

การศึกษากำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า  
ผสมน้ำยางพาราปรับสภาพ เถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์ และปูนซีเมนต์  
สำหรับงานชั้นพื้นทาง



นายกฤษฎา กิจเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2561

**THE STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH AND  
MICROSTRUCTURE OF RECLAIMED ASPHALT  
PAVEMENT (RAP) MIXED WITH MODIFIED  
RUBBER LATEX - FLY ASH GEOPOLYMER  
AND CEMENT FOR PAVEMENT BASE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Construction and  
Infrastructure Management  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2018**

การศึกษากำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า  
ผสมน้ำยางพาราปรับสภาพ ใ้ถ้ำลอยจีโอโพลีเมอร์ และปูนซีเมนต์  
สำหรับงานชั้นพื้นทาง

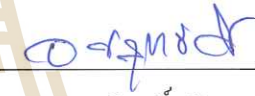
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ศ. ดร.พานิช วุฒิพิถกษย์)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สุขสันติ หอพิบูลสุข)

กรรมการ



(ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

กฤษฎา กิจเจริญ : การศึกษากำลั้งอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมน้ำยางพาราปรับสภาพ เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ และปูนซีเมนต์สำหรับงานชั้นพื้นทาง (THE STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH AND MICROSTRUCTURE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) MIXED WITH MODIFIED RUBBER LATEX - FLY ASH GEOPOLYMER AND CEMENT FOR PAVEMENT BASE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์, 88 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลั้งอัด (Compressive Strength) และโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (Fly Ash Geopolymer) และน้ำยางพาราปรับสภาพ (Modified Rubber Latex, MRL) ที่อัตราส่วนต่างๆ ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า ตัวอย่างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (RAP-FA Geopolymer) และตัวอย่างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์และน้ำยางพาราปรับสภาพ (RAP-MRL-FA Geopolymer) สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline Activator, AA) ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ผสมกันที่อัตราส่วน 50 : 50 เก็บกั๊นตัวอย่างโดยบดอัดในแบบ (Mold) ให้แน่นด้วยวิธีการทดสอบความหนาแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานที่ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) นำกั๊นตัวอย่างบ่มโดยใช้พลาสติกห่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดตามอายุบ่มที่ต้องการนำกั๊นตัวอย่างไปทดสอบค่ากำลั้งอัด, ค่ากำลั้งรับแรงดัด (Flexural Strength) และวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี (Element) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDS)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลั้งอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ ปริมาณเถ้าลอย, ปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์, ปริมาณน้ำยางพาราปรับสภาพ และระยะเวลาในการบ่ม จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลั้งอัดที่ 7 วันของทั้งตัวอย่าง RAP-FA Geopolymer และ RAP-MRL-FA Geopolymer สูงกว่าค่ากำลั้งอัดซึ่งกำหนดโดยกรมทางหลวงชนบทที่ 17.24 ksc สำหรับงานปรับปรุงคุณภาพชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Soil Cement Base) เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลั้งอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น และเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นค่ากำลั้งอัดก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน สำหรับตัวอย่าง RAP-MRL-FA Geopolymer ปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์และปริมาณน้ำยางพารา

ปรับสภาพส่งผลกระทบต่อการใช้งานสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ จึงทำให้ค่ากำลังอัดและกำลังรับแรงดัดลดลงเมื่อปริมาณน้ำยางพาราปรับสภาพเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อนำผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมปูนซีเมนต์และน้ำยางพาราปรับสภาพ (RAP-MRL-Cement) การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีได้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของตัวอย่างผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพ



สาขาวิชา การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา กฤษฎา กิ่งวงษ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร. อธิวัฒน์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ.ดร. อธิวัฒน์



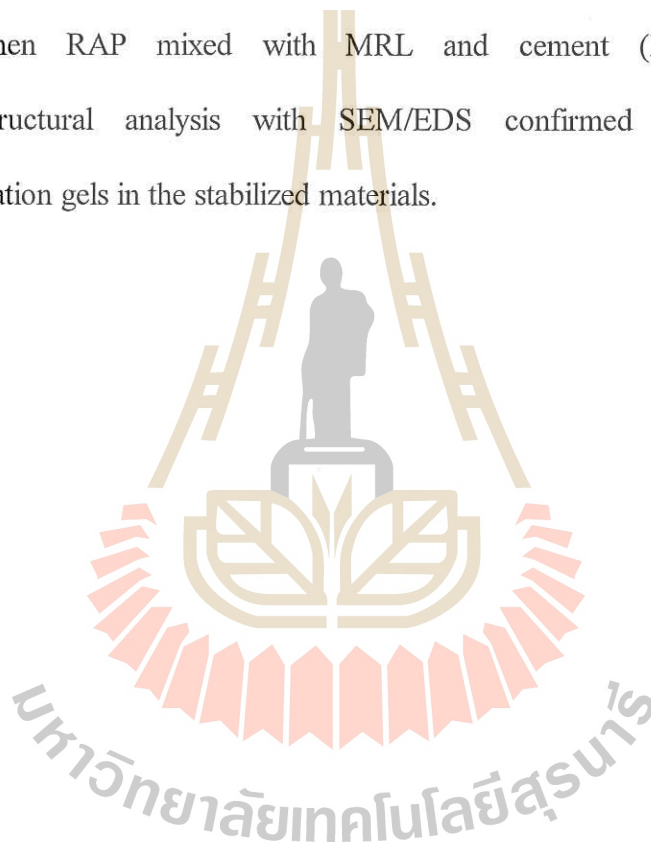
KRITSADA KITCHAROEN : THE STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH  
AND MICROSTRUCTURE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP)  
MIXED WITH MODIFIED RUBBER LATEX - FLY ASH GEOPOLYMER  
AND CEMENT FOR PAVEMENT BASE. THESIS ADVISOR : ASSOC.  
PROF. AVIRUT CHINKULKIJNIWAT, Ph.D., 88 PP.

ASPHALT CONCRETE/ MODIFIED RUBBER LATEX/ FLY ASH/ CEMENT/  
GEOPOLYMER/ COMPRESSIVE STRENGTH/MICROSTRUCTURE

This research aims to study on unconfined compressive strength (UCS) and microstructure of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) stabilized with fly ash (FA) geopolymer and mixed with modified rubber latex (MRL) at various ratios. Reclaimed Asphalt Pavement was tested in basic engineering properties before stabilizing. There were 2 types of samples tested : Reclaimed asphalt pavement mixed with fly ash geopolymer (RAP-FA geopolymer), reclaimed asphalt pavement mixed with modified rubber latex and fly ash geopolymer (RAP-MRL-FA geopolymer). A liquid alkaline activator (AA) is mixture of sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) solution and 8 M sodium hydroxide (NaOH) solution at  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  : NaOH ratio of 50 : 50. The samples were compacted in a mold at optimum moisture content (OMC) with modified proctor compaction and cured at room temperature for 7, 14 and 28 days. The samples should be tested for unconfined compressive strength, flexural strength (FS), microstructure and element analysis by Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM / EDS)

The factor that influence to strength development of geopolymer includes FA content, AA content, MRL content and curing time. The results showed that both

RAP-FA geopolymer and RAP-MRL-FA geopolymer had a 7-day UCS values higher base pavement strength requirement of 17.24 ksc (Soil cement base). The UCS values of RAP-FA geopolymer increase when FA content and curing time were increases. For the RAP-MRL-FA geopolymer, the AA content and MRL content have effect on the synthesis of geopolymer products, so the UCS and FS values of RAP-MRL-FA geopolymer decreased with increasing of MRL content, but UCS and FS values were increased when RAP mixed with MRL and cement (RAP-MRL-Cement). The microstructural analysis with SEM/EDS confirmed the formation of geopolymerization gels in the stabilized materials.



School of

Construction and Infrastructure Management

Academic Year 2018

Student's Signature ณัฐกร นาน้อย

Advisor's Signature อ.สุวิทย์

Co-advisor's Signature อ.สมชาย ใจดี

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.อิทธิกร ภูมิพันธ์ ผู้ซึ่งให้แนวคิด โอกาส และคำแนะนำในการแก้ไขปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจทานเนื้อหาอย่างละเอียด รวดเร็ว อันเป็นความกรุณาและคุณประโยชน์ต่อผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิฤกษ์ ประธานกรรมการ ดร.อภิชาติ สุดดีพงษ์ กรรมการ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์นี้ถูกต้อง ครบคลุมสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข คณะอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ซึ่งเป็นความรู้และประสบการณ์ที่มีค่าและมีประโยชน์ในการทำงานของผู้ศึกษาต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และโอกาสที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ นายชาญยุทธ กองเกิด ผู้อำนวยการส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 3 (ชลบุรี) และเจ้าหน้าที่ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือ สนับสนุน และให้คำปรึกษาจนกระทั่งการดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้อง สาขาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค รุ่นที่ 16 ทุกท่าน ที่ช่วยเหลือกัน ร่วมฟันฝ่าอุปสรรคจนถึงจุดหมายปลายทางของการศึกษา

ขอขอบคุณ ครอบครัวนวลปัทม และบริษัท อุทัยพาณิชย์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัย รวมถึงให้ที่พักอาศัยตลอดระยะเวลาในการศึกษา

และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ขอบคุณน้องสาว และครอบครัวที่สนับสนุน คอยให้กำลังใจ และคำปรึกษาจนสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

กฤษฎา กิจเจริญ



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย.....	5
<b>2 ปฏิบัติการวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 ประวัติศาสตร์ของถนน.....	6
2.2 แอสฟัลต์คอนกรีต.....	7
2.2.1 องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	8
2.2.1.1 ความหนาแน่น.....	8
2.2.1.2 ช่องว่างอากาศ.....	8
2.2.1.3 ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม.....	9
2.2.1.4 ปริมาณแอสฟัลต์.....	10
2.2.1.5 เสถียรภาพและการไหล.....	10
2.2.2 ปัญหาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2.1	ผิวทางเยี่ยม .....	11
2.2.2.2	ผิวทางเกิดการขูดตัวถาวร .....	12
2.2.2.3	ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ .....	13
2.2.2.4	ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากความล้า .....	13
2.2.2.5	การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้น .....	14
2.2.2.6	การเปลี่ยนคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น .....	15
2.3	ยางธรรมชาติ .....	18
2.3.1	ยางพารา .....	18
2.3.2	คุณสมบัติของยางพารา .....	20
2.4	จีโอโพลีเมอร์ .....	21
2.4.1	คุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์ .....	24
2.4.1.1	วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม .....	25
2.4.1.2	ค่ากำลังอัด .....	25
2.4.1.3	ความคงทน .....	25
2.4.1.4	การตรึงของเสียมิพิช .....	26
2.4.1.5	การทนไฟ .....	26
2.4.2	การประยุกต์ใช้จีโอโพลีเมอร์ .....	26
2.4.2.1	งานซ่อมแซม .....	27
2.4.2.2	อิฐจีโอโพลีเมอร์ .....	27
2.4.2.3	จีโอโพลีเมอร์คอนกรีต .....	27
2.5	ถ้ำลอย .....	27
2.5.1	ชนิดของถ้ำหิน .....	28
2.5.1.1	แอนทราไซต์ .....	28
2.5.1.2	บิทูมินัส .....	28
2.5.1.3	ซับบิทูมินัส .....	28
2.5.1.4	ลิกไนต์ .....	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า.....	28
2.5.2.1 ระบบเผาที่ความร้อนสูง.....	28
2.5.2.2 ระบบเผาที่ความร้อนปานกลาง.....	29
2.5.2.3 ระบบเผาที่ความร้อนต่ำ.....	29
2.5.3 คุณสมบัติของถ่านล้อย.....	31
2.5.4 ปฏิกริยาปอซโซลานของถ่านล้อย.....	32
2.6 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	34
2.7 การถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ร่วมกับชุดเอ็กซ์เรย์สเปคโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน.....	36
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
<b>3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>43</b>
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	43
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	43
3.2.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์.....	43
3.2.1.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า.....	43
3.2.1.2 น้ำยารักษาปรับสภาพ.....	43
3.2.1.3 ถ่านล้อย.....	43
3.2.2 สารเคมี.....	43
3.2.2.1 สารกระตุ้นอัลคาไลน์.....	43
3.2.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	43
3.2.2.3 สารละลายโซเดียมซลิเกต.....	44
3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	44
3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ.....	44
3.3.1.1 การทดสอบขนาดของเม็ดวัสดุ.....	44
3.3.1.2 การหาค่าขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก.....	44
3.3.1.3 การหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ.....	44

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1.4	การบดอัด.....	44
3.3.1.5	การทดสอบค่าแคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ.....	44
3.3.2	การทดสอบในห้องปฏิบัติการ.....	44
3.3.2.1	การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	44
3.3.2.2	การทดสอบกำลังรับแรงค้ำ.....	44
3.3.2.3	ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค.....	44
3.4	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	45
<b>4</b>	<b>ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล .....</b>	<b>47</b>
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าและถั่วลอย .....	47
4.1.1	วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า .....	47
4.1.2	ถั่วลอย.....	49
4.2	การบดอัดของตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์.....	50
4.3	กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลอย จีโอ โพลีเมอร์ .....	51
4.3.1	กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมถั่วลอยจีโอ โพลีเมอร์.....	51
4.3.2	กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลอย จีโอ โพลีเมอร์.....	53
4.4	กำลังรับแรงค้ำของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลอยจีโอ โพลีเมอร์ .....	56
4.4.1	กำลังรับแรงค้ำของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลอย จีโอ โพลีเมอร์.....	56
4.5	กำลังอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงค้ำของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและ ปูนซีเมนต์ .....	60
4.6	โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์ .....	60
4.6.1	โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผิวทางเก่าผสมถั่วลอยจีโอ โพลีเมอร์.....	60
4.6.2	โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลอย จีโอ โพลีเมอร์.....	62

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิควัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์.....	65
4.7.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์.....	65
4.7.2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์.....	68
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	71
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	73
	เอกสารอ้างอิง .....	74
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก บทความวิจัยเต็มรูปแบบในการประชุมวิชาการระดับชาติ.....	79
	ประวัติผู้เขียน .....	88



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ข้อกำหนดทางเคมีที่สำคัญของสารปอชโซลานสำหรับงาคอนกรีต.....30
2.2	สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมี และค่า LOI ของตัวอย่างเถ้า และวัสดุต่าง ๆ.....34
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า.....48
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย.....49
4.3	ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่างจีไอ โพลิเมอร์ .....51



## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	การก่อสร้างถนนตามวิธีของ Mr. John Macadam ..... 6
2.2	ส่วนประกอบทั่วไปของแอสฟัลต์คอนกรีต ..... 8
2.3	การไหลซึมของวัสดุแอสฟัลต์บนผิวทาง ..... 11
2.4	ก.) การการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับแนวทิศทางจราจร ..... 12
2.4	ข.) การการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางจราจร ..... 12
2.5	รอยแตกตามแนวขวางกับทิศทางการจราจร ..... 13
2.6	รอยแตกของผิวทางอันเนื่องมาจากความล้า ..... 14
2.7	การสึกกร่อนของผิวทาง ..... 15
2.8	การแตกร้าวและนำไปสู่การหลุดลอกของผิวทาง ..... 16
2.9	โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติแบบ cis 1, 4 polyisoprene ..... 19
2.10	องค์ประกอบของน้ำยางพารา ..... 19
2.11	การเกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชันของดินเหนียว $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}(\text{OH})_4$ ในสารอัลคาไลน์ ..... 22
2.12	การเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ..... 23
2.13	โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์พวกสายโซ่โพลีไซอะเลต ..... 24
2.14	โครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอย ..... 32
2.15	ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง XRF ..... 36
2.16	ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM ..... 37
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย ..... 46
4.1	วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า ..... 47
4.2	ขนาดคละของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าและเถ้าลอย ..... 48
4.3	ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย ..... 50
4.4	การบดอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอย ..... 51
4.5	กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ..... 52
4.6	กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ... 53

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กำลังรับแรงค้ำของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ข) 7 วัน.....	54
4.7 กำลังรับแรงค้ำของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ข) 14 วัน.....	54
4.7 กำลังรับแรงค้ำของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ค) 28 วัน.....	55
4.8 กำลังรับแรงค้ำของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน.....	57
4.8 กำลังรับแรงค้ำของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ข) 14 วัน.....	57
4.8 กำลังรับแรงค้ำของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ค) 28 วัน.....	58
4.9 กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน.....	59
4.9 กำลังรับแรงค้ำของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์ที่อายุบ่ม ที่อายุบ่ม (ข) 7 วัน.....	59
4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน.....	61
4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ข) 14 วัน.....	61
4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ค) 28 วัน.....	62
4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน.....	63
4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม (ข) 14 วัน.....	64

