

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ปริมาณสารหนู

การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูในน้ำด้วยวิธี Hydride generation method โดยใช้เครื่อง Atomic absorption spectrophotometer . มีหลักการและขั้นตอนดังนี้

หลักการวิเคราะห์

Hydride generation method เป็นการเปลี่ยนสภาพสารหนูให้เป็นไอโดยใช้ sodium borohydride reagent .แล้วส่งผ่านเข้าเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

สารเคมีที่ใช้

1. แกสไนโตรเจนบริสุทธิ์
2. กรดเกลือเข้มข้น
3. กรดกำมะถันเข้มข้น
4. สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 2.5 เปอร์เซ็นต์
5. สารละลายโปแตสเซียมไอโอไดด์ 20 เปอร์เซ็นต์
6. สารละลายเลดอะซิเตท 10 เปอร์เซ็นต์
7. น้ำกลั่น
8. น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน

วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1. Stock standard solution 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร
ชั่ง AS_2O_3 1.3203 กรัม ละลายใน NaOH 20 เปอร์เซ็นต์ 10 มิลลิลิตร ปรับให้เป็นกลางด้วย H_2SO_4 50 เปอร์เซ็นต์ 2.7 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรครบ 1,000 มิลลิลิตร
2. Working standard solution 1 ไมโครกรัมต่อลิตร เจือจาง stock solution 1:1,000 ด้วยน้ำกลั่น

ขั้นตอนการวิเคราะห์

การเตรียมเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

1. ปรับ Wavelength ที่ 193.7 นาโนเมตร
2. ปรับ spectral band width ที่ 1 นาโนเมตร
3. ปรับกระแสไฟ ที่เข้าไปยังหลอด (lamp current) ที่ 7 มิลลิแอมแปร์
4. ปรับตั้ง flame air acetylene

การเตรียมตัวอย่าง

1. ใสตัวอย่างน้ำปริมาณ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปกรวย ขนาด 35 มิลลิลิตร
2. เติม HCl 5 มิลลิลิตร
3. เติมสารละลาย โปแตสเซียมไอโอไดด์ 20 เปอร์เซ็นต์ 1 มิลลิลิตร
4. เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 1 ชั่วโมง
5. ใสตัวอย่างทั้งหมดที่เตรียมไว้แล้วลงใน reaction vessel ของ vapor generator ผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปใน reaction vessel ปรับหน้าปิดเครื่องมือเป็น 0.000
6. ทันทีขณะที่เครื่องกำลังปั่น เติมสารโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 5 มิลลิลิตร ลงใน reaction vessel โดยใช้ syringe ฉีดผ่าน injection port ทันที แล้วอ่านค่าการดูดกลืนสูงสุดของแต่ละตัวอย่าง และบันทึกค่า คำนวณหาปริมาณสารหนู โดยเทียบกับค่าการดูดกลืนของสารละลายมาตรฐาน (reference standard) โดยใช้สาร Arsenic trioxide (As_2O_3) 99.9 เปอร์เซ็นต์ ของ sigma

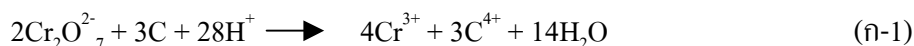
ภาคผนวก ข

การตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ในดิน

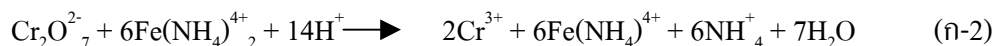
สารอินทรีย์ที่วิเคราะห์ในครั้งนี้เป็น การวิเคราะห์โดยวิธี วอลกี-แบล็ค (Walkley-Black Method) ซึ่งพัฒนาและปรับปรุงโดย Loring and Rantala (1995) เป็นวิธีที่แยกสารฮิวมัสออกจากคาร์บอนอินทรีย์อื่นๆ เช่น แกรไฟท์ (Graphite) ถ่านหิน (Coal) และคาร์บอนอินทรีย์ที่เชื่อมต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และเป็นวิธีที่ดีวิธีหนึ่งในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน โดยสารอินทรีย์ที่วิเคราะห์ออกมาโดยวิธีนี้ เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถออกซิไดซ์ได้ (Readily Oxidizable Organic Matter) ซึ่งถือเป็นสารอินทรีย์ในรูปที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยง่ายในสิ่งแวดล้อม

หลักการวิเคราะห์

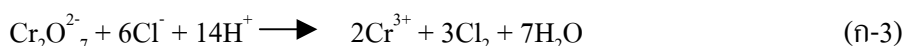
ในสภาวะที่เป็นกรด คาร์บอนอินทรีย์ในตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไดโครเมต ดังแสดงในสมการ ก-1



