การเพิ่มคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตด้วยเถ้าก้นเตากับน้ำยางธรรมชาติสำหรับงานผิวถนนคอนกรีตอย่างยั่งยืน

นางสาวสุฑามาศ แสนศรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

ENHANCING THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF BOTTOM ASH CONCRETE WITH NATURAL RUBBER LATEX FOR SUSTAINABLE RIGID PAVEMENTS

SUTAMAS SANSRI

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in
Civil Engineering and Construction Management
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

การเพิ่มคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตด้วยเถ้าก้นเตา กับน้ำยางธรรมชาติสำหรับงานผิวถนนคอนกรีตอย่างยั่งยืน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒนพงศ์)
ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. Menglim Hoy)
อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. วิสิษฐ์ กุลอริยทรัพย์)
กรรมการ

(ดร. ธีรศักดิ์ เยาวราช)
กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ.ดร. พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุฑามาศ แสนศรี : การเพิ่มคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตด้วยเถ้าก้นเตากับน้ำยางธรรมชาติสำหรับงานผิวถนนคอนกรีตอย่างยั่งยืน (ENHANCING THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF BOTTOM ASH CONCRETE WITH NATURAL RUBBER LATEX FOR SUSTAINABLE RIGID PAVEMENTS.)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. MENGLIM HOY, 59 หน้า

คำสำคัญ: เถ้าก้นเตา, น้ำยางธรรมชาติ, พื้นผิวคอนกรีตที่ยั่งยืน, การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค, กำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัดงอ

ศึกษาการประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติ (NRL) มาปรับใช้และเถ้าก้นเตา (BA) มาทดแทนทรายแม่น้ำสำหรับงานผิวถนนคอนกรีต ส่วนผสมคอนกรีตที่มีการทดแทนด้วยทรายอัตราส่วน BA 10% และ 20% และอัตราส่วน NRL ที่ (0%, 1.0%, 1.5% และ 2.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์) โดยได้จัดเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลและคุณลักษณะทางโครงสร้างจุลภาค ผลการวิจัยระบุว่าในขณะที่อัตรา BA สูงขึ้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง การแทนที่ NRL ในปริมาณที่เหมาะสมที่ 1.0% จะช่วยปรับปรุงทั้งกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL และ 20%BA+1.0%NRL แสดงคุณสมบัติทางกลที่ดีกว่าส่วนผสมอื่นและเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานกรมทางหลวง อย่างไรก็ตามปริมาณ NRL ที่มากเกินไป (1.5% และ 2.0%) ส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลลดลง การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นเมทริกซ์ที่มีความหนาแน่นมากขึ้นและมีขนาดกะทัดรัดมากขึ้นในคอนกรีต BA ที่มีส่วนผสมของ NRL โดยมีฟิล์ม NRL ช่วยเพิ่มพันธะระหว่างผิวและกลไกการเชื่อมรอยร้าว อย่างไรก็ตาม อัตราส่วน NRL ที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการก่อตัวของฟิล์ม NRL ที่ใหญ่ขึ้นและจำนวนมากขึ้น ซึ่งขัดขวางความต่อเนื่องของเมทริกซ์ซีเมนต์และสร้างโซนที่อ่อนแอ การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์การมีเฟสผลึกที่สำคัญและความสมดุลที่เหมาะสมที่สุดในส่วนผสม 20%BA+1.0%NRL ซึ่งมีส่วนทำให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ากว่า ที่มีอัตราของ NRL ที่มากเกินไปแสดงความเข้มที่ต่ำกว่าของพีคของควอตซ์ แคลไซต์ และปอร์ตแลนด์ไดต์ ซึ่งบ่งชี้ถึงการรบกวนในการก่อตัวและการเจริญเติบโตที่เหมาะสมของเฟสผลึกที่จำเป็น การค้นพบนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของคอนกรีต BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL ในฐานะวัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพสูงสำหรับงานคอนกรีตสำหรับงานทางเมื่อใช้ปริมาณ NRL ที่เหมาะสม ซึ่งส่งเสริมการใช้วัสดุเหลือใช้และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธาและการบริหารงานก่อสร้าง ลายมือชื่อนักศึกษา Sutamas
ปีการศึกษา 2567 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

SUTAMAS SANSRI : (ENHANCING THE MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF BOTTOM ASH CONCRETE WITH NATURAL RUBBER LATEX FOR SUSTAINABLE RIGID PAVEMENTS.) THESIS ADVISOR : MENGLIM HOY, Ph.D. 59 PP.

Keywords: Bottom Ash, Natural Rubber Latex, Sustainable Concrete Pavement, Microstructural Analysis, Compressive Strength, Flexural Strength.

This study investigates the potential of using natural rubber latex (NRL)-modified concrete incorporating bottom ash (BA) as a partial replacement for river sand in sustainable rigid pavements. Concrete mixes with 10% and 20% BA replacement and varying NRL dosages (0%, 1.0%, 1.5%, and 2.0% by weight of cement) were prepared and evaluated for their mechanical properties and microstructural characteristics. The results indicate that while BA replacement reduced the compressive strength of concrete, the incorporation of NRL at an optimal dosage of 1.0% significantly improved both the compressive and flexural strength. The 10%BA+1.0%NRL and 20%BA+1.0%NRL mixes exhibited mechanical properties surpassing the control mix and meeting the minimum requirements for rigid pavement materials. However, excessive NRL content (1.5% and 2.0%) led to a reduction in mechanical strength. Scanning electron microscopy analysis exhibited a denser and more compact matrix in NRL-modified BA concrete, with NRL films enhancing the interfacial bonding and crack-bridging mechanism. Nonetheless, excessive NRL content resulted in the formation of larger and more numerous NRL films, which disrupted the continuity of the cement matrix and created weak zones. X-ray diffraction analysis confirmed the presence of key crystalline phases and their optimal balance in the 20%BA+1.0%NRL mix, contributing to its superior performance. Mixes with excessive NRL content exhibited lower intensities of quartz, calcite, and portlandite peaks, indicating a disturbance in the proper formation and growth of essential crystalline phases. The findings demonstrate the potential of NRL-modified BA concrete as an eco-friendly and high-performance alternative for sustainable rigid pavements when using an optimal NRL dosage, promoting the utilization of waste materials and reducing the environmental footprint of the construction industry.

School of Civil Engineering and Construction Management Student's Signature Sutamas

Academic Year 2024 Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่ได้ช่วยเหลือชี้แนะให้คำปรึกษา รวมทั้งให้การช่วยเหลือในการให้ความรู้ การแนะนำสิ่งที่ถูกต้องจนงานวิจัยนี้สามารถริเริ่ม และลุล่วงไปได้ด้วยดีเสมอมา ก่อนอื่นผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิดและอบรมสั่งสอนให้ความรู้ด้วยดีเสมอมา

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ Dr.Menglim Hoy อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ถ่ายทอดวิชาความรู้ เป็นแบบอย่างในการดำเนินชีวิต และให้คำแนะนำปรึกษาเรื่องวิจัยช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรภูมิ เบญจโอฬาร รองศาสตราจารย์ พญ.จิตรวดี หอพิบูลสุข และ ดร.วิสิษฐ์ กุลอริยทรัพย์ ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการและประสบการณ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้แนวคิด ตลอดจนข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ที่กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะและช่วยเหลือจนกระทั่งการทำวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์

สุฑามาศ แสนศรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ข
กิตติกรรมประกาศ ค
สารบัญ ง
สารบัญตาราง ช
สารบัญรูป ซ
บทที่
1. **บทนำ** 1
   1.1 ความสำคัญของปัญหา 1
   1.2 วัตถุประสงค์ 3
   1.3 ขอบเขตการวิจัย 3
   1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
2. **แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** 4
   2.1 เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) 4
   2.2 น้ำยางพารา (Natural Rubber Latex) 5
   2.3 คอนกรีต (concrete) 7
   2.4 ปูนซีเมนต์ (Portland Cement) 9
   2.5 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate : ทราย) 9
   2.6 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate : หินหรือกรวด) 9
   2.7 น้ำ (Water) 11
   2.8 สารผสมเพิ่ม (Admixtures) 12
   2.9 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Concrete Mix Design) ตามมาตรฐาน ACI 12
   2.10 การบ่มคอนกรีต (Curing) 17

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11 มาตรฐานการทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต (COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE) 18

2.12 มาตรฐานการทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีต (FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE) 19

2.13 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค (Chemical Composition & Microstructure Analysis) 22

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 24

3. วัสดุและวิธีการดำเนินการ 27

3.1 วิธีการวิจัย (Research Methodology) 27

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย นำวัสดุมาทดสอบคุณสมบัติมวลรวมด้านกายภาพและวิศวกรรม 27

3.3 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Mix Design) 29

3.4 เตรียมวัสดุเพื่อทำการผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสมที่ออกแบบ 29

3.5 การผสมส่วนผสม (Mixing of Concrete Mix Design) 31

3.6 ทำการหล่อเข้าแบบและทำการบ่มคอนกรีต การบ่มคอนกรีต (CONCRETE CURING) 31

3.7 นำคอนกรีตที่หล่อตามแบบมาตรฐานมาทำการทดสอบ (compressive strength & Flexural Strength) 32

3.8 นำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructural Analysis) 33

4. ผลการวิจัย 34

4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 35

4.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 36

4.3 ผลสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete) 37

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructural Analysis) 40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5 การวิเคราะห์แร่วิทยา (Mineralogical Analysis) 44
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 50
5.1 บทสรุป (Conclusion) 50
5.2 ข้อเสนอแนะ 51
รายการอ้างอิง 52
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก 58
ประวัติผู้เขียน 59

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 พบว่าเถ้าก้นเตามีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2, CaO, $F_{e2}O_3$ และ Al_2O_3 5

2-2 ขนาดใหญ่สุดที่ยอมให้ของมวลรวมหยาบสำหรับโครงสร้างแต่ละชนิดชนิด
ของโครงสร้าง ขนาดใหญ่สุดที่ยอมให้ (มิลลิเมตร) 10

2-3 ค่าคงที่ 13

2-4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจำเป็น 13

2-5 ส่วนเผื่อเมื่อไม่มีผลทดสอบกำลังอัดแท่งตัวอย่าง 13

2-6 ค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่างๆ 15

2-7 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่ายุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่างๆ 15

2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต 16

2-9 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้สำหรับคอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง 16

2-10 ปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต 16

2-11 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ 17

2-12 อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางกับตัวคูณที่ใช้แก้ไขค่าความต้านแรงอัด 19

3-1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต fc' = 300 ksc. slump = 5 cm. 29

4-1 Chemical composition of OPC and BA 34

4-2 Physical and engineering properties of coarse and fine aggregate 36

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1-1 a), b)งานก่อสร้างที่ใช้คอนกรีต (ผิวถนนคอนกรีต) ของกรมทางหลวง (DOH) 2
2-1 การกระจายขนาดของเถ้าก้นเตา (Bottom ash) 4
2-2 a) เถ้าก้นเตา BA กำลังขยาย 500µm และ b) BB กำลังขยาย 500µm 5
2-3 ยางพารามีโครงสร้างทางเคมีแบบ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน 6
2-4 การผสมส่วนผสมคอนกรีต 8
2-5 แสดงอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต 18
2-6 วิธีใช้แรงกด หนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (CENTER-POINT LOADING) 20
2-7 วิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสอง เป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วน เท่า ๆ กัน (THIRD-POINT LOADING) 20
2-8 ตัวอย่างเครื่องมือทดสอบ SEM 23
3-1 a) การหาขนาดคละ bottom ash และ b) ,c) วัสดุมวลรวม ในเครื่อง Sieve Shake 28
3-2 a) และ b) เตรียมแบบหล่อคอนกรีตตามมาตรฐาน 28
3-3 a), b) ,c) ,d) ,e) ,c) และ f) จัดเตรียมอุปกรณ์และวัสดุตามอัตราส่วนผสมที่ออกแบบ 30
3-4 a) การผสมส่วนผสมคอนกรีต และ b) การควบคุมการยุบตัว slump test เท่ากับ 5 31
3-5 a) , b) ทิ้งคอนกรีต 24 ชั่วโมง ทำการแกะแบบคอนกรีตและ c) , d) บ่มคอนกรีต (CONCRETE CURING) จำนวน 7, 28 และ 60 วัน 31
3-6 a) และ b) การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (compressive strength) 32
3-7 a) และ b) การทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural Strength) 32
3-8 a) รูปการศึกษาโครงสร้างผลึกและ b) ชิ้นตัวอย่างโดยใช้ Scanning Electron Microscope กำลังขยาย x 500 และ กำลังขยาย x 2,000 33
3-9 a) รูปการศึกษาการวิเคราะห์ธาตุและ b) ชิ้นคอนกรีตตัวอย่างโดยการใช้ X-Ray Diffractometer (XRD) 33
4-1 XRD pattern of BA 34
4-2 Gradation of studied aggregates 35

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4-3 Compressive strength results of studied concrete samples with various BA and NRL contents cured at 7, 28, and 60 days. 37
4-4 Flexural strength results of studied concrete samples with various BA and NRL contents cured at 7, 28, and 60 days. 39
4-5 SEM image of a control sample. 41
4-6 SEM images: a) 10%BA+0.0%NRL, b) 10%BA+1.0%NRL, c) 10%BA+2.0%NRL, d) 20%BA+0.0%NRL, e) 20%BA+1.0%NRL, f) 20%BA+2.0%NRL. 42
4-7 XRD pattern of a control sample. 45
4-8 XRD pattern of a) 10%BA+1.0%NRL sample, b) 10%BA+2.0%NRL sample. 46
4-9 XRD pattern of a) 20%BA+1.0%NRL sample, b) 20%BA+2.0%NRL sample. 48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

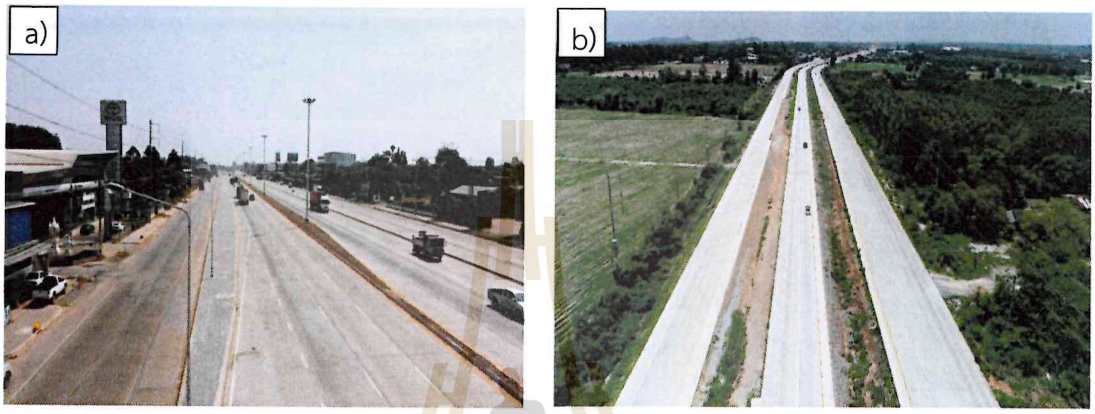
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เถ้าถ่านหิน เป็นของเสียที่เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อให้ใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะใช้ถ่านหินลิกต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณวันละ 40,000 ตัน ซึ่งก่อให้เกิดเถ้าถ่านหินประมาณวันละ 10,000 ตัน ในจำนวนนี้ประกอบไปด้วย เถ้าลอย (Fly Ash) คิดเป็นร้อยละ 80 ในปัจจุบันมีมูลค่าทางเศรษกิจเนื่องจากถูกใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ยังมีเถ้าก้นเตา (Bottom Ash) คิดเป็นร้อยละ 20 ซึ่งปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากเถ้าชนิดนี้มีปริมาณน้อยทำให้มีการกองทิ้งเถ้าก้นเตา ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งหากสามารถพัฒนาประโยชน์จากเถ้าก้นเตา นอกจากจะลดผลกระทบดังกล่าวยังเป็นการเพิ่มมูลค่าทางพาณิชย์อีกด้วย

ยางพารา (NRL) ประกอบกับในปัจจุบันเกิดปัญหาวิกฤตราคายางพาราตกต่ำ โดยมีราคาอยู่ที่ 3 กิโลกรัมต่อ 100 บาท ทั้งที่ช่วงปี 2554 ราคาผลผลิตยางพาราทุกประเภทได้อยู่ในระดับสูงเป็นประวัติการณ์ ทำให้ยาพาราในท้องตลาดขนาดนั้นดึงดูดเกษตรกรโดยน้ำยางสดราคา 125 บาทต่อกิโลกรัม (ตารางราคายางแห่งประเทศไทย 2554) ทำให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกยางพารา ไม่เพียงแต่ภาคใต้ที่มีพื้นที่การปลูกยางพาราเป็นหลัก แม้แต่เกษตรกรภาคตะวันออกเฉียงเหนือหลายจังหวัดในในภูมิภาคอื่นๆ ยังได้รับการส่งเสริมการปลูกยางพาราอย่างจริงจัง เพราะราคาดีกว่าพืชผลการเกษตรที่เคยปลูกอยู่ดั้งเดิม ในหลายปีที่ผ่านมาปริมาณน้ำยางที่ออกสู่ตลาดจึงมีปริมาณมากส่งผลให้เกิดภาวะราคายางเริ่มลดต่ำลง อันเป็นผลสืบเนื่องจากปริมาณยางพาราที่เกิดความต้องการของตลาด ดังนั้นการแปรรูปและการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการเพิ่มรายได้อย่างยั่งยืนให้เกษตรกร

คอนกรีต คือ วัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ใช้ในการก่อสร้าง อาคารและสาธารณูปโภค ตั้งแต่อดีตจวบจนปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและคุณสมบัติต่างๆ คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต ผสมกับวัสดุผสมอันได้แก่ ทราย หิน หรือ กรวด ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่เรียกว่าการไฮเดรชั่น เมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อ ที่มีรูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็งมีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โดยประมาณหลังจาก

แข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่คอนกรีตมีใช้กันในงานก่อสร้างหลายชนิด ซึ่งรวมถึงอาคาร ถนน เขื่อน สะพาน อนุสาวรีย์ และงานก่อสร้างต่างๆ ซึ่งมีเห็นได้ทั่วไป งานคอนกรีตในงานก่อสร้างทางในประเทศไทยโครงการของหน่วยงานรัฐ เช่น กรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบทเป็นต้น ซึ่งงบประมาณของปี 2566 กรมทางหลวง (ทล.) ได้รับมากที่สุดของกระทรวงคมนาคม จำนวน 113,464.41 ล้านบาท รองลงมาคือกรมทางหลวงชนบท ได้รับจำนวน 45,583.25 ล้านบาท



รูปที่ 1-1 a),b) งานก่อสร้างที่ใช้คอนกรีต (ผิวถนนคอนกรีต) ของกรมทางหลวง (DOH)

จากที่มาและปัญหาที่กล่าวข้างต้นนักวิจัยจึงสนใจและพยายามนำวัสดุที่เป็นกากของเสียและวัสดุผลพลอยได้จากกระวบนการต่างๆ มาประยุกต์ในงานวิศวกรรมโยธา หรือแม้แต่รัฐบาลเองก็พยามส่งเสริมการเพิ่มมูลค่าของน้ำยาพารา จึงเป็นแรงจุงใจให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาศักยภาพของการนำเถ้าถ่านหินมาผสมกับยางพาราเพื่อใช้เป็นวัสดุคัดเลือกสำหรับงานทาง โดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งเป็นบริหารการจัดการและใช้ประโยชน์ทัพยาการธรรมชาติอย่างคุ้มค่า อีกทั้งเป็นการพัฒนาวัสดุด้านวิศวกรรมช่วยลดปัญหาการเก็บกองการจัดเก็บ และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงอาจเป็นวัสดุทดแทนได้ด้วย เพื่อเป็นการส่งเสริมทางเลือกให้กับเกษตรชาวสวนยาง และยังสามารถนำผลวิจัยไปใช้เป็นประโยชในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.2 วัตถุประสงค์

การวิจัยเรื่อง การเพิ่มคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตด้วยเถ้าก้นเตากับน้ำยางธรรมชาติสำหรับผิวถนนคอนกรีตอย่างยั่งยืน

ได้กำหนดวัตถุประสงค์ขึ้น ดังนี้

1.2.1 ปรับปรุงน้ำยางธรรมชาติและเถ้าก้นเตามาทดแทนทรายสำหรับงานผิวทางถนนคอนกรีต

1.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลกำลังอัดของคอนกรีตและการรับแรงดัดงอของคอนกรีตตามมาตรฐานงานก่อสร้างผิวทางและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค

1.2.3 เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะของปริมาณส่วนผสมคอนกรีตในการแทนที่ของเถ้าก้นเตาและยางพารา

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 วัสดุในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ เถ้าก้นเตา (Bottom Ash) ซึ่งนำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และน้ำยาพารา (Natural rubber latex) ทราย (Coarse Sand) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนท์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I) และหิน มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (Crushed stone: NCA)

1.3.2 การศึกษาคุณสมบัติที่ทดสอบ ได้แก่ การวิเคราะห์ขนาคละของเถ้าก้นเตา วิเคราะห์หาการปรับปรุงส่วนผสมที่เหมาะสมเมื่อออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเท่ากับ 300 KSC และควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 5 กำลังของคอนกรีตตามมาตรฐานกรมทางหลวง การนำชิ้นคอนกรีตทดสอบเพื่อศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของผิวคอนกรีต เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM) และการวิเคราะห์สารประกอบของธาตุในคอนกรีต X-ray diffractometer (XRD)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการนำเถ้าก้นเตามาใช้ประโยชน์ และทราบถึงรายละเอียดเชิงลึกของวัสดุเหลือทิ้งที่นำมาผลิตคอนกรีต นอกจากนั้นประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยมีดังนี้

1.4.1 ทราบคุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าก้นเต้า ยางพารา และวัสดุส่วนผสมทดสอบคุณสมบัติมวลรวมด้านกายภาพและวิศวกรรมของคอนกรีต

1.4.2 ทราบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดงอดัดของคอนกรีตเมื่อนำเถ้าก้นเตาและยางพารามาเป็นส่วนผสม

