

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

งานวิจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน โดยการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของดิน และความเข้มข้นของแคตไอออนและแอนไอออนในสารละลายดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ได้แก่ ดินนาข้าว เมื่อสมมูลเคมีของดินถูกรบกวนจากสารละลายกรดซัลฟริก (H_2SO_4)

ส่วนที่ 2 การเปรียบเทียบแบบจำลองสมมูลเคมีของดิน เพื่อประมาณความเข้มข้นของอะลูมิเนียมและแมงกานีสที่ละลายออกมาจากดินนาข้าว ในการคำนวณหาความเข้มข้นของอะลูมิเนียมและแคตไอออนในสารละลายดินหลังสมมูลเคมีของดินถูกรบกวน

ส่วนที่ 1: การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

พื้นที่ศึกษา

เก็บตัวอย่างดินตามการใช้ประโยชน์ที่ดิน คือ ดินนาข้าว โดยมีจุดเก็บตัวอย่างดิน 21 ตัวอย่าง เพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละชุดดินได้แก่ ชุดดินอยุธยา ชุดดินโคกกระเทียม ชุดดินท่าเรือ ชุดดินบางเลน ชุดดินบางปะอิน ชุดดินวัฒนา และชุดดินราชบุรี ดังภาพที่ 3.1 แสดงพื้นที่ศึกษา

ภาพที่ 3.1

จุดเก็บตัวอย่างดินชุดดินอยุธยา อ. พระนครศรีอยุธยา

จ.พระนครศรีอยุธยา (พ.ศ. 2552)



ก.



ข.



ค.

หมายเหตุ:

ก: ชุดดินอยุธยา พิกัด 1591653N 673429E

ข: ชุดดินอยุธยา พิกัด 1591577N 673440E

ค: ชุดดินอยุธยา พิกัด 1591064N 673828E

ภาพที่ 3.2

จุดเก็บตัวอย่างดินชุดดินท่าเรือ อ.นครหลวง

จ.พระนครศรีอยุธยา (พ.ศ. 2552)



ง.



จ.



ฉ.

หมายเหตุ:

ง: ชุดดินท่าเรือ พิกัด 1604929N 678864E

จ: ชุดดินท่าเรือ พิกัด 1604871N 678981E

ฉ: ชุดดินท่าเรือ พิกัด 1604998N 678530E

ภาพที่ 3.3

จุดเก็บตัวอย่างดินชุดดินโคกกระเทียม อ.นครหลวง

จ.พระนครศรีอยุธยา (พ.ศ. 2552)



ข.



ช.



ฅ.

หมายเหตุ:

ข: ชุดดินโคกกระเทียม พิกัด 1599872N 672248E

ช: ชุดดินโคกกระเทียม พิกัด 1599793N 672384E

ฅ: ชุดดินโคกกระเทียม พิกัด 1599711N 672324E

ภาพที่ 3.4

จุดเก็บตัวอย่างดินชุดดินบางเลน อ.พระนครศรีอยุธยา

จ.พระนครศรีอยุธยา (พ.ศ. 2552)



ญ.



ฎ.



ฏ.

หมายเหตุ:

ญ: ชุดดินบางเลน	พิกัด 1595172N 674899E
ฎ: ชุดดินบางเลน	พิกัด 1595269N 675480E
ฏ: ชุดดินบางเลน	พิกัด 1593575N 674948E

ภาพที่ 3.5

จุดเก็บตัวอย่างดินชุดดินบางปะอิน อ.บางปะหัน

จ.พระนครศรีอยุธยา (พ.ศ. 2552)



ฐ.



ฑ.



ฒ.

หมายเหตุ:

ฐ: ชุดดินบางปะอิน	พิกัด 1607552N 673476E
ฑ: ชุดดินบางปะอิน	พิกัด 1606892N 672991E
ฒ: ชุดดินบางปะอิน	พิกัด 1606256N 672006E

ภาพที่ 3.6

จุดเก็บตัวอย่างดินชุดดินวัฒนา อ.บางปะหัน

จ.พระนครศรีอยุธยา (พ.ศ. 2552)



ณ.



ด.



ต.

หมายเหตุ:

ณ: ชุดดินวัฒนา	พิกัด 1625558N 674001E
ด: ชุดดินวัฒนา	พิกัด 1628236N 674759E
ต: ชุดดินวัฒนา	พิกัด 1632158N 674236E

ภาพที่ 3.7

จุดเก็บตัวอย่างดินชุดดินราชบุรี อ.พระนครศรีอยุธยา

จ.พระนครศรีอยุธยา (พ.ศ. 2552)



ถ.



ท.



ธ.

หมายเหตุ:

ถ: ชุดดินราชบุรี

พิกัด 1598123N 672674E

ท: ชุดดินราชบุรี

พิกัด 1597155N 672625E

ธ: ชุดดินราชบุรี

พิกัด 1596720N 672190E

วิธีการศึกษา

แบ่งวิธีการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ภาคสนาม

1. ศึกษาสภาพพื้นที่ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่
 - ศึกษาพื้นที่เก็บตัวอย่างดิน เพื่อเป็นตัวแทนของการใช้ประโยชน์ที่ดินนาข้าว ในชุดดินอยุธยา ชุดดินโคกกระเทียม ชุดดินท่าเรือ ชุดดินบางเลน ชุดดินบางปะอิน ชุดดินวัฒนา และชุดดินราชบุรี บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา
 - เก็บข้อมูลลักษณะพื้นที่ และค่าพิกัดบริเวณที่เก็บตัวอย่าง
2. การเก็บตัวอย่าง มีวิธีการเก็บตัวอย่าง ดังนี้
 - เลือกพื้นที่ตามการใช้ประโยชน์ที่ดิน ที่เป็นตัวแทนของดินนาข้าวในชุดดินอยุธยา ชุดดินโคกกระเทียม ชุดดินท่าเรือ ชุดดินบางเลน ชุดดินบางปะอิน ชุดดินวัฒนา และชุดดินราชบุรี บริเวณจังหวัดพระนครศรีอยุธยา
 - เก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร (กรมพัฒนาที่ดิน, 2544) ชนิดดินละ 3 ตัวอย่าง ปริมาณตัวอย่างละ 2 กิโลกรัม
3. การวิเคราะห์ตัวอย่างดินภาคสนาม
 - วัดค่าความเป็นกรด – เบสในดินตัวอย่าง ณ จุดเก็บตัวอย่าง ด้วย pH test kit