เมื่อใส่ไดโครเมตให้มีปริมาณที่มากเกินไป เมื่อคาร์บอนอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์ไปหมดแล้ว สามารถหาปริมาณไดโครเมตที่เหลือ โดยปฏิกิริยารีดักชันของไดโครเมตด้วยสารละลายเฟอร์รัส ใช้ไดฟีนิลลามีนเป็นอินดิเคเตอร์ เติมกรดฟอสฟอริกลงไปเพื่อสังเกตจุดยุติได้ง่ายขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แสดงในสมการ ก-2



เนื่องจากไดโครเมตทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ไอออน ดังสมการ ก-3 เพื่อป้องกันการสูญเสียไดโครเมตไปในปฏิกิริยานี้ จึงมีการเติมซิลเวอร์ซัลเฟตลงไป



วิธีการตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ในดิน มีรายละเอียดและขั้นตอนดังแสดงต่อไป

วัสดุและอุปกรณ์

- บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร
- เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
- ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร
-

สารเคมีและวิธีการเตรียม

- กรดฟอสฟอริก
- โซเดียมฟลูออไรด์
- เดกโทรส
- สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นและซิลเวอร์ซัลเฟต (Concentrated H_2SO_4 with Ag_2SO_4) (เตรียมโดย ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 2.5 กรัม ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 ลิตร)
- สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต เข้มข้น 1 นอร์มอล (Standard 1 N $K_2Cr_2O_7$ Solution) (เตรียมโดย ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 49.04 กรัม ในน้ำ และเจือจางเป็น 1 ลิตร)
- สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต เข้มข้น 0.5 นอร์มอล (0.5 N Ferrous Solution) (เตรียมโดย ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 196.1 กรัม ในน้ำ 800 มิลลิลิตรซึ่งมีกรดซัลฟูริกเข้มข้นอยู่ 20 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจางให้เป็น 1 ลิตร)
- ไดฟีนิลลามีนอินดิเคเตอร์ (เตรียมโดย ละลายไดฟีนิลลามีนประมาณ 0.5 กรัม ในน้ำ 20 มิลลิลิตร และกรดซัลฟูริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร)

วิธีดำเนินการ

- ใช้ตัวอย่างดินแห้งที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาดรู 1000 ไมโครเมตร จำนวน 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร
- เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต เข้มข้น 1 นอร์มอล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยใช้ บิวเรต และเติมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่ผสมซิลเวอร์ซัลเฟต จำนวน 20 มิลลิลิตร ผสมกันโดยค่อยๆ หมุนประมาณ 1 นาที
- ตั้งของผสมที่ได้ไว้ประมาณ 30 นาที
- ทำแปลงก็ทุกครั้งเมื่อเปลี่ยนชุดทดลองใหม่
- หลังจาก 30 นาทีผ่านไป เติมน้ำกลั่นปริมาตร 200 มิลลิลิตร ตามด้วยกรดฟอสฟอริก จำนวน 10 มิลลิลิตร และโซเดียมฟลูออไรด์ ปริมาตร 0.2 กรัม

- เติมไดฟีนิลลามีนอินดิเคเตอร์ จำนวน 15 หยด (0.5 มิลลิลิตร)
- ไตเตรทสารละลายที่ได้ด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต เข้มข้น 0.5 นอร์มอล จนถึงจุดยุติ จะได้สารละลายสีเขียวหัวเปิด (brilliant green)

การคำนวณผล

$$\% \text{ สารอินทรีย์} = 10(1-T/S) \times F$$

S = ปริมาณสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต เข้มข้น 0.5 นอร์มอล ที่ใช้ไปในการไตเตรทแบลงก์ (มิลลิลิตร)

T = ปริมาณสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต เข้มข้น 0.5 นอร์มอล ที่ใช้ไปในการไตเตรทตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

F = ค่าที่ได้จาก

$$F = (1.0 \text{ N}) \times 12/4000 \times 1.72 \times 100/\text{น้ำหนักตัวอย่างดิน}$$

$$= 1.03 \text{ เมื่อน้ำหนักของตัวอย่างเท่ากับ } 0.5 \text{ กรัม}$$

การทำมาตรฐานในการวิเคราะห์สารอินทรีย์

ทำมาตรฐานของสารละลายที่ใช้ในการไตเตรทสารอินทรีย์โดยใช้เดกโทรส ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) เป็นสารมาตรฐานซึ่งในเดกโทรสจะมีคาร์บอนอยู่ประมาณ 39.99 เปอร์เซ็นต์

ดำเนินการโดย ชั่งเดกโทรส 0.01 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วทำการทดลองหาปริมาณคาร์บอนด้วยวิธีการเหมือนกับขั้นตอนการหาสารอินทรีย์ในตัวอย่างดินดินหรือแบลงก์ จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณเปอร์เซ็นต์คาร์บอน ค่าที่ได้ควรใกล้เคียงกับ 39.99 เปอร์เซ็นต์ ตามวิธีคำนวณดังสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์คาร์บอน} = 10(1-T/S) \times F$$

