

บทที่ 3

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผลการศึกษา

3.1 การทดสอบหาค่าสมบัติของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

ดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยเป็นดินชั้นดินเดิม (Subgrade) มีลักษณะเนื้อละเอียดสีเทาปนดำและพบว่าดินมีกลิ่นเน่าเปื่อยรุนแรง ความลึกของดินตัวอย่างในการทำการศึกษาวิจัยอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 2–3 เมตร จากผิวดินเดิม ที่บริเวณโครงการประตุระบายน้ำปากพนัง อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช

3.1.1 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพนัง

จากการทดสอบดินเหนียวปากพนังพบว่าค่า Natural Water Content มีค่าเท่ากับ 76.32 % และค่า Liquid Limit เท่ากับ 55.18 % กรณีที่ค่า Natural Water Content มากกว่าค่า Liquid Limit เป็นช่วงที่ดินมีความแข็งแรงต่ำเนื่องดินอยู่ในสภาวะเหลว ค่า Plastic Limit เท่ากับ 27.36 % และค่า Plastic Index เท่ากับ 27.82 % ดินเหนียวปากพนังมีค่า Specific Gravity เท่ากับ 2.69 จากการแบ่งชนิดของดินตามขนาดของเม็ดดินซึ่งอ้างอิงตามระบบ MIT พบว่ามีปริมาณของทราย (Sand) ขนาด 0.06 - 2 mm. เท่ากับ 12.97 % ดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002 - 0.06 mm. เท่ากับ 83.63 % และปริมาณของดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 mm. เท่ากับ 3.40 % ดังตารางที่ 3.1 การกระจายของตัวดินเหนียวปากพนัง ดังรูปที่ 3.1 จากการจำแนกประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification จัดอยู่ในประเภท CH

3.1.2 สมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวปากพนัง

จากการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวปากพนังพบว่าค่า Total Unit Weight เท่ากับ 1500 kg/m³ การทดสอบ Unconfined Compression Test พบว่าดินเหนียวปากพนังมีค่ากำลังอัดค่อนข้างต่ำเท่ากับ 0.16 ksc. ค่า Sensitivity เท่ากับ 1.68 มีค่าที่ต่ำแสดงว่าการถูกกระทบกระเทือนจะมีผลต่อค่ากำลังอัดน้อยมาก ค่า Modulus of Elasticity เท่ากับ 2.22 ksc. และค่า Strain at Failure เท่ากับ 11.86 % ดังตารางที่ 3.1 จากการทดสอบพบว่าดินมีการยุบตัวสูง

3.1.3 สมบัติทางเคมีของดินเหนียวปากพนัง

จากการทดสอบสมบัติทางเคมีของดินเหนียวปากพนัง พบว่าจะมีค่า pH เท่ากับ 7.37 ซึ่งแสดงว่าดินมีสภาพเป็นกลาง มีปริมาณ Chloride เท่ากับ 7.7 g/kg, Organic Matter เท่ากับ 5.81 % และ Sulphate เท่ากับ 247 g/kg ดังตารางที่ 3.1 โดยเป็นผลที่เกิดจากตะกอนดินบริเวณใกล้ทะเลซึ่งมีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อกำลังของดินที่ปรับปรุงคุณภาพลดลง เกษมและโกศล (2544) ได้ศึกษาผลกระทบของดินซีเมนต์ต่อปริมาณของ Organic Matter และ Chloride พบว่าปริมาณของ Organic Matter ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง แต่ปริมาณของ Chloride ไม่ส่งผลต่อค่ากำลังอัด

3.1.4 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนังโดยวิธี X - Ray Diffraction พบว่ามีปริมาณแร่ Quartz เท่ากับ 35.71 %, แร่ Muscovite เท่ากับ 30.81 %, แร่ Montmorillonite เท่ากับ 22.17 %, แร่ Kaolinite เท่ากับ 8.12 % และแร่ Halite 3.19 % ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งสอดคล้องกับ สมมาตร (2550) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวบริเวณสะพานติณสูลานนท์ จังหวัดสงขลา พบว่ามีปริมาณแร่ Quartz เป็นหลัก และสอดคล้องกับ สุขสันต์ และรุ่งลาวัลย์ (2550) ได้ใช้วิธี X - Ray Diffraction วิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย พบว่ามีส่วนประกอบของแร่ Quartz และแร่ Montmorillonite เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่และมีปริมาณ 70 %

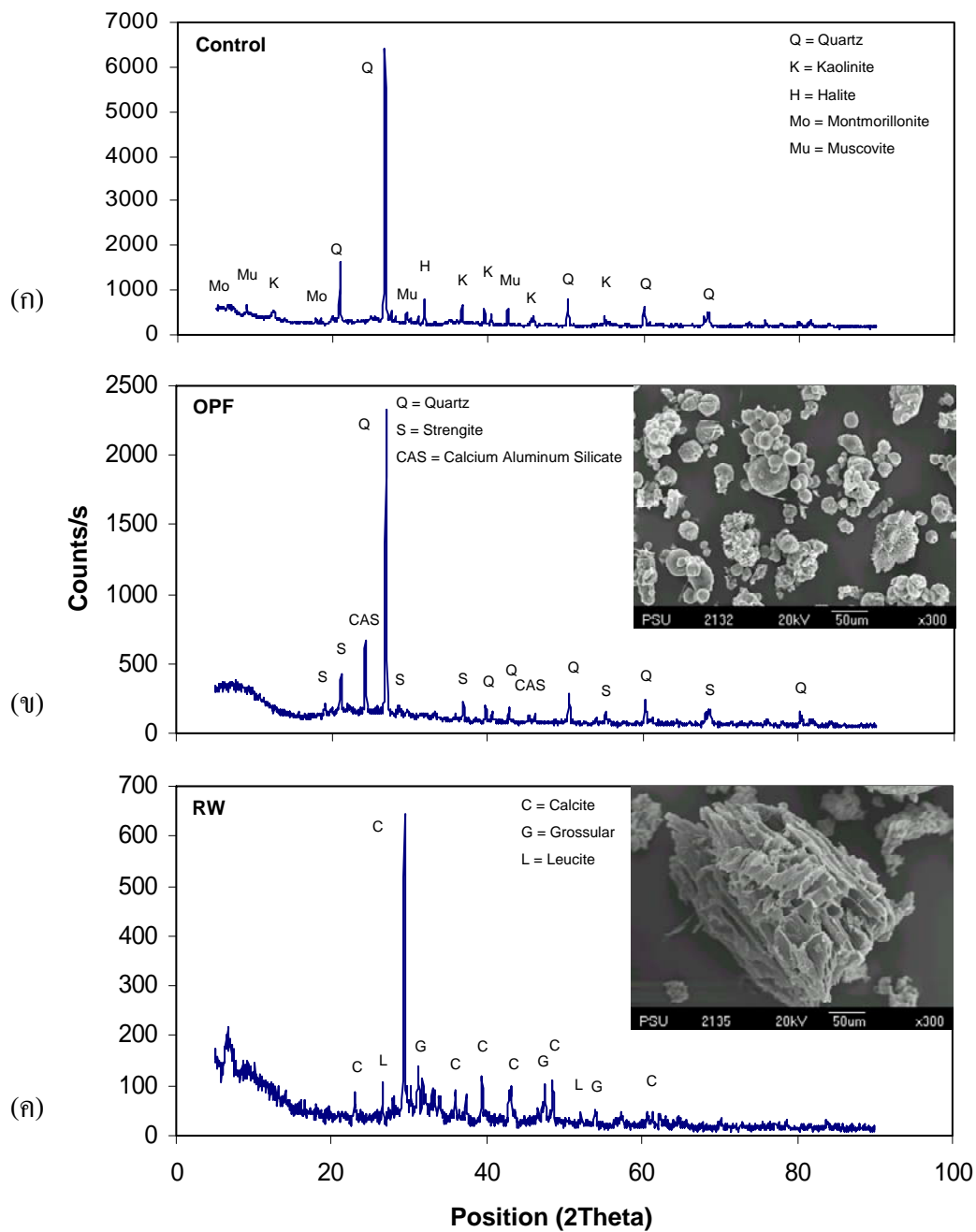
Cox (1970) กล่าวว่า สภาพทางธรณีวิทยาของดินเหนียวกรุงเทพฯ และดินเหนียวปากพนังเป็นดินชนิดเดียวกันอยู่หมวดหินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary)

3.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปากพนัง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของดินเหนียวปากพนังโดยวิธี X - Ray Fluorescence พบว่ามีองค์ประกอบของ SiO_2 เท่ากับ 51.60 % และ Al_2O_3 กับ 19.15 % เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีทางเคมี เนื่องจากสารประสานสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับ Soil Silica และ Soil Alumina ที่มีอยู่มากในดินได้ดี องค์ประกอบของ Fe_2O_3 เท่ากับ 10.71 %, K_2O เท่ากับ 3.21 %, Na_2O เท่ากับ 1.70 %, TiO_2 เท่ากับ 1.61 %, MgO เท่ากับ 1.52 %, Cl เท่ากับ 1.07 % และ SO_3 เท่ากับ 0.85 % สำหรับการทดสอบ Loss on Ignition (LOI) พบว่ามีค่าสูญเสียจากการเผาไหม้เท่ากับ 7.72 % ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางวิศวกรรมและสมบัติทางเคมีของดินเหนียวปากพั้ง

| สมบัติของดินเหนียวปากพั้ง | ค่าแสดงหรือปริมาณ |
|--|------------------------|
| 1) สมบัติทางกายภาพ | |
| Natural Water Content (NWC) | 76.32 % |
| Liquid Limit (LL) | 55.18 % |
| Plastic Limit (PL) | 27.36 % |
| Plastic Index (PI) | 27.82 % |
| Specific Gravity (Gs) | 2.69 |
| ปริมาณของดินที่ลอดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (0.075 mm.) | 89.36 % |
| Grain Size Distribution (ตามระบบ MIT) | |
| ทราย (Sand) ขนาด 0.06 - 2 mm. | 12.97 % |
| ดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002 - 0.06 mm. | 83.63 % |
| ดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 mm. | 3.40 % |
| ประเภทของดินตามระบบ Unified Soil Classification | CH |
| 2) สมบัติทางวิศวกรรม | |
| Total Unit Weight (γ_t) | 1500 kg/m ³ |
| Unconfined Compressive Strength (UCS) | 0.16 ksc. |
| Sensitivity | 1.68 |
| Modulus of Elasticity (E_{50}) | 2.22 ksc. |
| Strain at Failure (ϵ_f) | 11.86 % |
| 3) สมบัติทางเคมี | |
| pH | 7.37 |
| Chloride | 7.7 g/kg |
| Organic Matter | 5.81 % |
| Sulphate | 247 g/kg |



รูปที่ 3.2 การวิเคราะห์หองค์ประกอบแร่ (ก) ดินเหนียวปากพนัง (ข) ถ้ำไยปากลัมน้ำมัน (ค) ถ้ำไยปางพารา

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวปากพนัง, ภูเขาปลืมน้ำมันและถ้ำไม้ยางพารา

| องค์ประกอบ | Control (%) | OPF (%) | RW (%) |
|--------------------------------|-------------|---------|--------|
| MgO | 1.52 | 3.22 | 3.82 |
| Al ₂ O ₃ | 19.15 | 1.54 | 0.33 |
| SiO ₂ | 51.60 | 58.14 | 3.29 |
| P ₂ O ₅ | - | 3.32 | 2.53 |
| SO ₃ | 0.85 | 1.86 | 1.02 |
| Cl | 1.07 | 0.93 | 0.07 |
| K ₂ O | 3.21 | 11.49 | 20.12 |
| CaO | 0.86 | 12.04 | 43.14 |
| TiO ₂ | 1.61 | 0.26 | - |
| MnO ₂ | - | 0.23 | 1.35 |
| Fe ₂ O ₃ | 10.71 | 3.16 | 0.51 |
| SrO | - | - | 0.08 |
| CuO | - | 0.08 | - |
| Na ₂ O | 1.70 | - | - |
| LOI | 7.72 | 3.73 | 23.74 |

3.2 การทดสอบหาค่าสมบัติของถ้ำไยปาล์มน้ำมันและถ้ำไยยางพารา

การพิจารณาคัดเลือกสารปอชโซลานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้จะพิจารณาจากงานวิจัยในอดีตทางด้านสมบัติทางวิศวกรรมและองค์ประกอบทางเคมีเป็นหลัก โดยสารปอชโซลานที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้จะคัดเลือกจากวัสดุเหลือใช้ ซึ่งหากได้ผลที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้งานได้จะเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาประเทศและยังเป็นการจัดการปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย คือ

- 1) ถ้ำไยปาล์มน้ำมัน จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งใน จ.กระบี่ มีลักษณะเป็นผงละเอียดมีสีเทาปนม่วง โดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200
- 2) ถ้ำไยยางพารา ได้โรงงานที่ใช้ไยยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการอบไม้แห่งหนึ่งใน จ.นครศรีธรรมราช มีลักษณะเป็นผงสีเทา โดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

3.2.1 สมบัติทางกายภาพของถ้ำไยปาล์มน้ำมันและถ้ำไยยางพารา

จากการทดสอบถ้ำไยปาล์มน้ำมันพบว่าค่า Natural Water Content มีค่าเท่ากับ 1.25 % และค่า Specific Gravity เท่ากับ 2.30 จากการแบ่งชนิดของดินตามขนาดของเม็ดดินซึ่งอ้างอิงตามระบบ MIT พบว่ามีปริมาณเทียบเท่ากับทราย (Sand) ขนาด 0.06 - 2 mm. เท่ากับ 22.50 % เทียบเท่ากับดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002 - 0.06 mm. เท่ากับ 76.33 % และปริมาณเทียบเท่ากับดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 mm. เท่ากับ 1.17 % ดังตารางที่ 3.3 การกระจายตัวของถ้ำไยปาล์มน้ำมัน ดังรูปที่ 3.1

จากการทดสอบถ้ำไยยางพาราพบว่าค่า Natural Water Content มีค่าเท่ากับ 1.63 % และค่า Specific Gravity เท่ากับ 2.88 จากการแบ่งชนิดของดินตามขนาดของเม็ดดินซึ่งอ้างอิงตามระบบ MIT พบว่ามีปริมาณเทียบเท่ากับทราย (Sand) ขนาด 0.06 - 2 mm. เท่ากับ 17.90 % เทียบเท่ากับดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002 - 0.06 mm. เท่ากับ 79.45 % และปริมาณเทียบเท่ากับดินเหนียว (Clay) ขนาด < 0.002 mm. เท่ากับ 2.65 % ดังตารางที่ 3.3 การกระจายตัวของถ้ำไยยางพารา ดังรูปที่ 3.1 เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของถ้ำไยปาล์มน้ำมันและถ้ำไยยางพารา พบว่ามีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันมากและการกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.004 - 0.2 mm.

ตารางที่ 3.3 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ้ำไยป่าลุ่มน้ำมันและถ้ำไยปางพารา

| สมบัติของทางกายภาพ | ค่าแสดงหรือปริมาณ | |
|-----------------------------|-------------------|---------|
| | OPF | RW |
| Natural Water Content (NWC) | 1.25 % | 1.63 % |
| Specific Gravity (Gs) | 2.30 | 2.88 |
| Grain Size Distribution | | |
| ขนาด 0.06 - 2 mm. | 22.50 % | 17.90 % |
| ขนาด 0.002 - 0.06 mm. | 76.33 % | 79.45 % |
| ขนาด < 0.002 mm. | 1.17% | 2.65 % |

3.2.2 องค์ประกอบแร่ของถ้ำไยป่าลุ่มน้ำมันและถ้ำไยปางพารา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของถ้ำไยป่าลุ่มน้ำมันโดยวิธี X - Ray Diffraction ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์แร่ในดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่ามีปริมาณแร่ Quartz เท่ากับ 50.98 %, แร่ Strengite เท่ากับ 32.38 % และแร่ Calcium Aluminum Silicate เท่ากับ 16.64 % ดังรูปที่ 3.2

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของถ้ำไยปางพาราโดยวิธี X - Ray Diffraction ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์แร่ในดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่ามีปริมาณแร่ Calcite เท่ากับ 64.06 %, แร่ Grossular เท่ากับ 20.95 % และแร่ Luecite เท่ากับ 14.99 % ดังรูปที่ 3.2

3.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำไยป่าลุ่มน้ำมันและถ้ำไยปางพารา

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของถ้ำไยป่าลุ่มน้ำมันโดยวิธี X - Ray Fluorescence ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์แร่ในดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่ามีองค์ประกอบของ SiO_2 เท่ากับ 58.14 %, CaO เท่ากับ 12.04 %, K_2O เท่ากับ 11.49 %, P_2O_5 เท่ากับ 3.32 %, MgO เท่ากับ 3.22 %, Fe_2O_3 เท่ากับ 3.16 %, SO_3 เท่ากับ 1.86 %, Al_2O_3 เท่ากับ 1.54 %, Cl เท่ากับ 0.93 %, TiO_2 เท่ากับ 0.26 %, MnO_2 เท่ากับ 0.23 % และ CuO เท่ากับ 0.08 % สำหรับการทดสอบ Loss on Ignition (LOI) พบว่ามีค่าสูญเสียจากการเผาไหม้เท่ากับ 3.73 % ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับ ดินร่วนและชนภักดิ์ (2551) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของถ้ำไยป่าลุ่มน้ำมันพบว่ามี SiO_2 เป็น

องค์ประกอบหลักเท่ากับ 33.99 % รองลงมาคือ CaO เท่ากับ 16.43 % และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีพบว่าสอดคล้องกับ ชัยและไกรวุฒิ (2549) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 65.30 % รองลงมาคือ CaO เท่ากับ 6.42 %

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเถ้าไม้ยางพาราโดยวิธี X - Ray Fluorescence ตามมาตรฐานการปฏิบัติการวิเคราะห์แร่ในดิน โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่ามีองค์ประกอบของ CaO เท่ากับ 43.14 % K_2O เท่ากับ 20.12 %, MgO เท่ากับ 3.82 %, SiO_2 เท่ากับ 3.29 %, P_2O_5 เท่ากับ 2.53 %, MnO_2 เท่ากับ 1.35 %, SO_3 เท่ากับ 1.02 %, Fe_2O_3 เท่ากับ 0.51 %, Al_2O_3 เท่ากับ 0.33 %, SrO เท่ากับ 0.08 % และ Cl เท่ากับ 0.07 % สำหรับการทดสอบ Loss on Ignition (LOI) พบว่ามีค่าสูญเสียจากการเผาไหม้เท่ากับ 23.74 % ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับ ดนุพลและจิราชาติ (2543) ได้วิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเถ้าไม้ยางพาราพบว่ามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ 58.17 % รองลงมาคือ K_2O เท่ากับ 13.68 %

3.2.4 ประเภทสารปอซโซลานของเถ้าใบปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

มาตรฐาน ASTM C 618 ได้แบ่งประเภทของสารปอซโซลานออกเป็น 2 ประเภทคือ Class F และ Class C

เถ้าใบปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 62.84 % มีปริมาณ SO_3 เท่ากับ 1.86 % โดยไม่พบ Na_2O และค่า Loss on Ignition (LOI) เท่ากับ 3.73 % เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าสามารถจัดเป็นสารปอซโซลาน Class C ดังตารางที่ 3.4

เถ้าไม้ยางพารามีองค์ประกอบของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับ 4.13 % มีปริมาณ SO_3 เท่ากับ 1.02 % โดยไม่พบ Na_2O และค่า Loss on Ignition (LOI) เท่ากับ 23.74 % เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 ซึ่งไม่สามารถจัดเป็นสารปอซโซลานได้ ดังตารางที่ 3.4 แต่มีปริมาณของ CaO เท่ากับ 43.14 % ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณของ CaO ในปูนซีเมนต์จึงมีความสามารถเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration ได้ พบว่าค่า LOI ที่สูงเนื่องจากการเผาในระบบเปิดจึงยังคงมี Organic Matter อยู่มากซึ่งอาจส่งผลหน่วงปฏิกิริยา Hydration และทำให้ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 3.4 การแบ่งประเภทของสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 ของเถ้าไพล่มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

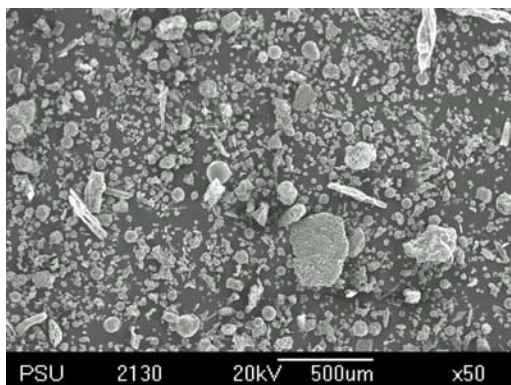
| องค์ประกอบ | Class C | Class F | OPF | RW |
|--|---------|---------|-------|-------|
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ ไม่น้อยกว่า (%) | 50 | 70 | 62.84 | 4.13 |
| SO ₃ ไม่เกิน (%) | 5.0 | 5.0 | 1.86 | 1.02 |
| Na ₂ O ไม่เกิน (%) | 1.5 | 1.5 | - | - |
| LOI ไม่เกิน (%) | 6.0 | 6.0 | 3.73 | 23.74 |