1.4.3 ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าก้นเตาและยางพาราในคอนกรีตเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกในงานก่อสร้างผิวทางคอนกรีต

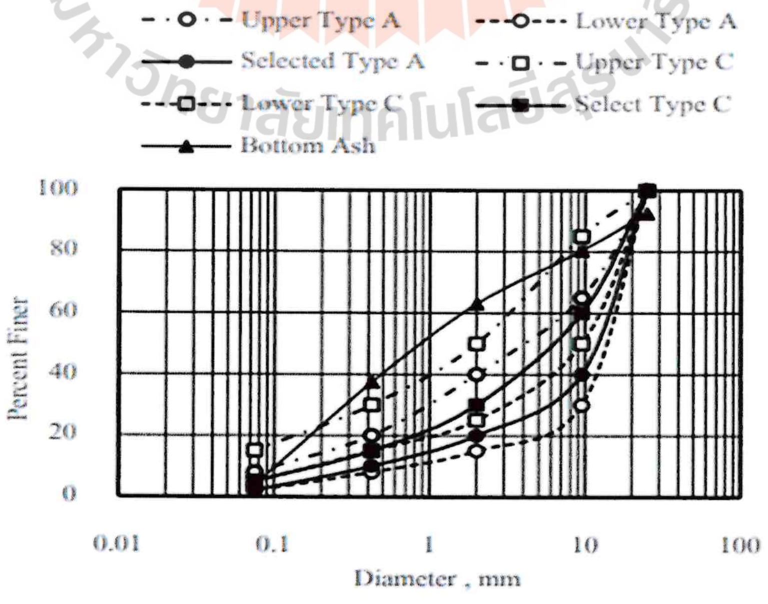
1.4.4 เพื่อนำเถ้าก้นเตาที่เป็นของเสียในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าถ่านหินไปใช้ประโยชน์

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เถ้าก้นเตา (Bottom Ash)

เป็นวัสดุผลพลอยได้จำนวนมากที่เหลือจาก กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหิน ส่วนใหญ่จะ ถูกนำไปทิ้งโดยการฝังกลบ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายและไม่ได้ ใช้วัสดุให้เกิดประโยชน์ เนื่องจากเถ้าก้นเตามีอนุภาคไม่เป็นรูปทรงกลม มีความพรุนสูง ค่อนข้างชื้นและทำปฏิกิริยาช้าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอย ที่ผ่านมาได้มี การศึกษาที่จะนำเถ้าก้นเตามาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีต แต่เนื่องจากเถ้าก้นเตามีเม็ดหยาบต้องมีการบดให้ ละเอียดมากพอจึงจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและต้องทำให้แห้งซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดใน คอนกรีตแต่ก็ยังใช้แทนที่ได้น้อย จึงทำให้ไม่มีการใช้อย่างแพร่หลายนัก เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะไม่มีความเป็นพลาสติก เนื่องจากเถ้าก้นเตามีความพรุนสูงและไม่มีความเหนียว มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7 เมื่อนำไปทดสอบการกระจายของขนาดคละ พบว่าเถ้าก้นเตามีขนาดในช่วงที่ เป็นทรายเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 2-1 จึงเลือกใช้เถ้าก้นเตาที่ผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว เนื่องจากต้องการใช้เถ้า ก้นเตาในสภาพธรรมชาติเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเตรียมเถ้าก้นเตาหากมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง เมื่อจำแนกตามระบบ USCS พบว่าเถ้าก้นเตาเป็นประเภท SP (Poorly Graded Sand)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

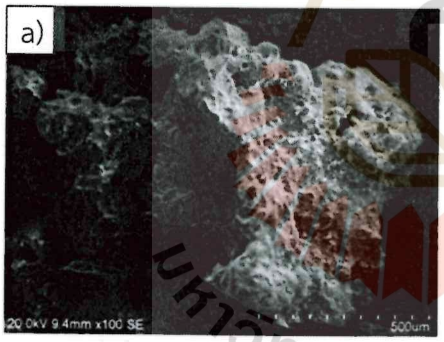


รูปที่ 2-1 การกระจายขนาดของเถ้าก้นเตา (Bottom ash)

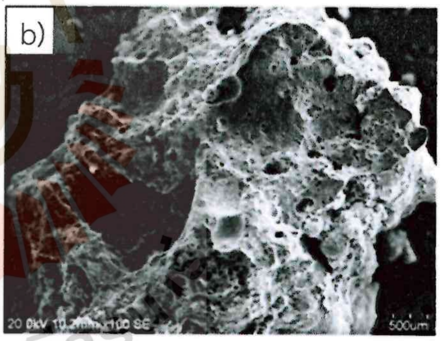
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าก้นเตาโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) แสดงในตารางที่ 2-1 พบว่าเถ้าก้นเตามีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2, CaO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 และ ซึ่งใกล้เคียงกับเถ้าลอยของ โรงไฟฟ้าแม่เมาะแต่มีความไวในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า เนื่องจากเถ้าลอยมีขนาดใหญ่และมีความพรุนสูง

สารประกอบออกไซด์	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	เถ้าก้นเตา	ดินลูกรัง
SiO_2	59.50	79.00
CaO	2.92	0.39
Fe_2O_3	6.07	6.29
Al_2O_3	25.70	10.90
MgO	0.80	0.45
K_2O	1.56	1.41

ตารางที่ 2-1 พบว่าเถ้าก้นเตามีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2, CaO, Fe_2O_3 และ Al_2O_3



เถ้าก้นเตา BA กำลังขยาย 500µm



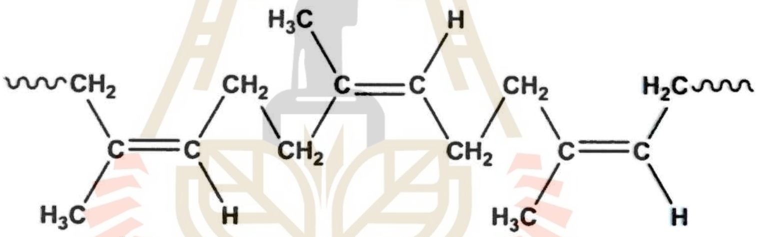
เถ้าก้นเตา BB กำลังขยาย 500µm

รูปที่ 2-2 a) เถ้าก้นเตา BA กำลังขยาย 500µm และ b) BB กำลังขยาย 500µm

2.2 น้ำยางพารา (Natural Rubber Latex)

ยางพาราหรือยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย การส่งออกยางธรรมชาติส่วนมากอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่ผ่านการแปรรูป เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน หรือยางทั้ง โดยประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกน้ำยางข้นรายใหญ่ของโลก ในปี พ.ศ.2558 น้ำยางข้นมีปริมาณการผลิต 964,403 ตัน และกว่าร้อยละ 85 ส่งออกยังต่างประเทศ มีมูลค่า 39,546 ล้านบาท น้ำยาง ข้นส่วนที่เหลือจากการส่งออกจะใช้ในอุตสาหกรรมภายในประเทศ

เพื่อผลิตถุงมือยาง ยางฟองน้ำถุงยางอนามัย จุกนมยาง ยางยืด ลูกโป่ง และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพาราเป็นของเหลวที่มีองค์ประกอบของแข็ง (Total Solid Content; TSC) ประมาณร้อยละ 36 และมีน้ าเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 60 โดยคิดเป็น น้ำหนักยางแห้ง (Dry Rubber Content; DRC) ร้อยละ 33 สารจำพวกโปรตีนร้อยละ 1-1.5 ขี้เถ้าไม่เกินร้อยละ 1 น้ำตาลร้อยละ 1 และมีสารประกอบอื่น ๆ เช่น กรดอะมิโน ลิพิดฟอสโฟลิพิด และ เกลือของกรดไขมัน อยู่ประมาณร้อยละ 0.5-1.60 ขนาดอนุภาคของยาง ธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.1-1.0 ไมครอน มีลักษณะค่อนข้างกลม โดยมีโปรตีนและแมมแบรนล้อมรอบอยู่ ที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาคยางธรรมชาติเป็นโพลิเมอร์ทางธรรมชาติที่ประกอบด้วย อะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจน มีโครงสร้างทางเคมีคือ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน (cis-1, 4- polyisoprene) ดัง**รูปที่ 2-3** ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวสูง โดยประกอบด้วยพันธะคู่ของคาร์บอน (C=C) เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ยางธรรมชาติเสื่อมสภาพได้โดยง่ายเมื่อถูกแสงแดดหรือหรือความร้อน โดยสังเกตได้จากยางจะแปรสภาพจากเดิมที่สามารถยืดหยุ่นได้ดีกลายเป็นแข็งเปราะและไม่สามารถใช้งานได้ต่อไป



รูปที่ 2-3 ยางพารามีโครงสร้างทางเคมีแบบ ซิส-1, 4-พอลิไอโซพรีน

ยางละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน โดยทั่วไปยางธรรมชาติมี โครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยาง สามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิจะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ยางพารามีสมบัติที่โดดเด่นแตกต่างจากยางสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นผลมาจากโครงข่ายที่เกิดจากการเชื่อมโยงตามธรรมชาติของหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่โมเลกุล โดยสมบัติที่โดดเด่น เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elasticity) ความทนทานต่อการขัดสี การกระดอน ทนทานต่อการฉีกขาด การเหนียวติดกัน (Track) ดีเยี่ยม แต่ทั้งนี้ยางพาราก็มีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางสังเคราะห์เช่น การเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดและความร้อน การบวมตัวเมื่อสัมผัสกับตัวทำลายอินทรีย์ นอกจากนี้ยางพารายังมีสมบัติไฮไดรฟิลิก (Hydrophobicity) ซึ่งทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติไม่สามารถแตกตัวให้ไอออน หรือเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งไม่

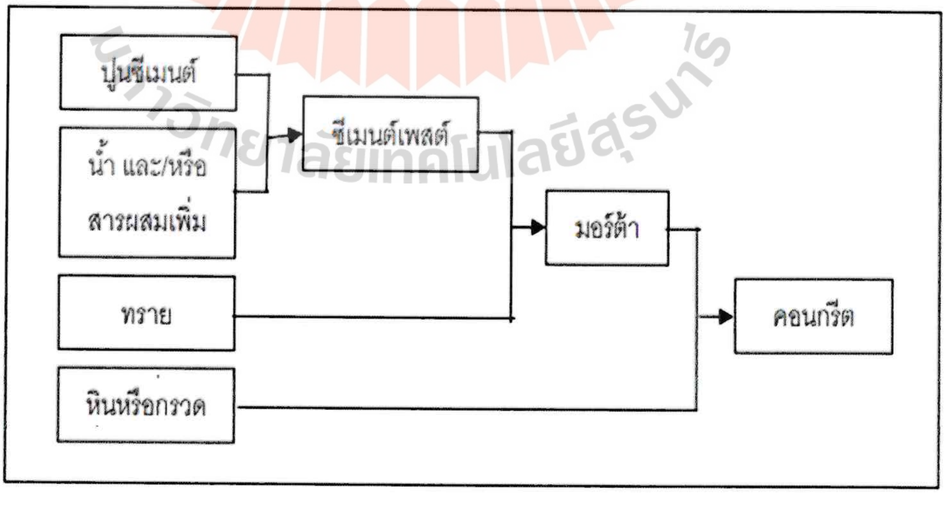
สามารถยึดติดกับโมเลกุลของน้ำหรือไม่เปียกน้ำและไม่สามารถขยายขนาดหรือบวมเมื่อสัมผัสน้ำจาก สมบัติดังกล่าวยางพาราจึงมี ความสามารถในการดูดน้ำได้น้อยมาก โดยทั่วไปน้ำยางสดที่ออกมาจากต้นยางจะคงสภาพความเป็นน้ำยางได้ไม่เกิน 3-6 ชั่วโมง เนื่องจากแบคทีเรียในอากาศและจากเปลือกของต้นยางจะลงไปในน้ำยาง และกินสารอาหารที่อยู่ใน น้ำยาง เช่น โปรตีน น้ำตาล เป็นต้น ทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่สิ่งที่เกิดขึ้นจากการ ย่อยของแบคทีเรียคือ ก๊าซชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน และกรดไขมันระเหยได้ (Volatile Fatty Acid) เมื่อปริมาณกรดที่ระเหยง่ายในน้ำยางเพิ่มมากขึ้น น้ำยางจะเกิดการสูญเสีย สภาพ สังเกตได้จากการที่น้ำยางจะค่อยๆ มีความหนืดมากขึ้น เพราะอนุภาคยางเริ่มจับตัวเป็นเม็ดเล็ก และค่อยขยายเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนน้ำยางสูญเสียสภาพ เกิดการบูดเน่าและมีกลิ่นเหม็น ซึ่งอัตราการเกิดกระบวนการทั้งหมดจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นเรื่องอุณหภูมิ สภาพแวดล้อม ความคงตัวของน้ำยาง พันธุ์ยาง เพื่อป้องกันการสูญเสียสภาพของน้ำยางสด จึงต้องเติมสารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อเก็บรักษาน้ำยางให้คงสภาพเป็นของเหลว ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการเก็บ รักษาน้ำยางเรียกว่า สารรักษาสภาพน้ำยาง (Preservative) เช่น แอมโมเนีย (Ammonia) โซเดียม ซัลไฟด์ (Sodium sulfite) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เป็นต้น น้ำยางข้นคือ น้ำยางสดที่ทำให้เข้มข้นโดยการหมุนเหวี่ยงหรือการแยกครีม เพื่อแยกส่วนที่เป็นเนื้อยางออกจากเซรุ่ม และเพิ่มปริมาณเนื้อยางแห้งจาก 30% เป็น 60% สำหรับวิธีการหมุน เหวี่ยง ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ในประเทศไทย และเพิ่มปริมาณเนื้อยางแห้งจาก 30% เป็น 64% สำหรับวิธีการแยกครีม เนื่องจากน้ำยางสดมีปริมาณน้ำมากเกินไปไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็น ผลิตภัณฑ์ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง กระบวนการผลิตน้ำยางข้น เริ่มจากการรวบรวมน้ำยางสด จากพื้นที่เพาะปลูก และมีการตรวจสอบคุณภาพและผสมสารเคมี ก่อนที่จะนำเข้าเครื่องเหวี่ยง (Certrifuge) เพื่อทำเป็นน้ำยางข้นที่มีความเข้มข้นได้ตั้งแต่ 30%-60% ในปัจจุบันการรักษาสภาพของน้ำยางข้นส่วนใหญ่ใช้สารแอมโมเนีย ซึ่งจำแนกกลุ่มของน้ำยางข้นออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะของสารเคมีที่ใช้ในการรักษาสภาพ คือ 1) น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโนเมียสูง (High Ammonia Latex; HA) คือ น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยสารละลายแอมโมเนียในปริมาณ 0.7% และ 2) น้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia Latex; LA) เป็นน้ำยางข้นที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียร่วมกับสารรักษาสภาพปริมาณ 0.2 % ร่วมกับสารเคมีชนิดอื่น น้ำยางข้นที่ได้รับการผสมสารเคมีแล้วอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบางประการทำให้น้ำยางมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปบ้างเล็กน้อย

2.3 คอนกรีต (concrete)

เป็นวัสดุผสมที่นิยมใช้ในงานก่อสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หิน ทราย หรือ กรวด) และน้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเติมเพิ่มเข้าไปสำหรับคุณสมบัติด้านอื่น เมื่อผสมเสร็จคอนกรีตจะแข็งตัวอย่างช้า ๆ ซึ่งน้ำและซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกันในลักษณะที่

เรียกว่าการไฮเดรชัน โดยซีเมนต์จะเริ่มจับตัวกับวัสดุอื่นและแข็งตัว ซึ่งในสถานะนี้จะนิยมเรียกกันว่า คอนกรีตความแข็งแรงของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลังจากที่ผสมและยังแข็งแรงขึ้นภายหลังจาก การแข็งตัว โดยประมาณหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน ความแข็งแรงจะเริ่มคงที่คอนกรีตมีใช้กันในงาน ก่อสร้างหลายชนิด ซึ่งรวมถึง อาคาร ถนน เขื่อน สะพาน อนุสาวรีย์ และงานก่อสร้าง ต่างๆ ซึ่งมีเห็น ได้ทั่วไปคุณสมบัติหลักของคอนกรีตคือการรับแรงอัดสูง ในขณะที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ (ประมาณ 10% ของแรงอัด) โดยเมื่อต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึง จะมีการเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปใน คอนกรีตโดยจะเรียกว่า คอนกรีตเสริมแรง หรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่เรียกกัน (โดยเสริมแรงด้วย เหล็ก) วัสดุเหล่านี้จะช่วยรับแรงดึงภายในคอนกรีต ซึ่งงานโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่นิยมใช้คอนกรีต เสริมแรงแทนที่คอนกรีตเปลือยนอกจากนี้ในงานก่อสร้างยังมีการใช้วิธีการที่เรียกว่า คอนกรีตอัดแรง โดยทำการใส่แรงเข้าไปในคอนกรีตหล่อสำเร็จที่หล่อมาจากโรงงาน โดยเมื่อนำไปใช้งานแรงที่ใส่เข้าไป ในคอนกรีตจะหักล้างกับน้ำหนักของตัวคอนกรีตเองและน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมา ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ คอนกรีตสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มมากขึ้น โดยงานสะพานและทางยกระดับ นิยมใช้คอนกรีตอัดแรง คอนกรีตจะมีสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย ต่อหิน ดังนี้ สัดส่วน 1 : 1.5 : 3 จะเป็นงานเสาและ โครงสร้าง สัดส่วน 1 : 2 : 4 จะเป็นงานพื้น, คาน สัดส่วน 1 : 2.5 : 4 จะเป็นงานถนน ฐานราก

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้จากการผสม ปูนซีเมนต์ หิน ทราย และน้ำ เข้าด้วยกัน ในขณะ ที่คอนกรีตยังเหลวอยู่ จะถูกเทลงในแบบหล่อเพื่อให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการ เช่น เสา คาน พื้น ผนัง เป็นต้น เมื่อคอนกรีตเริ่มก่อตัว ซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้คอนกรีตจะแข็งตัวขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับขั้นตอนการผสมคอนกรีต จะมีแสดงอยู่ใน**รูปที่ 2-4**



รูปที่ 2-4 การผสมส่วนผสมคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ จากหลักฐานยืนยันว่าปูนซีเมนต์ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่สมัยอียิปต์, กรีกและโรมัน คำว่า ซีเมนต์ มาจากภาษาลาติน มีความหมายทั่วๆ ไปคือ วัตถุที่แข็งเมื่อผสมกับน้ำ ซีเมนต์ถูกใช้อย่างแพร่หลายในฐานะเป็นวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดความเปลี่ยนแปลงทางเคมี ก่อให้เกิดความสามารถยึดส่วนต่างๆ หรืออนุภาคที่เป็นของแข็งให้รวมตัวกัน

2.4 ปูนซีเมนต์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในงานโครงสร้าง ให้ใช้ปูนซีเมนต์ดังต่อไปนี้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งเป็นประเภทต่างๆ 5 ประเภท

ประเภท 1 ปูนซีเมนต์ที่ใช้ทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ

ประเภท 2 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เมื่อต้องการความทนซัลเฟตปานกลางหรือเกิดความร้อน ปานกลางขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ

ประเภท 3 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เมื่อต้องการค่าความต้านแรงอัดสูงได้เร็ว

ประเภท 4 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เมื่อต้องการความร้อนต่ำขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ

ประเภท 5 ปูนซีเมนต์ที่ใช้เมื่อต้องการความทนซัลเฟตสูง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.849 : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างที่ สัมผัสหรือได้รับอิทธิพลจากดินเค็ม น้ำเค็ม หรือน้ำกร่อย ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2594 : ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิดใช้งานทั่วไป สัญลักษณ์ GU

2.5 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate : ทราย)

2.5.1 ต้องเป็นทรายน้ำจืดหรือทรายบก มีเม็ดหยาบ คม แข็งแกร่ง สะอาดปราศจากวัสดุอื่น เช่น เปลือกหอย ดิน เถ้าถ่าน และสารอินทรีย์ต่างๆ เจือปน

2.5.2 ทรายที่ใช้ในการก่อสร้างจะต้องมีค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ตั้งแต่ 2.3 ถึง 3.1

2.5.3 ทรายที่ใช้ในการก่อสร้างต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานกรมทางหลวงชนบท โดยทดสอบตามมทช.(ท) 101 : มาตรฐานการทดสอบวัสดุมวลผสมคอนกรีต

2.6 มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate : หินหรือกรวด)

2.6.1 มวลรวมหยาบที่ใช้ต้องแข็งแกร่ง เหนียว ไม่ผุและสะอาด ปราศจากวัสดุอื่นๆ

2.6.2 ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ ต้องไม่ใหญ่กว่า 40 มิลลิเมตร และไม่ใหญ่กว่า 1/5 ของด้านในที่แคบที่สุดของแบบหล่อ และต้องไม่ใหญ่กว่า 3/4 ของระยะช่องว่าง (Clear Spacing) ระหว่างเหล็กเสริมแต่ละเส้นหรือแต่ละมัด และขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบจะต้องมีค่าไม่เกินกว่าค่าที่ยอมให้ในตารางที่ 2-2

ชนิดของโครงสร้าง	ขนาดใหญ่สุดที่ยอมให้ (มิลลิเมตร)
ฐานราก เสา คาน	40
พื้นและครีบ	25
ผนังซึ่งมีความหนา ≥12.5 เซนติเมตร	40
ผนังซึ่งมีความหนา <12.5 เซนติเมตร	25

ตารางที่ 2-2 ขนาดใหญ่สุดที่ยอมให้ของมวลรวมหยาบสำหรับโครงสร้างแต่ละชนิดชนิดของโครงสร้าง ขนาดใหญ่สุดที่ยอมให้ (มิลลิเมตร)

<u>มาตรฐานการทดสอบหาขนาดคละของมวลรวม (Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates)</u>