เมื่อ $F = (1.0 \text{ N}) \times 12/4000 \times 100/\text{น้ำหนักเดกโทรส}$

(F มีค่าเท่ากับ 30 เมื่อเดกโทรสหนัก 0.01 กรัม)

ภาคผนวก ค

การหาขนาดองค์ประกอบขนาดของดิน

แบ่งตะกอนแห้ง 10-20 กรัม มาวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยกำจัดสารอินทรีย์ด้วย 10 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่อนตะกอนที่หมดสารอินทรีย์นี้ด้วยวิธีการ wet sieving ผ่านตะแกรงขนาด 63 ไมโครเมตร ตะกอนที่ผ่านตะแกรงนำไปวิเคราะห์ต่อโดยวิธี pipett method

หลักการ

การหาขนาดอนุภาคตะกอนระดับการแพร่กระจายของผิวหน้าตะกอนดำเนินการโดยใช้เทคนิคการร่อนและการตกตะกอนด้วยวิธีการบีบอัดซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ตามกฎของสโตรก (Annual Book of ASTM Standard, 1982)

ก่อนการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคตะกอนโดยเทคนิคการตกตะกอน ต้องมีการคำนวณเวลาที่จะใช้ในการบีบอัดสารละลายออกจากระดับความลึกกำหนด เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่ต้องการโดยใช้กฎของสโตรก (Stroke ' Law) ดังสมการนี้

$$D = \sqrt{[30n/980(G - G_1)] \times L/T}$$

เมื่อ

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (มิลลิเมตร)

n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของตัวกลางแขวนลอย (poises) ซึ่งในกรณีนี้คือ น้ำ (ค่าดังกล่าวเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของตัวกลางแขวนลอย)

L คือ ระยะทางจากผิวหน้าของตัวกลางแขวนลอย ถึงระดับซึ่งความหนาแน่นของตัวกลางแขวนลอยถูกวัด (เซนติเมตร)

T คือ ระยะเวลาจากที่เริ่มตกตะกอนจนถึงตอนที่คูตสารละลายออกโดยใช้บีบอัด (นาที)

G คือ ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคดิน

G₁ คือ ความถ่วงจำเพาะ (ความหนาแน่นสัมพัทธ์) ของตัวกลางแขวนลอย

การทดลองในครั้งนี้อ่อนุภาคที่ใช้เป็นตัวอย่างสำหรับการคำนวณหาเวลาที่ต้องการคือ ควอตซ์ (Quartz) ซึ่งเมื่อมีการกระจายตัวในน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะมีค่า $G = 2.65$, $G_1 = 0.998$ และ $n = 0.01$ เมื่อนำมาคำนวณเวลา (T) ซึ่งไม่มีขนาดอนุภาคที่มากกว่า D ไมโครเมตร ในชั้นของสารละลายเนื้อความลึก L (เมื่อ $D = 2$ ไมโครเมตร และ $L = 5$ เซนติเมตร) จะได้ ค่า $T = 231.7$ นาที หรือ 3 ชั่วโมง 52 นาที

วัสดุและอุปกรณ์

- ปิเปตอัตโนมัติ ขนาด 5 มิลลิลิตร
- กระจกตกตะกอน
- ไม้คนตะกอน
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ
- เทอร์โมมิเตอร์
- นาฬิกาจับเวลา
- ตะแกรงร่อน
- อลูมิเนียมฟรอย
- เติลิกเคเตอร์
- เครื่องชั่ง
- ตู้อบ

สารเคมี

- สารกระจายเมื่อดิน (Dispersing Agent) ใช้ สารละลายโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต เข้มข้น 10 % โดยปริมาตร
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

วิธีการดำเนินการ

- 1) กำจัดสารอินทรีย์ออกจากตะกอนดังนี้
 - ชั่งตะกอนแห้งประมาณ 20-30 กรัม (บันทึกน้ำหนัก)
 - เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 10 % โดยปริมาตร เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ และช่วยให้ตะกอนกระจายตัว
 - ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยา 1 คืน

