. (1982)
จุด	$0 < z < \infty$	$Z_{2a} = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_z t}} \exp\left[\frac{-z^2}{4D_z t}\right]$	Yeh (1981)
เส้น	$-\infty < y < \infty$	$X_2 = \frac{1}{2W} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x-vt + \frac{W}{2}}{\sqrt{4D_x t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-vt - \frac{W}{2}}{\sqrt{4D_x t}}\right) \right]$	Yeh (1981)
เส้น	$-\infty < y < \infty$	$Y_2 = \frac{1}{2L} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y + \frac{L}{2}}{\sqrt{4D_y t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y - \frac{L}{2}}{\sqrt{4D_y t}}\right) \right]$	Yeh (1981)
เส้น	$0 < z < \infty$	$Z_{2b} = \frac{1}{H} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z+H}{\sqrt{4D_z t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-H}{\sqrt{4D_z t}}\right) \right]$	Yeh (1981)
เส้น	$0 < z < b(H)$	$Z_3 = \frac{1}{H}$	Walker and White (2001)

ตารางที่ 1. (ต่อ)

แหล่ง	โดเมน	คำตอบ	แหล่งที่มา
ระนาบ	$-\infty < y < \infty$	$X_3 = \frac{m_x \sigma_x}{\sqrt{2D_x t + \sigma_x^2}} \exp \left[\frac{-(x - vt)^2}{2(2D_x t + \sigma_x^2)} \right]$	Walker and White (2001)
ระนาบ	$-\infty < y < \infty$	$Y_3 = \frac{m_y \sigma_y}{\sqrt{2D_y t + \sigma_y^2}} \exp \left[\frac{-y^2}{2(2D_y t + \sigma_y^2)} \right]$	Walker and White (2001)
ระนาบ	$0 < x < \infty$	$X_4 = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{\sqrt{4D_x t}} \right)$	Domenico and Robbins (1985)
ระนาบ	$-\infty < y < \infty$	$Y_4 = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y + \frac{L}{2}}{\sqrt{4D_y t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \frac{L}{2}}{\sqrt{4D_y t}} \right) \right]$	Domenico and Robbins (1985)
ระนาบ	$0 < z < \infty$	$Z_4 = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z + H}{\sqrt{4D_z t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z - H}{\sqrt{4D_z t}} \right) \right]$	Domenico and Robbins (1985)

2.4 คำตอบของโดเมนนิโก

แนวทางที่ใช้หาคำตอบคล้ายคลึงกับวิธีฟังก์ชันของกรีนใน **สมการที่ 15** Domenico and Schwartz (1998) แสดงกรอบแนวคิดในเรื่องนี้ดังนี้ (**ตารางที่ 2**)

$$\frac{C(x, y, z, t)}{C_0} = X_4 Y_4 Z_4 \quad (18)$$

Hunt (1978) เสนอคำตอบโดยประมาณสำหรับแหล่งกำเนิดที่ปล่อยมลพิษอย่างฉับพลันและมีความเข้มข้นคงที่ที่ออกมาจาก parallelepiped source (**รูปที่ 2**) Domenico and Robbins (1985) ขยายคำตอบประมาณนี้สำหรับแหล่งกำเนิดระนาบแนวตั้งที่ปล่อยมลพิษอย่างต่อเนื่องและมีความเข้มข้นคงที่โดยการต่อขยาย parallelepiped source ไปยัง ∞ ในทิศแกน $-x$ แนวคิดนี้คือใช้ infinite number ของแหล่งกำเนิดเส้นแนวราบ (Crank, 1979)

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_x t}} \int_x^\infty \exp\left(\frac{-\beta^2}{4D_x t}\right) d\beta = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{x/\sqrt{4D_x t}}^\infty \exp(-\gamma^2) d\gamma \quad (19)$$

โดยที่ β และ γ = dummy variables for integration; $\gamma = \beta/2(D_x t)^{0.5}$

เขียน **สมการที่ 19** ใหม่ได้เป็น (Crank, 1979)

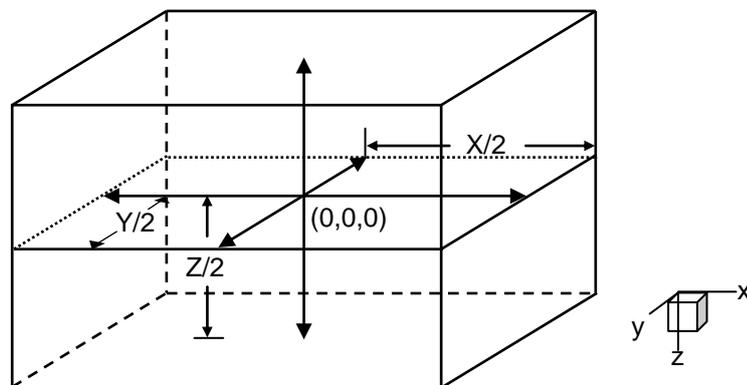
$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{\sqrt{4D_x t}} \right) \right] \quad (20)$$

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt}{\sqrt{4D_x t}} \right) + \exp\left(\frac{vx}{D_x}\right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt}{\sqrt{4D_x t}} \right) \right] \quad (21)$$

ตารางที่ 2. คำตอบจริงสำหรับแหล่งกำเนิด uniform และ multivariate Gaussian

ความคงที่ของ ความเข้มข้น	รูปทรง เรขาคณิต	การปล่อยมลพิษ	คำตอบ	ที่มา
คงที่	จุด	ต่อเนื่อง	$C(x, y, z, t) = X_1 Y_1 Z_{2a} e^{-\lambda t}$	1,2
คงที่	เส้น H	ต่อเนื่อง	$C(x, y, z, t) = X_2 Y_2 Z_{2a} e^{-\lambda t}$	2
คงที่	เส้น V	ต่อเนื่อง	$C(x, y, z, t) = X_2 Y_2 Z_{2a} e^{-\lambda t}$	2
คงที่	เส้น L	ต่อเนื่อง	$C(x, y, z, t) = X_2 Y_2 Z_{2a} e^{-\lambda t}$	2
คงที่	ระนาบ H	ต่อเนื่อง	$C(x, y, z, t) = X_2 Y_2 Z_{2a} e^{-\lambda t}$	2
คงที่	ระนาบ V	ต่อเนื่อง	$C(x, y, z, t) = X_2 Y_2 Z_{2a} e^{-\lambda t}$	5
คงที่	ระนาบ L	ต่อเนื่อง	$C(x, y, z, t) = X_2 Y_2 Z_{2b} e^{-\lambda t}$	2
Univariate x	ระนาบ H	ฉับพลัน	$C(x, y, z, t) = X_3 Y_3 Z_2 e^{-\lambda t}$	5
Univariate y	ระนาบ H	ฉับพลัน	$C(x, y, z, t) = X_3 Y_3 Z_2 e^{-\lambda t}$	5
Univariate y	ระนาบ V	ฉับพลัน	$C(x, y, z, t) = X_3 Y_3 Z_2 e^{-\lambda t}$	5
Univariate z	ระนาบ V	ฉับพลัน	$C(x, y, z, t) = X_3 Y_3 Z_2 e^{-\lambda t}$	5
Bivariate xy	ระนาบ H	ฉับพลัน	$C(x, y, z, t) = X_3 Y_3 Z_{2a} e^{-\lambda t}$	3
Bivariate yz	ระนาบ V	ฉับพลัน	$C(x, y, z, t) = X_3 Y_3 Z_2 e^{-\lambda t}$	5
Trivariate	ระนาบ L	ฉับพลัน	$C(x, y, z, t) = X_3 Y_3 Z_3 e^{-\lambda t}$	5

¹Codell et al. (1982); ²Yeh (1981); ³Walker and White (2001); ⁵Promma (2010); H = Horizontal; V = Vertical; L = L-shaped; แทน Z_{2a} โดย Z_1 สำหรับความหนาแน่นน้ำ b



รูปที่ 2. Parallelepiped source (ดัดแปลงจาก Domenico and Robbins, 1985)

สมการที่ 20 คือคำตอบโดยประมาณของคำตอบจริง สำหรับแหล่งกำเนิดจุดที่มีขอบเขตแบบ first-type (Dirichlet) (สมการที่ 7) ซึ่งแสดงโดย Ogata and Banks (1961) (สมการที่ 21) สมการที่ 21 ประมาณค่าได้เพราะว่าพจน์ที่ 2 มีค่าน้อยมากในการศึกษาภาคสนามและตีพิมพ์ชั้นมีอิทธิพลน้อยกว่าไฮโดรไดนามิกดิสเพอร์ชัน (Domenico and Schwartz, 1998; Charbeneau, 2000)

ในทางปฏิบัติ แหล่งกำเนิดในแนวตั้งปรากฏครั้งเดียวของทั้งหมด ให้ $H/2$ เป็น H นับจากจุดกำเนิดลงมาด้านล่าง จากการทำซ้ำ สมการที่ 19 แล้วอินทิเกรตจาก $y-W/2$ ถึง $y+W/2$ และ $z-H$ ถึง $z+H$ จะได้ (Domenico and Robbins, 1985)

$$\frac{C(y,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y + \frac{W}{2}}{\sqrt{4D_y t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \frac{W}{2}}{\sqrt{4D_y t}} \right) \right] \quad (22)$$

$$\frac{C(z,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z + H}{\sqrt{4D_z t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z - H}{\sqrt{4D_z t}} \right) \right] \quad (23)$$

รวมพจน์ใน สมการที่ 20, 22 และ 23 จะได้

$$C(x,y,z,t) = \left(\frac{C_0}{8}\right) \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x-vt}{\sqrt{4D_x t}}\right) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y+\frac{W}{2}}{\sqrt{4D_y t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-\frac{W}{2}}{\sqrt{4D_y t}}\right) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z+H}{\sqrt{4D_z t}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-H}{\sqrt{4D_z t}}\right) \right] \quad (24)$$

เราเรียก สมการที่ 24 ว่า คำตอบโดเมนนิโก (Domenico solution) มีการนำคำตอบนี้ไปใช้สร้างเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วใช้งานในภาคสนามหลายครั้ง (e.g., Fryar and Domenico, 1989; Ala and Domenico, 1992; Tong and Rong, 2002) ต่อมา Domenico (1987) ขยายผลเพื่อพิจารณา first-order kinetics reactions เช่น การสลายตัวทางกัมมันตรังสีและการสลายทางชีวภาพ

ปัจจุบันนี้มีกรอบแนวคิด 2 อย่าง อย่างแรกเชื่อตามคำตอบโดเมนนิโก แต่อีกฝ่ายหนึ่งคัดค้าน เช่น West et al. (2007) นำเสนอข้อผิดพลาดของคำตอบโดเมนนิโก และแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับคำตอบนี้ (BIOSCREEN และ BIOCHLOR) แต่ต่อมา Aziz et al. (2009) โต้แย้งว่า West et al. (2007) ผิดพลาด ทั้ง Guyonnet and Neville (2004) และ Srinivasan et al. (2007) ต่างยืนยันว่า คำตอบโดเมนนิโก ให้ผลดีและถูกต้องในแนวแกนพлум ในเงื่อนไขคือ (1) แอตเวกชันและดิสเพอร์ชันเชิงกลเด่น และ (2) ค่าดิสเพอร์ชันต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็วแอตเวกชันและระยะเวลาจำลองนานพอ คำตอบโดเมนนิโกจะให้ผลดีสมเหตุสมผลโดยเฉพาะความยาวของพлумตามแนวแกนพлумและยังคงมีประโยชน์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงถูกแปลงเป็นโปรแกรมลงในสเปรดชีทเอ็กเซล (EXCEL spreadsheet) ข้อมูลใน ตารางที่ 3 ถูกใช้ในคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงถูกใช้เพื่อทดสอบกับคำตอบโดเมนนิโกเดิมและคำตอบจริงอื่น ๆ ดังนี้

3.1 คำตอบโดเมนนิโกเดิม

คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงผ่านการทดสอบกับคำตอบโดเมนนิโกเดิม โดยการคำนวณความเข้มข้นสัมพันธ์ตามแนวแกนพลูม ($y = 0$) โค้งมลสาร (breakthrough curve) จำนวน 2 อัน ครอบคลุมบนตำแหน่ง $z = 0$ เพื่อทดสอบความเข้มข้นสัมพันธ์สูงสุดบนแกนพลูม และที่ $z = 1.5$ เพื่อประเมินความเข้มข้นสัมพันธ์ใกล้กับห้องของพลูม สังเกตว่าดิสเพอร์ซิวิตีได้มาจากผลงานวิจัยของ Gelhar et al. (1992) ยกตัวอย่างเช่น ที่ระดับภาคสนาม 100–1,000 เมตร α_x มีค่า 10 เท่าสูงกว่า α_y และมีค่า 100 เท่าสูงกว่า α_z ในกรณีนี้ α_x ถูกสมมุติให้มีค่าเท่ากับ 1 เมตร และ α_y และ α_z มีค่า 0.1 และ 0.01 เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ v มีค่าสูงกว่า v_{sl} 10 เท่า

3.2 คำตอบโดเมนนิโกเดิม Yeh (1981) และ Huyakorn et al. (1987)

คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงถูกทดสอบเปรียบเทียบกับคำตอบโดเมนนิโกเดิม และคำตอบจริงของ Yeh (1981) และ Huyakorn et al. (1987) โดยการคำนวณความเข้มข้นสัมพันธ์ตามแนวแกนพลูม เพื่อสร้าง รูปที่ 7 ของงานวิจัยของ Huyakorn et al. (1987) ขึ้นใหม่ สังเกตว่าดิสเพอร์ซิวิตี α_x มีค่าสูงกว่า α_y และ α_z 10 เท่า นอกจากนี้ v มีค่าสูงกว่า v_{sl} 10 เท่า

ตารางที่ 3. ข้อมูลทดสอบกับคำตอบในอดีตและความอ่อนไหวของตัวแปร

ตัวแปร	MDR-DR solutions	MDR-DR- HUMS-YEH solutions	MDR-DR- PZ solutions (xz- plane)	MDR-DR- PZ solutions (yz- plane)	MDR sensitivity analysis
x (m)	0-150	800	0-20	20	0-150
y (m)	0	0	0	0-10	0
z (m)	0, 1.5	0	0-5	0-5	0
t (day)	730	1.46×10^8	730	730	730
C_0 (mgL ⁻¹)	1	1	1	1	1
q_v (gm ⁻³ day ⁻¹)	-	9,344	0.01	0.01	-
v (mday ⁻¹)	0.1	0.082	0.1	0.1	0.1
v_{sl} (mday ⁻¹)	0.01	0.1v	0.001-0.1	0.001-0.1	0.01v-100v
α_x (m)	1	15.4	1	1	1,10
α_y (m)	0.1	1.54	0.5	0.5	0.01,0.1,1
α_z (m)	0.01	1.54	0.3	0.3	0.001,0.01,0.1,1
X (m)	1	Y, Z (MDR)	5	5	0.01Z-100Z
Y (m)	1	243.8	2 (PZ = 1)	2 (PZ = 1)	0.01Z-100Z
Z (m)	1	10	2	2	1
b (m)	Infinite	40	5 (PZ)	5 (PZ)	Infinite
λ (day ⁻¹)	0	0	0	0	0
σ (m)	-	97.3	-	-	-

หมายเหตุ DR = Domenico and Robbins (1985), MDR = Modified Domenico and Robbins (การวิจัยนี้), HUMS = Huyakorn et al. (1987), YEH = Yeh (1981), PZ = Park and Zhan (2001), λ = decaying constant, σ = standard deviation of Gaussian source

3.3 คำตอบโดเมนนิโกเดิมและ Park and Zhan (2001)

คำตอบโดเมนนิโกเดิมถูกทดสอบเปรียบเทียบกับคำตอบโดเมนนิโกเดิม และคำตอบจริงของ Park and Zhan (2001) โดยการถ่ายภาพตัดขวาง **รูปที่ 3** ของ Park and Zhan (2001) จำนวน 2 ภาพ และเปรียบเทียบรูปแบบของเส้นชั้น เส้นชั้นหนึ่งอยู่ในแนวกึ่งกลางของพลูม (xz -plane ที่ $y = 0$ เมตร) เพื่อแสดงการลงลึกของพลูม อีกเส้นชั้นหนึ่งอยู่ในแนวขวาง yz -plane ที่ $x = 20$ เมตร เพื่อประเมินปลายของพลูม