ขั้นตอนที่ 2: ห้องปฏิบัติการ

1. การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อการวิเคราะห์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้
 - นำตัวอย่างดินมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม
 - บดดิน และร่อนผ่านตระแกรงช่องขนาด 2 มิลลิเมตร
 - นำตัวอย่างดินตามการใช้ประโยชน์ที่ดินเดียวกัน มาผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วเลือก 1 กิโลกรัม เพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละการใช้ประโยชน์ที่ดิน
 - เก็บตัวอย่างดินลงถุงเก็บตัวอย่างเพื่อรอการวิเคราะห์ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2544)
2. วิเคราะห์ตัวอย่าง
 - วิเคราะห์ตัวอย่างดิน 12 พารามิเตอร์

ตารางที่ 3.1
พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

พารามิเตอร์	อ้างอิง
1. ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter)	American Society of Agronomy, 1982
2. ปริมาณอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable aluminum)	American Society of Agronomy, 1982
3. ปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ บวกของดิน (C.E.C)	American Society of Agronomy, 1982
4. ปริมาณความเป็นกรดของดิน (extractable acidity)	American Society of Agronomy, 1982
5. ปริมาณแคลเซียม (Ca^{2+})	American Society of Agronomy, 1982
6. ปริมาณแมกนีเซียม (Mg^{2+})	American Society of Agronomy, 1982
7. ปริมาณโซเดียม (Na^+)	American Society of Agronomy, 1982
8. ปริมาณโพแทสเซียม (K^+)	American Society of Agronomy, 1982
9. ปริมาณฟอสเฟต (PO_4^{3-})	American Society of Agronomy, 1982
10. ปริมาณเหล็ก (Fe^{3+})	American Society of Agronomy, 1982
11. ปริมาณแมงกานีส (Mn^{2+})	American Society of Agronomy, 1982
12. ความเป็นกรด - เบส (pH)	American Society of Agronomy, 1982

ขั้นตอนที่ 3: การวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน มีขั้นตอน ดังนี้

1.1 นำตัวอย่างดิน 7 ชุดดิน ที่เป็นตัวแทนของการใช้ประโยชน์ที่ดินของชุดดินใน
นาข้าวจังหวัดอยุธยา วิเคราะห์หาค่า 12 พารามิเตอร์เบื้องต้นของดิน (ทำ 3 ซ้ำ)

2. การวิเคราะห์สารละลายในตัวอย่างดิน (5 ขั้นตอน) มีขั้นตอนดังนี้ (ภาพที่ 3.8)

- 2.1 ชั่งตัวอย่างดิน 7 ชุดดินได้แก่ชุดดินอยุธยา ชุดดินโคกกระเทียม ชุดดินท่าเรือ ชุดดินบางเลน ชุดดินบางปะอิน ชุดดินวัฒนา และชุดดินราชบุรีที่เป็นตัวแทนของการใช้ประโยชน์ที่ดินของดินนาข้าวในแต่ละชุดดิน ชนิดดินละ 1 กิโลกรัม ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ 3 ลิตร

