

บทที่ 3

ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยตาเปล่าและเกณฑ์การประเมินระดับความเสียหาย (Visual inspection and Damage Evaluation)

สำหรับการประเมินระดับความเสียหายด้วยสายตา โดยใช้เกณฑ์การประเมิน ดังนี้

- ระดับ 1 : สภาพเสาตอม่อมีลักษณะปกติสมบูรณ์ไม่เกิดรอยแตกร้าวหรือความเสียหายใดๆ
- ระดับ 2 : เสาตอม่อมีรอยแตกร้าวเล็กน้อยและผิวคอนกรีตมีรอยผุกร่อนเล็กน้อย
- ระดับ 3 : เสาตอม่อมีรอยแตกร้าวแต่ไม่เกิดการขยายตัวลุกลามบริเวณ เนื้อผิวคอนกรีตเริ่มผุกร่อนเสื่อมสภาพ
- ระดับ 4 : เสาตอม่อมีรอยแตกร้าวบริเวณผิวคอนกรีตแต่ยังมองไม่เห็น เนื้อเหล็กเสริมด้านในมีการผุกร่อนเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งาน
- ระดับ 5 : เสาตอม่อมีรอยแตกร้าวจนเห็นเหล็กเสริมที่เป็นสนิมในเสาคอนกรีตรวมทั้งคอนกรีตมีการแตกร้าวและระเบิดออกมา

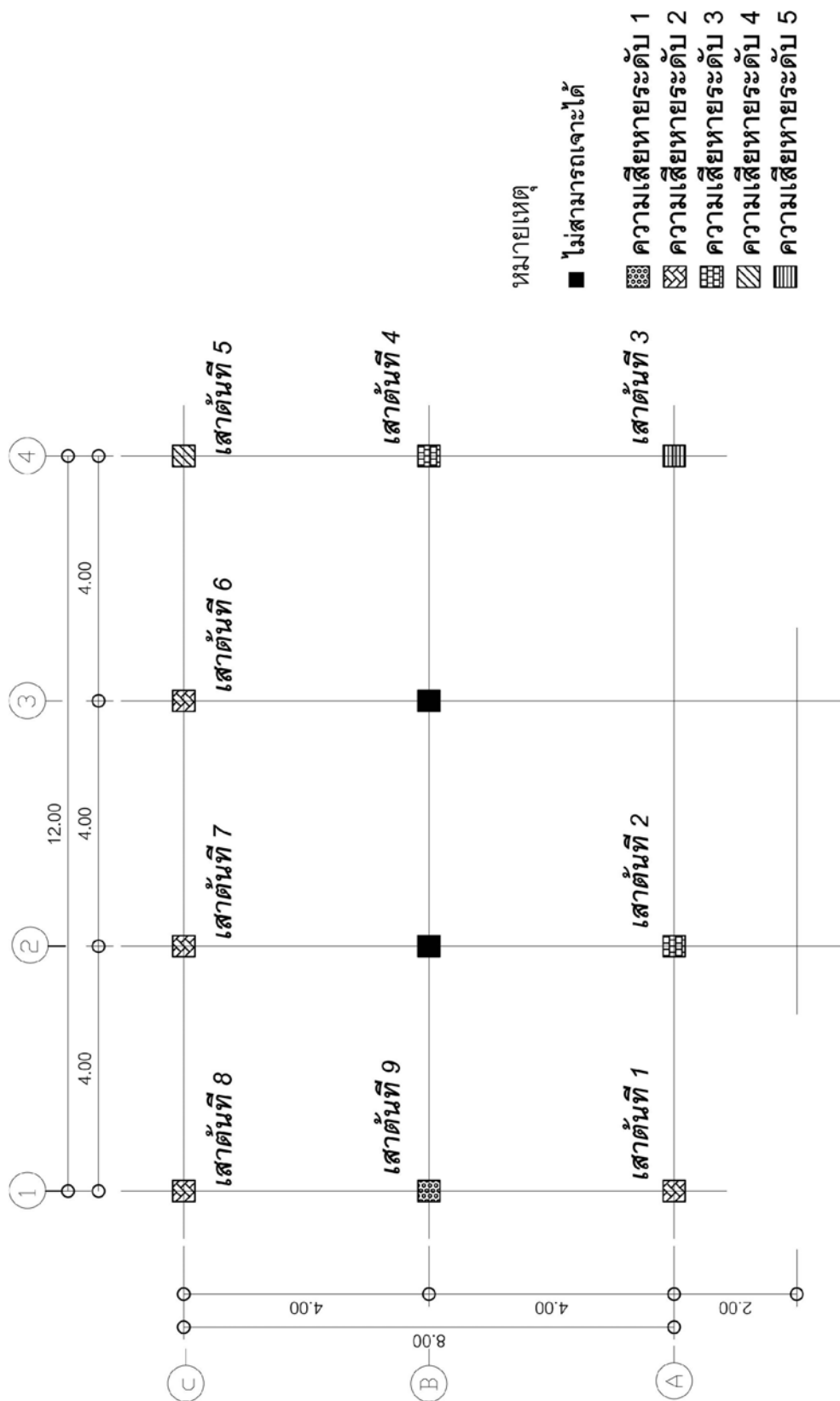
ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยตาเปล่าโดยใช้เกณฑ์การประเมินระดับความเสียหายจากเกณฑ์การประเมินดังกล่าว โดยผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ผลการประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้างด้วยสายตา

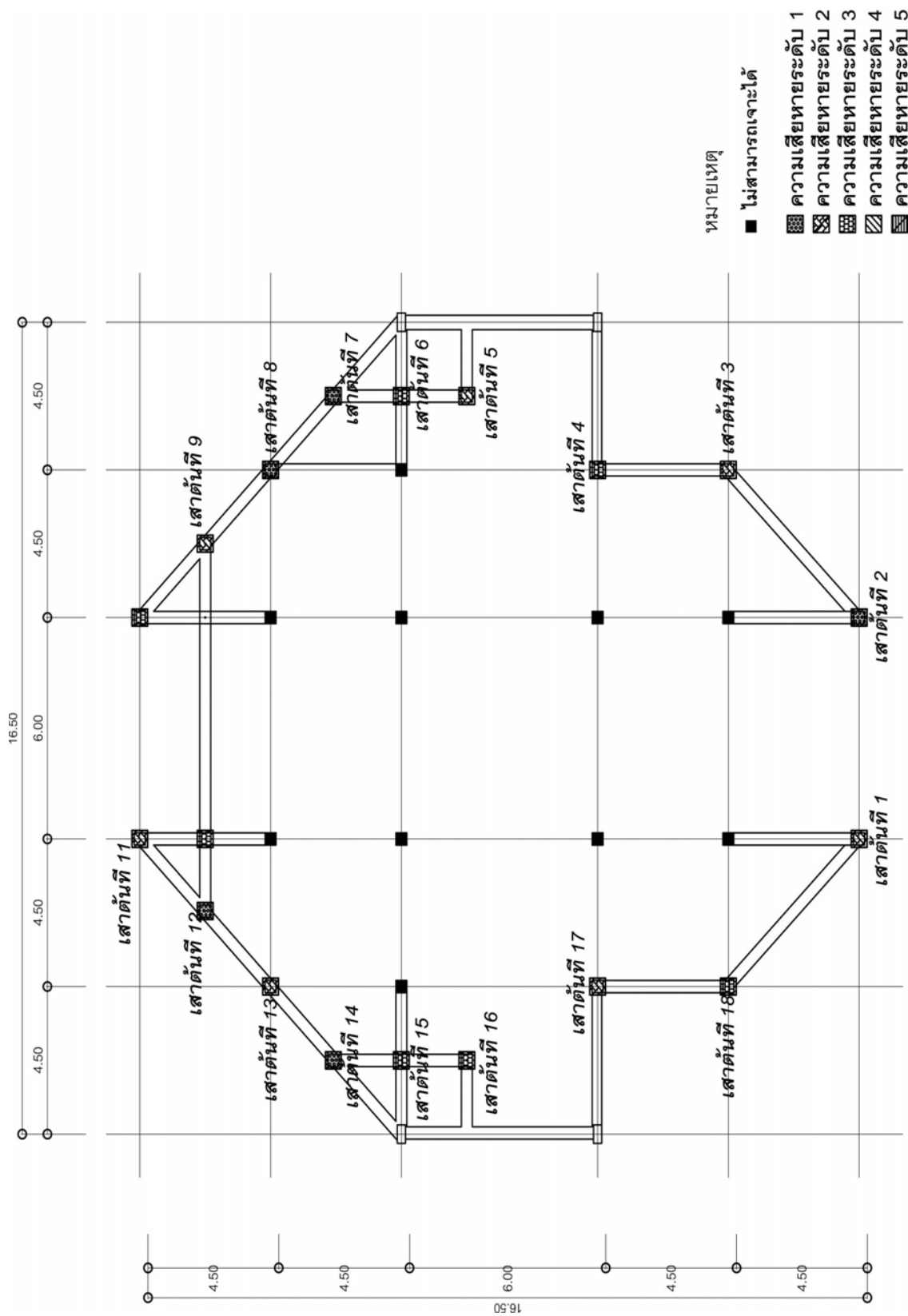
| ระดับความเสียหาย | อาคาร | จำนวนเสา |
|------------------|-----------------------------------|----------|
| 1 | อาคาร กีฏวิทยา | 1 |
| | อาคาร1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. | 5 |
| | กองยานพาหนะฯ (อาคาร1 และอาคาร2) | 12 |
| | ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ | 2 |
| 2 | อาคาร กีฏวิทยา | 4 |
| | อาคาร1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. | 4 |
| | กองยานพาหนะฯ (อาคาร1 และอาคาร2) | 16 |
| | ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ | 5 |
| 3 | อาคาร กีฏวิทยา | 2 |
| | อาคาร1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. | 6 |
| | กองยานพาหนะฯ (อาคาร1 และอาคาร2) | 8 |
| | ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ | 1 |

ตารางที่ 3-1 ผลการประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้างด้วยสายตา (ต่อ)