สำหรับระนาบ yz การจำลองแบบทำบนด้านขวาเท่านั้น เพราะว่าด้านตรงกันข้ามคือเงาสะท้อนของสมมาตร สังเกตว่าในการวิจัยนี้ ค่าดิสเพอร์ซีวิตี้ได้มาจาก Park and Zhan (2001) นั่นคือ α_x , α_y และ α_z มีค่าเท่ากับ 1, 0.5 และ 0.3 ตามลำดับ ข้อแตกต่างจากการทดสอบก่อนหน้านี้คือค่า v คงที่เท่ากับ 0.1 เมตรต่อวัน แต่ v_{sl} มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 0.1 เมตรต่อวันเป็น 0.01 และ 0.001 เมตรต่อวัน เพื่อประเมินผลกระทบของ v_{sl} ที่มีต่อรูปแบบของเส้นชั้นของความเข้มข้นเท่ากัน

3.4 ความอ่อนไหวของโค้งมลสาร

ความอ่อนไหวของโค้งมลสารถูกทดสอบโดยใช้คำตอบโดเมนนิโกเดิมที่ดัดแปลงตามแนวแกนพลูมตัวแปรมีดังนี้

1. ดิสเพอร์ซีวิตี้ ซึ่งใช้ค่านวณ ϕ
2. v_{sl}/v ซึ่งใช้ค่านวณ θ
3. อัตราของมิติขนาดแหล่งกำเนิด (X/Z , X/Y และ Y/Z) เพื่อศึกษาผลกระทบของความกว้าง

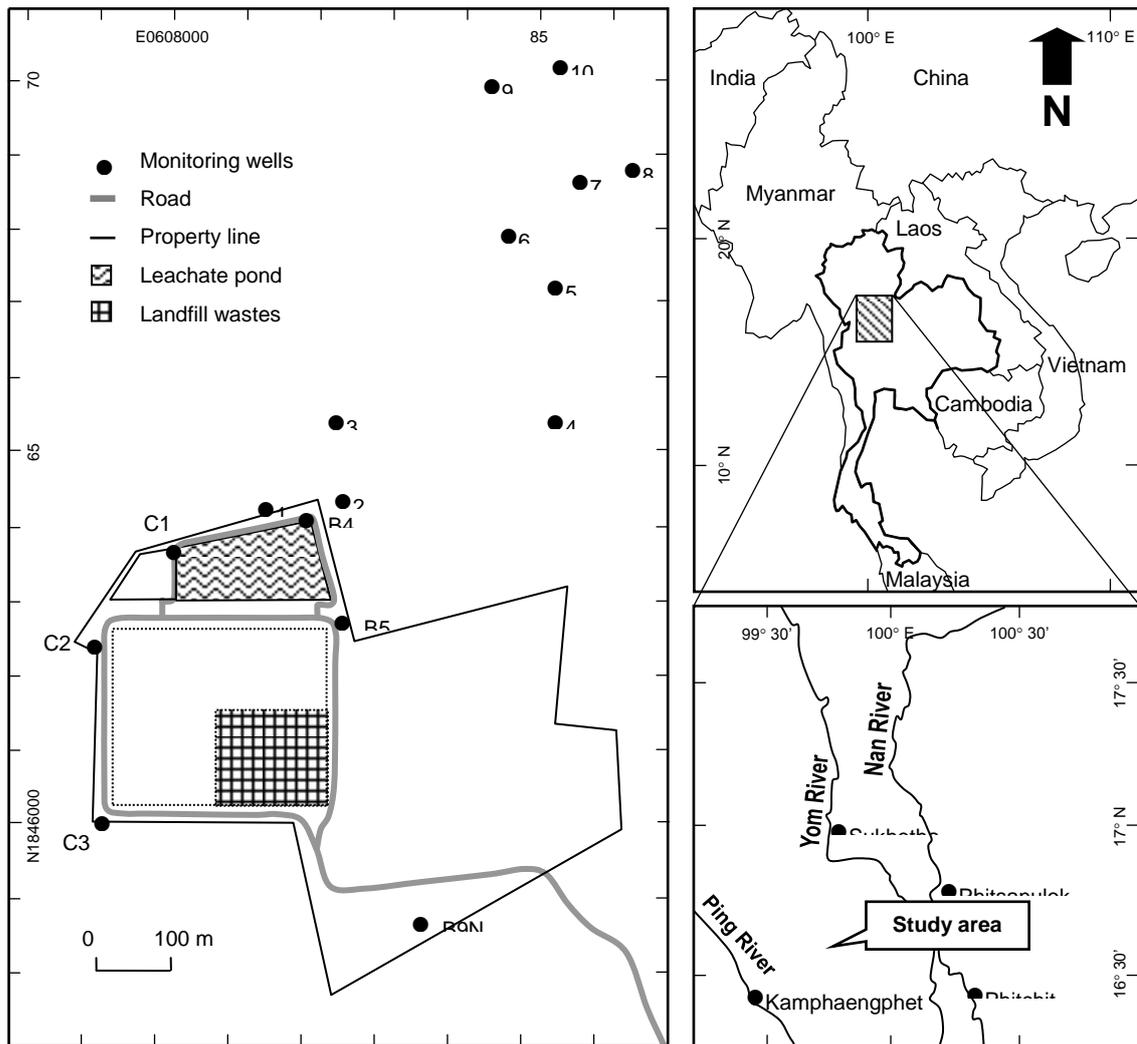
ของพลูมที่มีต่อพลูมโดยรวม

3.5 การทดสอบที่หลุมฝังกลบขยะ

1) พื้นที่ศึกษา

ตั้งอยู่ที่ตำบลบึงกอก อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก (**รูปที่ 3**) ใช้เป็นสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 ของเทศบาลนครพิษณุโลก ผมได้ร่วมกับทางเทศบาลติดตั้งบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลโดยรอบหลุมฝังกลบและบ่อบำบัดน้ำเสีย ชั้นน้ำที่วางตัวอยู่ข้างใต้หลุมฝังกลบ ชั้นน้ำลึก

8-11 m ใต้ผิวดิน และหนา 6-11 m ค่า longitudinal hydraulic conductivity ได้มาจากการสูบ
 ทดสอบวิธี Cooper-Jacob straight-line method (Cooper and Jacob, 1946) มีค่า 98.7 md^{-1}
 ผลการคำนวณพบว่าน้ำบาดาลไหลด้วยความเร็ว 0.5 md^{-1} พื้นที่ศึกษามีผลการตรวจวิเคราะห์
 คุณภาพน้ำบาดาลพร้อมให้ทำการจำลอง



รูปที่ 3. พื้นที่ศึกษา หลุมฝังกลบขยะเทศบาลนครพิษณุโลก อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก

2) แบบจำลองกรอบแนวคิด

ทำการออกแบบจำลองกรอบแนวคิด การไหลลงของมลพิษเกิดขึ้นในแนวตั้ง มีการแพร่กระจายจากขวาไปทางด้านซ้าย มีการจัดวางแหล่งกำเนิดใหม่ให้ขนานกับทิศทางการไหลของน้ำบาดาล N23°E บ่อบำบัดน้ำเสียมีก้นลึก 3 m มีระยะห่างจากชั้นน้ำ 6.7 m ขนาดของแหล่งกำเนิดคือ $87 \times 227 \times 3 \text{ m}^3$ ตารางที่ 4 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จะใช้ในการจำลอง

ตารางที่ 4. การออกแบบเพื่อจำลองที่หลุมฝังกลบขยะบึงกอก จังหวัดพิษณุโลก

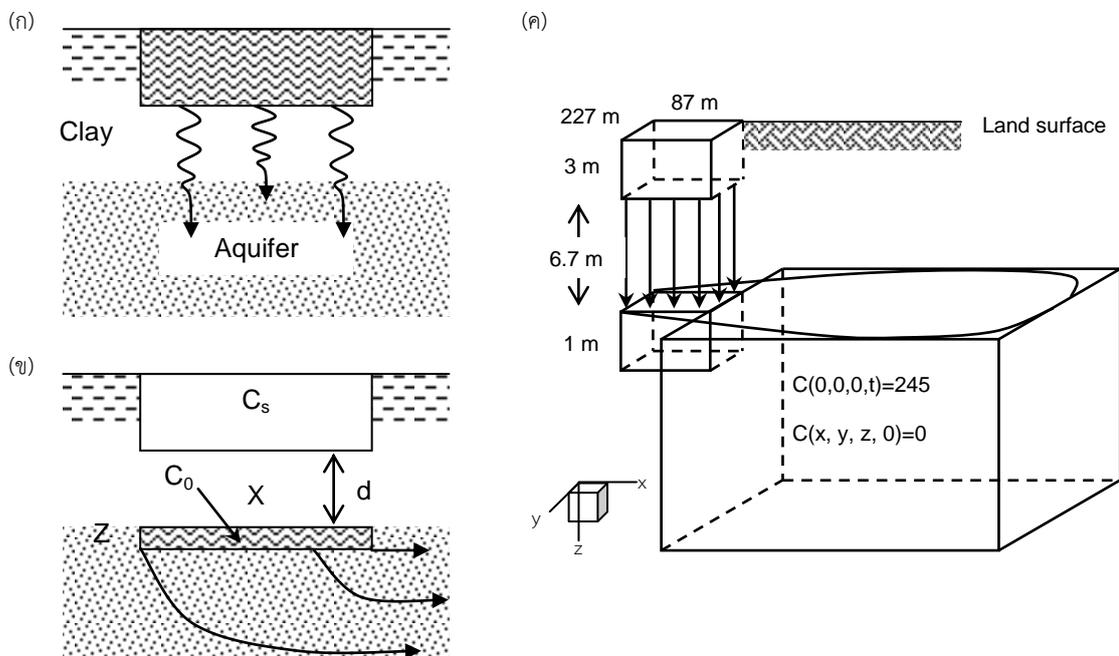
Parameters	Simulation type	
	Steady state	Transient
x	20 m x 60 columns	50 m x 80 columns
y	50 m x 13 rows	0 m
z	2 m x 6 layers	0 m
t	1,030 d	4 steps x 2 yr
C_s	$1,460 \text{ mgL}^{-1}$	$1,460 \text{ mgL}^{-1}$
R_{fs}	0.025 m^{-1}	0.025 m^{-1}
d	6.7 m	6.7 m
C_0	245 mgL^{-1}	245 mgL^{-1}
b	10.5 m	10.5 m
K	98.7 md^{-1}	98.7 md^{-1}
n	0.3	0.3
R_f	1	1
v_{gw}	0.5 md^{-1}	0.5 md^{-1}
v	0.5 md^{-1}	0.5 md^{-1}
v_{sl}	0.05 md^{-1}	0.05 md^{-1}
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$	10, 0.1, 0.01 m	10, 0.1, 0.01 m
X	87 m	87 m
Y	227 m	227 m
Z	1 m	1 m

3) การแบ่งส่วน

การออกแบบกริดเพื่อจำลอง steady-state แตกต่างจาก transient (ตารางที่ 4) โดยที่ steady-state model มีขนาด $1,200 \times 650 \times 12 \text{ m}^3$ ประกอบด้วย 13 rows 60 columns 6 layers ในแต่ละ cell มีขนาด $50 \times 20 \times 2 \text{ m}^3$ การจำลองจะทำตามแนว x-axis ส่วน transient model การทำนายจะแบ่งเป็น 80 columns แต่ละ node ห่างกัน 50 m การทำนายจำลองแบบที่ความลึก 5 m ซึ่งเป็นระดับของท่อกรอง

4) การย้ายตำแหน่งแหล่งกำเนิดและการเอียงตัว

ในแบบจำลองกรอบแนวคิด แหล่งกำเนิดถูกวางในตำแหน่งที่ inflow boundary แทนที่จะวางไว้บนดินเพื่อใช้คำตอบของโดเมนนิโก (รูปที่ 4) เนื่องจากแหล่งกำเนิดมลพิษของจริงไม่เจาะลึกลงไปใ้ชั้นน้ำ จึงจำเป็นต้องสมมติให้แหล่งกำเนิดเข้าไปในชั้นน้ำลึก 1 m เป็นความหนาของแหล่งกำเนิด (Z) สมมุติฐานนี้ง่ายเพื่อเปรียบเทียบกับความหนาของแหล่งกำเนิด Z ค่าอื่น ๆ ที่หนาหรือบางกว่า 1 m นอกจากนี้ยังได้วางแหล่งกำเนิดให้เอียงขนานกับกริด และปรับขนาดเป็น $87 \times 227 \times 1 \text{ m}^3$



รูปที่ 4. แบบจำลองกรอบแนวคิด (ก) แหล่งกำเนิดจริงบนพื้นดิน (ข) แหล่งกำเนิดที่ใช้ในคำตอบของโดเมนนิโก (ค) ที่บึงกอกใช้หนา 1 m ลึก 6.7 m ใต้กันแหล่งกำเนิดจริง

5) ความเข้มข้นของแหล่งกำเนิด

มีการเจือจางของแหล่งกำเนิดเนื่องจากเกิด preferential flow ในชั้นดินและการผสมกับ น้ำบาดาลดังนี้

$$C_0 = R_{fs} d C_s \quad (25)$$

โดยที่ C_0 = model source concentration [ML^{-3}]

C_s = source concentration at original location [ML^{-3}]

R_{fs} = source retardation factor [L^{-1}]

d = spacing between original source bottom and the top of aquifer [L]

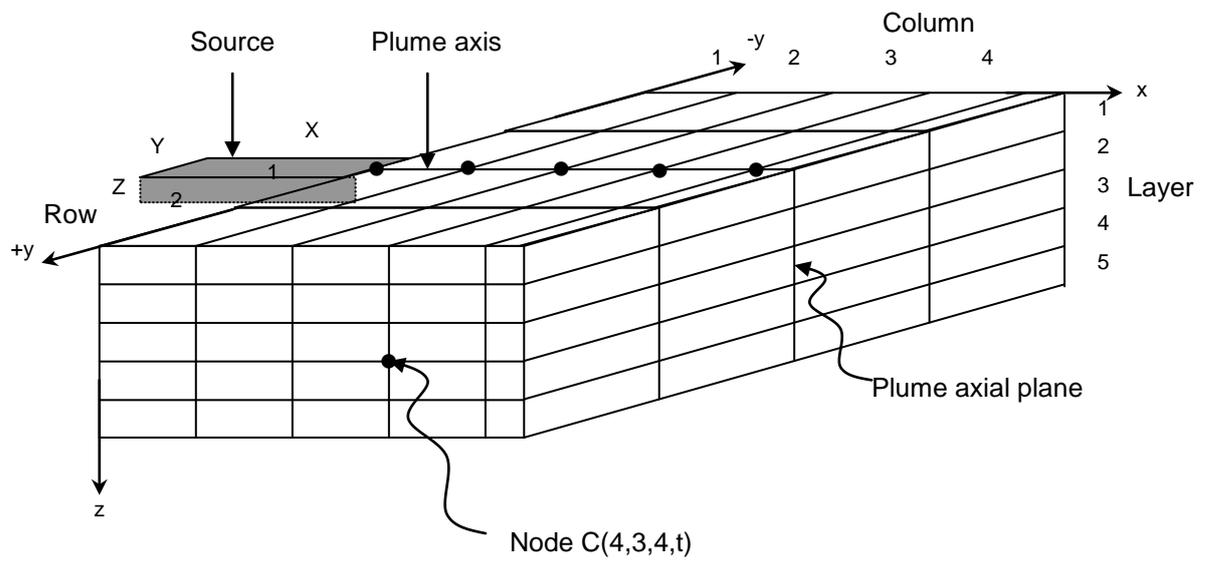
ในพื้นที่ศึกษาได้ใช้วิธีลองผิดลองถูกและพบว่า R_{fs} มีค่าเท่ากับ 0.025 m^{-1} ลบค่าความลึกของ ก้นบ่อน้ำชะขยะ (3 m) ออกจากความลึกของส่วนบนสุดของชั้นน้ำ (9.7 m) จะได้ค่า d เท่ากับ 6.7 m จาก ตารางที่ 5 C_s ของคลอไรด์มีค่า $1,460 \text{ mgL}^{-1}$ แทนค่าใน สมการที่ 25 จะได้ C_0 มีค่าเท่ากับ 245 mgL^{-1}