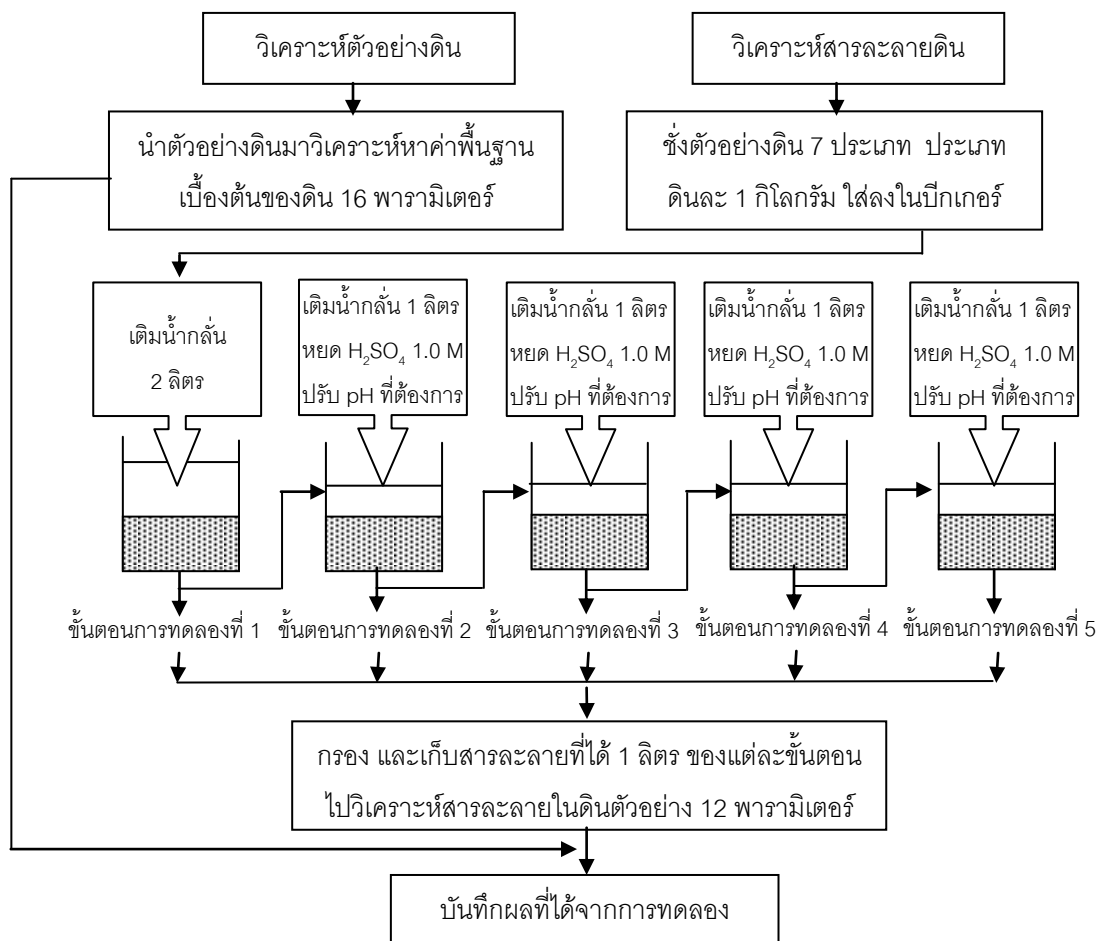
2.2 เติมน้ำกลั่นในแต่ละตัวอย่างดินปริมาตร 2 ลิตร ใส่ปิ๊กเกอร์ คนซ้ำๆ ให้เข้ากัน แล้วตั้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เข้าสู่สมดุล (Ludwig, Prenzel and Khanna, 1998)

2.3 กรองสารละลายดิน จากขั้นตอนที่ 2.2 จากนั้นเก็บสารละลายที่ได้ 1 ลิตร ไปวิเคราะห์สารละลายในตัวอย่างดิน 12 พารามิเตอร์ (ขั้นตอนที่ 1)

2.4 นำสารละลายที่เหลือจากการกรองใส่กลับลงไปในปิ๊กเกอร์ที่มีตัวอย่างดินเดิมอยู่ หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่น 1 ลิตร ใส่ลงในปิ๊กเกอร์ แล้วหยดสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ระดับความเข้มข้น 1.0 โมลลาร์ ซึ่งขณะหยดกรด ต้องวัดค่าความเป็นกรด เบส ด้วย pH meter และคนซ้ำๆ อย่างสม่ำเสมอ โดยหยดกรดจนกระทั่งค่าความเป็นกรด-เบสลดลงประมาณ 1 หน่วยตามที่ต้องการ แล้วตั้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นทำตามขั้นตอนที่ 2.3 อีกครั้ง (ขั้นตอนที่ 2)

2.5 ทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2.3 และ 2.4 อีก 3 ครั้ง (ขั้นตอนที่ 3-5)

ภาพที่ 3.8
ขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน



3. วัสดุ และอุปกรณ์

3.1 อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างดิน

- (1) จอบ
- (2) พลั่ว
- (3) เทปวัดระยะ
- (4) ถังเก็บตัวอย่างดิน
- (5) อุปกรณ์ติดฉลาก

3.2 อุปกรณ์ในการเตรียม และวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

- (1) เครื่องบดดิน
- (2) ตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร
- (3) ขวดแก้วทรงสารละลาย ขนาด 300 มิลลิลิตร
- (4) กระดาษกรอง GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
- (5) เครื่องแก้วต่าง ๆ
- (6) เครื่องดูดสูญญากาศ
- (7) ตู้อบ
- (8) โถดูดความชื้น
- (9) เครื่องวัดความเป็น เบส (pH meter)
- (10) เครื่องวัดความขุ่น (turbidimeter)
- (11) เครื่องวัดความเข้มข้นของสารละลาย (spectrophotometer)
- (12) ตาชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- (13) เครื่องคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมภาษาวิซวล เบสิก (Visual basic)

ส่วนที่ 2: การสร้างแบบจำลองสมดุลเคมีของดิน

1. ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสมดุลเคมี

การสร้างแบบจำลองสมดุลเคมีในครั้งนี้ ใช้ข้อมูล 2 ชุด ดังนี้

- 1.) ข้อมูลนำเข้าเพื่อใช้ในการคำนวณ ได้แก่ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินของดินนาข้าวทั้ง 7 ชุดดิน

2.) ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบและทดสอบผลการคำนวณของแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคตไอออน และแอนไอออนในสารละลายดินของดินนาข้าวทั้ง 7 ชุดดิน

2. การออกแบบชุดสมการทางคณิตศาสตร์

นำความสัมพันธ์ของทฤษฎีทางเคมีที่เกี่ยวข้องกัน อันได้แก่ การละลายของแร่ การเกิดไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียม การแลกเปลี่ยนไอออน และ ionic strength มาสร้างเป็นชุดสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ (1)–(49) จากนั้นจึงออกแบบค่าข้อมูลนำเข้า กระบวนการประมวลผล และผลลัพธ์จากความสัมพันธ์นั้น แล้วนำไปออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) ดังนี้