- ให้ความร้อนที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์
 - บางตัวอย่างตะกอนซึ่งมีสารอินทรีย์อยู่มากอาจต้องมีการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณมาก
 - กำจัดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไปออกโดยการทำให้เดือด
- 2) ร้อนตะกอนแบบเปียก (Wet-Sieved) ผ่านตะแกรงร่อนขนาดรู 63 ไมโครเมตร
 - 3) ตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า 63 ไมโครเมตรทำให้แห้งและชั่งน้ำหนัก ผลที่ได้จะเป็นน้ำหนักอนุภาคทราย (Sand)
 - 4) ตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่า 63 ไมโครเมตร ซึ่งประกอบด้วยขนาดอนุภาคที่เป็นทรายแป้ง (Silt)
 - 5) ดินเหนียว (Clay) ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการบีบอัด โดยนำตะกอนส่วนนี้ใส่ลงในกระบอกตกตะกอน
 - 6) เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับปริมาตรบนสุดของกระบอกตวง
 - 7) เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกระดับปริมาตรบนสุดของกระบอกตวง
 - 8) เริ่มใช้ไม้คนกระบอกตวงจนอนุภาคภายในฟุ้งกระจาย เริ่มจับเวลาทันทีหลังจากหยุดคน (การวิเคราะห์ทำที่อุณหภูมิคงที่ 20 องศาเซลเซียส)
 - 9) หลังจากเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง 52 นาที คูดน้ำที่เหนือระดับความลึก 5 เซนติเมตรใส่ในอลูมิเนียมฟอยซึ่งชั่งน้ำหนักไว้ก่อนแล้วโดยใช้ปิเปตอัตโนมัติ
 - 10) ทำให้แห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก ผลที่ได้จะเป็นน้ำหนักของอนุภาคขนาดดินเหนียว (<2 ไมโครเมตร)
 - 11) คำนวณเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคแต่ละขนาด (ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว) โดยถือว่าน้ำหนักรวมของทุกขนาดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์

ภาคผนวก ง

การทดสอบการดูดซับของสารหนู

การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับสารหนูของดินในพื้นที่ศึกษา สามารถทำได้โดยวิธี Batch Adsorption Test โดยแต่ละตัวอย่างดิน จะมีการทำซ้ำ 2 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การเตรียมดิน โดยใช้ตัวอย่างดินที่เก็บในพื้นที่หมู่ที่ 13 ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอ ร่อนพิบูลย์ที่ทำการ ร่อนผ่านตระแกรงเบอร์ 200 จำนวน 0.5 g, 1 g และ 10 g ตามลำดับ

เตรียมสารหนูละลาย โดยเจือจางสารหนูละลายมาตรฐาน ความเข้มข้น 1000 ug/l ในน้ำกลั่น (Deionized Water) ในแต่ละความเข้มข้นมีปริมาตร 25 mL ใช้ความเข้มข้นทั้งหมด 7 ค่า ความเข้มข้น ได้แก่ 5, 10, 20, 50, 100, 200 และ 500 ug/L

การผสมดินกับสารหนูละลาย โดยนำดินมาใส่ในขวด Centrifuge ขนาด 30 mL หลังจากนั้นนำสารหนูละลายที่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้นมาผสม ทำหลอดทดลองควบคุม (Blank) ซึ่งเป็นดินผสมน้ำกลั่นปิดฝา นำไปเขย่าทันทีด้วยเครื่อง Heidolph Promax 2020 ที่ความเร็วรอบ 300 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C จากนั้นก็เก็บใส่ขวดพลาสติก แล้วก็นำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นสุดท้าย

ในการทดลอง Batch นี้ จะใช้ความเข้มข้นของสารละลายประมาณ 7 ค่า ต่อหนึ่งชนิดของดิน ดังนั้นการทดลอง Batch ทั้งหมดรวมเป็นจำนวน 180 ครั้ง จากนั้นนำผลความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ไปฟิตกับสมการแบบ Freundlich เพื่อหาค่า K_p และค่า CEC ของดินในพื้นที่ศึกษา โดยมีรูปแบบของสมการคือ

$$\log q = \log K + \left(\frac{1}{n} \right) \log C_f$$

ภาคผนวก จ

ตารางผลการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่ศึกษา

ตาราง จ-1 ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยพื้นที่ศึกษา

ปีพ.ศ.	ปริมาณน้ำฝนรายเดือน (มิลลิเมตร)												รายปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
2528	9	51	88	206	105	117	50	25	78	106	406	198	1438
2530	65	53	8	23	90	119	14	185	247	232	205	756	1995
2531	140	43	55	113	281	42	211	103	185	79	1236	161	2648
2533	42	53	7	169	130	74	27	11	67	300	308	333	1521
2535	133	36	84	122	120	67	77	95	141	224	500	299	1899
2536	85	7	61	117	96	273	126	60	99	147	404	593	2067
2537	15	49	209	72	106	74	40	96	56	281	933	105	2036
2538	78	15	25	84	98	18	83	164	115	197	870	166	1911
2539	133	36	84	122	120	67	77	95	141	224	500	299	1899
2540	107	89	147	343	16	45	96	150	206	341	383	568	2489
2541	13	53	61	138	85	55	82	169	84	437	243	304	1723
2542	259	286	126	145	123	33	72	62	196	230	148	126	1804
2543	270	150	664	276	173	83	77	112	320	218	1133	386	3863
2544	325	16	337	163	98	95	167	62	30	154	276	479	2202
2545	44	19	86	122	107	67	19	115	109	256	771	535	2251
เฉลี่ย	114	64	136	148	117	82	81	100	138	228	554	354	2116
SD	99	71	169	79	56	60	54	51	79	91	348	195	581