3.2.5 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าไพล่มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

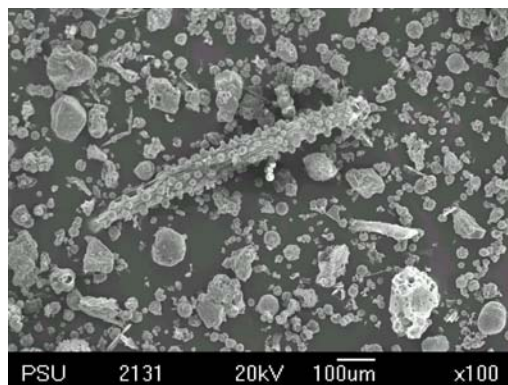
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าไพล่มน้ำมันโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 3.3 พบว่าอนุภาคของเถ้าไพล่มน้ำมันมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมผิวเรียบ แต่บางส่วนพบว่ามีรูปร่างภายนอกไม่แน่นอนหรือเป็นรูปเหลี่ยม ซึ่งลักษณะส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมผิวเรียบจะช่วยหล่อลื่นทำให้การบดอัดง่ายขึ้น

คุณพลและธนภัทร์ (2551) กล่าวว่า โครงสร้างจุลภาคของเถ้าไพล่มน้ำมันมีลักษณะค่อนข้างเป็นเม็ดกลมผิวเรียบภายในมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป จุดเด่นทางด้านสรีระรูปร่างของเถ้าไพล่มน้ำมันที่มีลักษณะทรงกลมจะสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ทุกทิศทาง

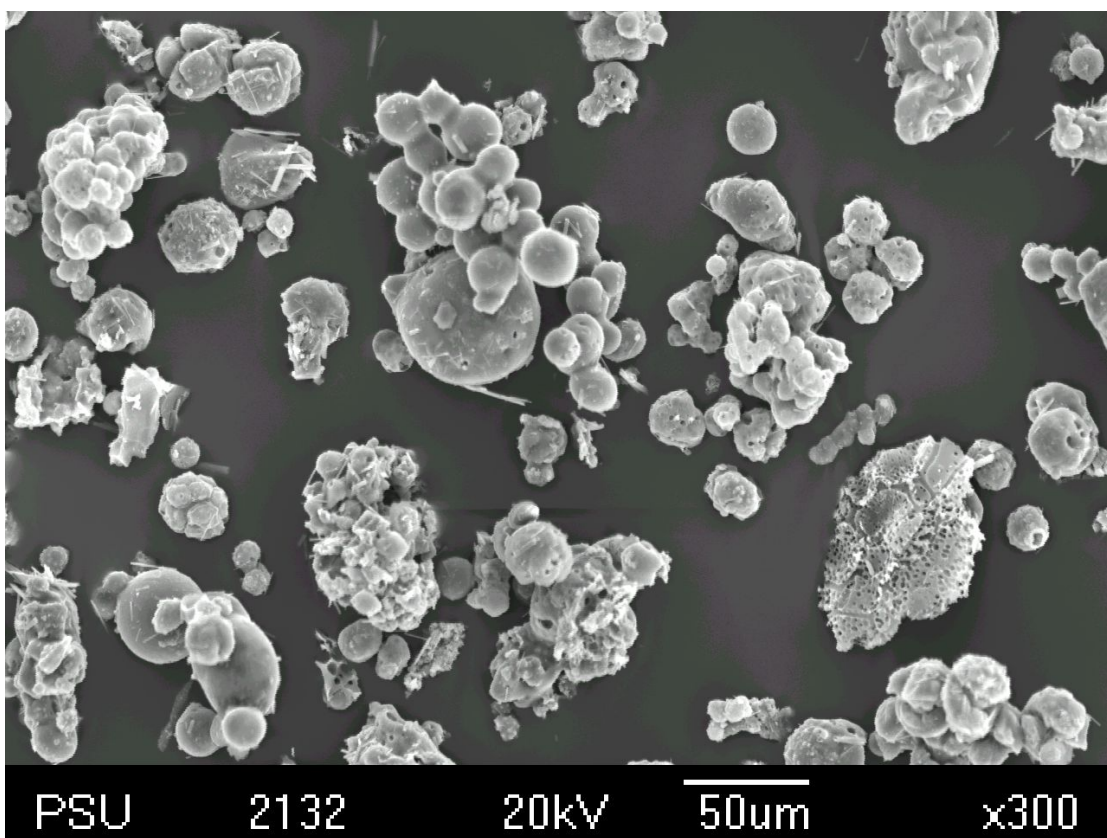
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าไม้ยางพาราโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังรูปที่ 3.4 พบว่าอนุภาคของเถ้าไม้ยางพาราเป็นเหลี่ยมภายในมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งลักษณะที่มีเหลี่ยมคมมากอาจส่งผลเสียทำให้การบดอัดยากขึ้นและไม่เกื้อหนุนต่อการทำปฏิกิริยากับแร่ในดินเหนียวปากพั้ง แต่ส่งผลให้การยึดเกาะแบบขัดประสานกัน (Mechanical Interlock) ดียิ่งขึ้นเนื่องจากมีเหลี่ยมคมมากและขณะเดียวกันก็ดูดซึมน้ำมากเข้าไปในรูพรุนของตัวเองทำให้ปริมาณน้ำในมวลดินที่ผสมลดลงไปด้วย



(ก)

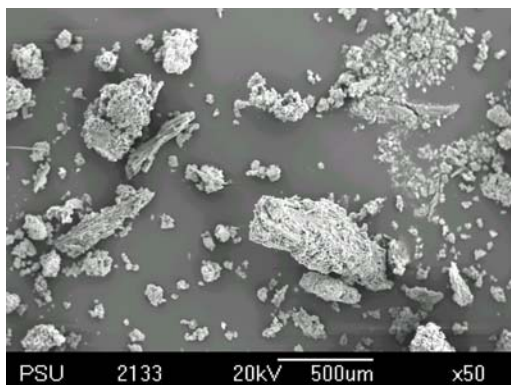


(ข)

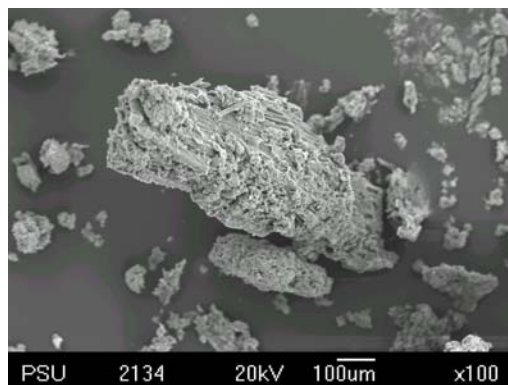


(ค)

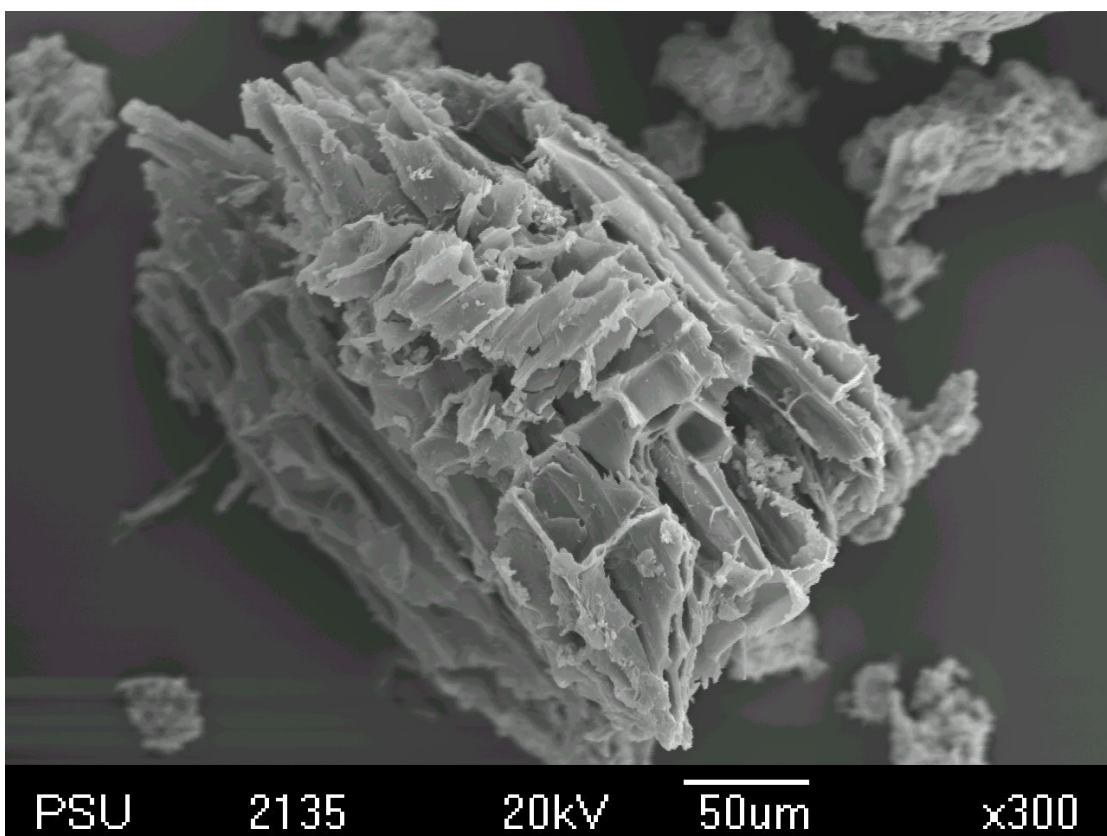
รูปที่ 3.3 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าไฮปาล์มน้ำมัน (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (ข) กำลังขยาย 100 เท่า (ค) กำลังขยาย 300 เท่า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.4 โครงสร้างจุลภาคของเส้นใยขางพารา (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (ข) กำลังขยาย 100 เท่า (ค) กำลังขยาย 300 เท่า

3.3 การทดสอบหาค่าสมบัติของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

3.3.1 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพ

1) การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

จากการทดสอบหาค่า Specific Gravity พบว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่า Specific Gravity เท่ากับ 2.69, เถ้าไยปลาล์มน้ำมันมีค่า Specific Gravity เท่ากับ 2.30, เถ้าไม้ยางพารามีค่า Specific Gravity เท่ากับ 2.88 และมีค่า Specific Gravity กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ดังตารางที่ 3.5

จากการทดสอบหาค่า Specific Gravity กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไยปลาล์มน้ำมันเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้าไยปลาล์มน้ำมันส่งผลให้ค่า Specific Gravity ลดลงอย่างมาก ซึ่งพิจารณาได้จากการลดลงของค่า Specific Gravity เมื่อมีการผสมเถ้าไยปลาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียวหรือเมื่อมีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ดังรูปที่ 3.5 (ก)

จากการทดสอบหาค่า Specific Gravity กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราส่งผลให้ค่า Specific Gravity เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งพิจารณาได้จากการเพิ่มขึ้นของค่า Specific Gravity เมื่อมีการผสมเถ้าไม้ยางพาราเพียงอย่างเดียวหรือเมื่อมีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ดังรูปที่ 3.5 (ข)

2) การทดสอบ Atterberg Limits

จากการทดสอบหาค่า Atterberg Limits พบว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่า Liquid Limit เท่ากับ 55.18 % ค่า Plastic Limit เท่ากับ 27.36 % และค่า Plastic Index เท่ากับ 27.82 % สำหรับเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารามีค่าเป็น Non - Plastic กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ดังตารางที่ 3.5

จากการทดสอบหาค่า Atterberg Limits กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไยปลาล์มน้ำมันเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้าไยปลาล์มน้ำมันส่งผลให้ค่า Liquid Limit ลดลงและส่งผลให้ค่า Plastic Limit เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้ค่า Plastic Index ลดลง ซึ่งพิจารณาได้จากการทดสอบหา

ค่า Atterberg Limits เมื่อมีการผสมแฉะไยปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียวหรือเมื่อมีปรับปรุงคุณภาพด้วยแฉะไยปาล์มน้ำมันและแฉะไยยางพารา ดังรูปที่ 3.6 (ก)

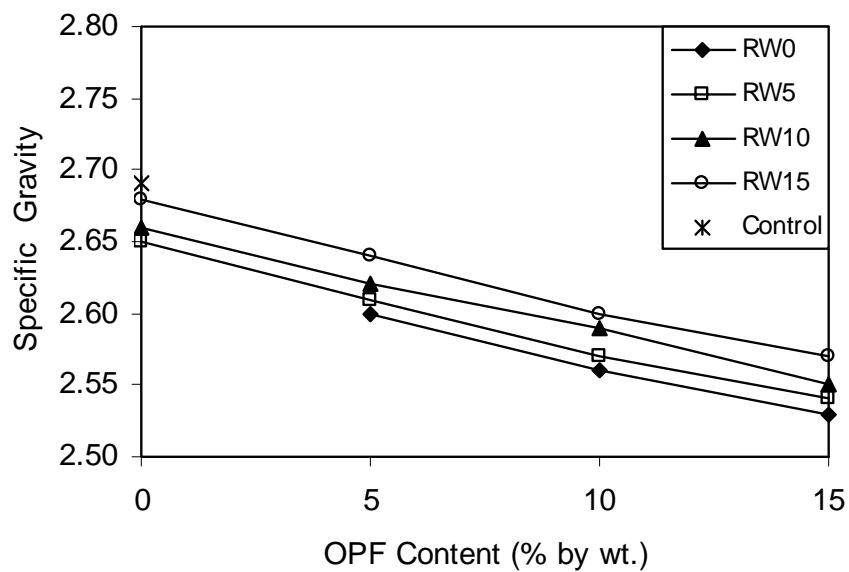
จากการทดสอบหาค่า Atterberg Limits กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยแฉะไยปาล์มน้ำมันและแฉะไยยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของแฉะไยยางพาราเป็นหลัก พบว่าการผสมแฉะไยยางพาราส่งผลเช่นเดียวกับการผสมแฉะไยปาล์มน้ำมันคือทำให้ค่า Liquid Limit ลดลงและส่งผลให้ค่า Plastic Limit เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงทำให้ค่า Plastic Index ลดลง ซึ่งพิจารณาได้จากการทดสอบหาค่า Atterberg Limits เมื่อมีการผสมแฉะไยยางพาราเพียงอย่างเดียวหรือเมื่อมีปรับปรุงคุณภาพด้วยแฉะไยปาล์มน้ำมันและแฉะไยยางพารา ดังรูปที่ 3.6 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับ Redus (1958) ได้ทดสอบ Atterberg Limits ดินซีเมนต์ที่ใช้เป็นพื้นทางของสนามบิน พบว่าซีเมนต์จะทำให้เกิดการลดลงของค่า Plastic Index ของวัสดุและการลดลงจะเป็นไปอย่างถาวร โดยการลดลงจะแปรผันตรงกับปริมาณซีเมนต์

Awal (1979) ได้อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity Index ของดินผสมซีเมนต์ที่เป็นผลจากการผสมซีเมนต์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเมนต์จะมีผลทำให้ดินมีการเพิ่มค่า Plastic Limit เล็กน้อย แต่จะทำให้มีการลดลงของค่า Liquid Limit และเป็นผลทำให้ Plasticity Index มีค่าลดลง

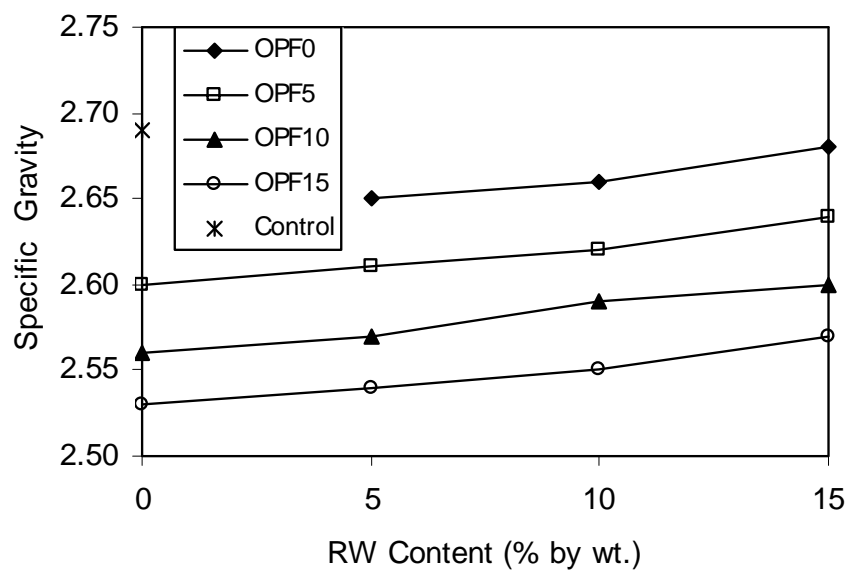
Terrel et al. (1979) กล่าวว่า การลดลงของค่า Plastic Index จะช่วยเพิ่มความความสามารถในการผสมเข้ากัน (Workability)

ตารางที่ 3.5 สมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์ม น้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

| สัญลักษณ์ | Specific Gravity | Atterberg Limits | | |
|------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | Liquid Limit (%) | Plastic Limit (%) | Plastic Index (%) |
| Control | 2.69 | 55.18 | 27.36 | 27.82 |
| OPF0:RW5 | 2.65 | 53.68 | 26.78 | 26.90 |
| OPF0:RW10 | 2.66 | 51.71 | 27.94 | 23.77 |
| OPF0:RW15 | 2.68 | 49.97 | 29.84 | 20.13 |
| OPF5:RW0 | 2.60 | 54.08 | 27.73 | 26.35 |
| OPF5:RW5 | 2.61 | 52.43 | 28.24 | 24.19 |
| OPF5:RW10 | 2.62 | 50.93 | 29.22 | 21.71 |
| OPF5:RW15 | 2.64 | 49.55 | 30.42 | 19.13 |
| OPF10:RW0 | 2.56 | 52.57 | 29.21 | 23.36 |
| OPF10:RW5 | 2.57 | 51.43 | 29.63 | 21.80 |
| OPF10:RW10 | 2.59 | 50.29 | 30.24 | 20.05 |
| OPF10:RW15 | 2.60 | 49.50 | 30.89 | 18.61 |
| OPF15:RW0 | 2.53 | 51.49 | 30.53 | 20.96 |
| OPF15:RW5 | 2.54 | 50.71 | 30.67 | 20.04 |
| OPF15:RW10 | 2.55 | 49.86 | 30.79 | 19.07 |
| OPF15:RW15 | 2.57 | 49.57 | 31.19 | 18.38 |

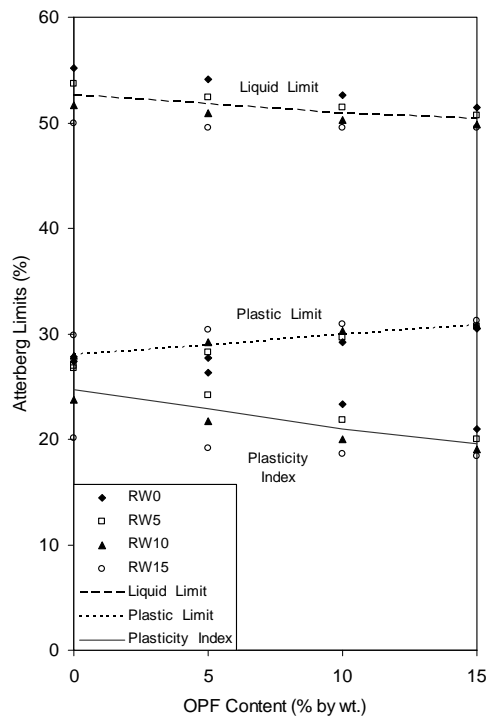


(ก)

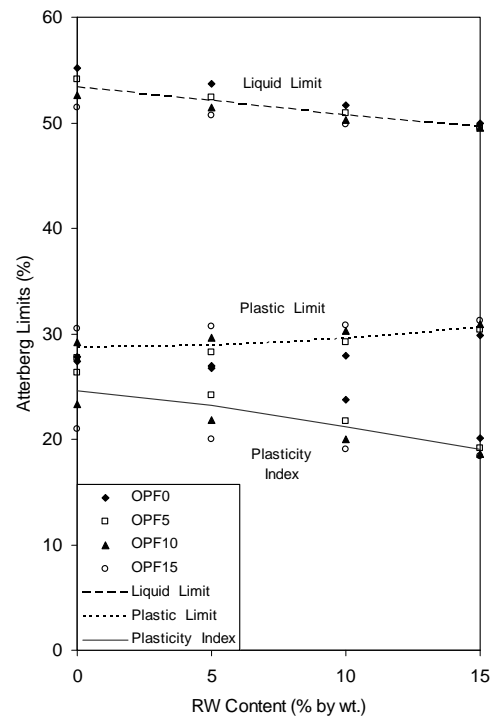


(ข)

รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Specific Gravity กับอัตราส่วน (ก) เถ้าใบปาล์มน้ำมันและ (ข) เถ้าไม้ยางพารา



(ก)



(จ)

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Atterberg Limits กับอัตราส่วน (ก) เถ้าไยปลาล์มน้ำมันและ (จ) เถ้าไม้ยางพารา

3.3.2 การทดสอบการบดอัดของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพ

จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) พบว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่า Maximum Dry Density เท่ากับ 1522 kg/m^3 และ Optimum Moisture Content เท่ากับ 23.86 % กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ดังตารางที่ 3.6

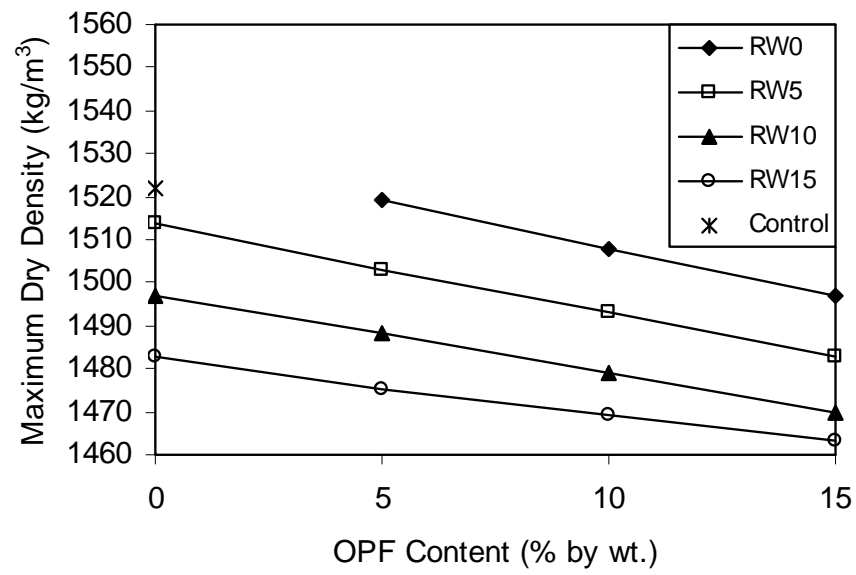
จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไยปลาล์มน้ำมันเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้าไยปลาล์มน้ำมันส่งผลให้ค่า Maximum Dry Density ลดลง ดังรูปที่ 3.7 (ก) และส่งผลให้ค่า Optimum Moisture Content เพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าไยปลาล์มน้ำมัน ดังรูปที่ 3.8 (ก) เมื่อมีการผสมเถ้าไยปลาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียวหรือเมื่อมีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

จากการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน ภูมิของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราส่งผลให้ค่า Maximum Dry Density ลดลง เช่นเดียวกับการผสมเถ้าไยปาล์มน้ำมัน ดังรูปที่ 3.7 (ข) และส่งผลให้ค่า Optimum Moisture Content เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเริ่มจะคงที่เมื่อปริมาณเถ้าไยปาล์มน้ำมันมากขึ้น ดังรูปที่ 3.8 (ข) เมื่อมีการผสมเถ้าไม้ยางพาราเพียงอย่างเดียวหรือเมื่อมีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

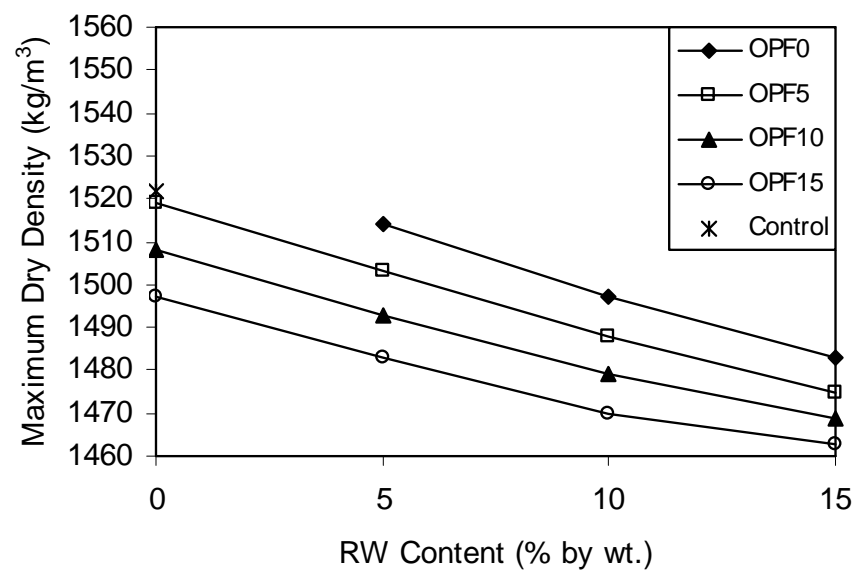
การปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราส่งผลให้ค่า Maximum Dry Density ลดลง เนื่องจากอนุภาคของเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราในมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไปซึ่งช่วยน้ำหนักและช่วยในการดูดซึมน้ำได้ดี โดยจะพบว่าค่า Optimum Moisture Content เพิ่มขึ้น ภูมิปรับปรุงดินที่มี Natural Water Content สูงจะช่วยในการลด Water Content ในดินที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพและช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้าง

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไพล่าลุ่มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

| สัญลักษณ์ | Maximum Dry Density (kg/m ³) | Optimum Moisture Content (%) |
|------------|---|---------------------------------|
| Control | 1522 | 23.86 |
| OPF0:RW5 | 1514 | 24.08 |
| OPF0:RW10 | 1497 | 24.67 |
| OPF0:RW15 | 1483 | 25.13 |
| OPF5:RW0 | 1519 | 23.89 |
| OPF5:RW5 | 1503 | 24.45 |
| OPF5:RW10 | 1488 | 24.96 |
| OPF5:RW15 | 1475 | 25.34 |
| OPF10:RW0 | 1508 | 24.37 |
| OPF10:RW5 | 1493 | 24.87 |
| OPF10:RW10 | 1479 | 25.34 |
| OPF10:RW15 | 1469 | 25.63 |
| OPF15:RW0 | 1497 | 24.88 |
| OPF15:RW5 | 1483 | 25.34 |
| OPF15:RW10 | 1470 | 25.76 |
| OPF15:RW15 | 1463 | 25.94 |

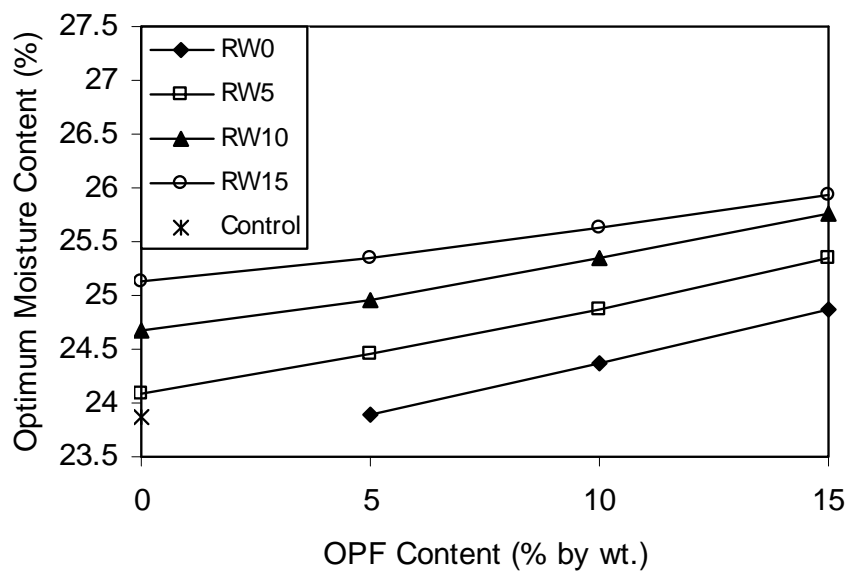


(ก)

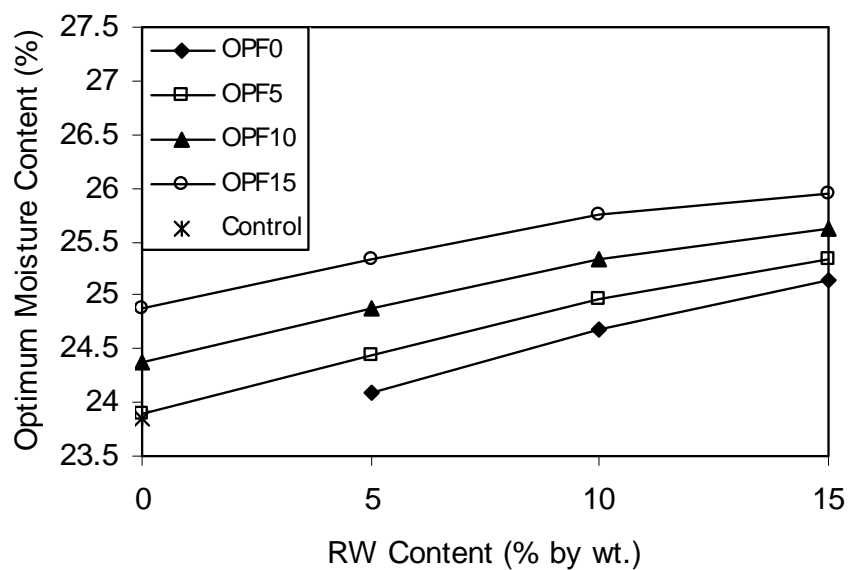


(ข)

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Maximum Dry Density กับอัตราส่วน (ก) เถ้าไฮปาล์ม น้ำมันและ (ข) เถ้าไม้ยางพารา



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Optimum Moisture Content กับอัตราส่วน (ก) ถั่วไฮปาล์ม น้ำมันและ (ข) ถั่วไม้อย่างพารา

3.3.3 การทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพ

จากการทดสอบ Unconfined Compression Test ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดใช้พลังงานในการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) และใช้ปริมาณน้ำที่จุด Optimum Moisture Content พบว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 1.38, 1.35, 1.37, 1.39 และ 1.43 ksc. ซึ่งค่ากำลังอัดมีแนวโน้มคงที่ กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไฮปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงสุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยมีค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 2.09, 2.78, 3.41, 4.23 และ 4.40 ksc. ซึ่งค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 0, 7, 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน ค่ากำลังอัดเริ่มจะคงที่และผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ทุกอัตราส่วน ดังตารางที่ 3.7 กระบวนการเพิ่มของค่ากำลังอัดเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration ทำให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งมีสมบัติเชื่อมเกาะ (Cementitious) เพิ่มขึ้นตามเวลา

1) อิทธิพลของปริมาณเถ้าไฮปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราต่อค่ากำลังอัด

จากการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดกรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไฮปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไฮปาล์มน้ำมันเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้าไฮปาล์มน้ำมันส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการผสมเถ้าไฮปาล์มน้ำมัน 5 % และให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ปริมาณการผสมเถ้าไฮปาล์มน้ำมันที่ 10 % แต่เมื่อปริมาณการผสมเถ้าไฮปาล์มน้ำมันที่ 15 % ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่ม ดังรูปที่ 3.9 โดยผลของกำลังอัดที่ลดลงเมื่อปริมาณการผสมเถ้าไฮปาล์มน้ำมันที่ 15 % เนื่องจากจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของ CaO ในเถ้าไฮปาล์มน้ำมันที่มีอยู่จำกัดและปริมาณของ SiO₂ ในดินเหนียวปากพั้งและเถ้าไฮปาล์มน้ำมันที่มีมากกว่าความต้องการ ในการทำปฏิกิริยากับ CaO จึงทำให้กำลังอัดไม่เพิ่มขึ้นและอาจทำให้กำลังอัดลดลง

จากการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดกรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไฮปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้าไม้ยางพาราเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการผสมเถ้าไม้ยางพารา 5 % และให้ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ปริมาณการผสมเถ้าไม้ยางพาราที่ 10 % แต่เมื่อปริมาณการผสมเถ้าไม้ยางพารา

ที่ 15 % ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่ม เช่นเดียวกับการผสมเถ้าไพล์น้ำมัน ดังรูปที่ 3.9 โดยผลของกำลังอัดที่ลดลงเมื่อปริมาณการผสมเถ้าไม้ยางพาราที่ 15 % ซึ่งสอดคล้องกับ Mitchell (1976) พบว่าปฏิกิริยา Pozzolanic ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดกำลังอัดของดินเหนียวผสมปูนขาวเพิ่มขึ้น แต่จากปริมาณของ SiO_2 ที่มีอยู่จำกัดค่าหนึ่ง ถ้ามีการเพิ่มปูนขาวจนมากกว่าความต้องการในการทำปฏิกิริยากับ SiO_2 ปูนขาวที่เพิ่มนี้อาจส่งผลให้กำลังอัดลดลง โดยในเถ้าไม้ยางพาราประกอบด้วย CaO เป็นองค์ประกอบหลัก แต่ปริมาณ SiO_2 ที่มีอยู่จำกัดในดินจึงทำให้กำลังอัดไม่เพิ่มขึ้นและทำให้กำลังอัดลดลง

จากการวิเคราะห์ค่ากำลังอัดพบว่าดินเหนียวปากพหนังที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไพล์น้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการผสมด้วยเถ้าไพล์น้ำมันหรือเถ้าไม้ยางพาราเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเถ้าไม้ยางพารามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมีดังนี้คือ CaO จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งสารนี้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าไพล์น้ำมันและในดินเหนียวปากพหนัง เกิดเป็นสารประกอบใหม่คือ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ซึ่งมีสมบัติเชื่อมประสานให้เนื้อดินติดกันแน่นขึ้น ขณะเดียวกันช่วยลดช่องว่างในเนื้อดินจึงส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

| สัญลักษณ์ | Age of Curing (days) | Total Unit Weight (kg/m ³) | Unconfined Compressive Strength (ksc.) | Modulus of Elasticity, E ₅₀ (ksc.) | Strain at Failure, ε _f (%) | Water Content (%) |
|-----------|----------------------|--|--|---|---------------------------------------|-------------------|
| Control | 0 | 1872 | 1.38 | 22.64 | 7.77 | 23.10 |
| | 7 | 1867 | 1.35 | 19.72 | 8.96 | 22.64 |
| | 14 | 1854 | 1.37 | 19.98 | 10.46 | 22.15 |
| | 28 | 1850 | 1.39 | 21.81 | 9.31 | 21.64 |
| | 56 | 1833 | 1.43 | 21.65 | 10.06 | 20.62 |
| OPF0:RW5 | 0 | 1863 | 1.09 | 43.76 | 2.77 | 23.37 |
| | 7 | 1858 | 1.57 | 83.51 | 2.21 | 22.96 |
| | 14 | 1855 | 1.86 | 114.25 | 2.07 | 22.35 |
| | 28 | 1848 | 2.34 | 152.50 | 1.91 | 22.17 |
| | 56 | 1835 | 2.37 | 158.13 | 1.88 | 21.09 |
| OPF0:RW10 | 0 | 1874 | 1.20 | 68.36 | 2.79 | 24.95 |
| | 7 | 1855 | 1.64 | 110.17 | 2.44 | 23.51 |
| | 14 | 1844 | 2.11 | 147.36 | 2.09 | 23.01 |
| | 28 | 1826 | 2.53 | 208.67 | 1.99 | 22.48 |
| | 56 | 1821 | 2.55 | 220.43 | 1.97 | 21.65 |
| OPF0:RW15 | 0 | 1857 | 1.19 | 73.64 | 2.77 | 25.46 |
| | 7 | 1840 | 1.57 | 113.76 | 2.31 | 24.08 |
| | 14 | 1836 | 1.93 | 165.32 | 2.00 | 23.58 |
| | 28 | 1819 | 2.37 | 222.82 | 1.89 | 23.00 |
| | 56 | 1809 | 2.42 | 234.14 | 1.87 | 22.07 |

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินเหนียวปากพนังกรณี
ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้อย่างพารา

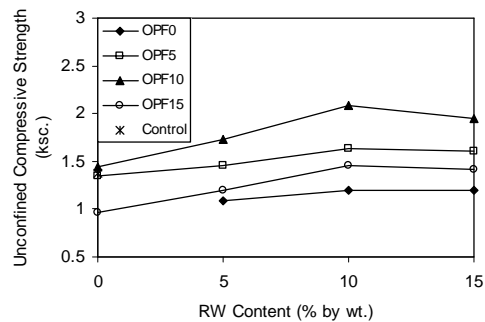
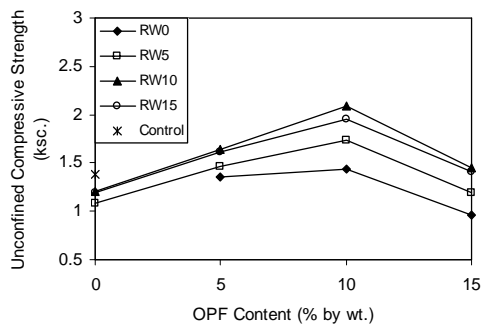
| สัญลักษณ์ | Age of Curing (days) | Total Unit Weight (kg/m ³) | Unconfined Compressive Strength (ksc.) | Modulus of Elasticity, E ₅₀ (ksc.) | Strain at Failure, ε _f (%) | Water Content (%) |
|-----------|----------------------|--|--|---|---------------------------------------|-------------------|
| OPF5:RW0 | 0 | 1872 | 1.35 | 39.56 | 3.65 | 23.29 |
| | 7 | 1866 | 1.68 | 73.89 | 3.01 | 22.99 |
| | 14 | 1868 | 2.02 | 101.28 | 2.75 | 22.34 |
| | 28 | 1860 | 2.54 | 134.50 | 2.49 | 21.97 |
| | 56 | 1841 | 2.59 | 139.13 | 2.41 | 21.01 |
| OPF5:RW5 | 0 | 1872 | 1.46 | 54.50 | 3.60 | 24.04 |
| | 7 | 1961 | 1.91 | 90.62 | 2.98 | 23.61 |
| | 14 | 1851 | 2.43 | 147.43 | 2.60 | 23.02 |
| | 28 | 1830 | 2.88 | 178.15 | 2.39 | 21.45 |
| | 56 | 1833 | 2.95 | 182.60 | 2.35 | 21.39 |
| OPF5:RW10 | 0 | 1851 | 1.64 | 75.20 | 3.39 | 24.39 |
| | 7 | 1843 | 2.12 | 113.76 | 2.78 | 24.01 |
| | 14 | 1836 | 2.65 | 196.42 | 2.38 | 23.28 |
| | 28 | 1833 | 3.27 | 235.97 | 2.29 | 22.96 |
| | 56 | 1818 | 3.38 | 243.29 | 2.25 | 22.00 |
| OPF5:RW15 | 0 | 1836 | 1.61 | 83.85 | 2.79 | 24.87 |
| | 7 | 1830 | 2.11 | 137.88 | 2.45 | 24.22 |
| | 14 | 1821 | 2.55 | 208.18 | 2.31 | 23.79 |
| | 28 | 1815 | 3.23 | 280.53 | 1.99 | 23.34 |
| | 56 | 1807 | 3.28 | 288.39 | 1.96 | 22.28 |

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินเหนียวปากพนังกรณี
ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