ข้อมูลนำเข้า (input) ได้แก่

Al-soil:	ค่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่อนุภาคดิน หน่วย พีพีเอ็ม
H-soil:	ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่อนุภาคดิน หน่วย พีพีเอ็ม
Fe-soil:	ค่าความเข้มข้นของเหล็กที่อนุภาคดิน หน่วย พีพีเอ็ม
Mn-soil:	ค่าความเข้มข้นของแมงกานีสที่อนุภาคดิน หน่วย พีพีเอ็ม
Ca-soil:	ค่าความเข้มข้นของแคลเซียมที่อนุภาคดิน หน่วย พีพีเอ็ม
Mg-soil:	ค่าความเข้มข้นของแมกนีเซียมที่อนุภาคดิน หน่วย พีพีเอ็ม
K-soil:	ค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่อนุภาคดิน หน่วย พีพีเอ็ม
Na-soil:	ค่าความเข้มข้นของโซเดียมที่อนุภาคดิน หน่วย พีพีเอ็ม
pH:	ค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ในดิน

ผลลัพธ์ (output) ได้แก่

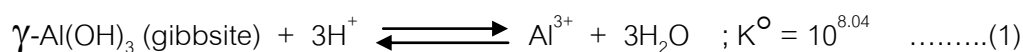
Al^{3+} :	ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมทั้งหมดในสารละลาย หน่วย พีพีเอ็ม
Fe^{3+} :	ความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดในสารละลาย หน่วย พีพีเอ็ม
Mn^{2+} :	ความเข้มข้นของแมงกานีสทั้งหมดในสารละลาย หน่วย พีพีเอ็ม
Ca^{2+} :	ความเข้มข้นของแคลเซียมทั้งหมดในสารละลาย หน่วย พีพีเอ็ม
Mg^{2+} :	ความเข้มข้นของแมกนีเซียมทั้งหมดในสารละลาย หน่วย พีพีเอ็ม
K^+ :	ความเข้มข้นของโพแทสเซียมทั้งหมดในสารละลาย หน่วย พีพีเอ็ม
Na^+ :	ความเข้มข้นของโซเดียมทั้งหมดในสารละลาย หน่วย พีพีเอ็ม

ชุดสมการที่ใช้ในกระบวนการประมวลผล (process)

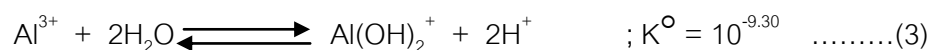
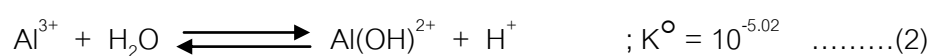
สำหรับชุดสมการที่นำมาใช้ในการประมวลผลในแบบจำลองสมดุลเคมีเพื่อประมาณความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่ละลายออกมาจากดินกรดนี้มีแนวคิดมาจากทฤษฎีต่างๆ มี 7 ขั้นตอนดังนี้

1. การละลายของอะลูมิเนียมจากแร่กิปไซต์ในสารละลายดิน

ใช้อธิบายการละลายของ γ -Al(OH)₃ (gibbsite) ซึ่งทำให้เกิด Al³⁺ ดังสมการที่ (1)

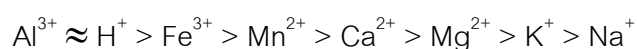


2. การเกิดขบวนการไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียมกับน้ำ ดังสมการที่ (2) และ (3)



ค่า K[°] คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา ณ สภาวะสมดุล (Lindsay, 1979)

3. การแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน โดยเรียงลำดับความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินได้ดังนี้



กรณีที่ Al ถูกไล่ที่ สมการที่ (4)



กรณีที่ Fe ถูกไล่ที่ สมการที่ (5) และ (6)



กรณีที่มี Mn ถูกไล่ที่ สมการที่ (7) (8) และ (9)



กรณีที่มี Ca ถูกไล่ที่ สมการที่ (10) (11) (12) และ (13)



กรณีที่มี Mg ถูกไล่ที่ สมการที่ (14) (15) (16) (17) และ (18)



กรณีที่มี K ถูกไล่ที่ สมการที่ (19) (20) (21) (22) (23) และ (24)





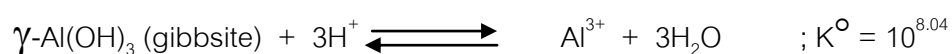
กรณีที่ Na ถูกไล่ที่ สมการที่ (25) (26) (27) (28) (29) (30) และ (31)



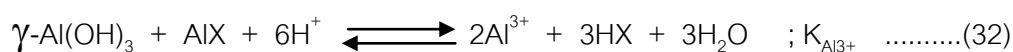
4. จัดให้อยู่ในรูปไอออนแอคติวิตี โดยนำ γ_i ไปคูณกับความเข้มข้นของแคตไอออนในสารละลาย และจัดรูปได้ดังต่อไปนี้

กรณีหา $[\text{Al}^{3+}]$

ทำโดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด Al^{3+} ในสารละลาย คือ สมการที่ (1) และ (4)



รวมสมการที่ (1) + (4) ได้สมการที่ (32)



$$K_{Al3+} = 10^{8.04} \times K_{sH/Al}$$

$$K_{Al3+} = \frac{\gamma_3^2 [Al^{3+}]^2 (HX)^3}{\gamma_1^6 [H^+]^6 (AIX)}$$

$$[Al^{3+}] = \left[\frac{K_{Al3+} \gamma_1^6 (AIX)}{\gamma_3^2 (HX)^3} \right]^{1/2} [H^+]^3$$

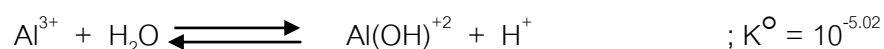
โดยให้

$$A = \left[\frac{K_{Al3+} \gamma_1^6 (AIX)}{\gamma_3^2 (HX)^3} \right]^{1/2}$$

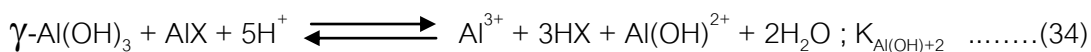
$$\therefore [Al^{3+}] = A [H^+]^3 \quad \dots\dots\dots(33)$$