การกระจายของขนาดวัสดุมวลรวม (Particle Size Distribution) หมายถึง การที่มวลรวมประกอบด้วยเม็ดวัสดุหลายขนาดต่างๆกัน ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมจะขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดวัสดุ โดยการกระจายของขนาดเม็ดวัสดุมวลรวมจะแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตะแกรงมาตรฐานในสเกลลอการิทึม (Logarithm Scale) เป็นแกนนอนกับร้อยละโดยมวลของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเป็นแกนตั้ง ซึ่งเรียกว่ากราฟการกระจายของขนาดวัสดุมวลรวม

ขนาดระบุใหญ่สุด (Nominal Maximum Size) หมายถึงขนาดช่องผ่านของตะแกรงเล็กที่สุดที่มวลรวมสามารถผ่านได้หรือมีสัดส่วนการผ่านตะแกรงเป็นไปตามที่กำหนด

พิกัดความละเอียด (Fineness Modulus) หมายถึง ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของมวลรวม

มวลรวม (Aggregate) หมายถึง วัสดุที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตที่มีขนาดเม็ดตั้งแต่ 0.075 มิลลิเมตรขึ้นไป

มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) หมายถึงวัสดุที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตที่มีขนาดเม็ดตั้งแต่ 0.075 มิลลิเมตร ถึง 4.75 มิลลิเมตร

มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) หมายถึง วัสดุที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตที่มีขนาดเม็ดตั้งแต่ 4.75 มิลลิเมตรขึ้นไป

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน ร้อยละของวัสดุมวลที่ผ่านตะแกรง 9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) 100 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) 95-100 2.36 มิลลิเมตร (เบอร์ 8) 80-100 1.18 มิลลิเมตร (เบอร์ 16) 50-85 0.60 มิลลิเมตร (เบอร์ 30) 25-60 0.30 มิลลิเมตร (เบอร์ 50) 5-30 0.15 มิลลิเมตร (เบอร์100) 0-10 มิลลิเมตร

การทดสอบความต้านทานกัดกร่อนการสึดกร่อนของหินโดยเครื่องทดสอบลอสแองเจลีส (Abrasion Test by Angeles Machine)

การทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของหินโดยเครื่องทดสอบลอสแองเจลีสทำได้จากการวัดค่าความสึกกร่อนของมวลรวม จากการะแทกและการเสียดสีลูกเหล็กทรงกลม ซึ่งมีขนานตามที่กำหนดและมีจำนวนขึ้นอยู่กับขนาดคละของตัวอย่างทดสอบในขณะที่ถังหมุนรอบตัวเองจะมีแผ่นเหล็กตั้งฉากกับผนังของถัง จะพาตัวทดสอบลูกเหล็กกลมขึ้นไปพร้อมกัน เมื่อตัวอย่างทดสอบกับลูกเหล็กกลมอยู่สูงขึ้นจะตกลงมากระแทกกับผนังตรงข้ามของถังเหล็ก กระบวนการนี้จะทำการซ้ำๆ ไปเรื่อย จนครบจำนวนรอบ จากนั้นตัวอย่างทดสอบออกจากถัง แล้วนำมาแยกด้วยตะแกรงเพื่อหาเปอร์เซ็นการศึกกร่อน จากมาตรฐาน ASTM C33 หินที่ใช้งานคอนกรีตต้องรับแรงเสียดทานมากเช่นงานถนน ซึ่งจะต้องมีการสึกกร่อนไม่เกิน 35 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเดิมจึงเหมาะสมกับการนำมาผสมคอนกรีต

มาตรฐานการทดสอบหาค่าความหนาแน่นสัมพันธ์และค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบ (Standard Test Method for Relative Density and Absorption of Coarse Aggregates)

การดูดซึมน้ำ (Absorption) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ของมวลรวมแต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ที่ผิวนอกของมวลรวม

ขนาดระบุใหญ่สุด (Nominal Maximum Size) หมายถึง ขนาดช่องผ่านของตะแกรงเล็กที่สุดที่มวลรวมสามารถผ่านได้ทั้งหมดหรือมีสัดส่วนการผ่านตระแกรงเป็นไปตามไปตามที่กำหนด

ความหนาแน่น (Density) หมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาณ

ความหนาแน่นสภาพอบแห้ง (Density Oven-Dry) หมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของมวลรวมในสภาพอบแห้งปริมาตรที่รวมช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้

ความหนาแน่นสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Density Saturated-Surface-Dry) หมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของมวลรวมในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งปริมาณที่รวมช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้

ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) หมายถึง อัตราส่วนของมวลต่อหนึ่งหน่วยของมวลรวมปริมาตรที่ไม่รวมช่องว่างน้ำซึมผ่านได้

2.7 น้ำ (Water)

2.7.1 น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตให้ใช้น้ำประปา

2.7.2 ในกรณีที่หาน้ำประปาไม่ได้ต้องเป็นน้ำจืดปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีตและเหล็กเสริม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.8 สารผสมเพิ่ม (Admixtures)

2.8.1 สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) จะต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.733 : สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับคอนกรีต สามารถใช้สารเคมีผสมเพิ่มปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตได้เช่น ก. สารลดน้ำ (Water Reducers หรือ Plasticizers) เพื่อลดปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของ คอนกรีตโดยที่ความสามารถในการเทได้ของคอนกรีตคงเดิม หรือเพื่อเพิ่มความสามารถใน การเทได้ของคอนกรีตโดยคงปริมาณน้ำต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตไว้ ข. สารเร่งการแข็งตัว (Accelerators) เพื่อลดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตให้สั้นลง ค. สารหน่วงการแข็งตัว (Retarders) เพื่อยืดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตให้ยาวนานขึ้น

2.8.2 การใช้สารเคมีผสมเพิ่มมากกว่า 1 ชนิดในส่วนผสมเดียวกันจะต้องคำนึงถึงผลที่มีต่อกันของสารเคมีผสมเพิ่มแต่ละชนิดด้วย

2.9 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Concrete Mix Design) ตามมาตรฐาน ACI

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)
2. มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate : ทราย)
3. มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate : หินย่อย)
4. น้ำ (Water)

2.9.1 วิธีการออกแบบ มาตรฐานการออกแบบคอนกรีต หลักในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะต้องออกแบบคอนกรีตให้มีกำลังอัดมากกว่ากำลังอัดของงานที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เพื่อสร้างความเชื่อมั่นว่าเมื่อนำคอนกรีตไปใช้งานแล้วจะมีกำลังอัดไม่น้อยกว่ากำลัง อัดของที่งานกำหนด แม้ว่าส่วนผสมคอนกรีตจะมีความผิดเพี้ยนไปบ้างไม่ว่าจะเกิดจากสาเหตุใดก็ตาม ดังสมการที่ (2-1)

$$f_{cr} = f'_c + k\,s \quad \mathbf{(2\text{-}1)}$$

f_{cr} = กำลังอัดเป้าหมาย (Target Strength)

f'_c = กำลังอัดที่ต้องการ (Required Strength)

s = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากผลการทดสอบคอนกรีต

k = ค่าคงที่ ดังตารางที่ 2-3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค่าร้อยละของกำลังที่ต่ำกว่า f_c'	ค่า k
20	0.842
10	1.282
5	1.645
2.5	1.960
2	2.054
1	2.326
0	3.000

ตารางที่ 2-3 ค่าคงที่

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจำเป็นต้องหาจากแท่งตัวอย่าง จำนวนอย่างน้อย 30 ค่า จึงจะให้ความเชื่อถือทางสถิติได้เพียงพอ แต่ถ้าการทดสอบน้อยกว่า 30 ค่า ค่าคงที่ k ในตารางที่ 2.7 อนุโลมให้ใช้ได้โดยใช้ตัวคูณ ดังตารางที่ 2-4

จำนวนตัวอย่าง	ตัวคูณสำหรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
น้อยกว่า 15	ใช้ตารางที่ 4
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 หรือมากกว่า	1.00

ตารางที่ 2-4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจำเป็น

ในกรณีที่ไม่มีผลการทดสอบแท่งตัวอย่าง หรือมีผลการทดสอบน้อยกว่า 15 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่จะต้องผลิตต้องสูงกว่ากำลังอัดที่กำหนด ดังตารางที่ 2-5

ค่ากำลังอัดที่กำหนด (f_c')	กำลังอัดที่ต้องเพิ่ม
น้อยกว่า 210	70
210 – 350	85
350 หรือมากกว่า	100

ตารางที่ 2-5 ส่วนเผื่อเมื่อไม่มีผลทดสอบกำลังอัดแท่งตัวอย่าง

การออกแบบตามมาตรฐานอเมริกาในการหาสัดส่วนผสมของคอนกรีตธรรมดา (Normal Weight Concrete) ตามมาตรฐานของอเมริกานี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ออกแบบต้องทราบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ผสมคอนกรีต ดังนี้

<u>ปูนซีเมนต์</u>

- ความถ่วงจำเพาะ (สามารถใช้ค่า 3.15 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1)

<u>มวลรวม (มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ)</u>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ
- ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ
- ความชื้นทั้งสภาพอิ่มตัวผิวหน้าแห้ง (ค่าการดูดซึม) และสภาพขณะใช้งานของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ
- พิกัดความละเอียดของมวลรวมละเอียด (Fineness Modulus, F.M.)
- หน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ

<u>น้ำ</u>

- ความถ่วงจำเพาะ
- ความหนาแน่น

<u>สารเคมีผสมเพิ่ม</u>

- อัตราการใช้

โดยมีขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต ดังนี้

1. เลือกค่ายุบตัวที่เหมาะสม คำแนะนำตาม ตารางที่ 2-6
2. เลือกขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ ให้พิจารณาเลือกใช้ขนาดใหญ่ที่สุดแต่ต้องไม่เกินกว่า
    2.1 ขนาด 1/5ของส่วนที่แคบที่สุดของโครงสร้างที่ไม่เสริมเหล็ก
    2.2 ขนาด 3/4 ของระยะเรียงเหล็กเสริมที่แคบที่สุดหรือระหว่างเหล็กเสริมกับแบบหล่อ
    2.3 ขนาด 1/3 ของความหนาแผ่นพื้นที่วางอยู่บนดิน
3. ประมาณปริมาณน้ำและฟองอากาศที่จะเกิดขึ้นในคอนกรีต (ปริมาตร 1 ลบ.ม.) คำแนะนำตามตารางที่ 2-7
4. เลือกอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์คำแนะนำตาม ตารางที่ 2-8
5. คำนวณปริมาณปูนซีเมนต์ = ขั้นตอนที่ 3 ÷ ขั้นตอนที่ 4
6. คำนวณปริมาณมวลรวมหยาบ = ปริมาตรของมวลรวมหยาบ (ตารางที่ 2-9) x หน่วยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ
7. คำนวณปริมาณของมวลรวมละเอียด มี 2 วิธี คือ
    7.1 วิธี Weight Method

น้ำหนักมวลรวมละเอียด = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (ตารางที่ 2-10) – น้ำหนักของวัสดุผสมยกเว้นมวลรวมละเอียด

    7.2 วิธี Absolute Volume

ปริมาตรของมวลรวมละเอียด = ปริมาตรของคอนกรีต – ปริมาตรของวัสดุผสมยกเว้นมวลรวมละเอียด

น้ำหนักมวลรวมละเอียด = ปริมาตรของมวลรวมละเอียด x ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด x หน่วยน้ำหนักของน้ำ

8. ปรับส่วนผสมตามสภาพความชื้นของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

9. ทำการทดลองผสมเพื่อตรวจสอบดูความสามารถเทได้และกำลังอัดของคอนกรีต

10. หากเหมาะสมให้หยุดการทดลอง แต่ถ้าหากไม่เหมาะสมให้กลับไปดำเนินการตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ใหม่

ประเภทของงาน	ค่ายุบตัว (เซนติเมตร)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
งานคอนกรีตขนาดใหญ่	7.5	2.5
พื้นถนน	8.0	3.0
โครงสร้างทั่วๆ ไป	10.0	5.0
เสาหรือผนังบาง	12.5	7.5
โครงสร้างที่มีเหล็กเสริมหนาแน่น	15.0	10.0

ตารางที่ 2-6 ค่ายุบตัวของคอนกรีตที่ใช้สำหรับการก่อสร้างประเภทต่างๆ

ค่ายุบตัว (เซนติเมตร)	ปริมาณน้ำ เป็นกิโลกรัม ต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร สำหรับวัสดุผสมขนาดต่างๆ							
	$\frac{3}{8}$ นิ้ว	$\frac{1}{2}$ นิ้ว	$\frac{3}{4}$ นิ้ว	1 นิ้ว	$1\frac{1}{2}$ นิ้ว	2 นิ้ว	3 นิ้ว	6 นิ้ว
คอนกรีตที่ไม่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Non-Air Entraining Concrete)								
2.5 – 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 – 10	228	216	205	193	181	169	145	124
12.5 – 15.0	243	228	216	202	190	178	160	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
คอนกรีตที่มีสารกระจายกักฟองอากาศ (Air Entraining Concrete)								
2.5 – 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 – 10	202	193	184	175	165	157	133	119
12.5 – 15.0	216	205	197	184	174	166	154	-
ปริมาณฟองอากาศ (%) โดยปริมาตร	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3

ตารางที่ 2-7 ปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับค่ายุบตัวและวัสดุผสมขนาดต่างๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ โดยน้ำหนัก	
	คอนกรีตที่ไม่กระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตที่กระจายกักฟองอากาศ
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

ตารางที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ชนิดของโครงสร้าง	โครงสร้างที่เปียกตลอดเวลาหรือมีการเยือกแข็งและการละลายของน้ำสลับกันบ่อยๆ (เฉพาะคอนกรีตกระจายกักฟองอากาศเท่านั้น)	โครงสร้างในน้ำทะเลหรือสัมผัสกับซัลเฟต
(1) โครงสร้างบางที่มีเหล็กหุ้มน้อยกว่า 3 ซม.	0.45	0.40*
(2) โครงสร้างอื่นๆ ทั้งหมด	0.50	0.45*

ตารางที่ 2-9 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้สำหรับคอนกรีตในสภาวะเปิดเผยรุนแรง

ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ นิ้ว (มม.)	ปริมาตรของวัสดุผสมหยาบในสภาพแห้งและอัดแน่นต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตสำหรับค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียดต่างๆ กัน			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8 (9.5)	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2 (12.5)	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4 (19)	0.66	0.64	0.62	0.60
1 (25)	0.71	0.69	0.67	0.65
1/2 (37.5)	0.76	0.74	0.72	0.70
2 (50)	0.78	0.76	0.74	0.72
3 (75)	0.81	0.79	0.77	0.75
6 (100)	0.87	0.85	0.83	0.81

ตารางที่ 2-10 ปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดโตสุดของมวลรวมหยาบ นิ้ว (มม.)	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต	
	คอนกรีตที่ไม่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศ	คอนกรีตที่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศ
3/8 (10 มม.)	2,280	2,200
1/2 (12.5 มม.)	2,310	2,230
3/4 (20 มม.)	2,345	2,275
1 (25 มม.)	2,380	2,290
1 1/2 (40 มม.)	2,410	2,350
2 (50 มม.)	2,445	2,345
3 (75 มม.)	2,490	2,405
6 (150 มม.)	2,530	2,435

ตารางที่ 2-11 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ

2.10 การบ่มคอนกรีต (Curing)

การบ่ม (Curing) คือ ชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การทำให้คอนกรีตคงสภาพของปริมาณความชื้น และอุณหภูมิตลอดช่วงเวลาแรกเพื่อให้ได้คุณสมบัติของคอนกรีตตามต้องการ การบ่มจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตคอนกรีต กำลังและความทนทานของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเต็มที่เมื่อได้รับการบ่ม

หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต มีด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. ปริมาณความชื้นที่เพียงพอ ปริมาณผสมคอนกรีตทั่วไปนั้นมีการสูญเสียน้ำจากการระเหยมากเกินไปทำให้ปริมาณน้ำลดลงอย่างมาก ทำให้คอนกรีตไม่ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ผลกระทบนี้ควรได้รับการป้องกันโดยการเพิ่มน้ำหรือป้องกันการระเหย โดยผลกระทบของน้ำที่สูญเสียไปนั้นส่งผลให้คุณสมบัติของคอนกรีตลดลง และยังส่งผลให้เกิดการแตกร้าวจากการหดตัวยแบบพลาส

2. อุณหภูมิที่เหมาะสม การเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ โดยจะเกิดได้ช้าหากมีอุณภูมิที่ต่ำและเกิดได้อย่างรวบรวมเมื่ออุณภูมิสูงขึ้น โดยอุณภูมิของคอนกรีตในระยะแรกมีผลกระทบจากหลายสิ่งเช่น อุณภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ การระเหยของน้ำระหว่างการผสมหรือน้ำที่ใช้บ่มคอนกรีตนั้นช่วยระบายความร้อน ซึ่งเป็นผลดีแต่การระเหยต้องไม่มากจนเกินไปจนทำให้กำลังอัดลดลง โดยสามารถรักษาความชื้นของคอนกรีตได้ เช่น การฉีดน้ำ พรมน้ำ หรือ การใช้วัสดุที่มีความชื้นคลุมบนผิวของคอนกรีต เป็นต้น

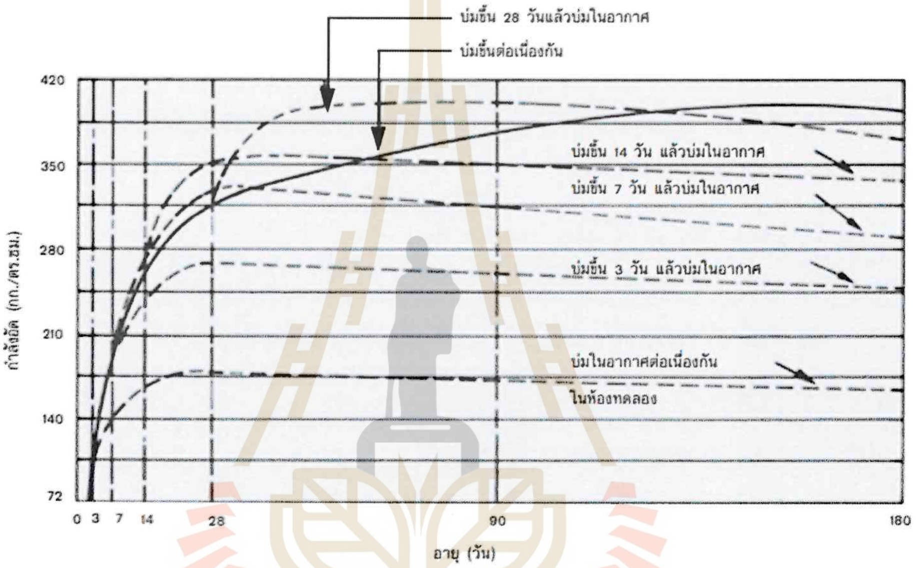
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วัตุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ

1. เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน

2. เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่มอาจหมายถึง การควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชั่นให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว



รูปที่ 2-5 แสดงอิทธิพลของการบ่มต่อกำลังอัดของคอนกรีต

2.11 มาตรฐานการทดสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต (COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE)

<u>การทดสอบ</u>

1. การวางแท่งทดสอบบนเครื่องกดต้องเป็นไปตามนี้

- ผิวแผ่นเหล็กด้านสัมผัสกับแท่งทดสอบต้องสะอาดปราศจากน้ำมัน
- จัดแนวศูนย์กลางของแผ่นเหล็กตั้งตัวบนและตัวล่างให้อยู่ในแนวเดียวกัน
- การวางแท่งทดสอบต้องให้แนวแกนของแท่งทดสอบทับกับแนวศูนย์กลางของเครื่องกดทดสอบ
- ผิวแผ่นเหล็กต้องสัมผัสกับแท่งทดสอบแนบสนิท

2. เมื่อวางแท่งทดสอบบนเครื่องกดทดสอบ และจัดให้แผ่นเหล็กสัมผัสกับแท่งทดสอบแนบสนิทดีแล้ว จึงเริ่มให้น้ำหนักกดอย่างสม่ำเสมอ โดยมีอัตราคงที่อยู่ในช่วง 1.43 ถึง 3.47 กิโลกรัมต่อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ในช่วงครึ่งแรกของน้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งทดสอบจะรับได้นยอมให้ใช้อัตรา การกดสูงกว่ากำหนดได้ และห้ามปรับอัตราการกดหรือส่วนใด ๆ ของเครื่องทดสอบในขณะที่แท่ง ทดสอบอยู่ในช่วงจุดคราก (YIELD POINT) และจุดวิบัติ (FAILURE)

3. ให้ทำการกดจนกระทั่ง แท่งทดสอบถึงจุดวิบัติ บันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งทดสอบ สามารถรับได้

<u>การคำนวณ</u>

การคำนวณ ค่าความต้านแรงอัดของแท่งทดสอบให้ละเอียด ถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง ได้จากสูตร

$$\text{ความต้านทานอัดของแท่งทดสอบ (กิโลเมตรต่อตารางเซนติเมตร)} = \frac{\text{น้ำหนักกดสูงสุดที่แท่งทดสอบรับได้ (กิโลกรัม)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของแท่งทดสอบ(ตารางเซนติเมตร)}}$$

การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของแท่งทดสอบ ให้มีความละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง ได้จาก สูตร

$$\text{ความหนาแน่นของแท่งทดสอบ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \frac{\text{น้ำหนักของแท่งทดสอบ (กิโลกรัม)}}{\text{ปริมาตรของแท่งทดสอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

ถ้าแท่งทดสอบที่ได้จากการเจาะมีส่วนสูงน้อยกว่า 2 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางให้แก้ไขค่าความต้าน แรงอัดตาม ตารางที่ 2-13

อัตราส่วนความสูง ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทดสอบ	ตัวคูณสำหรับแก้ไขค่าความด้านทานแรงอัด
1.75	0.99
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

ตารางที่ 2-12 อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางกับตัวคูณที่ใช้แก้ไขค่าความต้านแรงอัด

2.12 มาตรฐานการทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีต (FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE)