6) กริด

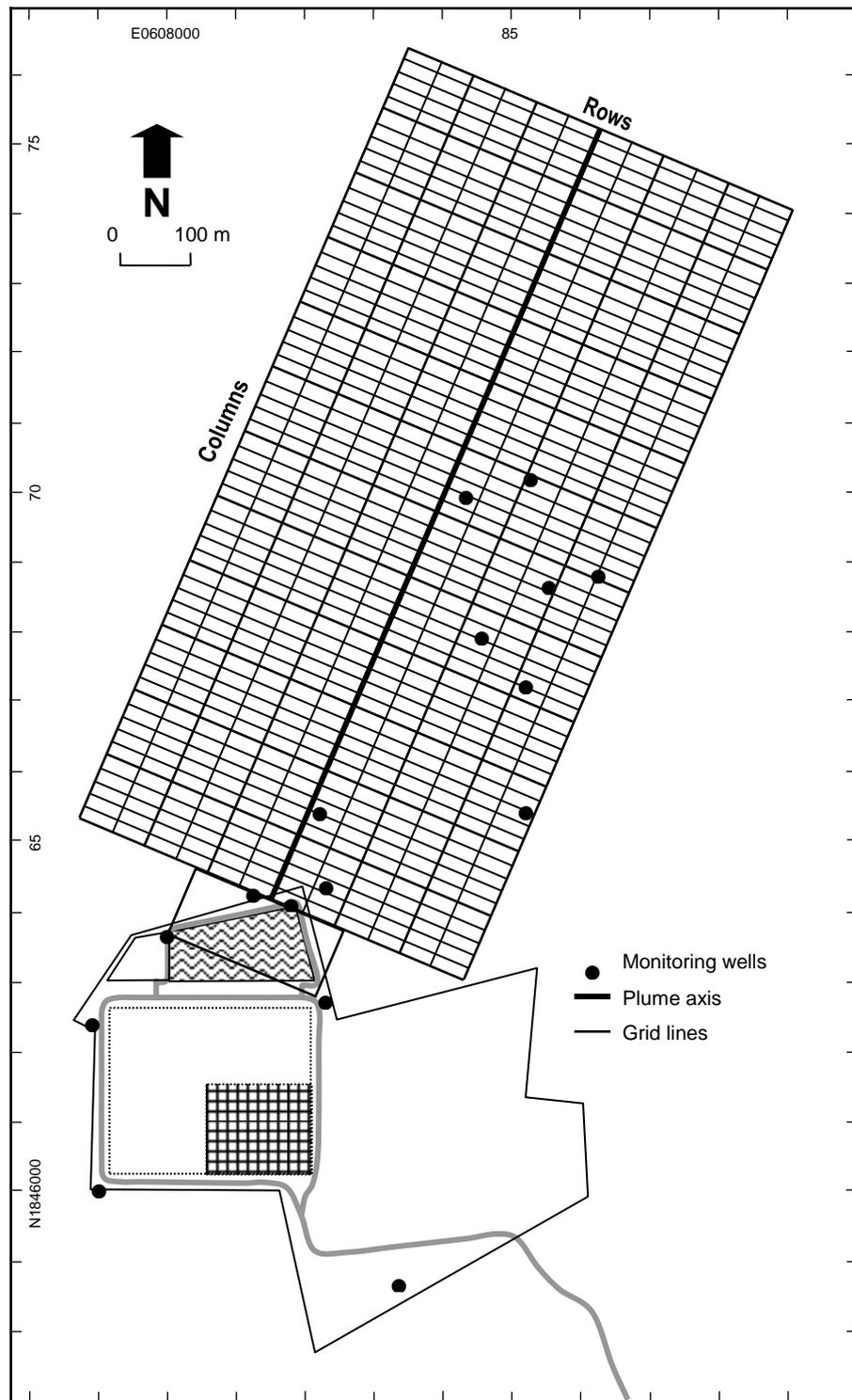
กริดเป็นแบบ mesh-centered finite-difference (รูปที่ 5) แถวแรกคือแกนพлум ($x, 0, 0$) ระบาย $x = 0$ คือระบายแกนพлум อีกด้านหนึ่งของพлумคือภาพสะท้อนผ่านระบายแกนพлум โหนดแรก กำหนดไว้ที่จุดกำเนิด ($0, 0, 0$) จากนั้นเรียงแหล่งกำเนิดและกริดให้ขนานกับทิศทางการไหลของ น้ำบาดาล N23°E (รูปที่ 6) การจำลองแบบทำในด้านขวาของพлумโดยทำที่ละโค้งมลสาร ภาพสามมิติ ได้มาจากการแปรเปลี่ยนค่า y และ z ตารางที่ 4 แสดงว่า โดเมนในการจำลองแบบ steady-state มี จำนวน 13 แถว \times 60 สดมภ์ \times 6 ชั้น แต่ในการจำลองแบบ transient มีจำนวนสดมภ์เท่ากับพлумใน อนาคตที่จะขยายไปข้างหน้า ในแบบจำลอง steady-state โดเมนมีขนาด $1,200 \times 650 \times 12 \text{ m}^3$ แต่ ละเซลล์มีขนาด $50 \times 20 \times 2 \text{ m}^3$ แต่ละโนดห่างกัน 50 m

ตารางที่ 5. คุณภาพน้ำบาดาล พ.ศ. 2544

Parameters	Leachate	Well B4	Well B5	Well B9N	Well C1	Well C2	Well C3	QA-B5
pH	8.41	6.42	7.04	6.42	6.23	6.19	6.07	7.04
T (°C)	30.93	28.90	29.46	29.23	28.79	29.30	28.47	29.46
SC (μScm^{-1})	8,755	1,460	2,138	384	446	450	306	2,138
DO (mgL^{-1})	9.87	0.03	0.83	0.23	0.26	0.67	0.88	0.83
TDS (mgL^{-1})	5,020	990	1,300	282	272	288	254	1,285
Na ⁺ (mgL^{-1})	1,058	145	252	64	52	42	38	250
K ⁺ (mgL^{-1})	160	2.2	0.1	2.8	2.3	0.4	2.0	0.1
Ca ²⁺ (mgL^{-1})	410	82.5	64.1	20.4	21.1	27.6	24.9	63.0
Mg ²⁺ (mgL^{-1})	99.6	25.5	26.2	7.9	7.1	10.7	7.7	27.4
Cl ⁻ (mgL^{-1})	1,460	240	175	4	29	27	10	174
HCO ₃ ⁻ (mgL^{-1})	2,242.0	398.7	787	281.1	170.3	201.3	176.5	780
CO ₃ ²⁻ (mgL^{-1})	22.81	0.03	0.52	0.04	0.01	0.02	0.01	0.4
SO ₄ ²⁻ (mgL^{-1})	23	9.7	7	4.2	5.4	2.6	7.9	9
Fe (mgL^{-1})	23	13.5	11	9.1	7.5	6.8	20	10
Cd (mgL^{-1})	0.004	0.003	0.001	0.003	0.002	0.002	0.003	0.001
Hg (mgL^{-1})	0.004	<0.001	<0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	<0.001
Mn (mgL^{-1})	19.10	1.33	0.98	0.21	1.46	0.51	1.76	0.9
Ni (mgL^{-1})	0.106	0.022	0.020	0.011	0.001	0.037	0.023	0.010
Pb (mgL^{-1})	0.188	0.048	0.042	0.055	0.015	0.047	0.021	0.04
charge balance (%)	-0.25	-3.56	-4.89	-3.05	3.07	-0.25	3.48	-4.73



รูปที่ 5. กริดสามมิติสำหรับใช้กับคำตอบของโดเมนนิโก



รูปที่ 6. การวางกริดในพื้นที่ศึกษา

7) ค่าตัวแปร

ค่าตัวแปรยกเว้นดิสเพอร์ซิวิตีที่ได้มาจากการสำรวจในภาคสนาม ค่าดิสเพอร์ซิวิตีที่แนวขวางมีค่าน้อยกว่าแนวยาว 100 เท่า (Gelhar et al., 1992) โดเมนมีสมบัติโฮโมจีเนียสและไอโซทรอปิก ค่าเริ่มต้นคือค่าธรรมชาติของคลอไรด์ในพื้นที่ศึกษาซึ่งมีค่าเท่ากับ $4-29 \text{ mgL}^{-1}$ แต่ในทางปฏิบัติได้กำหนดให้เป็น 0 สมมุติฐานนี้ชี้ว่า การจำลองแบบนอกหน้าพุ่มไม้ได้พิจารณาค่าธรรมชาติ

8) การประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าจริงและการพิสูจน์การทำนาย

คำตอบของโดเมนนิโกถูกนำไปดัดแปลงลงในโปรแกรม EXCEL spreadsheet ตารางที่ 5 แสดงข้อมูล 2 ปีที่ใช้แสดงพุ่มของคลอไรด์ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2544 การประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าจริงใช้วิธีลองผิดลองถูก ในพื้นที่ศึกษาใช้ stress period เท่ากับ 1,030 d (กุมภาพันธ์ 2542 – ธันวาคม 2544) เป้าหมายของการประมวลผลคือ residual mean ของคลอไรด์น้อยกว่า 10 mgL^{-1} วิธีการประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าจริงใช้หลักการของ Zheng and Bennett (2002) มีการทดสอบความอ่อนไหวของสัมประสิทธิ์ของการซึมได้และดิสเพอร์ซิวิตี หลังจากการประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าจริงสิ้นสุดลง ได้ทำนายพุ่มจากเดือนธันวาคม 2544 ไปถึงธันวาคม 2552 โดยใช้ time step จำนวน 4 ครั้ง รอบละ 2 ปี

การพิสูจน์ผลการทำนายทำทุก ๆ 2 ปี ใน พ.ศ. 2546, 2548, 2550 และ 2552 จุดข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบคือ บ่อหมายเลข B4 และ 1-10 ในการเปรียบเทียบได้ใช้ความเข้มข้นที่ความลึก $z = 0 \text{ m}$ เพราะว่าการพิจารณาความเข้มข้นสูงสุด อีกทั้งน้ำบาดาลที่เก็บตัวอย่างมาได้มาจากความลึก 0-3 m การเปรียบเทียบทำในโค้งมลสารและกราฟ 1:1

บทที่ 4

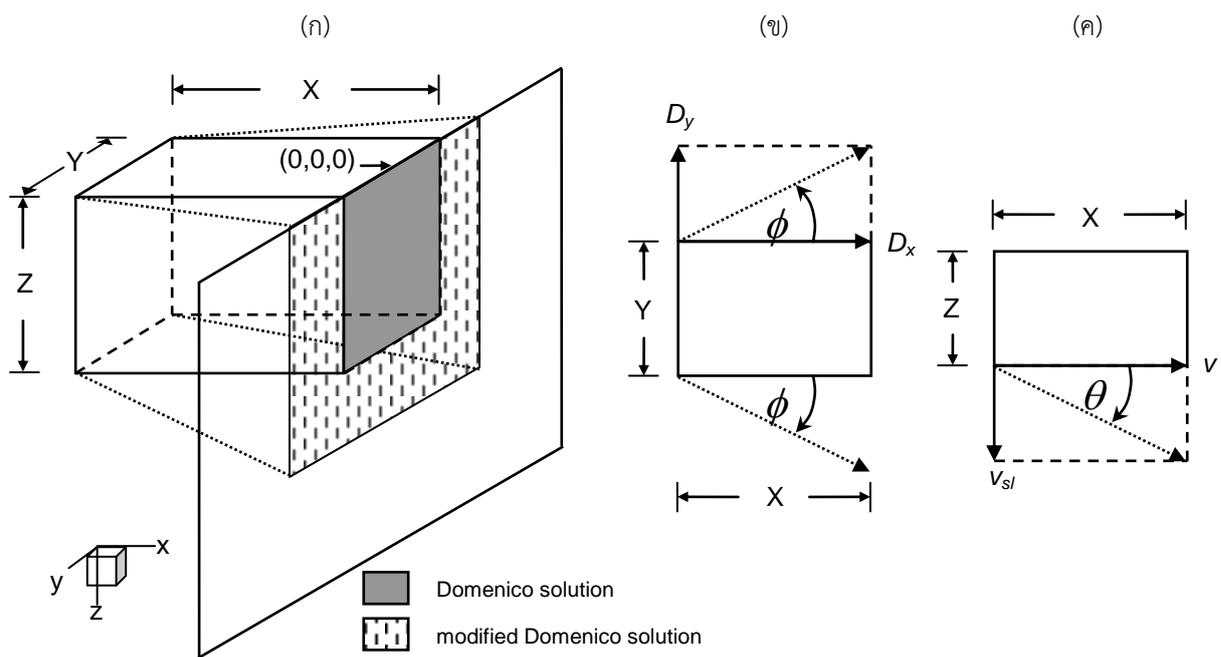
ผลการวิจัย

4.1 คำตอบโดเมนนิโคตต์แปลง

ในทางปฏิบัติ แหล่งกำเนิดมลพิษส่วนมากมีขนาดแน่นอนและเป็นสามมิติ เช่น ปริซึม สำหรับแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ ความกว้างของแหล่งกำเนิด (X) อาจมีความสำคัญ (รูปที่ 7ก) อย่างไรก็ตาม การปล่อยมลพิษในแนวดิ่งและการเกิดดิสเพอร์ชันแนวราบในบริเวณแหล่งกำเนิดนอกโดเมนมักถูกเพิกเฉย เพราะว่าแหล่งกำเนิดต้องตั้งอยู่บนขอบเขตที่น้ำบาดาลไหลเข้า (ระนาบ $x = 0$)

ดังนั้น แหล่งกำเนิดมลพิษต้องถูกแปลงรูปก่อนนำคำตอบไปประยุกต์ใช้งาน Domenico and Schwartz (1998, หน้า 379) ใช้ geometrical projection เพื่อคำนวณการแพร่กระจายของมลพิษในแนวดิ่งในชั้นน้ำที่มีความหนานันต์ ตัวแปรที่ใช้คือ ความลึกถึงแหล่งกำเนิด (Z) ความหนาของชั้นน้ำ และดิสเพอร์ซิวิตีตามยาว เพื่อต่อยอดแนวคิด geometrical projection นี้ แหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมนี่ต้องถูกเปลี่ยนแปลงเป็นระนาบแนวดิ่ง โดยใช้ตัวแปรที่วัดได้จริงในภาคสนาม ดังคำอธิบายต่อไปนี้

รูปที่ 7ข แสดงแหล่งกำเนิดในระนาบ xy ถูกขยาย เนื่องจากการไหลสม่ำเสมอตลอดทั้งโดเมน ดิสเพอร์ชันจึงมีบทบาทสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของสารมลพิษในบริเวณข้างใต้แหล่งกำเนิด การปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดบนระนาบ xy เกิดขึ้นเนื่องจากดิสเพอร์ชันตามขวาง แม้ว่าดิสเพอร์ชันตามขวางให้ค่าความเข้มข้นน้อยกว่า C_0 ในบริเวณเกินกว่าระยะ $\pm Y/2$ แต่ระยะทางในพื้นที่แหล่งกำเนิดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของพлумมีค่าน้อยมากจนกระทั่งสามารถกำหนดให้ C_0 มีค่าคงที่จนกระทั่งเดินทางไปถึง inflow boundary ($x = 0$)



รูปที่ 7. แหล่งกำเนิดรูปปริซึม (ก) การเปลี่ยนแปลงจากปริซึมสามมิติไปเป็นระนาบแนวดิ่งสองมิติ (ข) ในภาพด้านบน Y มีขนาดใหญ่ขึ้นอีก $2X \tan \phi$ (ค) ในภาพด้านข้าง Z มีขนาดใหญ่ขึ้นอีก $X \tan \theta$