กรณีหา $[Al(OH)^{2+}]$

ทำโดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด Al^{3+} และ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ Al^{3+} เกิดเป็น $Al(OH)^{2+}$ ในสารละลาย คือ สมการที่ (32) และ (2)



รวมสมการที่ (32) + (2) ได้สมการที่ (34)



$$K_{Al(OH)+2} = K_{Al3+} \times 10^{-5.02}$$

$$K_{Al(OH)+2} = \frac{\gamma_3 \gamma_2 [Al^{3+}] [Al(OH)^{+2}] (HX)^3}{\gamma_1^5 [H^+]^5 (AIX)}$$

$$[Al(OH)^{+2}] = \frac{K_{Al(OH)+2} \gamma_1^5 (AIX) [H^+]^5}{\gamma_3 \gamma_2 (HX)^3 [Al^{3+}]}$$

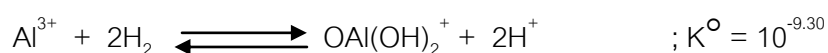
$$\text{โดยให้ } B = \frac{K_{\text{Al(OH)}_2^+} \gamma_1^5 (\text{AIX})}{\gamma_3 \gamma_2 (\text{HX})^3}$$

แทนค่า $[\text{Al}^{3+}]$ และ B

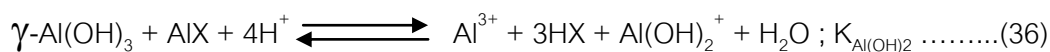
$$\therefore [\text{Al(OH)}_2^+] = \frac{B}{A} [\text{H}^+]^2 \quad \dots\dots\dots(35)$$

กรณีหา $[\text{Al(OH)}_2^+]$

ทำโดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดอะลูมิเนียม Al^{3+} และ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ Al^{3+} เกิดเป็น Al(OH)_2^+ ในสารละลาย คือ สมการที่ (32) และ (3)



รวมสมการที่ (32) + (3) ได้สมการที่ (36)



$$K_{\text{Al(OH)}_2^+} = K_{\text{Al}^{3+}} \times 10^{-9.30}$$

$$K_{\text{Al(OH)}_2^+} = \frac{\gamma_3 [\text{Al}^{3+}] [\text{Al(OH)}_2^+] (\text{HX})^3}{\gamma_1^3 [\text{H}^+]^4 (\text{AIX})}$$

$$[\text{Al(OH)}_2^+] = \frac{K_{\text{Al(OH)}_2^+} \gamma_1^3 (\text{AIX}) [\text{H}^+]^4}{\gamma_3 (\text{HX})^3 [\text{Al}^{3+}]}$$

$$\text{โดยให้ } C = \frac{K_{\text{Al(OH)}_2^+} \gamma_1^3 (\text{AIX})}{\gamma_3 (\text{HX})^3}$$

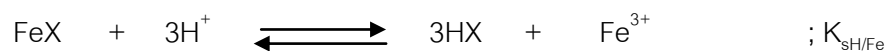
แทนค่า $[Al^{3+}]$ และ C

$$\therefore [Al(OH)_2^+] = \frac{C}{A} [H^+] \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$\text{Total Al} = [Al^{3+}] + [Al(OH)^{+2}] + [Al(OH)_2^+]$$

กรณีหา $[Fe^{3+}]$

ทำโดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด Fe^{3+} ในสารละลาย คือ สมการที่ (5) และ (6)



รวมสมการที่ (5) + (6) ได้สมการที่ (38)



$$K_{Fe} = K_{sAl/Fe} \times K_{sH/Fe}$$

$$K_{Fe} = \frac{\gamma_3 [Fe^{3+}]^2 (AlX) (HX)^3}{\gamma_1^3 [H^+]^3 [Al^{3+}] (FeX)^2}$$

$$[Fe^{3+}] = \left[\frac{K_{Fe} \gamma_1^3 [H^+]^3 [Al^{3+}] (FeX)^2}{\gamma_3 (AlX) (HX)^3} \right]^{1/2}$$

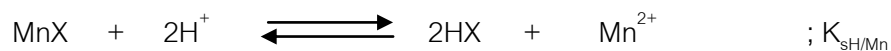
$$\text{โดยให้ } D = \frac{K_{Fe} \gamma_1^3 (FeX)^2}{\gamma_3 (AlX) (HX)^3}$$

แทนค่า $[Al^{3+}]$ และ D

$$\therefore [Fe^{3+}] = D^{1/2} A^{1/2} [H^+]^3 \quad \dots\dots\dots(39)$$

กรณีหา $[Mn^{2+}]$

ทำโดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด Mn^{2+} ในสารละลาย คือ สมการที่ (7), (8) และ (9)



รวมสมการที่ (7) + (8) + (9) ได้สมการที่ (40)



$$K_{Mn} = K_{sAl/Mn} \times K_{sH/Mn} \times K_{sFe/Mn}$$

$$K_{Mn} = \frac{\gamma_2^7 [Mn^{2+}]^7 (AlX)^2 (HX)^2 (FeX)^2}{\gamma_1^2 \gamma_3^4 [Fe^{3+}]^2 [H^+]^2 [Al^{3+}]^2 (MnX)^7}$$

$$[Mn^{2+}] = \left[\frac{K_{Mn} \gamma_1^2 \gamma_3^4 [Fe^{3+}]^2 [H^+]^2 [Al^{3+}]^2 (MnX)^7}{\gamma_2^7 (AlX)^2 (HX)^2 (FeX)^2} \right]^{1/7}$$

$$\text{โดยให้ } E = \frac{K_{Mn} \gamma_1^2 \gamma_3^4 (MnX)^7}{\gamma_2^7 (AlX)^2 (HX)^2 (FeX)^2}$$