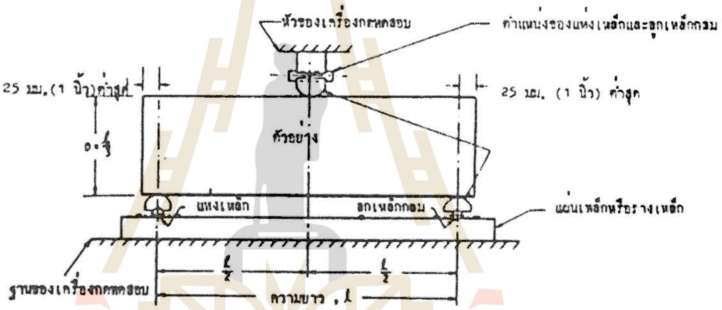
วิธีการทดสอบนี้ ครอบคลุมถึงการทดสอบหาการรับแรงดัดของคอนกรีต โดยสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีใช้แรงกด หนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (CENTER-POINT LOADING) และวิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสอง เป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน (THIRD-POINT LOADING)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

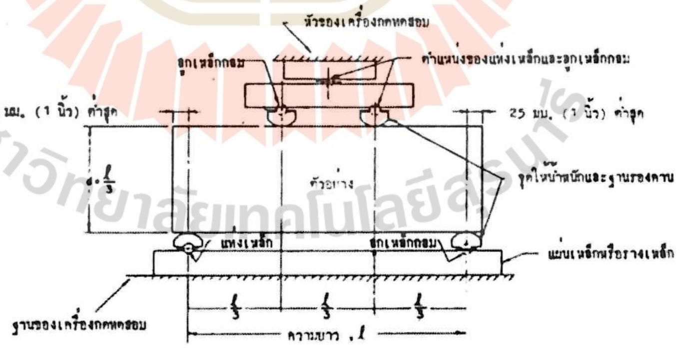
<u>การทดสอบ</u>

1. วางชิ้นทดสอบลงบนฐานรองรับคาน วางหัวกดให้ตำแหน่งของหัวกด คานและฐานรองคานอยู่ตามกำหนด โดยวิธีใช้แรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน ให้จัดตำแหน่งเครื่องมือตามกำหนดในรูปที่ 2-6 ส่วนการทดสอบวิธีใช้แรงกดคานสองจุดให้จัดตำแหน่งเครื่องมือตามกำหนดใน **รูป 2-7**

2. ปรับอัตราการกดเครื่องทดสอบด้วยแรงประมาณร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 6 ของแรงประลัย (ULTIMATE LOAD) แล้วค่อยตรวจสอบผิวสัมผัสของตัวกดกับคาน และฐานรองคานกับคานดูว่ามีช่องขนาดกว้างกว่า 0.15 มิลลิเมตร ในช่วง 25 มิลลิเมตร หรือไม่ ถ้ามีให้แต่งคอนกรีตที่บริเวณช่วงนั้นๆด้วยการฝนให้เรียบ ช่องที่ขนาดกว้างน้อยกว่า 0.15 มิลลิเมตร ในช่วง 25 มิลลิเมตร อาจอุดได้โดยการวางแผ่นหนัง (LEATHER SHIM) ไว้ระหว่างผิวสัมผัส แผ่นหนังที่ใช้จะต้องมีขนาดเท่ากับ 6.4 มิลลิเมตร กว้าง 25 มิลลิเมตร ถึง 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 2-6 วิธีใช้แรงกด หนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (CENTER-POINT LOADING)



รูปที่ 2-7 วิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสอง เป็นตำแหน่งที่แบ่งคานออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน (THIRD-POINT LOADING)

3. เพิ่มแรงกดอย่างต่อเนื่อง และไม่มีการกระตุกในช่วงครึ่งแรกของแรงประลัย อาจเพิ่มแรงได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นให้เพิ่มแรงด้วยอัตราที่อยู่ในช่วง 9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที ถึง 12 กิโลเมตรต่อตารางเซนติเมตรต่อนาที (125 ปอนด์ต่อตารางนิ ิ้วต่อนาที ถึง 175 ปอนด์ต่อตารางนิ้วต่อนาที)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4. วัดด้านกว้างและลึกของคานที่บริเวณที่มีรอยแตกด้านละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของหน้าตัดที่รอยแตก พร้อมทั้งสเกตลักษณะการแตกร้าวของคานตัวอย่าง

<u>การคำนวณ</u>

การคำนวณค่าการรับแรงดัดจะกำหนดให้ อยู่ในรูปของ โมดูลัสของการแตกหัก (MODULUS OF RUPTURE) ดังต่อไปนี้

1. สำหรับการกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (CENTER-POINT LOADING) สามารถหาค่าการรับแรงดัดได้จากสมการ (2-2)

$$R = 3\ Pl/2bd2 \qquad \textbf{(2-2)}$$

2. สำหรับการกดสองจุด โดยตำแหน่งที่จุดทั้งสองแบ่งคานออกเป็นสามส่วน (THIRD-POINT LOADING) สามารถหาค่าการรับแรงดัดได้จาก**สมการ (2-3)**

2.1 เมื่อรอยแตกอยู่ในช่วงกลางคาน

$$R = Pl/2bd2 \qquad \textbf{(2-3)}$$

2.2 เมื่อรอยแตกอยู่นอกช่วงกลางคาน และห่างจากช่วงกลาง ไม่เกินร้อยละ 5 ของช่วงคาน ให้ใช้**สมการ (2-4)**

$$R = 3\ Pl/2bd2 \qquad \textbf{(2-4)}$$

เมื่อ

R = ค่าการรับแรงดัด เป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

P = แรงที่จุดวิบัติของคาน เป็น กิโลกรัม

l = ช่วงคาน เป็น เซนติเมตร

b = ความกว้างเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก เป็น เซนติเมตร

d = ความลึกเฉลี่ยที่หน้าตัดบริเวณรอยแตก เป็น เซนติเมตร

a = ระยะเฉลี่ยของรอยแตกจากฐานรองคานด้านใกล้ที่สุดเป็นเซนติเมตร

เกณฑ์การตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้

1. การพิจารณาค่าการรับแรงดัดของคอนกรีตต้องอยู่ในช่วง ร้อยละ 11 ถึงร้อยละ 23 ของความต้านแรงอัดของแท่งทดสอบซึ่งเป็นคอนกรีตที่ผสมในครั้งเดียวกัน

2. ในกรณีของการทดสอบวิธีใช้แรงกดคานสองจุด ถ้ารอยแตกอยู่นอกช่วงกลางคานและห่างจากช่วงกลางคานเกินร้อยละ 5 ของช่วงคาน ให้ทำการทดสอบใหม่

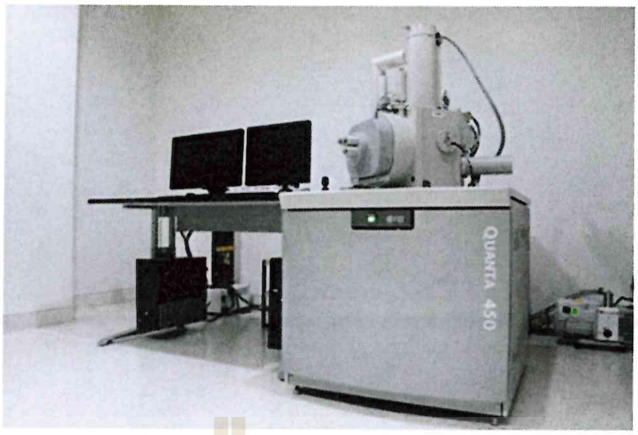
3. ค่าการรับแรงดัด ต้องคำนวณให้ละเอียด ถึง 0.35 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

2.13 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค (Chemical Composition & Microstructure Analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis) สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบชั้นสูง และสามารถหลายวิธีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับว่าต้องวิเคราะห์วัสดุตัวอย่างประเภทใด หนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในห้องแล็ปเพื่อโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้เวลาในการทดสอบไม่มาก ค่อนข้างรวดเร็ว ก็คือ การตรวจสอบด้วยเครื่องมือ Spectrometer แบบต่างๆ ด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน เช่น เทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรดด้วย FT-IR Spectroscopy (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) การวิเคราะห์และหาปริมาณธาตุของโลหะและอโลหะของแข็งด้วยเครื่องมือ Emission Spectroscopy นอกเหนือจากการใช้เครื่องมือเคมีวิเคราะห์ทางด้านสเปกโทรสโกปี (Spectroscopy Instrumentation) ยังมีการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบรูปแบบที่ใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscope) แบบต่างๆ โดยต่อไปนี้ เราจะกล่าวถึงการทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) รวมถึงกล่าวถึงเทคนิคการใช้ X-rays Detector หรือ เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS, EDX)

2.13.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เรียกย่อว่า SEM (มาจาก Scanning Electron Microscope หรือสามารถเรียกว่า X-Ray Spectroscopy ก็ได้) คือเครื่องมือที่ช่วยให สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า มีประสิทธิภาพมากกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาโดยมีกำลังขยายสูงถึง 200,000 เท่า ในการทำงานของเครื่องจะเป็นการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง (Surface) ผลลัพธ์ที่มองเห็นจะให้ภาพแบบ 3 มิติ สามารถรองการศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งทางชีวภาพและกายภาพ Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy หรืออาจถูกเรียกอีกแบบว่า Energy Dispersive X-ray Analysis เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่อาศัยปฏิสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ไปใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีหรือธาตุ ของตัวอย่าง (โลหะ เซรามิก หรือพอลิเมอร์) ในส่วนของการประยุกต์ใช้งาน ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง SEM จะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในด้านของวิทยาศาสตร์ชีวภาพวิทยาศาสตร์กายภาพ ธรณีวิทยา และงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2-8 ตัวอย่างเครื่องมือทดสอบ SEM

2.13.2 X-Ray Diffractometer (XRD) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็น การวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัว ของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของ รังสีเอกซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิด การหักเหของรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ ในปี ค.ศ. 1912 นาย **W.L.Bragg** ได้นำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของแร่ต่าง ๆ ต่อมาได้มีการประดิษฐ์คิดค้น เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรก โตมิเตอร์ขึ้นในปี 1948 และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งสามารถนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุม การทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผลเพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น XRD เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ในกลุ่มนักวัสดุศาสตร์ ธรณีวิทยา โลหะวิทยา เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของ วัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิด มีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอม ที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอม ของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัว เปรียบได้กับลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พสิษฐ์ตันดุลยกุล และ วีรยา ฉิมอ้อย (2564) การใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังประเภทกรวดสำหรับวัสดุ งานทาง งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาการนำเถ้าก้นเตาซึ่งเป็นวัสดุพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้ในการแทนที่ดินลูกรังเพื่อ เป็นวัสดุทดแทนวัสดุธรรมชาติสำหรับใช้เป็นวัสดุงานทาง โดยใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ผ่านตะแกรง 1 นิ้ว โดย นำมาแทนที่ดินลูกรังที่มีการคัดขนาดตามมาตรฐานวัสดุชั้นรองพื้นทาง ทล.-ม. 205/2532 Type A และ Type C ของกรมทางหลวง อยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 60 โดยมวลดินลูกรังแห้ง จากผลการศึกษาคุณสมบัติการบดอัดของดินลูกรังแทนที่ด้วยเถ้า ก้นเตาพบว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความชื้น เหมาะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับคุณสมบัติด้านกำลังรับน้ำหนักพบว่าค่า CBR มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการ แทนที่เถ้าก้นเตาที่เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 30 หลังจากนั้นค่า ซีบีอาร์ มีค่าสูงขึ้น หากเทียบกับมาตรฐานวัสดุมวลรวมชั้นรอง พื้นทาง พบว่าการบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสมมีค่า CBR ผ่านมาตรฐาน และการบดอัดด้วยความชื้นเหมาะสม+2% มีค่า CBR ผ่านมาตรฐานเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าก้นเตาอยู่ในช่วง ร้อยละ 40 – 60แต่ไม่ได้ช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรัง

ศิระ อาทมาท (2562) ผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของทรายในคอนกรีตต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต จากผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีความต้านทานคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ30 คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ50 มีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวและความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตมากที่สุด เมื่อควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่เท่ากัน พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ10 มีค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตสูงขึ้นนและมีระยะเวลาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมนานขึ้น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศาสน์ สุขประเสริฐ (2559) การประยุกต์ใช้ยางพาราและดินซีเมนต์สำหรับงานก่อสร้างถนนดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพาราร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีสมบัติทางวิศวกรรมกรรมตามมาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ โดยมีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 19.58 กก./ตร.ซม. และโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 1,116.2 กก./ตร.ซม. เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัด เท่ากับ 16.78 กก./ตร.ซม. และโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 1,025.9 กก./ตร.ซม. พบว่าดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารามีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 16.67 และโมดูลัสความยืดหยุ่น เพิ่มขึ้น ร้อยละ 8.80 ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยาโพลิเมอร์ ซึ่งมี กำลังรับแรงอัด เท่ากับ 21.25 กก./ตร.ซม. และโมดูลัสความยืดหยุ่น เท่ากับ 1,278.8 กก./ตร.ซม. พบว่า ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางพารามีกำลังรับแรงอัดลดลง ร้อยละ 7.89 และโมดูลัส ความยืดหยุ่นลดลง ร้อยละ 12.44 อย่างไรก็ตาม ดินซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำ

ยางพารามีค่า กำลังรับแรงอัด มากกว่า 17.50 กก./ตร.ซม. ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ที่ ทล.-ม. 204/2533 ดังนั้น ผลการวิจัยนี้ยืนยันว่าสามารถประยุกต์ใช้น้ำยางพาราเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพดิน ซีเมนต์สำหรับเป็นวัสดุพื้นทางในโครงสร้างถนน แต่ก็ยังมีสมบัติที่ด้อยกว่าดินซีเมนต์ที่ปรับปรุง

ศุภชัย ไทยพุ่ม ชูศักดิ์ ศีรีรัตน์ (2562) การศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนต์และน้ำยาพาราเพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับงานทาง จากผลการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐานพบว่าปริมาณยางพาราที่เหมาะสมที่สุด 2 อันดับแรกคือ ร้อยละ 6 และร้อยละ 8 สำหรับปริมาณปูนซีเมนส์ที่เหมาะสมซึ่งพิจารณาจากผลการทดสอนแรงอัดแกนเดียวคือ ร้อยละ 5 สำหรับงานถนนที่มีการจราจรปริมาณน้อยมาก ซึ่งสรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมได้แก่ B95%C5%R6% และ B93%C7%R6% นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลของการแช่น้ำมีผลทำให้กำลังของเถ้าก้นเตาผสมปูนซีเมนส์และน้ำยาลดลงประมาณร้อยละ 5 เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความต้านทานต่อการไถลในสภาพเปียกพบว่าอยู่เกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้งานถนนสารธรณะในทางตรงและมีความลาดชันน้อยได้

วุฒิกรณ์ โสพรรณรัตน (2563) การปรับปรุงคุณภาพดินทรายโดยใช้เถ้าก้นเตาและปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุถมและวัสดุงานทาง การศึกษาประกอบไปด้วยการทดสอบกำลังรับแรงอัด แบบไม่ถูกจำกัด (UCS) การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Mr) และการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้คลื่น สั่นสะเทือน Free-Free Resonance (FRR) สามารถนำมาใช้ในการ ประเมินกำลังของดินทรายปรับปรุงคุณภาพได้และสามารถใช้ในการหา คุณสมบัติด้านโมดูลัสสั่นสะเทือนและอัตราส่วนปัวส์ซอง ผลการทดสอบ พบว่าความเร็วคลื่น P-wave และ S-wave รวมไปถึงค่าโมดูลัสสั่นสะเทือน มีความสอดคล้องกันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณการแทนที่ดินทรายด้วยเถ้าก้นเตาปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ทุกสัดส่วนซีเมนต์และระยะเวลาบ่มมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (UCS) ค่า California bearing ratio (CBR) และค่าโมดูลัสคืนตัว (Mr) มีค่าสูงสุดที่สัดส่วนนี้ ดินทรายปรับปรุง คุณภาพด้วยเถ้าก้นเตาและซีเมนต์สามารถจำแนกได้เป็นชั้นพื้นทางดิน ซีเมนต์ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม. 204/2556 กรมทางหลวง ประเทศไทย

เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2546) การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต จากการศึกษาพบว่าค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม ส่วนกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถพัฒนากำลังอัดจนสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันขึ้นไป และอายุ 90 วันมีกำลังอัดสูงสุดร้อยละ 113 ของคอนกรีตควบคุม สำหรับคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาความละเอียดและอัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนส์

เท่ากันพบว่าคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดสูงกว่า มีค่าร้อยละกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ออกแบบกำลังอัดต่ำกว่า ผลจากกการทดลองสรุปว่าเถ้าก้นเตาบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตได้อย่างดี

ทยุติ อิสริยฤทธานนท์ (2546) ได้ศึกษากำลังอัด ความต้านทานต่อการขัดสีและความต้านทานต่อคลอไรด์ ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่มวลรวมละเอียด พบว่าเถ้าก้นเตามีรูปร่างไม่แน่นอน พรุนมาก เปราะ ความชื้นสูง ดูดซึมมาก ละเอียดมากกว่าทราย เฉื่อยต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และทำให้คอนกรีตต้องใช้น้ำมากขึ้นเพื่อให้มีค่ายุบตัวเพียงพอความต้านทานการขัดสีอยู่ในช่วงร้อยละ 30-40 ของคอนกรีตควบคุม ความต้านทานต่อคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ทรายทุกส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตควบคุม และพบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาหยาบร้อยละ 10 ผสมสารลดน้ำมีการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วัสดุและวิธีการดำเนินการ

การศึกษาเรื่อง Enhancing the Mechanical and Microstructural Properties of Bottom Ash Concrete with Natural Rubber Latex for Sustainable Rigid Pavements มีวิธีในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 วิธีการวิจัย (Research Methodology)

แผนการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ (เริ่มทำวิทยานิพนธ์ เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2565) กิจกรรม /ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ทบทวนการศึกษา รวบรวมข้อมูลรวมทั้งสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. วางแผนดำเนินงาน
3. หาวัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
4. ออกแบบและขึ้นรูปชิ้นทดสอบ
5. ทดสอบชิ้นงานและส่งตรวจทางจุลภาค
6. รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล
7. สรุปผลการศึกษาและจัดทำข้อเสนอแนะ
8. จัดทำวิทยานิพนธ์
9. สอบวิทยานิพนธ์

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย นำวัสดุมาทดสอบคุณสมบัติมวลรวมด้านกายภาพและวิศวกรรม

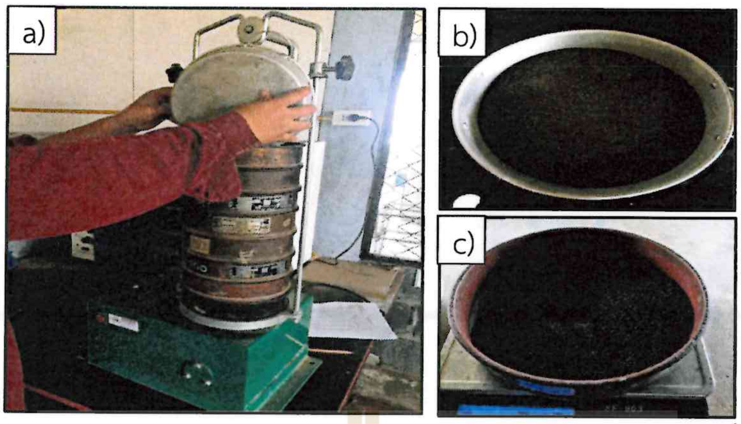
3.2.1 นำวัสดุมาทดสอบมาตรฐานมวลรวมเฉพาะในงานคอนกรีต

การกระจายของขนาดวสดมวลรวม (Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates) โดยใช้เครื่อง Sieve Shaker ตามมาตรฐาน

3.2.2 นำวัสดุมาทดสอบ American Society of Testing Materials ASTM

คือ Maximum size aggregate , Saturated surface dry specific gravity , Dry specific gravity , Dry density , Water absorption , Moisture content , Abrasion loss และ Fineness modulus

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3-1 a) การหาขนาดคละ bottom ash และ b) ,c) วัสดุมวลรวม ในเครื่อง Sieve Shake

3.2.3 ทำการผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนจำนวน 9 สูตรตัวอย่าง

ตามที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 cm. (Concrete Cube Mold) แบบหล่อคอนกรีตคานทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 7.5x7.5x30 cm. (Concrete rectangle Mold)

รูปที่ 3-2 a) และ b) เตรียมแบบหล่อคอนกรีตตามมาตรฐาน

3.3 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต (Mix Design)

Mixing Proportions of BA-NRL Concrete (fc' = 300 ksc.) slump = 5 cm.