มุมที่ขยายออกจากแหล่งกำเนิดจึงเกิดขึ้นจากการแข่งขันกันระหว่างดิสเพอร์ชันตามยาว และดิสเพอร์ชันตามขวางแนวราบ ถ้าสมมุติให้ไม่เกิดดิฟฟิวนซ์ D_x/D_y มีค่าเท่ากับ α_x/α_y ดังนั้น มุมขยายแนวราบ (ϕ) มีนิยามคือ

$$\phi = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{\alpha_x}{\alpha_y}\right) \quad (26)$$

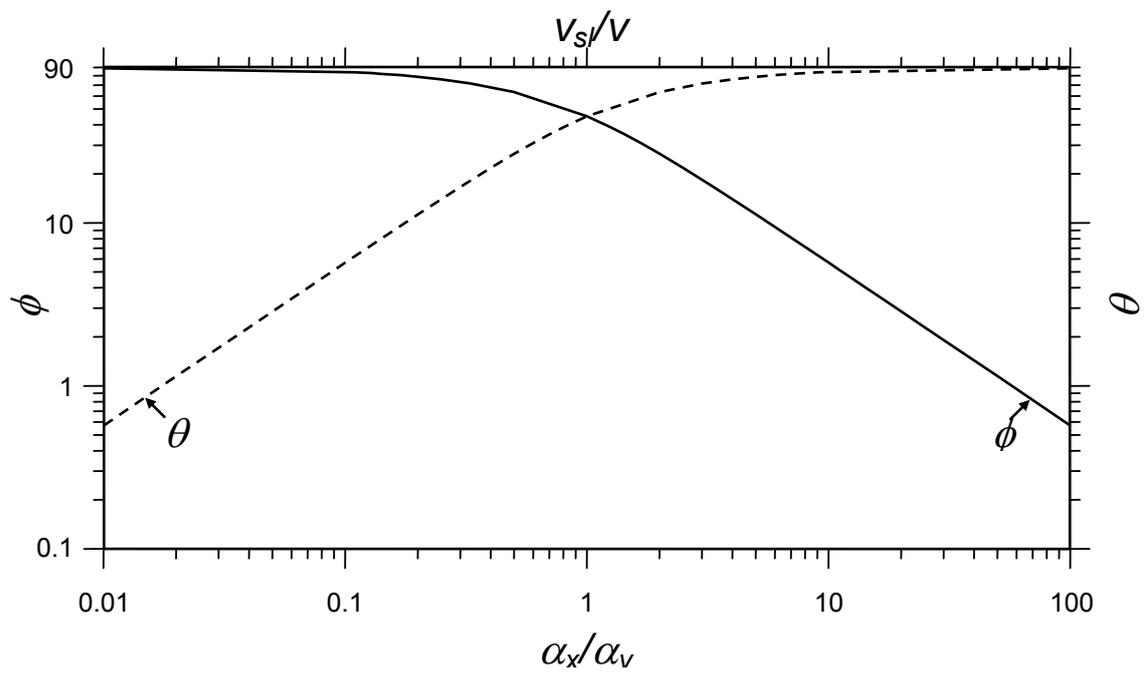
รูปที่ 7ค แสดงแหล่งกำเนิดในระนาบ xz ถูกขยาย ในระนาบนี้ดิสเพอร์ชันในแนวตั้งไม่สำคัญ เพราะว่ามีสมมุติให้ดิสเพอร์ชันตามขวางแนวตั้งมีค่าน้อยกว่าดิสเพอร์ชันตามยาวมาก (เช่น $\alpha_x = 100\alpha_z$) ในทางตรงกันข้าม การไหลซึมลงจากแหล่งกำเนิดมีความสำคัญมาก ดังนั้นมุมขยายแนวราบออกจากแหล่งกำเนิดจึงขึ้นอยู่กับการแข่งขันระหว่างแอดเวกชันในทิศทางตามแกน x (v) และแอดเวกชันจากแหล่งกำเนิด (v_{sl}) แม้ว่า C_0 ข้างใต้ท้องของพลูมอาจเกิดการเจือจาง การสมมุติว่า C_0 มีค่าคงที่ได้แหล่งกำเนิดไปจนถึง inflow boundary ยังสมเหตุสมผลเนื่องจากระยะที่เจือจางนั้นสั้นนักเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวของพลูม รวมถึงแอดเวกชันแนวตั้งเด่นได้แหล่งกำเนิด

มุมขยายแนวตั้ง (θ) มีค่าดังนี้

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_{sl}}{v}\right) \quad (27)$$

รูปที่ 7 แสดง geometrical projection ที่ใช้ขยายความยาวของแหล่งกำเนิดเดิม (Y) ทั้งสองข้างของแหล่งกำเนิดเท่ากับ $2X\tan\phi$ และขยายความหนาของแหล่งกำเนิด (Z) ลงไปข้างใต้อีกเท่ากับ $X\tan\theta$ ผลที่ได้คือแหล่งกำเนิดระนาบแนวตั้งมีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าระนาบ YZ เดิม อีกนัยหนึ่งคือ ปริซึมนอกโดเมนถูกแปลงเป็นระนาบแนวตั้งที่บน inflow boundary

รูปที่ 8 แสดงช่วงค่า ϕ และ θ ที่แปรเปลี่ยนตามอัตราส่วนของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง มุมขยายแนวราบ (ϕ) มีค่าลดลงขึ้นอยู่กับ α_x/α_y แต่มุมขยายแนวตั้ง (θ) มีค่าเพิ่มขึ้นตาม v_{sl}/v



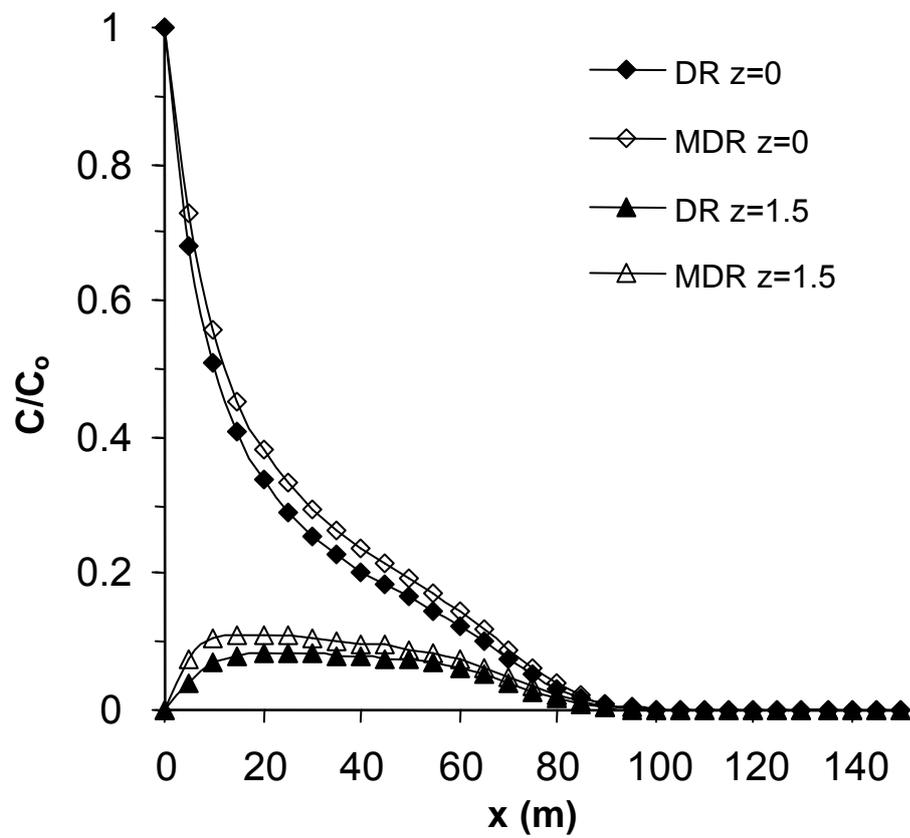
รูปที่ 8. มุมแหล่งกำเนิดแนวราบและแนวตั้ง

แทน สมการที่ 26-27 ลงในพจน์ Y และ Z ของ สมการที่ 25 ทำให้ได้คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลง (modified Domenico solution)

$$C(x,y,z,t) = \left(\frac{C_0}{8} \right) \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{\alpha_x vt}} \right) \right\} \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{erf} \left(\frac{y + \left(\frac{Y + 2X \tan \phi}{2} \right)}{2\sqrt{\alpha_y x}} \right) \\ - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \left(\frac{Y + 2X \tan \phi}{2} \right)}{2\sqrt{\alpha_y x}} \right) \end{array} \right\} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{z + Z + X \tan \theta}{2\sqrt{\alpha_z x}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z - Z - X \tan \theta}{2\sqrt{\alpha_z x}} \right) \right\} \quad (28)$$

4.2 การทดสอบกับคำตอบในอดีต

รูปที่ 9 แสดงคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงที่ให้ค่าสูงกว่าโดเมนนิโกเดิมในบริเวณใกล้กับแหล่งกำเนิด ที่ $z = 0$ เมตร คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงจำลองแบบได้ค่าความเข้มข้นสูงกว่า ที่ $z = 1.5$ เมตร ค่าความเข้มข้นที่สูงกว่าอาจเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แนวตั้งภายในแหล่งกำเนิด การขยายขนาดของแหล่งกำเนิดทำให้เกิดความแตกต่างที่ชัดเจนไปจากคำตอบเดิม โค้งมลสารของคำตอบเก่าและใหม่มีค่าใกล้เคียงกันในบริเวณที่ไกลออกไปจากแหล่งกำเนิด เช่น ประมาณ 100 เมตร ทำให้น้ำ



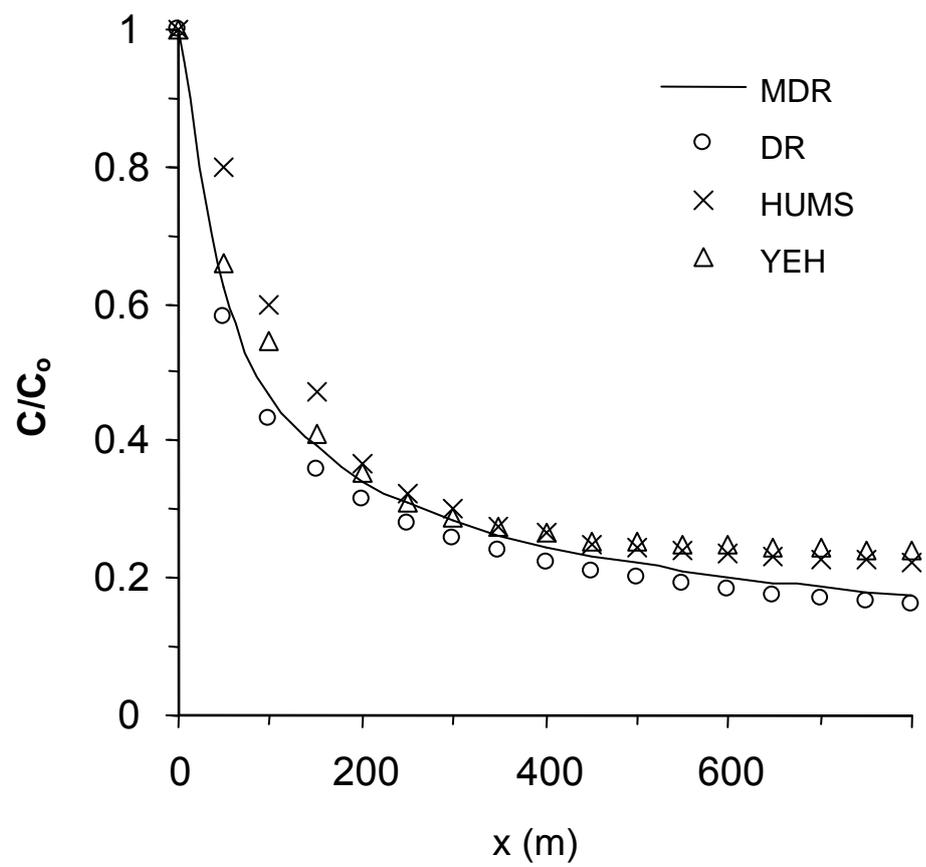
รูปที่ 9. คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลง (Modified Domenico solution, MDR) กับคำตอบโดเมนนิโกเดิม (DR) ตามแกนพหุคูณที่ $z = 0$ และ 1.5 เมตร

สำหรับตัวแปรที่พิจารณา **รูปที่ 10** แสดงว่า ความแตกต่างระหว่างคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงและคำตอบจริงของ Yeh (1981) และ Huyakorn et al. (1987) มีค่าน้อย เส้นกราฟของคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงตั้งอยู่ระหว่างเส้นกราฟของคำตอบโดเมนนิโกเดิมและคำตอบจริงดังกล่าว ความแตกต่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทาง x เช่น ที่ระยะทางเกิดกว่า 800 เมตร ความแตกต่างมีค่าน้อยกว่า 0.1 หรือร้อยละ 10 ของความเข้มข้นที่แหล่งกำเนิด ซึ่งก็นับว่าไม่สำคัญเท่าใดนัก ข้อนี้สะท้อนว่าการขยายแหล่งกำเนิดของคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงมีความใกล้เคียงกับคำตอบจริงทั้งสอง ความแตกต่างที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการประมาณค่าคำตอบของคำตอบโดเมนนิโกและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ต่างกัน

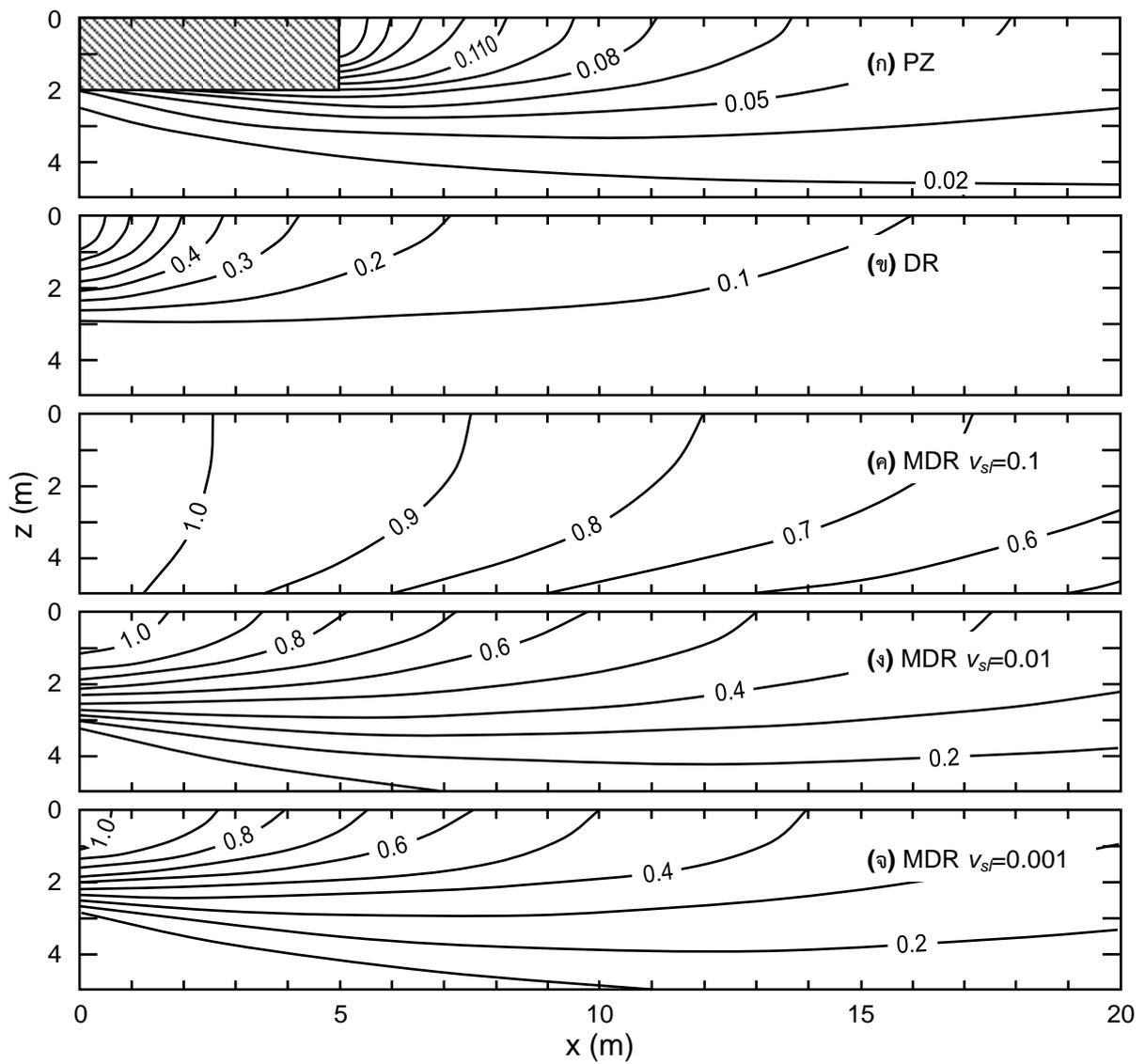
รูปที่ 11-12 แสดงว่า คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงให้รูปร่างของพelumและรูปแบบเส้นชั้นของความเข้มข้นคล้ายคลึงกับที่เสนอโดย Park and Zhan (2001) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ v_{st} มีค่าต่ำ แต่การเปรียบเทียบจุดต่อจุดเป็นไปไม่ได้เพราะว่าคำตอบของ Park and Zhan (2001) ไม่ได้ให้ความเข้มข้นสัมพัทธ์ (C/C_0)