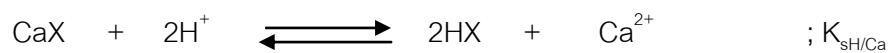
แทนค่า $[Al^{3+}]$, $[Fe^{3+}]$ และ E

$$\therefore [Mn^{2+}] = E^{1/7} D^{1/7} A^{3/7} [H^+]^2 \dots \dots \dots (41)$$

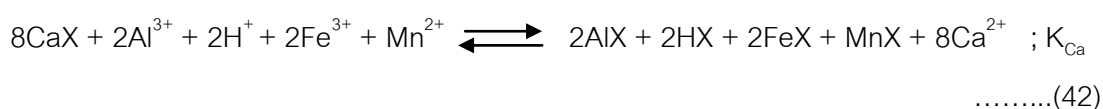
กรณีหา $[Ca^{2+}]$

ทำโดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด Ca^{2+} ในสารละลาย คือ สมการที่ (10), (11), (12) และ (13)





รวมสมการที่ (10) + (11) + (12) + (13) ได้สมการที่ (42)



$$K_{\text{Ca}} = K_{\text{sAl/Ca}} \times K_{\text{sH/Ca}} \times K_{\text{sFe/Ca}} \times K_{\text{sMn/Ca}}$$

$$K_{\text{Ca}} = \frac{\gamma_2^7 [\text{Ca}^{2+}]^8 (\text{AlX})^2 (\text{HX})^2 (\text{FeX})^2 (\text{MnX})}{\gamma_1^2 \gamma_3^4 [\text{Fe}^{3+}]^2 [\text{H}^+]^2 [\text{Al}^{3+}]^2 [\text{Mn}^{2+}] (\text{CaX})^8}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = \left[\frac{K_{\text{Ca}} \gamma_1^2 \gamma_3^4 [\text{Fe}^{3+}]^2 [\text{H}^+]^2 [\text{Al}^{3+}]^2 [\text{Mn}^{2+}] (\text{CaX})^8}{\gamma_2^7 (\text{AlX})^2 (\text{HX})^2 (\text{FeX})^2 (\text{MnX})} \right]^{1/8}$$

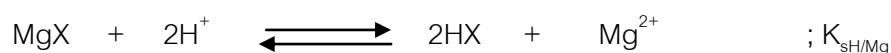
โดยให้ $F = \frac{K_{\text{Ca}} \gamma_1^2 \gamma_3^4 (\text{CaX})^8}{\gamma_2^7 (\text{AlX})^2 (\text{HX})^2 (\text{FeX})^2 (\text{MnX})}$

แทนค่า $[\text{Al}^{3+}]$, $[\text{Fe}^{3+}]$, $[\text{Mn}^{2+}]$ และ F

$$\therefore [\text{Ca}^{2+}] = F^{1/8} E^{1/56} D^{1/7} A^{3/7} [\text{H}^+]^2 \quad \dots\dots\dots(43)$$

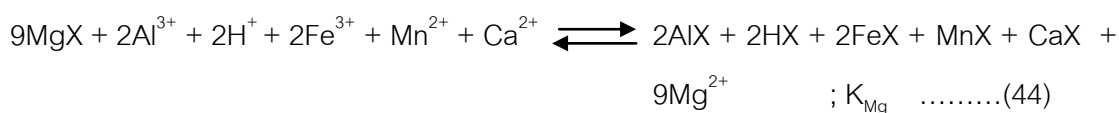
กรณีหา $[\text{Mg}^{2+}]$

โดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด Mg^{2+} ในสารละลาย คือ สมการที่ (14), (15), (16), (17) และ (18)





รวมสมการที่ (14) + (15) + (16) + (17) + (18) ได้สมการที่ (44)



$$K_{\text{Mg}} = K_{\text{sAl/Mg}} \times K_{\text{sH/Mg}} \times K_{\text{sFe/Mg}} \times K_{\text{sMn/Mg}} \times K_{\text{sCa/Mg}}$$

$$K_{\text{Mg}} = \frac{\gamma_2^7 [\text{Mg}^{2+}]^9 (\text{AlX})^2 (\text{HX})^2 (\text{FeX})^2 (\text{MnX}) (\text{CaX})}{\gamma_1^2 \gamma_3^4 [\text{Fe}^{3+}]^2 [\text{H}^+]^2 [\text{Al}^{3+}]^2 [\text{Mn}^{2+}] [\text{Ca}^{2+}] (\text{MgX})^9}$$

$$[\text{Mg}^{2+}] = \left[\frac{K_{\text{Mg}} \gamma_1^2 \gamma_3^4 [\text{Fe}^{3+}]^2 [\text{H}^+]^2 [\text{Al}^{3+}]^2 [\text{Mn}^{2+}] [\text{Ca}^{2+}] (\text{MgX})^9}{\gamma_2^7 (\text{AlX})^2 (\text{HX})^2 (\text{FeX})^2 (\text{MnX}) (\text{CaX})} \right]^{1/9}$$

$$\text{โดยให้ } G = \frac{K_{\text{Mg}} \gamma_1^2 \gamma_3^4 (\text{MgX})^9}{\gamma_2^7 (\text{AlX})^2 (\text{HX})^2 (\text{FeX})^2 (\text{MnX}) (\text{CaX})}$$