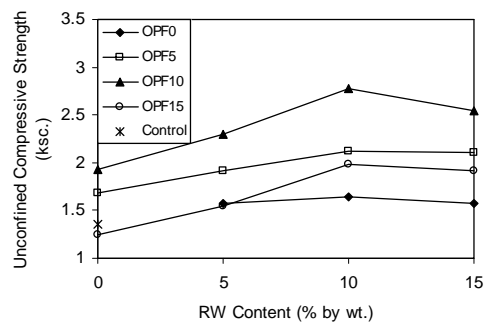
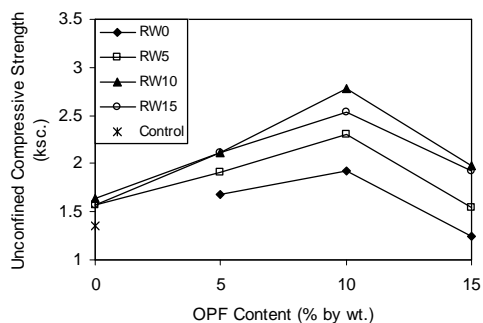
| สัญลักษณ์ | Age of Curing (days) | Total Unit Weight (kg/m^3) | Unconfined Compressive Strength (ksc.) | Modulus of Elasticity, E_{50} (ksc.) | Strain at Failure, ϵ_r (%) | Water Content (%) |
|------------|----------------------|---------------------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------|
| OPF10:RW0 | 0 | 1858 | 1.44 | 46.24 | 5.71 | 23.81 |
| | 7 | 1856 | 1.93 | 75.41 | 4.68 | 23.30 |
| | 14 | 1848 | 2.30 | 109.38 | 4.24 | 22.78 |
| | 28 | 1847 | 2.96 | 154.80 | 3.92 | 22.38 |
| | 56 | 1826 | 2.99 | 150.63 | 3.78 | 21.19 |
| OPF10:RW5 | 0 | 1851 | 1.73 | 63.66 | 4.43 | 24.25 |
| | 7 | 1850 | 2.30 | 110.87 | 3.59 | 23.88 |
| | 14 | 1848 | 2.73 | 166.87 | 3.07 | 23.30 |
| | 28 | 1826 | 3.54 | 208.12 | 2.99 | 22.79 |
| | 56 | 1823 | 3.65 | 214.58 | 2.92 | 21.97 |
| OPF10:RW10 | 0 | 1842 | 2.09 | 98.48 | 3.40 | 24.89 |
| | 7 | 1838 | 2.78 | 163.07 | 2.81 | 24.28 |
| | 14 | 1832 | 3.41 | 223.64 | 2.49 | 23.71 |
| | 28 | 1825 | 4.23 | 297.08 | 2.29 | 23.29 |
| | 56 | 1809 | 4.40 | 313.12 | 2.23 | 22.18 |
| OPF10:RW15 | 0 | 1835 | 1.95 | 102.00 | 2.81 | 25.04 |
| | 7 | 1833 | 2.54 | 176.68 | 2.34 | 24.59 |
| | 14 | 1823 | 3.11 | 252.34 | 1.96 | 24.12 |
| | 28 | 1819 | 3.85 | 317.25 | 1.89 | 23.52 |
| | 56 | 1801 | 3.98 | 330.26 | 1.88 | 22.63 |

ตารางที่ 3.7 (ต่อ) ผลการทดสอบ Unconfined Compression Test ของดินเหนียวปากพนังกรณี
ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเิปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา

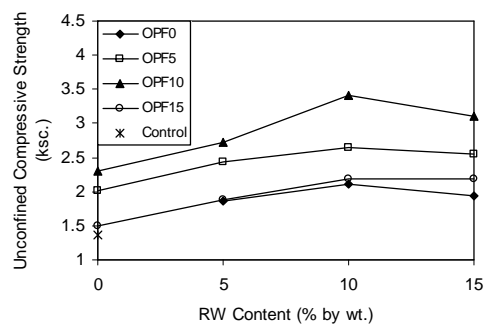
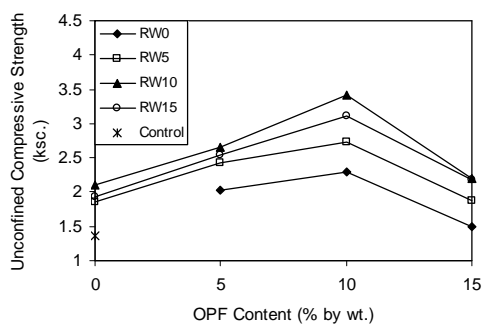
| สัญลักษณ์ | Age of Curing (days) | Total Unit Weight (kg/m^3) | Unconfined Compressive Strength (ksc.) | Modulus of Elasticity, E_{50} (ksc.) | Strain at Failure, ϵ_r (%) | Water Content (%) |
|------------|----------------------|---------------------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------|
| OPF15:RW0 | 0 | 1857 | 0.96 | 13.25 | 12.03 | 24.39 |
| | 7 | 1855 | 1.24 | 16.43 | 10.23 | 23.89 |
| | 14 | 1845 | 1.50 | 21.37 | 8.81 | 23.24 |
| | 28 | 1840 | 1.89 | 31.55 | 8.17 | 22.75 |
| | 56 | 1830 | 1.93 | 32.57 | 7.83 | 21.98 |
| OPF15:RW5 | 0 | 1840 | 1.19 | 18.02 | 9.41 | 24.80 |
| | 7 | 1837 | 1.55 | 29.85 | 7.75 | 24.26 |
| | 14 | 1835 | 1.88 | 37.69 | 7.33 | 23.72 |
| | 28 | 1828 | 2.38 | 52.92 | 6.38 | 23.32 |
| | 56 | 1818 | 2.42 | 53.98 | 6.25 | 22.16 |
| OPF15:RW10 | 0 | 1835 | 1.45 | 31.60 | 7.46 | 25.17 |
| | 7 | 1826 | 1.98 | 42.60 | 6.15 | 24.66 |
| | 14 | 1829 | 2.19 | 72.78 | 5.49 | 24.23 |
| | 28 | 1823 | 3.00 | 88.77 | 4.98 | 23.58 |
| | 56 | 1812 | 3.07 | 90.90 | 4.90 | 22.83 |
| OPF15:RW15 | 0 | 1827 | 1.41 | 31.57 | 7.05 | 25.38 |
| | 7 | 1821 | 1.92 | 46.37 | 5.81 | 24.78 |
| | 14 | 1816 | 2.18 | 77.45 | 5.16 | 24.39 |
| | 28 | 1809 | 2.91 | 90.23 | 4.78 | 23.99 |
| | 56 | 1800 | 2.98 | 91.95 | 4.66 | 22.84 |



(ก)

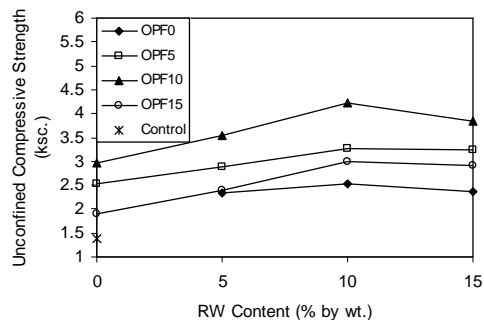
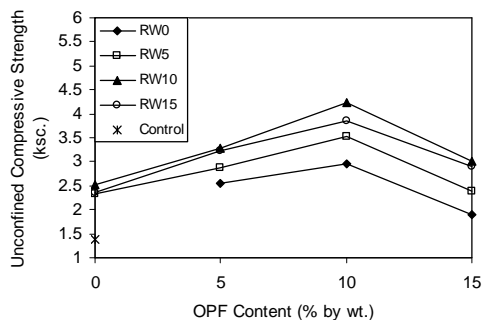


(ข)

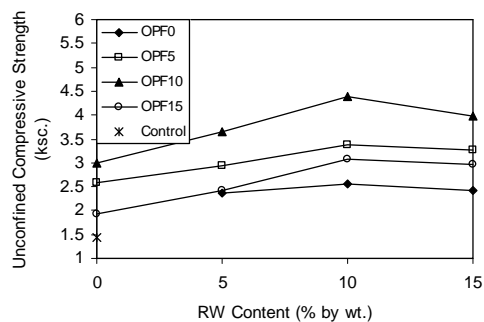
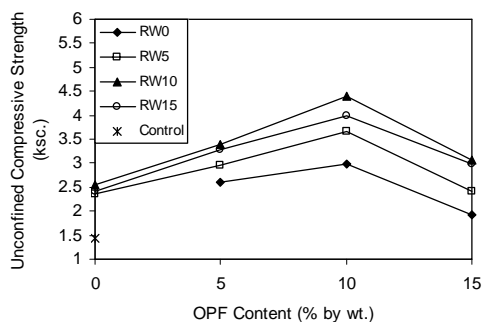


(ค)

รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอัตราส่วนเถ้าไพลล์น้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุการบ่ม (ก) 0 วัน, (ข) 7 วัน, (ค) 14 วัน, (ง) 28 วัน และ (จ) 56 วัน



(ง)



(จ)

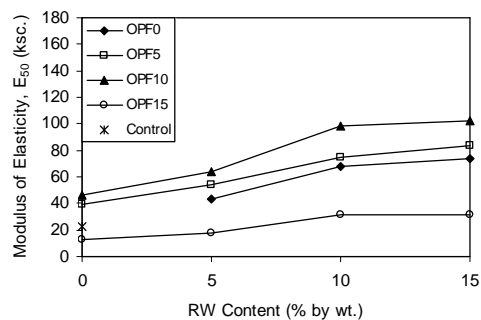
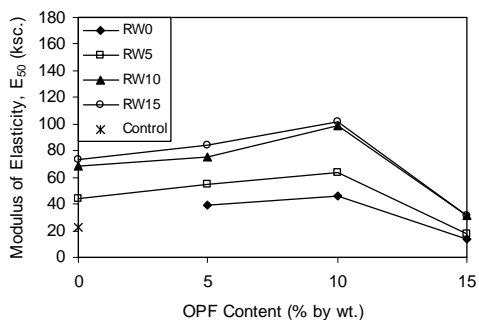
รูปที่ 3.9 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอัตราส่วนเถ้าไยปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้
 ยางพาราที่อายุการบ่ม (ก) 0 วัน, (ข) 7 วัน, (ค) 14 วัน, (ง) 28 วัน และ (จ) 56 วัน

2) อิทธิพลของปริมาณเถาใยปลาล์มน้ำมันและเถาใยยางพาราต่อค่า Modulus of Elasticity

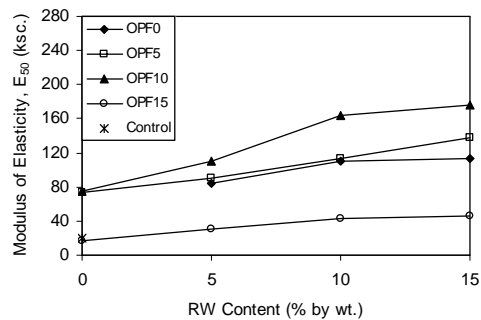
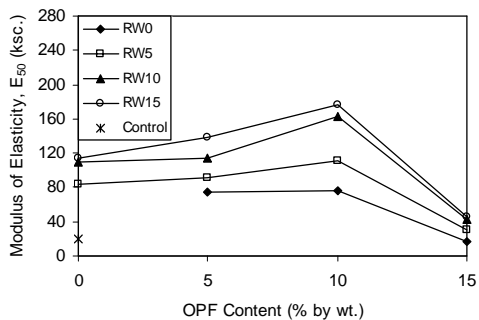
จากการทดสอบ Unconfined Compression Test พบว่าดินเหนียวปากพนังมีค่า Modulus of Elasticity ที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 22.64, 19.72, 19.98, 21.81 และ 21.65 ksc. ซึ่งค่ากำลังอัดมีแนวโน้มคงที่ กรณีของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถาใยปลาล์มน้ำมัน 10 % และเถาใยยางพารา 10 % ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยมีค่า Modulus of Elasticity ที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 98.48, 163.07, 223.64, 297.08 และ 313.12 ksc. ซึ่งค่า Modulus of Elasticity มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 0, 7, 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน ค่า Modulus of Elasticity เริ่มจะคงที่ ดังตารางที่ 3.7

จากการวิเคราะห์ค่า Modulus of Elasticity กรณีของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถาใยปลาล์มน้ำมันและเถาใยยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถาใยปลาล์มน้ำมันเป็นหลัก พบว่าการผสมเถาใยปลาล์มน้ำมันส่งผลให้ค่า Modulus of Elasticity เพิ่มขึ้นที่ปริมาณการผสมเถาใยปลาล์มน้ำมัน 5 % และให้ค่า Modulus of Elasticity สูงสุดที่ปริมาณการผสมเถาใยปลาล์มน้ำมันที่ 10 % แต่เมื่อปริมาณการผสมเถาใยปลาล์มน้ำมันที่ 15 % ส่งผลให้ค่า Modulus of Elasticity ลดลง ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่ม ดังรูปที่ 3.10 การเพิ่มขึ้นของค่า Modulus of Elasticity แสดงถึงความแข็งของวัสดุ การผสมเถาใยปลาล์มน้ำมันส่งผลให้ดินเหนียวปากพนังมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่หากผสมเถาใยปลาล์มน้ำมันมากกว่า 10 % จะส่งผลให้ความแข็งลดลง

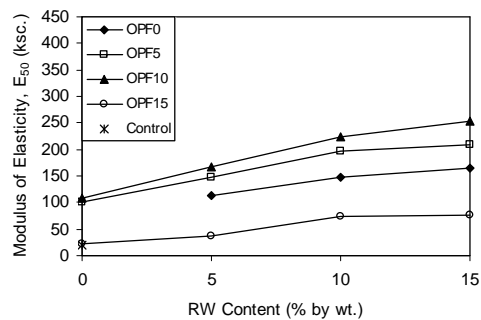
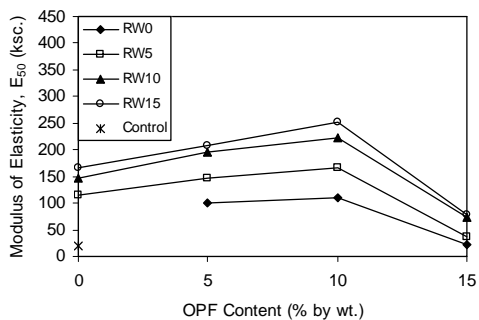
จากการวิเคราะห์ค่า Modulus of Elasticity กรณีของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถาใยปลาล์มน้ำมันและเถาใยยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถาใยยางพาราเป็นหลัก พบว่าการผสมเถาใยยางพาราส่งผลให้ค่า Modulus of Elasticity เพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณการผสมเถาใยยางพารา ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่ม ดังรูปที่ 3.10 การเพิ่มขึ้นของค่า Modulus of Elasticity แสดงถึงความแข็งของวัสดุ การผสมเถาใยยางพาราส่งผลให้ดินเหนียวปากพนังมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่หากผสมเถาใยยางพารามากกว่า 10 % จะทำให้วัสดุเปราะและส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง



(ก)

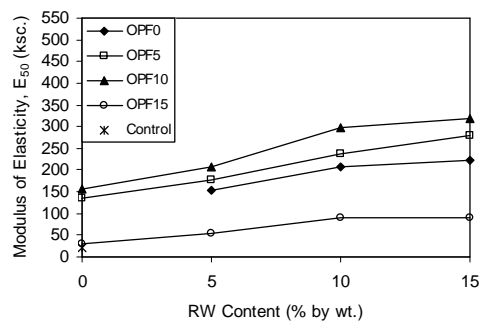
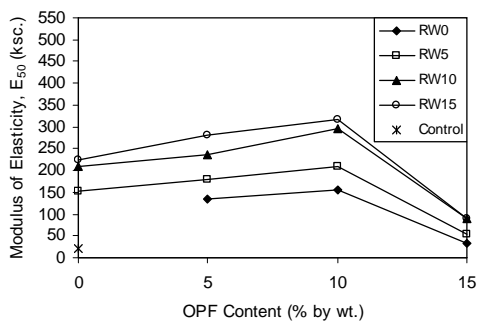


(ข)

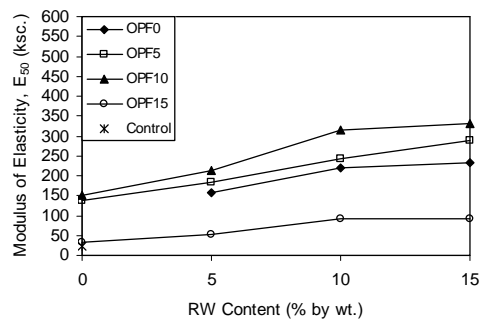
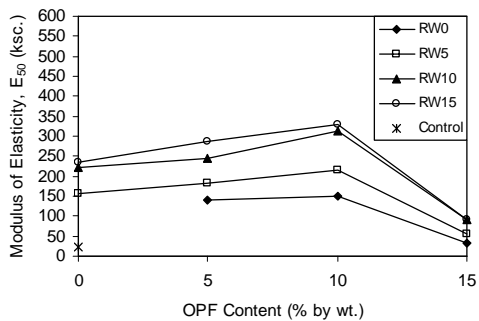


(ค)

รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity กับอัตราส่วนเนื้อโพลิเมอร์ไขมันและเนื้อใยพาราที่อายุการบ่ม (ก) 0 วัน, (ข) 7 วัน, (ค) 14 วัน, (ง) 28 วัน และ (จ) 56 วัน



(ง)



(จ)

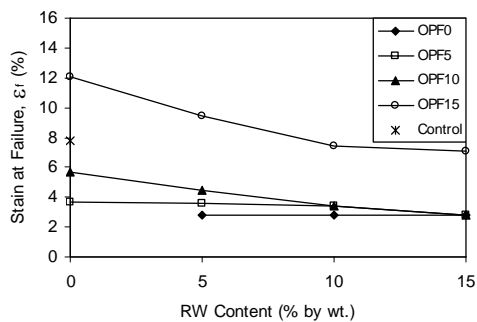
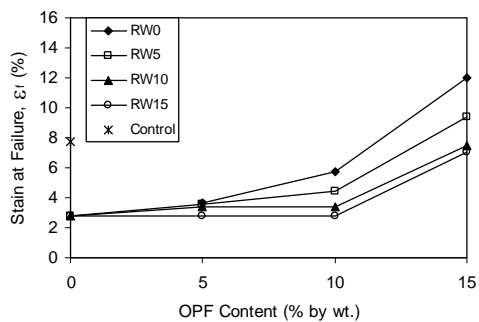
รูปที่ 3.10 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity กับอัตราส่วนเถ้าใยปาล์มน้ำมัน และเถ้าไม้ยางพาราที่อายุการบ่ม (ก) 0 วัน, (ข) 7 วัน, (ค) 14 วัน, (ง) 28 วัน และ (จ) 56 วัน

3) อิทธิพลของปริมาณเถ้ายปาล์มน้ำมันและเถ้ายปาล์มยางพาราต่อค่า Strain at Failure

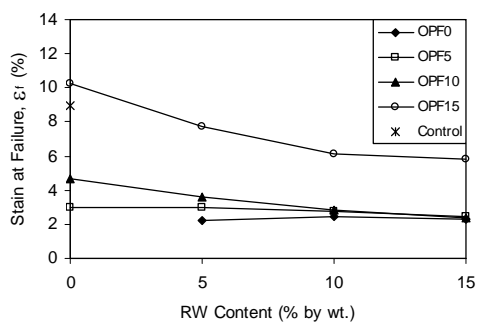
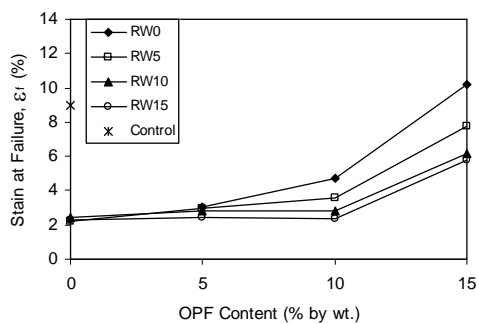
จากการทดสอบ Unconfined Compression Test พบว่าดินเหนียวปากพนังมีค่า Strain at Failure ที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 7.77, 8.96, 10.46, 9.31 และ 10.06 ksc. ซึ่งค่ากำลังอัดมีแนวโน้มคงที่ กรณีของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้ายปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้ายปาล์มยางพารา 10 % ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงสุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยมีค่า Strain at Failure ที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 3.40, 2.81, 2.49, 2.29 และ 2.23 ksc. ซึ่งค่า Strain at Failure มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 0, 7, 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน ค่า Strain at Failure เริ่มจะคงที่ ดังตารางที่ 3.7

จากการวิเคราะห์ค่า Strain at Failure กรณีของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้ายปาล์มน้ำมันและเถ้ายปาล์มยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้ายปาล์มน้ำมันเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้ายปาล์มน้ำมันส่งผลให้ค่า Strain at Failure เพิ่มขึ้นที่ทุกปริมาณการผสมเถ้ายปาล์มยางพารา ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่ม ดังรูปที่ 3.11 การเพิ่มขึ้นของค่า Strain at Failure แสดงถึงความเหนียวของวัสดุ การผสมเถ้ายปาล์มน้ำมันส่งผลให้ดินเหนียวปากพนังมีความเหนียวเพิ่มขึ้นและช่วยทำให้วัสดุไม่แข็งจนเปราะเนื่องจากการผสมเถ้ายปาล์มยางพารา