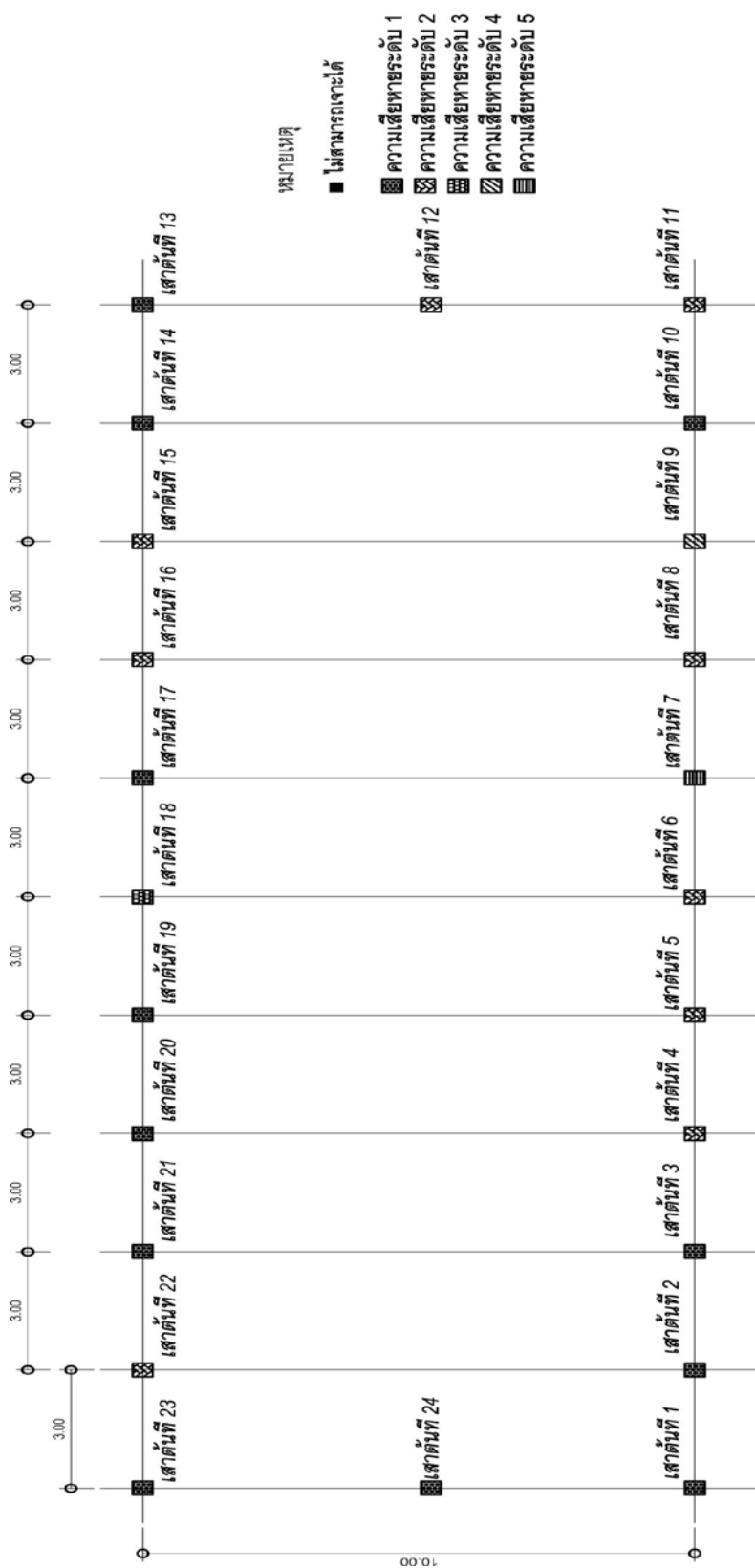
| ระดับความเสียหาย | อาคาร | จำนวนเสา |
|------------------|-----------------------------------|----------|
| 4 | อาคาร กีฏวิทยา | 1 |
| | อาคาร1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. | 3 |
| | กองยานพาหนะฯ (อาคาร1 และอาคาร2) | 5 |
| | ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ | - |
| 5 | อาคาร กีฏวิทยา | 1 |
| | อาคาร1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. | - |
| | กองยานพาหนะฯ (อาคาร1 และอาคาร2) | 5 |
| | ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ | - |



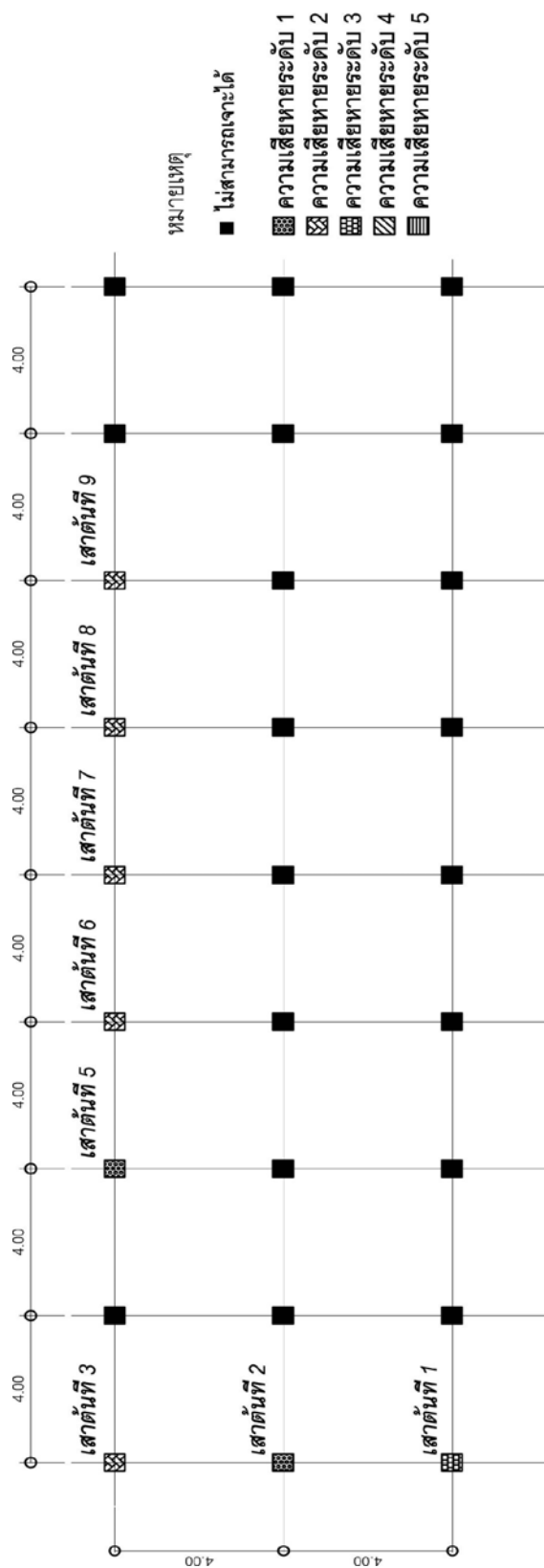
รูปที่ 3-1 ผังบริเวณแสดงความเสียหายของเสาตอม่อ อาคารกวีวิทยา



รูปที่ 3-2 ผังบริเวณแสดงความเสียหายของเสาตอม่อ อาคาร 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส.



รูปที่ 3-4 ผังบริเวณแสดงความเสียหายของเสาต่อม่อ กองยานพาหนะฯ อาคาร 2



รูปที่ 3-5 ผังบริเวณแสดงความเสียหายของเสาตอม่อ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ

3.2 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ทางเคมี

เมื่อได้ผลรายงานการวิเคราะห์ทางเคมี จากห้องทดลองและปฏิบัติการวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ได้ปริมาณธาตุที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ Ca, Mg, Na, Cl, HCO_3 และ S แล้วนำมาวิเคราะห์ได้ปริมาณของคลอไรด์และซัลเฟต หาเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น(โดยน้ำหนัก) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดจากตารางที่ 1-2 ข้อกำหนดสำหรับคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต (ว.ส.ท.ข้อ 3105 ก และตารางที่ 3004) และนำมาวิเคราะห์ความเสียหายเนื่องจากอัลคาไลโดยหาเปอร์เซ็นต์ $\text{Na}_2\text{O}_{(\text{eq})}$ จากธาตุในหมู่อัลคาไล ได้แก่ Na และ K ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนด (ตารางที่ 1-3 ปริมาณสารที่ยอมให้ในน้ำสำหรับคอนกรีตและตารางที่ 1-4 ข้อกำหนดคุณสมบัติทางเคมีเพิ่มเติมของมวลรวมหยาบที่ใช้แล้ว)

ค่าของปริมาณธาตุในดิน ที่ได้จากผลรายงานการวิเคราะห์ทางเคมี จากห้องทดลองและปฏิบัติการวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ได้แก่ ธาตุ K, Ca, Mg, Na, Cl, S มีหน่วยเป็น mg/kg เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ว่ามีแนวโน้มเป็นสารละลายชนิดใด ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ปริมาณธาตุที่พบในดินตัวอย่าง

| ตัวอย่าง ที่ | ชื่อตัวอย่าง | pH (1:1) | ค่าที่วิเคราะห์ได้ (mg/kg) | | | | | |
|-----------------|--------------|-------------|----------------------------|----------|--------|--------|----------|--------|
| | | | K | Ca | Mg | Na | S | Cl |
| 1 | ดิน 1 หลุม 1 | 7.29 | 68.67 | 418.51 | 192.81 | 380.93 | 1,871.02 | 429.37 |
| 2 | ดิน 3 หลุม 3 | 5.88 | 97.23 | 451.2 | 204.56 | 629.73 | 1,978.28 | 204.21 |
| 3 | ดิน 5 หลุม 5 | 6.54 | 249.92 | 1,671.54 | 389.74 | 517.09 | 5,175.11 | 204.21 |
| 4 | ดิน 7 หลุม 7 | 6.32 | 137.77 | 476.4 | 225.86 | 15.85 | 280.01 | 507.92 |

3.2.1 ปริมาณธาตุของตัวอย่างดินที่ 1 (หลุม 1) อาคาร 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ 1 (หลุม 1)

| ธาตุ | ปริมาณธาตุในดิน (mg/kg) | เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น % | pH |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|------|
| โพแทสเซียม (K) | 68.67 | 0.006867 | 7.29 |
| แคลเซียม (Ca) | 418.51 | 0.041851 | |
| แมกนีเซียม (Mg) | 192.81 | 0.019281 | |
| โซเดียม (Na) | 380.93 | 0.038093 | |
| คลอไรด์ (Cl) | 429.37 | 0.042937 | |
| ซัลเฟอร์ (S) | 1,871.02 | 0.187102 | |

ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ 1 (หลุม 1) อาคาร 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. มีแนวโน้มเป็นสารละลายซัลเฟอร์คลอไรด์ (SCl) ที่มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 0.230039 % และแคลเซียมซัลเฟตที่มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 0.228953 % เมื่อเทียบกับตารางที่ 1-2 (ว.ส.ท. ข้อ 3105 ก ตาราง 3004) จัดอยู่ในสภาวะที่สัมผัสกับซัลเฟตรุนแรง

3.2.2 ปริมาณธาตุของตัวอย่างดินที่ 2 (หลุม 3) อาคารเรือนปฏิบัติการกลางและสำนักงาน ภาควิชาภูมิวิทยา ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ 2 (หลุม 3)

| ธาตุ | ปริมาณธาตุในดิน (mg/kg) | เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น % | pH |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|------|
| โพแทสเซียม (K) | 97.23 | 0.009723 | 5.88 |
| แคลเซียม (Ca) | 451.2 | 0.04512 | |
| แมกนีเซียม (Mg) | 204.56 | 0.020456 | |
| โซเดียม (Na) | 629.73 | 0.062973 | |
| คลอไรด์ (Cl) | 204.21 | 0.020421 | |
| ซัลเฟอร์ (S) | 1,978.28 | 0.197828 | |

ดังนั้น ตัวอย่างดินที่ 2 (หลุม 3) อาคารเรือนปฏิบัติการกลางและสำนักงาน ภาควิชาภูมิวิทยา มีแนวโน้มเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NaSO_4) ที่มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 0.260801% เมื่อเทียบกับตารางที่ 1-2 (ว.ส.ท. ข้อ 3105 ก ตาราง 3004) จัดอยู่ในสภาวะที่สัมผัสกับซัลเฟตรุนแรง

3.2.3 ปริมาณธาตุของตัวอย่างดินที่ 5 (หลุม 5) อาคารจอด กองอาคารสถานที่และยานพาหนะ ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ 3 (หลุม 5)

| ธาตุ | ปริมาณธาตุในดิน (mg/kg) | เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น % | pH |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|------|
| โพแทสเซียม (K) | 249.92 | 0.024992 | 6.54 |
| แคลเซียม (Ca) | 1,671.54 | 0.167154 | |
| แมกนีเซียม (Mg) | 389.74 | 0.038974 | |
| โซเดียม (Na) | 517.09 | 0.051709 | |
| คลอไรด์ (Cl) | 204.21 | 0.020421 | |
| ซัลเฟต (S) | 5,175.11 | 0.517511 | |

ดังนั้น ตัวอย่างดินที่ 3 (หลุม 5) อาคารจอด กองอาคารสถานที่และยานพาหนะ มีแนวโน้มเป็นสารละลายแคลเซียมซัลเฟต (CaS) มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 0.684665% เมื่อเทียบกับตารางที่ 2-3 (ว.ส.ท. ข้อ 3105 ก ตาราง 3004) จัดอยู่ในสภาวะที่สัมผัสกับซัลเฟตรุนแรง

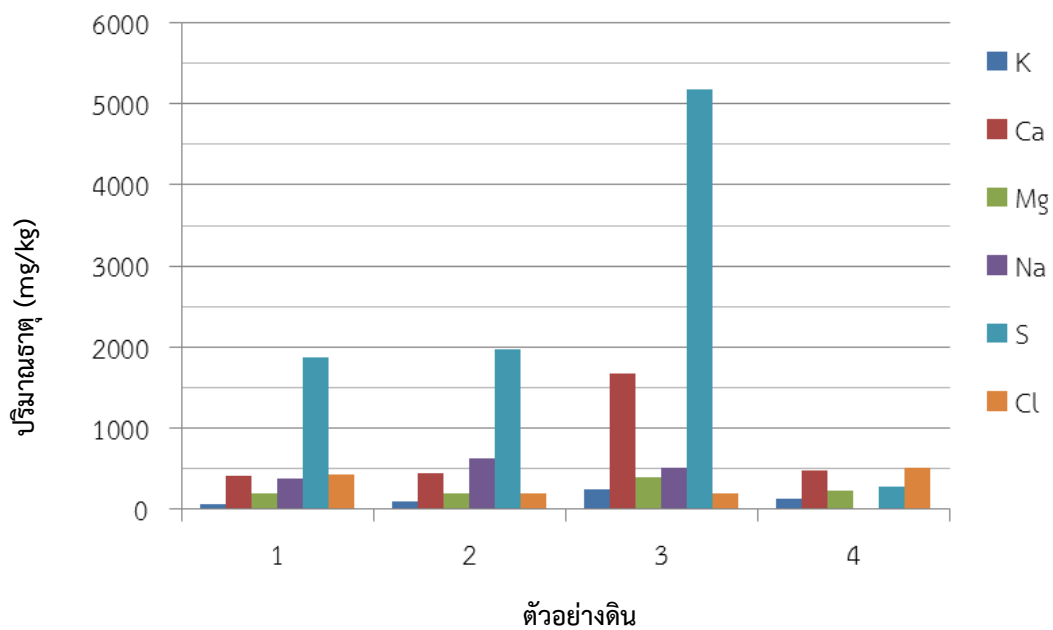
3.2.4 ปริมาณธาตุของตัวอย่างดินที่ 4 (หลุม 7) สำนักงานและห้องประชุม ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ ดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่ 4 (หลุม 7)

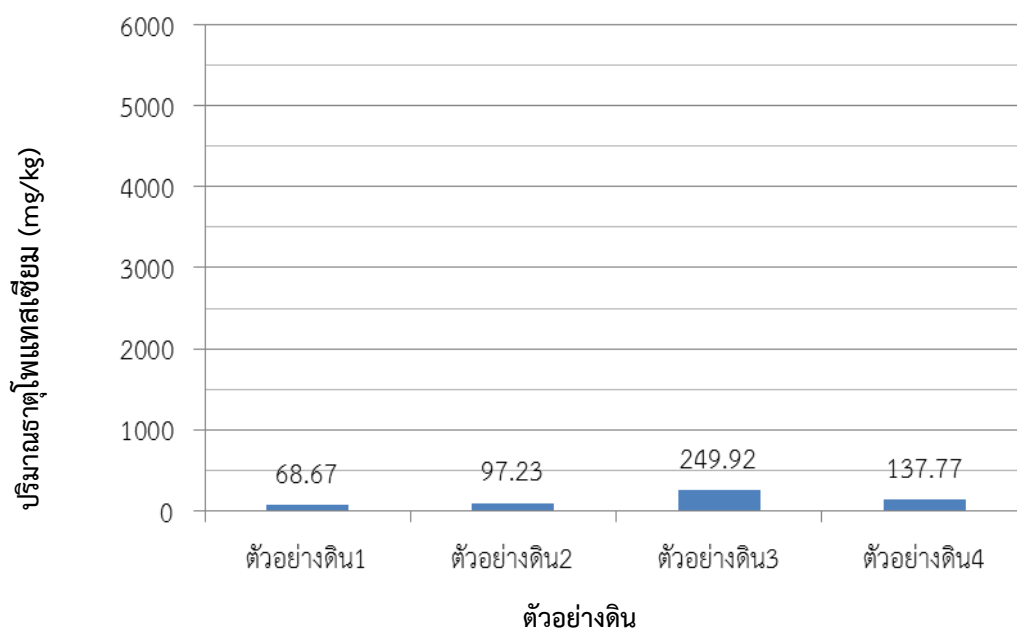
| ธาตุ | ปริมาณธาตุในดิน (mg/kg) | เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น % | pH |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|------|
| โพแทสเซียม (K) | 137.77 | 0.013777 | 6.32 |
| แคลเซียม (Ca) | 476.04 | 0.047604 | |
| แมกนีเซียม (Mg) | 225.86 | 0.022586 | |
| โซเดียม (Na) | 15.85 | 0.001585 | |
| คลอไรด์ (Cl) | 507.92 | 0.050792 | |
| ซัลเฟต (S) | 280.01 | 0.028001 | |

ดังนั้น ตัวอย่างดินที่ 4 (หลุม 7) สำนักงานและห้องประชุม (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ) มีแนวโน้มเป็นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl) มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 0.098396 % เมื่อเทียบกับตารางที่ 2-3 (ว.ส.ท. ข้อ 3105 ก ตาราง 3004) จัดอยู่ในสภาวะที่สัมผัสกับซัลเฟตน้อยมาก

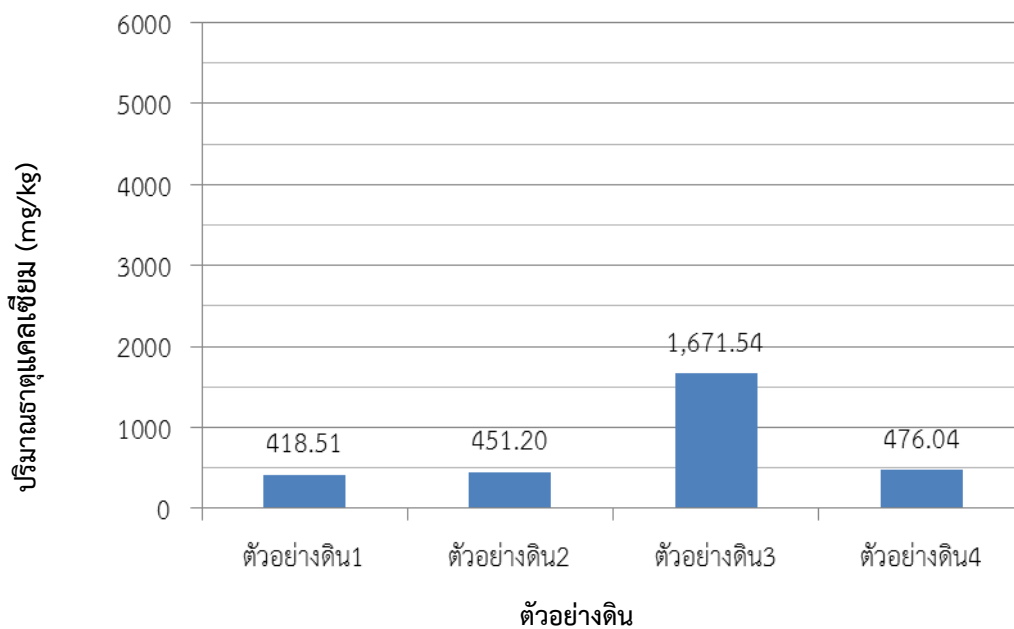
สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ที่สกัดโดยน้ำ Water Extraction เพื่อที่จะทำให้มองเห็นปริมาณธาตุเปรียบเทียบบันดั่งรูปที่ 3-6 สังเกตได้ว่าตัวอย่างดินส่วนใหญ่มีปริมาณของซัลเฟต (S) สูงที่สุด และปริมาณของโซเดียม (Na) รองลงมา ทำให้ตัวอย่างดินส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะเป็นสารละลายโซเดียมซัลเฟต (NaSO₄) นั้นมีโอกาสสูงมาก (ดูตารางที่ 3-2)