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลอ จีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม (ก) 28 วัน.....	64
4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นฟิล์มยางพารา (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (100X) .....	65
4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นฟิล์มยางพารา (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า (1,000X) .....	65
4.13 SEM/EDS และ mapping ของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าถั่วลอจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน.....	66
4.13 SEM/EDS และ mapping ของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าถั่วลอจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม (ข) 28 วัน.....	67
4.14 SEM/EDS และ mapping ของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลอ จีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน.....	69
4.14 SEM/EDS และ mapping ของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลอ จีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม (ข) 28 วัน.....	70

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AA	=	Liquid Alkaline Activator
ACI	=	American Concrete Institute
Al	=	อะลูมิน่า
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
$Al_2SiO_3$	=	อะลูมิเนียมซิลิเกต
C.B.R.	=	California Bearing Ratio
C-S-H	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์
EDS	=	Energy Dispersive X-ray Spectrometer
FA	=	เถ้าลอย
FS	=	Flexural Strength
LL	=	ค่าขีดจำกัดเหลว
MRL	=	น้ำยางพาราปรับสภาพ
NaOH	=	โซเดียมไฮดรอกไซด์
N-A-S-H	=	โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต
$Na_2SiO_3$	=	โซเดียมซิลิเกต
NP	=	Non Plastic
PI	=	ค่าขีดจำกัดพลาสติก
RAP	=	ผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า
SEM	=	Scanning Electron Microscopy
Si	=	ซิลิกา
$SiO_2$	=	ซิลิกอนไดออกไซด์
UCS	=	Unconfined Compressive Strength
XRF	=	X-ray fluorescence
มทช.	=	มาตรฐานงานทางกรมทางหลวงชนบท



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัญหาการชำรุดหรือเสียหายของถนนลาดยาง (Flexible Pavements) และถนนคอนกรีต (Rigid Pavements) เกิดมาจากหลายสาเหตุด้วยกันทั้งจากการออกแบบส่วนผสมที่ใช้ผลิตตัวคอนกรีตเองที่ไม่ได้มาตรฐานหรือจากชั้นพื้นทาง (Base) แข็งแรงไม่เพียงพอที่จะสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกจากยานพาหนะเมื่อถูกกดทับจากการจราจรได้ จึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวตามบริเวณมุมและรอยต่อของแผ่นคอนกรีต หรือจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสภาพภูมิอากาศในระหว่างวัน ทำให้เกิดการโก่งงอของแผ่นคอนกรีตขึ้นจากการขยายตัว และหดตัวของคอนกรีตโดยที่อุณหภูมิแวดล้อมสูงจะทำให้ยางมะตอย (Asphalt) อ่อนตัว และที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ยางมะตอยแตกผิวทางของถนนจึงเกิดความเสียหาย สาเหตุส่วนใหญ่อีกประการหนึ่งที่ทำให้ถนนคอนกรีตเกิดความเสียหายมักเกิดขึ้นจากโพรงใต้แผ่นคอนกรีต (Void) ซึ่งทำให้เกิดการแตกร้าวของถนนคอนกรีตในบริเวณที่มีโพรงใต้แผ่นคอนกรีตนั้นแผ่นคอนกรีตจะสูญเสียการพุง (Loss of Support) ทำให้แผ่นคอนกรีตต้องเผชิญกับความเค้นและความเครียด (Stress and Strain) จากการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่มากกว่าปกติ [1] จึงนำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าวในแผ่นคอนกรีตในที่สุด โดยปกติโพรงใต้ถนนคอนกรีตนั้นจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากแผ่นคอนกรีตจะเกิดความเสียหายมากจนสังเกตเห็นได้ เช่น รอยร้าว (Cracks) หรือรอยเลื่อนต่างระดับ (Faulting) เป็นต้น จากสาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้เองจึงทำให้ถนนมีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานลดน้อยลง

ปัจจุบันการซ่อมแซมถนนลาดยางและถนนคอนกรีตที่เกิดปัญหาจากความเสียหายดังกล่าวข้างต้นมีหลายวิธี เช่น การซ่อมแซมตลอดช่วงความหนา (Full Depth Repair) การซ่อมอุดโพรงด้วยน้ำปูนทราย (Subsealing) หรือการปะซ่อม (Patching) เป็นต้น และจากปัญหาความเสียหายดังกล่าวทำให้ต้องมีการซ่อมแซม และปรับปรุงถนนให้สามารถกลับมาใช้งานได้ตามปกติเพื่อป้องกันอันตรายและความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นต่อผู้ใช้ถนน หากปล่อยไว้นานก็จะยิ่งก่อให้เกิดความเสียหายมากขึ้นรวมทั้งค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม และปรับปรุงถนนคอนกรีตก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นไปด้วย

เทคนิคในการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้ใหม่ (Asphalt Concrete Recycling) คือ การนำวัสดุผิวทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำไปใช้งานใหม่ให้มีคุณภาพตามข้อกำหนด โดยอาจจะเพิ่มปริมาณวัสดุจำพวก หิน ทราย ฯลฯ และเพิ่มวัสดุผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพ เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์ หรือสารผสมอื่น ๆ เพิ่มเติม เป็นต้น การปรับปรุงชั้นทางนี้อาจทำการปรับปรุงชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้รวมถึงการอบผิวทางแอสฟัลต์เก่าให้ร้อนแล้วขูดลอกผิวหน้า ออกส่งเข้าเครื่องผสมใหม่แล้วนำมาปูเป็นพื้นทางได้อีก ในแต่ละปีมีการซ่อมผิวทางหลาย กิโลเมตรทำให้มีขยะผิวทางเดิมที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก และคาดการณ์ว่าในอนาคต อาจมีปริมาณผิวทางเก่าสูงถึง 463,271 ตัน [2] ทั้งนี้การนำวัสดุผิวทางเก่ามาใช้จะต้องก่อสร้างให้ ถูกต้องตามขั้นตอน และปิดทับด้วยผิวทางใหม่ วัสดุผิวทางเดิมส่วนที่เหลือจึงกลายเป็นขยะที่ไม่ สามารถนำใช้งานอีกต่อไป สำหรับวิธีการนำแอสฟัลต์เก่ามาผสมซ้ำโดยไม่ต้องใช้แอสฟัลต์ใหม่ จากโรงงานในการปูเสริมผิวหน้าชั้นสุดท้าย จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ศึกษาการนำแอสฟัลต์มา ผสมซ้ำโดยใช้วัสดุเก่าทั้งหมดร้อยละ 100 นำไปคลุกเคล้าโดยเพิ่มน้ำมันดีเซลเพื่อทำปฏิกิริยากับยาง AC 60/70 ทำให้ได้วัสดุผิวทางใหม่ที่คงทน แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบมีราคาสูงขึ้น และมี ปริมาณน้อยลงเรื่อย ๆ รวมไปถึงการขาดแคลนวัสดุมวลรวมที่มีคุณภาพในบางท้องถิ่นโดยเฉพาะ ในส่วนของงานที่จำเป็นต้องใช้วัสดุเหล่านี้ในการก่อสร้างทาง [3] ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนา เทคโนโลยีเพื่อให้สามารถนำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในผิวทางที่เก่าแล้วกลับมาใช้ใหม่ให้มี ประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลา ลดขั้นตอนในการทำงาน และประหยัดงบประมาณ ในการก่อสร้าง อีกทั้งยังช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และไม่ส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่ง กรมทางหลวงได้นำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพที่เรียกว่าการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้ ใหม่ (Asphalt Concrete Recycling) นี้มาใช้ปรับปรุงถนนสายหลักที่เกิดการชำรุดเสียหายอย่างไรก็ตาม หลังการปรับปรุงถนนที่นำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้ใหม่พบว่าในระยะเวลาไม่นานก็จะ เกิดความเสียหายของผิวถนนตามมา

จากแนวคิดในการพัฒนาเทคโนโลยีในการนำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในผิวทางที่เก่าแล้ว กลับมาใช้ใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีการประกอบอาชีพ อุตสาหกรรมเป็นหลักทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมากมาย เช่น ถ้ำลอย ถ้ำเคลือบ ถ้ำชานอ้อย เป็นต้น ถ้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นสารปอซโซลานที่สามารถนำมาใช้เป็นสาร ตังต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาทาง เคมี โดยใช้วัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีของธาตุที่อยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) มี ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นส่วนใหญ่ นิยมใช้ถ้ำลอยมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณการผลิตสูงมากในแต่ละวัน และถ้ำลอยมีองค์ประกอบของซิลิกา (Si) และ

อะลูมินา (Al) ที่ได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า มีทั้งความเป็นออสติฐานและผลึกในอนุภาค ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จากถั่วลอทยสามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จึงมีการประยุกต์ใช้ถั่วลอทยจีโอโพลิเมอร์กับคอนกรีตเพื่อใช้งานก่อสร้างถนน [4]

นอกจากนี้ในสภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบันทำให้ราคายางพารา (Para rubber latex) มีราคาตกต่ำลงอย่างมากและที่ผ่านมามีการนำยางพาราไปประยุกต์ใช้อุตสาหกรรมมากมาย รวมถึงการนำยางพาราไปผสมกับยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (Asphalt) เพื่อนำมาใช้สำหรับงานสร้าง และซ่อมแซมถนนอีกด้วย ซึ่งส่วนผสมของยางพารานี้ได้มีการศึกษาและทดลองใช้ในพื้นที่ชุมชน และมีการรับรองสูตรโดยกรมทางหลวงแล้ว แต่ถนนที่มีส่วนผสมของยางพารายังไม่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย [5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงแนวทางในการนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยผสมน้ำยางพาราสดและถั่วลอทยจีโอโพลิเมอร์สำหรับงานชั้นพื้นทาง เพื่อให้ได้ถนนที่มีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้น และยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการส่งเสริมการใช้ยางพาราในประเทศไทยให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มมูลค่าอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของน้ำยางพาราปรับสภาพ และถั่วลอทยจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมของน้ำยางพาราปรับสภาพ และถั่วลอทยจีโอโพลิเมอร์ที่มีผลต่อกำลังอัดแกนเดียว กำลังรับแรงดัด และโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า

1.2.3 เพื่อศึกษากำลังอัดแกนเดียว กำลังรับแรงดัด และ โครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้ใหม่

1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเก่า และน้ำยางพาราปรับสภาพไปประยุกต์ใช้ในการสร้างถนน และซ่อมแซมชั้นพื้นทางที่มีคุณภาพตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

- จากถนนทางหลวงหมายเลข 331 เขต ตำบลปอวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
- 1.3.2 นํ้ายางพาราปรับสภาพ ทล.1 CRD30 (Modified Rubber Latex, MRL)  
จากตำบลเขาทะเล อำเภอพุนพิน จังหวัดนครศรีธรรมราช
- 1.3.3 เถ้าลอย ชนิด F (Fly Ash Class F, FA)  
จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง
- 1.3.4 สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline Activator, AA)  
อัตราส่วนผสมของ NaOH: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 50:50 โดยน้ำหนัก
- 1.3.4.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)  
ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ (M)
- 1.3.4.2 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)  
โซเดียมซิลิเกตเหลว Type CR 53 ตาม ม.อ.ก.433 - 2539
- 1.3.5 อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตแก่ต่อเถ้าลอยต่อสารกระตุ้นอัลคาไลน์ (RAP: FA: AA) ร้อยละโดยน้ำหนักของ RAP ดังนี้
- 100% RAP + 5% FA + Alkaline Activator
  - 100% RAP + 10% FA + Alkaline Activator
  - 100% RAP + 15% FA + Alkaline Activator
  - 100% RAP + 20% FA + Alkaline Activator
- 1.3.6 อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตแก่ต่อเถ้าลอยและนํ้ายางพาราปรับสภาพต่อสารกระตุ้นอัลคาไลน์ (RAP: FA: MRL:AA) ร้อยละโดยน้ำหนักของ RAP ดังนี้
- 100% RAP + 5% FA + Modified Rubber Latex + Alkaline Activator
  - 100% RAP + 10% FA + Modified Rubber Latex + Alkaline Activator
  - 100% RAP + 15% FA + Modified Rubber Latex + Alkaline Activator
  - 100% RAP + 20% FA + Modified Rubber Latex + Alkaline Activator
- 1.3.7 บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน
- 1.3.8 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 303-2545 (เทียบเท่า AASHTO T 207 และ T 208) [6]
- 1.3.9 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength, FS) ตามมาตรฐาน ASTM D1632 [7] และ ASTM D1635 [8]
- 1.3.10 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

1.3.10.1 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับชุดเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDS)

1.3.11 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

1.3.11.1 การหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve analysis)

1.3.11.2 การหาขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limits)

1.3.11.3 การหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles abrasion)

1.3.11.4 การบดอัด (Compaction)

1.3.11.5 การทดสอบค่าแคลิฟอร์เนีย แบริง เรโซ (CBR)

#### 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเท่ากับน้ำยางพาราปรับสภาพและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

1.4.2 ทราบถึงกำลังอัดแกนเดียว กำลังรับแรงดัดและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเท่าที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว

1.4.3 ทราบถึงความเป็นไปได้ของการนำแอสฟัลต์คอนกรีตเท่าและน้ำยางพาราปรับสภาพไปใช้ในการสร้างถนนและซ่อมแซมชั้นพื้นทางที่มีคุณภาพตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

#### 1.5 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ระยะเวลาตั้งแต่ 1 ธันวาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561 (รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 10 เดือน)



## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ประวัติศาสตร์ของถนน (A History of the Road) [9]

ในยุคเริ่มแรกมนุษย์ใช้ทางเท้า (Traces) ในการคมนาคมเดินไปมาหากัน ต่อมาเมื่อรู้จักใช้สัตว์เป็นพาหนะจึงเปลี่ยนมาใช้สัตว์ในการขับล้อเลื่อนและเริ่มใช้ทางเกวียน ทางสร้างด้วยหินถูกสร้างครั้งแรกเมื่อก่อนคริสต์ศักราช 3,500 พบในเมโสโปเตเมีย (Mesopotamia) สมัยโรมันรุ่งเรืองชาวโรมันได้สร้างติดต่อระหว่างอาณาจักรต่าง ๆ ต่อมาเมื่อศตวรรษที่ 18 Mr. Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้เริ่มสร้างถนนให้ดีขึ้น โดยใช้หินมาถมเป็นชั้น ๆ ทำให้ถนนรับน้ำหนักและมีความทนทานมากขึ้น หลังจากนั้น Mr. John Macadam วิศวกรชาวอังกฤษได้นำหินมาเรียงกันเป็นผิวทาง และให้รถม้าวิ่งบดทับให้แน่น (รูปที่ 2.1) ทางลักษณะนี้จึงให้ชื่อว่า Macadam ซึ่งมีรูปแบบการใช้งานมาจนถึงปัจจุบันนี้ ในสหรัฐอเมริกาการก่อสร้างทางเริ่มจากการปรับปรุงทางเก่า และเก็บค่าผ่านทาง (Turnpike) ซึ่งอาจจะลงทุนโดยรัฐบาลหรือเอกชน ทางสายแรกสร้างระหว่างฟิลาเดเฟีย และเวอร์จิเนีย ต่อมาการสร้างทางหลวงถูกพัฒนามาเรื่อย ๆ เช่น การนำแอสฟัลต์มาใช้ประกอบกับหินหรือมวลรวม ใช้ในลักษณะของ Mixed Inplace and Asphaltic Concrete หรือผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กปัจจุบัน และ Prestress Concrete ถูกนำมาใช้กับทางหลวง

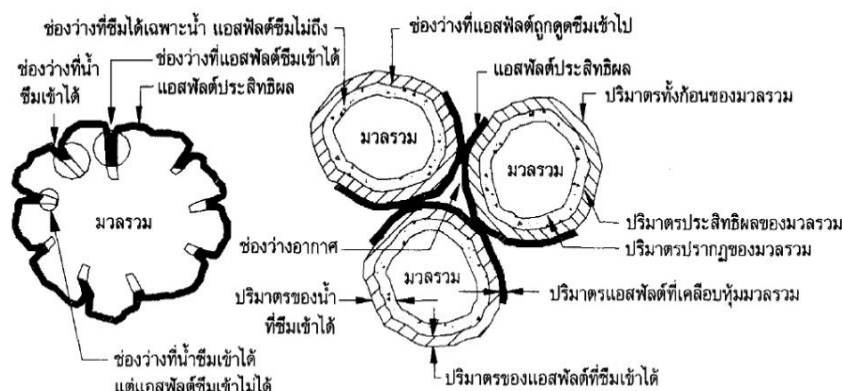


รูปที่ 2.1 การก่อสร้างถนนตามวิธีของ Mr. John Macadam [10]