Specimen ID	w/c	Portland	Coarse Aggregate	Fine Aggregate		NRL		Water
		Cement (kg/m^3)	Limestone (kg/m^3)	Sand (kg/m^3)	BA (kg/m^3)	r/c ratio (%)	Solid (kg/m^3)	(kg/m^3)
Normal Concrete (control mix)	0.5	370	1018	814	-	0	-	185
10%BA+0.0%NRL	0.5	370	1018	732.6	81.4	0	-	185
10%BA+1.0%NRL	0.5	370	1018	732.6	81.4	1.0	7.12	181.58
10%BA+1.5%NRL	0.5	370	1018	732.6	81.4	1.5	10.67	179.88
10%BA+2.0%NRL	0.5	370	1018	732.6	81.4	2.0	14.23	178.17
20%BA+0.0%NRL	0.5	370	1018	651.2	162.8	0	-	185
20%BA+1.0%NRL	0.5	370	1018	651.2	162.8	1.0	7.12	181.58
20%BA+1.5%NRL	0.5	370	1018	651.2	162.8	1.5	10.67	179.88
20%BA+2.0%NRL	0.5	370	1018	651.2	162.8	2.0	14.23	178.17

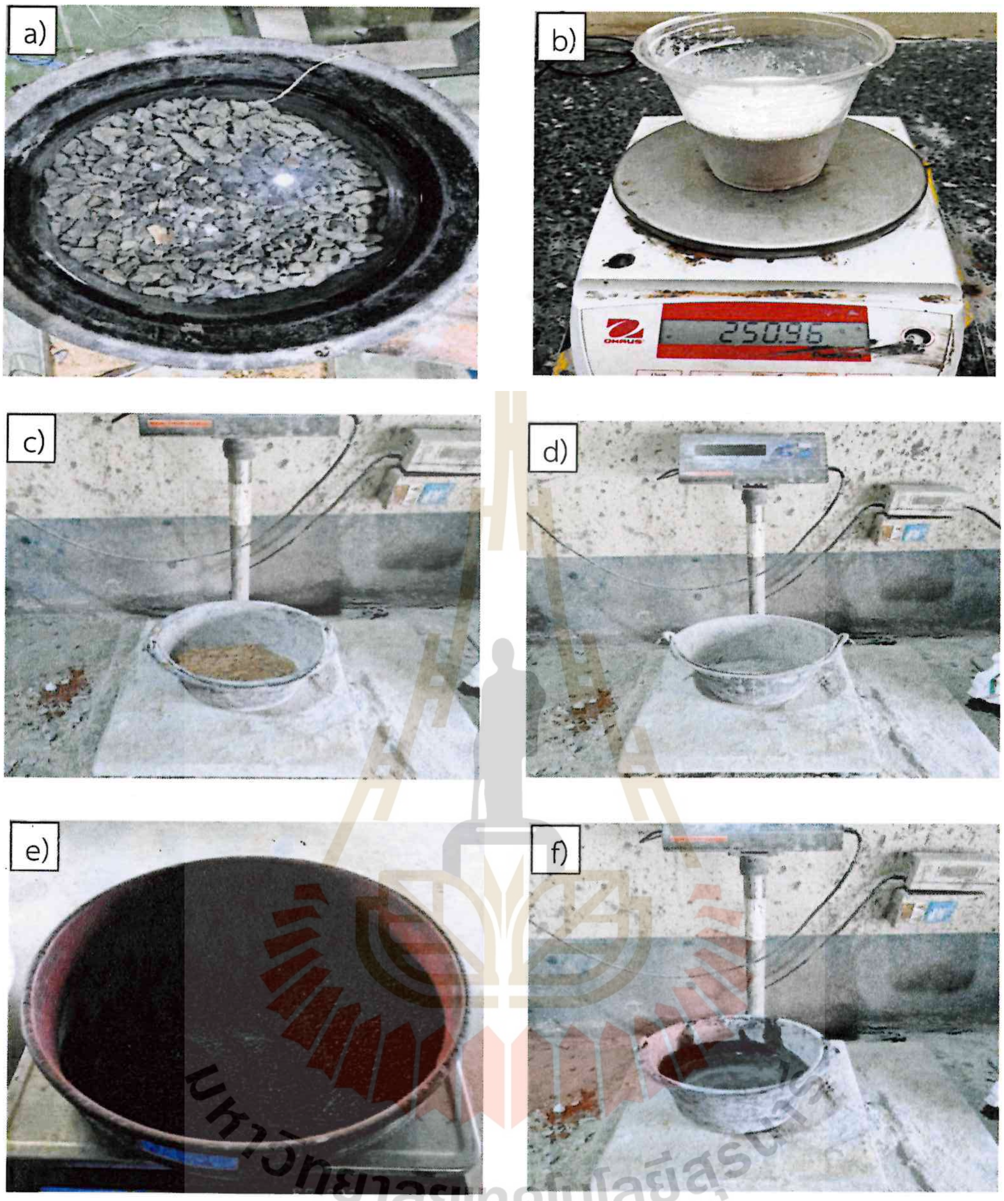
Note: r = dry rubber latex (solid content)

ตารางที่ 3-1 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต fc' = 300 ksc. slump = 5 cm.

3.4 เตรียมวัสดุเพื่อทำการผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนผสมที่ออกแบบ

1. ปูนซีเมนต์ปอตแลนท์ประเภทที่ 1
2. ทรายหยาบ (Coarse Sand)
3. หิน (Limestone)
5. เถ้าก้นเตา (bottom ash)
6. น้ำยางพารา (Natural rubber latex)
7. Slump Test
8. น้ำ (Water)

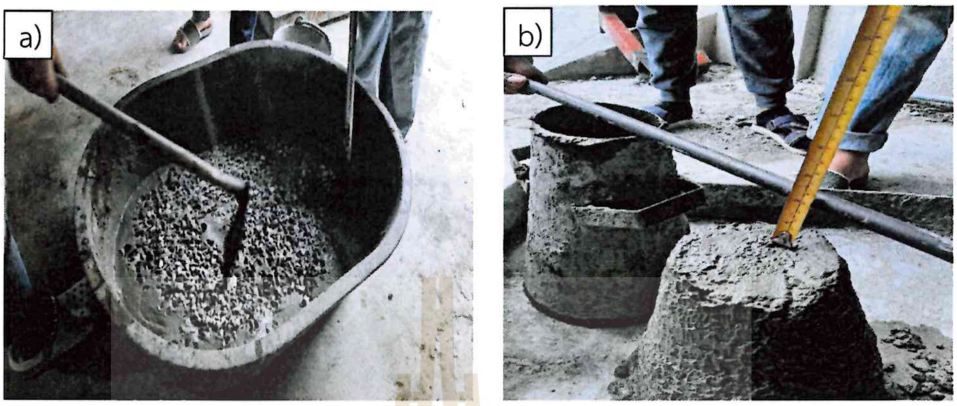
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3-3 a), b) ,c) ,d) ,e) ,c) และ f) จัดเตรียมอุปกรณ์และวัสดุตามอัตราส่วนผสมที่ออกแบบตามตารางที่ 3-1

3.5 การผสมส่วนผสม (Mixing of Concrete Mix Design)

ผสมคอนกรีตให้เข้ากันและทำการตรวจสอบการยุบตัวให้ได้ตามาตรที่ออกแบบ slump = 5 Cm.



รูปที่ 3-4 a) การผสมส่วนผสมคอนกรีต และ b) การควบคุมการยุบตัว slump test เท่ากับ 5

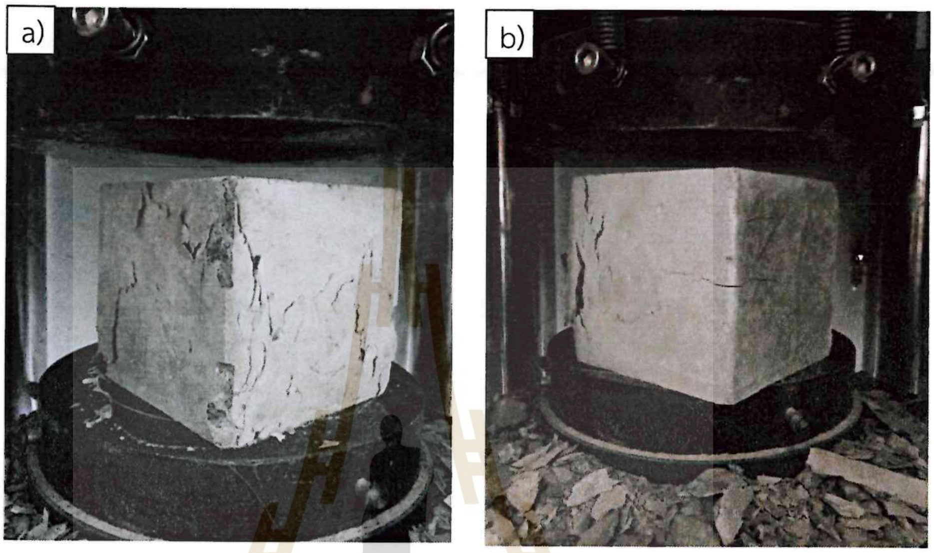
3.6 ทำการหล่อเข้าแบบและทำการบ่มคอนกรีต การบ่มคอนกรีต (CONCRETE CURING)

แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 cm (Concrete Cube Mold) และ แบบหล่อคอนกรีตคานทรงสี่เหลี่ยมฝืนผ้า (Concrete rectangle Mold) ขนาดด 7.5x7.5x30 cm แล้วทำการทิ้งไว้ให้แห้ง 24 ชั่วโมงแล้วมาแกะแบบเพื่อการบ่มน้ำ(CONCRETE CURING) คอนกรีตที่ 7, 28 วัน และ 60 ตามมาตรฐาน

รูปที่ 3-5 a) , b) ทิ้งคอนกรีต 24 ชั่วโมง ทำการแกะแบบคอนกรีตและ c) , d) บ่มคอนกรีต (CONCRETE CURING) จำนวน 7, 28 และ 60 วัน

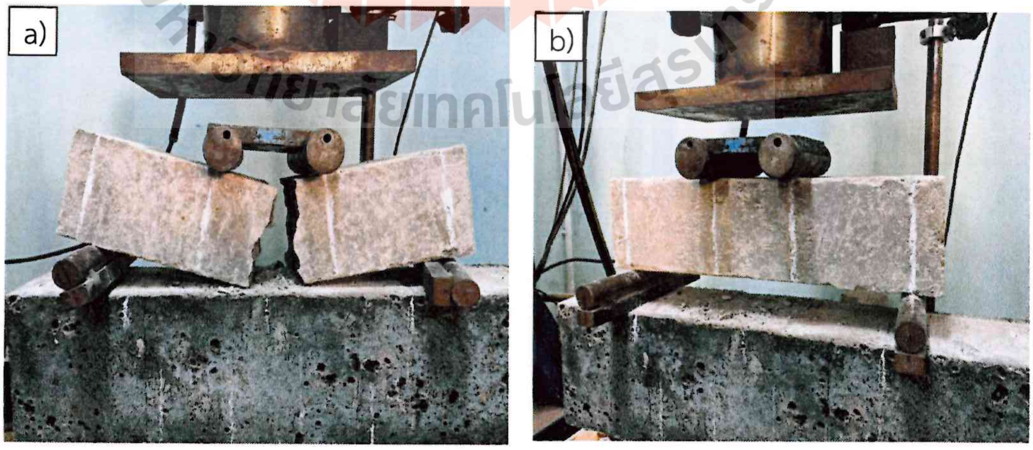
3.7 นำคอนกรีตที่หล่อตามแบบมาตรฐานมาทำการทดสอบ (compressive strength & Flexural Strength)

3.7.1 กำลังอัดของคอนกรีต (compressive strength) จากชิ้นตัวอย่างที่ 7, 28 และ 60 วัน ตามได้ทำการ CONCRETE CURING ไว้ข้างต้นและทำการจดบันทึกค่าแล้วนำไปคำนวณ



รูปที่ 3-6 a) และ b) การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (compressive strength)

3.7.2 การรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural Strength) จากชิ้นตัวอย่างที่ 7, 28 และ 60 วัน ตามได้ทำการ CONCRETE CURING วิธีใช้แรงกดคาน 2 จุด โดยให้ตำแหน่งของจุดทั้งสองเป็นตำแหน่งที่แบ่งคาออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน (THIRD-POINT LOADING) ทำการจดบันทึกค่าแล้วนำไปคำนวณ

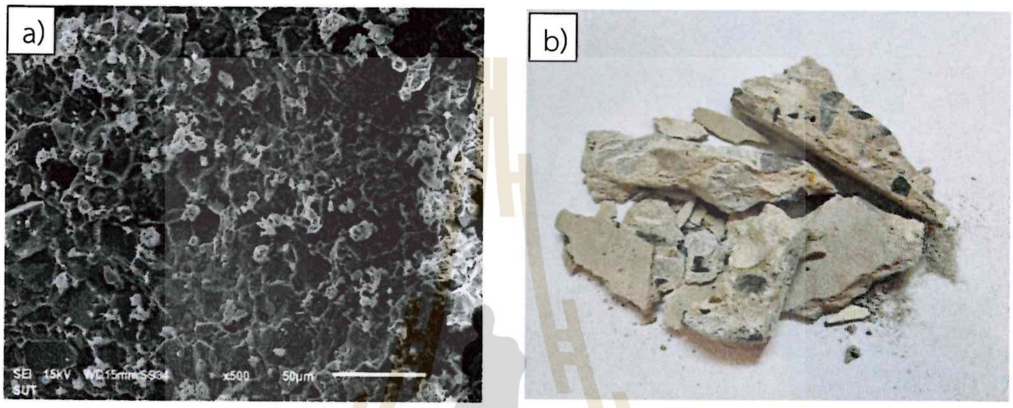


รูปที่ 3-7 a) และ b) การทดสอบการรับแรงดัดของคอนกรีต (Flexural Strength)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.8 นำตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructural Analysis)

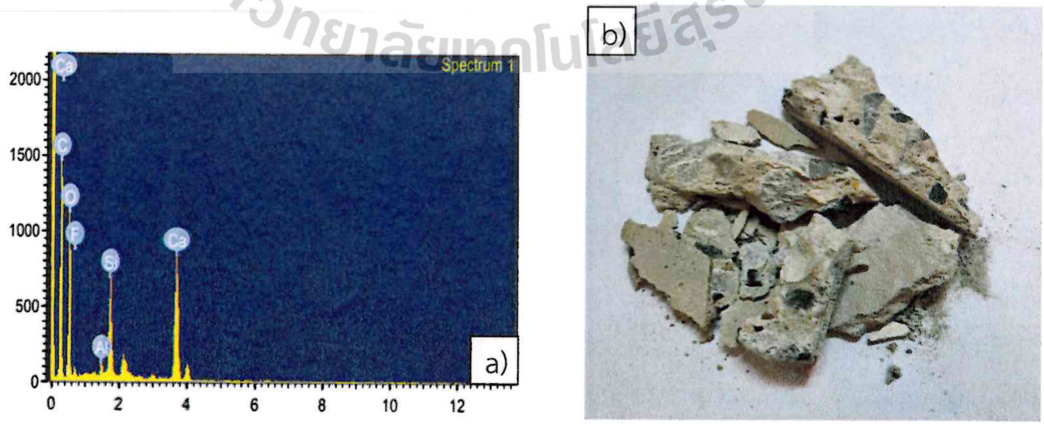
การนำชิ้นส่วนคอนกรีตโครงสร้างจุลภาคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่ศูนย์เครื่องมือเพื่อศึกษาและวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของตัวอย่างทั้งทางชีวภาพและกายภาพ กำลังขยายx500 และ กำลังขยายx2,000 และนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3-8 a) รูปการศึกษาโครงสร้างผลึกและ b) ชิ้นตัวอย่างโดยใช้ Scanning Electron Microscope กำลังขยาย x 500 และ กำลังขยาย x 2,000

นำตัวอย่างคอนกรีตทดสอบวิเคราะห์แร่วิทยา (Mineralogical Analysis)

นำตัวอย่างมาเข้าเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน หรือมาใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) และนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ต่อไป



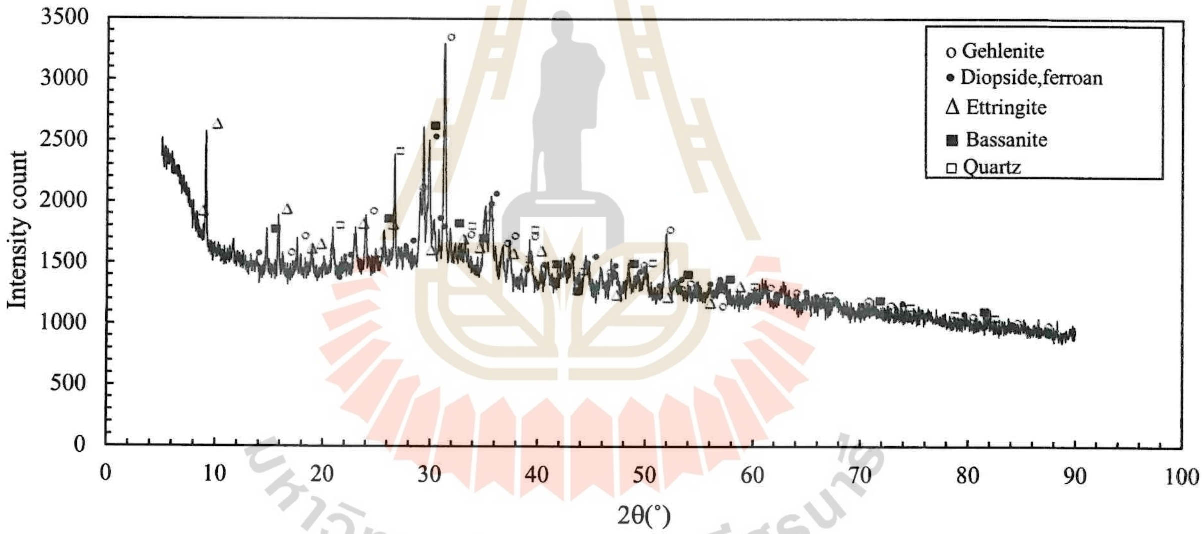
รูปที่ 3-9 a) รูปการศึกษาการวิเคราะห์ธาตุและ b) ชิ้นคอนกรีตตัวอย่างโดยการใช้ X-Ray Diffractometer (XRD)

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 เถ้าก้นเตา (BA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

การทดสอบวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffractometer (XRD) ของเถ้าก้นเตาที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) แสดงดังรูปที่ 4-1 แสดงให้เห็นถึงของสารประกอบต่างๆที่อยู่ในเถ้าก้นเตาเช่น Gehlenite, Diopside,ferroan, Ettringite, Bassanite, และ Quartz



รูปที่ 4-1 XRD pattern of BA.

Components	OPC	BA
Silicon dioxide (SiO_2)	20.9	59.50
Aluminum oxide (Al_2O_3)	4.70	25.70
Iron oxide (Fe_2O_3)	3.40	6.07
Calcium oxide (CaO)	65.40	2.92
Magnesium oxide (MgO)	1.20	0.8
Sulfur trioxide (SO_3)	2.70	-
Loss on ignition (LOI)	0.90	2.20

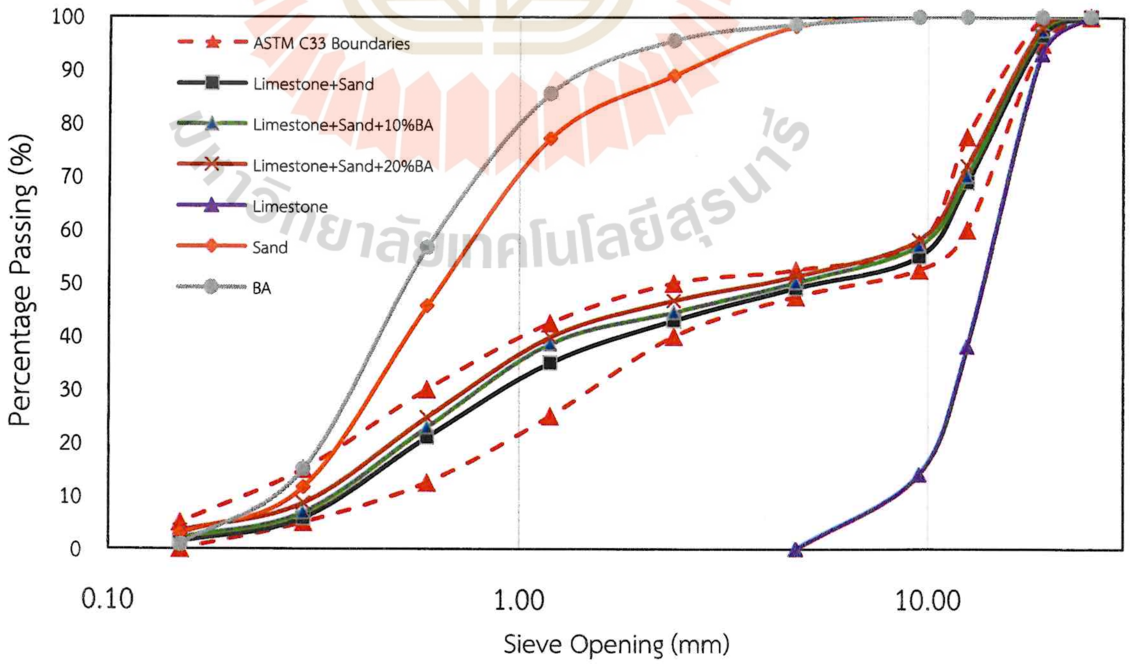
ตารางที่ 4-1 Chemical composition of OPC and BA

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

BA ได้มาจากเหมืองแม่เมาะที่ตั้งอยู่ทางภาคเหนือของประเทศไทย นำไปผึ่งลมให้แห้งก่อนเพื่อขจัดความชื้น จากนั้นจึงกรองผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มม. เพื่อขจัดอนุภาคขนาดใหญ่ และเพื่อให้แน่ใจว่ามีการกระจายขนาดที่สม่ำเสมอ BA มีความถ่วงจำเพาะของพื้นผิวแห้งอิ่มตัวที่ 2.30, ความถ่วงจำเพาะของแห้งที่ 2.10 และความหนาแน่นของแห้งที่ 1,200 กิโลกรัม/ลบ.ม. ค่าการดูดซึมน้ำ ปริมาณความชื้น และโมดูลัสความละเอียดของ BA เท่ากับ 1.50%, 2.50% และ 3.00 ตามลำดับ ตรวจสอบองค์ประกอบของสารเคมีและแร่วิทยาของ BA โดยใช้การวิเคราะห์ XRF และการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ตามลำดับ ผลลัพธ์ XRF ตามรูปที่ 4-1 เปิดเผยว่า BA มีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์สูง (59.50%) ตามด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ (25.70%) และเหล็กออกไซด์ (6.07%) รูปแบบ XRD ของ BA ตามรูปที่ 4-1 เผยให้เห็นการมีอยู่ของเฟสผลึกต่างๆ รวมถึงเกห์เลไนต์, เฟอร์โรนไดออปไซด์, เอตริงไทต์, บาสซาไนต์ และควอตซ์

4.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

4.2.1 การนำวัสดุมาทดสอบมาตรฐานมวลรวมเฉพาะในงานคอนกรีตการกระจายของขนาดวสดมวลรวม (Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates) มีขนานตะแกรงดังนี้ ขนาด 9.50 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) ขนาด 4.75 มิลลิเมตร (เบอร์ 4) ขนาด 2.36 มิลลิเมตร (เบอร์ 8) ขนาด 1.18 มิลลิเมตร (เบอร์ 16) ขนาด 0.60 มิลลิเมตร (เบอร์ 30) ขนาด 0.30 มิลลิเมตร (เบอร์ 50) และขนาด 0.15 มิลลิเมตร (เบอร์100)