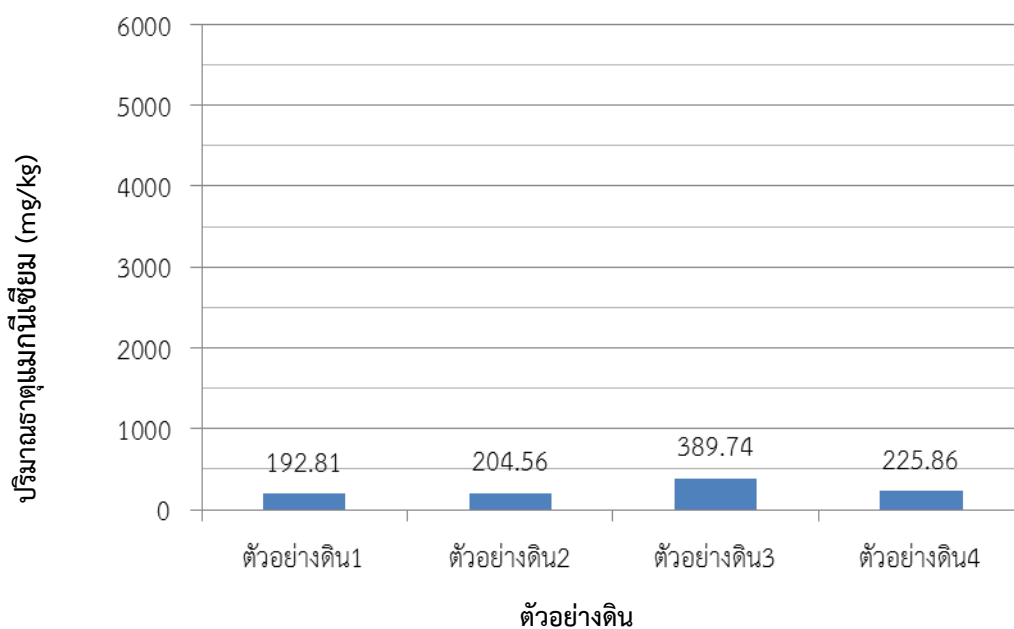
รูปที่ 3-6 ปริมาณธาตุที่สกัดโดยน้ำ (Water Extraction ; mg/kg)



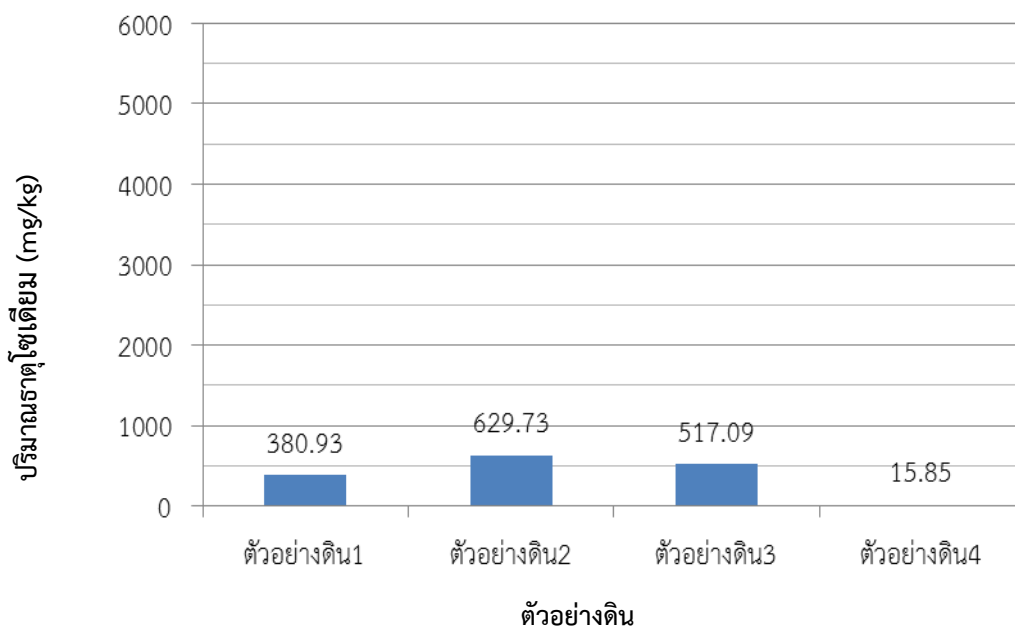
รูปที่ 3-7 แผนภูมิปริมาณธาตุโพแทสเซียม (K) ในดินที่สกัดโดยน้ำ



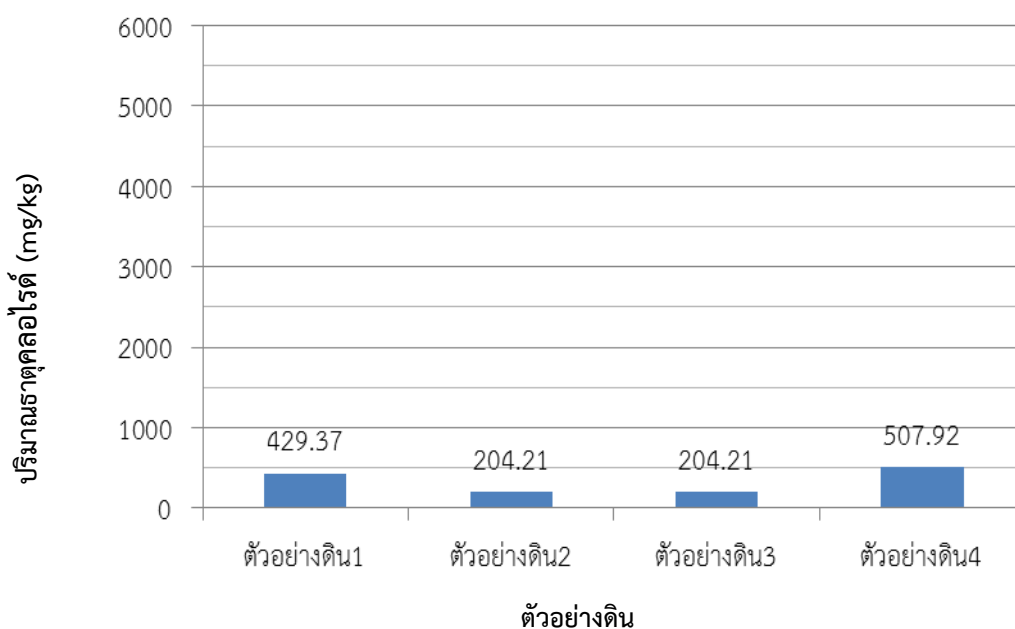
รูปที่ 3-8 แผนภูมิปริมาณธาตุแคลเซียม (Ca) ในดินที่สกัดโดยน้ำ



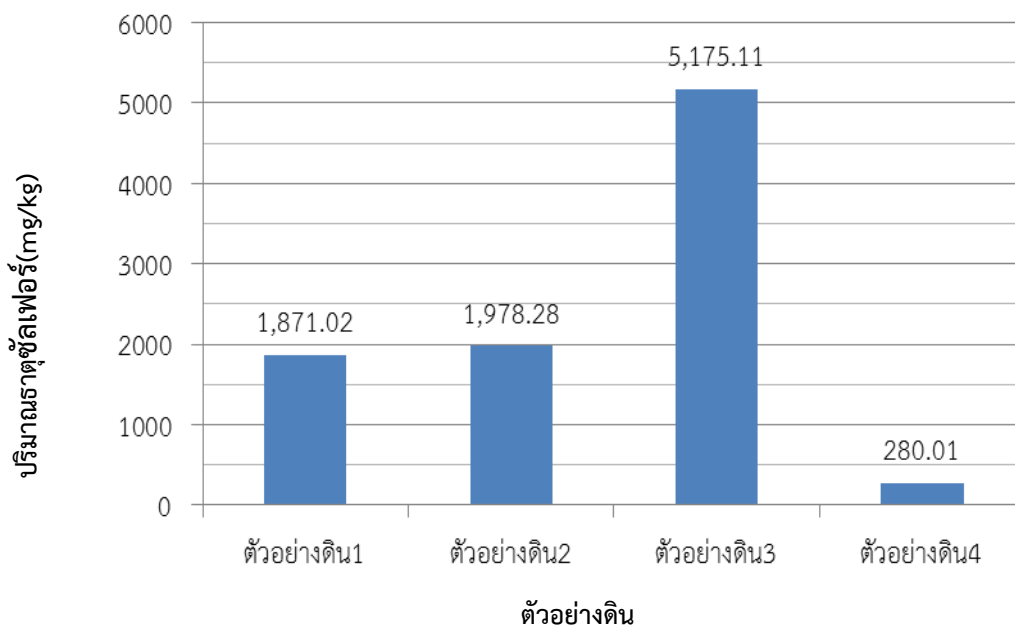
รูปที่ 3-9 แผนภูมิปริมาณธาตุแมกนีเซียม (Mg) ในดินที่สกัดโดยน้ำ



รูปที่ 3-10 แผนภูมิปริมาณธาตุโซเดียม (Na) ในดินที่สกัดโดยน้ำ



รูปที่ 3-11 แผนภูมิปริมาณธาตุคลอไรด์ (Cl) ในดินที่สกัดโดยน้ำ



รูปที่ 3-12 แผนภูมิปริมาณธาตุซัลเฟต (S) ในดินที่สกัดโดยน้ำ

สำหรับค่าปริมาณธาตุต่างๆ ในดินที่สกัดโดยน้ำ Water Extraction แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก เพื่อที่จะนำค่าปริมาณธาตุต่างๆ ดังตารางที่ 3-6 ไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนด ซึ่งจะทำให้ทราบว่าปริมาณธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในดินจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหรือไม่