## 2.2 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) [11]

แอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง วัสดุทำผิวทางหรือพื้นทางบดอัดแน่น ซึ่งได้จากการผสมกันระหว่างวัสดุมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ตามอัตราส่วนผสมที่ได้ ออกแบบไว้ โดยในการผสมกันนี้จะต้องให้ความร้อนทั้งวัสดุมวลรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์จนได้อุณหภูมิตามที่กำหนดเสียก่อนเมื่อผสมเข้ากันดีแล้ว จึงนำไปใช้งานพร้อมบดอัดให้แน่นและเรียบขณะที่ยังร้อนอยู่ ตาม มทข.230 – 2545 : มาตรฐานงานแอสฟัลต์คอนกรีต (มาตรฐานงานแอสฟัลต์คอนกรีต, กรมทางหลวงชนบท) เป็นแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีผิวทางคุณภาพดี แข็งแรง สึก่อนข้างด้ารองรับปริมาณการจราจรที่หนาแน่นมาก ๆ ได้ จึงเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ แบล็กท็อป (Blacktop) หรือส่วนผสมร้อน (Hot mix) ดังนั้นแอสฟัลต์คอนกรีตจึงมักนิยมนำใช้สำหรับถนนลาดยางคุณภาพดีทั่วไป รวมถึงลานจอดรถขนาดใหญ่ แต่จะไม่นิยมนำไปใช้สร้างถนนในชนบทหรือถนนที่มีปริมาณการจราจรเบาบางมาก เนื่องจากไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในการก่อสร้าง ถนนลาดยางประเภทผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนี้จัดเป็นถนนที่มีความปลอดภัย มีเสถียรภาพ และมีความทนทานดี คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตนี้จะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และมวลรวม ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของส่วนผสมตลอดจนสัดส่วนที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม และกระบวนการในการผลิตส่วนผสม

ในแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีปริมาณสัมพัทธ์ระหว่างมวลรวม แอสฟัลต์ และอากาศ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต แอสฟัลต์ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาคมวลรวมจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานอนุภาคมวลรวมให้เกาะติดกันแน่นไม่หลุดออกง่ายจึงเรียกว่า แอสฟัลต์ประสิทธิผล (Effective asphalt) ซึ่งมีแอสฟัลต์บางส่วนถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคมวลรวม (Absorbed Asphalt) และช่องอากาศ (Air void) ที่อยู่ระหว่างอนุภาคมวลรวมที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่ โดยทั่วไปปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมนี้นี้จะมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวมชนิดนั้นได้ประมาณร้อยละ 50 (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบทั่วไปของแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete) [11]

## 2.2.1 องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

### 2.2.1.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง มวลของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากพอจะทำให้มีอายุการใช้งานนานและมีคุณภาพดี โดยทั่วไปการบดอัดด้วยรถบดในสนามจะได้ความหนาแน่นน้อยกว่าความหนาแน่นที่ออกแบบไว้ซึ่งถูกบดอัดด้วยเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นต่ำสุดที่ต้องบดอัดให้ได้ในสนาม จะกำหนดให้เป็นค่าร้อยละของความหนาแน่นที่ทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ กรมทางหลวงจึงได้กำหนดการบดอัดต้องให้ได้ความหนาแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของความหนาแน่นที่ทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ

### 2.2.1.2 ช่องว่างอากาศ (Air void)

ช่องว่างอากาศ (Air void, AV) ของแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง ช่องว่างเล็กๆ ที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการบดอัดแล้วจะต้องมีปริมาณช่องว่างอากาศเพียงพอ หลังจากที่เปิดใช้การจราจรแล้วยานพาหนะที่แล่นบนผิวทางจะทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแน่นขึ้นกว่าเดิม จึงมีปริมาณช่องว่างอากาศลดลง ดังนั้นถ้าปริมาณช่องว่างอากาศที่ก่อสร้างเสร็จใหม่มีไม่เพียงพอจะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาบนผิวหน้าของถนน นอกจากนี้ช่องว่างอากาศยังเป็นที่รองรับแอสฟัลต์ที่ขยายตัวเมื่อสภาพอากาศร้อนขึ้นอีกด้วย สำหรับผิวทางชั้นบนสุดจะออกแบบให้มีปริมาณช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 3 – 5 ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหนักรถของยานพาหนะที่แล่นบนผิวทาง ส่วนผิวทางชั้นล่างอาจออกแบบให้มีปริมาณช่องว่างอากาศได้มากถึงร้อยละ 4 – 7 เป็นต้น

ปริมาณช่องว่างอากาศมีผลต่อความทนทานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ถ้าปริมาณช่องว่างอากาศน้อย น้ำ และอากาศมีโอกาสซึมผ่านเข้าไปทำลายการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้น้อย ทำให้ผิวทางมีอายุการใช้งานนานขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าปริมาณช่องว่างอากาศมีน้อยเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาจากผิวหน้าของถนนได้ และที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ผิวทางมีแอสฟัลต์ไหลเยิ้ม (Bleeding) และเกิดการยุบตัวแบบถาวร (Permanent deformation) หรือเกิดร่องล้อ (Rutting) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ในขณะที่เดียวกันถ้าปริมาณช่องว่างอากาศมากเกินไปจะทำให้ น้ำและอากาศซึมผ่านเข้าไปทำลายการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้มากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างน้ำกับอากาศจะทำให้วัสดุแอสฟัลต์เกิดการแข็งตัวเมื่อผ่านการใช้งาน (Aging) ทุกระยะหนึ่ง ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีสภาพแข็งเปราะและเกิดการแตกร้าวได้ ยิ่งเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกในลักษณะซ้ำซากก็จะเกิดการเสียหายในลักษณะของการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) ดังนั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณจราจรที่ออกแบบไว้จะต้องมีปริมาณช่องว่างอากาศไม่น้อยกว่าร้อยละ 3 และไม่มากเกินไปกว่าร้อยละ 5 ซึ่งโดยทั่วไปจะพิจารณาค่ากลางของปริมาณช่องว่างอากาศ คือ ร้อยละ 4 ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ดังนั้นความหนาแน่นและปริมาณช่องว่างอากาศจึงมีความสัมพันธ์กัน ถ้าความหนาแน่นมากปริมาณช่องว่างอากาศจะน้อย การกำหนดค่าความหนาแน่นต่ำสุดของผิวทางจะต้องคำนึงถึงปริมาณช่องว่างอากาศด้วย โดยปกติผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดเสร็จใหม่ มักจะกำหนดค่าความหนาแน่นต่ำสุดให้มีปริมาณช่องว่างอากาศน้อยกว่าร้อยละ 8

### 2.2.1.3 ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Void in Mineral Aggregate)

ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Void in Mineral Aggregate, VMA) หมายถึง ปริมาณช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งรวมทั้งช่องว่างที่ถูกแอสฟัลต์แทนที่ด้วย (Voids Filled with Asphalt, VFA) ดังนั้นช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมจึงเป็นปริมาณช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ร่วมกับปริมาณช่องว่างอากาศ (Air void, AV) สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า  $VMA = VFA + AV$  สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากัน แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า VMA สูงกว่าจะมีความทนทานต่อการใช้งานยาวนานกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า VMA ต่ำกว่า เนื่องจากมวลรวมที่มีค่า VMA สูงกว่า ย่อมมีปริมาตรช่องว่างสำหรับใส่แอสฟัลต์ได้มากกว่า ทำให้ได้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มผิวอนุภาคของมวลรวมหนากว่า แอสฟัลต์คอนกรีตจึงมีความทนทานและมีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้น (Aging resistance) ถึงแม้ส่วนผสมที่มีค่า VMA น้อยกว่า

ข้อกำหนดจะทำให้ใช้ปริมาณแอสฟัลต์น้อยลง แม้จะเป็นการประหยัดแต่จะทำให้ได้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความทนทานลดลง

#### 2.2.1.4 ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt content)

ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt content) ในแอสฟัลต์คอนกรีตมีผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นอย่างมาก ดังนั้นปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้จะต้องถูกต้องและแน่นอนไม่ว่าจะเป็นการผสมในห้องปฏิบัติการหรือที่โรงผสมในสนาม ข้อกำหนดต่าง ๆ เกี่ยวกับคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการ ในการออกแบบจะเป็นตัวกำหนดปริมาณแอสฟัลต์ที่ต้องใช้ในส่วนผสม

ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่ ขนาดคละ และคุณสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์ มวลรวมที่มีขนาดคละ ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กจะต้องการแอสฟัลต์สำหรับผสมมากกว่ามวลรวมที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ เหตุผลคือ เมื่อปริมาตรเท่ากันมวลรวมที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ จึงต้องใช้แอสฟัลต์มากกว่าเพื่อเคลือบผิวอนุภาคของมวลรวม มวลรวมที่ดูดซึมแอสฟัลต์มากทำให้ต้องใช้แอสฟัลต์ผสมมากเพื่อชดเชยส่วนที่ถูกดูดซึมไป

#### 2.2.1.5 เสถียรภาพและการไหล (Stability and Flow)

เสถียรภาพ (Stability) หมายถึง ความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจรได้โดยไม่เกิดร่องล้อหรือเป็นคลื่น หรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผิดไปจากเดิม (Deformation) เป็นค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดโดยทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่วนค่าการไหล (Flow) เป็นการวัดค่าการเคลื่อนที่หรือหน่วยการยุบตัว (Strain) โดยวัดจากระยะทางที่แอสฟัลต์คอนกรีตยุบตัวลงขณะที่ไม่มีแรงกระทำ กับขณะที่มีแรงกระทำสูงสุดของเสถียรภาพ ความมีเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายใน และแรงยึดประสานระหว่างอนุภาคมวลรวม ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคของมวลรวมเกิดการเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกัน เมื่อมีน้ำหนักของยานพาหนะมากระทำ

โดยทั่วไปมวลรวมที่มีรูปร่างและอนุภาคเป็นเม็ดเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระจะให้ค่าเสถียรภาพสูง แรงยึดเกาะจะมีค่ามากหากแอสฟัลต์ที่ใช้มีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมจะทำให้ค่าแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์จนถึงระดับหนึ่งจะทำให้แอสฟัลต์ที่เคลือบอนุภาคของมวลรวมหนาเกินไป เป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมมีค่าลดลง จึงทำให้เสถียรภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตลดลงด้วย ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมจะต้องออกแบบให้มีเสถียรภาพสูงพอที่จะรับ



น้ำหนักการจราจรได้ ซึ่งควรคำนึงด้วยว่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไปจนขาดความยืดหยุ่นอาจทำให้ผิวทางเกิดความเสียหายได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้แอสฟัลต์คอนกรีตปูลงบนผิวทางเดิมที่มีการแอ่นตัวสูง

## 2.2.2 ปัญหาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต [12]

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงจะแอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนตัวในขณะที่อุณหภูมิต่ำแอสฟัลต์คอนกรีตจะแตกเปาะ อีกทั้งปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดปัญหาการชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาสูงมากขึ้น ซึ่งลักษณะความเสียหายที่พบมีดังนี้

### 2.2.2.1 ผิวทางเยิ้ม (Bleeding)

ผิวทางเยิ้ม (Bleeding) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุแอสฟัลต์ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไหลขึ้นมารวมกันที่ผิวหน้าเมื่ออุณหภูมิสูงหลังจากได้รับน้ำหนักบรรทุก โดยแอสฟัลต์คอนกรีตจะไหลเยิ้มทำให้ผิวทางลื่น (รูปที่ 2.3) เกิดจากแอสฟัลต์มีค่าความหนืดต่ำ (Low viscosity) และมีค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) สูงมาก หรือปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt content) ในแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมไม่ถูกต้อง อาจมีปริมาณมากเกินไป นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากวัสดุแอสฟัลต์มีจุดอ่อนตัว (Softening point) ต่ำ ทำให้แอสฟัลต์อ่อนตัวง่ายและก่อให้เกิดร่องล้อ (Rutting) ที่ผิวทางขึ้นได้

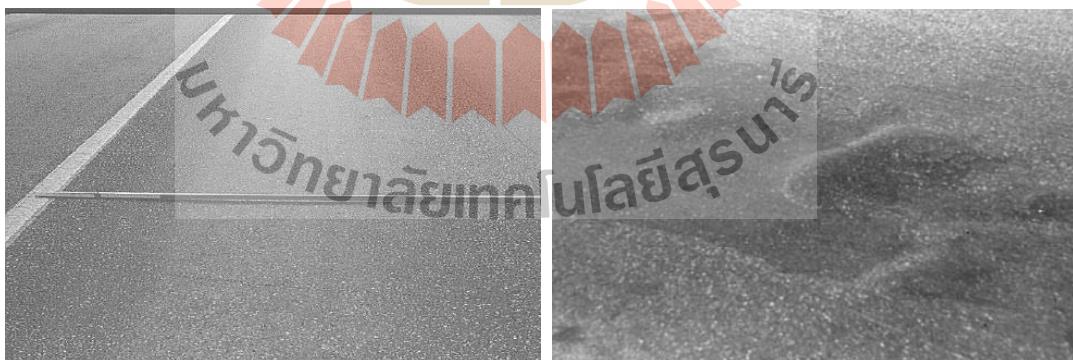


รูปที่ 2.3 การไหลเยิ้มของวัสดุแอสฟัลต์บนผิวทาง (Bleeding) [13]

### 2.2.2.2 ผิวทางเกิดการยุบตัวถาวร (Permanent deformation)

การยุบตัวถาวร (Permanent deformation) เป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นผิวทางหรือชั้นโครงสร้างทางอย่างถาวร โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุกที่แล่นผ่านหรือบริเวณที่มีการหยุดรถของรถบรรทุกหนัก การยุบตัวถาวรสามารถเกิดขึ้นเฉพาะที่ชั้นผิวทางหรือเฉพาะที่ชั้นโครงสร้าง หรือทั้งชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทางได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยการที่ชั้นทางนั้นใช้วัสดุในการก่อสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพที่ดีพอ ทำให้เกิดการยุบตัวเนื่องจากการทับถมหรือเกิดการไหลตัวของชั้นทางนั้นอย่างถาวร อาจเกิดหลังจากที่ผิวทางมีการไหลเยิ้ม (Bleeding) ก็ได้ โดยทั่วไปการยุบตัวถาวรจะมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ การยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุกขนานกับทิศทางการจราจรที่เรียกว่าร่องล้อ (Rutting) (รูปที่ 2.4 ก.) และการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางการจราจร และมักจะเกิดบริเวณที่การจราจรหยุดหรือเคลื่อนตัวช้าๆ ที่เรียกว่า Shoving (รูปที่ 2.4 ข.)