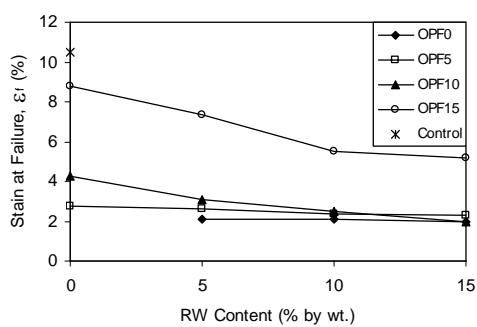
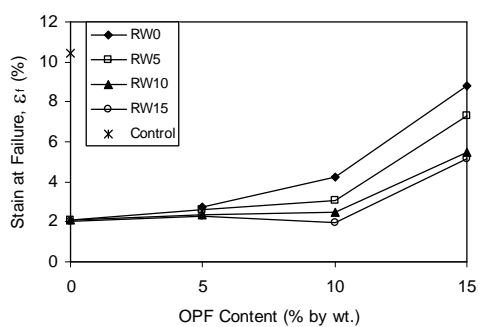
จากการวิเคราะห์ค่า Strain at Failure กรณีของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้ายปาล์มน้ำมันและเถ้ายปาล์มยางพารา เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเถ้ายปาล์มยางพาราเป็นหลัก พบว่าการผสมเถ้ายปาล์มยางพาราส่งผลให้ค่า Strain at Failure ลดลงทุกปริมาณการผสมเถ้ายปาล์มยางพารา ซึ่งมีแนวโน้มที่เหมือนกันในทุกอายุการบ่ม ดังรูปที่ 3.11 การลดลงของค่า Strain at Failure แสดงถึงความเหนียวของวัสดุ การผสมเถ้ายปาล์มยางพาราส่งผลให้ดินเหนียวปากพนังมีความเหนียวลดลง แต่เถ้ายปาล์มยางพารามีสมบัติที่ทำให้ดินเหนียวปากพนังมีความแข็งเพิ่มขึ้น



(ก)

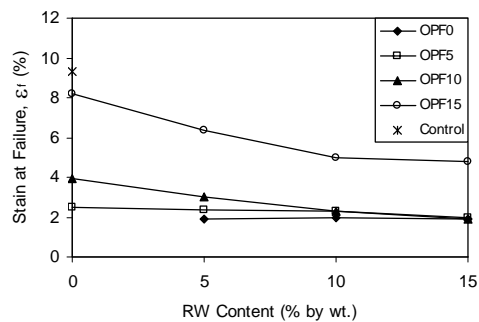
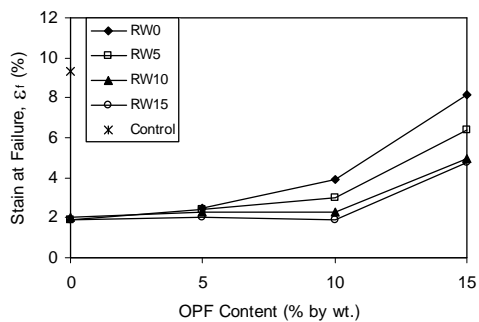


(ข)

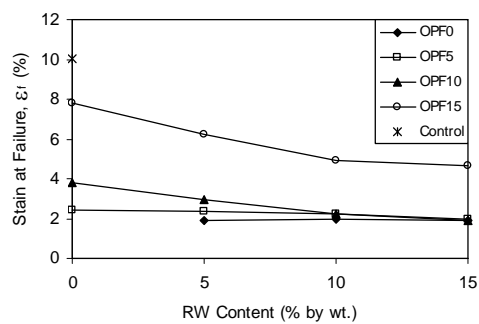
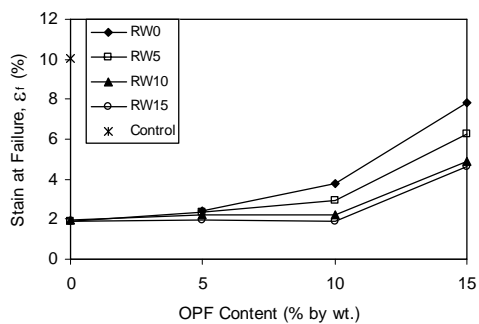


(ค)

รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Strain at Failure กับอัตราส่วนเข้าไพล่าสัมน้ำมันและเข้าไม้ยางพาราที่อายุการบ่ม (ก) 0 วัน, (ข) 7 วัน, (ค) 14 วัน, (ง) 28 วัน และ (จ) 56 วัน



(ง)

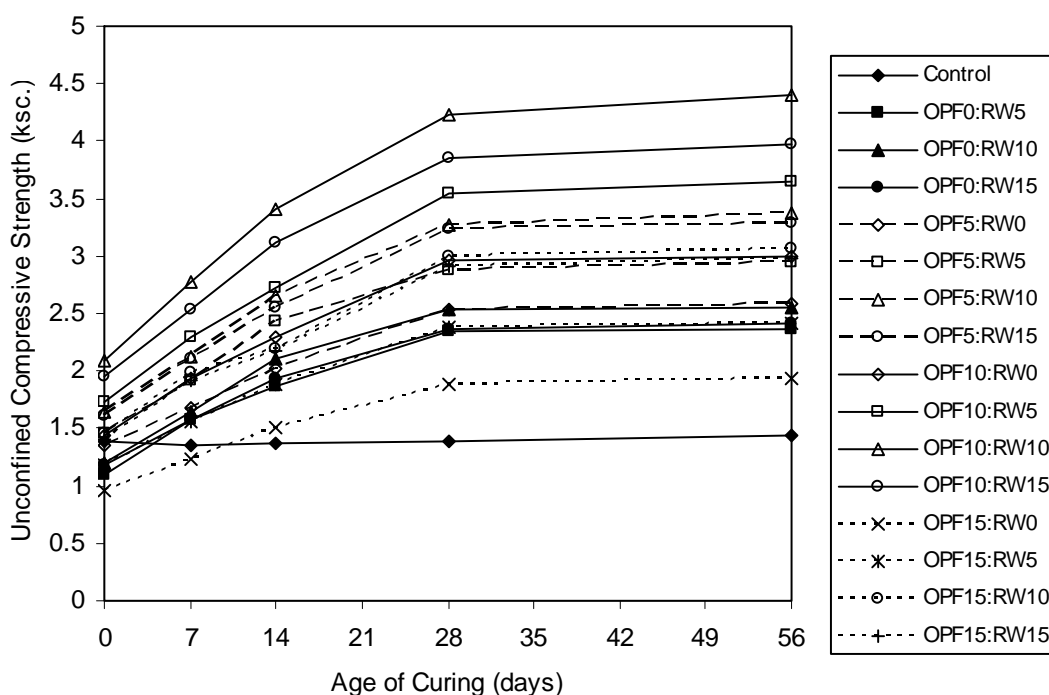


(จ)

รูปที่ 3.11 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Strain at Failure กับอัตราส่วนเนื้อโพลีเมอร์ไขมันและเนื้อไม้ขางพาราที่อายุการบ่ม (ก) 0 วัน, (ข) 7 วัน, (ค) 14 วัน, (ง) 28 วัน และ (จ) 56 วัน

4) อิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่ากำลังอัด

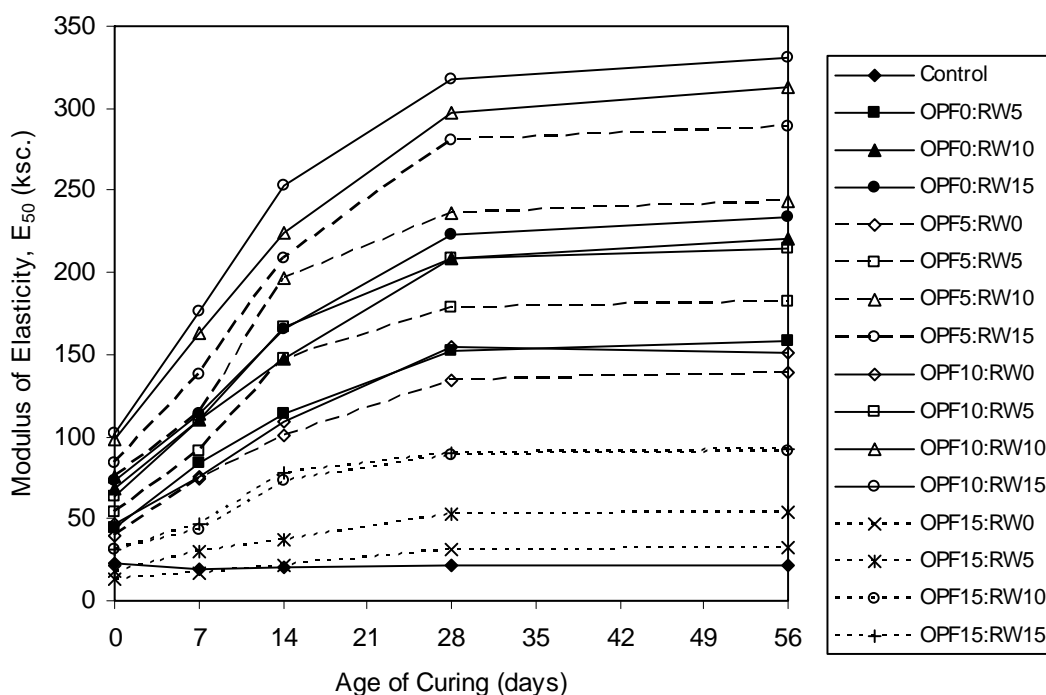
จากการทดสอบ Unconfined Compression Test พบว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่าอัตราการเพิ่มค่ากำลังอัดที่คงที่ โดยอายุการบ่มไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มค่ากำลังอัด แต่กรรมของดินเหนียวปากพั้งกรรมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเใยปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าเใยยางพารา 10 % มีอัตราการเพิ่มค่ากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยมีอัตราการเพิ่มค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 49.41, 65.72, 80.61, 100 และ 104.04 % ต่อค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ซึ่งอัตราส่วนการผสมทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 3.12 อัตราการเพิ่มค่ากำลังอัดเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของการเพิ่มกำลังอัดที่ต้องอาศัยเวลาในการเกิด



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดกับอายุการบ่มของทุกอัตราส่วน

5) อิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่า Modulus of Elasticity

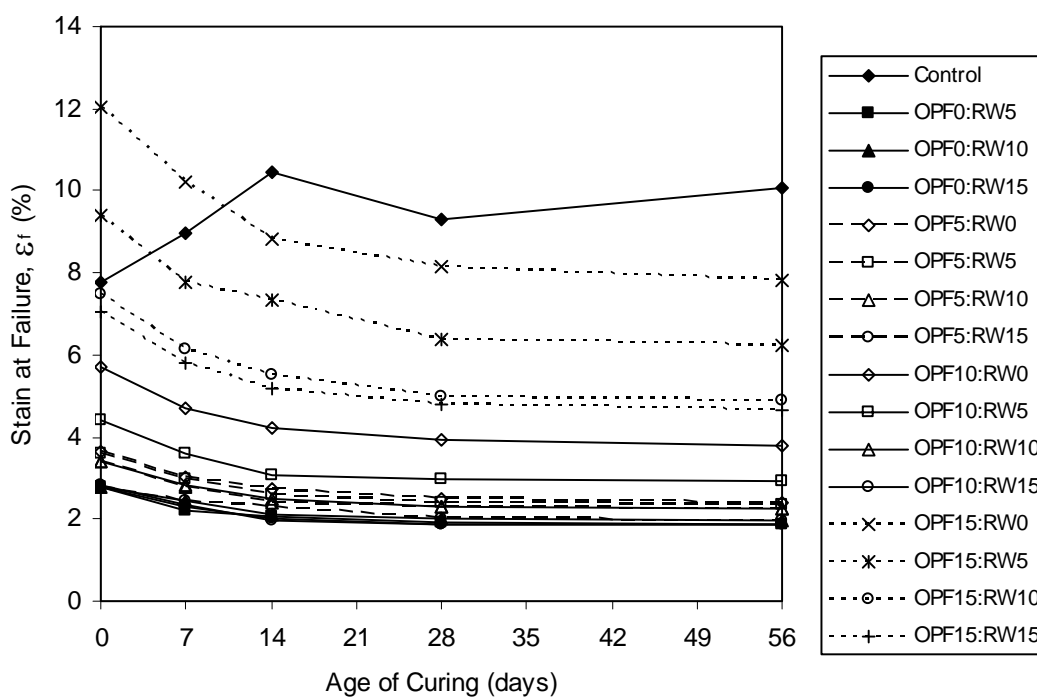
จากการทดสอบ Unconfined Compression Test พบว่าดินเหนียวปากพนังมีค่า Modulus of Elasticity คงที่ โดยอายุการบ่มไม่มีผลต่ออัตราการเพิ่มค่า Modulus of Elasticity แต่กรณีของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไผ่ปล้มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ทุกอัตราส่วนมีอัตราการเพิ่มค่าของ Modulus of Elasticity อย่างชัดเจน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 0, 7, 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน ค่า Modulus of Elasticity ค่าเริ่มจะคงที่ทุกอัตราส่วนการผสม ดังรูปที่ 3.13 จากการวิเคราะห์ค่า Modulus of Elasticity พบว่าการผสมเถ้าไม้ยางพาราในปริมาณมากจะทำให้ค่า Modulus of Elasticity สูงขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลหลักของเถ้าไม้ยางพารา



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Modulus of Elasticity กับอายุการบ่มของทุกอัตราส่วน

6) อิทธิพลของอายุการบ่มต่อค่า Strain at Failure

จากการทดสอบ Unconfined Compression Test พบว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่า Strain at Failure ไม่คงที่ตลอดอายุการบ่ม แต่กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไหลปลั่มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราทุกอัตราส่วนมีอัตราการลดลงค่าของ Strain at Failure อย่างชัดเจน มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 0, 7, 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน ค่า Strain at Failure ค่าเริ่มจะคงที่ทุกอัตราส่วนการผสม ดังรูปที่ 3.14 จากการวิเคราะห์ค่า Strain at Failure พบว่าการผสมเถ้าไหลปลั่มน้ำมันในปริมาณมากจะทำให้ค่า Strain at Failure สูงขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลหลักของเถ้าไหลปลั่มน้ำมัน



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Strain at Failure กับอายุการบ่มของทุกอัตราส่วน

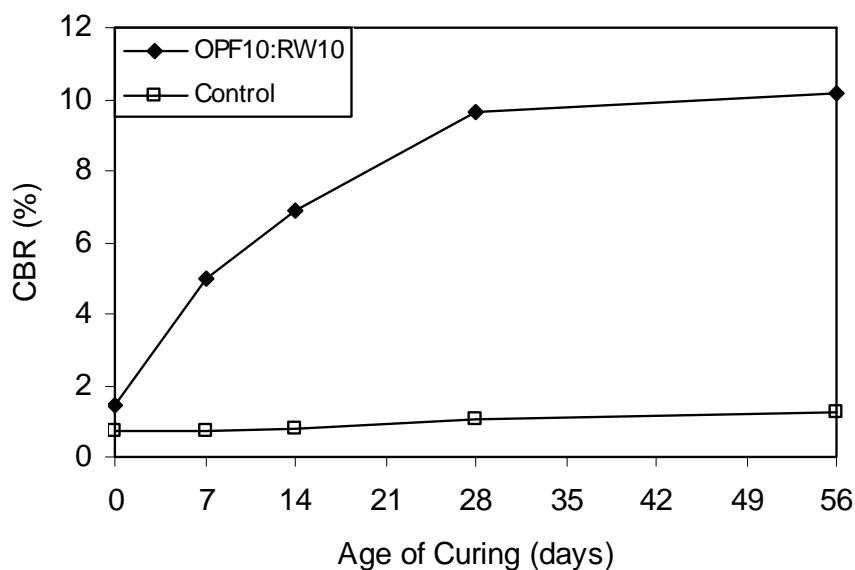
3.3.4 การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) ของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพ

จากการทดสอบ California Bearing Ratio ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดจะบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) และใช้ปริมาณน้ำที่จุด Optimum Moisture Content พบว่ากรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน จึงทำการศึกษาทางด้านกำลังรับแรงแบกทาน (Bearing Capacity) เพิ่มเติม โดยจากการทดสอบ California Bearing Ratio พบว่าดินเหนียวปากพั้งมีค่า CBR ที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 0.69, 0.75, 0.81, 1.04 และ 1.24 ksc. ซึ่งค่ากำลังอัดมีแนวโน้มคงที่ กรณีของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน โดยมีค่า CBR ที่อายุการบ่ม 0, 7, 14, 28 และ 56 วัน เท่ากับ 1.45, 5.01, 6.89, 9.66 และ 10.18 ksc. ดังตารางที่ 3.8 ซึ่งค่ากำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุการบ่ม 0, 7, 14 และ 28 วัน โดยที่อายุการบ่มที่ 56 วัน ค่ากำลังอัดเริ่มจะคงที่และผลการทดสอบ California Bearing Ratio รูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบ California Bearing Ratio ของดินเหนียวปากพั้งและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 %

| สัญลักษณ์ | Age of Curing (days) | Total Unit Weight (kg/m ³) | CBR | Water Content (%) |
|------------|-------------------------|---|-------|----------------------|
| Control | 0 | 1875 | 0.69 | 22.04 |
| | 7 | 1862 | 0.75 | 21.24 |
| | 14 | 1859 | 0.81 | 20.87 |
| | 28 | 1850 | 1.04 | 20.15 |
| | 56 | 1843 | 1.24 | 19.21 |
| OPF10:RW10 | 0 | 1852 | 1.45 | 23.53 |
| | 7 | 1846 | 5.01 | 23.01 |
| | 14 | 1836 | 6.89 | 22.42 |
| | 28 | 1830 | 9.66 | 22.08 |
| | 56 | 1831 | 10.18 | 21.03 |

การก่อสร้างถนนในบริเวณ อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช จะต้องทำการลอกดินเดิมออกแล้วนำวัสดุจากแหล่งอื่นมาใช้งาน เนื่องจากดินเดิมมีค่า CBR ต่ำมากและค่า Plastic Index สูง จึงทำให้การบดอัดยาก เมื่อมีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ส่งผลให้มีค่า CBR สูงขึ้นและค่า Plastic Index ต่ำลง ส่งผลให้การบดอัดโครงสร้างถนนดีขึ้น จากผลการพิจารณาค่า CBR กรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % พบว่ามีความสามารถที่ใช้ในงานทางเป็น วัสดุชั้นคันทาง (Subgrade) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงสมบัติของดินเดิมในระดับดิน โดยไม่ต้องนำวัสดุจากแหล่งอื่นมาใช้งาน ซึ่งมีประโยชน์หลายประการเนื่องจากวัสดุที่นำมาปรับปรุงเป็นวัสดุในท้องถิ่น ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและสามารถผสมในสนาม



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับอายุการบ่มของดินเหนียวปากพนังและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 %

3.3.5 การทดสอบ Consolidation Test ของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพ

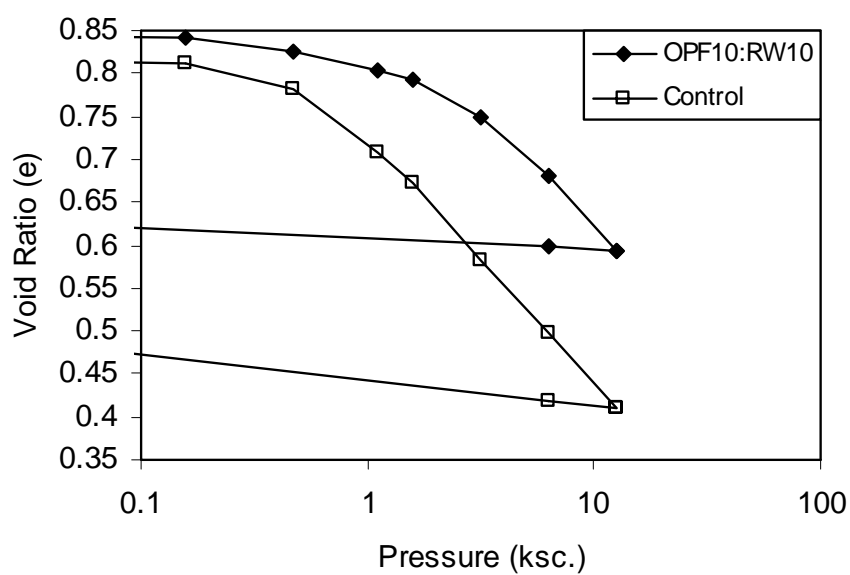
การทดสอบการทดสอบ Consolidation Test เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าคงตัวของ การอัดตัวได้ (Compressibility Parameter) ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดใช้พลังงานในการบดอัดแบบ มาตรฐาน (Standard Proctor) และใช้ปริมาณน้ำที่จุด Optimum Moisture Content ของดิน เหนียวปากพนังและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเิปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าเิป่าขางพารา 10 % ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดจะบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ซึ่งค่าคงตัว ของการอัดตัวได้ สามารถนำมาวิเคราะห์ระยะเวลาและการทรุดตัว ซึ่งผลการทดสอบ ดังตารางที่ 3.9

การทดสอบการทดสอบ Consolidation Test ค่าความดันการทดสอบมีค่า ระหว่าง 0.158 - 12.631 ksc. ดินเหนียวปากพนังมีค่า Void Ratio ระหว่าง 0.830 - 0.410 กรณีที่ ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเิปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าเิป่าขางพารา 10 % มีค่า Void Ratio ระหว่าง 0.853 - 0.593 เนื่องจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเถ้าเิปาล์มน้ำมันและเถ้าเิป่า ขางพาราพบว่ามึรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป การปรับปรุงด้วยเถ้าเิปาล์มน้ำมันและเถ้าเิป่าขางพารา ส่งผลให้ค่า Preconsolidation Pressure สูงขึ้นอย่างชัดเจนเท่ากับ 2.900 ksc. จากกรณีของดิน เหนียวปากพนังมีค่า Preconsolidation Pressure เท่ากับ 0.700 ksc. การปรับปรุงด้วยเถ้าเิปาล์ม น้ำมันและเถ้าเิป่าขางพารามีค่า Compression Index เท่ากับ 0.296 สูงกว่าของดินเหนียวปากพนัง เล็กน้อย ส่วนค่า Recompression Index มีค่าลดลงอย่างชัดเจนเท่ากับ 0.013 จากเดิมกรณีของดิน เหนียวปากพนังเท่ากับ 0.027