ตาราง จ-2 ข้อมูลการคายระเหยที่วัด ณ สถานีจังหวัดนครศรีธรรมราช

ปีพ.ศ.	ปริมาณการคายระเหยรายเดือน (มิลลิเมตร)												รายปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
2526	93	122	147	162	121	105	124	113	112	103	80	75	1357
2527	78	87	129	123	122	123	115	144	111	107	83	65	1287
2529	98	107	141	130	119	123	129	110	99	93	89	90	1328
2530	91	112	143	151	134	121	154	135	121	114	95	74	1446
2531	90	110	145	124	123	132	117	132	101	97	55	80	1305
2532	93	114	134	130	121	147	118	134	131	114	98	107	1441
2533	115	123	162	151	126	160	153	183	121	128	90	104	1616
2534	107	109	140	129	115	126	127	124	119	113	92	107	1407
2535	100	114	150	150	152	125	139	123	131	88	84	83	1438
2536	206	106	119	139	138	133	141	158	126	111	92	88	1558
2537	111	116	118	131	129	120	141	125	108	111	93	99	1400
2538	102	102	136	150	150	138	113	118	103	106	76	87	1379
2539	104	104	148	122	133	115	130	128	117	100	97	89	1386
2542	119	113	159	122	123	125	137	146	140	105	94	86	1468
2543	112	123	126	130	136	106	145	125	125	116	74	99	1416
2546	115	133	158	173	136	144	128	145	136	99	101	92	1559
เฉลี่ย	108	112	141	139	130	128	132	134	119	107	87	89	1424
SD	28	11	13	16	11	14	13	18	12	10	12	12	92

ตาราง จ-3 ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ณ สถานีอำเภอเมืองนครศรีธรรมราช

ปีพ.ศ.	ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์รายเดือน (%)												รายปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
2536	84	81	84	82	83	80	75	76	82	87	87	86	82
2537	82	81	84	82	84	80	74	81	84	85	89	84	83
2538	83	82	80	78	78	77	82	81	82	86	90	83	82
2539	82	83	78	81	82	82	78	81	80	86	87	86	82
2540	80	81	80	81	78	80	80	80	85	86	88	87	82
2541	82	78	75	73	77	79	81	84	85	87	87	88	81
2542	86	83	80	80	82	78	77	77	83	85	85	85	82
2543	85	83	83	83	80	82	77	77	82	83	88	86	82
2544	85	79	84	80	81	80	81	75	82	87	87	84	82
2545	82	79	79	79	80	78	74	76	79	83	87	86	80
2546	82	79	80	77	80	80	80	81	79	82	88	86	81
เฉลี่ย	83	81	81	80	80	80	78	79	82	85	88	86	82
SD	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	1	1	1

ตารางที่ จ-4 ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยของสถานีคลองเสาชง ระหว่างปี พ.ศ. 2533 ถึง พ.ศ. 2542

ปีพ.ศ.	ปริมาณน้ำท่ารายเดือนของสถานี คลองเสาชง (X167) (ล้านลูกบาศก์เมตร)												รายปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
2533	9.06	5.59	7.62	3.76	2.46	0.97	0.89	2.30	2.41	20.95	63.32	57.22	176.55
2535	24.63	12.17	12.84	12.01	9.82	5.36	3.31	8.22	4.69	15.71	46.21	44.08	199.05
2538	14.41	23.89	3.99	4.32	3.09	14.27	11.19	12.18	7.69	7.92	92.43	25.97	221.35
2541	42.20	60.25	18.12	5.46	6.62	7.26	5.80	5.62	11.47	28.48	51.76	66.53	309.57
2542	30.06	19.93	83.10	20.84	11.53	11.05	11.19	10.26	8.41	12.54	18.85	54.63	292.39
เฉลี่ย	24.07	24.37	25.13	9.28	6.70	7.78	6.48	7.72	6.93	17.12	54.51	49.69	239.78
SD	11.69	19.02	29.37	6.49	3.58	4.59	4.15	3.48	3.12	7.09	23.93	13.85	52.22
เฉลี่ย (มม.)	90	91	94	35	25	29	24	29	26	64	203	185	895

ภาคผนวก จ

การคำนวณหาปริมาณการเติมน้ำ

กำหนดค่า

ก) ค่าปริมาณการเก็บกักน้ำสูงสุดของดิน (Maximum Soil Water Storage, S_{max}) หมายความว่าถ้ามีปริมาณน้ำมากกว่าค่า S_{max} น้ำจะล้นจากชั้นดิน อาจจะไปไหลบนผิวดินเป็นน้ำท่า หรืออาจซึมลงใต้ดิน

ข) ค่าปริมาณการเก็บกักน้ำต่ำสุดของดิน (Minimum Soil Water Storage, S_{min}) หมายความว่าน้ำในดินมีน้อยมาก ทำให้มีแรงยึดติดกับเม็ดดินสูงมาก ในสภาวะปกติจะไม่สูญเสียน้ำออกจากจากดิน