แทนค่า $[\text{Al}^{3+}]$, $[\text{Fe}^{3+}]$, $[\text{Mn}^{2+}]$, $[\text{Ca}^{2+}]$ และ G

$$\therefore [\text{Mg}^{2+}] = G^{1/9} F^{1/72} E^{1/56} D^{1/7} A^{3/7} [\text{H}^+]^2 \dots\dots\dots(45)$$

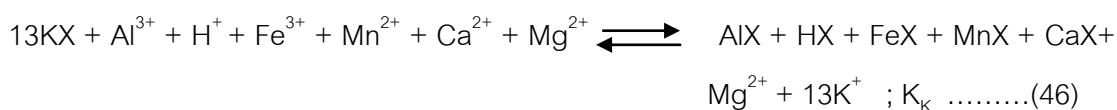
กรณีหา $[\text{K}^+]$

โดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด K^+ ในสารละลาย คือ สมการที่ (19), (20), (21), (22), (23) และ (24)





รวมสมการที่ (19) + (20) + (21) + (22) + (23) + (24) ได้สมการที่ (46)



$$K_K = K_{\text{sAl/K}} \times K_{\text{sH/K}} \times K_{\text{sFe/K}} \times K_{\text{sMn/K}} \times K_{\text{sCa/K}} \times K_{\text{sMg/K}}$$

$$K_K = \frac{\gamma_1^{12} [\text{K}^+]^{13} (\text{AlX}) (\text{HX}) (\text{FeX}) (\text{MnX}) (\text{CaX}) (\text{MgX})}{\gamma_2^3 \gamma_3^2 [\text{Fe}^{3+}] [\text{H}^+] [\text{Al}^{3+}] [\text{Mn}^{2+}] [\text{Ca}^{2+}] [\text{Mg}^{2+}] (\text{KX})^{13}}$$

$$[\text{K}^+] = \left[\frac{K_K \gamma_2^3 \gamma_3^2 [\text{Fe}^{3+}] [\text{H}^+] [\text{Al}^{3+}] [\text{Mn}^{2+}] [\text{Ca}^{2+}] [\text{Mg}^{2+}] (\text{KX})^{13}}{\gamma_1^{12} (\text{AlX}) (\text{HX}) (\text{FeX}) (\text{MnX}) (\text{CaX}) (\text{MgX})} \right]^{1/13}$$

$$\text{โดยให้ } I = \frac{K_K \gamma_2^3 \gamma_3^2 (\text{KX})^{13}}{\gamma_1^{12} (\text{AlX}) (\text{HX}) (\text{FeX}) (\text{MnX}) (\text{CaX}) (\text{MgX})}$$

แทนค่า $[\text{Al}^{3+}]$, $[\text{Fe}^{3+}]$, $[\text{Mn}^{2+}]$, $[\text{Ca}^{2+}]$, $[\text{Mg}^{2+}]$ และ I

$$\therefore [\text{K}^+] = I^{1/13} G^{1/117} F^{5/468} E^{5/364} D^{1/14} A^{3/14} [\text{H}^+] \quad \dots\dots\dots(47)$$

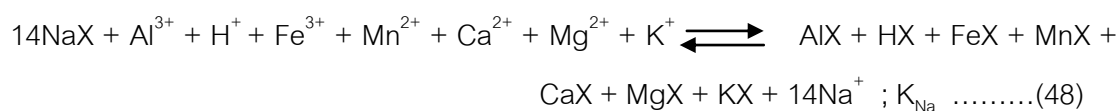
กรณีหา $[\text{Na}^+]$

ทำโดยเลือกปฏิกิริยาที่ทำให้เกิด Na^+ ในสารละลาย คือ สมการที่ (25), (26), (27), (28), (29), (30) และ (31)





รวมสมการที่ (25) + (26) + (27) + (28) + (29) + (30) + (31) ได้สมการที่ (48)



$$K_{\text{Na}} = K_{\text{sAl/Na}} \times K_{\text{sH/Na}} \times K_{\text{sFe/Na}} \times K_{\text{sMn/Na}} \times K_{\text{sCa/Na}} \times K_{\text{sMg/Na}} \times K_{\text{sK/Na}}$$

$$K_{\text{Na}} = \frac{\gamma_1^{12} [\text{Na}^+]^{14} (\text{AlX}) (\text{HX}) (\text{FeX}) (\text{MnX}) (\text{CaX}) (\text{MgX}) (\text{KX})}{\gamma_2^3 \gamma_3^2 [\text{Fe}^{3+}] [\text{H}^+] [\text{Al}^{3+}] [\text{Mn}^{2+}] [\text{Ca}^{2+}] [\text{Mg}^{2+}] [\text{K}^+] (\text{NaX})^{14}}$$

$$[\text{Na}^+] = \left[\frac{K_{\text{Na}} \gamma_2^3 \gamma_3^2 [\text{Fe}^{3+}] [\text{H}^+] [\text{Al}^{3+}] [\text{Mn}^{2+}] [\text{Ca}^{2+}] [\text{Mg}^{2+}] [\text{K}^+] (\text{NaX})^{14}}{\gamma_1^{12} (\text{AlX}) (\text{HX}) (\text{FeX}) (\text{MnX}) (\text{CaX}) (\text{MgX}) (\text{KX})} \right]^{1/14}$$

$$\text{โดยให้ } J = \frac{K_{\text{Na}} \gamma_2^3 \gamma_3^2 (\text{NaX})^{14}}{\gamma_1^{12} (\text{AlX}) (\text{HX}) (\text{FeX}) (\text{MnX}) (\text{CaX}) (\text{MgX}) (\text{KX})}$$