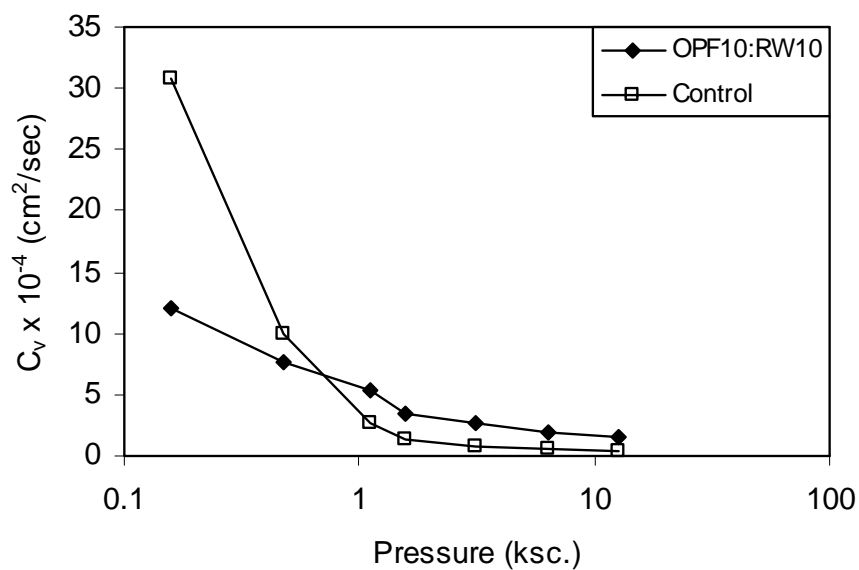
จากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration ทำให้เกิด การเชื่อมประสานระหว่างเม็ดดินส่งผลให้อนุภาคดินจับตัวกันเป็นก้อน โดยพบว่าค่า Coefficient of Consolidation และค่า Coefficient of Permeability มีค่าลดลง ดังรูปที่ 3.16, 4.17 และ 4.18 การปรับปรุงด้วยเถ้าเิปาล์มน้ำมันและเถ้าเิป่าขางพาราทำให้การอัดตัวแบบคายน้ำลดลง ซึ่งจะ ช่วยลดอัตราการทรุดตัว

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบ Consolidation Test ของดินเหนียวปากพนังและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไพลล์น้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 %

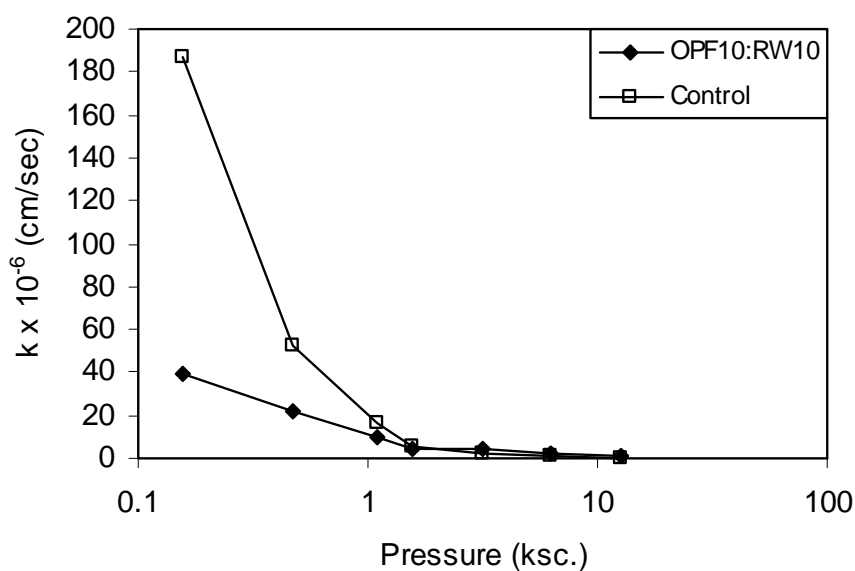
| Compressibility Parameter | Control | OPF10:RW10 |
|------------------------------|---|---|
| Pressure (ksc.) | 0.158 - 12.631 | 0.158 - 12.631 |
| Void Ratio | 0.830 - 0.410 | 0.853 - 0.593 |
| k (cm/sec) | 1.874×10^{-4} - 3.423×10^{-7} | 3.964×10^{-5} - 1.203×10^{-6} |
| C_v (cm ² /sec) | 3.071×10^{-3} - 4.600×10^{-5} | 1.195×10^{-3} - 1.580×10^{-4} |
| P_c (ksc.) | 0.700 | 2.900 |
| C_c | 0.290 | 0.296 |
| C_r | 0.027 | 0.013 |



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Void Ratio กับ Pressure ของดินเหนียวปากพนังและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไพลล์น้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 %



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Coefficient of Consolidation กับ Pressure ของดินเหนียวปากพั้งและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเิปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าเ้าไม้ยางพารา 10 %



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Coefficient of Permeability กับ Pressure ของดินเหนียวปากพั้งและกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเิปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าเ้าไม้ยางพารา 10 %

3.3.6 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธี X - Ray Diffraction โดยวิเคราะห์เฉพาะกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไพล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ที่อายุบ่ม 28 วัน เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) ที่เกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration โดยจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ไม่พบการเกิด CSH และ CAH ในทุกอัตราส่วนการผสม โดยมักพบ Quartz, Muscovite, Kaolinite และ Montmorillonite เป็นหลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบแร่ที่มักพบในดิน ดังตารางที่ 3.10 และการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธี X - Ray Diffraction ดังรูปที่ 3.19, 3.20 และ 3.21 เนื่องจากดินปากพนังเกิดจากตะกอนดินบริเวณใกล้ทะเลและมีปริมาณ Chloride, Organic Matter และ Sulphate ปนอยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งส่งผลให้เกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration ซ้ำกว่าปกติและปฏิกิริยาอาจเกิดไม่สมบูรณ์ โดยส่งผลให้กำลังอัดพัฒนาไม่เต็มที่

การพัฒนากำลังอัดในช่วงแรกหรือก่อนช่วงอายุการบ่มที่ 28 วัน เกิดจากน้ำในดินทำปฏิกิริยากับ CaO ที่อุณหภูมิห้องเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำให้ได้สารประกอบที่สมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration

จากการทดสอบ Unconfined Compression Test พบว่ากรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไพล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดสูงสุดและมีอัตราการพัฒนากำลังอัดอย่างชัดเจน จึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 56 วัน โดยจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ไม่พบการเกิด CSH และ CAH ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 โดยมักพบ Quartz, Muscovite, Kaolinite และ Montmorillonite เป็นหลัก ซึ่งเป็นองค์ประกอบแร่ที่มักพบในดิน ในช่วงอายุการบ่ม 7 และ 14 วัน เป็นช่วงที่เกิดสารประกอบ Calcium Hydroxide เป็นหลัก สำหรับอายุการบ่มที่ 28 วัน สารประกอบ Calcium Hydroxide เริ่มทำปฏิกิริยากับ Al_2O_3 และ SiO_2 จึงตรวจพบสารประกอบที่อยู่ในรูปของ Muscovite และ Montmorillonite จึงไม่พบสารประกอบ CSH และ CAH ได้

การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ที่อายุการบ่ม 56 วัน พบสารประกอบ CSH แต่ไม่พบสารประกอบ CAH เนื่องจากในดินเหนียวปากพนังและเถ้าไพล์มน้ำมันมีปริมาณ Al_2O_3 ต่ำ โดยการเกิด CSH ล่าช้าซึ่งพบในอายุการบ่มที่ 56 วัน ปริมาณการเกิด CSH เท่ากับ 42.64 % โดยทั่วไปมักพบการเกิด CSH ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับ เกษมและโกศล (2544) ได้ศึกษาผลกระทบของ Organic Matter โดยได้ทดลองนำดินอ่อนกรุงเทพฯ ที่มี Organic Matter

ปริมาณ 4 ถึง 22 % ผสมปูนซีเมนต์ 150 kg/m³ พบว่าส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าลดลงเฉลี่ย 43.9 % และ Sherwood (1958) กล่าวว่า การปนเปื้อนของ Organic Matter สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration ดังตารางที่ 3.11 และการวิเคราะห์องค์ประกอบแร่โดยวิธี X - Ray Diffraction ดังรูปที่ 3.22

Terrel et al. (1979) กล่าวถึงผลของ Organic Matter พบว่า Organic จะดูดซับ Calcium Ions จากปฏิกิริยา Hydration เป็นผลให้ pH ลดลงและยังไปยับยั้งกระบวนการแข็งตัว

ตารางที่ 3.10 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเียงปาล์ม น้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุการบ่ม 28 วัน

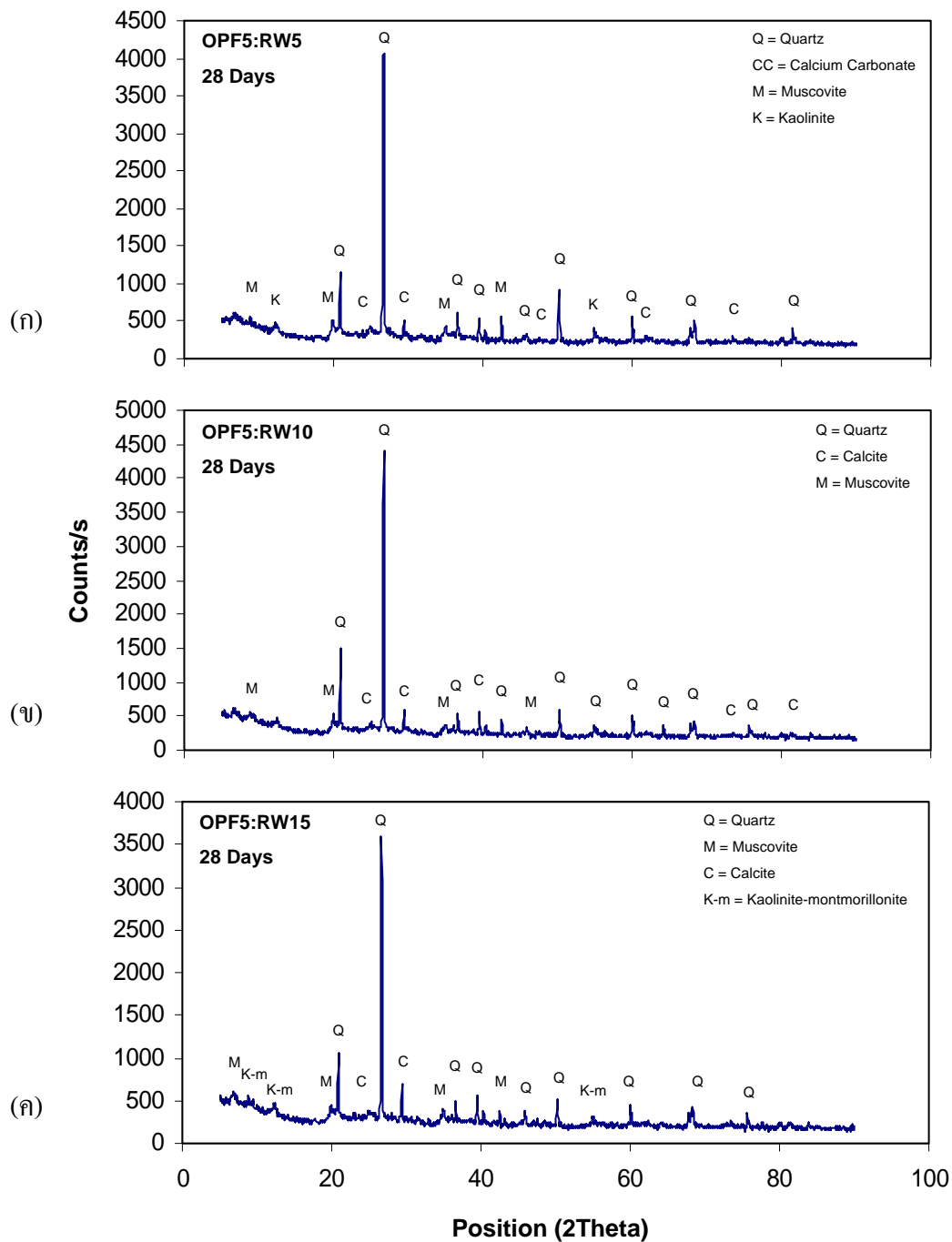
| สัญลักษณ์ | องค์ประกอบแร่ | ปริมาณ (%) |
|-----------|-----------------------------|------------|
| OPF5:RW5 | Quartz | 48.03 |
| | Muscovite | 31.63 |
| | Kaolinite | 14.43 |
| | Calcium Carbonate | 5.91 |
| OPF5:RW10 | Quartz | 44.42 |
| | Muscovite | 32.43 |
| | Kaolinite | 16.76 |
| | Calcite | 6.39 |
| OPF5:RW15 | Quartz | 46.74 |
| | Muscovite | 31.76 |
| | Kaolinite - montmorillonite | 12.68 |
| | Calcite | 8.82 |

ตารางที่ 3.10 (ต่อ) องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเียง
ปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพาราที่อายุการบ่ม 28 วัน

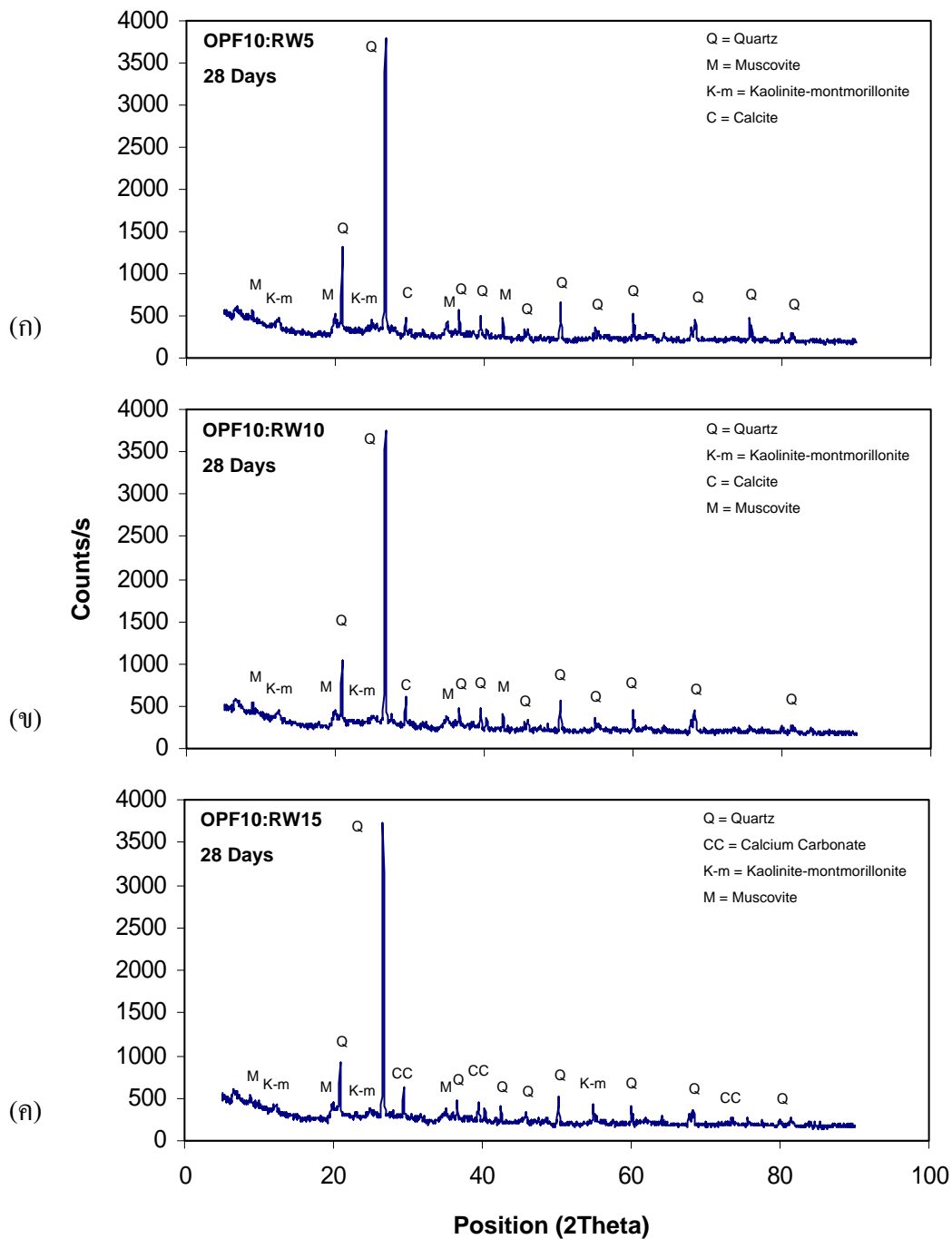
| สัญลักษณ์ | องค์ประกอบแร่ | ปริมาณ (%) |
|------------|-----------------------------|------------|
| OPF10:RW5 | Quartz | 49.86 |
| | Muscovite | 31.22 |
| | Calcite | 5.47 |
| | Kaolinite - montmorillonite | 3.45 |
| OPF10:RW10 | Quartz | 42.68 |
| | Muscovite | 38.71 |
| | Kaolinite - montmorillonite | 12.54 |
| | Calcite | 6.07 |
| OPF10:RW15 | Quartz | 40.48 |
| | Muscovite | 37.90 |
| | Kaolinite - montmorillonite | 14.53 |
| | Calcium Carbonate | 7.09 |
| OPF15:RW5 | Quartz | 44.40 |
| | Muscovite | 37.26 |
| | Kaolinite | 16.17 |
| | Calcite | 4.17 |
| OPF15:RW10 | Quartz | 49.16 |
| | Muscovite | 34.62 |
| | Kaolinite | 12.22 |
| | Calcium Carbonate | 4.00 |
| OPF15:RW15 | Quartz | 42.59 |
| | Illite | 38.30 |
| | Kaolinite - montmorillonite | 12.83 |
| | Calcite | 6.28 |

ตารางที่ 3.11 องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเียงปาล์ม น้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28 และ 56 วัน

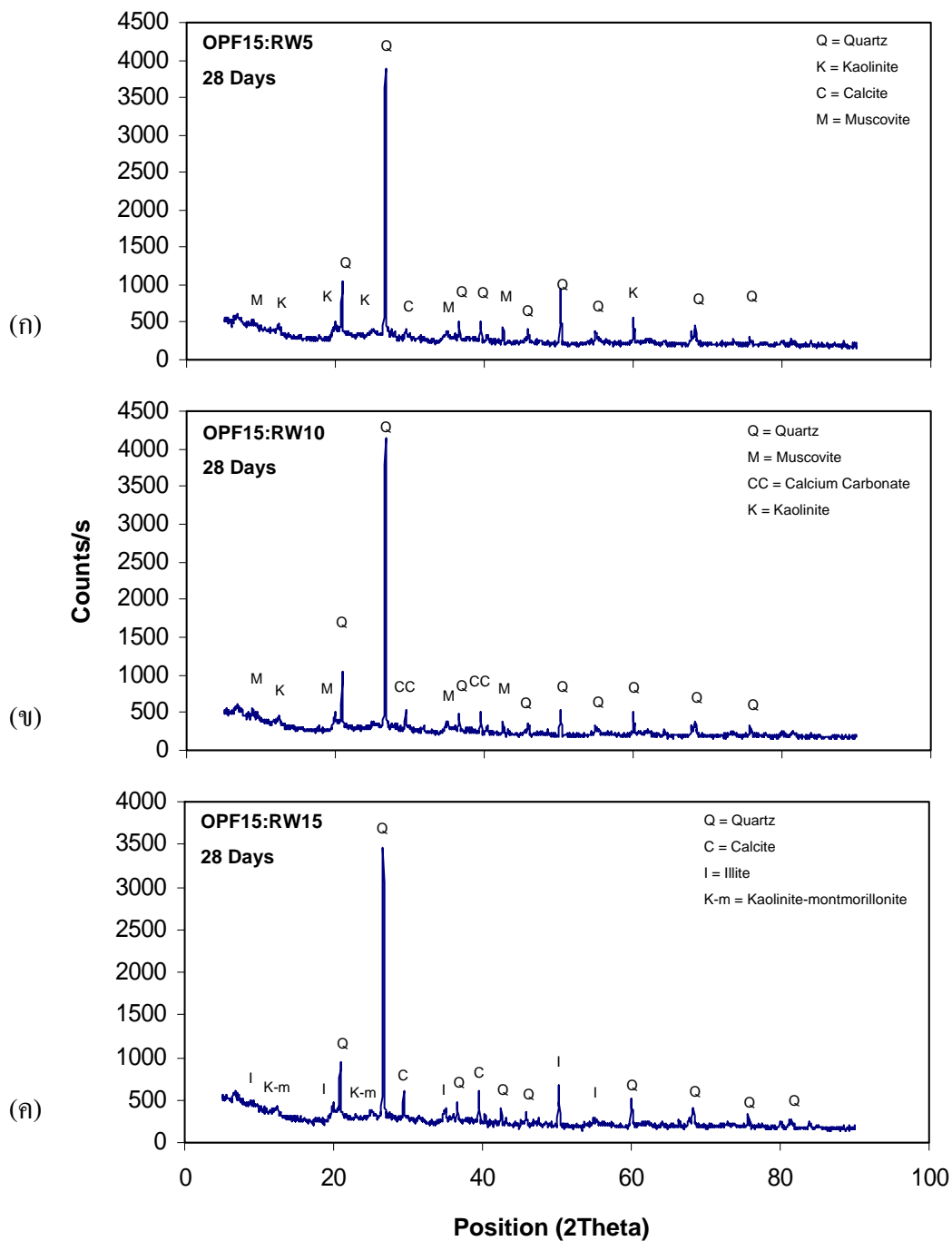
| Age of Curing (days) | องค์ประกอบแร่ | ปริมาณ (%) |
|-------------------------|-----------------------------|------------|
| 7 | Quartz | 63.29 |
| | Kaolinite | 17.46 |
| | Montmorillonite | 10.56 |
| | Calcite | 8.69 |
| 14 | Quartz | 44.91 |
| | Muscovite | 35.96 |
| | Kaolinite | 14.07 |
| | Calcium Carbonate | 5.06 |
| 28 | Quartz | 42.68 |
| | Muscovite | 38.71 |
| | Kaolinite - montmorillonite | 12.54 |
| | Calcite | 6.07 |
| 56 | Quartz | 48.21 |
| | Calcium Silicate Hydrate | 42.64 |
| | Calcite | 9.15 |