ส่วนมากตามถนนในพื้นที่นอกเมืองจะพบการยุบตัวถาวรชนิด Rutting มากกว่า เพราะการจราจรเคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงกว่า ส่วนพื้นที่ในเมืองมักพบทั้ง Rutting และ Shoving โดยเฉพาะบริเวณตามทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจร ป้ายรถประจำทางหรือบริเวณที่มีการจราจรติดขัดเป็นประจำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการหยุดจอดบ่อยครั้งของการจราจรที่มีน้ำหนักรถบรรทุกมาก ทำให้เกิด Shoving ได้ง่าย ซึ่งคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์นั้นก็มีส่วนสำคัญเช่นกันที่จะส่งผลต่อการยุบตัวอย่างถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 2.4 ก.) การการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับแนวทิศทางการจราจร (Rutting)

ข.) การการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางการจราจร (Shoving) [13]



### 2.2.2.3 ผิวทางแตกร้าวนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal cracking)

การแตกร้าวนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal cracking) ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต มีสาเหตุมาจากแรงเค้นดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เย็นจัด (ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง) อย่างรวดเร็ว เมื่อแรงเค้นดึงนี้มีค่ามากเกินกว่าค่ากำลังรับแรงดึงของส่วนผสมแอสฟัลต์ที่สามารถรับได้ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวจึ้น ลักษณะของรอยแตกร้าวนื่องจะเป็นรอยแตกตามแนวขวางกับทิศทางการจราจร (Transverse) (รูปที่ 2.5) สำหรับการแตกร้าวนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต จะเป็นผลโดยตรงมาจากคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์จะมีลักษณะแข็งและเปราะ ง่ายต่อการแตกร้าวนื่อง วัสดุแอสฟัลต์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเกรด แหล่งน้ำมันดิบ อายุ และอัตราการเกิดความเครียดของวัสดุแอสฟัลต์ วัสดุแอสฟัลต์ที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวนื่องสูงเช่นกัน



รูปที่ 2.5 รอยแตกตามแนวขวางกับทิศทางการจราจร (Transverse cracking) [13]

### 2.2.2.4 ผิวทางแตกร้าวนื่องจากความล้า (Fatigue cracking)

การแตกร้าวนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) จากการรับน้ำหนักบรรทุกบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เกิดจากการที่ผิวทางต้องรับน้ำหนักจราจรซ้ำไปซ้ำมา (Repeated load) เป็นระยะเวลานานจนเกิดความล้า (รูปที่ 2.6) ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกร้าวนื่องเนื่องจากการรับน้ำหนักซ้ำไปซ้ำมานี้ ได้แก่ การออกแบบโครงสร้างชั้นทาง คุณภาพของวัสดุ

แอสฟัลต์ ปริมาณของวัสดุแอสฟัลต์ ปริมาณช่องว่างระหว่างวัสดุรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์ คอนกรีต คุณภาพในสนามของวัสดุชั้นทาง อุณหภูมิ และปริมาณการจราจร



รูปที่ 2.6 รอยแตกของผิวทางอันเนื่องมาจากความล้า (Fatigue cracking) [13]

#### 2.2.2.5 การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้น (Moisture damage)

การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้น (Moisture damage) ไม่ใช่ความเสียหายจากถนนแต่เป็นผลกระทบหลักที่จะก่อให้เกิดความเสียหายกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เนื่องจากความชื้นจะไปทำลายการยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุรวมกับวัสดุแอสฟัลต์ทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุรวมจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่เรียกว่า Raveling คือ การสึกกร่อนของผิวทาง เนื่องจากวัสดุส่วนละเอียดที่ผิวหน้าของวัสดุแอสฟัลต์ถูกแรงเฉือนจากล้อรถตะกุกจนหลุดออก ทำให้ผิวทางมีลักษณะหยาบขรุขระ ไม่ราบเรียบ มีหินใหญ่โผล่ขึ้นมา (รูปที่ 2.7) ความเสียหายดังกล่าวนี้จะทำให้โครงสร้างชั้นทางมีกำลังลดลงนำไปสู่การแตกร้าวหรือการยุบตัวอย่างถาวรในแนวร่องล้อต่อไป



รูปที่ 2.7 การสึกกร่อนของผิวทาง (Raveling) [13]

#### 2.2.2.6 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น (Aging)

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น (Aging) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยตรง แต่เป็นสาเหตุที่จะทำให้เกิดความเสียหายในระยะเวลาดต่อมา เพราะแอสฟัลต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่มากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการแข็งเปราะ แม้ว่าการแข็งขึ้นของแอสฟัลต์ดังกล่าวจะเป็นผลดีต่อการต้านทานต่อการยุบตัวอย่างถาวร แต่หากเกิดการแข็งตัวมากเกินไปจนเปราะแล้วจะทำให้เกิดการแตกร้าวและนำไปสู่การหลุดลอกได้ (Stripping) (รูปที่ 2.8)

ภาวะการเกิด Aging อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในระหว่างขั้นตอนการผสมแอสฟัลต์กับมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และในระหว่างการใช้งานในภาคสนาม ภาวะ Aging สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาทั้ง 7 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 การแตกร้าวและนำไปสู่การหลุดลอกของผิวทาง (Stripping) [13]

### ก. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากออกซิเจนทำปฏิกิริยากับวัสดุแอสฟัลต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วหรือช้าขึ้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแอสฟัลต์ อุณหภูมิ และอัตราการกระจายตัวของออกซิเจน นอกจากนี้ความพรุนของวัสดุรวมก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยานี้ด้วย โดยที่ ณ อุณหภูมิและความดันปกติปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและแอสฟัลต์จะเกิดขึ้นช้ามาก แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้จะมีผลทำให้ฟิล์มของแอสฟัลต์บนผิวทางมีความแข็งเป็นพิเศษ และหากไม่มีการรบกวนใด ๆ แล้วฟิล์มนี้จะทำหน้าที่สกัดกั้นออกซิเจนจากสภาวะแวดล้อม ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่ให้เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องลงไปชั้นผิวทาง แต่ถ้าหากผิวทางแข็งเปราะและเกิดรอยแตกร้าว จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในชั้นผิวทางได้และเกิดรอยแตกร้าวอย่างต่อเนื่อง

### ข. ปฏิกิริยาโวลติไลเซชัน (Volatilization reaction)

ปฏิกิริยาโวลติไลเซชัน (Volatilization) เป็นปฏิกิริยาการระเหยของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบาจากวัสดุแอสฟัลต์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการผสมแอสฟัลต์กับวัสดุรวมที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากแอสฟัลต์อยู่ในลักษณะของฟิล์มที่บางจึงง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา

### ค. ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization reaction)

ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการเรียงตัวของโมเลกุลขนาดเล็กของแอสฟัลต์มาจับรวมกันเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ขึ้น จึงเป็นผลทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น

### ง. ปฏิกริยาที่โซทรอปี่หรือสเตอริก ฮาร์ดนิ่ง (Thixotropy or Steric hardening)

ปฏิกริยาที่โซทรอปี่ (Thixotropy) หรือสเตอริก ฮาร์ดนิ่ง (Steric hardening) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของวัสดุแอสฟัลต์มีการยึดเกาะกันแน่น เมื่อถูกปล่อยไว้เป็นเวลานานโดยปราศจากสิ่งรบกวน กล่าวคือ ถนนที่ปราศจากการสัญจรเป็นเวลานานจะเกิดการแข็งเปราะอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับถนนแบบเดียวกันที่มีการสัญจรไปมา

### จ. ปฏิกริยาซินเนอริซิส (Syneresis reaction)

ปฏิกริยาซินเนอริซิส (Syneresis) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแอสฟัลต์ โดยเกิดจากของเหลวในแอสฟัลต์ส่วนที่เป็นโมเลกุลเบาแยกตัวออกจากส่วนที่เป็นโมเลกุลหนักมาสู่ผิวหน้าของวัสดุแอสฟัลต์และระเหยออกไปเป็นผลให้แอสฟัลต์ โดยรวมเกิดการแข็งขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือเคมี ซึ่งปฏิกริยาซินเนอริซิสเป็นรูปแบบของการเกิดผิวทางเยิ้ม (Bleeding)

### ฉ. ปฏิกริยาเซพาเรชัน (Separation reaction)

ปฏิกริยาเซพาเรชัน (Separation) เป็นปฏิกริยาการแยกตัวหรือกำจัดส่วนประกอบของน้ำมัน เรซิน หรือแอสฟัลต์ของส่วนที่เป็นของเหลวในส่วนผสมแอสฟัลต์เช่นกัน แต่ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากความพรุนของวัสดุรวม

### ช. ปฏิกริยาฟิสิกอล ฮาร์ดนิ่ง (Physical hardening)

ปฏิกริยาฟิสิกอล ฮาร์ดนิ่ง (Physical hardening) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการที่วัสดุแอสฟัลต์อยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ แม้ว่าอุณหภูมิจะคงที่แต่แอสฟัลต์จะมีการแข็งตัวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ดังนั้น การแก้ไขปัญหาความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยเฉพาะถนนที่มีปริมาณการจราจรและปริมาณรถบรรทุกน้ำหนักสูง วิธีหนึ่งก็คือ การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ซึ่งเป็นวัสดุประสาน (Binder) ให้มีคุณสมบัติดังนี้

เพิ่มความหนืด (Viscosity)

ลดความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility)

เพิ่มจุดอ่อนตัว (Softening point)

เพิ่มความยืดหยุ่น (Elasticity)

เพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)

เพิ่มการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเนื่องจากอายุการใช้งาน (Aging resistance)



เพิ่มความแข็งแรง (Stiffness)

เพิ่มเสถียรภาพ (Stability)

## 2.3 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) [14]

ปัจจุบันยางที่ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานผลิตภัณฑ์ยาง จะได้มาจากพืชและจากการสังเคราะห์ของมนุษย์ ยางที่ได้มาจากพืชจะเรียกว่า ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) ส่วนยางที่ได้จากการสังเคราะห์จะเรียกว่า ยางเทียมหรือยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber, SR)

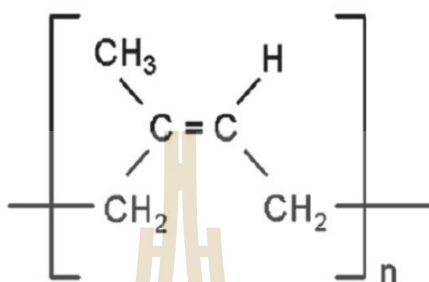
พืชที่ให้ยางธรรมชาติมีหลายชนิด เช่น ยางพารา ยางกัตคาเปอร์ช่า ยางมาลาตา และยางซิลเกิล ยางแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างโมเลกุล คุณสมบัติ และการนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน แต่ยางที่ได้จากยางพารา เป็นยางธรรมชาติที่นำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด หากกล่าวถึงยางธรรมชาติจะหมายถึงยางพาราเพียงอย่างเดียว

### 2.3.1 ยางพารา (Para rubber latex)

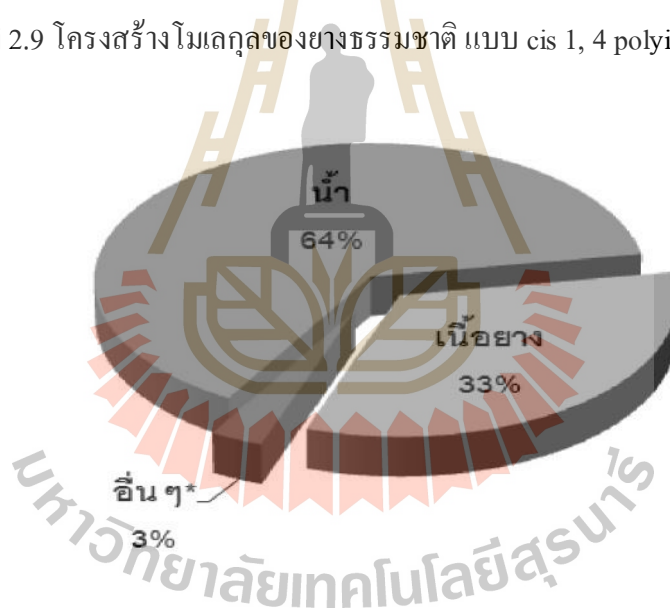
ต้นยางพารา (Para rubber tree) หรือยางพารา เป็นพืชยืนต้นขนาดใหญ่ชนิดใบเลี้ยงคู่ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Hevea brasiliensis* เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000,000 เป็นสารประกอบโพลิเมอร์ประเภทไฮโดรคาร์บอน มีโครงสร้างโมเลกุลแบบ cis 1, 4 polyisoprene (รูปที่ 2.9) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 และมีสูตรทางเคมีคือ  $C_5H_8$  เกิดจากการเชื่อมต่อกันหลาย ๆ หน่วยโมเลกุลของ Isoprene ซึ่งต่อแบบปลายต่อปลายประมาณ 5,000 หน่วยขึ้นไป โดยอนุภาคของเนื้อยางมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมหรือรูปลูกแพร์ขนาด 0.01 – 5.00 ไมโครเมตร กระจุกกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (Aqueous medium) ถิ่นกำเนิดของต้นยางพาราอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ บริเวณลุ่มแม่น้ำอเมซอนในประเทศบราซิล ส่วนการปลูกต้นยางพาราในประเทศไทยไม่มีหลักฐานแน่ชัดว่าเริ่มเมื่อใด แต่เชื่อกันว่า พระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ขณะดำรงตำแหน่งเจ้าเมืองตรัง ได้นำยางพารามาจากรัฐเปร์ค ประเทศมาเลเซีย มาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง ในราวปี พ.ศ. 2442 – 2444

น้ำยางจะเป็นของเหลวที่อยู่ในท่อน้ำยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในเปลือกของต้นยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเปลือกด้านในซึ่งติดกับเนื้อเจริญ การนำน้ำยางออกจากต้นยางจะต้องใช้มีดกรีดเพื่อตัดท่อน้ำยางให้ขาดออกจากกัน เมื่อกรีดลำต้นจะทำให้น้ำยางไหลออกมาซึ่งเป็นสารที่ไม่บริสุทธิ์มีสีขาวคล้ายน้ำมัน เรียกว่า น้ำยางสด (Latex) ประกอบด้วย อนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในน้ำปกติจะมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content : DRC) อยู่ประมาณร้อยละ 30 – 45 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลืออีกประมาณร้อยละ 50 – 65 จะเป็นน้ำ และที่เหลืออีกบางส่วนเพียงเล็กน้อยจะเป็นโปรตีน ไขมัน และเกลืออนินทรีย์ (รูปที่ 2.10) น้ำยางมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง

0.975 – 0.980 กรัมต่อมิลลิเมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.93 และมีค่า pH ประมาณ 6.5 – 7.0 ความหนืดของยางมีค่าประมาณ 12 – 15 centipoise (น้ำบริสุทธิ์มีความหนืด 1 centipoise) และอาจมีค่าความแปรปรวน ขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบในน้ำยาง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น พันธุ์ยาง อายุของยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง เป็นต้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ แบบ cis 1, 4 polyisoprene [15]



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของน้ำยางพารา [16]

น้ำยางสดที่ได้หลังจากกรีดยางแล้วจะคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่ง คือ ไม่เกิน 3 ชั่วโมง จากนั้นน้ำยางจะเริ่มจับตัวเป็นเจล (Gel) มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ คล้ายเม็ดพริก แล้วค่อย ๆ หนืดขึ้น อนุภาคยางจะเริ่มจับตัวเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนกระทั่งน้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพ ซึ่งอาจเกิดมาจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในน้ำยางหรือเมื่อค่า pH ของน้ำยางลดลงต่ำกว่า 6.5 เนื่องจากเคมีที่เมื่อน้ำยางสดไหลออกจากต้นหลังการกรีดยางจะมีสถานะเป็นต่าง หากไม่มีการเติมสารเคมีเพื่อรักษาสภาพลงไปน้ำยางจะมีการ



เปลี่ยนแปลงสภาพเป็นกรด โดยน้ำยางจะแยกออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่เป็นเซรุ่ม ต่อมาน้ำยางจะเริ่มบวมและมึนเหนียว ดังนั้น จึงต้องเติมสารเคมีเข้าไปเพื่อเก็บรักษา น้ำยาง ถ้าเก็บระยะสั้นเพียง 2 – 3 วัน จะเติมสารเคมี เช่น แอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟด์ และฟอร์มาลดีไฮด์ เพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (Anticoagulant) แต่หากเก็บรักษาระยะยาวจะเติมสารเคมีที่ทำให้น้ำยางยังเป็นของเหลวและไม่เกิดการบวมและมึนเหนียว การรักษาสภาพน้ำยาง (Preservative) จะใช้สารแอมโมเนียหรือแอมโมเนียร่วมกับซิงค์ออกไซด์ TMTD กรดบอริก ซึ่งจะ ทำให้น้ำยางที่จับตัวเป็นก้อนแยกส่วนออกจากกัน ยางที่จับตัวแล้วจะถูกแปรรูปในลักษณะต่าง ๆ เพื่อ ใช้เป็นวัตถุดิบป้อนเข้าสู่โรงงานผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

### 2.3.2 คุณสมบัติของยางพารา (Para rubber latex Properties) [15]

ยางพาราหรือยางธรรมชาติมีลักษณะเด่น คือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางพารามีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางพารายังมีคุณสมบัติเชื่อมด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (Assemble) ชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพไม่เสถียร ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้งานจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่าง ๆ หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

ยางพาราถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย เนื่องจากคุณสมบัติ ดังนี้

ยางพารามีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถูมียาง ถูยางอนามัย ยางรัดของ

ยางพารามีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติการ

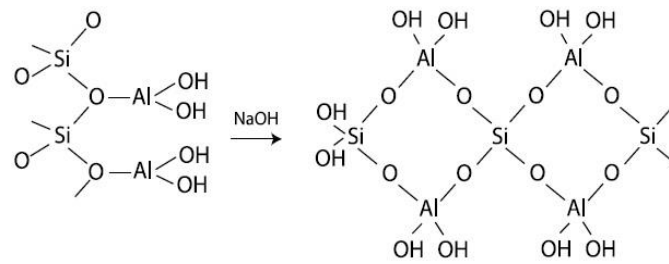
เหนียวติดกัน (Tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

ยางพารามีความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเป๋าน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

แม้ว่า ยางพาราจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย แต่ยางพารานั้นก็มีข้อเสียหลัก ๆ คือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น เนื่องจากโมเลกุลของยางพารามีพันธะคู่ (Double bond) อยู่มากมาย ทำให้ยางพาราไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางพารายังทนต่อสารละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง น้ำมัน และสารเคมีได้ต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสิ่งต่าง ๆ ดังกล่าวได้

## 2.4 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) [4]

ในปี ค.ศ. 1972 Prof. Joseph Davidovits วิศวกรเคมีชาวฝรั่งเศสได้พัฒนาวัสดุโพลิเมอร์อนินทรีย์ (Inorganic polymer) ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต โดยทำปฏิกิริยาระหว่างดินเถ้าหรือดินขาว (สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต) กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่อุณหภูมิ 100 – 150 องศาเซลเซียส และเกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) (รูปที่ 2.11) ต่อมา Davidovits ได้พัฒนาวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตโครงสร้าง 3 มิติ จากสารที่มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) เป็นสารกึ่งผลึก และในปี ค.ศ. 1979 ได้ให้นิยามชื่อเป็นจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) มีความหมายว่าโพลิเมอร์เชิงแร่ที่ได้จากวิธีทางเคมีธรณี (Geochemistry) หรือการสังเคราะห์ทางธรณีวิทยา (Geosynthesis) เนื่องจากสังเคราะห์ครั้งแรกจากดินเถ้า