ค) ค่าปริมาณการเก็บกักเริ่มต้น (Initial Soil Water Storage, S_0) เป็นการกำหนดค่าการเก็บกักน้ำของชั้นดินในเดือนแรกของการคำนวณ ซึ่งในการคำนวณเราได้เลือกเดือนมกราคมเป็นเดือนเริ่มต้น เนื่องจากเดือนมกราคมเป็นเดือนที่อยู่ในช่วงปลายฤดูฝนดินมีความอิ่มตัวเต็มที่ ทำให้มั่นใจได้ว่าค่าปริมาณการเก็บกักเริ่มต้นจะมีค่าเท่ากับปริมาณการเก็บกักสูงสุด

ง) ค่าการระเหยจริงเริ่มต้น (Initial Actual Evaporation, ETa_0) เนื่องจากเดือนเริ่มต้นเป็นเดือนปลายฤดูฝน ปริมาณน้ำเก็บกักในดินยังมีมาก ดังนั้นค่าการคายระเหยจริงของเดือนนี้จึงมีค่าเท่ากับศักย์ของการระเหยของเดือนเดียวกัน นั่นคือ $ETa_0 = ETp_0$

การคำนวณปริมาณการเก็บกักของน้ำในดิน

เนื่องจากเราได้เลือกเดือนมกราคมเป็นเดือนเริ่มต้น ดินมีความอิ่มตัวเต็มที่ กำหนดให้ปริมาณการเก็บกักในเดือนแรกเท่ากับการเก็บกักสูงสุด ($S_0 = S_{max}$) ดังนั้นในการคำนวณปริมาณการเก็บกักน้ำในดินจะคำนวณตั้งแต่เดือนที่สองเป็นต้นไป โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างปริมาณฝนของเดือนนั้น (R_m) กับศักย์การคายระเหยของเดือนนั้น (ETp_m) โดยมี 2 กรณี คือ

ก) กรณีที่ปริมาณฝนมากกว่าศักย์การระเหย จะได้ปริมาณการเก็บกักในดินเป็นปริมาณฝนในเดือนนั้น ลบด้วยศักย์การระเหยในเดือนนั้น บวกกับปริมาณการเก็บกักของเดือนที่ผ่านมา แต่ทั้งนี้ปริมาณการเก็บกักเดือนนั้นๆ (S_m) จะต้องไม่มากกว่าปริมาณการเก็บกักสูงสุด

$$S_m = \min[(R_m - ETp_m + S_{m-1}), S_{max}]$$

ข) กรณีที่ปริมาณฝนน้อยกว่าศักยภาพการคายระเหยจะได้ปริมาณการเก็บกักเป็นแฟกเตอร์ (Factor) ของปริมาณการเก็บกักของเดือนที่ผ่านมา ซึ่งจากการทดลองของ Thornthwaite (Dingman, 1994) จะได้ค่าแฟกเตอร์เป็น $\exp(-((ETp_m - R_m)/S_{max}))$ อย่างไรก็ตามปริมาณการเก็บกักจะไม่ค่อยไปกว่าปริมาณเก็บกักต่ำสุด (S_{min})

$$S_m = \max [(S_{m-1}) \exp (-((ETp_m - R_m)/ S_{max})), S_{min}]$$

การคำนวณปริมาณการระเหยจริง

ปริมาณการระเหยจริง (ETa) ขึ้นอยู่กับปริมาณฝน ศักยภาพการระเหย และปริมาณการเก็บกักในดิน สำหรับเดือนแรกของการคำนวณ ได้ใช้เดือนมกราคมซึ่งเป็นเดือนที่เกือบปลายฤดูฝนซึ่งมีปริมาณฝนมากบวกกับปริมาณการเก็บกักในดินสูง ดังนั้นเราสามารถกำหนดได้ว่าปริมาณการระเหยจริงของเดือนนี้มีค่าเท่ากับศักยภาพการระเหยของเดือนเดียวกัน สำหรับเดือนต่อไป มีวิธีการคำนวณ ดังนี้

ก) กรณีที่ปริมาณฝนมากกว่าศักยภาพการระเหย ปริมาณการระเหยจริงในเดือนนั้นๆ (ETa_m) จะต้องเท่ากับศักยภาพการระเหยของเดือนนั้นๆ

$$ETa_m = ETp_m$$

ข) กรณีที่ปริมาณฝนน้อยกว่าศักยภาพการระเหย ปริมาณการระเหยจริงจะเท่ากับปริมาณฝนบวกด้วยปริมาณการเก็บกักของเดือนที่ผ่านมาลบด้วยปริมาณการเก็บกักของเดือนนั้นๆ

$$ETa_m = R_m + S_{m-1} - S_m$$

การคำนวณปริมาณการไหลออก (out flow)