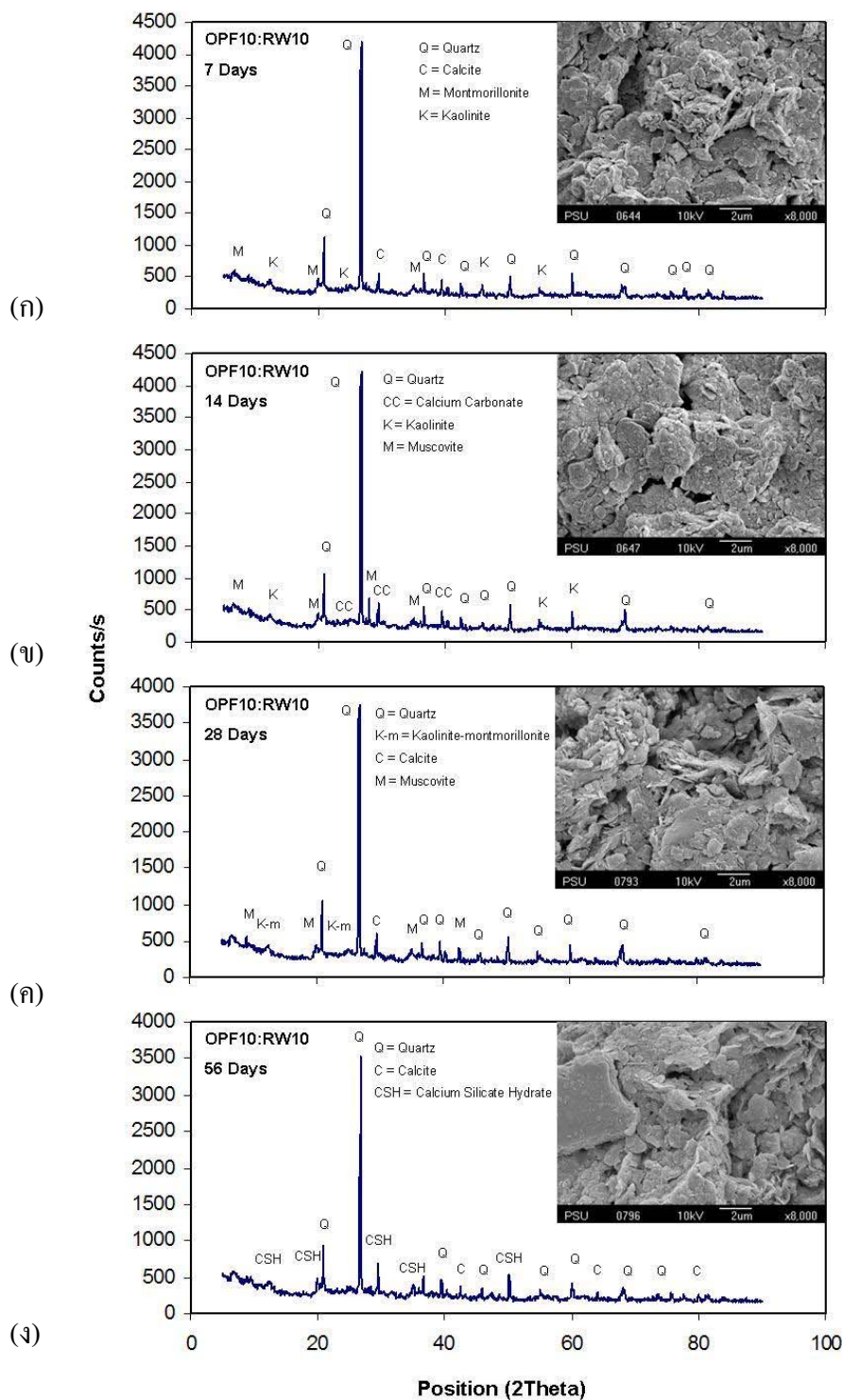
รูปที่ 3.19 การวิเคราะห์องค์ประกอบแร่ของดินเหนียวปากบั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปาล์ม น้ำมัน และเถ้าไม้ยางพารา ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) OPF5:RW5 (ข) OPF5:RW10 (ค) OPF5:RW15



รูปที่ 3.20 การวิเคราะห์ห้องค้ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไย
 ปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) OPF10:RW5 (ข) OPF10:RW10 (ค)
 OPF10:RW15



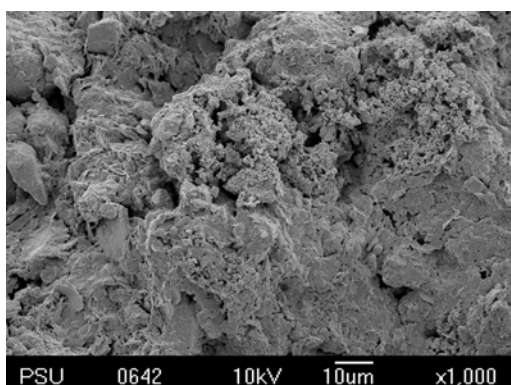
รูปที่ 3.21 การวิเคราะห์ห้องค้ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไย
 ปาล์มน้ำมันและเถ้าไม้ยางพารา ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) OPF15:RW5 (ข) OPF15:RW10 (ค)
 OPF15:RW15



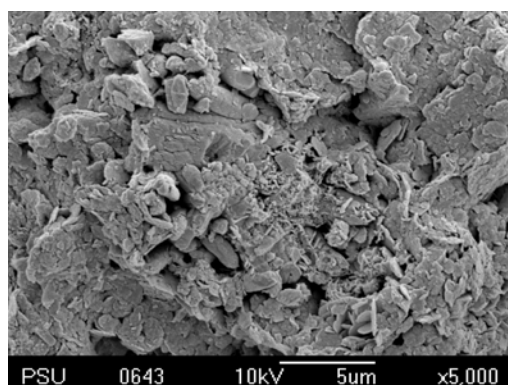
รูปที่ 3.22 การวิเคราะห์ห้องค้ประกอบแร่ของดินเหนียวปากพนังกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเิปาล์มน้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ที่อายุการบ่ม (ก) 7 วัน, (ข) 14 วัน, (ค) 28 วัน และ (ง) 56 วัน

3.3.7 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปากพั้งกรณีปรับปรุงคุณภาพ

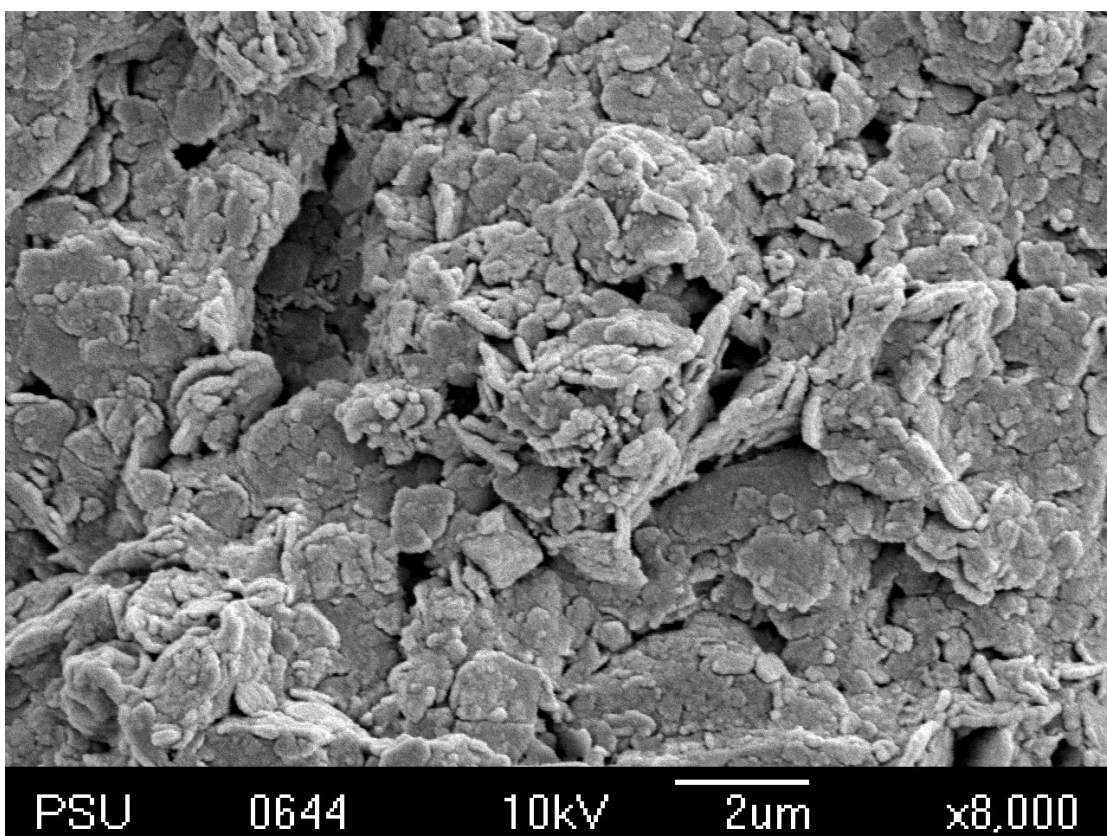
จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเถ้าเฝ้าน้ำมันโดยภาพถ่ายจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยศึกษาเฉพาะกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าเฝ้าน้ำมัน 10 % และเถ้าเฝ้ายางพารา 10 % ที่อายุการบ่ม 7 วัน โครงสร้างของดินเดิมมีลักษณะเป็นแผ่นจับกันหลวม ซึ่งประกอบไปด้วยแร่ Quartz, Muscovite, Kaolinite และ Montmorillonite ซึ่งเป็นแร่หลักของดิน การที่ดินมีโครงสร้างที่จับกันหลวมจะทำให้ความสามารถในการรับแรงนั้นต่ำ ดังรูปที่ 3.23 ที่อายุการบ่ม 14 วัน โครงสร้างดินลักษณะหนาแน่นขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 3.24 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดินมีโครงสร้างที่ยึดแน่นและช่วยเพิ่มกำลังอัด ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา Pozzolanic Reaction และปฏิกิริยา Cement Hydration ดังรูปที่ 3.25 ที่อายุการบ่ม 56 วัน ดินมีโครงสร้างที่ยึดแน่นอย่างชัดเจนและพบการเกิดแร่ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ขึ้นบางส่วน ดังรูปที่ 3.26



(ก)

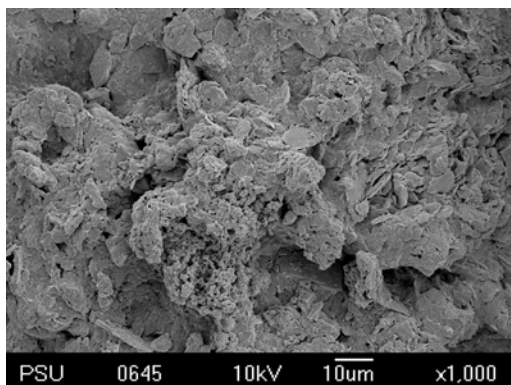


(ข)

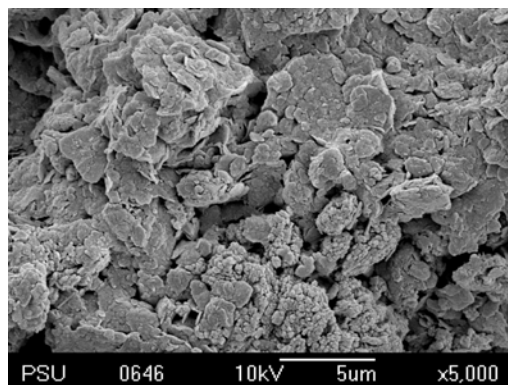


(ค)

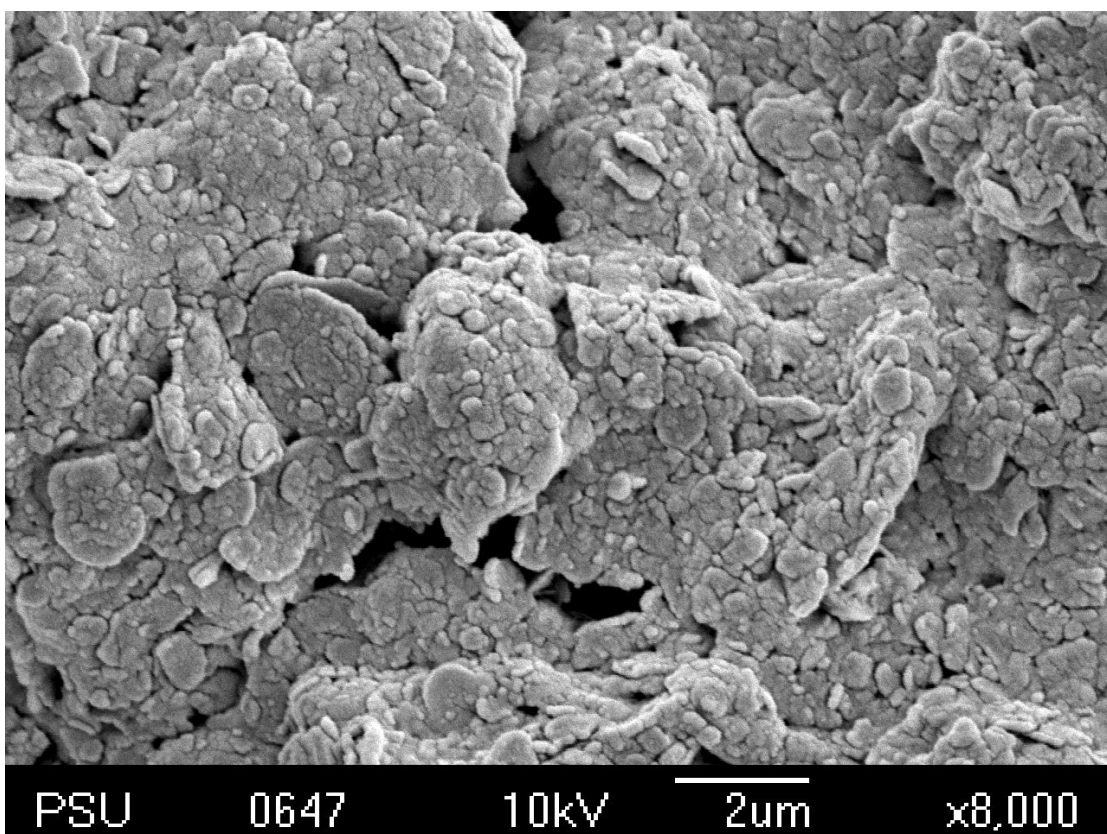
รูปที่ 3.23 โครงสร้างจุลภาคของของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไยปลาล์ม น้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(ก)

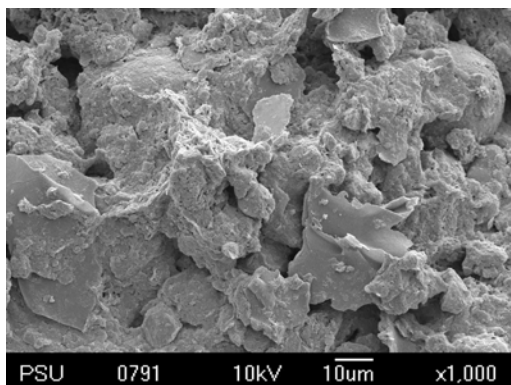


(ข)

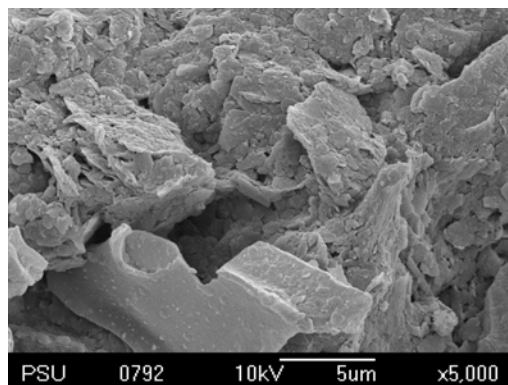


(ค)

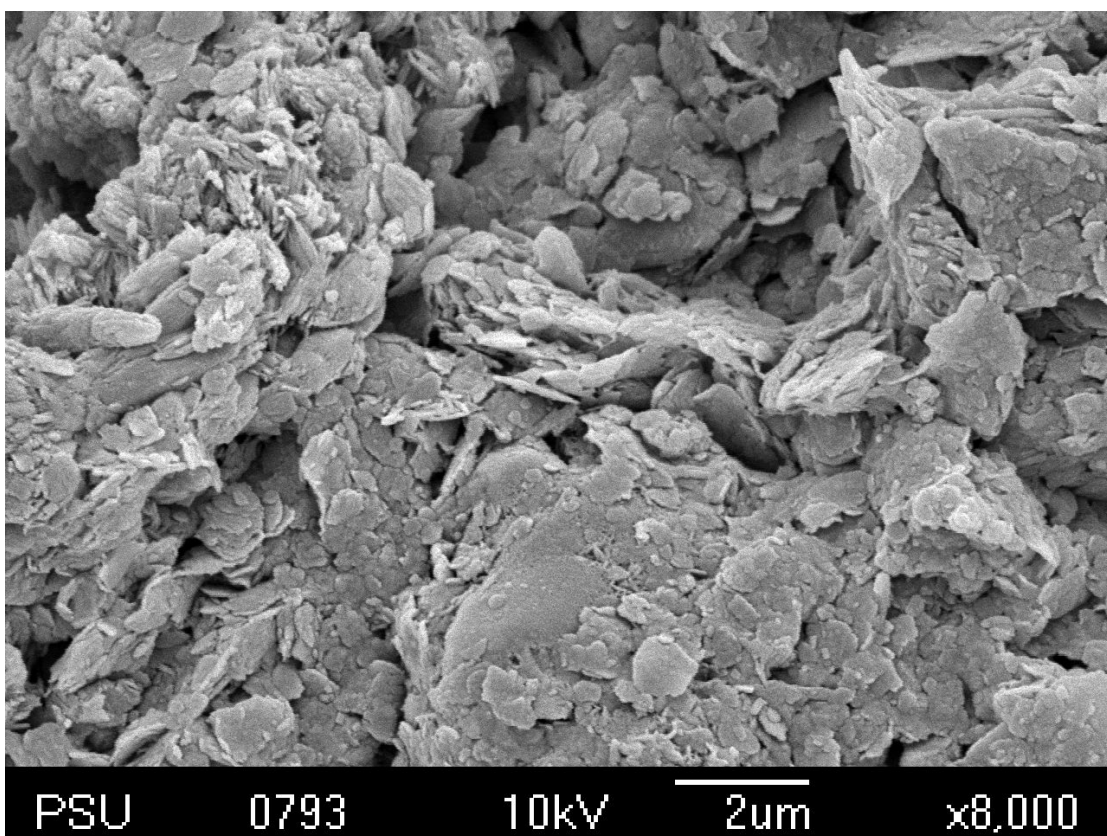
รูปที่ 3.24 โครงสร้างจุลภาคของของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไฮปาล์ม น้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ที่อายุการบ่ม 14 วัน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(ก)