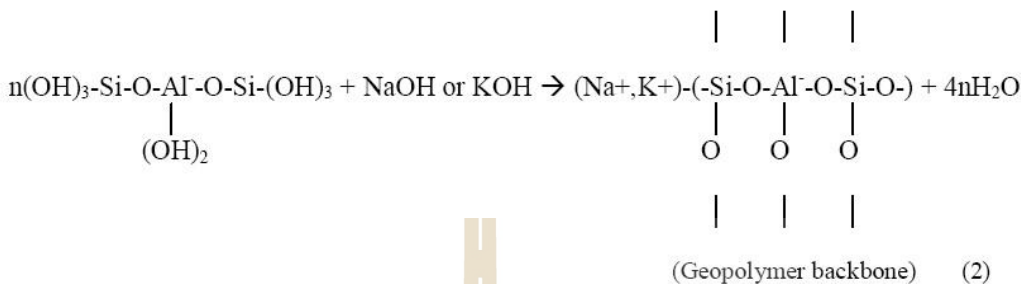
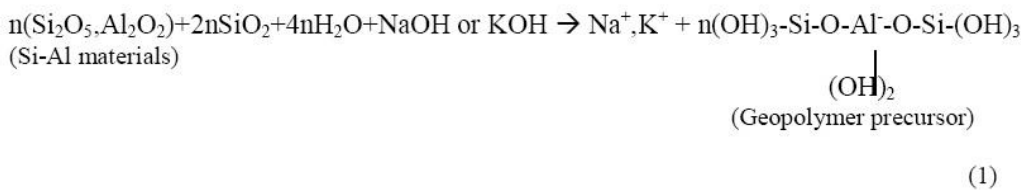


รูปที่ 2.11 การเกิดปฏิกิริยาโพลีคอนเดนเซชัน (Polycondensation) ของดินเถ้า

$\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}(\text{OH})_4$  ในสารอัลคาไลน์ [17]

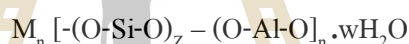
จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของแร่ธาตุ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นหลัก โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นจะอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) เป็นส่วนใหญ่ และถูกทำให้แตกตัวด้วยอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูง ซึ่งได้แก่ สารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  หรือ  $\text{KOH}$  จะทำให้องค์ประกอบหลักแตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาและเกิดเป็น Polymer chain ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส) จะเกิดการก่อตัว ความหนาแน่นมากขึ้น เกิดแข็งตัว และทำให้โครงสร้างสามารถรับกำลังอัดได้ วัสดุนี้นี้สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 2,000 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาสั้น จึงเรียกว่าเป็นวัสดุเสมือนเซรามิกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่ำ

สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงจะทำให้องค์ประกอบหลักเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีและเกิดเป็นโพลิเมอร์เชน (Polymer chain) ปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา (รูปที่ 2.12) ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)



รูปที่ 2.12 การเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) [18]

โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เป็นสายโซ่โพลิไซอะเลต (Si-O-Al-O) ตามสูตร



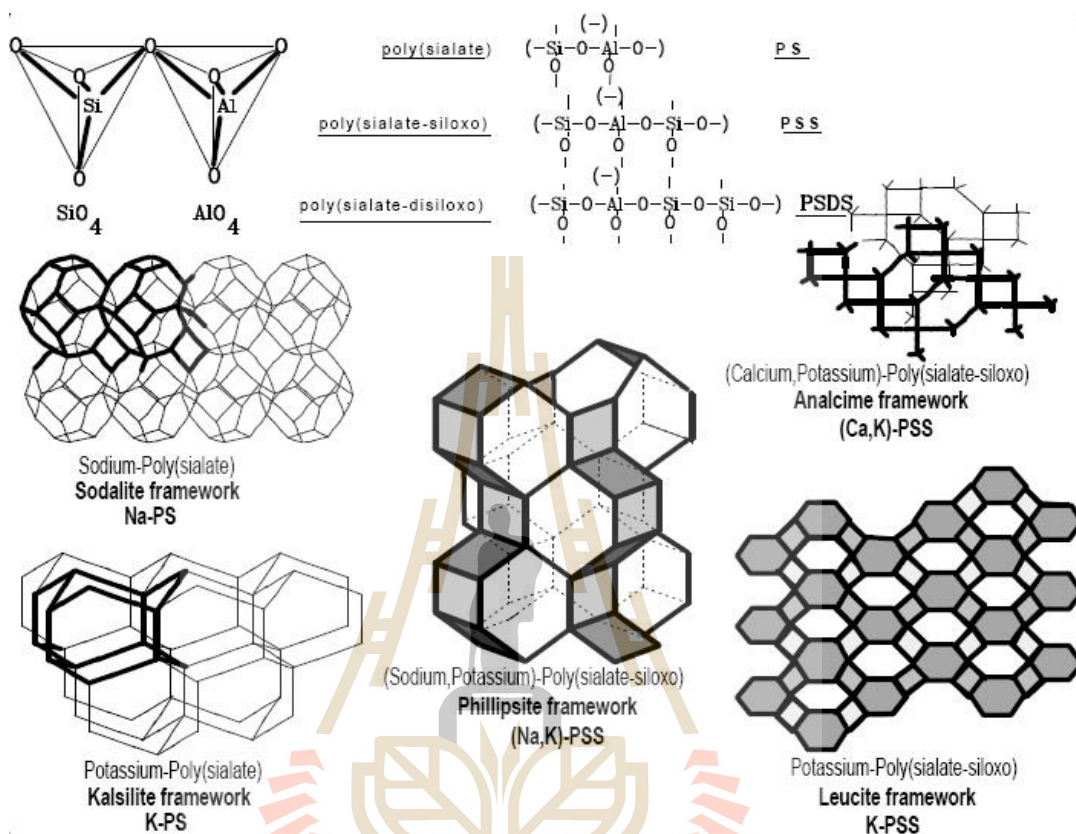
- เมื่อ
- M คือ โลหะอัลคาไลน์
  - n คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นสายโซ่
  - Z คือ ตัวเลข 1 2 หรือ 3
  - W คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ

หาก Z มีค่าเป็น 1 ได้สารโพลิไซอะเลต Z มีค่าเป็น 2 ได้สารโพลิไซอะเลตไซลอคโซ Z มีค่าเป็น 3 ได้สารโพลิไซอะเลต-ไดไซลอคโซ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์พวกสายโซ่โพลิไซอะเลต ดังแสดงในรูปที่ 2.13

โดยอัตราส่วนระหว่าง Si ต่อ Al ระบุถึงสมบัติและการใช้งานของจีโอโพลิเมอร์ ที่อัตราส่วนต่ำ (1 2 และ 3) ทำให้ได้โครงสร้างแข็ง 3 มิติ เช่น ที่อัตราส่วน 1:1 เหมาะสำหรับงานอิฐ อัตราส่วน 2:1 เหมาะสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีตอัตราส่วน 3:1 เหมาะสำหรับผลิตสารประกอบไฟเบอร์กลาสและเครื่องมือที่ทนอุณหภูมิในช่วง 200 – 1,000 องศาเซลเซียส หากอัตราส่วนมากกว่า 15:1 ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติไฟเบอร์คอมโพสิตที่ทนไฟ

ปฏิกิริยาทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์คล้ายกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolite) แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างที่แตกต่างกัน การสังเคราะห์ซีโอไลต์จะใช้อุณหภูมิสูง

กว่าจีโอโพลิเมอร์ ใช้ปริมาณสารละลายเบสมาก และให้โครงสร้างที่เป็นผลึก อีกทั้งสมบัติเชิงกล เช่น กำลังอัดต่ำกว่า เป็นต้น



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์พวกสายโซ่โพลิไซอะเลต [19]

#### 2.4.1 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer properties)

แนวความคิดพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์เริ่มแรกมาจากการปรับกระบวนการผลิตที่ชาวโรมันและชาวอียิปต์ใช้ โดย Davidovits ได้เสนอว่าพีระมิด (Pyramid) ไม่ได้สร้างมาจากหินตามธรรมชาติแต่สร้างมาจากส่วนผสมที่มนุษย์ผลิตขึ้น ซึ่งเป็นส่วนผสมของหินปูน แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซิลิเกต และน้ำ เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง XRD พบวัสดุประสานจำพวกผลึก  $\text{CaCO}_3$  เป็นส่วนใหญ่ รวมถึงวัสดุสัณฐานที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียมซิลิเกต และซีโอไลต์ ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ในชั้นส่วนพีระมิด



### 2.4.1.1 วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Environmentally friendly materials)

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทุก 1 ตัน จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ 1 ตัน หรือประมาณร้อยละ 5 – 8 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโลก ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) และเป็นสาเหตุในการเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน (Global warming) จากการผลิตปูนซีเมนต์ จีโอโพลิเมอร์มีสมบัติคล้ายวัสดุประสานจากปูนซีเมนต์ แต่มีปฏิกิริยาและโครงสร้างทางเคมีต่างกัน การผลิตจีโอโพลิเมอร์ไม่ต้องการความร้อนที่สูงในการเผาหินปูนเหมือนการผลิตปูนซีเมนต์ สารตั้งต้นมักเป็นของเสียอุตสาหกรรมที่มีซิลิกาและอะลูมินาออสัญฐานเป็นองค์ประกอบ เช่น ใ้จากการเผาถ่านหิน (ทั้งถ่านลอยและถ่านตะกั่ว) ถ่านกลบ และถ่านชีวมวล เป็นต้น เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ประโยชน์จากถ่านหินอุตสาหกรรมเป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ และลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศได้เป็นอย่างดี

### 2.4.1.2 ค่ากำลังอัด (Compressive strength)

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุประสานพวกอะลูมิโนซิลิเกต ที่ให้สมบัติทางด้านกำลังที่สูงในระยะเวลาอันสั้นหากใช้ความร้อนเร่งปฏิกิริยา แม้ว่าจีโอโพลิเมอร์ต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสมบูรณ์ แต่อุณหภูมิที่ใช้ไม่สูงมากนัก คือที่ประมาณ 45 – 70 องศาเซลเซียส จีโอโพลิเมอร์สามารถใช้ในการผลิตสำเร็จรูป ซึ่งเหมาะสมกับงานที่ต้องการค่ากำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ในปัจจุบันคอนกรีตหล่อสำเร็จเป็นที่ต้องการของตลาดมากเนื่องจากสะดวกและใช้เวลาอันรวดเร็วในการทำงาน ส่วนการบ่มที่อุณหภูมิห้องทำให้จีโอโพลิเมอร์พัฒนากำลังได้ช้าเมื่อเทียบกับการบ่มด้วยความร้อน สำหรับประเทศไทยเป็นประเทศในเขตอบอุ่นจึงสามารถใช้ความร้อนช่วงเวลากลางวันบ่มจีโอโพลิเมอร์ได้

### 2.4.1.3 ความคงทน (Durability)

จีโอโพลิเมอร์จากถ่านลอยที่มีออสัญฐานวิทยาแบบกิ่งผลึก และเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งมีความคงทนในสารละลายกรดและเบสมากกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องจากปูนซีเมนต์มอร์ตาร์มีปริมาณแคลเซียมในส่วนผสมมากกว่าจึงไม่คงทนต่อสารละลายกรด จีโอโพลิเมอร์จากถ่านลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงจึงมักประสบกับปัญหาการขยายตัวในสารละลายกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) เนื่องจากการเกิดเอททริงไต์ (Ettringite) และเกิดสารประกอบสีขาวบริเวณผิวตัวอย่างเมื่อสัมผัสกับสารละลายเกลือแมกนีเซียม ( $MgSO_4$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) อย่างไรก็ตาม จีโอโพลิเมอร์จากถ่านลอยมีความคงทนในสารละลายกรดและเบสได้ดีกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกตที่แข็งแรง

สำหรับจีโอ โพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าแกลบ ซึ่งมีปริมาณซิลิกาอยู่ในส่วนผสมมาก มีความคงทนในสารละลายกรดต่ำ เนื่องจากปริมาณซิลิกาที่มากเกินไป เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสระหว่างเตรียมจีโอ โพลิเมอร์จะได้สารประกอบไฮเดรตซิลิกเกต ซึ่งสามารถถูกชะสารละลายกรดได้เป็นกรดซิลิซิก (Silicic acid,  $H_4SiO_4$ ) ออกมาในสารละลายทำให้การสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น ดังนั้นมักผสมเถ้าลอยในส่วนผสมจีโอ โพลิเมอร์จากแกลบเพื่อลดปัญหาดังกล่าว

#### 2.4.1.4 การตรึงของเสียมีพิษ (Toxic waste solidification)

จีโอ โพลิเมอร์มีความสามารถในการตรึงของเสียที่มีพิษ เนื่องจากโครงสร้างของจีโอ โพลิเมอร์มีลักษณะคล้ายกับซีโอไลต์ (Zeolite) และเลขโคออร์ดิเนชันของอะลูมิเนียมมีความสามารถในการตรึงโลหะหนัก เช่น  $Cu(II)$ ,  $Cd(II)$ ,  $Cr(III)$  และ  $Pb(II)$  ได้ดี นอกจากนี้โครงสร้างของจีโอ โพลิเมอร์มีความแข็งแรง สามารถกักเก็บของเสียทางเคมีพวกอ็อกไซด์โลหะหนักและกากนิวเคลียร์ไม่ให้ถูกชะออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยของเสียที่มีพิษถูกกักอย่างหนาแน่นภายในโครงสร้าง 3 มิติของจีโอ โพลิเมอร์

#### 2.4.1.5 การทนไฟ (Fire resistance)

จีโอ โพลิเมอร์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตจึงมีสมบัติในการต้านทานเปลวไฟที่ดี โดยสมบัติดังกล่าวขึ้นกับสารตั้งต้นและสารละลายเบสที่ใช้ โดยจีโอ โพลิเมอร์ที่เตรียมจากสารละลายไฮเดรตซิลิกเกตมีความต้านทานความร้อนที่ดีกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมซิลิเกต จีโอ โพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนอะตอม Si:Al สูงกว่า 1.5 หรือมีปริมาณ  $SiO_2$  ในส่วนผสมมากจะทนไฟได้ดี เมื่อทดสอบกับเปลวไฟอุณหภูมิประมาณ 800 – 1,000 องศาเซลเซียส

#### 2.4.2 การประยุกต์ใช้จีโอ โพลิเมอร์ (Geopolymer applications)

การใช้งานจีโอ โพลิเมอร์ครั้งแรกมีขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1973 – 1976 โดยใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น แผ่นฉนวนทนไฟที่ใช้จีโอ โพลิเมอร์เคลือบบนผิวแผ่นไม้ทั้งสองด้าน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สมบัติของวัสดุยังไม่ดีเท่าที่ควร ต่อมาในปี ค.ศ. 1978 – 1980 ได้มีการพัฒนาวัสดุประสานจีโอ โพลิเมอร์ชนิดของเหลวจากเมตาแกลลิน (Metakaolin) หรือดินขาวเผา โดยใช้สารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกตเพื่อผลิตเป็นวัสดุทนไฟทดแทนสารเรซินอินทรีย์ ซึ่งพบว่าจีโอ โพลิเมอร์ทนไฟได้ดี ในปี ค.ศ. 1984 ได้มีการพัฒนาวัสดุผสมระหว่างจีโอ โพลิเมอร์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ผลิตภัณฑ์ชื่อ Pyrament® ที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 80 และสารจีโอ โพลิเมอร์ร้อยละ 20 และให้ค่ากำลังช่วงต้นที่สูงอย่างรวดเร็วเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุสำหรับงานซ่อมแซมลานบินคอนกรีตที่พร้อมรองรับการขึ้นลงของเครื่องบินภายในระยะเวลา 4 – 6



ชั่วโมง ทางเดินในอุตสาหกรรมและถนนทางหลวง ซึ่งจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์สามารถให้ค่ากำลังอัด 20 เมกะปาสกาล ภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง ในขณะที่คอนกรีตธรรมดาใช้เวลาหลายวัน

#### 2.4.2.1 งานซ่อมแซม (Repair work)

งานซ่อมแซมเป็นงานที่ต้องการวัสดุซ่อมแซมที่ก่อตัวเร็ว และค่ากำลังอัดที่สูงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งเห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์มีความเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุซ่อมแซม ระยะเวลาการก่อตัวมีความจำเป็นขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน เช่น บริเวณแม่น้ำหรือชายฝั่งทะเลที่ต้องการการก่อตัวที่เร็วของวัสดุ โดยการใส่สารผสมเพิ่มในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์สามารถหน่วงหรือเร่งการก่อตัวได้ นอกจากนี้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างแท่งเหล็กและคอนกรีตเจาะรูได้ดี และถูกเสนอแนะสำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีต

#### 2.4.2.2 อิฐจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer brick)

จีโอโพลิเมอร์สามารถเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีต้นทุนต่ำ ให้กำลังที่สูงแม้ว่าไม่มีการบ่มด้วยความร้อน มีความเสถียรในน้ำ สามารถใช้ในงานไม่ต้องการรับแรงมากได้ เช่น ผนัง หรือทางเดินเท้า เป็นต้น และมีความสามารถต้านทานความเย็น (Freezing) ในประเทศเขตหนาวได้

#### 2.4.2.3 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete)

ประเทศออสเตรเลียเป็นประเทศหนึ่งที่ศึกษาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และเริ่มมีการประยุกต์ใช้งานจริง โดยเมื่อเดือน มิถุนายน ปี ค.ศ. 2008 ได้มีการเทพื้นทางเดินจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตครั้งแรกขึ้นที่ Curtin University of Technology โดยการผสมในรถผสมปูนและเป็นการเทพื้นที่มีการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพตลอดทั้งปี ต่อมาในเดือน พฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2009 ได้สร้างทางเดินเท้าแห่งที่สองเพิ่มโดยใช้วัสดุดิบท้องถิ่น นอกจากนี้ยังมีการสร้างท่อน้ำทิ้ง (Sewer pipe) ที่ทนต่อกรดที่รุนแรงจากจีโอโพลิเมอร์สำหรับใช้ในโครงการระบบโครงสร้างพื้นฐาน

## 2.5 เถ้าลอย (Fly ash) [4]

เถ้าลอย หรือเถ้าถ่านหิน (Fly ash หรือ Fulverized fuel ash) ได้จากการเผาถ่านหิน (Coal) ในโรงงาน และโรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยจะถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล มีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน (Pozzolan) ตั้งเพราะที่ประเภทหนึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นอัญรูปของซิลิกา และ อะลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้ง และเป็นฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค แต่เมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร  $\text{Ca(OH)}_2$  และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน

(Cementitious substance) ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และช่วงเวลาของการเผา ดังนั้นคุณภาพและความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหิน

### 2.5.1 ชนิดของถ่านหิน (Type of coal)

โดยทั่วไปชนิดของถ่านหินแบ่งตามคุณภาพพื้นฐาน คือ ค่าถ่านคงตัว สารระเหย และค่าความร้อน โดยแบ่งได้ 4 กลุ่ม ตามคุณภาพสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ ตามมาตรฐาน ASTM D388 [22] ดังนี้

#### 2.5.1.1 แอนทราไซต์ (Anthracite)

แอนทราไซต์ (Anthracite) เป็นถ่านหินที่มีคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด มีลักษณะดำเป็นเงามัน มีความวาวสูง เกิดจากการทับถมเป็นเวลานาน มีลักษณะแข็งมาก มีสีดำและติดไฟได้ยากหากอุณหภูมิไม่สูงพอ เมื่อติดไฟจะมีเปลวไฟและควันน้อย ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 92 – 94 ให้ค่าความร้อนสูงกว่า 16,000 บีทียู/ปอนด์

#### 2.5.1.2 บิทูมินัส (Bituminous)

บิทูมินัส (Bituminous) เป็นถ่านหินชั้นรองลงมาจากแอนทราไซต์ เนื้อแน่น มีลักษณะแข็ง และมักจะประกอบด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิทที่มีลักษณะเป็นมันวาว เมื่อติดไฟจะมีเปลวไฟสีเหลือง มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 78 – 86 ให้ค่าความร้อน 10,500 – 16,000 บีทียู/ปอนด์

#### 2.5.1.3 ซับบิทูมินัส (Sub bituminous)

ซับบิทูมินัส (Sub bituminous) เป็นถ่านหินที่มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ เนื้อถ่านหินจะมีความอ่อนตัวคล้ายขี้ผึ้ง ไม่แข็งมาก มีปริมาณคาร์บอนประมาณร้อยละ 71 - 77 และมีปริมาณกำมะถันต่ำ ให้ค่าความร้อน 8,300 – 11,500 บีทียู/ปอนด์

#### 2.5.1.4 ลิกไนต์ (Lignite)

ลิกไนต์ (Lignite) เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด เนื้อถ่านหินมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ มีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างน้อย และมีปริมาณกำมะถันสูง มีปริมาณความชื้นสูงถึงร้อยละ 30 – 70 มีขี้เถ้ามาก ให้ค่าความร้อนต่ำกว่า 8,300 บีทียู/ปอนด์

### 2.5.2 การเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า (Coal combustion)

ระบบการเผาถ่านหินในโรงงานไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ ดังต่อไปนี้

#### 2.5.2.1 ระบบเผาที่ความร้อนสูง (High temperature combustion)

ใช้อุณหภูมิเผาในเตาระบบไซโคลน (Cyclone combustion) ประมาณ 1,500 – 1,700 องศาเซลเซียส ถ่านหินจะหลอมละลายรวมกันเป็นก้อน เป็นเม็ดแก้วใส ๆ ตกลงมาที่ก้นเตา ระบบนี้ได้เถ้าลอยปริมาณน้อย

### 2.5.2.2 ระบบเผาที่ความร้อนปานกลาง (Medium temperature combustion)

ใช้ระบบเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion, PCC) เเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,100 – 1,400 องศาเซลเซียส ระบบนี้ต้องมีการดักจับก๊าซที่ดี เพื่อลดปริมาณก๊าซกำมะถันหรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_x$ ) และก๊าซไนโตรเจนหรือไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ผู้สังเกตการณ์ เถ้าที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอยที่มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน เหมาะสำหรับใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในส่วนผสมคอนกรีต โรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหินที่แม่เมาะใช้ระบบการเผานี้

### 2.5.2.3 ระบบเผาที่ความร้อนต่ำ (Low temperature combustion)

ใช้ระบบเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed combustion, FBC) อุณหภูมิที่ใช้เผาอ่อนข้างต่ำประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส ถ่านหินที่บดจนมีขนาดเล็กมากผสมกับหินปูนและพ่นเข้าไปในเตาเผาพร้อมอากาศร้อน ถ่านหินและหินปูนที่พ่นเข้าไปจะแขวนลอยอยู่ในคลื่นอากาศ โดยมีลักษณะคลื่นของเหลวเดือด ขณะที่ถ่านหินเผาไหม้อยู่หินปูนจะทำหน้าที่คล้ายฟองน้ำดักจับก๊าซกำมะถันที่เกิดขึ้น กระบวนการนี้สามารถลดปริมาณก๊าซกำมะถันที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้มากถึง 90% นอกจากนี้ การเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะลดปริมาณมลพิษที่เกิดจากก๊าซไนโตรเจนในระบบเผาได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยที่ได้จากระบบนี้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน (Irregular) และมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิที่เผาไม่สูงพอ เถ้าลอยที่ได้นี้แม้จะสามารถนำไปใช้เป็นสารปอซโซลานได้ แต่ไม่ดีเท่ากับเถ้าลอยที่ได้จากระบบเผาความร้อนปานกลาง เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมและซัลเฟอร์ ระบบการเผาแบบนี้มีการใช้มากในโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก หรือโรงงานต่าง ๆ ในชุมชน

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในปัจจุบันการผลิตวัสดุโพลิเมอร์จึงนิยมใช้เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินแบบใช้ถ่านหินบด หรือ PCC เป็นวัตถุดิบ เนื่องจากเถ้าลอยชนิดนี้กว่าร้อยละ 70 – 90 มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจิโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยที่เผาแบบ PCC ให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า และมีความคงทนกว่าวัสดุที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ในอายุที่เท่ากัน และคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าจิโพลิเมอร์ที่ผลิตจากวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น ดินขาว เเผา เป็นต้น

เกณฑ์หรือมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต มีหน่วยงานวิจัยหลายหน่วยงานได้กล่าวถึงคุณสมบัติและข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานที่อ้างอิง โดยมี 2 แห่งด้วยกันคือ American Concrete Institute (ACI) และ American Society for Testing and Material (ASTM) ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทาง

กายภาพของเถ้าลอยตาม ASTM C618 [20] และ ASTM C593 [21] เพื่อควบคุมคุณภาพและคัดเลือกเถ้าลอยมาใช้ในงาน

American Society for Testing and Material (1995) จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence พบว่าเถ้าลอยทั่วไปมีองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ขบวนการเผาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ตามมาตรฐาน ASTM C618 [20] ได้แยกเถ้าลอยเป็น ชนิด F และ ชนิด C โดยที่

เถ้าลอย ชนิด F คือ เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ หรือบิทูมินัส และมีสมบัติตรงกับข้อกำหนด เถ้าลอยชนิดนี้มีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน

เถ้าลอย ชนิด C คือ เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ หรือซับบิทูมินัส และมีสมบัติตรงข้อกำหนด เถ้าลอยชนิดนี้จอกจากมีสมบัติการเป็นสารปอซโซลานแล้ว ยังมีสมบัติการเป็นสารเชื่อมประสานอีกด้วย โดยเถ้าลอย ชนิด C อาจมีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูงกว่าร้อยละ 10

ตัวอย่างข้อกำหนดทางเคมีที่สำคัญของสารปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C618 [20] แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางเคมีที่สำคัญของสารปอซโซลานสำหรับงานคอนกรีต

ข้อกำหนดทางเคมี	ชนิด	
	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ไม่น้อยกว่า (%)	70.0	50.0
$\text{SO}_3$ ไม่เกิน (%)	5.0	5.0
ความชื้น ไม่เกิน (%)	3.0	3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ไม่เกิน (%)	6.0*	6.0

\*สามารถใช้เถ้าลอยชนิด F ที่มีค่า LOI สูงถึง 12% ได้ หากมีผลการใช้งานหรือมีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ยอมรับได้ [4]

สำหรับข้อกำหนดทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C618 [20] ใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกาอะลูมินาและเหล็กในเถ้าลอย โดยที่ ชนิด F และ ชนิด C ต้องมีผลรวมร้อยละของออกไซด์ดังกล่าวอย่างน้อยร้อยละ 70 และ 50 ตามลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก

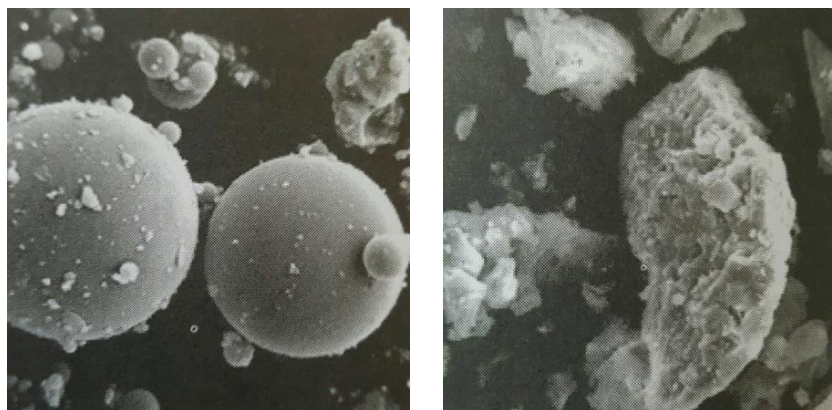
ในระยะยาวด้วย สำหรับปริมาณของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) กำหนดไม่ให้เกิดร้อยละ 5 เพราะซัลเฟอร์มีผลเสียต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด ระยะเวลาก่อตัวและยังมีผลเสียต่อกอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย เนื่องจากทำให้เกิดการกัดกร่อนจากซัลเฟต

ความชื้นของเถ้าลอยไม่ควรเกินร้อยละ 3 มิฉะนั้นจะเป็นอุปสรรคต่อการปฏิบัติงานสำหรับเถ้าลอย ชนิด C จะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีการกำหนดค่าน้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition, LOI) ไว้ไม่เกินร้อยละ 6 ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในเถ้าลอย หากมี LOI มากการควบคุมในด้าน air entrainment ของคอนกรีตสดจะทำให้ยากและยังต้องการน้ำเพิ่มในคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าจะมีค่า LOI ต่ำกว่าร้อยละ 6 ปริมาณอัลคาไลน์ในรูปของโซเดียมออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$  Equivalent) มากที่สุดไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งเป็นข้อกำหนดเสริมใน ASTM C618 เพราะเถ้าลอยที่มีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูง จะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาของ Alkali-aggregate ขึ้นได้ ถ้าต้องการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณอัลคาไลน์มากกว่าร้อยละ 1.5 ไปใช้กับมวลรวมที่ไวต่อปฏิกิริยา จะต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนว่าไม่เกิดปรากฏการณ์ขยายตัวจนเกิดความเสียหายได้

### 2.5.3 คุณสมบัติของเถ้าลอย (Fly ash properties)

เถ้าลอยมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน เถ้าลอยแม่เมาะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15 – 30 ไมครอน มีความละเอียดประมาณ 2,500 – 3,500 ตารางเซนติเมตร/กรัม [23] รูปทรงกลมซึ่งเกิดจากการหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง มีสถานะคล้ายแก้ว (Glassy phase) หรือมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous phase) ให้ทำปฏิกิริยาได้ดี โดยส่วนที่เป็นอสัณฐานอยู่บริเวณที่ผิวเถ้าลอย ส่วนที่เป็นผลึกอยู่บริเวณแกนกลาง [24] เถ้าลอยยังประกอบด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในเรียกว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) เกิดจากการกักก๊าซจากการเผาไหม้ภายในเถ้าลอย ส่วนเถ้าลอยที่มีอนุภาคขนาดเล็กภายในจะเรียกว่าพลีโรสเฟีย (Plerosphere) ดังแสดงในรูปที่ 2.14





ก) เถ้าลอยแม่เมาะ

ข) เถ้าลอย FBC



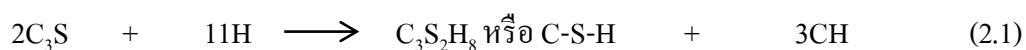
ค) ซีโนสเฟีย

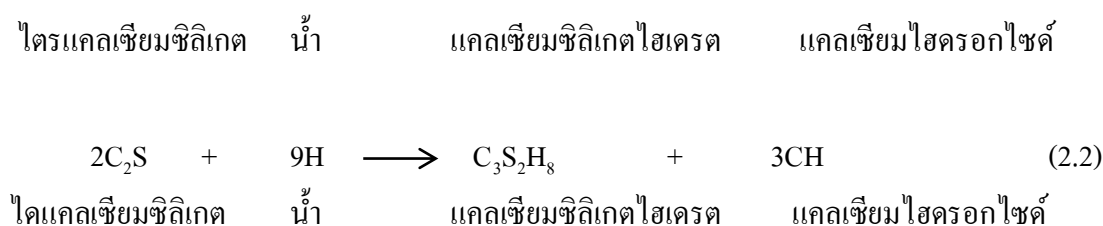
ง) พลีโรสเฟีย

รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคของเถ้าลอย [4]

#### 2.5.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอย (Pozzolanic reaction of fly ash)

องค์ประกอบทางเคมีเป็นสิ่งที่สำคัญที่ต้องวิเคราะห์ โดยปริมาณ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ในเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลานเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ในปูนซีเมนต์ เมื่อ C แทน  $\text{CaO}$ , S แทน  $\text{SiO}_2$ , H แทน  $\text{H}_2\text{O}$ , A แทน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ CH แทน  $\text{Ca(OH)}_2$  ดังแสดงในสมการที่ 2.1 และ 2.2



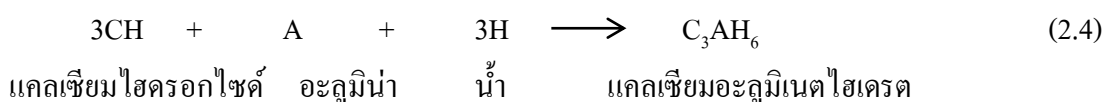


สมการที่ 2.1 และ 2.2 แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยไตรแคลเซียมและไดแคลเซียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่มีสมบัติให้ค่ากำลังอัดแก่คอนกรีตตามอายุการบ่ม นอกจากนี้ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรตได้เช่นกัน

อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ พอร์ตแลนด์ไดซ์ (Portlandite) เป็นผลิตภัณฑ์รองเสมอ หากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตมีปริมาณมาก ทำให้คอนกรีตมีความคงตัวต่ำ ดังนั้นการใช้สารปอซโซลานในคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 2.3



เช่นเดียวกัน หากอะลูมินาในสารประกอบปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรตที่เป็นผลิตภัณฑ์เช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ 2.4