ปริมาณการไหลออกประกอบด้วย การไหลในลำน้ำหรือน้ำท่า (stream flow) และการซึมลงสู่หน้าดิน (groundwater recharge)

ก) กรณีที่ปริมาณฝนมากกว่าปริมาณการระเหยจริง ปริมาณการไหลออกในเดือนนั้นๆ (OUT_m) จะมีค่าเท่ากับปริมาณฝนลบด้วยปริมาณการระเหยจริงลบด้วยปริมาณการเก็บกักที่เปลี่ยนแปลง (ΔS) ซึ่งปริมาณการเก็บกักที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับการเก็บกักของเดือนนี้ลบด้วยการเก็บกักของเดือนที่ผ่านมา

$$OUT_m = R_m - ETp_m - \Delta S_m$$

ข) กรณีที่ปริมาณฝนน้อยกว่าปริมาณการระเหยจริง จะไม่มีการไหลออก ทั้งนี้เนื่องจากฝนจะระเหยไปหมด

$$OUT_m = 0$$

ซึ่ง $\Delta S = S_m - S_{m-1}$ และ OUT_m คือ ปริมาณการไหลออกในเดือนนั้น

การคำนวณปริมาณการซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดิน (groundwater recharge)

เนื่องจากบางเดือนปริมาณการระเหยมีค่ามากกว่าปริมาณฝน ดังนั้นน้ำในดินส่วนใหญ่มักจะระเหยออกไป สำหรับเดือนที่มีฝนมากกว่าค่าระเหย น้ำที่เหลือจากการเก็บกักในดินบางส่วนก็จะกลายเป็นน้ำท่าและบางส่วนก็จะซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดิน ในกรณีที่มิมีน้ำไหลในลำน้ำในเดือนที่มีปริมาณการระเหยสูงกว่าปริมาณฝน นั่นเป็นเพราะการซึมออกจากระบบน้ำใต้ดินเข้าสู่ลำน้ำ ดังนั้นการคำนวณปริมาณการซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดินมีลำดับการคำนวณ ดังนี้

พิจารณาเฉพาะเดือนที่มีการไหลออกจากชั้นดิน โดยรวมปริมาณการไหลออกรายเดือน (OUT_m) ทุกๆ เดือน จะได้ปริมาณการไหลออกจากชั้นดินรายปี (OUT_y)

จากสถิติน้ำท่า เลือกรวมปริมาณน้ำท่าเฉพาะเดือนที่มีการไหลออกจากชั้นดิน ($STREAM_{mf}$) สำหรับทุกเดือนที่มีการไหลออกจากชั้นดิน ปริมาณการไหลออกจากชั้นดินลบด้วยปริมาณน้ำท่า จะเป็นปริมาณการซึมลงสู่ระบบน้ำใต้ดินในช่วงเดือนที่มีการไหลออกจากชั้นดิน (GW_{mf})

$$GW_{mf} = OUT_y - STREAM_{mf}$$

ในช่วงเดือนที่ไม่มีมีการไหลออกจากชั้นดินแต่ยังมีน้ำไหลในลำน้ำ เพราะน้ำจากระบบน้ำใต้ดินซึมเข้าสู่ลำน้ำ ดังนั้นเราอาจคำนวณปริมาณน้ำที่เติมเข้าสู่ระบบน้ำใต้ดินสุทธิ (GW_{net}) ได้จากปริมาณไหลออกจากชั้นดินรายปี (OUT_y) ลบด้วยปริมาณน้ำท่ารายปี ($STREAM_y$)

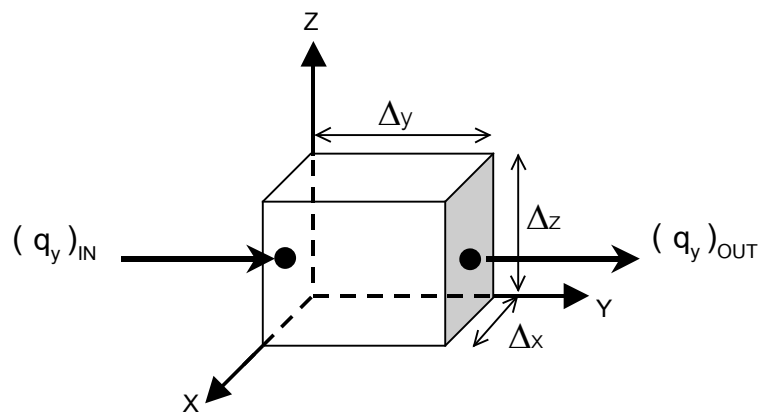
$$GW_{net} = OUT_y - STREAM_y$$

ภาคผนวก ข

สมการการไหลของน้ำใต้ดิน

สมการหลัก 2 สมการในการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข คือ กฎของดาร์ซีและกฎทรงมวล ดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 1.5.3.1 การไหลทั่วไป (3 มิติ) ของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ ผ่านตัวกลางที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) และมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง (anisotropic) ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1-9 ในหัวข้อ 1.5.3.1 ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation)