รูปที่ 11ก-12ก แสดงว่า แหล่งกำเนิดใน Park and Zhan (2001) วางตั้งข้างในโดเมนและลึกลงไปในโดเมนเล็กน้อย ในทางตรงกันข้าม แหล่งกำเนิดของคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงและคำตอบโดเมนนิโกเดิมวางไว้ที่ inflow boundary ดังนั้นพelumจึงแตกต่างกัน เช่นเมื่อ v_{st} มีค่าสูง (**รูปที่ 11ค**)

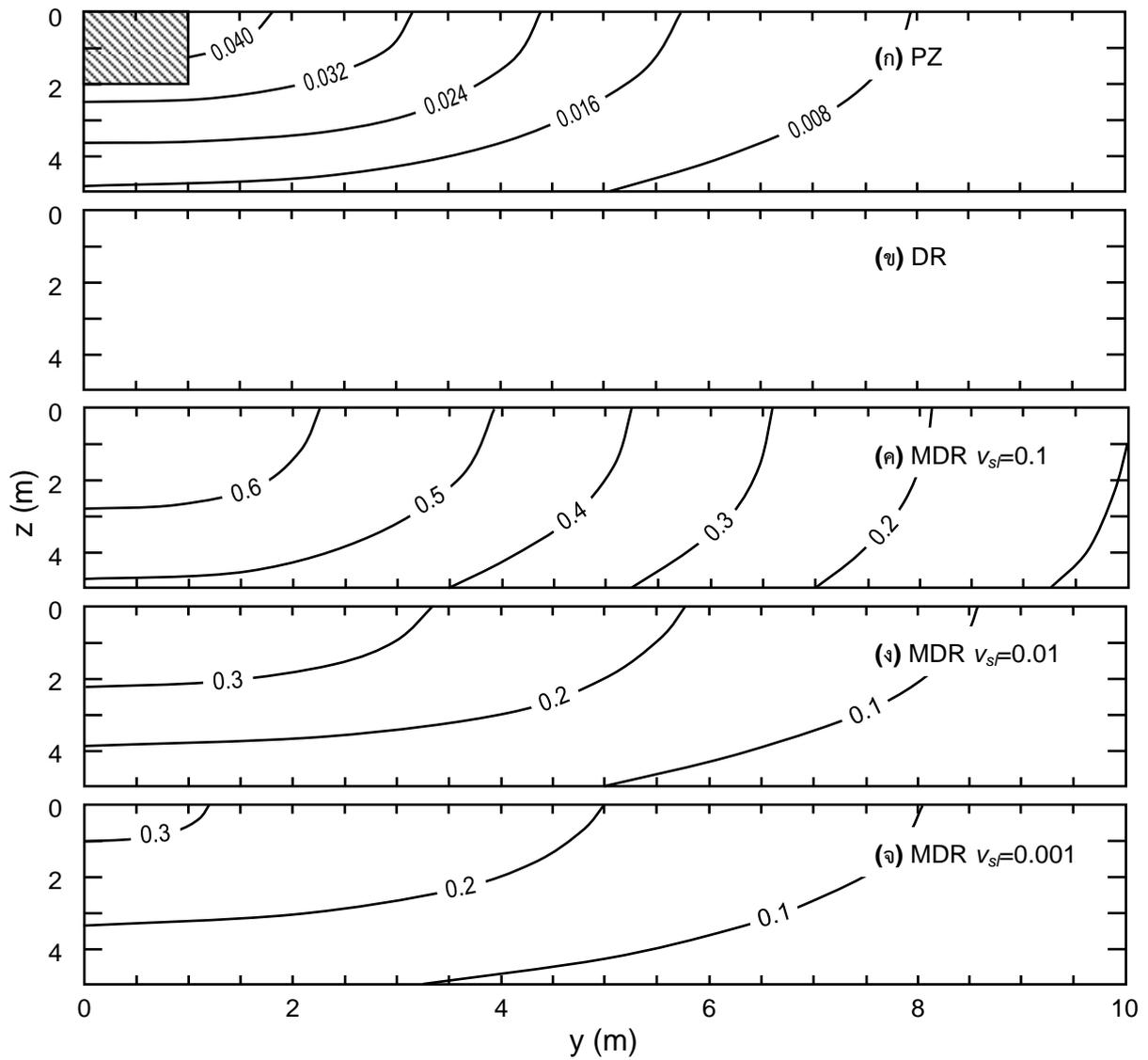
รูปที่ 11ข-12ข แสดงว่า คำตอบโดเมนนิโกเดิมให้ความเข้มข้นสัมพัทธ์ที่ $x = 20$ เมตรมีค่าน้อยกว่า 0.1 ซึ่งเป็นเส้นชั้นแรก จากค่าตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้ ตำแหน่ง $x = 20$ เมตรไกลเกินไปกว่าที่พelumซึ่งจำลองโดยคำตอบโดเมนนิโกจะไปถึง ดังนั้น **รูปที่ 12ข** ซึ่งเป็นภาพตัดตามขวางของ **รูปที่ 11ข** ที่ $x = 20$ เมตร ไม่แสดงเส้นชั้นใด ๆ ในทางตรงกันข้าม **รูปที่ 11ค-11จ** และ **12ค-12จ** แสดงว่าคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงที่มีแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ขึ้นสามารถจำลองได้ที่ตำแหน่ง $x = 20$ เมตร ทำให้ได้ผลคล้ายกับคำตอบของ Park and Zhan (2001)



รูปที่ 10. คำตอบโดเมนนิโคดัดแปลง (MDR) กับคำตอบโดเมนนิโคเดิม (DR) คำตอบของ Huyakorn et al. (1987) (HUMS) และคำตอบของ Yeh (1981) (YEH)



รูปที่ 11. คำตอบโดเมนนิโกัดดแปลง (MDR) กับคำตอบโดเมนนิโกเดิม (DR) และคำตอบของ Park and Zhan (2001) (PZ) บนระนาบ xz



รูปที่ 12. คำตอบโดเมนนิโกัดแปลง (MDR) กับคำตอบโดเมนนิโกเดิม (DR) และคำตอบของ Park and Zhan (2001) (PZ) บนระนาบ yz

รูปที่ 11ค-11จ และ 12ค-12จ ยังแสดงว่า การซึมลงของมลพิษในแนวตั้งมีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาล ยิ่งความเร็วมีค่ามากขึ้น พลุมนักยิ่งลงไปได้ลึกมากขึ้นในโดเมน นี้คือผลการศึกษาที่สำคัญ เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมได้แนวตั้ง การเคลื่อนที่แบบแอดเวกชันแนวตั้งข้างใต้แหล่งกำเนิดในชั้นน้ำขึ้นอยู่กับความลาดชันชลศาสตร์ระหว่างระดับน้ำด้านบนและก้นบ่อของแหล่งกำเนิดมลพิษ

อีกนัยหนึ่งคือ ความลาดชันชลศาสตร์แนวตั้งในแหล่งกำเนิดมีความสำคัญต่ออัตราการซึมชะของมลพิษมากกว่าอัตราการเติมน้ำตามธรรมชาติ ยกตัวอย่างเช่น ค่า v_{sl} เท่ากับ 0.1 เมตรต่อวันสามารถพบได้ในกรณีน้ำเสียถูกสูบลอยอย่างรวดเร็วเข้าไปใต้อ่างในแหล่งกำเนิด ความลาดชันชลศาสตร์แนวตั้งจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าค่า v_{sl} ที่ 0.001 เมตรต่อวันพบได้ในกรณีระดับน้ำในแหล่งกำเนิดสูงกว่าระดับน้ำใต้ดินเพียงเล็กน้อย

ค่าของอัตราการเติมน้ำแนวตั้งตามธรรมชาติได้มาจากวิธีการประมาณต่าง ๆ เพราะแหล่งกำเนิดของน้ำเติมและกระบวนการที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไป (de Vries and Simmers, 2002) ค่าอัตราน้ำเติมจึงขึ้นอยู่กับวิธีการดังกล่าวที่ใช้ตรวจสอบ (Allaire et al., 2009) ตามรายงานของ Scanlon et al. (2002) ค่าอยู่ระหว่าง 0.00014–3 เมตรต่อวัน ดังนั้น ถ้าน้ำเติมธรรมชาติมีผลต่อการปลดปล่อยมลพิษเพียงอย่างเดียว ค่า v_{sl} (0.001–0.1 เมตรต่อวัน) ที่สมมุติในการวิจัยนี้จึงสมเหตุสมผล

เช่นเดียวกับกรณี mass flux rate ที่ใช้ในคำตอบจริง ความเร็วแนวตั้งของการปล่อยมลพิษนั้นยากที่จะตรวจวัดได้ในภาคสนาม ในทางปฏิบัติจึงสมมุติให้ v_{sl} มีค่าน้อยกว่า v มาก ๆ

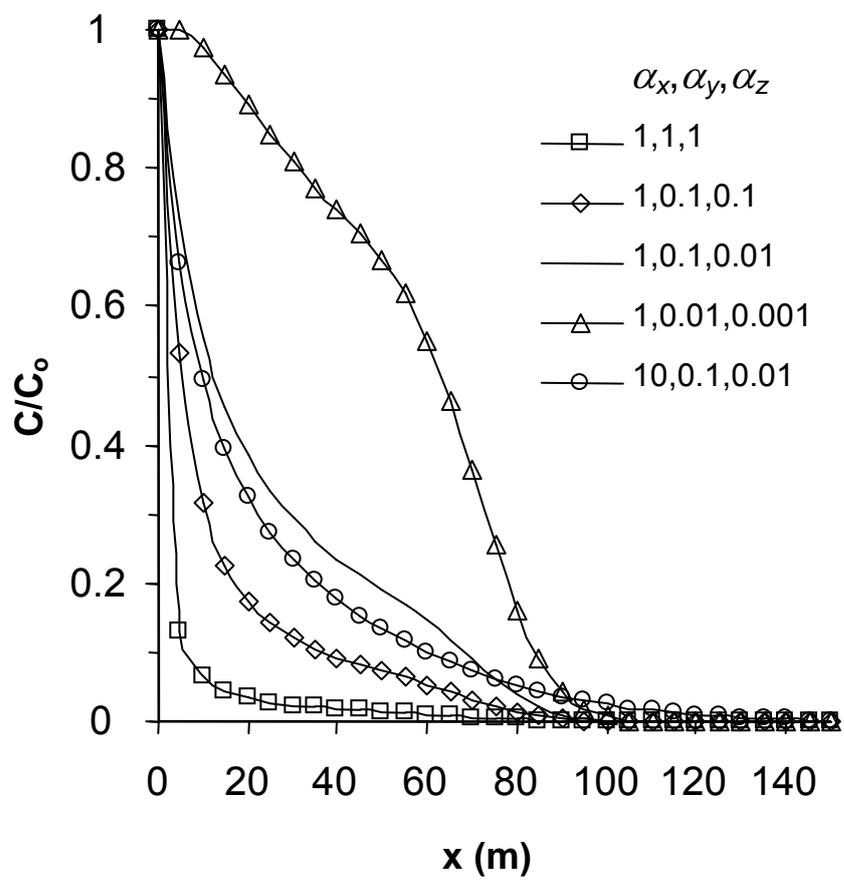
ตามที่เงื่อนไขขอบเขตใน **สมการที่ 2-4** คำตอบโดเมนนิโคตัดแปลงไม่ได้ใช้อัตราเติมน้ำในโดเมน การเติมน้ำเกิดขึ้นที่เขตอิมอากาศ แต่แอดเวกชันแนวตั้งเกิดขึ้นข้างใต้แหล่งกำเนิดและในชั้นน้ำนอกโดเมน

4.3 ความอ่อนไหวของตัวแปร

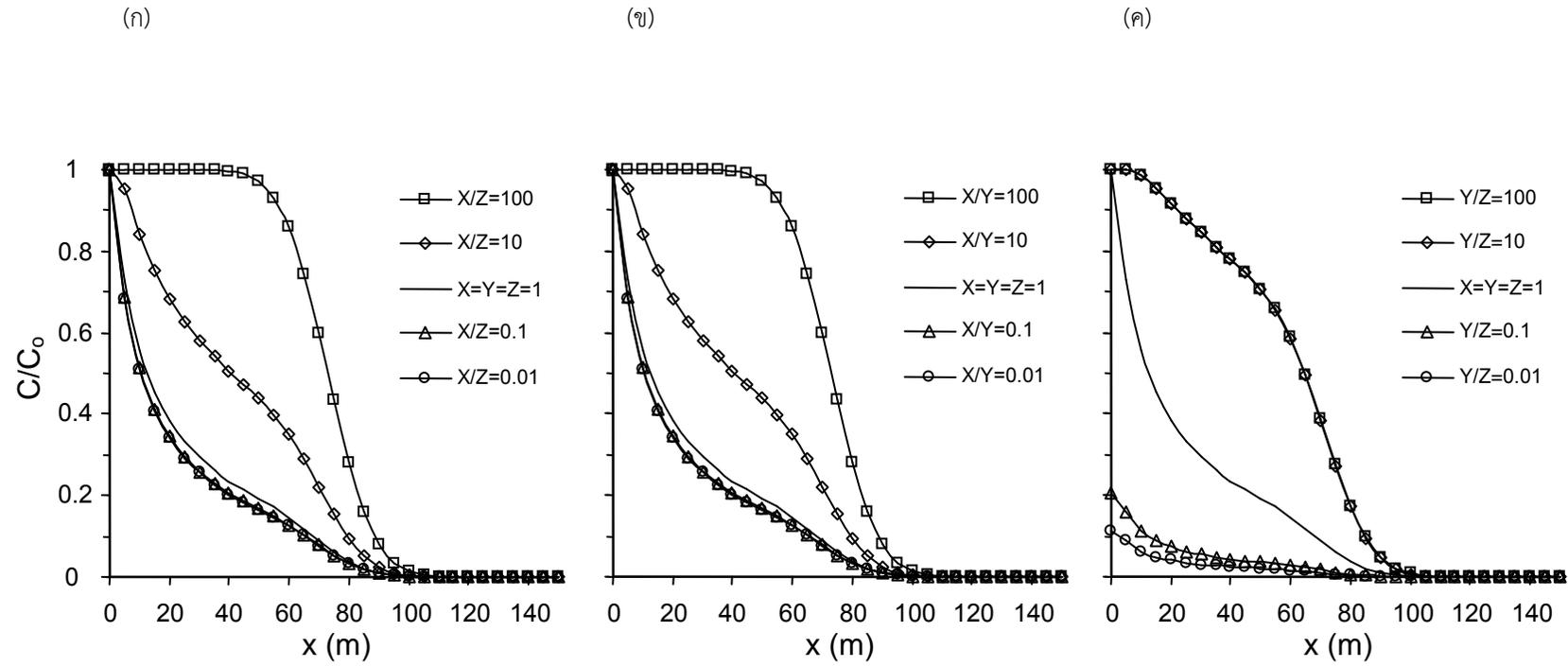
ดิสเพอร์ซิวิตีที่มีความอ่อนไหวมากที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วนระหว่างมิติของแหล่งกำเนิด และอัตราส่วนระหว่างความเร็วแนวตั้งของการปล่อยมลพิษจากแหล่งกับความเร็วตามยาวของการเคลื่อนที่ของสารมลพิษ ตามลำดับ