ดังนั้น ถ้ำลอยหรือวัสดุอื่นที่นำมาเป็นสารปอซโซลาน ควรนำมาตรวจหาองค์ประกอบทางเคมีก่อน เพื่อให้ทราบปริมาณซิลิกาและอะลูมินาในถ้ำ ซึ่งโดยทั่วไปใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) ควบคู่กับการหาการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา (LOI) ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างถ้ำ และวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้เป็นสารปอซโซลานที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF



ตารางที่ 2.2 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมี และค่า LOI ของตัวอย่างเถ้า และวัสดุต่าง ๆ [4]

องค์ประกอบ (%)	เถ้าลอย PCC	เถ้าลอย FBC	เถ้าแกลบดำ	ซิลิกาฟูม
SiO <sub>2</sub>	39.50	21.00	87.50	98.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.50	8.00	2.50	-
CaO	17.30	42.20	0.80	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.10	6.90	0.40	-
ออกไซด์อื่น ๆ	8.80	20.10	6.70	1.80
LOI	0.80	1.00	2.50	-

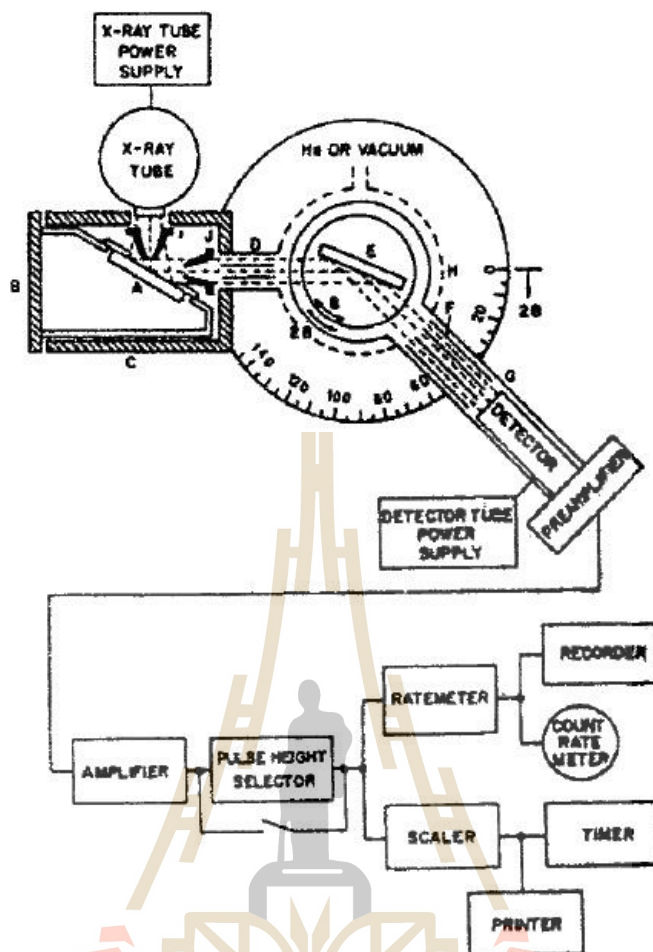
จากตารางที่ 2.2 พบว่า เถ้าลอยจากการเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pul-verized coal combustion, PCC) เถ้าลอยเถ้าลอยจากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed combustion, FBC) เถ้าแกลบ และซิลิกาฟูม มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน อย่างไรก็ตาม ไม่นิยมนำเถ้าลอย FBC มาผสมกับคอนกรีต เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ และซัลเฟอร์ออกไซด์สูง ซึ่งเกิดจากการพ่นหินปูนไปจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ การที่มีปริมาณแคลเซียมไดออกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงจะทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงตัวและคงทนต่ำ อย่างไรก็ตาม วิธีการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะเป็นวิธีการเผาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถลดปริมาณ SiO<sub>x</sub> และไม่มี NO<sub>x</sub> ในก๊าซที่ปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม

## 2.6 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF)

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ (X-ray) ที่เป็นสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.1 – 100 อังสตรอม (Angstrom, °A) หรือ 0.01 – 10 นาโนเมตร (Nanometer, nm) แต่ที่ใช้ในทางเคมีวิเคราะห์จะอยู่ในช่วง 0.07 – 0.2 นาโนเมตร รังสีเอ็กซ์จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์หลาย ๆ อย่าง เช่น การเปล่งแสงบางชนิด (Emission) การดูดกลืน (Absorption) การกระเจิง (Scattering) หรือการเลี้ยวเบน (Diffraction) เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะ (Characteristic) ของแต่ละสารที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมี

เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) นี้เป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีแบบไม่ทำลาย ตัวอย่าง (non – destructive analysis) สามารถทำได้ทั้งวิเคราะห์ธาตุเดี่ยว ๆ ทีละธาตุ (Sequential) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (Simultaneous) ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการวิจัยเพราะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นต่ำจนถึงระดับความเข้มข้นสูง บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับส่วนในล้านส่วน (parts per million, ppm) ซึ่งเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายและรวดเร็ว

ในการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค XRF นั้นมีขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการดังนี้ คือ ลำแสงรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิที่ได้จากเครื่อง X – ray generator (ซึ่งมีหลอดรังสีเอ็กซ์อยู่) จะถูกกระดุมยิงไปยังสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง เกิดรังสีเอ็กซ์เรย์ทุติยภูมิหรือปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนซ์ขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน แล้วให้รังสีเอ็กซ์ทุติยภูมิหรือฟลูออเรสเซนซ์ผ่านคอลลิเมเตอร์ (Collimator) เพื่อทำให้ลำแสงรังสีเอ็กซ์เป็นลำขนานและเดินไปในทิศทางที่ต้องการ คือ ไปกระทบกับ Analysing crystal ที่อยู่ในสถานะสูญญากาศหรือความกดดันต่ำมาก ๆ Analysing crystal นี้ จะทำหน้าที่กระจายหรือแยกรังสีเอ็กซ์ออกไปให้มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันนี้จะถูกวัดความเข้ม (Intensity) หรือกำลัง (Power) ด้วยการสแกน (Scan) ของดีเทคเตอร์ (Detector) สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลแล้วถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัม ด้วยเครื่อง Printer หรือ Recorder ดังแสดงในรูปที่ 2.15 [25]



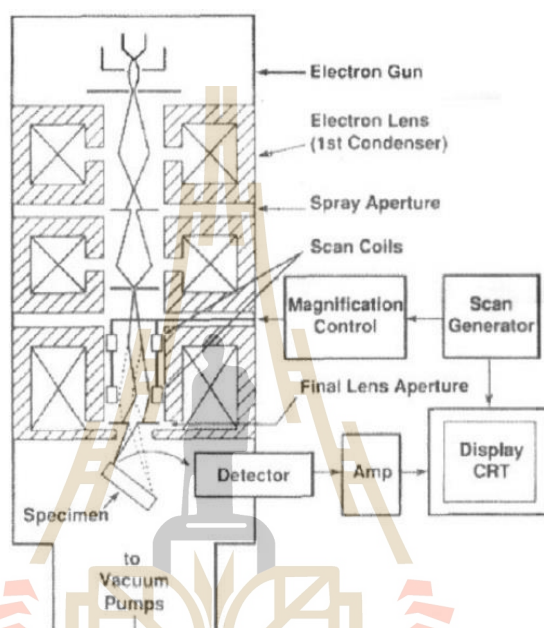
รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง XRF [25]

## 2.7 การถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ร่วมกับชุดเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDS)

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพถ่ายทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพถ่ายที่มีลักษณะแบบ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะ และวัสดุ เป็นต้น

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่าปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูก

เร่งให้เคลื่อนที่มาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ในช่วง 0 – 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) (บางเครื่องอาจทำได้สูงสุดถึง 50 keV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอปเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กันตามลักษณะการใช้งาน



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่อง SEM [26]

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป

จุดเด่นของSEM คือ มีระยะชัดลึก และมีอำนาจแยกแยะเชิงระยะ (Spatial resolution) สูง เนื่องจากSEM ใช้คุณสมบัติคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นที่สั้นทำให้ SEM มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และด้วยความสามารถในการบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ ทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง [26, 27]

สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM นั้น เป็นเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้สำหรับศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของตัวอย่าง โดยมีกำลังขยายสูงสุด 300,000 เท่า เหมาะสำหรับตัวอย่างทั้งทางวัสดุและชีววิทยา สามารถถ่ายภาพตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า (Non-conductive materials) มีความชื้น (Moist) และมีลักษณะเปียก (Wet) ตัวอย่างที่มีไอระเหย ตัวอย่างสดหรือตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเตรียมเบื้องต้นมาก่อน เช่น ใบไม้ ดอกของพืช แมลง เป็นต้น โดยสามารถเลือกสภาวะการทดสอบได้ทั้งสภาวะสุญญากาศสูง (High vacuum, น้อยกว่า  $1.3 \times 10^{-2}$  ปาสคาล) สภาวะสุญญากาศต่ำ (Low vacuum, 10 – 30 ปาสคาล) และสภาวะใกล้เคียงความดันบรรยากาศ (Environmental SEM, 130 – 2600 ปาสคาล) นอกจากนี้ยังสามารถถ่ายวิดีโอบันทึกการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้าง การเคลื่อนที่ของตัวอย่างในช่วงระยะเวลาหนึ่งได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้นำ SEM มาใช้ร่วมกับกับชุดเอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDS) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานของตัวอย่าง โดยมีหลักการทำงาน คือ การกระตุ้นวัตถุตัวอย่างโดยอนุภาคพลังงานสูง อันได้แก่อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งจะถูกลอยออกมาจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-ray tube) อนุภาคจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่มาอย่างรวดเร็วมีพลังงานจลน์สูง เมื่ออนุภาคนี้อันเข้ามาในอะตอมของวัตถุตัวอย่าง บางส่วนก็จะมีโอกาสที่จะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม ในการชนนี้ก็จะถ่ายทอดพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้น และโดยทั่วไปมักจะสูงมากพอที่จะหลุดออกไปจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นสูงกว่าก็จะตกลงมาอยู่แทนที่ ในการตกลงมาอยู่ชั้นต่ำกว่านี้ อิเล็กตรอนก็จะต้องปล่อยหรือคายพลังงานที่มีอยู่มากเกินระดับที่ต้องการออกไป พลังงานที่คายออกมานี้จะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะ (Characteristic x-ray) ซึ่งจะบอกได้ว่าวัตถุตัวอย่างมีองค์ประกอบของธาตุใดบ้าง เนื่องจากแต่ละธาตุมีรังสีเอกซ์เฉพาะที่ไม่เหมือนกัน

ข้อได้เปรียบในการใช้เทคนิค EDS คือ สามารถตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพได้ในเวลาอันรวดเร็วและตรวจได้คราวละหลายๆธาตุพร้อมกัน นอกจากนี้ยังไม่ทำลายวัตถุตัวอย่างหรือทำให้วัตถุตัวอย่างสูญเสียสภาพเดิม และสามารถใช้วัตถุตัวอย่างในสภาพของแข็งได้ ดังนั้น เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM ร่วมกับเทคนิค EDS/EDX (SEM-EDS/EDX) ก็จะทำให้สามารถวิเคราะห์

องค์ประกอบและการมีอยู่ของธาตุบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างได้ละเอียดและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น [27]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.J. Lyons. (1967) ได้ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผสมยางพาราธรรมชาติกับวัสดุแอสฟัลต์ พบว่ากรณีใช้น้ำยางพาราควรทำการผสมในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 140 – 170 องศาเซลเซียส โดยจะขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุแอสฟัลต์ที่นำมาใช้ สำหรับการเก็บรักษาส่วนผสมของแอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาตินั้น ควรหลีกเลี่ยงการจัดเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน เนื่องจากจะทำให้ส่วนผสมเกิดการแยกตัวและสูญเสียคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดเก็บไว้ในที่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส [28]

วิสุทธิ สุกครรัตน์. (2543) ได้รายงานว่าสถาบันวิจัยยางอินเดียได้เริ่มทดลองใช้น้ำยางผสมแอสฟัลต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ราคถนน ระหว่างเมืองทริวานครัมและโคตายัมโดยราคถนนเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตรเปรียบเทียบกับถนนราคาแอสฟัลต์ธรรมดา ปรากฏว่าถนนราคาแอสฟัลต์ต้องซ่อมผิวถนนใหม่ในอีก 5 ปีต่อมาและในปีที่ 10 ก็ซ่อมครั้งที่ 2 ในขณะที่ถนนที่ราคาด้วยแอสฟัลต์ผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ยังมีสภาพดีจนถึงปีที่ 14 และได้มีการขยายผลไปทั่วประเทศ ซึ่งจากข้อมูลหลายการทดลองสรุปได้ว่าการผสมยางธรรมชาติก็อายุถนนได้อย่างน้อยร้อยละ 50 โดยค่าใช้จ่ายในการราคาผิวถนนเพิ่มขึ้นร้อยละ 16 เมื่อผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 2 กับแอสฟัลต์ [29]

Alonso et al. (1999) ได้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยขณะที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่าง พบว่า ส่วนมากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical) ขนาดต่าง ๆ กัน เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง อนุภาคของเถ้าลอยได้ถูกกัดกร่อนที่บริเวณผิวของทรงกลมก่อนที่จะขยายออกเป็นรูขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยาทั้งภายใน และภายนอกอนุภาคทรงกลม จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) แสดงถึงส่วนของอนุภาคที่ทำปฏิกิริยาซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสที่เกิดขึ้นใหม่บนอนุภาคของเถ้าลอย นอกจากนั้นก็ยังสังเกตเห็นอนุภาคบางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งยังคงมีลักษณะเป็นทรงกลมอยู่ เถ้าลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของด่าง ขนาดอนุภาคของเถ้าลอย ระยะเวลาการบ่มและการผสม จากการทดลองพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตในการผสมก่อนจีโอโพลิเมอร์ และนำเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ทำให้จีโอโพลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นผืนผืนกิดติดกันคล้ายกับเนื้อของแก้ว [30]



สิทธิชัย และคณะ (2548) ได้ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติเพื่อพัฒนางานคอนกรีต โดยศึกษาหาเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการผสมน้ำยางพาราในคอนกรีต ซึ่งได้ศึกษาความสามารถเทได้ (Workability) ของน้ำยางพาราที่ผสมกับคอนกรีต หลังจากนั้นนำมาหล่อแบบแล้วหาค่ากำลังอัด (Compressive Strength) และค่ากำลังดัด (Flexural Strength) สัดส่วนของน้ำยางพาราต่อคอนกรีต (P/C) ที่ศึกษาได้แก่ 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 และ 0.25 ตามลำดับ และส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้คือ ซีเมนต์:ทราย:หิน (1:2:4) โดยน้ำหนัก วิธีการผสมน้ำยางพารากับคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วน้ำยางพารากับคอนกรีตจะเข้ากันได้ยาก จึงต้องมีการผสมสารลดแรงตึงผิว สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Surfactants) คือ Lutensol XL 80 (C10-Guerbet Alcohol Alkoxylate) ในสัดส่วนร้อยละ 4 ของน้ำหนักของซีเมนต์ เมื่อผสมคอนกรีตตามสูตร แล้วนำมาทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) จากนั้นหล่อเข้าแบบมาตรฐาน (รูปลูกบาศก์ และรูปคาน) แล้วทำการบ่มขึ้นเป็นเวลา 7 วัน หลังจากนั้นทำการบ่มแห้งในอากาศเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ แล้วทดสอบค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัด ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราจะมีกำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 60 และเมื่อปริมาณน้ำยางพาราเพิ่มขึ้นการรับกำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง สำหรับค่ากำลังดัดพบว่าลดลงประมาณร้อยละ 10 เมื่อสัดส่วนน้ำยางพาราต่อซีเมนต์ (P/C) ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อศึกษาระยะเวลาการบ่มแห้งในอากาศเพิ่มเป็น 14 และ 28 วัน ที่สัดส่วนน้ำยางพาราต่อซีเมนต์ (P/C) เท่ากับ 0.15 และ 0.20 พบว่าคอนกรีตผสมน้ำยางพาราจะมีค่ากำลังดัดของสูงกว่าคอนกรีตปกติ เนื่องจากอนุภาคเนื้อยางเกาะตัวกันเป็นชั้นฟิล์ม (Film) ที่แข็งแรงขึ้น [31]

ดังนั้นการใช้งานคอนกรีตผสมน้ำยางพารา ยังไม่เหมาะกับงานโครงสร้างที่ต้องรับแรงอัดมาก แต่อาจเหมาะกับงานซ่อมแซม หรือเหมาะกับงานคอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนังที่ไม่รับแรงอัดมาก ซึ่งการยึดเหนี่ยวของน้ำยางพาราจะมีประโยชน์ในการเป็นตัวประสานกับคอนกรีตเดิม อย่างไรก็ตาม การขจัดฟองอากาศและการก่อตัวซ้ำในคอนกรีตยังเป็นปัญหาสำคัญที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้คอนกรีตมีกำลังอัดและการก่อตัวใกล้เคียงคอนกรีตปกติเพื่อให้สามารถนำมาใช้งานโครงสร้างอื่นได้ต่อไป