สมการการไหลผ่านตัวกลางพรุนอ้างอิง (Representation Elementary Volume : REV) ดังรูป x-x ซึ่งมีขนาดใหญ่มากพอที่จะเป็นตัวแทนของคุณสมบัติของตัวกลางพรุนนั้นได้ และจะต้องมีขนาดเล็กพอที่จะทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำภายในมีค่าน้อยมากๆ โดยปริมาตรของ REV ที่มีลักษณะเป็นรูปลูกบาศก์มีค่าเท่ากับ $\Delta x \Delta y \Delta z$



รูปที่ ข-1 รูปแสดง Representation Elementary Volume : REV (Anderson and Woessner, 1992)

การไหลผ่าน REV กำหนดให้เป็นเทอมของอัตราการไหล (q) ที่แสดงในรูปแบบ 3 มิติทั่วไป คือ

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (1)$$

เมื่อ i_x, i_y, i_z คือ หน่วยเวกเตอร์ในแนวแกน x, y, z

จากกฎทรงมวลของการไหลผ่านตัวกลางพรุนในสมการที่ 1-5 พิจารณาการไหลในแนวแกน y ของ REV ดังแสดงในรูป 1-9 การไหลเข้าสู่ REV ผ่านผนังด้าน $\Delta x \Delta z$ มีค่าเท่ากับ $(q_y)_{IN}$ และการไหลออกจาก REV ผ่านผนัง $\Delta x \Delta z$ มีค่าเป็น $(q_y)_{OUT}$ ถ้าเอาค่าการไหลออกลบการไหลเข้าในแนวแกน y จะได้

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z \quad (2)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (3)$$

หรือกล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลผ่าน REV ในแนวแกน y คือ

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (4)$$

สำหรับการพิจารณาการไหลในแนวแกน x และแกน z จะใช้หลักการในทำนองเดียวกัน ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลมีค่าเท่ากับ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรกักเก็บ ดังสมการ (5)

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{change in storage} \quad (5)$$

ในกรณีที่มีการสูญเสียจากการซึมหรือการใช้ (sink) หรือมีการเพิ่มเติมน้ำจาก Recharge หรือ injection well (source) ภายใน REV จะมีค่า Volumetric inflow rate คือ $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$ เมื่อกำหนดให้ R^* มีค่าเป็นบวก ในกรณีที่เป็ค่า Source ซึ่งจะเพิ่มเข้าทางด้านซ้ายของสมการ (5) ดังนี้

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{change in storage} \quad (6)$$

พิจารณาด้านขวามือของสมการ (6) change in storage สามารถแทนค่าโดย Specific storage (S_s) ซึ่งกำหนดให้เป็นสัดส่วนของปริมาณน้ำซึ่งไหลออกจากการกักเก็บ ต่อหน่วยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ ต่อหน่วยปริมาตรของชั้นหินให้น้ำ

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (7)$$

โดยปกติ ค่า ΔV ในสมการ (7) มีค่าเป็นบวกเมื่อค่า Δh มีค่าเป็นลบ หรือกล่าวได้ว่า ปริมาณน้ำที่กักเก็บจะลดลงเมื่อแรงดันน้ำลดลง ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกักเก็บใน REV คือ

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (8)$$

รวมสมการ (6) และสมการ (8) เข้าด้วยกัน แล้วหารด้วย $\Delta x \Delta y \Delta z$ จะได้สมการสุดท้ายคือ สมการ (9)

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = - S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (9)$$

สมการที่ได้นี้มีการใช้งานน้อยมาก เพราะไม่สามารถวัดค่า q ได้โดยตรง ดังนั้น จะใช้สมการของดาร์ซีช่วยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และค่า h ซึ่งค่าแรงดันน้ำสามารถวัดได้ โดยใช้สมการของดาร์ซีใน 3 มิติ เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_x &= - K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= - K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= - K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (10)$$

เมื่อนำค่า q_x, q_y และ q_z ไปแทนที่ในสมการที่ (9) จะได้สมการหลักคือ

$$\frac{\partial}{\partial x}[-K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[-K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z}[-K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z}] + R^* = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10)$$

เมื่อ K_x, K_y, K_z = ค่าความนำชลศาสตร์ ในแนว x, y, z [LT^{-1}]

h = ความสูงของระดับความดันน้ำ [L]

R^* = ปริมาณน้ำเข้า (recharge) และ/หรือปริมาณน้ำออก (discharge) จากระบบ ต่อหน่วยปริมาตรของชั้นหินให้น้ำ ต่อหน่วยเวลาที่น้ำเข้า และ/หรือ ออก [T^{-1}] (กรณีจำลองการไหลออก R มีค่าเป็นลบ)

S_s = ค่าการกักเก็บจำเพาะ (specific storage) [L^{-1}]

t = เวลา [T]