ตารางที่ 3-7 ปริมาณธาตุในดินที่สกัดโดยน้ำ (Water Extraction; % ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก)

| ตัวอย่างที่ | ชื่อตัวอย่าง | pH (1:1) | ปริมาณธาตุในดินที่สกัดด้วยน้ำ Water Extraction (% ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก) | | | | | |
|-------------|--------------|----------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | | K | Ca | Mg | Na | Cl | S |
| 1 | ดิน 1 | 7.29 | 0.006867 | 0.041851 | 0.019281 | 0.038093 | 0.042937 | 0.187102 |
| 2 | ดิน 3 | 5.88 | 0.009723 | 0.045120 | 0.020456 | 0.062973 | 0.020421 | 0.197828 |
| 3 | ดิน 5 | 6.54 | 0.024992 | 0.167154 | 0.038974 | 0.051709 | 0.020421 | 0.517511 |
| 4 | ดิน 7 | 6.32 | 0.013777 | 0.047604 | 0.022586 | 0.001585 | 0.050792 | 0.028001 |

ผลวิเคราะห์จากการทดสอบตัวอย่าง ว่ามีแวนิเนียมเป็นสารละลายชนิดใด มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนักเท่าใด และค่า pH ซึ่งให้ผลเป็นดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 แวนิเนียมที่จะเป็นสารละลายของตัวอย่างดินที่สกัดโดยน้ำ (Water Extraction)

| ตัวอย่างดิน | แวนิเนียมที่จะเป็นสารละลาย | เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลาย โดยน้ำหนัก (%) | ค่า pH |
|-------------|----------------------------|---|--------|
| 1 | SCL | 0.230039 | 7.29 |
| 2 | CaS | 0.260801 | 5.88 |
| 3 | CaS | 0.684665 | 6.54 |
| 4 | CaCl | 0.098396 | 6.32 |

3.3 ปริมาณธาตุหมู่อัลคาไล

ธาตุในหมู่อัลคาไล ได้แก่ โปแตสเซียมและโซเดียม เมื่อทำปฏิกิริยากับหินพวก Dolomitic Limestone ที่ไวต่อปฏิกิริยาและน้ำจะเกิด Alkali Carbonate Reaction ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวของคอนกรีต และเมื่อทำปฏิกิริยากับหินทราย ที่ประกอบด้วย Silaceous ที่ไวต่อปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวในคอนกรีตเช่นกัน และจากค่า Low Alkali ซีเมนต์ ซึ่งมีค่า $\text{Na}_2\text{O}_{(aq)}$ ไม่เกิน 0.6 % สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$\% \text{Na}_2\text{O}_{(aq)} = (\% \text{Na}_2\text{O}) + 0.658 (\% \text{K}_2\text{O}) \quad \text{ไม่เกิน } 0.6 \%$$

ซึ่งเกิดจากโซเดียม (Na) และโปแตสเซียม (K) ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ (ชิวาลีย์, 2536)

ตัวอย่างการคำนวณ

Na_2O มีมวลอะตอมของ Na = $23 \times 2 = 46$ และมีมวลอะตอมของ O = 16 รวมได้ 62

K_2O มีมวลอะตอมของ K₂ = $39 \times 2 = 78$ และมีมวลอะตอมของ O = 16 รวมได้ 94

ตัวอย่างดิน 1 (หลุม 1) มี K = 68.67 mg/kg และมี Na = 380.93 mg/kg

ดังนั้น มี $\text{Na}_2\text{O} = (62 \times 380.93)/46 = 546.552 \text{ mg/kg}$

มี $\text{K}_2\text{O} = (94 \times 68.67)/78 = 82.756 \text{ mg/kg}$

ดังนั้นจะได้ $\text{Na}_2\text{O}_{(\text{aq})} = 546.552 + 0.658(82.756) = 601.005 \text{ mg/kg}$ คิดเป็น 0.060 % < 0.6 % ข้อกำหนดดูจากตารางที่ 1-4 ข้อกำหนดคุณสมบัติทางเคมีเพิ่มเติมของมวลรวมหยาบที่ใช้แล้ว หรือ $260.95 \text{ mg/kg} = 601.005 \text{ mg/L} = 601.005 \text{ ppm} > 600 \text{ ppm}$ ข้อกำหนดดูจากตารางที่ 1-3 ปริมาณสารที่ยอมให้ในน้ำสำหรับผสมคอนกรีต

ตารางที่ 3-9 ปริมาณธาตุในหมู่อัลคาไล และ % $\text{Na}_2\text{O}_{(\text{aq})}$ โดยการคำนวณจากมวลอะตอม

| ตัวอย่างดิน | ชื่อตัวอย่าง | K (mg/kg) | Na (mg/kg) | Na_2O (mg/kg) | K_2O (mg/kg) | $\text{Na}_2\text{O}_{(\text{aq})}$ (mg/kg) | $\text{Na}_2\text{O}_{(\text{aq})}$ (%) | หมายเหตุ |
|-------------|--------------|-----------|------------|-------------------------------|------------------------------|---|---|----------|
| 1 | ดิน1 หลุม1 | 68.67 | 308.93 | 546.552 | 82.756 | 601.005 | 0.060 | < 0.6 % |
| 2 | ดิน3 หลุม3 | 97.23 | 629.73 | 848.766 | 117.175 | 925.867 | 0.093 | < 0.6 % |
| 3 | ดิน5 หลุม5 | 249.92 | 517.09 | 696.947 | 301.186 | 895.120 | 0.0895 | < 0.6 % |
| 4 | ดิน7 หลุม7 | 137.77 | 15.85 | 21.369 | 166.031 | 130.611 | 0.0131 | < 0.6 % |

3.4 ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ในเนื้อคอนกรีต

ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ในเนื้อคอนกรีต (%เทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ส่ง) จากผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการดังตารางที่ 3-9 เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน ตัวอย่างผงคอนกรีตจะจัดอยู่ในประเภทการก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอื่น ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำที่ยอมให้ในคอนกรีตไม่เกิน 0.30 % ดังรูปที่ 3-13

ตารางที่ 3-10 ผลการทดลองปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ในเนื้อคอนกรีต

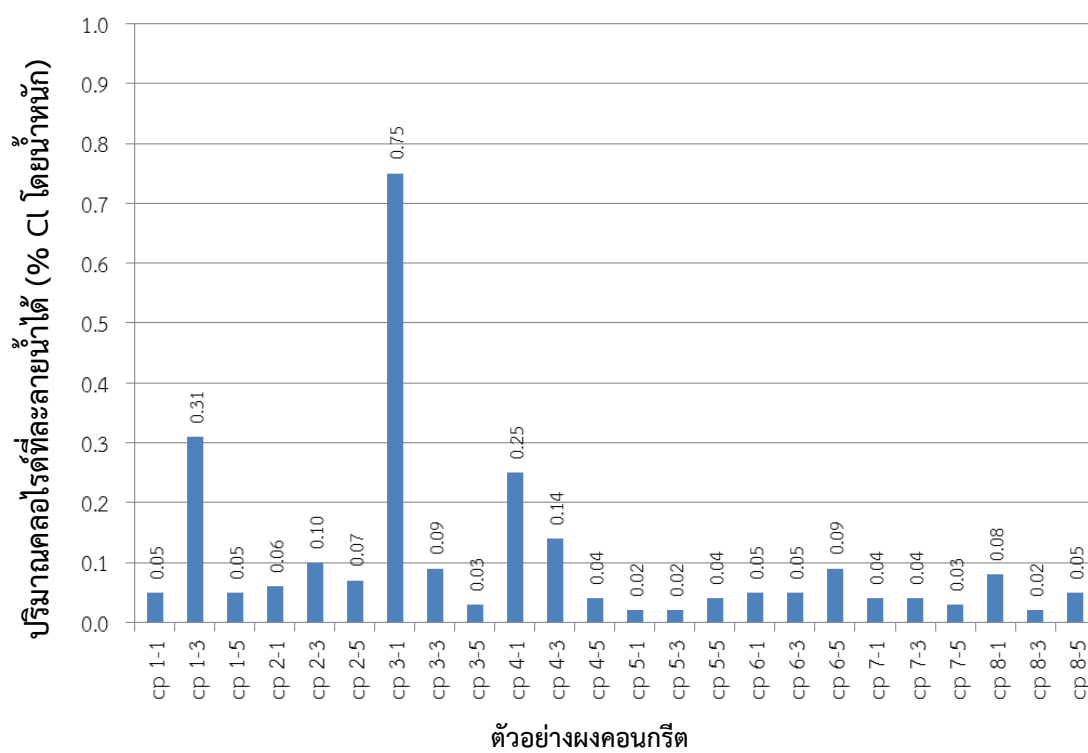
| ชื่อตัวอย่าง | ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ (%ของน้ำหนักวัสดุประสาน) |
|--------------|--|
| cp 1-1 | 0.05 |
| cp 1-3 | 0.31 |
| cp 1-5 | 0.05 |

| | |
|--------|------|
| cp 2-1 | 0.06 |
| cp 2-3 | 0.10 |
| cp 2-5 | 0.07 |
| cp 3-1 | 0.75 |
| cp 3-3 | 0.09 |
| cp 3-5 | 0.03 |