รูปที่ 4-2 Gradation of studied aggregates.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการทดสอบสมบัติมาตรฐานของมวลรวมเฉพาะในงานคอนกรีตเมื่ออ้างอิงจาก American Society of Testing Materials ASTM C33: Specification for Concrete Aggregates ดังกราฟที่แสดงรูปที่ 4-2 พบว่าวัสดุที่ผสมเพื่อเตรียมผสม Limestone+Sand, Limestone +Sand10%BA และ Limestone+Sand20%BA อยู่ในขอบเขตมาตรฐาน ASTM C33 จึงสามารถนำเป็นวัสดุในงานคอนกรีตได้

4.2.2 นำวัสดุมาทดสอบคุณสมบัติมวลรวมด้านกายภาพและวิศวกรรมของ coarse and fine aggregates พบว่า สมบัติของวัสดุดังกล่าวอยู่ในมตารฐานทางด้านวิศวกรรมของ American Society of Testing Materials ASTM จึงสามารถนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ในงานวิจัยได้ ดังตารางที่ 4-2

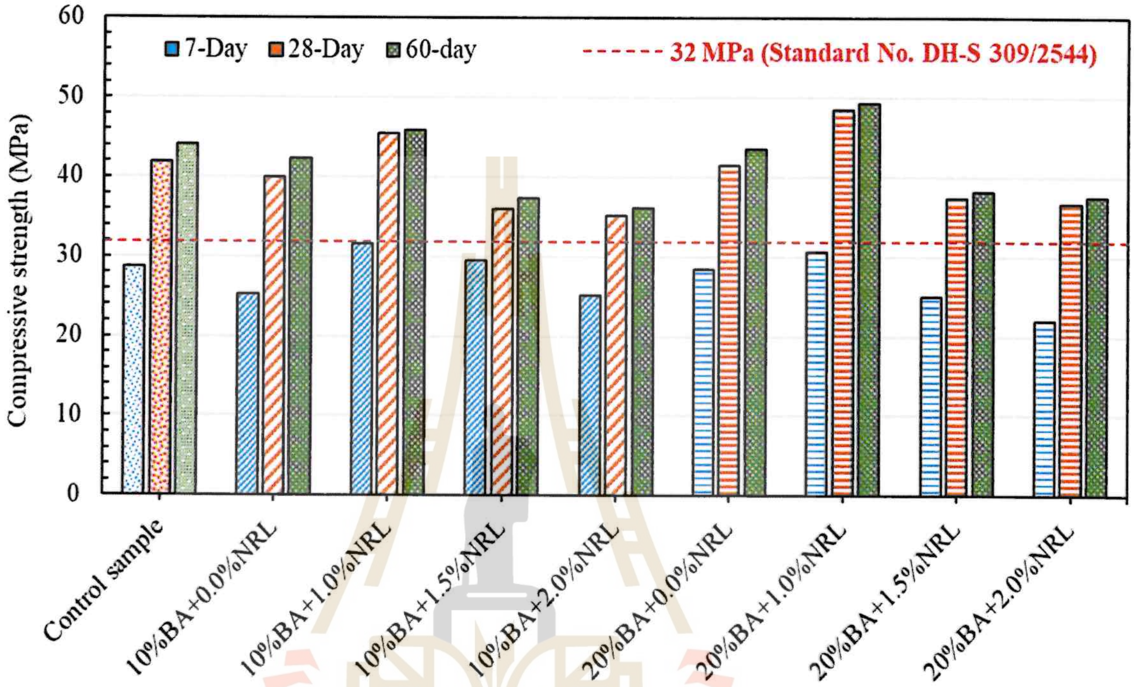
Properties	Coarse Aggregate	Fine Aggregate	
	Limestone	Sand	BA
Maximum size aggregate (mm)	19	4.75	4.75
Saturated surface dry specific gravity	2.77	2.62	2.30
Dry specific gravity	2.47	2.60	2.10
Dry density (kg/m^3)	1634	1613	1200
Water absorption (%)	1.86	0.70	1.50
Moisture content (%)	0.98	0.48	2.50
Abrasion loss (%)	22.4	-	-
Fineness modulus	-	2.75	3.00

ตารางที่ 4-2 Physical and engineering properties of coarse and fine aggregates.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3 ผลสอบความต้านแรงอัดของแท่งคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete)

4.3.1 ทดสอบหาค่าความต้านทานแรงอัดของแท่งลูกบาศก์คอนกรีตตัวอย่างขนาด 15x15x15 ซม. ระยะการบ่ม (Curing) 7, 28 และ 60 วัน



รูปที่ 4-3 Compressive strength results of studied concrete samples with various BA and NRL contents cured at 7, 28, and 60 days.

จากผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตอายุการบ่มคอนกรีตพบว่า 7, 28 และ 60 วัน แสดงในรูปที่ 4-3 ตามที่คาดการณ์ทางทฤษฎีของระยะบ่มคอนกรีตว่าการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น การให้น้ำอย่างต่อเนื่องของซีเมนต์จะมีผลต่อเนื่องต่อการรับแรงอัดเช่นกันและการการพัฒนาโครงสร้างจุลภาคที่มีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป อิทธิพลของ BA และ NRL มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของส่วนผสมกับอัตราส่วนการแทนที่ BA และปริมาณ NRL ที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ยังถูกเปรียบเทียบกับข้อกำหนดขั้นต่ำ 32 MPa ที่กำหนดโดยกรมทางหลวง (DOH) (DHS309/2544)

การแทนที่ BA ในสัดส่วนของทรายที่ 10% และ 20% โดยไม่เติม NRL ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีต control ในช่วงอายุการบ่ม ที่ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการเปลี่ยน BA 10% และ 20% ลดลง 7.2% และ 14.5% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง control จะเห็นได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตมีความแข็งแรงที่ลดลงประกอบกับความหนาแน่น

ที่ลดลงและความพรุนของ BA ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับทรายซึ่งทำให้พันธะระหว่างพื้นผิวระหว่างอนุภาค BA และเมทริกซ์ซีเมนต์อ่อนลงนอกจากนี้ รูปร่างและพื้นผิวที่ไม่ปกติของอนุภาค BA อาจขัดขวางการบรรจุและการบดอัดคอนกรีตที่เหมาะสม ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีรูพรุนมากขึ้นและลดความแข็งแรงอย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีการเปลี่ยน BA 10% (36.2 MPa) ยังคงเป็นไปตามข้อกำหนดขั้นต่ำที่ 32 MPa ที่กำหนดโดยกรมทางหลวง (DHS309/2544) โดยส่วนผสมที่มีการเปลี่ยน BA 20% (33.8 MPa) นั้นสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย

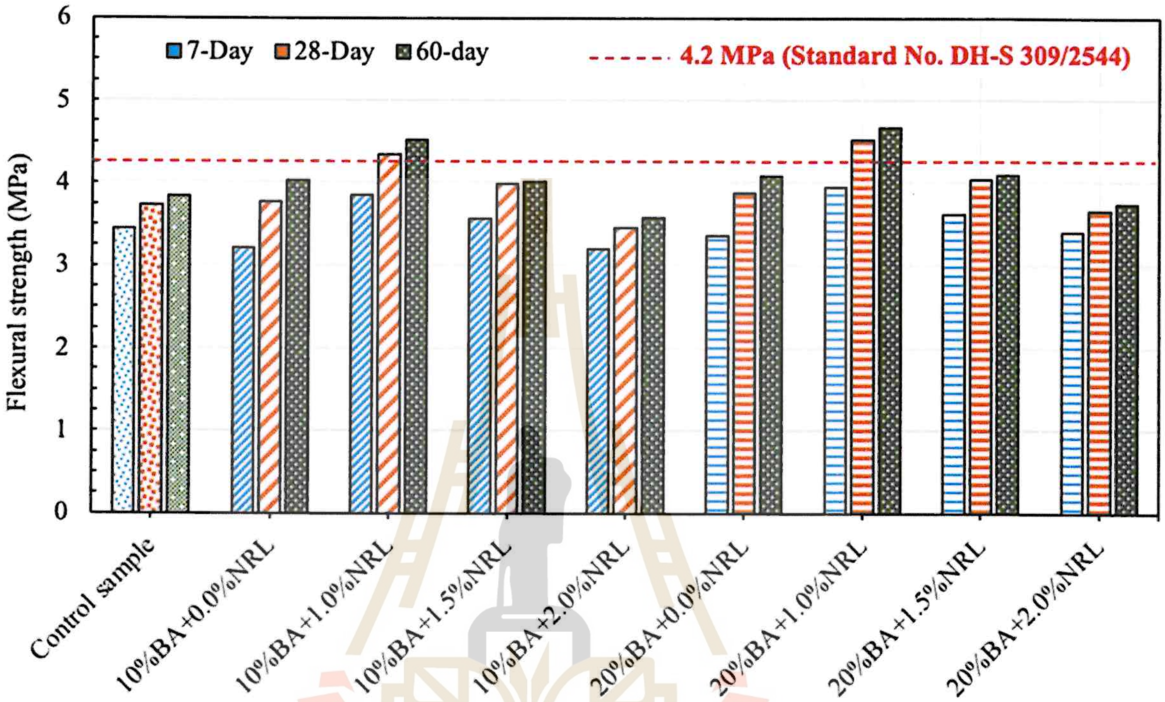
การรวมตัวกันของ NRL ในส่วนผสมคอนกรีตที่มี BA ส่งผลให้เกิดผลต่อกำลังรับแรงอัด ซึ่งตัวอย่างที่มี NRL ที่ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่มีการเปลี่ยน BA 10% และ NRL 1.0% (10%BA+1.0%NRL) (43.68 MPa) สูงกว่าส่วนผสมที่สอดคล้องกันโดยไม่มี NRL (10%BA +0.0%NRL) (39.96 MPa) และตัวอย่าง Control (41.98 MPa) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณ NRL เพิ่มเติมเป็น 1.5% และ 2.0% ในส่วนผสมทดแทน BA 10% กำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่มี NRL 1.0% และต่ำกว่าตัวอย่าง Control แนวโน้มที่คล้ายกัน จะเห็นได้ว่าสำหรับของผสมที่มีการแทนที่ BA 20% โดยที่การเติม NRL 1.0% ส่งผลให้เกิดกำลังรับแรงอัดสูงสุด (42.20 MPa) ในบรรดาของผสมที่มี NRL ในขณะที่ปริมาณ NRL ที่สูงขึ้น (1.5% และ 2.0%) จะส่งผลต่อการพัฒนาความแข็งแกร่งในระยะยาวของส่วนผสมยังเห็นได้จาก ผลทดสอบกำลังรับแรงอัด 28 และ 60 วัน

การปรับปรุงกำลังอัดโดยเติม NRL 1.0% อาจเนื่องมาจากความสามารถของคุณลักษณะ NRL ในการเพิ่มการกระจายความเค้นและกลไกการประสานการแตกร้าวภายในเมทริกซ์คอนกรีต ลักษณะความยืดหยุ่นของอนุภาค NRL ช่วยดูดซับและกระจายความเค้นภายในเมทริกซ์คอนกรีต ลดการก่อตัวและการแพร่กระจายของรอยแตกขนาดเล็กอย่างไรก็ตาม การลดลงของความแรงที่ปริมาณ NRL ที่สูงขึ้น (1.5% และ 2.0%) จากผลทดสอบชี้ให้เห็นว่า NRL มีปริมาณที่เหมาะสมซึ่งเกินกว่านั้น NRL ที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้นและทำให้เมทริกซ์คอนกรีตอ่อนลง ปริมาณ NRL ที่สูงขึ้นอาจนำไปสู่การกักเก็บอากาศที่เพิ่มขึ้นและโครงสร้างจุลภาคที่มีรูพรุนมากขึ้นซึ่งส่งผลเสียต่อกำลังรับแรงอัด

ในแง่ของการพัฒนาการรับกำลังของคอนกรีตในส่วนของการรับแรงอัดและแรงดัดงอด้วยการเพิ่มปริมาณการทดแทน BA การรวมตัวของ NRL ในปริมาณที่เหมาะสมที่ 1.0% ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของส่วนผสมคอนกรีตดัดแปลงด้วย BA ได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL และ 20%BA+1.0%NRL ไม่เพียงแต่ชดเชยส่วนผสมควบคุมเท่านั้น แต่ยังเป็นไปตามข้อกำหนดที่เข้มงวดสำหรับคอนกรีตงานทางที่กำหนดโดยกรมทางหลวง การค้นพบนี้เน้นย้ำถึงศักยภาพของการใช้คอนกรีต BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL เป็นทางเลือกที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพสูง

สำหรับการก่อสร้างทาง ซึ่งมีส่วนช่วยในการประเมินมูลค่าของวัสดุเหลือใช้และการพัฒนาวิธีปฏิบัติในการก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

4.3.2 ผลทดสอบความต้านแรงดัดของแท่งคานคอนกรีต (Flexural Strength of Concrete)



รูปที่ 4-4 Flexural strength results of studied concrete samples with various BA and NRL contents cured at 7, 28, and 60 days.

จากผลการทดสอบตัวอย่าง รูปที่ 4-4 แสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงดัดงอของตัวอย่างคอนกรีตที่ศึกษาซึ่งมีปริมาณ BA และ NRL ต่างๆ ซึ่งได้รับการบ่มที่ 7, 28 และ 60 วัน BA และ NRL มีผลต่อการพัฒนาการกำลังรับแรงดัดงอของคอนกรีตได้รับการวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณระดับการเปลี่ยน BA และปริมาณ NRL ที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ยังได้รับการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดขั้นต่ำ 4.2 MPa สำหรับกำลังรับแรงดัดงอ 28 วัน ของข้อกำหนดกรมทางหลวง (DHS 309/2544)

พบว่าการแทนที่ทรายด้วย BA ที่ 10% และ 20% โดยไม่มีการเติม NRL ส่งผลให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกันต่อกำลังรับแรงดัดงอเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต Control ที่อายุการบ่มที่แตกต่างกัน ที่ 7 วัน ความต้านทานแรงดัดงอของคอนกรีตที่มีการทดแทน BA 10% และ 20% เท่ากับ 3.21 MPa และ 3.37 MPa ตามลำดับซึ่งต่ำกว่าส่วนผสม Control (3.45 MPa) อย่างไรก็ตามที่ 28 และ 60 วัน ความต้านทานแรงดัดงอของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของ BA สูงกว่าของ Control เล็กน้อย โดยBA 10% มีความต้านทานแรงดัดงอ 3.77 MPa และ 4.03 MPa ที่ 28 และ 60 วันตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างคอนกรีตที่มีปริมาณBA 20% อยู่ที่ 3.88 MPa และ 4.09 MPa

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่อายุการบ่มเท่ากัน ค่าเหล่านี้สูงกว่าคอนกรีต Control ซึ่งมีความมีความต้านทานแรงดัดงอ 3.73 MPa และ 3.85 MPa ที่ 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ความต้านทานแรงดัดงอที่ดีขึ้นในภายหลังอาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของ BA ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มเติม ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคหนาแน่นขึ้นและคุณสมบัติเชิงกลดีขึ้นนอกจากนี้พื้นผิวที่หยาบและรูปร่างเชิงมุมของอนุภาค BA ยังอาจช่วยให้ประสานได้ดีขึ้นและเพิ่มความแข็งแรงรับแรงดัดงอได้

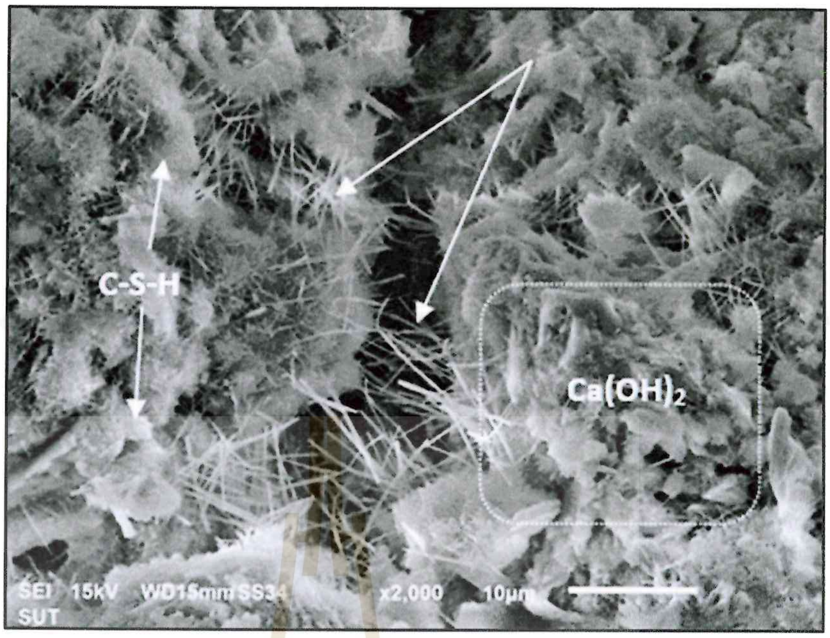
การรวม NRL กับคอนกรีตที่มีปริมาณ BA และคอนกรีต Control ส่งผลอย่างสำคัญในการรับแรงดัดงอ โดยจะเด่นชัดมากขึ้นที่อายุการบ่มที่สูงขึ้น ที่ 7 วัน สารผสมทดแทน BA 10% และ 20% ที่มี NRL 1.0% (10%BA+1.0%NRL และ 20%+1.0%NRL) ได้รับความต้านทานแรงดัดงอที่ 3.85 MPa และ 3.95 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าที่มีส่วนผสมของ BA ในคอนกรีตแต่ไม่มี NRL และคอนกรีต Control

ที่อายุ 28 และ 60 วัน อิทธิพลเชิงบวกของ NRL ต่อความต้านทานแรงดัดงอมีความชัดเจนมากขึ้น ตัวอย่างคอนกรีต 10%BA+1.0%NRL มีความต้านทานแรงดัดงอ 4.35 MPa และ 4.53 MPa ที่ 28 และ 60 วัน ตามลำดับ ตัวอย่างคอนกรีตของ 20%BA+1.0%NRL มีความต้านทานแรงดัดงอ 4.55 MPa ที่ 28 วันและ 4.67 MPa ที่ 60 วัน ตัวอย่างคอนกรีตที่มี NRL เหล่านี้แสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่าส่วนผสมที่ไม่มี NLR และเกินข้อกำหนดขั้นต่ำที่ 4.2 MPa ที่กำหนดโดยกรมทางหลวงกำลังรับแรงดัดงอ 28 วันของคอนกรีตสำหรับงานทาง

การปรับปรุงกำลังรับแรงดัดงอด้วยการเติม NRL อาจเนื่องมาจากความสามารถของพฤติกรรม NRL ในการปรับปรุงการถ่ายเทความเค้นแรงดึงและกลไกการเชื่อมรอยร้าวภายในเมทริกซ์คอนกรีต ลักษณะความยืดหยุ่นของ NRL ช่วยกระจายความเค้นแรงดึงและควบคุมการแพร่กระจายของรอยแตกขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดัดงอดีขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น การมีอยู่ของ NRL อาจปรับปรุงพันธะระหว่างอนุภาครวมและซีเมนต์เพสต์ ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น สิ่งสำคัญที่ควรทราบคือแม้ว่าปริมาณ NRL ที่สูงขึ้น (1.5% และ 2.0%) ยังปรับปรุงความแข็งแรงของแรงดัดงอเมื่อเปรียบเทียบกับของผสมที่ไม่มี NRL แต่การปรับปรุงนั้นไม่มีนัยสำคัญเท่ากับที่สังเกตด้วย NRL 1.0% สิ่งนี้เป็นการยืนยันการมีอยู่ของปริมาณ NRL ที่เหมาะสม ซึ่งเกินกว่านั้นประโยชน์ด้านความต้านทานแรงดัดงออาจลดลง

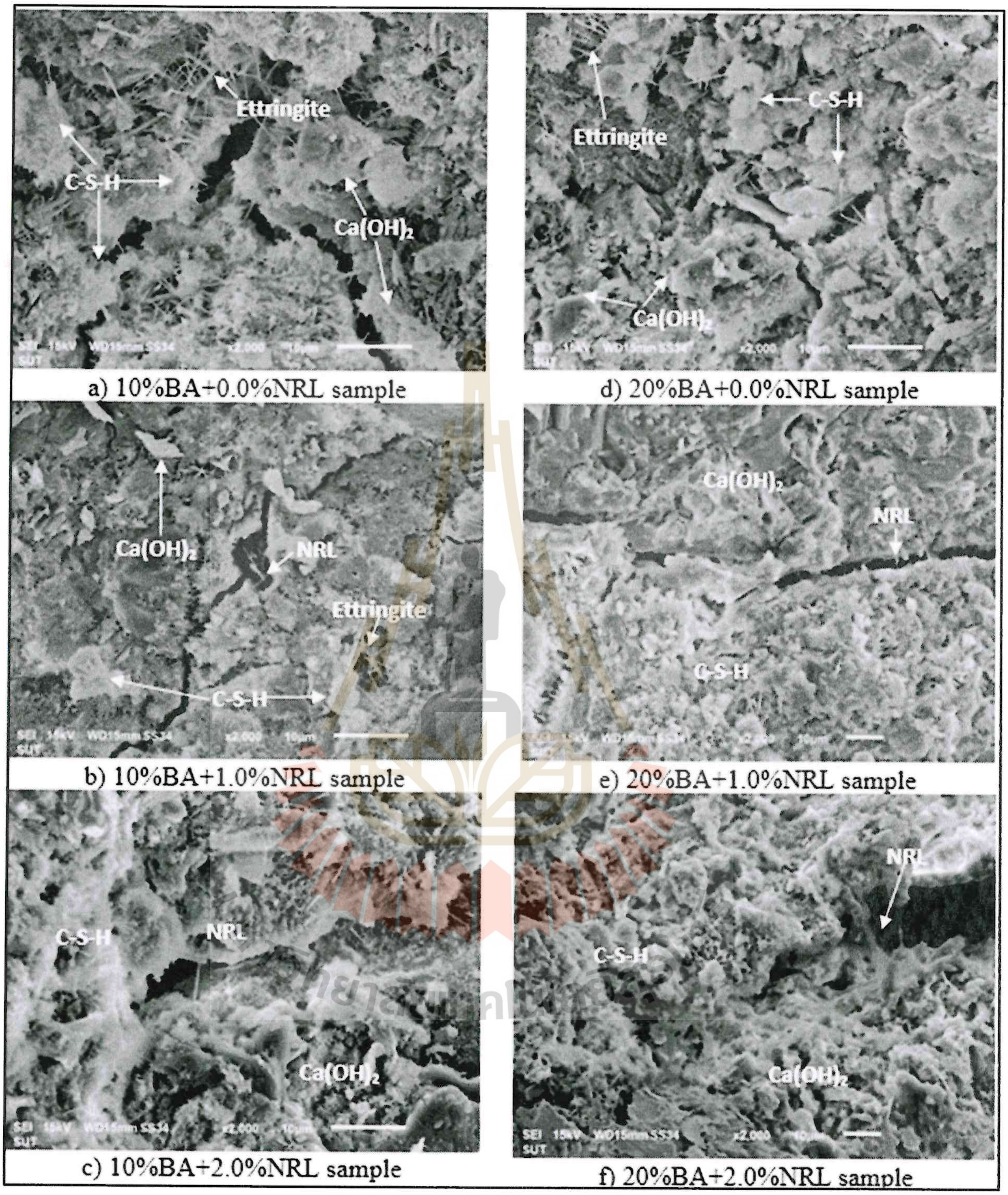
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Microstructural Analysis)

คุณสมบัติทางโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมีบทบาทสำคัญในการพิจารณาประสิทธิภาพทางกลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้ SEM ให้ข้อมูลเชิงลึกของโครงสร้างภายในของคอนกรีตControl และคอนกรีต BA ที่ปรับปรุงด้วย NRL



รูปที่ 4-5 SEM image of a control sample.