รูปที่ 13 แสดง ค่า α_x เปรียบเทียบกับ α_y และ α_z มีความอ่อนไหวมากที่สุดในการจำลองตามแนวแกนพ्लุม ค่าดิสเพอร์ซิวิตีแบบไอโซโทรปิกให้ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์ต่ำสุด เพราะว่าดิสเพอร์ซิวิตีมีค่าเท่ากันทุกทิศทางจากแหล่งกำเนิด ในขณะที่ดิสเพอร์ซิวิตีที่มีค่าเท่ากับ 1, 0.01 และ 0.001 ให้ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงสุดในทิศทางตามยาว ส่วนดิสเพอร์ซิวิตีที่มีค่าเท่ากับ 1, 0.1 และ 0.01 ให้โค้งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน เมื่อเปรียบเทียบโค้งทั้งสองที่มีอัตราส่วนระหว่างดิสเพอร์ซิวิตีเท่ากัน เช่น โค้ง 10-0.1-0.01 กับโค้ง 1-0.01-0.001 อย่างหลังให้ค่าความเข้มข้นสัมพัทธ์สูงสุดในทิศทางตามแนวแกนพ्लุม ผลการวิจัยเช่นนี้ชี้ว่า ดิสเพอร์ซิวิตีตามขวางที่สูงขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำลง และค่าดิสเพอร์ซิวิตีที่สำคัญกว่าอัตราส่วนของค่าระหว่างดิสเพอร์ซิวิตี

ความกว้างของแหล่งกำเนิดในคำตอบโดเมนนิโกัดแปลงมีบทบาทสำคัญต่อพ्लุม **รูปที่ 14ก** แสดงว่า เมื่อความยาวของแหล่งกำเนิด (Y) มีค่าคงที่ที่ 1 เมตร ความกว้างของแหล่งกำเนิด (X) เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของแหล่งกำเนิด (Z) มีความอ่อนไหวสูงต่อโค้งมลสาร เมื่อ X มีค่าสูงกว่า Z 100 เท่า โค้งมลสารแสดงว่า หน้าแอตเวกชันอยู่ที่ตำแหน่ง 75 เมตรจากแหล่งกำเนิด ซึ่งเป็นระยะทางที่ยาวที่สุด ตำแหน่งของหน้าแอตเวกชันเข้ามาใกล้กับแหล่งกำเนิดมากขึ้นเมื่อ X มีค่าน้อยลง แหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมแบบลูกบาศก์ ($X=Y=Z$) ก็ให้หน้าแอตเวกชันที่ตำแหน่ง 15 เมตรจากแหล่งกำเนิด เมื่อ X มีค่าน้อยกว่า Z 10 หรือ 100 เท่า โค้งมลสารมีความคล้ายคลึงกันมากกับผลของคำตอบโดเมนนิโก ดั้งนั้นเมื่อ X มีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ คำตอบโดเมนนิโกัดแปลงจะเข้าใกล้คำตอบโดเมนนิโกเดิม เพราะว่าแหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมจะกลายเป็นรูปร่างระนาบแนวตั้ง (YZ patch)



รูปที่ 13. ความอ่อนไหวสูงของ α_x , α_y และ α_z ตามแกนพหุคูณ

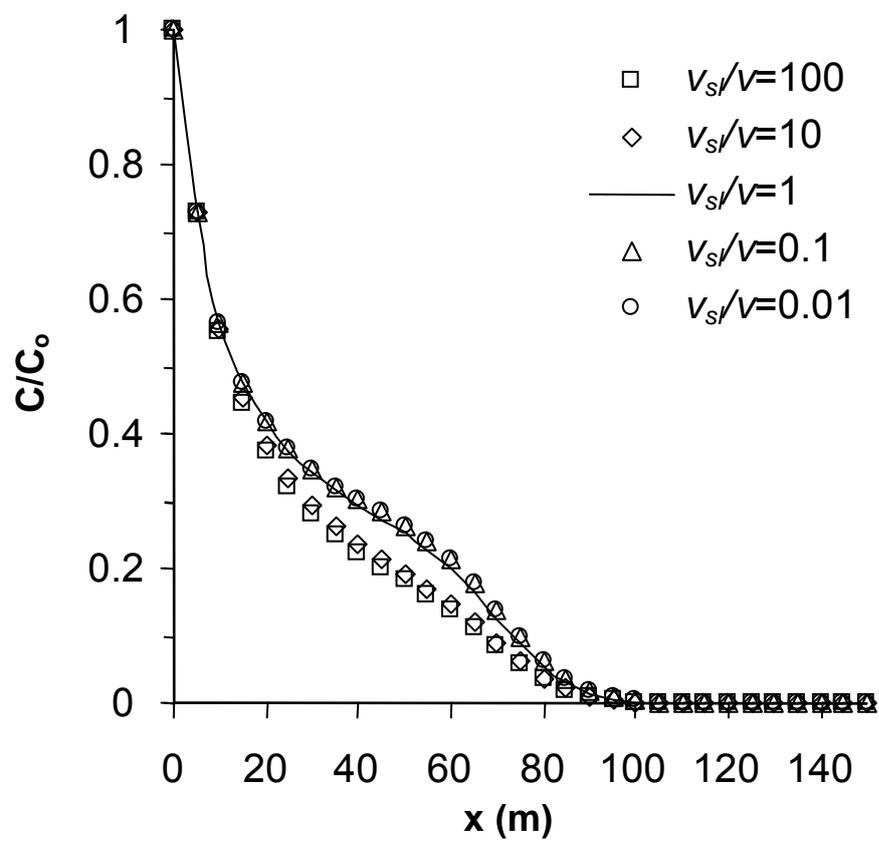


รูปที่ 14. ความอ่อนไหวสูงของมิติแหล่งกำเนิดตามแกนพลูม

รูปที่ 14ข แสดงโค้งมลสารที่เหมือนกันทุกประการกับ **รูปที่ 14ก** เมื่อความหนาของแหล่งกำเนิด (Z) มีค่าคงที่ที่ 1 เมตร และความกว้างของแหล่งกำเนิด (X) มีค่ากว้างกว่าความยาวของแหล่งกำเนิด (Y) หลาย ๆ เท่า หน้าแอตเวกชันจะอยู่ในตำแหน่งไกลจากแหล่งกำเนิดมากกว่าสถานการณ์ที่ X มีค่าน้อยกว่า Y มาก ๆ ดังนั้นเมื่อ X มีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ ค่าตอบโดเมนนิโกตัดแปลงจะเข้าใกล้คำตอบโดเมนนิโกเดิม เพราะว่าแหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมจะกลายเป็นรูปร่างระนาบแนวตั้ง (YZ patch)

รูปที่ 14ค แสดงว่า เมื่อความกว้างของแหล่งกำเนิด (X) มีค่าคงที่ที่ 1 เมตร ความยาวของแหล่งกำเนิด (Y) เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของแหล่งกำเนิด (Z) จะอ่อนไหวสูงโค้งมลสาร เมื่อแหล่งกำเนิดมีรูปร่างลูกบาศก์ ($X=Y=Z$) Y ที่ตำแหน่งยาวกว่า Z 10 หรือ 100 เท่าจะให้หน้าแอตเวกชันยาวที่สุดและให้โค้งมลสารเดียวกันเพราะว่าการจำลองแบบทำในแนวแกนพ्लุมเท่านั้น ผลของดิสเพอร์ชันที่มีมาจากค่า Y สูงไม่มีผลกระทบต่อความเข้มข้นของสารมลพิษ เมื่อ Y มีค่าน้อยกว่า Z มาก ๆ เช่น น้อยกว่า 10 หรือ 100 เท่า ดิสเพอร์ชันจะมีบทบาทสูงต่อโค้งมลสาร อีกนัยหนึ่งคือ เมื่อ Y มีค่าน้อยมากเข้าใกล้ศูนย์ แหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมจะกลายเป็นเส้นแนวตั้ง

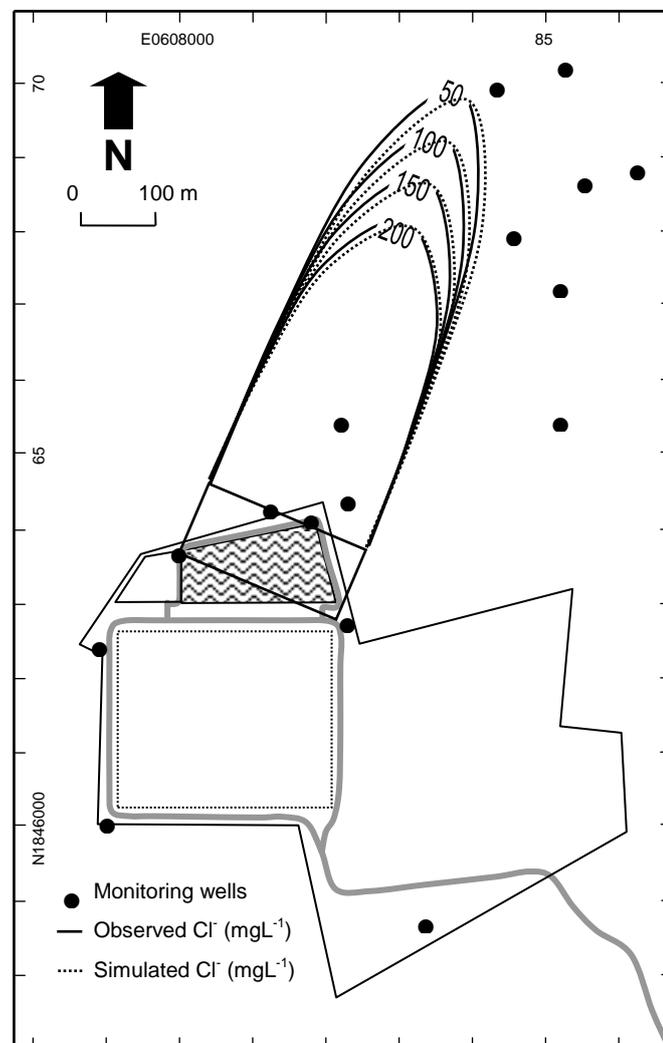
รูปที่ 15 แสดงว่า โค้งมลสารอ่อนไหวเล็กน้อยกับอัตรา v_{sl}/v ค่า v_{sl} ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นตอนกลางของโค้งมลสารเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเพราะว่าความกว้างของแหล่งกำเนิด ($X = 2.5Y = 2.5Z$) กระทบต่อพ्लุมมากกว่าอัตรา v_{sl}/v ความอ่อนไหวต่ำใน **รูปที่ 15** แสดงว่าสมมุติฐานที่ว่า v_{sl} มีค่าน้อยกว่า v มาก ๆ นั้นเป็นที่ยอมรับได้



รูปที่ 15. ความอ่อนไหวต่ำของ v_s/v ตามแกนพหุคูณ

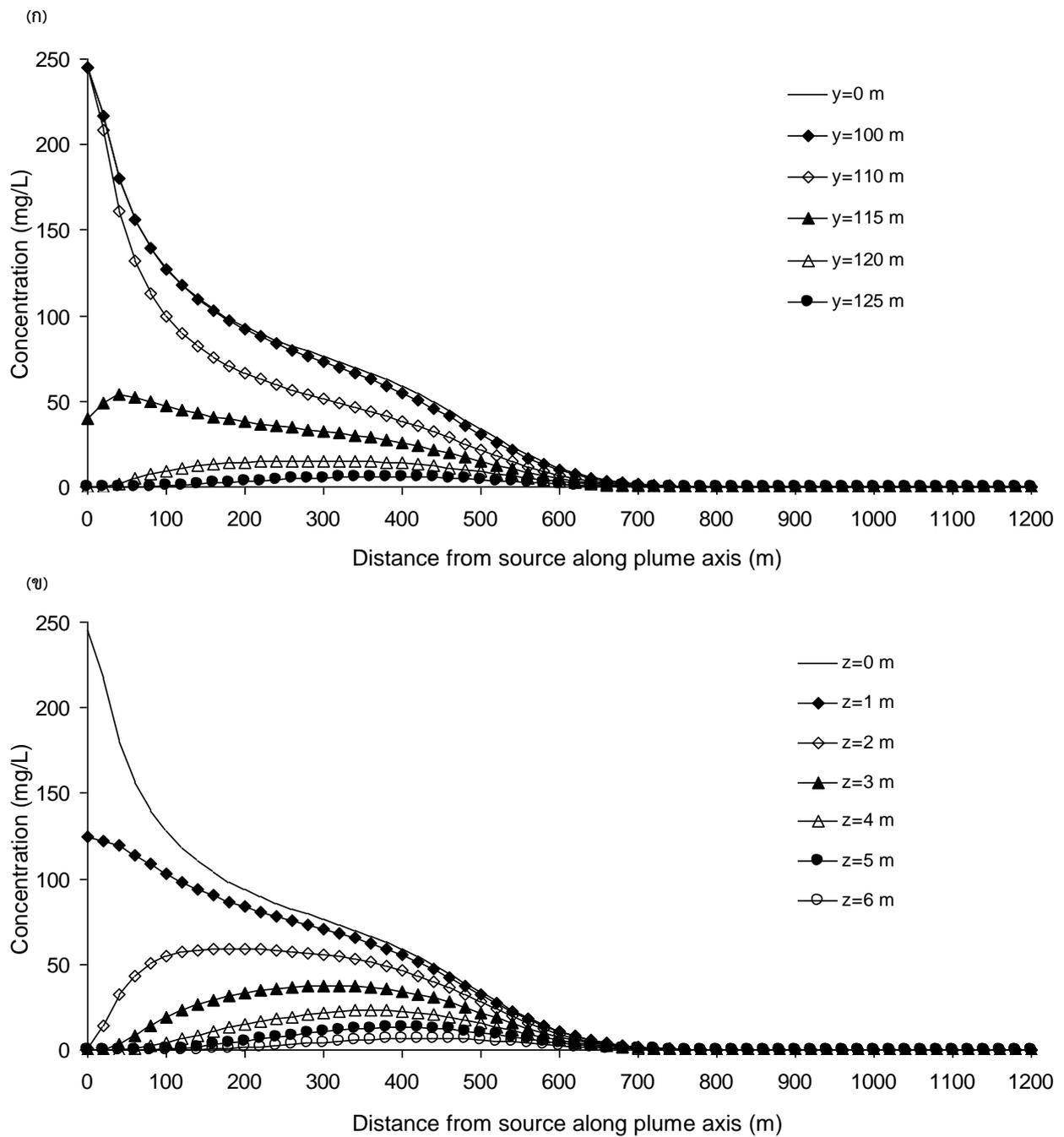
4.4 พลูมจำลองที่ผ่านการเปรียบเทียบกับของจริง

การเปรียบเทียบพลูมของคลอไรด์ที่จำลองแบบใน พ.ศ. 2544 กับข้อมูลพลูมจริงชี้ว่า คำตอบของโดเมนนี้โกใช้ได้จริง รูปที่ 16 แสดงว่า พลูมมีการแพร่กระจายในทิศทางแนวขวางน้อยกว่าในทิศทางอื่น ๆ เพราะว่าแอกเวกชันและดิสเพอร์ชันแนวยาวมีความโดดเด่นที่พื้นที่ศึกษา เมื่อพิจารณาตามแนวแกน y ความเข้มข้นของคลอไรด์ค่อนข้างคงที่ระหว่าง 0-200 m และลดลงอย่างรวดเร็วเข้าสู่ความเข้มข้นค่าธรรมชาติใกล้กับปลายของพลูม