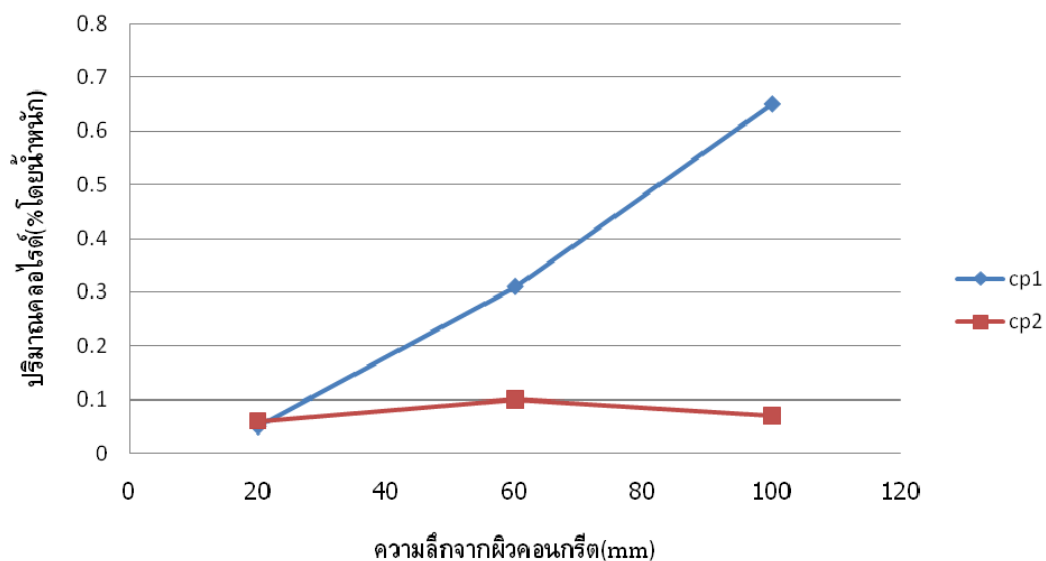
ตารางที่ 3-10 ผลการทดลองปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ในเนื้อคอนกรีต (ต่อ)

| ชื่อตัวอย่าง | ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายน้ำได้ (%ของน้ำหนักวัสดุประสาน) |
|--------------|--|
| cp 4-1 | 0.25 |
| cp 4-3 | 0.14 |
| cp 4-5 | 0.04 |
| cp 5-1 | 0.02 |
| cp 5-3 | 0.02 |
| cp 5-5 | 0.04 |
| cp 6-1 | 0.05 |
| cp 6-3 | 0.05 |
| cp 6-5 | 0.09 |
| cp 7-1 | 0.04 |

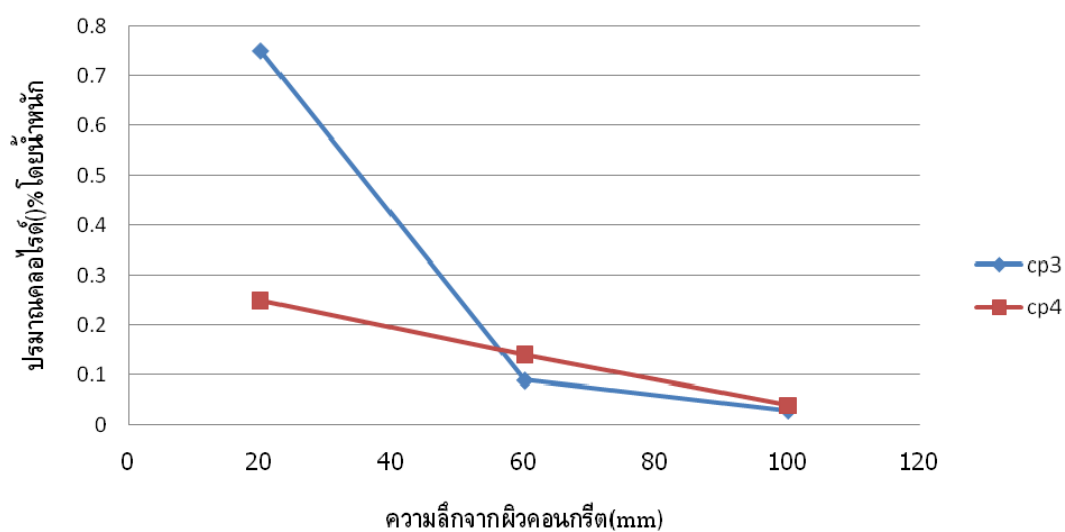
| | |
|--------|------|
| cp 7-3 | 0.04 |
| cp 7-5 | 0.03 |
| cp 8-1 | 0.08 |
| cp 8-3 | 0.02 |
| cp 8-5 | 0.05 |



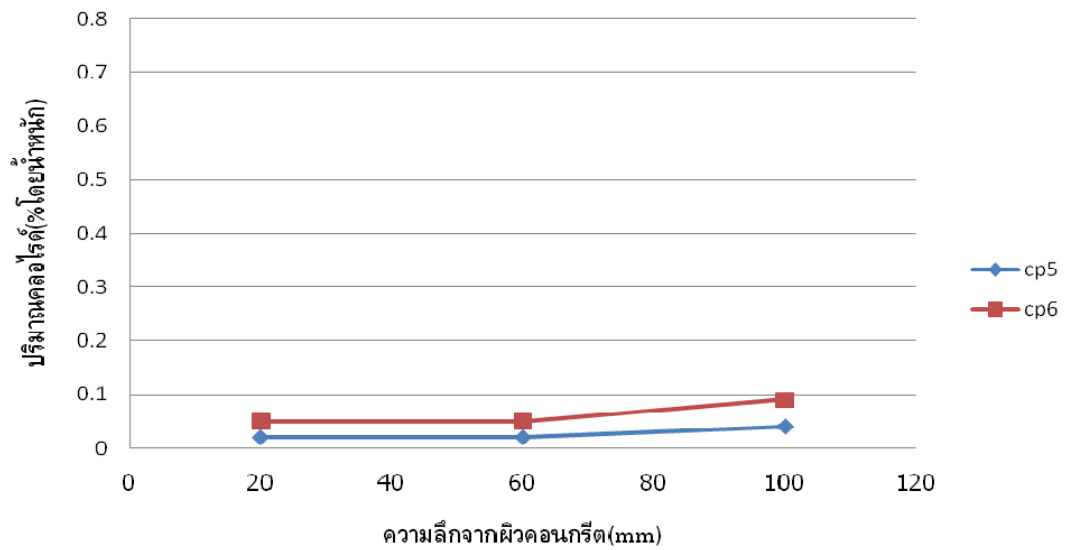
รูปที่ 3-13 ปริมาณปริมาณคลอรีน (CI) ที่ละลายน้ำได้ในคอนกรีต เทียบกับค่ามาตรฐาน



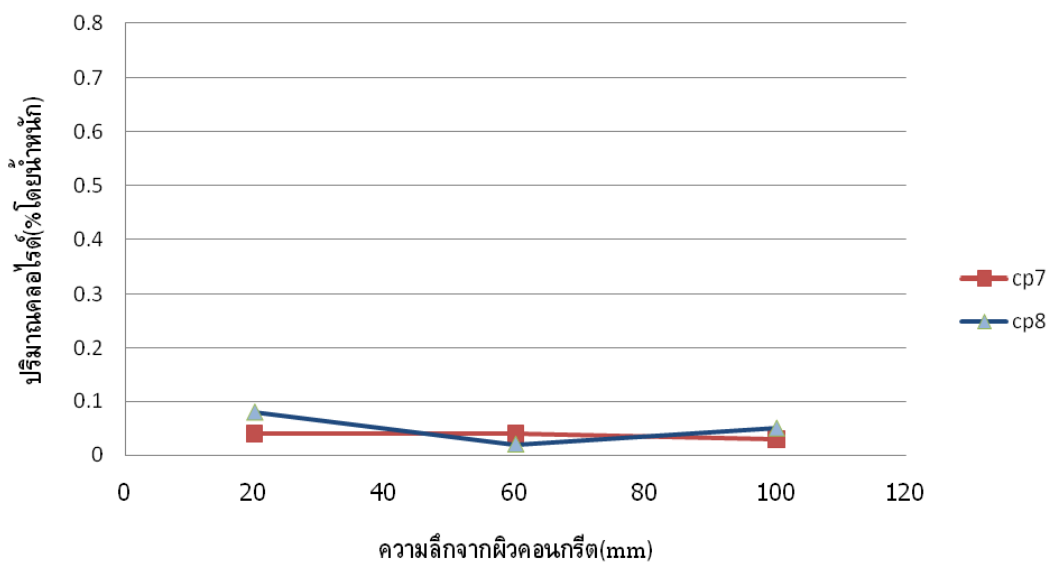
รูปที่ 3-14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปริมาณคลอไรด์ (Cl) กับระดับความลึกของการเจาะฝังตัวอย่างคอนกรีตของตัวอย่างผงคอนกรีต cp 1 และ cp 2



รูปที่ 3-15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปริมาณคลอไรด์ (Cl) กับระดับความลึกของการเจาะฝังตัวอย่างคอนกรีตของตัวอย่างผงคอนกรีต cp 3 และ cp 4



รูปที่ 3-16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปริมาณคลอรีน (CI) กับระดับความลึกของการเจาะฝังตัวอย่างคอนกรีตของตัวอย่างผงคอนกรีต cp 5 และ cp 6



รูปที่ 3-17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปริมาณคลอรีน (CI) กับระดับความลึกของการเจาะฝังตัวอย่างคอนกรีตของตัวอย่างผงคอนกรีต cp 7 และ cp 8

3.5 ผลการทดสอบการวัดความลึกของคาร์บอนชั้น

การวัดความลึกของคาร์บอนเนชั่น โดยการพ่น phenolphthaleins in alcohol (1%) ให้ชุ่ม กระจกกรอง (สาร phenolphthalein จะไม่เปลี่ยนสีเมื่อ pH มีค่าต่ำกว่า 10) เจาะผิวคอนกรีตและ ร่องผนังคอนกรีตที่หลุดด้วยกระจกกรอง หยุดเจาะเมื่อเกิดสีชมพูขึ้นที่กระจกกรอง ความลึกของคาร์บอนเนชั่นวัดได้จากความลึกจากผิวคอนกรีตเมื่อหยุดเจาะ ดังตารางที่ 3-11

ตารางที่ 3-11 ผลการทดสอบการวัดความลึกของคาร์บอนเนชั่น

| ชื่อตัวอย่าง | ระยะ(mm) | ผลที่ได้ |
|--------------|----------|-----------|
| cp 1-1 | 0-20 | ไม่เกิดสี |
| cp 1-2 | 20-40 | เกิดสี |
| cp 1-3 | 40-60 | เกิดสี |
| cp 1-4 | 60-80 | เกิดสี |
| cp 1-5 | 80-100 | เกิดสี |
| cp 2-1 | 0-20 | ไม่เกิดสี |
| cp 2-2 | 20-40 | ไม่เกิดสี |
| cp 2-3 | 40-60 | ไม่เกิดสี |
| cp 2-4 | 60-80 | ไม่เกิดสี |
| cp 2-5 | 80-100 | เกิดสี |