รูปที่ 4-5 แสดงภาพ SEM ของส่วนผสมของคอนกรีต Control ที่ถูกบ่มที่ 28 วัน โครงสร้างจุลภาคของส่วนผสมควบคุมเผยให้เห็นถึงการมีอยู่ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่น ซึ่งรวมถึงแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต C-S-H แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ และเอตทริงไทต์ ภาพ SEM แสดงเมทริกซ์ที่มีความหนาแน่น ไม่มีรูปร่าง และเชื่อมต่อถึงกัน ซึ่งมีส่วนช่วยในคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต เอตทริงไธต์เป็นคริสตัลคล้ายเข็ม มีบทบาทสำคัญในการพัฒนากำลังตั้งแต่เริ่มต้นของคอนกรีต และมีส่วนช่วยในกระบวนการแข็งตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต การก่อตัวของ C-S-H เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างอนุภาคของซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่แข็งแกร่งและเหนียวแน่น $Ca(OH)_2$ หรือปอร์ตแลนไดต์เป็นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชั่นอีกชนิดหนึ่งที่กระจายไปทั่วเมทริกซ์ซีเมนต์ซึ่งสามารถมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาทุติยภูมิที่อาจก่อตัวเป็น C-S-H เพิ่มเติมเมื่อมีวัสดุปอซโซลานอยู่



รูปที่ 4-6 SEM images: a) 10%BA+0.0%NRL, b) 10%BA+1.0%NRL, c) 10%BA+2.0%NRL, d) 20%BA+0.0%NRL, e) 20%BA+1.0%NRL, f) 20%BA+2.0%NRL.

รูปที่ 4-6 แสดงภาพ SEM ของส่วนผสมคอนกรีตที่รวม BA ไว้เป็นการทดแทนบางส่วนสำหรับทรายที่ 10% และ 20% โดยปริมาตร โดยมีและไม่มีการเติมNRL ที่ขนาด 1.0% และ 2.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ภาพเหล่านี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีความสำคัญเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดจากการรวมตัวกันของ BA และ NRL ในเมทริกซ์คอนกรีต

ภาพ SEM ของคอนกรีตผสม BA ที่ไม่มี NRL (รูปที่ 6a และ 6d) เผยให้เห็นโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายคลึงกับของส่วนผสม Control โดยมี C-S-H, $Ca(OH)_2$ และเอตริงไทต์ปรากฏอยู่ อย่างไรก็ตาม การรวมตัวกันของ BA ดูเหมือนจะส่งผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่มีรูพรุนและต่างกันเล็กน้อยเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม Control นี่อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่าง BA และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งก่อตัวเป็น C-S-H เพิ่มเติม แต่ยังนำไปสู่โครงสร้างจุลภาคที่ต่างกันมากขึ้นอีกด้วย โครงสร้างจุลภาคที่มีรูพรุนและต่างกันมากขึ้นที่พบในส่วนผสมคอนกรีต BA ที่ไม่มี NRL มีส่วนทำให้กำลังรับแรงอัดและแรงดัดงอลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4-3 และ 4-4

รูปภาพ SEM ของคอนกรีตผสม BA ที่ดัดแปลงโดย NRL (รูปที่ 6b, 6c, 6e และ 6f) แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่สำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสม BA ที่ไม่มี NRL ส่วนผสมคอนกรีต BA ที่มีส่วนผสม NRL (10%BA+1.0%NRL และ 20%BA+1.0%NRL) บ่งชี้ว่ามีโครงสร้างจุลภาคที่หนาแน่นกว่าและกะทัดรัดกว่าโดยมีความพรุนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสม BA ที่ไม่มี NRL การก่อตัวของ C-S-H ดูเหมือนจะกว้างขวางกว่าและมีการกระจายตัวดีขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตผสม BA ที่ไม่มี NRL

นอกจากนี้ การรวม NRL ในส่วนผสมคอนกรีต BA ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของฟิล์ม NRL บางๆ ในเมทริกซ์คอนกรีต ฟิล์ม NRL เหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงพันธะระหว่างพื้นผิวระหว่างอนุภาค BA และซีเมนต์เพสต์ นำไปสู่โครงสร้างจุลภาคที่เหนียวแน่นและกะทัดรัดมากขึ้น ข้อมูลการค้นพบเหล่านี้มีการรายงานไว้ในงานก่อนหน้าเกี่ยวกับซีเมนต์เพสต์ดัดแปลงด้วย NRL พันธะระหว่างพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากความเข้ากันได้ทางเคมีและแรงดึงดูดระหว่างฟิล์ม NRL และผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ไฮเดรชั่น กลไกการยึดเกาะและการเชื่อมประสานที่ดีขึ้นในมวลรวมและเมทริกซ์ซีเมนต์ ช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล เช่น แรงอัดและกำลังรับแรงดัด (รูปที่ 4-3 และ 4-4) โดยการสร้างเครือข่ายที่แข็งแกร่งและเหนียวแน่นภายในคอนกรีต

นอกจากนี้ ฟิล์ม NRL ยังทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับความเครียดและขจัดรอยแตกร้าวภายในเมทริกซ์คอนกรีต เมื่อคอนกรีตถูกรับน้ำหนัก ฟิล์ม NRL สามารถเปลี่ยนรูปและยืดตัวได้ โดยดูดซับความเค้นและกระจายไปทั่วเมทริกซ์ กลไกนี้ช่วยป้องกันการเริ่มต้นและการแพร่กระจายของรอยแตกขนาดเล็ก ซึ่งนำไปสู่ความเหนียวและความทนทานที่ดีขึ้นของคอนกรีต BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL ซึ่งให้ประโยชน์เมื่อใช้เป็นวัสดุปูผิวทางแบบแข็งภายใต้การรับน้ำหนักแบบกด

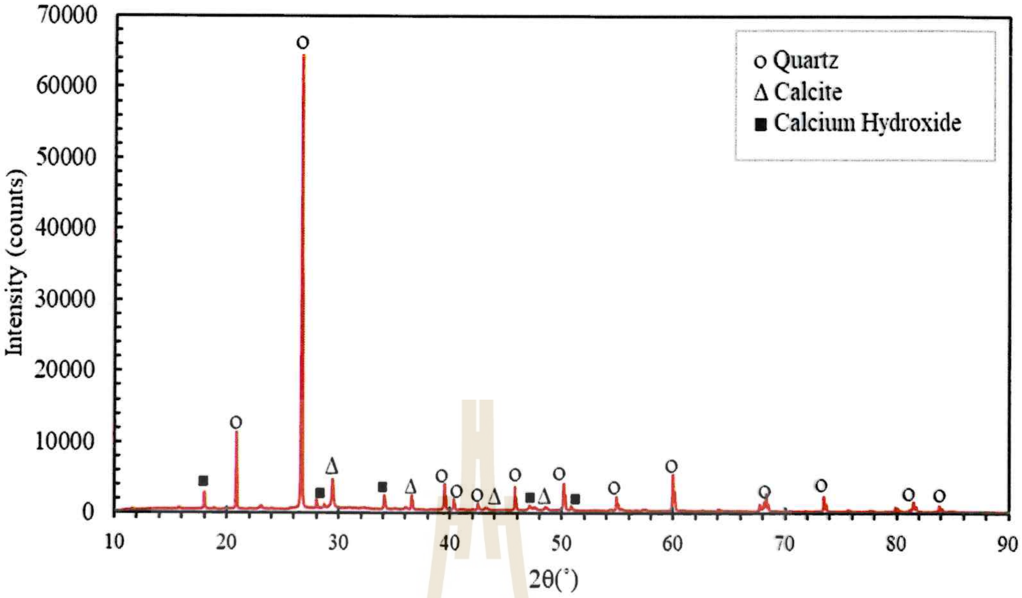
เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL และ 20%BA+1.0% NRL (รูปที่ 4-6 b และ e) สังเกตได้ว่าส่วนผสม 20%BA+1.0%NRL มีความหนาแน่นมากกว่าเล็กน้อยและเป็นโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า ส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL การสังเกตนี้สอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดและแรงดัดงอที่สูงขึ้นเล็กน้อยที่รายงานสำหรับส่วนผสม 20%BA+1.0%NRL เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลที่ได้รับการปรับปรุงของส่วนผสม 20%BA+1.0%NRL เป็นผลมาจากการผสมผสาน BA และ NRL อย่างเหมาะสม ซึ่งส่งผลกระทบเสริมฤทธิ์กันต่อกระบวนการเติมน้ำและการพัฒนาเมทริกซ์ซีเมนต์ที่แข็งแรงและกะทัดรัด

แม้ว่าการรวม NRL ในปริมาณที่เหมาะสม (1.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์) จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตผสม BA แต่ปริมาณ NRL ที่มากเกินไป (2.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์) อาจทำให้ความแข็งแรงลดลงได้ การลดความแข็งแรงนี้สามารถนำมาประกอบกับการก่อตัวของฟิล์ม NRL ที่ใหญ่ขึ้นและมีจำนวนมากขึ้นในเมทริกซ์ซีเมนต์ ปริมาณ NRL ที่มากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาค NRL และการก่อตัวของฟิล์ม NRL ที่หนาขึ้น

ซึ่งอาจรบกวนความต่อเนื่องของเมทริกซ์ซีเมนต์และสร้างโซนที่อ่อนแอได้ บริเวณที่อ่อนแอเหล่านี้สามารถทำหน้าที่เป็นความเข้มข้นของความเครียดและตำแหน่งที่อาจเกิดรอยแตกร้าว ส่งผลให้ความแข็งแรงโดยรวมของคอนกรีตลดลง การค้นพบนี้เน้นถึงความสำคัญของการปรับปรุง NRL ให้เหมาะสมเพื่อให้บรรลุความสมดุลที่ต้องการระหว่างการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคและสมรรถนะทางกลในคอนกรีตผสม BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL เมื่อใช้เป็นวัสดุการทาง

4.5 การวิเคราะห์แร่วิทยา (Mineralogical Analysis)

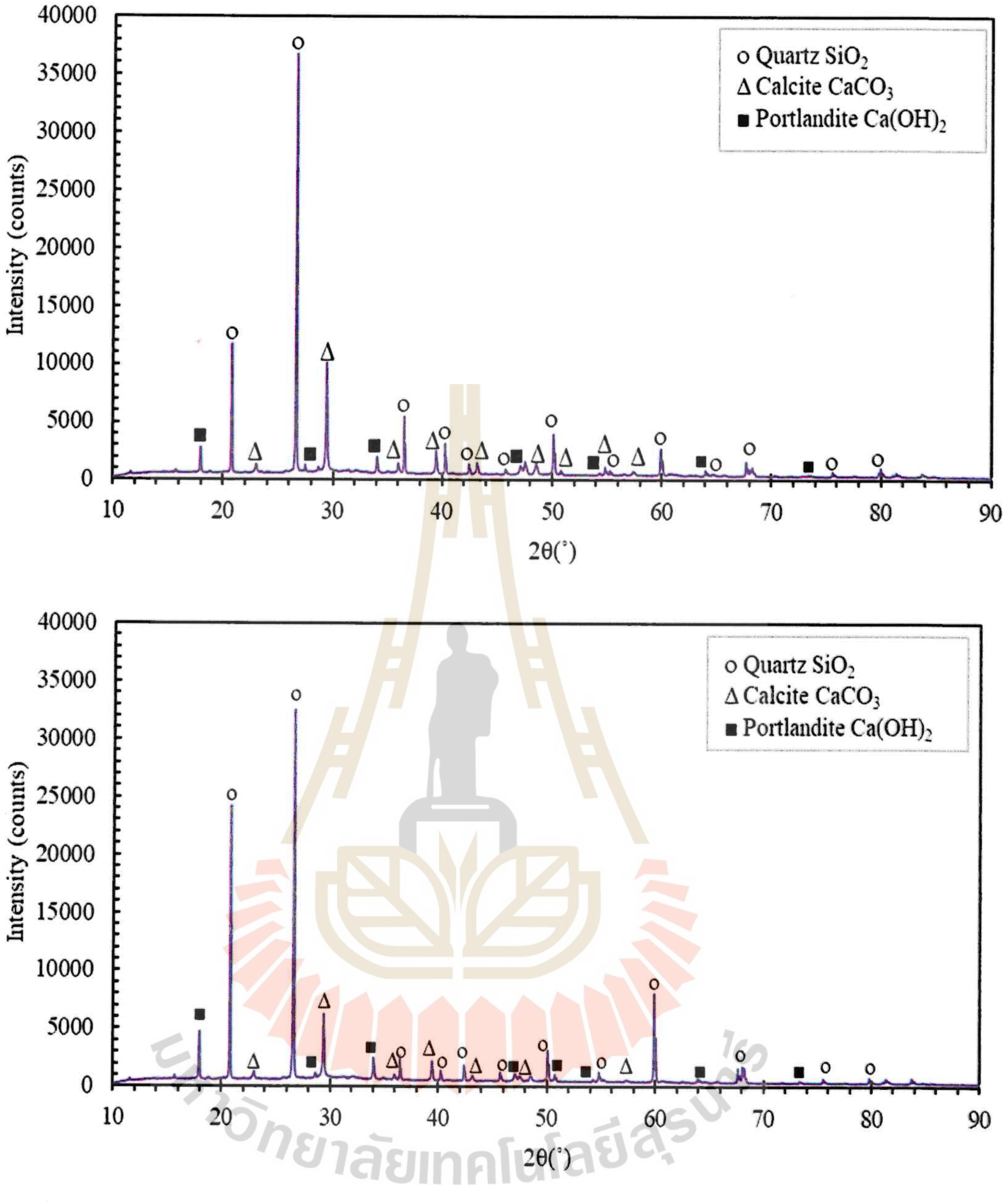
การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ให้ข้อมูลเชิงลึกในรายละเอียดเกี่ยวกับเฟสผลึกที่มีอยู่ในวัสดุประสาน ซึ่งบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการไฮเดรชั่นและการเสื่อมสภาพที่ตามมาของคอนกรีต เทคนิค XRD ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินองค์ประกอบเฟสผลึกของส่วนผสม Control และส่วนผสมคอนกรีตดัดแปลง NRL ที่ดัดแปลงด้วย 10%BA และ 20%BA และปริมาณ NRL ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4-7 XRD pattern of a control sample.

รูปที่ 4-7 แสดงรูปแบบ XRD ของส่วนผสม Control ที่ 28 วันของการบ่ม การวิเคราะห์ XRD เผยให้เห็นการมีอยู่ของเฟสผลึกหลายเฟสในเมทริกซ์ซีเมนต์ พีคหลักที่ระบุในรูปแบบ XRD สอดคล้องกับควอตซ์ (SiO_2) แคลไซต์ ($CaCO_3$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)

ควอตซ์เป็นแร่ธาตุทั่วไปที่พบในมวลรวมตามธรรมชาติ เช่น ทรายและกรวด ในการผลิตคอนกรีต การมีอยู่ของพีคควอตซ์ในรูปแบบ XRD ของส่วนผสมควบคุมบ่งชี้ถึงการรวมตัวของมวลรวมซิลิกาในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต แคลไซต์เป็นรูปแบบผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต และการมีอยู่ของพีคของแคลไซต์ในรูปแบบ XRD บ่งชี้ว่าอาจเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับหนึ่งในส่วนผสมควบคุมในระหว่างกระบวนการบ่ม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ปอร์ตแลนไดต์) เป็นผลิตภัณฑ์ให้ความชุ่มชื้นเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การมีอยู่ของพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในรูปแบบ XRD แสดงให้เห็นถึงความก้าวหน้าของการเพิ่มความชุ่มชื้นของซีเมนต์ และมีส่วนช่วยในการพัฒนาความแข็งแรงของส่วนผสมควบคุม รูปแบบ XRD ของส่วนผสมควบคุมทำหน้าที่เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบเฟสผลึกและความเข้มสัมพัทธ์ของเฟสนั้นกับเฟสของผสมคอนกรีต BA ดัดแปลงด้วย NRL



รูปที่ 4-8 XRD pattern of a) 10%BA+1.0%NRL sample, b) 10%BA+2.0%NRL sample.

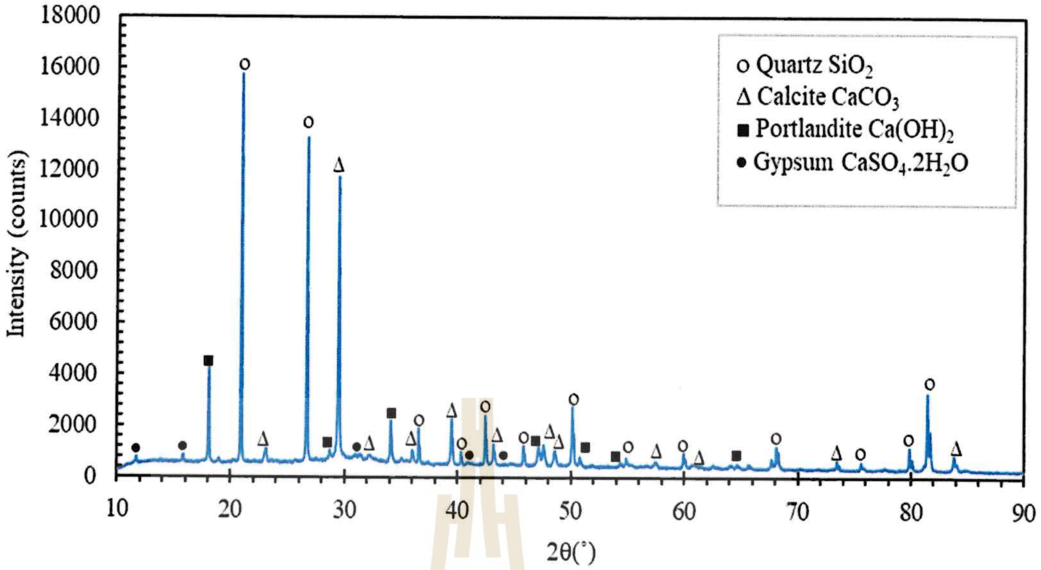
รูปที่ 4-8 แสดงรูปแบบ XRD ของส่วนผสมคอนกรีตที่ผสม BA 10% เพื่อทดแทนทรายแม่น้ำ และ NRL บางส่วนที่ปริมาณ 1.0% และ 2.0% โดยน้ำหนักของซีเมนต์ ตามลำดับ รูปแบบ XRD ของส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL (รูปที่ 8a) และ 10%BA+2.0%NRL (รูปที่ 8b) แสดงเฟสผลึกคล้ายกับส่วนผสมควบคุม ซึ่งรวมถึงควอตซ์ แคลไซต์ และพอร์ตแลนด์ไดต์ อย่างไรก็ตาม สามารถสังเกตความแตกต่างบางประการในความเข้มสัมพัทธ์ของยอดเขาได้

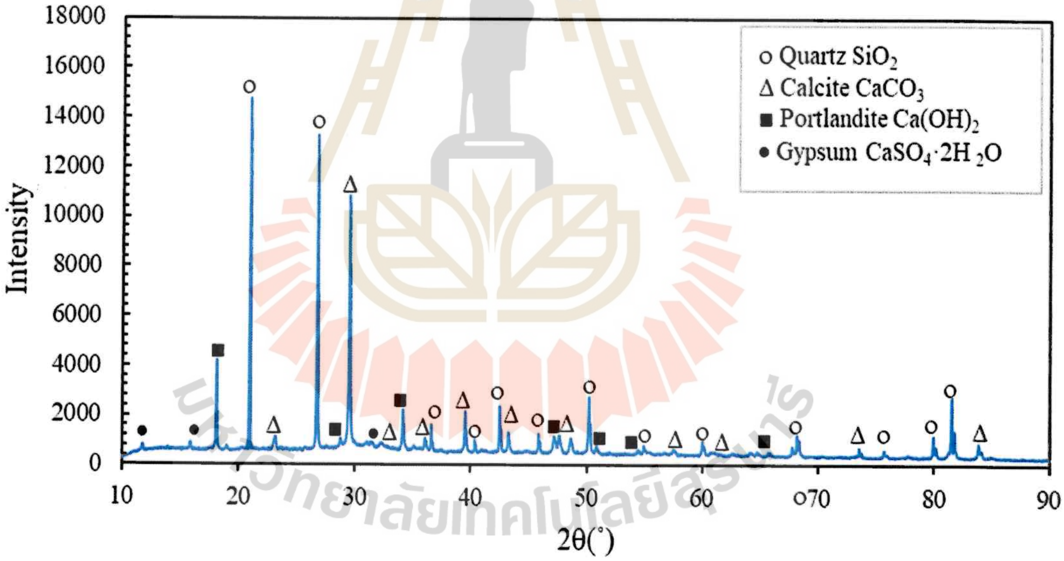
ในรูปแบบ XRD ของส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL (รูปที่ 8a) ความเข้มของพีคควอตซ์ต่ำกว่าส่วนผสมControlเล็กน้อย ความเข้มของควอตซ์ที่ลดลงนี้สามารถนำมาประกอบกับการแทนที่ทรายแม่น้ำด้วย BA บางส่วน ซึ่งมีองค์ประกอบทางแร่วิทยาที่แตกต่างกัน การมี BA ในส่วนผสมอาจทำให้ปริมาณควอตซ์เจือจาง ส่งผลให้ความเข้มข้นสูงสุดลดลง

ยอดพีคแคลไซต์ในส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL ดูเหมือนจะเข้มข้นกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมControl ความเข้มข้นของแคลไซต์ที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดจากการมีแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ใน BA หรืออิทธิพลที่เป็นไปได้ของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ไฮเดรชั่น ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของแคลไซต์เพิ่มเติม ความเข้มของพีคปอร์แลนไดต์ใน 10%BA+1.0%NRL เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าที่อยู่ในส่วนผสมControl ซึ่งบ่งชี้ว่าการรวม BA และ NRL ในปริมาณเหล่านี้ส่งผลกระทบเล็กน้อยต่อการก่อตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในระหว่างการให้ความชุ่มชื้นและการพัฒนาความแข็งแรงของซีเมนต์

ในรูปแบบ XRD ของ 10%BA+2.0%NRL (รูปที่ 8b) ความเข้มของพีคของควอตซ์ แคลไซต์และพอร์ตแลนไดต์ดูเหมือนจะต่ำกว่าเมื่อเทียบกับส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL การลดความเข้มข้นสูงสุดนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณ NRL ที่สูงขึ้นในส่วนผสม ปริมาณ NRL ที่มากเกินไปในส่วนผสม NRL 2.0% อาจขัดขวางการก่อตัวและการเจริญเติบโตที่เหมาะสมของเฟสผลึก เช่น ปอร์ตแลนด์ไดต์และแคลไซต์ ซึ่งจำเป็นสำหรับการพัฒนาความแข็งแกร่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





รูปที่ 4-9 XRD pattern of a) 20%BA+1.0%NRL sample, b) 20%BA+2.0%NRL sample.