รูปที่ 16. พลูมจำลองที่ผ่านการเปรียบเทียบกับของจริง พ.ศ. 2544

รูปที่ 17 แสดงโค้งมลสารตามแนวแกนพหลุมของ รูปที่ 16 ปลายพหลุมในทิศทางแนวขวางมีความคมชัดเพราะว่าความเข้มข้นลดลงไปสู่ค่าธรรมชาติภายในระยะทาง 25 m ($Y/2 = 113.5$ m) ในขณะที่ก้นพหลุมหายไปทีความลึก 5 m ใต้แหล่งกำเนิด ($Z = 1$ m) การค้นพบนี้คล้ายคลึงกับที่ Borden site (Frind and Hokkanen, 1987) เพราะว่าชั้นน้ำมีความต่อเนื่องดีในแนวยาวและบางในทิศทางแนวตั้ง ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวแสดงว่า พื้นที่ศึกษามีค่าดิสเพอร์ซิวิตีอ่อนไหวมากที่สุด



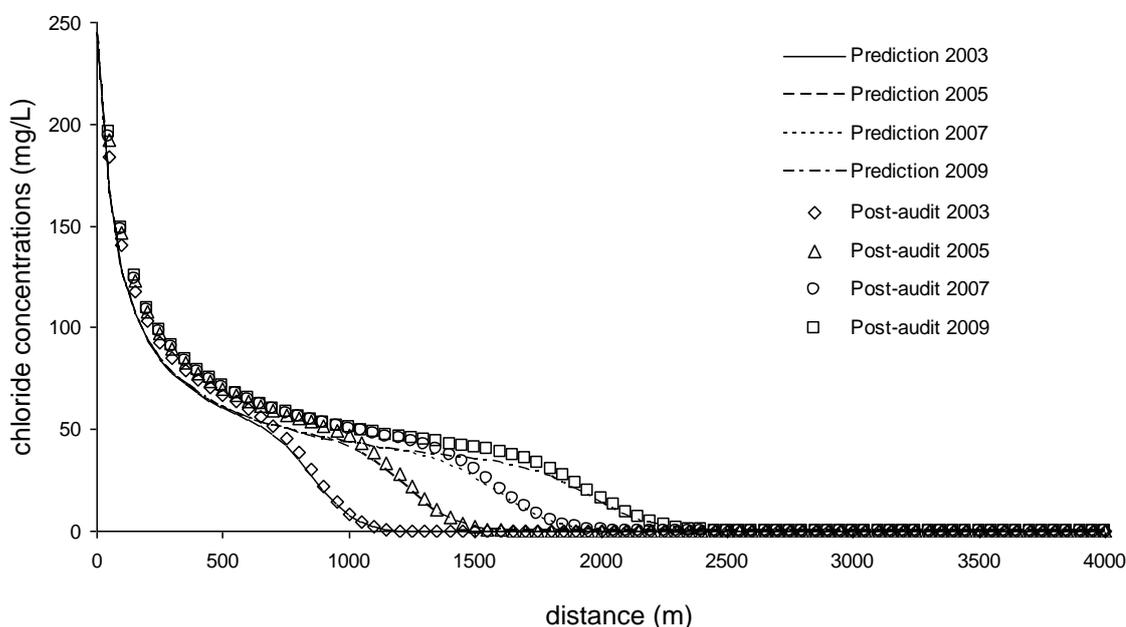
รูปที่ 17. โค้งมลสารของคลอไรด์ พ.ศ. 2544 (ก) กั้นชั้นน้ำ ($z = 0$ m) (ข) บนระนาบแกนพลูมที่

ความลึก $z = 0-6$ m

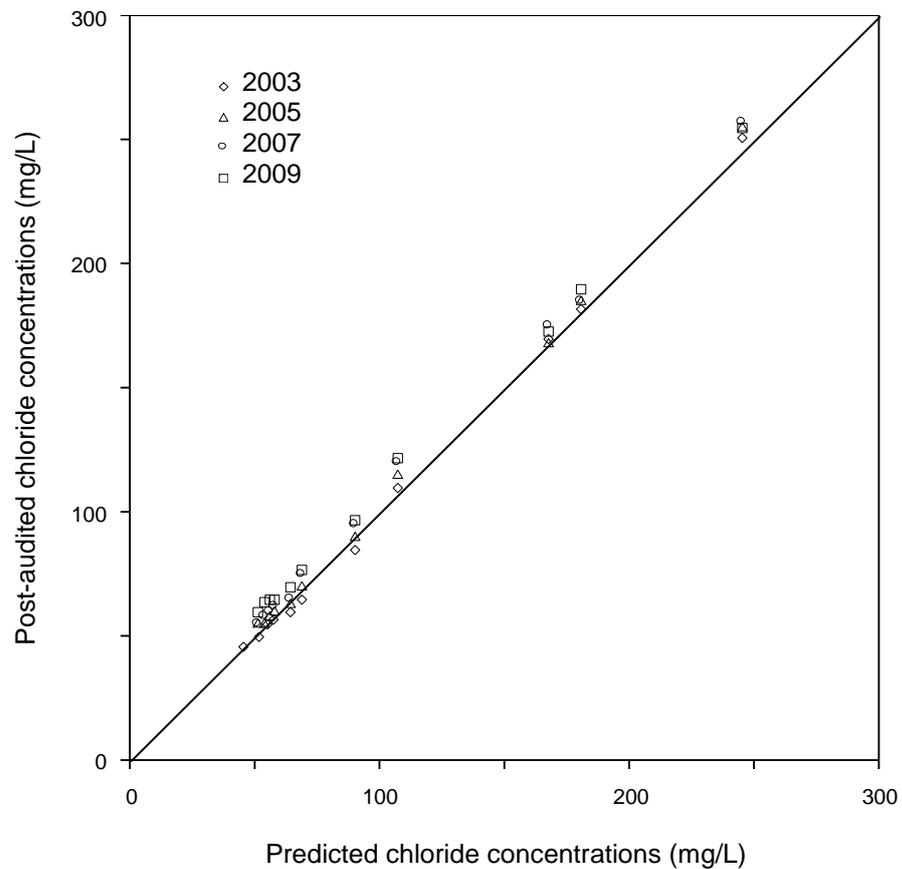
4.5 พหลุมทำนายที่ผ่านการเปรียบเทียบกับของจริง

การทำนายใน พ.ศ. 2546-2552 ถูกต้อง การพิสูจน์ค่าทำนายของแบบจำลองแสดงว่า คำตอบของโดเมนนิโกสามารถใช้ทำนายพหลุมของคลอไรด์ได้เป็นอย่างดี รูปที่ 18 แสดงว่า พหลุมที่ทำนายไว้มีความเข้มข้นน้อยกว่าพหลุมที่พิสูจน์ค่าทำนาย ลักษณะเช่นเดียวกันนี้ยังพบได้ใน รูปที่ 19 ซึ่งแสดงข้อมูลบนกราฟ 1:1 ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการพิสูจน์ค่าทำนาย ความแตกต่างของความเข้มข้นของคลอไรด์มีค่าประมาณ 10 mgL^{-1} ซึ่งยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ สาเหตุของความแตกต่างอาจเกิดขึ้นจาก

- 1) การเปลี่ยนแปลงปริมาณมลสารที่แหล่งกำเนิดหลังจากทำนายแล้ว
- 2) ความเข้มข้นของแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีจำนวนขยะมูลฝอยมากขึ้น
- 3) การผสมของน้ำชะขยะที่มาจากบ่อข้างเคียง



รูปที่ 18. พหลุมของคลอไรด์ที่ได้มาจากการทำนายและการพิสูจน์ตามแนวแกนพหลุม



รูปที่ 19. กราฟ 1:1 ระหว่างการจำลองแบบและของจริง

ในทางปฏิบัติการประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าจริง (calibration) ที่ดียืนยันว่า การทำนายที่ใช้แบบจำลองที่ผ่านการเปรียบเทียบกับค่าจริงแล้วย่อมมีความน่าเชื่อถือ ระยะเวลาที่น่าเชื่อถือขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ข้อมูลถูกนำมาใช้ในการประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าจริง เช่น การประมวลผลเปรียบเทียบกับค่าจริงใช้ข้อมูล 5 ปี การทำนายก็น่าเชื่อถือไม่เกิน 5 ปี แต่งานวิจัยนี้แสดงว่า การใช้ข้อมูลเพียง 2 ปี อาจจะทำนายได้แม่นยำเกินกว่า 2 ปี ซึ่งในที่นี้คือ 8 ปี ตราบเท่าที่การเปลี่ยนแปลงลักษณะการปนเปื้อนในพื้นที่ศึกษา ยังคงเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอเช่นเดิม

บทที่ 5

อภิปรายผลและสรุป

5.1 อภิปรายผล

5.1.1 สถานการณ์จริง

สถานการณ์จริงสำหรับการประยุกต์ใช้คำตอบโดเมนนิโคตัดแปลงเพื่อจำลองแบบการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากแหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมสามมิติในระบบการไหลที่สม่ำเสมอสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. แหล่งกำเนิดบนแผ่นดินที่มีกั้นในชั้นน้ำไม่มีแรงดัน แหล่งกำเนิดที่มีความเข้มข้นคงที่สามารถปล่อยมลพิษจากกันแหล่งกำเนิดที่จมอยู่ในชั้นน้ำไม่มีแรงดัน เช่น หลุมฝังกลบขยะในบ่อเหมืองร้าง หลุมฝังกลบขยะในบ่อทรายร้าง หลุมฝังกลบขยะที่คัดเลือกสถานที่ไม่ดีและซุดเข้าไปในชั้นน้ำไม่มีแรงดันหรือพื้นที่ชุ่มน้ำสูญเสีย

2. แหล่งกำเนิดใต้ดินในชั้นน้ำ เช่น ถังเก็บใต้ดินรูปทรงปริซึมที่กักเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงและสารเคมี ห้องใต้ดินที่มีสารเคมีและเกิดน้ำท่วม ห้องแยกเก็บกากสารพิษที่ถูกปิดอย่างกะทันหันเพราะเกิดการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีหรือสารอันตราย

3. สระ ถ้าอัตราการซึมซะแนวตั้งมีค่ามากกว่าความเร็วการไหลของน้ำบาดาลหลาย ๆ เท่า น้ำบาดาลจะไม่สามารถพัดพาสารมลพิษไปไกลจากแหล่งกำเนิดได้จนเกิดเป็นสระ ด้วยเหตุนี้สารมลพิษที่กักกันอยู่เป็นสระในชั้นน้ำจะอยู่ข้างใต้แหล่งกำเนิด เช่น สถานะอิสระของของไหลสถานะไม่ละลายน้ำทั้งหมดและเบาที่น้ำ หรือน้ำชะขยะ แม้ว่าสระดังกล่าวจะมีรูปทรงไม่แน่นอนแต่ก็สามารถประมาณได้ว่ามีรูปทรงปริซึมเพื่อสะดวกในการจำลองแบบ

การไหลของน้ำบาดาลรอบ ๆ แหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมควรมีการไหลสม่ำเสมอ ไม่ใช่การไหลแบบรัศมีรอบ ๆ แหล่งกำเนิด เช่น ปล่อยจากน้ำชะขยะ หรือบ่อบำบัดน้ำเสียที่ไม่มีไลเนอร์ เนื่องจาก

น้ำบาดาลไหลอย่างช้า ๆ การไหลจึงควรเป็นแบบสม่ำเสมอรอบ ๆ แหล่งกำเนิด ในทางตรงกันข้าม การไหลแบบบรัคมีเกิดขึ้นรอบ ๆ แหล่งกำเนิดที่มีพรุนหรือใกล้กับบ่อสูบน้ำ

5.1.2 ข้อจำกัดและการวิจัยในอนาคต

ข้อแตกต่างไปจากคำตอบจริงคือ การใช้คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงสามารถเลี่ยงการอินดิเกรต และทำให้เขียนลงในสเปรดชีทได้อย่างง่ายดาย การวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดรูปทรงปริซึมซึ่งสามารถใส่ค่าความกว้าง ความยาว และความหนาของแหล่งกำเนิดสามมิติได้ (X , Y และ Z) การระบุแหล่งกำเนิดสามมิติคือข้อดีกว่าแบบจำลองเดิมที่ใช้คำตอบโดเมนนิโก

แต่อย่างไรก็ตาม คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงมีข้อจำกัดดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อนของการประมาณคำตอบ Domenico and Schwartz (1998, หน้า 380–381) ทดสอบคำตอบโดเมนนิโกกับคำตอบจริงของ Leij et al. (1991) แล้วพบว่าคำตอบประมาณมีความถูกต้องน้อยลงในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดและเมื่อ α_x มีค่ามาก แม้ว่าคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงสามารถลดความคลาดเคลื่อนในบริเวณใกล้กับแหล่งกำเนิด แต่มันก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในบริเวณไกลจากแหล่งกำเนิด (รูปที่ 6) ผู้เขียนเห็นด้วยกับ Guyonnet and Neville (2004), Srinivasan et al. (2007) และ Aziz et al. (2009) ที่ว่า ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ย่อมรับได้ตราบเท่าที่การจำลองแบบทำในแนวแกนพลูม
2. ความเข้มข้นคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา งานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาประเด็นความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลง เช่น Gaussian (Walker and White, 2001) คำตอบจริงพิจารณาแหล่งกำเนิดเป็นระนาบที่มีความเข้มข้นค่าหนึ่งบน inflow

boundary โดยจำลองแอตเวกชันและดิสเพอร์ชันข้ามขอบเขตนี้ แต่คำตอบโดเมนนิโกเดิมและดัดแปลงใช้วิธีแอตเวกชันเท่านั้นในการจำลองการปลดปล่อยมลพิษ

3. ไม่มีการแพร่กระจายในแนวตั้งขึ้น คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงจำลองเฉพาะการเคลื่อนที่ลงของสารมลพิษ การวิจัยในอนาคตควรพิจารณาการเคลื่อนที่ขึ้นด้วย เช่น จากแหล่งกำเนิดที่ถูกฝังไว้ เช่น ถังเก็บใต้ดิน ห้องเก็บแยกกากของเสีย หรือสระของของไหลสถานะไม่ละลายน้ำหนัก เป็นต้น
4. ความหนาแน่น ตามเงื่อนไขขอบเขตใน สมการที่ 2-4 คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงจำลองเฉพาะในชั้นน้ำที่มีความหนาแน่น แม้ว่า Domenico and Schwartz (1998, หน้า 379) อธิบายว่าการแพร่กระจายแนวตั้งโดยใช้ geometrical projection การวิจัยในอนาคตควรศึกษาวิธีที่ใช้ได้กับชั้นน้ำที่มีความหนาแน่นเพราะชั้นน้ำส่วนมากเป็นแบบนี้

ความไม่แน่นอนของคำตอบโดเมนนิโกดัดแปลงยังคงมีเท่ากับคำตอบโดเมนนิโกเดิม การดัดแปลงเกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิด (X , Y และ Z) แต่ไม่ใช่ทั้งคำตอบ ถ้าพิจารณาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการประมาณคำตอบซ้อนการประมาณคำตอบจะพบว่า มันหลีกเลี่ยงการทำให้ง่ายหรือการสมมุติเงื่อนไขได้ยาก คำตอบโดเมนนิโกดัดแปลง สมมุติฐานสำคัญคือความเร็วในการไหลซึมแนวตั้งออกจากแหล่งกำเนิดเพราะยากที่จะตรวจวัดได้ในภาคสนาม และการสมมุติให้มลพิษมีความเข้มข้นคงที่ไปจนถึง inflow boundary

5.2 สรุป

ไม่มีคำตอบจริงใดของสมการกำหนดพฤติกรรมหลายมิติของการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลที่สามารถหลีกเลี่ยงอินดิเกรชันได้ แม้ว่าการประมาณคำตอบลดความถูกต้องของคำตอบจริง

ลง แต่นักปฏิบัติงานจริงนิยมใช้คำตอบประมาณนี้เพื่อประมาณความยาวของพุ่มและความเข้มข้น การวิจัยนี้ตัดแปลงคำตอบโดเมนนิโกเพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลแบบสามมิติที่ ออกมาจากแหล่งกำเนิดสามมิติรูปทรงปริซึม แหล่งกำเนิดนอกโดเมนถูกลากแนวไปยัง inflow boundary เพื่อแปลงเป็นระนาบแนวตั้ง โดยใช้ตัวแปรที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม คำตอบโดเมนนิโก ตัดแปลงจำลองความเข้มข้นใกล้กับแหล่งกำเนิดได้สูงกว่าคำตอบโดเมนนิโกเดิม トラบเท่าที่จำลองใน แนวแกนพุ่ม คำตอบโดเมนนิโกตัดแปลงให้ผลลัพธ์คล้ายคลึงกับคำตอบจริง คำตอบโดเมนนิโก ตัดแปลงใส่ค่าความกว้าง ความยาว และความหนาของแหล่งกำเนิดและค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ง่าย