แทนค่า $[\text{Al}^{3+}]$, $[\text{Fe}^{3+}]$, $[\text{Mn}^{2+}]$, $[\text{Ca}^{2+}]$, $[\text{Mg}^{2+}]$, $[\text{K}^+]$ และ J

$$\therefore [\text{Na}^+] = J^{1/14} I^{1/182} G^{1/117} F^{35/3276} E^{5/364} D^{1/14} A^{3/14} [\text{H}^+] \quad \dots\dots\dots(49)$$

5. แทนค่าด้วยตัวแปรชั่วคราว

เพื่อให้การแก้สมการที่ (33) (35) (37) (39) (41) (43) (45) (47) และ (49) สะดวกขึ้น จึงกำหนดตัวแปรชั่วคราว $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8$ และ D_9 มาเป็นตัวกลางในการคำนวณ โดยกำหนดให้

$$D_1 = A$$

$$D_2 = \frac{B}{A}$$

$$D_3 = \frac{C}{A}$$

$$D_4 = D^{1/2} A^{1/2}$$

$$D_5 = E^{1/7} D^{1/7} A^{3/7}$$

$$D_6 = F^{1/8} E^{1/56} D^{1/7} A^{3/7}$$

$$D_7 = G^{1/9} F^{1/72} E^{1/56} D^{1/7} A^{3/7}$$

$$D_8 = I^{1/13} G^{1/117} F^{5/468} E^{5/364} D^{1/14} A^{3/14}$$

$$D_9 = J^{1/14} I^{1/182} G^{1/117} F^{35/3276} E^{5/364} D^{1/14} A^{3/14}$$

ดังนั้น เมื่อนำสมการที่ (33) – (41) เขียนใหม่ จะได้ความเข้มข้นของแคตไอออนที่มีความสัมพันธ์กับ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ได้ดังต่อไปนี้

$$[Al^{3+}] = D_1 [H^+]^3$$

$$[Al(OH)^{2+}] = D_2 [H^+]^2$$

$$[Al(OH)_2^+] = D_3 [H^+]$$

$$[Fe^{3+}] = D_4 [H^+]^3$$

$$[Mn^{2+}] = D_5 [H^+]^2$$

$$[\text{Ca}^{2+}] = D_6 [\text{H}^+]^2$$

$$[\text{Mg}^{2+}] = D_7 [\text{H}^+]^2$$

$$[\text{K}^+] = D_8 [\text{H}^+]$$

$$[\text{Na}^+] = D_9 [\text{H}^+]$$

6. สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์กัมมันต์ของวาเลนซี 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (γ_1 , γ_2 และ γ_3) กับค่าความเป็นกรด - เบส (pH)

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์กัมมันต์ของวาเลนซี 1, 2 และ 3 เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์กัมมันต์ของวาเลนซี 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (γ_1 , γ_2 และ γ_3) กับค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- นำผลที่ได้จากการทดลองตามขั้นตอนการทดลองของแต่ละการใช้ประโยชน์ที่ดิน มาคำนวณหาค่า ionic strength (μ)

- นำค่า ionic strength มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์กัมมันต์ของวาเลนซี 1, 2 และ 3 ตามขั้นตอนการทดลองของแต่ละการใช้ประโยชน์ที่ดิน ในสมการ Davies ของ Debye-Hückel equation

- หาค่าความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กัมมันต์ของวาเลนซี 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (γ_1 , γ_2 และ γ_3) กับค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ตามขั้นตอนการทดลองของแต่ละการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยใช้โปรแกรมพื้นฐาน Curve Expert

7. สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การเลือก ($K_{\text{sH}/\text{Al}}$, $K_{\text{sAl}/\text{Fe}}$, $K_{\text{sH}/\text{Fe}}$, $K_{\text{sAl}/\text{Mn}}$, $K_{\text{sH}/\text{Mn}}$, $K_{\text{sFe}/\text{Mn}}$, $K_{\text{sAl}/\text{Ca}}$, $K_{\text{sH}/\text{Ca}}$, $K_{\text{sFe}/\text{Ca}}$, $K_{\text{sMn}/\text{Ca}}$, $K_{\text{sAl}/\text{Mg}}$, $K_{\text{sH}/\text{Mg}}$, $K_{\text{sFe}/\text{Mg}}$, $K_{\text{sMn}/\text{Mg}}$, $K_{\text{sCa}/\text{Mg}}$, $K_{\text{sAl}/\text{K}}$, $K_{\text{sH}/\text{K}}$, $K_{\text{sFe}/\text{K}}$, $K_{\text{sMn}/\text{K}}$, $K_{\text{sCa}/\text{K}}$, $K_{\text{sMg}/\text{K}}$, $K_{\text{sAl}/\text{Na}}$, $K_{\text{sH}/\text{Na}}$, $K_{\text{sFe}/\text{Na}}$, $K_{\text{sMn}/\text{Na}}$, $K_{\text{sCa}/\text{Na}}$, $K_{\text{sMg}/\text{Na}}$ และ $K_{\text{sK}/\text{Na}}$) กับค่าความเป็นกรด - เบส (pH) (ชุดิมา ชูทอง, 2550)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสมดุลเคมีของดิน

นำผลคำนวณจากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์สารละลายตัวอย่างดิน ที่ตรวจวัดจริงไปทดสอบค่าทางสถิติ pair t-test เพื่อทดสอบว่าข้อมูลทั้ง 2 ชุดมีความแตกต่างกันหรือไม่ ข้อมูลที่ใช้เปรียบเทียบ ได้แก่ ความเข้มข้นของอะลูมิเนียม แมงกานีส เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และโซเดียม ในสารละลายดิน (ชุดิมา ชูทอง, 2550)