รูปที่ 4-9 แสดงรูปแบบ XRD ของผสมคอนกรีต 20%BA ดัดแปลง NRL ที่ขนาดใช้ 1.0% และ 2.0% NRL พีคยิปซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ถูกตรวจพบอย่างเด่นชัดในรูปแบบ XRD ของของผสม 20%BA เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม 10%BA การก่อตัวของยิปซั่มในส่วนผสม BA 20% อาจเกิดจากการทดแทน BA ในเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่า ซึ่งอาจเพิ่มความพร้อมใช้ของซัลเฟตในเมทริกซ์ซีเมนต์ (An et al., 2017; Gencel et al., 2021) การมีอยู่ของ ยิปซั่มในส่วนผสม 20%BA+1.0%NRL (รูปที่ 4-9 a) อาจส่งผลให้คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตดีขึ้น

ยอดพีคยิปซั่มในส่วนผสม 20%BA+1.0%NRL มีความโดดเด่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม 20%BA+2.0%NRL ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณ 1.0%NRL อาจช่วยให้เกิดปริมาณยิปซั่มที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอาจมี มีส่วนทำให้คุณสมบัติความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน รูปแบบ XRD ของส่วนผสม 20%BA+2.0% NRL (รูปที่ 4-9 b) แสดงความเข้มข้นที่ต่ำกว่าของพีคของควอตซ์ แคลไซต์ และปอร์ตแลนด์ไดต์ เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม 20% BA+1.0% การลดลงของความเข้มสูงสุดนี้สามารถนำมาประกอบกับผลการรบกวนของปริมาณ NRL ส่วนเกิน (เกินปริมาณ NRL ที่เหมาะสม 1.0%) บนเฟสผลึก ตามที่อภิปรายไว้ก่อนหน้านี้ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและแรงดัดงอของคอนกรีตผสม BA ที่มีปริมาณ NRL สูงกว่าลดลง

เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสม BA 20% กับส่วนผสม BA 10% จะเห็นได้ชัดว่าการรวมตัวของ BA ในเปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่า (20%) มีอิทธิพลต่อการก่อตัวของยิปซั่ม ซึ่งไม่มีอยู่ในส่วนผสม 10% BA การมีอยู่ของยิปซั่มในส่วนผสม 20%BA โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนผสม 20%BA+1.0%NRL อาจมีบทบาทในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต นอกจากนี้ รูปแบบ XRD ของของผสม 10%BA แสดงการลดลงที่เด่นชัดมากขึ้นในความเข้มข้นสูงสุดเมื่อขนาดการใช้ NRL ถูกเพิ่มขึ้นจาก 1.0% ถึง 2.0% เมื่อเปรียบเทียบกับของผสม 20% BA สิ่งนี้แสดงเป็นนัยว่าผลการรบกวนของ NRL ที่มากเกินไปต่อเฟสผลึกอาจมีนัยสำคัญมากกว่าในของผสม 10% BA ซึ่งนำไปสู่ การลดลงในคุณสมบัติความแข็งแรงที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อขนาดยา NRL เพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์ทางจุลโครงสร้างและแร่วิทยา พบว่าการแทนที่ BA และปริมาณ NRL เพิ่มเติมมีความโดดเด่นในการมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL พบว่าปริมาณ NRL ที่เหมาะสมที่สุด 1.0% ให้ผลผลิตความแข็งแรงเชิงกลสูงสุดในบรรดาของNRLปริมาณทั้งหมด สำหรับทั้งส่วนผสม 10%BA และ 20% นอกจากนี้ การผสมผสานที่เหมาะสมที่สุดของระดับการแทนที่ BA (20%) และปริมาณการใช้ NRL (1.0%) ในการผสม 20%BA+1.0%NRL ส่งผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่ได้รับการพัฒนาอย่างดี ดังที่เห็นได้จากเมทริกซ์หนาแน่นในภาพ SEM และคุณสมบัติที่สมดุลของเฟสผลึกสำคัญในรูปแบบ XRD การค้นพบนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการปรับเนื้อหา BA และ NRL ให้เหมาะสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าในส่วนผสมคอนกรีต BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป (Conclusion)

การศึกษานี้ ศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าก้นเตา (BA) เพื่อทดแทนทรายแม่น้ำและน้ำยางธรรมชาติ (NRL) บางส่วนเพื่อเป็นตัวปรับคุณสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตในงานผิวทางแบบแข็งที่ยั่งยืน ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้คอนกรีต BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL เป็นทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพสูงแทนคอนกรีตทั่วไปในการก่อสร้างทางเท้า ข้อค้นพบที่สำคัญจากการวิจัยครั้งนี้สรุปได้ดังนี้

5.1.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต BA ลดลงเมื่อมีปริมาณ BA เพิ่มขึ้น ในขณะที่การผสม NRL ในปริมาณที่เหมาะสม 1.0% ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของทั้งส่วนผสม 10%BA และ 20%BA อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่ม NRL ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการรับแรงดัดงอ โดยส่วนผสม 10%BA+1.0%NRL และ 20%BA+1.0%NRL แสดงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มี NRL และส่วนผสมControl ที่ปริมาณ 1.0% NRL ที่เหมาะสม คอนกรีตผสม BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL มีความแข็งแรงเชิงกลเหนือกว่าส่วนผสมควบคุม และเป็นไปตามข้อกำหนดขั้นต่ำ (กำลังรับแรงอัด > 32 MPa และความต้านทานแรงดัดงอ > 4.2 MPa) สำหรับงานทางตามกำหนดของกรมทางหลวงของประเทศไทย

5.1.2 การวิเคราะห์ SEM แสดงให้เห็นว่าคอนกรีต BA ที่ดัดแปลงด้วย NRL มีโครงสร้างจุลภาคที่หนาแน่นกว่าและกะทัดรัดกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต BA ที่ไม่มี NRL การก่อตัวของฟิล์ม NRL บางๆ ช่วยปรับปรุงพันธะระหว่างพื้นผิวระหว่างอนุภาค BA และเฟสซีเมนต์ ส่งผลให้เมทริกซ์มีความเหนียวแน่นมากขึ้น ฟิล์ม NRL ยังทำหน้าที่เป็นสารดูดซับความเค้นและแก้ปัญหาการแตกร้าว ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียวและความทนทานของคอนกรีต

5.1.3 การวิเคราะห์ XRD แสดงให้เห็นว่ามีเฟสผลึกที่สำคัญ เช่น ควอตซ์ แคลไซต์ และปอร์ตแลนไดต์ ในทุกส่วนผสม การรวมตัวของ BA และ NRL มีอิทธิพลต่อความเข้มสัมพัทธ์ของระยะเหล่านี้ ส่วนผสม 20%BA+1.0%NRL แสดงความสมดุลที่เหมาะสมที่สุดของเฟสผลึก ซึ่งมีส่วนทำให้คุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.1.4 อย่างไรก็ตาม ปริมาณ NRL ที่มากเกินไปทำให้เกิดฟิล์ม NRL ที่ใหญ่ขึ้นและจำนวนมากขึ้นที่ตรวจพบโดยการวิเคราะห์ SEM ซึ่งขัดขวางความต่อเนื่องของเมทริกซ์ซีเมนต์ และสร้างโซนที่อ่อนแอในโซนการเปลี่ยนผ่านของผิวหน้า การวิเคราะห์ XRD ยังยืนยันด้วยว่าส่วนผสมที่มีปริมาณ NRL มากเกินไปทำให้พีคของควอตซ์ แคลไซต์ และปอร์ตแลนด์ไดต์มีความเข้มลดลง ซึ่งอาจกระจายการก่อตัวและการเจริญเติบโตที่เหมาะสมของเฟสผลึกที่จำเป็น และลดความแข็งแรงโดยรวมของคอนกรีต

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าในการพัฒนาวัสดุคอนกรีตประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับงานทางอย่างยั่งยืน การรวมเอาวัสดุเหลือใช้ เช่น BA และตัวดัดแปลงตามธรรมชาติ เช่น NRL นำเสนอแนวทางที่มีแนวโน้มในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ขณะเดียวกันก็ตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับโครงสร้างพื้นฐานต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

Delatte, N. (2018). Concrete Pavement Design, Construction, and Performance. CRC Press, London, United Kingdom. doi:10.1201/9781482288483.

Huang, Y.H. (2004) Pavement Analysis and Design. Pearson, London, United Kingdom.

Griffiths, S., Sovacool, B. K., Furszyfer Del Rio, D. D., Foley, A. M., Bazilian, M. D., Kim, J., & Uratani, J. M. (2023). Decarbonizing the cement and concrete industry: A systematic review of socio-technical systems, technological innovations, and policy options. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 180, 113291. doi:10.1016/j.rser.2023.113291.

Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. International Journal of Sustainable Built Environment, 1(2), 194–216. doi:10.1016/j.ijsbe.2013.05.001.

Singh, M., & Siddique, R. (2014). Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand. Construction and Building Materials, 68, 39–48. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.034.

Andrade, L. B., Rocha, J. C., & Cheriaf, M. (2007). Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement. Waste Management, 27(9), 1190–1199. doi:10.1016/j.wasman.2006.07.020.

Bai, Y., Darcy, F., & Basheer, P. A. M. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate. Construction and Building Materials, 19(9), 691–697. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.02.021.

Ranapratap, P., & Padmanabham, K. (2016). Effect of Replacing Fine Aggregate with Bottom Ash in M40 Grade of Concrete with Opc-53S Cement. International Journal of Research in Engineering and Technology, 5(10), 59–62. doi:10.15623/ijret.2016.0510011.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Soman, K., Sasi, D., & Abubaker, K. A. (2014). Strength properties of concrete with partial replacement of sand by bottom ash. International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering, 1(7), 2349–2163.

Yang, I. H., Park, J., Dinh Le, N., & Jung, S. (2020). Strength Properties of High-Strength Concrete Containing Coal Bottom Ash as a Replacement of Aggregates. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 1–12. doi:10.1155/2020/4246396.

Mousa, A. (2023). Utilization of coal bottom ash from thermal power plants as a cement replacement for building: A promising sustainable practice. Journal of Building Engineering, 74, 106885. doi:10.1016/j.jobe.2023.106885.

Singh, M., & Siddique, R. (2013). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. Resources, Conservation and Recycling, 72, 20–32. doi:10.1016/j.resconrec.2012.12.006.

Singh, M., & Siddique, R. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete. Journal of Cleaner Production, 112, 620–630. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.001.

Özkan, Ö., Yüksel, I., & Muratglu, Ö. (2007). Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag. Waste Management, 27(2), 161–167. doi:10.1016/j.wasman.2006.01.006.

Yüksel, I., & Genç, A. (2007). Properties of concrete containing nonground ash and slag as fine aggregate. ACI Materials Journal, 104(4), 397–403. doi:10.14359/18829.

Rafieizonooz, M., Salim, M. R., Mirza, J., Hussin, M. W., Salmiati, Khan, R., & Khankhaje, E. (2017). Toxicity characteristics and durability of concrete containing coal ash as substitute for cement and river sand. Construction and Building Materials, 143, 234–246. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.151.

Kou, S. C., & Poon, C. S. (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. Construction and Building Materials, 23(8), 2877–2886. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.009.

Kim, H. K., & Lee, H. K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. Construction and Building Materials, 25(2), 1115–1122. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065.

Kurama, H., & Kaya, M. (2008). Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. Construction and Building Materials, 22(9), 1922–1928. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.008.

Subash, S., Mini, K., & Ananthkumar, M. (2021). Incorporation of natural rubber latex as concrete admixtures for improved mechanical properties. Materials Today: Proceedings, 46, 4859–4862. doi:10.1016/j.matpr.2020.10.326.

Muhammad, B., & Ismail, M. (2012). Performance of natural rubber latex modified concrete in acidic and sulfated environments. Construction and Building Materials, 31, 129–134. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.099.

Tuffrey, J., Siwseng, P., Laksanakit, C., & Chusilp, N. (2024). Enhancing the performance of waste paper pulp-cement composites, through the incorporation of natural rubber latex: A sustainable approach for high-performance construction materials. Construction and Building Materials, 430, 136345. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.136345.

Yaowarat, T., Suddeepong, A., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Takaikaew, T., Vichitcholchai, N., Arulrajah, A., & Chinkulkijniwat, A. (2021). Improvement of flexural strength of concrete pavements using natural rubber latex. Construction and Building Materials, 282, 122704. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122704.

Suddeepong, A., Buritatum, A., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Takaikaew, T., Horpibulsuk, J., & Arulrajah, A. (2022). Natural Rubber Latex–Modified Concrete Pavements: Evaluation and Design Approach. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(9), 4022215. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004364.

Samingthong, W., Hoy, M., Ro, B., Horpibulsuk, S., Yosthasaen, T., Suddeepong, A., Buritatum, A., Yaowarat, T., & Arulrajah, A. (2023). Natural Rubber Latex-Modified Concrete with PET and Crumb Rubber Aggregate Replacements for Sustainable Rigid Pavements. Sustainability (Switzerland), 15(19), 14147. doi:10.3390/su151914147.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ASTM C127-15. (2024). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (Withdrawn 2024). ASTM International, Pennsylvania, United States. doi:10.1520/C0127-15.

ASTM C131-06. (2010). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International, Pennsylvania, United States. doi:10.1520/C0131-06.

ASTM C128-22. (2004). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, Pennsylvania, United States. doi:10.1520/C0128-22.

ASTM C33/C33M-18. (2023). Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, Pennsylvania, United States. doi:10.1520/C0033_C0033M-18.

ASTM C39/39M-21. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, Pennsylvania, United States. doi:10.1520/C0039_C0039M-21.

ASTM C78-09. (2010). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International, Pennsylvania, United States. doi:10.1520/C0078-09.

DHS309/2544. (1996). Thailand Department of Highways, Standards for highway construction, DHS309/2544, Bangkok, Thailand. (In Thai).

Muhammad, B., Ismail, M., Bhutta, M. A. R., & Abdul-Majid, Z. (2012). Influence of non-hydrocarbon substances on the compressive strength of natural rubber latex-modified concrete. Construction and Building Materials, 27(1), 241–246. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.054.

Abdulmatin, A., Tangchirapat, W., & Jaturapitakkul, C. (2018). An investigation of bottom ash as a pozzolanic material. Construction and Building Materials, 186, 155–162. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.101.

Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. Bin, Djobo, J. N. Y., Tan, C. G., Ang, B. C., & Ranjbar, N. (2018). Microstructural characterization and mechanical properties of bottom ash mortar. Journal of Cleaner Production, 170, 797–804. doi:10.1016/j.jclepro.2017.09.191.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Mandal, A. K., & Sinha, O. P. (2014). Review on Current Research Status on Bottom Ash: An Indian Prospective. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 95(4), 277–297. doi:10.1007/s40030-014-0100-0.

Schaefer, R. J. (2010). Mechanical properties of rubber. Harris' Shock and Vibration Handbook, 6, 33-1, McGraw Hill Education, New York, United States.

Loykaew, A., & Utara, S. (2020). Effect of acidic and sulfated environments on phase transformation, compressive strength and microstructure of natural rubber latex-modified cement pastes. Journal of Materials Research and Technology, 9(6), 15496–15512. doi:10.1016/j.jmrt.2020.11.016.

Sukmak, G., Sukmak, P., Horpibulsuk, S., Yaowarat, T., Kunchariyakun, K., Patarapaiboolchai, O., & Arulrajah, A. (2020). Physical and mechanical properties of natural rubber modified cement paste. Construction and Building Materials, 244, 118319. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118319.

Elyasigorji, F., Farajiani, F., Hajipour Manjili, M., Lin, Q., Elyasigorji, S., Farhangi, V., & Tabatabai, H. (2023). Comprehensive Review of Direct and Indirect Pozzolanic Reactivity Testing Methods. Buildings, 13(11), 2789. doi:10.3390/buildings13112789.

An, J., Kim, J., & Nam, B. H. (2017). Investigation on impacts of municipal solid waste incineration bottom ash on cement hydration. ACI Materials Journal, 114(5), 701–711. doi:10.14359/51689712.

Olubajo, O., Osha, O., El-Nafaty, U., & Adamu, H. (2014). Effect of water-cement ratio on the mechanical properties of blended cement containing bottom ash and limestone. Civil and Environmental Research, 6(12), 1-9.

Gencel, O., Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., Yarar, D. O., Karimipour, A., & Ahmad, M. R. (2021). Influence of bottom ash and polypropylene fibers on the physico-mechanical, durability and thermal performance of foam concrete: An experimental investigation. Construction and Building Materials, 306, 124887. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124887.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานเผยแพร่ผลงานวิชาการ

Available online at www.CivileJournal.org

Civil Engineering Journal

(E-ISSN: 2476-3055; ISSN: 2676-6957)

Vol. 10, No. 08, August, 2024

Natural Rubber Latex-Modified Concrete with Bottom Ash for Sustainable Rigid Pavements

Karn Kantatham [1, 2], Menglim Hoy [1, 2*], Sutamas Sansri [1], Suksun Horpibulsuk [1, 2*], Apichat Suddeepong [2], Apinun Buritatum [1, 2], Teerasak Yaowarat [1, 2], Bundan Ro [1, 2], Veena Phunpeng [1, 2]

[1] *Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.*

[2] *Center of Excellence in Innovation for Sustainable Infrastructure Development, Institute of Research and Development, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.*

Received 17 April 2024; Revised 23 June 2024; Accepted 04 July 2024; Published 01 August 2024

Abstract

This article investigates the viability of using natural rubber latex (NRL)-modified concrete with bottom ash (BA) as a partial replacement for river sand in sustainable rigid pavements. Concrete mixes with 10% and 20% BA replacement ratios and varying NRL dosages (0%, 1.0%, 1.5%, and 2.0% by weight of cement) were prepared and evaluated for their mechanical and microstructural characteristics. Results showed that BA substitution decreased the compressive strength of concrete. However, the addition of NRL at an optimal dosage of 1.0% significantly improved both the compressive and flexural strengths. The 10%BA+1.0%NRL and 20%BA+1.0%NRL mixes exhibited mechanical properties surpassing the control mix and meeting the minimum requirements for rigid pavement materials. However, excessive NRL content (1.5% and 2.0%) led to a reduction in mechanical strength. Scanning electron microscopy analysis exhibited a denser and more compact matrix in NRL-modified BA concrete, with NRL films enhancing the interfacial bonding and crack-bridging mechanism. Nonetheless, excessive NRL content resulted in the formation of abundant and thicker NRL films, which disrupted the continuity of the cement matrix and created weak zones. X-ray diffraction analysis confirmed the existence of crucial crystalline phases and their optimal balance in the 20%BA+1.0%NRL mix, contributing to its superior performance. Mixes with excessive NRL contents exhibited lower intensities of quartz, calcite, and portlandite peaks, indicating a disturbance in the proper formation and growth of essential crystalline phases. The findings demonstrated the potential of NRL-modified BA concrete as an eco-friendly and high-performance alternative for sustainable rigid pavements when using an optimal NRL dosage, promoting the employment of waste resources and reducing the environmental impact of the construction industry.

Keywords: Bottom Ash; Natural Rubber Latex; Sustainable Concrete Pavement; Microstructural Analysis; Compressive Strength; Flexural Strength.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุฑามาศ แสนศรี เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2535 ปัจจุบันอยู่เลขที่บ้าน 1174 ม.4 ต.หนองจะบก อ.เมือง จ.นครราชสีมา เริ่มศึกษา -ระดับประถมศึกษาปีที่ ป.1 ถึง ป.6 โรงเรียนอนุบาลนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา - ระดับมัธยมศึกษาปีที่ ม.1 ถึง ม.6 โรงเรียนสุรธรรมพิทักษ์ จังหวัดนครราชสีมา -ระดับศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา -ประวัติการทำงานปัจจุบันเป็นเจ้าหน้าที่ในส่วนContractor ในโครงการระบบท่อส่งก๊าชธรรมชาติบนบกจากบางปะกงไปโรงไฟฟ้าพระนครใต้ (เฟสที่1) จังหวัดฉะเชิงเทรา และโครงการก่อสร้างโรงแยกก๊าชธรรมชาติหน่วยที่ 7 จังหวัดระยอง