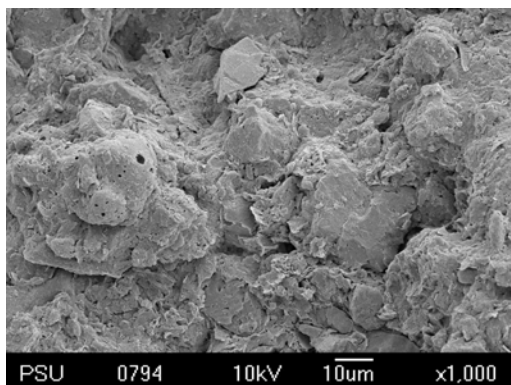


(ข)

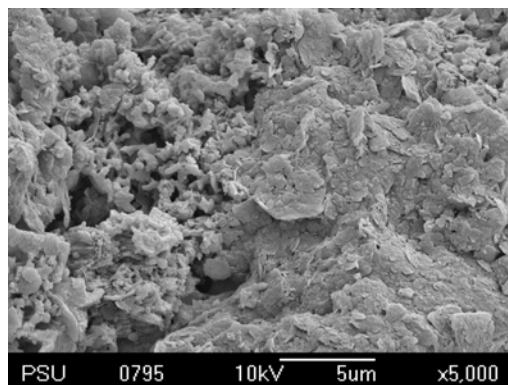


(ค)

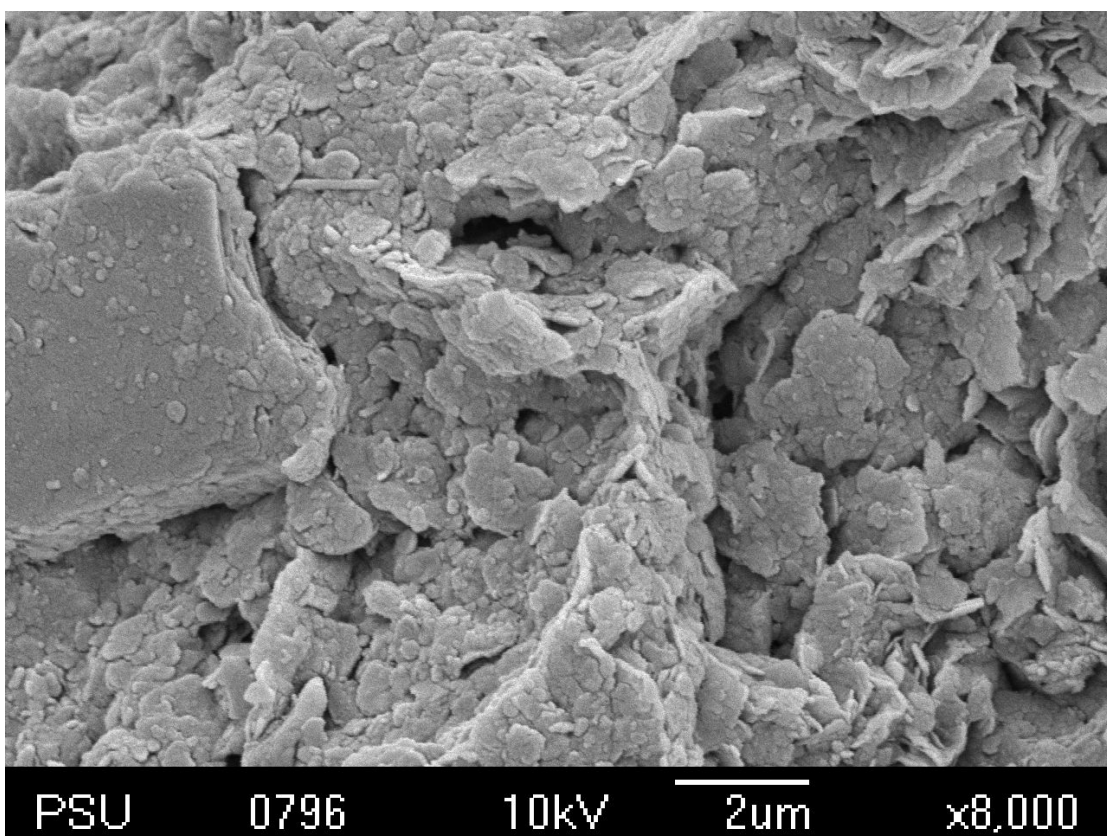
รูปที่ 3.25 โครงสร้างจุลภาคของของดินเหนียวปากพั้งกรณีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยถ้ำไฮปาล์ม น้ำมัน 10 % และถ้ำไม้ยางพารา 10 % ที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.26 โครงสร้างจุลภาคของดินเหนียวปากพนังกรณีปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าไผ่ปาล์ม น้ำมัน 10 % และเถ้าไม้ยางพารา 10 % ที่อายุการบ่ม 56 วัน (ก) กำลังขยาย 1,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า (ค) กำลังขยาย 5,000 เท่า

3.3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยสหสัมพันธ์ของตัวแปร กำลังอัดแกนเดียวในรูปสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Variable Regression)

การวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสมบัติทางวิศวกรรมจากการทดสอบ Unconfined Compression Test ด้วยสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Variable Regression) เพื่อสร้างสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปร การวิเคราะห์ใช้โปรแกรม SPSS 16.0 (Statistical Package for Social Science) ซึ่งค่าความน่าเชื่อถือของสมการถดถอยแสดงในรูปของค่า Multiple Coefficient of Determination (R^2) โดยค่าของตัวแปรประกอบด้วย

- 1) Unconfined Compressive Strength (ksc.), UCS
- 2) Modulus of Elasticity (ksc.), E_{50}
- 3) Strain at Failure (%), ϵ_f
- 4) Total Unit Weight (kg/m^3), γ_t
- 5) Water Content (%), ω
- 6) Age of Curing (days), T
- 7) ปริมาณของเถ้าใยปาล์มน้ำมัน (% by wt.), OPF
- 8) ปริมาณของเถ้าไม้ยางพารา (% by wt.), RW

สำหรับการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรทำการจำแนกค่า R^2 แนะนำโดย Draper and Smith (1966)

| | | | |
|-------|---|-------------|--------------------------|
| R^2 | < | 0.25 | มีความสัมพันธ์กันน้อย |
| R^2 | = | 0.25 - 0.55 | มีความสัมพันธ์กันปานกลาง |
| R^2 | = | 0.55 - 0.80 | มีความสัมพันธ์กันดี |
| R^2 | > | 0.80 | มีความสัมพันธ์กันดีมาก |

จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยรวมทุกอัตราส่วน การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กันปานกลางจนถึงดีมาก ค่า R^2 0.503 - 0.910 ดังตารางที่ 3.12 ความสัมพันธ์ของค่า E_{50} กับค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กันปานกลางจนถึงดีมาก ค่า R^2 0.469 - 0.893 ดังตารางที่ 3.13 และความสัมพันธ์ของค่า ϵ_f กับค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กันปานกลางจนถึงดี ค่า R^2 0.415 - 0.681 ดังตารางที่ 3.14 ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าต่างๆ มีความน่าเชื่อถือมากที่สุดส่วนความสัมพันธ์ของค่า ϵ_f กับค่าต่างๆ มีความน่าเชื่อถือน้อยที่สุด

ตารางที่ 3.12 ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน)

| Equation Model | Regression Equation | R ² |
|----------------|---|----------------|
| Linear | $UCS=1.224+0.023OPF+0.046RW+0.025T$ | 0.510 |
| Linear | $UCS=1.1974+0.023OPF+0.046RW+0.025T+1.412E-5\gamma_t$ | 0.503 |
| Linear | $UCS=0.818+0.049OPF-0.011RW+0.009T+0.008E_{50}$ | 0.900 |
| Linear | $UCS=2.116+0.059OPF+0.005RW+0.021T-0.184\epsilon_f$ | 0.718 |
| Linear | $UCS=18.671+0.076OPF+0.115RW-0.008T-0.759\omega$ | 0.583 |
| Linear | $UCS=-0.960+0.050OPF-0.009RW+0.009T+0.001\gamma_t+0.008E_{50}$ | 0.899 |
| Linear | $UCS=10.778+0.054OPF-0.005RW+0.018T-0.005\gamma_t-0.190\epsilon_f$ | 0.721 |
| Linear | $UCS=12.284+0.084OPF+0.128RW-0.008T+0.004\gamma_t-0.808\omega$ | 0.583 |
| Linear | $UCS=1.073+0.055OPF-0.015RW+0.009T+0.007E_{50}-0.043\epsilon_f$ | 0.905 |
| Linear | $UCS=6.040+0.064OPF-0.012RW+0.000T+0.008E_{50}-0.227\omega$ | 0.905 |
| Linear | $UCS=13.901+0.092OPF+0.056RW-0.001T-0.167\epsilon_f-0.516\omega$ | 0.750 |
| Linear | $UCS=1.493+0.054OPF-0.015RW+0.009T+0.000\gamma_t+0.007E_{50}-0.044\epsilon_f$ | 0.904 |
| Linear | $UCS=2.642+0.068OPF-0.019RW+0.000T+0.002\gamma_t+0.008E_{50}-0.255\omega$ | 0.905 |
| Linear | $UCS=4.668+0.071OPF-0.012RW+0.000T+0.001\gamma_t+0.007E_{50}-0.041\epsilon_f-0.238\omega$ | 0.910 |

ตารางที่ 3.13 ความสัมพันธ์ของค่า E_{50} กับค่าต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน)

| Equation Model | Regression Equation | R^2 |
|----------------|--|-------|
| Linear | $E_{50}=50.328-3.183OPF+7.116RW+2.017T$ | 0.476 |
| Linear | $E_{50}=267.418-3.332OPF+6.878RW+1.946T-0.116\gamma_t$ | 0.469 |
| Linear | $E_{50}=-70.773-5.495OPF-2.563RW-0.440T+98.952UCS$ | 0.893 |
| Linear | $E_{50}=145.321+0.609OPF+2.794RW+1.598T-19.511\epsilon_f$ | 0.680 |
| Linear | $E_{50}=1638.834+1.594OPF-13.387RW-1.006T-69.142\omega$ | 0.526 |
| Linear | $E_{50}=148.939-5.646OPF+2.323RW-0.512T-0.117\gamma_t+98.953UCS$ | 0.891 |
| Linear | $E_{50}=1295.316-0.022OPF+1.361RW+1.209T-0.611\gamma_t-30.350\epsilon_f$ | 0.687 |
| Linear | $E_{50}=1256.001+2.105OPF+14.145RW-0.988T+0.240\gamma_t-72.066\omega$ | 0.521 |
| Linear | $E_{50}=-52.028-4.892OPF+2.290RW-0.351T+93.257UCS-2.424\epsilon_f$ | 0.893 |
| Linear | $E_{50}=-236.886-6.025OPF+1.845RW-0.165T+100.462UCS+7.150\omega$ | 0.892 |
| Linear | $E_{50}=1120.067+3.298OPF+6.965RW-0.241T-18.203\epsilon_f-42.712\omega$ | 0.697 |
| Linear | $E_{50}=301.007-5.026OPF+1.858RW-0.488T-0.186\gamma_t+92.253UCS-2.852\epsilon_f$ | 0.892 |
| Linear | $E_{50}=15.721-6.413OPF+1.268RW-0.173T-0.164\gamma_t+100.968UCS+9.536\omega$ | 0.891 |
| Linear | $E_{50}=168.889-5.785OPF+0.820RW-0.115T-0.232\gamma_t+94.272UCS-2.838\epsilon_f+9.404\omega$ | 0.892 |

ตารางที่ 3.14 ความสัมพันธ์ของค่า \mathcal{E}_f กับค่าต่างๆ (วิเคราะห์ภาครวมทุกอัตราส่วน)

| Equation Model | Regression Equation | R ² |
|----------------|---|----------------|
| Linear | $\mathcal{E}_f=4.859+0.194OPF-0.221RW-0.021T$ | 0.415 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=50.512+0.163OPF-0.271RW-0.036T-0.024\gamma_t$ | 0.426 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=5.884+0.129OPF-0.076RW+0.020T-0.020E_{50}$ | 0.664 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=7.734+0.249OPF-0.113RW+0.037T-2.350UCS$ | 0.663 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=-28.500+0.094OPF-0.353RW+0.042T+1.452\Omega$ | 0.435 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=56.008+0.094OPF-0.130RW+0.004T-0.027\gamma_t-0.021E_{50}$ | 0.662 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=53.325+0.218OPF-0.163RW+0.022T-0.024\gamma_t-2.350UCS$ | 0.678 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=24.989+0.022OPF-0.459RW+0.040T-0.033\gamma_t+1.861\Omega$ | 0.461 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=7.232+0.210OPF-0.095RW+0.034T-0.007E_{50}-1.647UCS$ | 0.664 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=4.777+0.126OPF-0.081RW+0.022T-0.020E_{50}+0.048\Omega$ | 0.639 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=16.934+0.278OPF-0.073RW+0.022T-2.433UCS-0.396\Omega$ | 0.660 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=54.505+0.173OPF-0.145RW+0.018T-0.025\gamma_t-0.008E_{50}$ $-1.566UCS$ | 0.681 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=49.981+0.064OPF-0.177RW+0.020T-0.029\gamma_t$ $-0.020E_{50}+0.427\Omega$ | 0.659 |
| Linear | $\mathcal{E}_f=54.095+0.170OPF-0.148RW+0.019T-0.025\gamma_t-0.008E_{50}$ $-1.557UCS+0.030\Omega$ | 0.676 |

จากการวิเคราะห์ทางสถิติแต่ละอัตราส่วน การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดีมาก ค่า R^2 0.8464 - 0.998 ดังตารางที่ 3.15 ความสัมพันธ์ของค่า E_{s0} กับค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กันน้อยจนถึงดีมาก ค่า R^2 0.1653 - 0.9996 ดังตารางที่ 3.16 และความสัมพันธ์ของค่า ϵ_r กับค่าต่างๆ มีความสัมพันธ์กันปานกลางจนถึงดี ค่า R^2 0.5574 - 0.9918 ดังตารางที่ 3.17 ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กันดีมากยกเว้นดินเหนียวปากพ่นังกรณีที่ยังมีได้ปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 3.15 ความสัมพันธ์ของค่า UCS กับค่าต่างๆ ของแต่ละอัตราส่วน

| สัญลักษณ์ | Equation Model | Regression Equation | R^2 |
|------------|----------------|---------------------------------|--------|
| Control | Power | $UCS=2E-5T^2-0.0002T+1.368$ | 0.8464 |
| OPF0:RW5 | Power | $UCS=-0.0008T^2+0.0657T+1.1089$ | 0.9981 |
| OPF0:RW10 | Power | $UCS=-0.0009T^2+0.073T+1.2018$ | 0.9962 |
| OPF0:RW15 | Power | $UCS=-0.0007T^2+0.0627T+1.1831$ | 0.9996 |
| OPF5:RW0 | Power | $UCS=-0.0007T^2+0.062T+1.3163$ | 0.9961 |
| OPF5:RW5 | Power | $UCS=-0.0009T^2+0.0773T+1.4568$ | 0.9953 |
| OPF5:RW10 | Power | $UCS=-0.001T^2+0.0862T+1.6146$ | 0.9984 |
| OPF5:RW15 | Power | $UCS=-0.001T^2+0.0848T+1.5846$ | 0.9985 |
| OPF10:RW0 | Power | $UCS=-0.0009T^2+0.0791T+1.4211$ | 0.9976 |
| OPF10:RW5 | Power | $UCS=-0.001T^2+0.0926T+1.7037$ | 0.997 |
| OPF10:RW10 | Power | $UCS=-0.0013T^2+0.112T+2.0794$ | 0.9998 |
| OPF10:RW15 | Power | $UCS=-0.0011T^2+0.0997T+1.9302$ | 0.9995 |
| OPF15:RW0 | Power | $UCS=-0.0006T^2+0.0486T+0.9434$ | 0.9983 |
| OPF15:RW5 | Power | $UCS=-0.0007T^2+0.0623T+1.1688$ | 0.9983 |
| OPF15:RW10 | Power | $UCS=-0.0008T^2+0.0764T+1.4311$ | 0.9830 |
| OPF15:RW15 | Power | $UCS=-0.0008T^2+0.0753T+1.3957$ | 0.9906 |

ตารางที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของค่า E_{50} กับค่าต่างๆ ของแต่ละอัตราส่วน

| สัญลักษณ์ | Equation Model | Regression Equation | R^2 |
|------------|----------------|------------------------------------|--------|
| Control | Power | $E_{50}=0.0013T^2-0.0673T+21.462$ | 0.1653 |
| OPF0:RW5 | Power | $E_{50}=-0.0672T^2+5.7739T+45.128$ | 0.9991 |
| OPF0:RW10 | Power | $E_{50}=-0.0788T^2+7.1853T+65.729$ | 0.9978 |
| OPF0:RW15 | Power | $E_{50}=-0.0884T^2+7.8879T+69.898$ | 0.9963 |
| OPF5:RW0 | Power | $E_{50}=-0.0589T^2+5.0537T+40.619$ | 0.9991 |
| OPF5:RW5 | Power | $E_{50}=-0.0841T^2+6.9971T+53.792$ | 0.9806 |
| OPF5:RW10 | Power | $E_{50}=-0.1091T^2+9.1675T+71.284$ | 0.9709 |
| OPF5:RW15 | Power | $E_{50}=-0.1222T^2+10.583T+79.329$ | 0.9958 |
| OPF10:RW0 | Power | $E_{50}=-0.0698T^2+5.8495T+42.604$ | 0.9946 |
| OPF10:RW5 | Power | $E_{50}=-0.0947T^2+7.9745T+64.247$ | 0.9917 |
| OPF10:RW10 | Power | $E_{50}=-0.118T^2+10.448T+97.958$ | 0.9996 |
| OPF10:RW15 | Power | $E_{50}=-0.1373T^2+11.702T+104.31$ | 0.9949 |
| OPF15:RW0 | Power | $E_{50}=-0.0096T^2+0.9153T+11.842$ | 0.9721 |
| OPF15:RW5 | Power | $E_{50}=-0.0206T^2+1.8027T+17.81$ | 0.9972 |
| OPF15:RW10 | Power | $E_{50}=-0.0383T^2+3.2481T+29.007$ | 0.9675 |
| OPF15:RW15 | Power | $E_{50}=-0.0411T^2+3.3925T+30.52$ | 0.9657 |

ตารางที่ 3.17 ความสัมพันธ์ของค่า ϵ_f กับค่าต่างๆ ของแต่ละอัตราส่วน

| สัญลักษณ์ | Equation Model | Regression Equation | R ² |
|------------|----------------|---|----------------|
| Control | Power | $\epsilon_f = -0.0013T^2 + 0.1058T + 8.208$ | 0.5574 |
| OPF0:RW5 | Power | $\epsilon_f = 0.0006T^2 - 0.0469T + 2.656$ | 0.9101 |
| OPF0:RW10 | Power | $\epsilon_f = 0.0006T^2 - 0.0466T + 2.7429$ | 0.9521 |
| OPF0:RW15 | Power | $\epsilon_f = 0.0006T^2 - 0.0506T + 2.6906$ | 0.9416 |
| OPF5:RW0 | Power | $\epsilon_f = 0.0008T^2 - 0.0627T + 3.5411$ | 0.9559 |
| OPF5:RW5 | Power | $\epsilon_f = 0.0009T^2 - 0.068T + 3.5003$ | 0.9569 |
| OPF5:RW10 | Power | $\epsilon_f = 0.0008T^2 - 0.0638T + 3.2728$ | 0.9207 |
| OPF5:RW15 | Power | $\epsilon_f = 0.0005T^2 - 0.0412T + 2.7665$ | 0.9918 |
| OPF10:RW0 | Power | $\epsilon_f = 0.0012T^2 - 0.098T + 5.518$ | 0.9408 |
| OPF10:RW5 | Power | $\epsilon_f = 0.0011T^2 - 0.0837T + 4.2569$ | 0.9043 |
| OPF10:RW10 | Power | $\epsilon_f = 0.0008T^2 - 0.0617T + 3.3003$ | 0.9539 |
| OPF10:RW15 | Power | $\epsilon_f = 0.0007T^2 - 0.0542T + 2.7274$ | 0.9272 |
| OPF15:RW0 | Power | $\epsilon_f = 0.0026T^2 - 0.2162T + 11.765$ | 0.9621 |
| OPF15:RW5 | Power | $\epsilon_f = 0.0019T^2 - 0.1586T + 9.1585$ | 0.9626 |
| OPF15:RW10 | Power | $\epsilon_f = 0.0017T^2 - 0.1372T + 7.2486$ | 0.9600 |
| OPF15:RW15 | Power | $\epsilon_f = 0.0016T^2 - 0.1265T + 6.8312$ | 0.9472 |