การพิสูจน์ผลการทำนายคือการตรวจสอบที่ดีเยี่ยมว่า แบบจำลองการเคลื่อนที่ของมลสารในน้ำ บาดาลมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ การพิสูจน์ผลการทำนายตลอดระยะเวลา 8 ปี แสดงว่า แบบจำลอง การเคลื่อนที่ของมลสารในน้ำบาดาลซึ่งในที่นี้คือคำตอบของโดเมนนิโกผ่านการพิสูจน์แล้วว่าใช้งานได้ ดี โดยใช้ได้ดีกับมลสารชนิดละลายในน้ำ เช่น น้ำชะขยะ ณ สถานที่ฝังกลบขยะบึงกอก ดิสเพอร์ชัน แนวยาวและแนวขวางมีความโดดเด่น คำตอบของโดเมนนิโกซึ่งเหมาะสมอยู่แล้วที่จะใช้ในสถานการณ์ เช่นนี้จึงใช้ได้ดีในระดับภาคสนาม ข้อดีของคำตอบของโดเมนนิโกคือ แทนค่าตัวแปรทั้งสามมิติได้ง่าย และเหมาะสมที่จะใช้งานในทางปฏิบัติต่อไป

บรรณานุกรม

- Ala, N.K., Domenico, P.A., 1992. Inverse analytical techniques applied to coincident contaminant distributions at Otis Air Force Base, Massachusetts. *Ground Water* 30, 212–218.
- Allaire, S.E., Roulier, S., Cessna, A.J., 2009. Quantifying preferential flow in soils: a review of different techniques. *Journal of Hydrology* 378, 179–204.
- Aziz, C.E., de Blanc, P.C., Newell, C.J., 2009. Comment “On the Use and Error of Approximation in the Domenico (1987) Solution, by West, M.R., Keuper, B.H., Unger, M.J., 2007. *Ground Water* 45 (2), 126–135.” *Ground Water* 47 (1), 5–6.
- Batu, V., 1989. A generalized two-dimensional analytical solution for hydrodynamic dispersion in bounded media with the first-type boundary condition at the source. *Water Resources Research* 25, 1125–1132.
- Batu, V., 1993. A generalized two-dimensional analytical solute transport model in bounded media for flux-type finite multiple sources. *Water Resources Research* 29, 2881–2892.
- Bear, J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*. McGraw Hill, New York.
- Charbeneau, R.J., 2000. *Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Cleary, R.W., Unger, M.J., 1978. Analytical methods for groundwater pollution and hydrology. *Water Resources Progress Report 78-WR-15*, Princeton University.
- Codell, R.B., Key, K.T., Whelan, G., 1982. A collection of mathematical models for dispersion in surface water and groundwater. Report NUREG-0868, US Nuclear Regulation Committee.

- de Vries, J.J., Simmers, I., 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* 10, 5–17.
- Domenico, P.A., 1987. An analytical model for multi-dimensional transport of a decaying contaminant species. *Journal of Hydrology* 91 (1–2), 49–58.
- Domenico, P.A., Palciauskas, V.V., 1982. Alternative boundaries in solid waste management. *Ground Water* 20 (3), 303–311.
- Domenico, P.A., Robbins, G.A., 1985. A new method of contaminant plume analysis. *Ground Water* 23 (4), 476–485.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*, 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Fryar, A.E., Domenico, P.A., 1989. Analytical inverse modeling of regional scale tritium waste migration. *Journal of Contaminant Hydrology* 4, 113–125.
- Galya, D.P., 1987. A horizontal plane source model for groundwater transport. *Ground Water* 25 (6), 200–209.
- Gelhar, L.W., Welty, C., Rehfeldt, K.W., 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research* 28 (7), 1955–1974.
- Gureghian, A.B., 1987. Analytical solutions for multidimensional transport of a four-member radionuclide decay chain in groundwater. Technical Report BMI/OCRD–25, Battelle Memorial Institute.
- Guyonnet, D., Neville, C., 2004. Dimensionless analysis of two analytical solutions for 3-D solute transport in groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology* 75 (1–2), 141–153.
- Hunt, B.W., 1978. Dispersive sources in uniform groundwater flow. *Journal of Hydraulics Division ASCE* 104 (HY4), 75–85.

- Huyakorn, P., Unger, M.J., Mulkey, L.A., Sudicky, E.A., 1987. A three-dimensional analytical method for predicting leachate migration. *Ground Water* 25 (5), 588–598.
- Leij, F.J., Priesack, E., Schaap, M.G., 2000. Solute transport modeled with Green's functions with application to persistent solute sources. *Journal of Contaminant Hydrology* 41, 155–173.
- Leij, F.J., Skaggs, T., van Genuchten, M.Th., 1991. Analytical solutions for solute transport in three-dimensional semi-infinite porous media. *Water Resources Research* 27 (10), 2719–2733.
- Leij, F.J., Toride, N., van Genuchten, M.Th., 1993. Analytical solutions for non-equilibrium solute transport in three-dimensional porous media. *Journal of Hydrology* 151, 193–228.
- Ogata, A., Banks, R.B., 1961. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. US Geological Survey Professional Paper 411-A.
- Park, E., Zhan, H., 2001. Analytical solutions of contaminant transport from finite one-, two-, and three-dimensional sources in a finite-thickness aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology* 53, 41–61.
- Promma, K., 2010. Approximate solution to simulate dissolved contaminant transport in groundwater from prism source. *Journal of Hydrology* 389, 381–389.
- Sagar, B., 1982. Dispersion in three dimensions: approximate analytical solutions. *Journal of Hydraulics Division ASCE* 108 (HY1), 47–62.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10, 18–39.

- Schwartz, F.W., 1975. On radioactive waste management: an analysis of the parameters controlling subsurface contaminant transfer. *Journal of Hydrology* 27, 51–71.
- Serrano, S.E., 1996. Hydrologic theory of dispersion in heterogeneous aquifers. *Journal of Hydraulic Engineering* 1 (4), 144–151.
- Srinivasan, V., Clement, T.P., Lee, K.K., 2007. Domenico solution—Is it valid? *Ground Water* 45 (2), 136–146.
- Tong, W.X., Rong, Y., 2002. Estimation of methyl tert-butyl ether plume length using the Domenico analytical model. *Environmental Forensics* 3 (1), 81–87.
- Walker, D.D., White, J.E., 2001. Analytical solutions for transport in porous media with Gaussian source terms. *Water Resources Research* 37 (3), 843–848.
- West, M.R., Kueper, B.H., Unger, M.J., 2007. On the use and error of approximation in the Domenico (1987) solution. *Ground Water* 45 (2), 126–135.
- Wexler, E.J., 1992. Analytical solutions for one-, two-, and three-dimensional solute transport in groundwater systems with uniform flow. *US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter B7*.
- Wilson, J.L., Miller, P.J., 1978. Two-dimensional plume in uniform groundwater flow. *Journal of Hydraulics Division ASCE* 104 (HY4), 503–514.
- Yeh, G.-T., 1981. AT123D: analytical transient one-, two-, and three-dimensional simulation of waste transport in the aquifer system. Report ORNL-5602, Oak Ridge National Laboratory.
- Yeh, G.-T., Tsai, Y.-J., 1976. Analytical three-dimensional transient modeling of effluent discharges. *Water Resources Research* 12, 533–540.

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) รองศาสตราจารย์ ดร.กิจการ พรหมมา

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Associate Professor Kitchakarn Promma, Ph.D.
2. อายุ 42 ปี
3. เลขหมายบัตรประชาชน 3-6599-00421-468
4. ครอบครัว สมรสกับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทญ.ลลิตกร พรหมมา

มีบุตร 1 คน ชื่อ เด็กชายโตบุญ พรหมมา
5. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
6. หน่วยงานที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยนเรศวร อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000

โทรศัพท์ 055-962732 หรือ 081-5334489

โทรสาร 055-962750 E-mail: kitpromma@yahoo.com
7. ประวัติการศึกษา

Ph.D. (Geology), Texas A & M University, U.S.A. (2542)

M.S. (Geophysics), Colorado School of Mines, U.S.A. (2538)

วท.บ. เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง (ธรณีวิทยา), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2535)
8. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

อุทกธรณีวิทยา (Hydrogeology) และธรณีวิศวกรรม (Engineering Geology)

9. ประสพการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัย

- หัวหน้าโครงการ เรื่อง กระบวนการทางอุทกธรณีเคมีในปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน ระหว่างแม่น้ำสองสาย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย งบประมาณ 1,200,000 บาท (25 มิ.ย. 2550 – 24 มิ.ย. 2553)
- หัวหน้าโครงการ เรื่อง การป้องกันและบรรเทาภัยจากน้ำป่า แผ่นดินถล่ม และน้ำท่วมในเขต ภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ งบประมาณ 490,000 บาท (16 ส.ค. 2550 – 16 มิ.ย. 2551)
- หัวหน้าโครงการ เรื่อง กระบวนการทางอุทกธรณีเคมีในปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำบาดาลและน้ำผิวดิน ระหว่างแม่น้ำสองสาย ทุนเมธีวิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย งบประมาณ 1,200,000 บาท (25 มิ.ย. 2550 – 24 มิ.ย. 2553)
- หัวหน้าโครงการ เรื่อง การจำลองแบบการบริหารจัดการน้ำบาดาลอย่างเป็นระบบเพื่อแก้ไขปัญหา ภัยแล้ง งบประมาณแผ่นดินปี 2550 งบประมาณ 300,000 บาท (1 มี.ค. 2550 – 29 ก.พ. 2551)
- หัวหน้าโครงการ เรื่อง วิวัฒนาการของเหล็กเฟอร์ในระบบการไหลของน้ำบาดาลท้องถิ่น สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย งบประมาณ 479,000 บาท (1 ก.ค. 2545 – 31 ธ.ค. 2547)
- หัวหน้าโครงการ เรื่อง ผลกระทบจากการใช้น้ำบาดาลบ่อนที่มีต่อสภาพแวดล้อมในจังหวัด พิษณุโลก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ งบประมาณ 500,000 บาท (15 พ.ค. 2544 – 30 เม.ย. 2545)
- หัวหน้าโครงการ เรื่อง การจำลองแบบสามมิติของแหล่งมลพิษและการกระจายตัวของมลพิษชนิด จุดและปนเปื้อนอย่างต่อเนื่องในน้ำบาดาลทดสอบ ณ สถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยเทศบาลนคร พิษณุโลก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ งบประมาณ 200,000 บาท (1 ก.พ. 2544 – 31 ก.ค. 2546)

10. ผลงานวิจัยตีพิมพ์

- กิจการ พรหมมา. 2551. การลดหนี้สินของชาวนาในช่วงวิกฤตน้ำมันโดยใช้ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง. ใน Proceedings การประชุมทางวิชาการนเรศวรวิจัย ครั้งที่ 4. 28–29 กรกฎาคม 2551. มหาวิทยาลัยนเรศวร. (กำลังพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารการวิจัยเพื่อพัฒนาชุมชน)
- กิจการ พรหมมา และสนอง ปะทะนอมปี. 2551. ธรรมชาติในการป้องกันและบรรเทาภัยจากน้ำป่า แผ่นดินถล่ม และน้ำท่วมซ้ำซาก. ใน Proceedings การประชุมทางวิชาการนเรศวรวิจัย ครั้งที่ 4. 28–29 กรกฎาคม 2551. มหาวิทยาลัยนเรศวร. (กำลังพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารการวิจัยเพื่อพัฒนาชุมชน)
- กิจการ พรหมมา. 2550. การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลระดับต้นเพื่อแก้ไขปัญหาภัยแล้ง. ใน Proceedings การประชุมทางวิชาการนเรศวรวิจัย ครั้งที่ 3. 28–29 กรกฎาคม 2550. มหาวิทยาลัยนเรศวร: 316–326.
- Promma, K. 2010. Approximate solution to simulate dissolved contaminant transport in groundwater from prism source. *Journal of Hydrology* 389, 381–389.
- Promma K, Zheng C, Asnachinda P. 2007. Groundwater and surface–water interactions in a confined alluvial aquifer between two rivers: Effects of groundwater flow dynamics on high iron anomaly. *Hydrogeology Journal* 15(3): 495–513
- Promma K. 2004. Urban growth into problematic shallow groundwater resources. In Proceedings of the 2004 International Conference on Water Sensitive Urban Design, 418–427. Adelaide, Australia.
- Promma K. 2003. Integrated management of shallow groundwater resources. In Abstract, International Conference on Water Resources Management for Safe Drinking Water, 26 (abstract). Chiang Mai, Thailand: Chiang Mai University.
- Promma K, A Preechaharn, C Kongmuang, J Boonyanuphap, and W Homhaul. 2002. Shallow–well groundwater quality and potential contamination to paddy soils,

- Phitsanulok, Thailand. In Proceedings, International Seminar on Soil and Environmental Quality, 109–120. Bangkok, Thailand: Kasetsart University.
- Promma K. 2001. Using P-wave velocity logs with petrofabric effects to map natural and blast-induced fractures in hard rocks. *Environmental and Engineering Geoscience* 7: 267–279.
- Promma K. 2001. Sustainable development of groundwater resources in Thailand during global warming. In Abstracts, Regional Conference on Global Change and Sustainable Development in Southeast Asia, 24 (abstract). Chiang Mai, Thailand: Southeast Asian Regional Committee for START.
- Promma K. 2000. Roles of environmental geophysics in contaminant hydrogeology. In Proceedings, International Conference on Applied Geophysics, 127–148. Chiang Mai, Thailand: Chiang Mai University.

11. ผลงานตำรา

- กิจการ พรหมมา. 2555. **ธรณีวิทยาสำหรับวิศวกร**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กิจการ พรหมมา. 2555. **อุทกธรณีวิทยา**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

12. งานบริการสังคม

- สมาชิกตลอดชีพ สมาคมธรณีวิทยาแห่งประเทศไทย
- สมาชิกตลอดชีพ International Association of Hydrological Sciences
- ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินคุณค่าบทความวิจัยนานาชาติ ผลงานทางวิชาการรองศาสตราจารย์ ข้อเสนอโครงการวิจัย รางวัลงานวิจัยของอาจารย์และนิสิต สอบวิทยานิพนธ์ภายนอกสถาบัน
- กรรมการสอบคัดเลือกผู้รับทุนโครงการ พสวท. ศึกษา ณ ต่างประเทศ

- วิทยากรบรรยายพิเศษ อาจารย์พิเศษ มช. และ มรพส.
- กรรมการสำนักหอสมุด มน. กรรมการสภาวิชาการ มรพส.

13. รางวัลหรือทุนการศึกษา

- นักวิจัยพี่เลี้ยง อาจารย์ที่ปรึกษาทุน คปก. และเมธีวิจัย สกว.
- รางวัลศิษย์เก่าดีเด่น สมาคมนักเรียนเก่าและโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม ปี พ.ศ. 2546
- รางวัลเรียนดี มูลนิธิศาสตราจารย์ ดร. แถบ นีละนิธิ ปี พ.ศ. 2531
- รางวัลที่ 1 ระดับประเทศ จากรัฐมนตรีว่าการทบวงมหาวิทยาลัย (ดร.สุบิน ปิ่นขยัน) การสอบ Pre-Entrance สายวิทยาศาสตร์ Center of Knowledge ปี พ.ศ. 2530
- ทุนรัฐบาลไทย (โครงการ พสวท.) ปี พ.ศ. 2531-2542
- Oswald Scholarship/Teaching Assistantship, Texas A & M University จำนวน 2 ปี

ภาคผนวก

บทคัดย่อที่ตีพิมพ์จากผลการวิจัยนี้