ตารางที่ 3-11 ผลการทดสอบการวัดความลึกของคาร์บอนเนชั่น (ต่อ)

| ชื่อตัวอย่าง | ระยะ(mm) | ผลที่ได้ |
|--------------|----------|-----------|
| cp 3-1 | 0-20 | ไม่เกิดสี |
| cp 3-2 | 20-40 | เกิดสี |
| cp 3-3 | 40-60 | เกิดสี |
| cp 3-4 | 60-80 | เกิดสี |
| cp 3-5 | 80-100 | เกิดสี |
| cp 4-1 | 0-20 | ไม่เกิดสี |
| cp 4-2 | 20-40 | เกิดสี |
| cp 4-3 | 40-60 | เกิดสี |
| cp 4-4 | 60-80 | เกิดสี |
| cp 4-5 | 80-100 | เกิดสี |
| cp 5-1 | 0-20 | ไม่เกิดสี |
| cp 5-2 | 20-40 | เกิดสี |
| cp 5-3 | 40-60 | เกิดสี |
| cp 5-4 | 60-80 | เกิดสี |
| cp 5-5 | 80-100 | เกิดสี |

| | | |
|--------|--------|-----------|
| cp 6-1 | 0-20 | ไม่เกิดสี |
| cp 6-2 | 20-40 | ไม่เกิดสี |
| cp 6-3 | 40-60 | ไม่เกิดสี |
| cp 6-4 | 60-80 | ไม่เกิดสี |
| cp 6-5 | 80-100 | ไม่เกิดสี |
| cp 7-1 | 0-20 | ไม่เกิดสี |
| cp 7-2 | 20-40 | ไม่เกิดสี |
| cp 7-3 | 40-60 | เกิดสี |
| cp 7-4 | 60-80 | เกิดสี |
| cp 7-5 | 80-100 | เกิดสี |
| cp 8-1 | 0-20 | ไม่เกิดสี |
| cp 8-2 | 20-40 | เกิดสี |
| cp 8-3 | 40-60 | เกิดสี |
| cp 8-4 | 60-80 | เกิดสี |
| cp 8-5 | 80-100 | เกิดสี |

3.6 การคำนวณระยะเวลาการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเนื่องจากปริมาณคลอไรด์

การคำนวณระยะเวลาการเสื่อมสภาพเนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่ผิวทำให้เกิดกระบวนการกัดกร่อน จากผลการทดลองนำค่าข้อมูลปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตจากห้องปฏิบัติการมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของคลอไรด์ที่ผิวและอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์จากแก้วสมการตัวแปรของสมการ (2) ตามมาตรฐาน JSCE.(2003) โดยสมมติให้ความหนาแน่นที่ผิวมีการกระจายตัวเป็นแบบการกระจายตัวปกติ และเนื่องจากการแพร่กระจายของสารผ่านรูพรุนเนื้อคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของคอนกรีต และหาและอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์มาอย่างละค่าเพื่อคำนวณระยะเวลาที่โครงสร้างจะถึงจุดเสื่อมสภาพ เนื่องจากการกัดกร่อนโดยคำนวณได้จากสมการ (1) เป็นหนึ่งชุดข้อมูล และระยะเวลาการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอนขึ้นจากสมการ (5) และจากกราฟเป็นค่าของระยะเวลาที่โครงสร้างเกิดจุดเสื่อมสภาพ แล้วพิจารณา ณ เวลาปัจจุบันว่าความน่าจะเป็นที่เกิดจุดเสื่อมสภาพในโครงสร้างเป็นอย่างไรแล้วจึงพิจารณาความเหมาะสมในการเลือกค่าความน่าจะเป็นของการเกิดจุดเสื่อมสภาพในโครงสร้างที่จะใช้เป็นเกณฑ์ประเมินอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของโครงสร้าง

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

คำนวณระยะเวลาในการเสื่อมสภาพเนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่ผิวทำให้เกิดกระบวนการกัดกร่อนได้จากสมการที่ (1)

$$t_i = \frac{(0.1x)^2 \left[\operatorname{erfc}^i \left(\frac{C_{\text{lim}}}{C_s} \right) \right]^{-2}}{4D_{cl}} \quad (1)$$

เมื่อ ;

t_i คือ เวลาที่เหล็กเริ่มเกิดกระบวนการถูกกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์(ปี) ตามมาตรฐานของ JSCE.(2005)

D_{cl} คือ อัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์ (ตร.ซม./ปี) คำนวณได้จากสมการ 2

C_{lim} คือ ปริมาณคลอไรด์ ที่ทำให้เริ่มการกัดกร่อนเหล็กเสริม (กก./ลบ.ม.) โดยกำหนดค่าไว้ที่ 1.2 กก./ลบ.ม.ตามมาตรฐานของ JSCE.(2005)

C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิว (กก./ลบ.ม.)

X คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริมของคอนกรีต (มม.)

$$C_x = C_0 - C_0 \operatorname{erf} \left(\frac{0.1C}{2D_{cl}t} \right) \quad (2)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (3)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4)$$

เมื่อ ;

C_0 = ปริมาณของคลอไรด์ที่ระยะ c จากผิว (กก./ลบ.ม.) ตามมาตรฐานของ JSCE.(2003)

C_x = ปริมาณของคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)

c = ระยะลึกจากผิวคอนกรีต (ซม.)

t = ระยะเวลาที่โครงสร้างผ่านการใช้งาน (ปี)

$$D = k\sqrt{t_c} \quad (5)$$

เมื่อ ;

D = ความลึกของคาร์บอนชั้น (มม.)

k = สัมประสิทธิ์การเกิดคาร์บอนชั้น (มม./ปี^{0.5})

t_c = เวลาที่เหล็กเริ่มเกิดกระบวนการถูกกัดกร่อนจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น

การคำนวณระยะเวลาในการเสื่อมสภาพเนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่ผิวทำให้เกิดกระบวนการกัดกร่อนได้จากสมการที่ (1) เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของคลอไรด์ (ตร.ซม./ปี) คำนวณได้จากสมการ (2) มีค่าน้อยมาก และเนื่องจากผลปริมาณคลอไรด์กับระดับความลึกของคอนกรีตบางส่วนไม่

เป็นไปตามทฤษฎีที่ว่าปริมาณของคลอไรด์ที่ระยะจากผิวมีมากกว่าปริมาณของคลอไรด์ที่ความลึกใดๆ ทำให้เมื่อนำผลไปแทนค่าคำนวณระยะเวลาในการเชื่อมสภาพเนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่ผิวทำให้เกิดกระบวนการกัดกร่อนได้จากสมการที่ (1) มีค่าเวลาดิตลบหรือไม่ก็สูงเกินไป ซึ่งผลเป็นดังตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 ผลการคำนวณระยะเวลาในการเชื่อมสภาพเนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่ผิว

| ชื่อตัวอย่าง | ความลึกจากผิวคอนกรีต (มม.) | เวลาที่เหล็กเริ่มเกิดกระบวนการถูกกัดกร่อน เนื่องจากคลอไรด์(ปี) |
|--------------|-------------------------------|---|
| cp 1-1 | 20 | |
| cp 1-3 | 60 | -3.06373E-09 |
| cp 1-5 | 100 | -4.24247E+15 |
| cp 2-1 | 20 | |
| cp 2-3 | 60 | -5.65611E+14 |
| cp 2-5 | 100 | -8.48416E+13 |

ตารางที่ 3.12 ผลการคำนวณระยะเวลาในการเชื่อมสภาพเนื่องจากปริมาณคลอไรด์ที่ผิว (ต่อ)

| ชื่อตัวอย่าง | ความลึกจากผิวคอนกรีต (มม.) | เวลาที่เหล็กเริ่มเกิดกระบวนการถูกกัดกร่อน เนื่องจากคลอไรด์(ปี) |
|--------------|-------------------------------|---|
| cp 3-1 | 20 | |
| cp 3-3 | 60 | -2.6513E+14 |
| cp 3-5 | 100 | -4.77277E+14 |
| cp 4-1 | 20 | |
| cp 4-3 | 60 | 6.48104E+15 |
| cp 4-5 | 100 | 7.42365E+15 |
| cp 5-1 | 20 | |
| cp 5-3 | 60 | 2.27376E+41 |
| cp 5-5 | 100 | 2.27376E+29 |
| cp 6-1 | 20 | |
| cp 6-3 | 60 | 1.2925E+30 |
| cp 6-5 | 100 | 1.17543E+18 |
| cp 7-1 | 20 | |
| cp 7-3 | 60 | 9.09504E+41 |
| cp 7-5 | 100 | 8.27198E+41 |
| cp 8-1 | 20 | |
| cp 8-3 | 60 | 1.88083E+17 |

| | | |
|--------|-----|--------------|
| cp 8-5 | 100 | -8.48608E+13 |
|--------|-----|--------------|

ตารางที่ 3.13 เวลาที่เหล็กเริ่มเกิดกระบวนการกัดกร่อนจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นจากสมการที่ 5

| ชื่อตัวอย่าง | ระยะความลึกที่เกิดปฏิกิริยา คาร์บอนชั้น (มม.) | เวลาที่เหล็กเริ่มเกิดกระบวนการกัดกร่อน จากปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น (ปี) |
|--------------------|--|--|
| cp 1-1(รูเจาะที่1) | 0-20 | 251.572 |
| cp 2-5(รูเจาะที่2) | 80-100 | 4025.15 |
| cp 3-1(รูเจาะที่3) | 0-20 | 251.572 |
| cp 4-1(รูเจาะที่4) | 0-20 | 251.572 |
| cp 5-1(รูเจาะที่5) | 0-20 | 251.572 |
| cp 6-1(รูเจาะที่6) | 0-20 | 251.572 |
| cp 7-2(รูเจาะที่7) | 20-40 | 1,006.289 |
| cp 8-1(รูเจาะที่8) | 0-20 | 251.572 |

3.7 ผลการวิเคราะห์จากสมการของ Corr et al. (2001)

จากการทดลองที่สกัดโดยน้ำ (Water Extraction) ของตัวอย่างดินที่ 3 (หลุม 5) อาคารจอด
กองอาคารสถานที่และยานพาหนะมีแนวโน้มที่เป็นสารละลาย NaSO_4 ที่มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดย
น้ำหนัก 0.569220% ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น (โดยน้ำหนัก) ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Corr

et al. (2001) ซึ่งมีค่า 0.15M NaSO₄ หรือเท่ากับ 2.13 % NaSO₄ การคำนวณดังแสดงตัวอย่างการแปลงหน่วย M (โมลาร์) เป็น % ความเข้มข้น (โดยน้ำหนัก)

ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงหน่วย M (โมลาร์) เป็น % ความเข้มข้น(โดยน้ำหนัก)

น้ำหนักอะตอม หรือน้ำหนักโมเลกุล ของ NaSO₄ มีค่า = (23x2) + 32 + (16x4) = 142 g/mol

สมมุติ สารละลาย NaSO₄ มีความเข้มข้นโดยน้ำหนัก = 5 %

แสดงว่า ในตัวละลาย 1,000 g มีค่า NaSO₄ 50 g

จะมีจำนวนโมล = 50 g / (142 g/mol) = 0.352 mol

ดังนั้น Molarity = 0.352 mol / 1 L = 0.352 M

ถ้าในสารละลาย NaSO₄ มีค่า 0.352 M เทียบเท่าความเข้มข้นโดยน้ำหนัก 5 %

ดังนั้นถ้าในสารละลาย NaSO₄ มี 0.15 M เทียบเท่าความเข้มข้นโดยน้ำหนัก

$$= (5 \% \times 0.15 \text{ M}) / 0.352 \text{ M}$$

$$= 2.13 \%$$

ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จะอาศัยสมการของ Corr et al. (2001) มาวิเคราะห์ระยะเวลาและอายุการใช้งานของคอนกรีต ที่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่มีอยู่ในดินจากสมการที่ 6

$$T = (1/((W/C)^2 \gamma_3^2)) \times \{ \ln(E_0/(C_3A + 1)^{\gamma_2} - \gamma_1) \}^2 \quad (6)$$

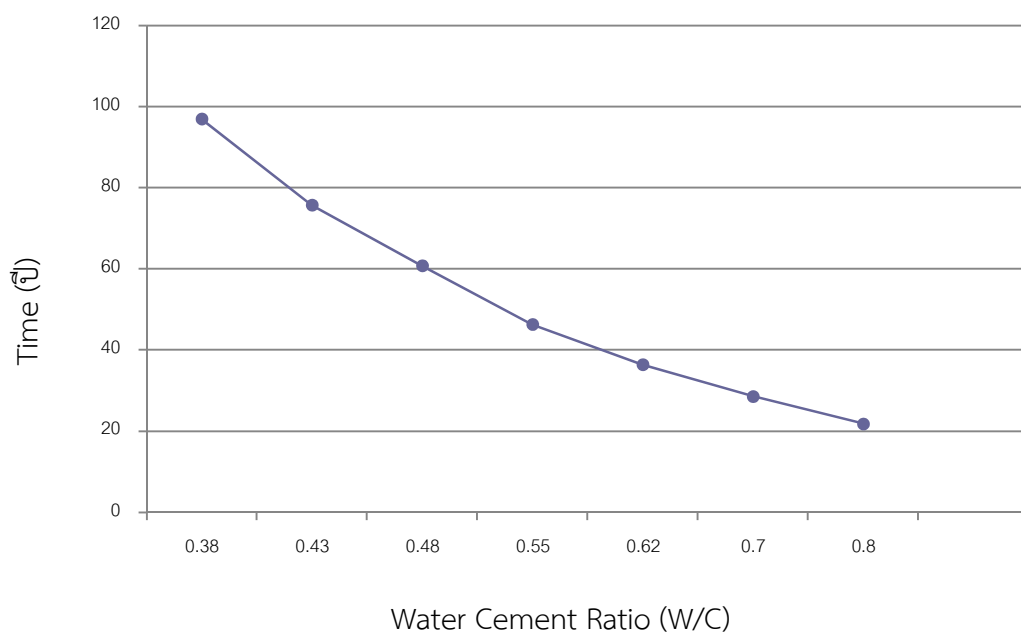
การกำหนดค่าตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในสมการจะกำหนดค่าต่างๆให้สอดคล้องกับการก่อสร้างอาคารใน ที่เกิดการแตกร้าว ซึ่งจะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ คอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ซึ่งมีไตรแคลเซียมอลูมิเนียม (C₃A) เท่ากับ 0 % (ตามมาตรฐาน มอก. 15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ. 2517) เกณฑ์กำหนดคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์), E₀กำหนดให้มีค่า 0.5 %, $\gamma_1 = -4.2117$, $\gamma_2 = 0.32494$, $\gamma_3 = 0.94001$ และ W/C กำหนดให้มีค่า 0.38-0.80 (จากตารางที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ชัลวาลย์, 2536)

ตารางที่ 3.14 ผลจากการแทนค่าลงในสมการเพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาและอายุการใช้งานของคอนกรีตตามสมการของ Corr et al. (2001)

| ชุดที่ | กำลังอัดประลัยที่ 28 วัน (fc') (ksc,Cylinder) | W/C (Water cement ratio) | T (Time, ปี) |
|--------|--|---------------------------------|------------------|
| 1 | 150 | 0.80 | 21.89 |
| 2 | 200 | 0.70 | 28.59 |
| 3 | 250 | 0.62 | 36.45 |

| | | | |
|---|-----|------|-------|
| 4 | 300 | 0.55 | 46.32 |
| 5 | 350 | 0.48 | 60.81 |
| 6 | 400 | 0.43 | 75.78 |
| 7 | 450 | 0.38 | 97.03 |

ระยะเวลาอายุการใช้งานของคอนกรีตโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แกน Y คือ T (ระยะเวลา,ปี) และ แกน X คือ W/C (Water cement ratio) ซึ่งแปรผกผันกัน



รูปที่ 3-18 กราฟแสดงระยะเวลาอายุการใช้งานของคอนกรีต

3.7 ผลทดสอบกำลังอัดประลัยคอนกรีตโดยวิธี Rebound Hammer-Schmidt

การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยวิธี Rebound Hammer เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย สามารถทำการทดสอบแบบในที่ โดยอาศัยหลักการสะท้อนกลับของ Steel Hammer การทดสอบวิธีนี้สามารถนำไปใช้สำหรับการประเมินหาค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ณ สภาพปัจจุบัน โดยนำค่าที่ได้ไปตรวจสอบหาความสามารถในการรับน้ำหนักขององค์อาคารคอนกรีตที่เหลืออยู่

การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ Schmidt Hammer อาศัยแรงต้านทานที่เกิดขึ้นจากการตีของ Steel Hammer ซึ่งมีหน้าตัดที่แน่นอน กดลงบนผิวหน้าคอนกรีตที่ต้องการตรวจสอบแล้วเกิดการสะท้อนกลับทำให้ได้ค่าระยะที่ต้นลูกตุ้มให้สะท้อนกลับคือค่า Rebound Number ซึ่งค่า Rebound Number นี้จะถูกนำไปแปลงผลเป็นกำลังอัดประลัยของ

คอนกรีตโดยใช้ดัชนีมาตรฐานในการแปลงผล ซึ่งการทดสอบหาค่ากำลังอัดสูงสุดด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด (Schmidt Hammer) เป็นไปตามมาตรฐาน BS 1881: Part 202 และ ASTM C805

ผลจากการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ Schmidt Hammer ในโครงการนี้ โดยทำการทดสอบกำลังในส่วนโครงสร้างของเสาอาคารมาเป็นตัวอย่างของข้อมูล ซึ่งผลของกำลังอัดประลัย ดังแสดงในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังอัดประลัยของโครงสร้างเสาอาคารคอนกรีตโดยประมาณ โดยใช้เครื่อง Schmidt Hammer

| ชื่ออาคาร | เสาตัวอย่าง | ค่ากำลังอัดเฉลี่ย (ksc.) |
|---|-------------|--------------------------|
| 1.อาคาร 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. | 11 | 380 |
| | 12 | 425 |
| | 13 | 380 |
| | 14 | 384 |
| | 15 | 372 |
| 2.เรือนปฏิบัติการกลาง และสนง.ภาควิชาวิศวกรรมวิทยา | 21 | 331 |
| | 22 | 346 |
| | 23 | 320 |
| | 24 | 348 |
| | 25 | 337 |
| 3.กองอาคารสถานที่และยานพาหนะ 1 | 31 | 220 |
| | 32 | 215 |
| | 33 | 228 |
| | 34 | 239 |
| | 35 | 227 |
| 4.กองอาคารสถานที่และยานพาหนะ 2 | 41 | 230 |
| | 42 | 217 |
| | 43 | 224 |
| | 44 | 235 |
| | 45 | 205 |
| 5.ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ | 51 | 324 |
| | 52 | 328 |

| | | |
|--|----|-----|
| | 53 | 330 |
| | 54 | 325 |
| | 55 | 340 |

3.8 ผลการตรวจสอบระยะหุ้มเหล็กเสริม

ในการตรวจสอบระยะหุ้มเหล็กเสริมนั้น อาศัยการตรวจสอบจากโครงสร้างเสาอาคารด้วยเครื่องวัดมาตรฐาน ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย และให้ค่าระยะที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 แสดงผลการตรวจสอบระยะหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างเสาอาคาร

| ชื่ออาคาร | เสาตัวอย่าง | ระยะหุ้มเหล็กเสริม (mm) |
|--|-------------|-------------------------|
| 1.อาคาร 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ กพส. | 11 | 45 |
| | 12 | 45 |
| | 13 | 42 |
| | 14 | 40 |
| | 15 | 43 |
| 2.เรือนปฏิบัติการกลาง และสนง.ภาควิชาวิศวกรรมโยธา | 21 | 40 |
| | 22 | 45 |
| | 23 | 50 |
| | 24 | 47 |
| | 25 | 45 |
| 3.กองอาคารสถานที่และยานพาหนะ 1 | 31 | 40 |
| | 32 | 42 |
| | 33 | 37 |
| | 34 | 35 |
| | 35 | 38 |
| 4.กองอาคารสถานที่และยานพาหนะ 2 | 41 | 35 |
| | 42 | 40 |
| | 43 | 37 |

| | | |
|--------------------------------------|----|----|
| | 44 | 42 |
| | 45 | 38 |
| 5. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตโคกระบือ | 51 | 45 |
| | 52 | 45 |
| | 53 | 44 |
| | 54 | 47 |
| | 55 | 58 |