นราชัย ตันติวรวิทย์. (2546) ได้ศึกษาลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตซีเมนต์ธรรมดา กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมน้ำยางพาราเข้มข้น (NRA) ในปริมาณร้อยละ 1 – 14 และนำไปผสมกับวัสดุมวลรวมเพื่อนำไปทดสอบ เช่น แรงดึงทางอ้อม, โมดูลัสคินตัว, ความล้า, การยุบตัวถาวรและการหลุดออก จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุ NRA มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาพบว่าปริมาณน้ำยางเข้มข้นที่เหมาะสมในการผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์คือร้อยละ 9 กรัมต่อน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด โดยสถาบันพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ผสมยางพารา โดยใช้ อัตราส่วนการผสมที่ร้อยละ 5, 7 และ 9 หาค่า Penetration การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening Point) การทดสอบความหนืด Rotational Viscosity Test และการทดสอบ Thin Film Oven Test (RTFO) การทดสอบจุดวาบไฟ (Flash Point) ผลการทดสอบพบว่าแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่อัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมคือร้อยละ 5 [12]

Uboluk et al. (2009) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นต่างของสารละลายต่าง NaOH ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่าง 5, 10 และ 15 โมลาร์ ด้วยอัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต พบว่าสารละลายมี  $Si^{4+}$  ไอออนเกิดขึ้น ที่ความเข้มข้นของ NaOH 10 โมลาร์ มากที่สุด และมากกว่าความเข้มข้นที่ 5 โมลาร์ เนื่องจากความเป็นด่างสูงกว่า ส่วนที่ 15 โมลาร์ ลดการละลายของซิลิกา เนื่องจากเกิดการรวมตัวเป็นก้อนแข็งของซิลิกาผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิค SEM พบว่าผิวขรุขระของก้อนจีโอโพลิเมอร์ที่ถูกชะละลายไอออนด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งที่ความเข้มข้น 5 โมลาร์ มีผิวขรุขระน้อยกว่าที่ความเข้มข้น 10 และ 15 โมลาร์ ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์ ให้กำลังอัดสูงสุดถึง 60 - 70 เมกะปาสคาล สูงกว่าที่ความเข้มข้นต่ำกว่า [32]

Nuno et al. (2013) ได้ศึกษาผลของ Alkaline-Activated เถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีต่อความเสถียรของดินอ่อน ที่ระยะเวลาการบ่ม 7, 28, 90 และ 365 วัน ผลการทดลองพบว่า สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ค่ากำลังอัด (Unconfined Compressive Strength) ของตัวอย่างก็ยังคงเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ตัวอย่างทดลอง หลังการบ่ม 365 วัน โดยค่ากำลังอัดขึ้นอยู่กับปริมาณเถ้าลอยที่เติมลงไป พบว่าที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 40 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด [33]

ชยกฤต เพชรช่วย (2553) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) มาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ โดยใช้ Alkaline Activator และเถ้าลอยในการพัฒนากำลังอัดของดินเหนียวปนตะกอนทราย (Silty clay) ผลการทดลองพบว่า ค่า Maximum Soaked Strength ของตัวอย่าง Clay-FA Geopolymer อัตราส่วนของ  $Na_2SiO_3$ /น้ำ เท่ากับ 0.6 อัตราการเพิ่มเถ้าลอยที่ใช้ผสมร้อยละ 15 และบ่มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสให้ค่ากำลังอัดสูงสุดและสูงกว่าการบ่มที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย [34]

Ittikorn et al. (2016) ได้ศึกษาการพัฒนา กำลังอัดของวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกรันเหล็กจีโอโพลิเมอร์สำหรับการนำไปใช้งานพื้นที่ทางที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตะกรันเหล็กจีโอโพลิเมอร์ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 5 ตะกรันเหล็กร้อยละ 5 และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร้อยละ 5 ตะกรันเหล็กร้อยละ 5 ค่ากำลังอัดที่ 7 วันเป็นไปตามข้อกำหนดต่ำสุด (>1.724 เมกะปาสคาล) ซึ่งการพัฒนา กำลังอัดสูงสุดของตะกรัน

เหล็กจีโอโพลิเมอร์ (Rap+10%S Geopolymer) ที่ 5.73 เมกะปาสกาลเกิดเนื่องปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและแคลเซียมของตะกรันเหล็กและสารกระตุ้นอัลคาไลน์ได้เป็นผลิตภัณฑ์ C-A-S-H ดังนั้นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ที่จะเกิดขึ้นและอยู่ร่วมกันกับเจล C-A-S-H เมื่อผสมแล้วลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกรันเหล็ก โดยใช้ตะกรันเหล็กเป็นสารตั้งต้น [35]

Menglim et al. (2016) ได้ศึกษาการพัฒนากำลังอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์เก่าโดยการผสมแล้วลอยชนิด C โดยใช้ NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เป็น Alkaline Activator สำหรับงานโครงสร้างถนน ตัวอย่างทดสอบคือ RAP-FA Geopolymer และ RAP-FA blend (ใช้น้ำเป็นตัว Control) ผลการทดลองพบว่า กราฟการบดอัด (Compaction Curve) ของ RAP-FA Geopolymer ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> และอัตราการเพิ่มของแล้วลอย ค่ากำลังอัดในช่วง 7 วันแรกที่จุด OWC เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย ทั้งการบดที่อุณหภูมิห้องและ 40 องศาเซลเซียส มีปริมาณการเพิ่มแล้วลอยร้อยละ 20 และ 30 โดยที่ค่ากำลังอัดของ RAP-FA Geopolymer จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ลดลงน้อยกว่า 90:10 และให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า RAP-FA Blend ที่ระยะเวลาบดและอัตราการเพิ่มแล้วลอยที่เท่ากันแต่จะไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีปริมาณแล้วลอยมากกว่าร้อยละ 20

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของทั้งตัวอย่างทดสอบ RAP-FA Geopolymer และ RAP-FA Blend พบว่า RAP มีปริมาณ Ca และ Mg สูง และแล้วลอยมีปริมาณ Si และ Al สูง ทำให้มีผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นตลอดเวลา จึงทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน NaOH:Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ลดลง และเมื่อไม่มี Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (NaOH:Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เท่ากับ 100:0) ทำให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันของ RAP-FA Geopolymer เกิดขึ้นได้ช้า ดังนั้นค่ากำลังอัดในช่วง 7 วันแรกของ RAP-FA Blend จึงมีค่าสูงกว่า [36]

Itthikorn et al. (2018) ได้ศึกษาความสามารถในการใช้ของเสียสองประเภท คือ แล้วลอยชนิด C และ GBFS ร่วมกับ Alkaline Activator เป็นวัสดุทดแทนในการปรับปรุงคุณภาพของดินลูกรังที่ส่วนผสมต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่า ค่ากำลังอัด (Unconfined Compressive Strength) ของระยะเวลาการบด 7 วัน ที่อัตราส่วน LS: FA: GBFS ที่อัดด้วย OLC มีค่ากำลังอัดสูงกว่าที่กำหนดโดยกรมทางหลวงชนบทประเทศไทย (มากกว่า 1.724 เมกะปาสกาล) สำหรับการจราจรไม่หนาแน่น และมากกว่า 2.413 เมกะปาสกาล สำหรับการจราจรหนาแน่น) และทางหลวงออสเตรเลีย (มากกว่า 3.5 เมกะปาสกาล) อัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 7 วัน คือ NS: NH เท่ากับ 100: 0 และ LS: FA: GBFS เท่ากับ 50:30:20 ในขณะที่ค่ากำลังอัดสูงสุดที่ 28 วันและ 60 วัน คือ NS: NH เท่ากับ 90:10 และ LS: FA: GBFS เท่ากับ 60:30:10 [37]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

เก็บตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่ามาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม ได้แก่ การทดสอบขนาดของเม็ดวัสดุ (Sieve Analysis) การทดสอบการบดอัด (Compaction) เพื่อหาค่าความหนาแน่นสูงสุด และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม การทดสอบหาค่าขีดจำกัดแอดเตอร์ เบิร์ก (Atterberg's Limits) การทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles Abrasion Test) และการทดสอบค่าแคลิฟอร์เนีย แบริง เบริง เรโซ (California Bearing Ratio, CBR) เตรียมตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ แล้วนำไปบ่มที่ระยะเวลาและอุณหภูมิตามที่กำหนด เพื่อเตรียมทดสอบค่ากำลังอัด (Compressive Strength) ค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM/EDS แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 3.2 วัสดุดิบ อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.2.1 วัสดุดิบและอุปกรณ์

###### 3.2.1.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า (RAP)

จากถนนทางหลวงหมายเลข 331 เขต ต.บ่อวิน อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี

###### 3.2.1.2 นํ้ายางพาราปรับสภาพ (Modified Rubber Latex, MRL)

ทล.1 CRD30 จาก ต.เขากะลา อ.พุนพิน จ.นครศรีธรรมราช

###### 3.2.1.3 เถ้าลอย (Fly Ash, FA)

จากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ต.มาบตาพุด อ.เมือง จ.ระยอง

##### 3.2.2 สารเคมี

###### 3.2.2.1 สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline Activator, AA)

อัตราส่วนผสมของ NaOH: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> มีค่าเท่ากับ 50 : 50 โดยน้ำหนัก

###### 3.2.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ความเข้มข้นของ NaOH เท่ากับ 8 โมลาร์ (M)

### 3.2.2.3 สารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

โซเดียมซิลิเกตเหลว Type CR 53 ตาม ม.อ.ก.433 - 2539

## 3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุ

#### 3.3.1.1 การทดสอบขนาดของเม็ดวัสดุ (Sieve analysis)

ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.8-2545 [38] เทียบเท่า AASHTO T.27-70

#### 3.3.1.2 การหาค่าขีดจำกัดแอสเตอร์เบิร์ก (Atterberg's limits)

ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.5-2545 [39] และ มทช.(ท) 501.6-2545 [40]

เทียบเท่ามาตรฐาน AASHTO T.89 และ T.90

#### 3.3.1.3 การหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Los Angeles abrasion test)

ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.9-2545 [41] เทียบเท่า ASTM C 131 และ

ASTM C 535

#### 3.3.1.4 การบดอัด (Compaction)

ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.2-2545 [42] เทียบเท่า AASHTO T.99

#### 3.3.1.5 การทดสอบค่าแคลิฟอร์เนีย แบร์ริง เรโซ (CBR)

ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 501.3-2545 [43] เทียบเท่า AASHTO T – 193

### 3.3.2 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 3.3.2.1 การทดสอบค่ากำลังอัด (Compressive Strength)

ตามมาตรฐาน มทช.(ท) 303-2545 [6] เทียบเท่ามาตรฐาน AASHTO

T.207 และ T.208

#### 3.3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

ตามมาตรฐาน ASTM D1632 [7] และ D1635 [8]

#### 3.3.2.3 ภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM/EDS)

### 3.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าที่ถูกขูดหรือถอนออกจากถนน (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) จากจังหวัดชลบุรี นํ้ายางพาราปรับสภาพ (Modified Rubber Latex, MRL) เถ้าลอย (Fly Ash, FA) และสารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline Activator, AA) มาผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้

สำหรับตัวอย่างควบคุม (Quality Control Sample, QC Sample)

อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผิวทาง : ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 : นํ้า (RAP:OPC:W) โดยน้ำหนักของ RAP

ส่วนผสม 1 (RAP+5%OPC+W) (RCW)

สำหรับตัวอย่างทดสอบ (Test Sample)

อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผิวทาง : เถ้าลอย : สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (RAP:FA:AA) โดยน้ำหนักของ RAP

ส่วนผสม 2 (RAP+5%FA+AA) (RFA5)

ส่วนผสม 3 (RAP+10%FA+AA) (RFA10)

ส่วนผสม 4 (RAP+15%FA+AA) (RFA15)

ส่วนผสม 5 (RAP+20%FA+AA) (RFA20)

อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผิวทาง : เถ้าลอย : นํ้ายางพาราปรับสภาพ : สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (RAP:FA:NR:AA) โดยน้ำหนักของ RAP โดยที่อัตราส่วนของ AA : MRL ที่ค่า OMC เท่ากับ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70:30 และ 60 : 40 (หรือที่ปริมาณนํ้ายางพาราปรับสภาพ ร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของส่วนผสม)

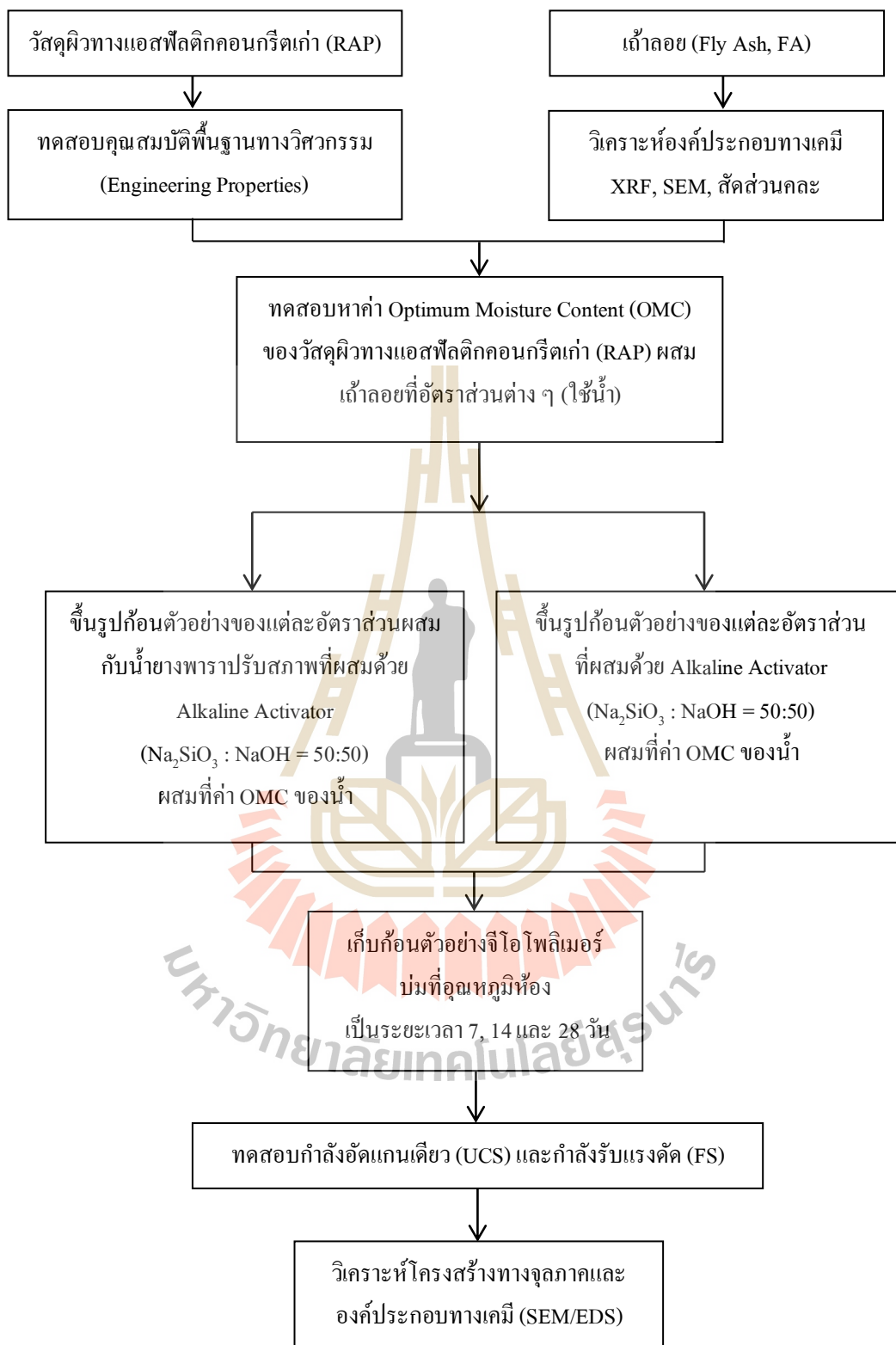
ส่วนผสม 6 (RAP+5%FA+AA : MRL) (RMFA5)

ส่วนผสม 7 (RAP+10%FA+AA : MRL) (RMFA10)

ส่วนผสม 8 (RAP+15%FA+AA : MRL) (RMFA15)

ส่วนผสม 9 (RAP+20%FA+AA : MRL) (RMFA20)





รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าและเถ้าลอย

##### 4.1.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า

รูปที่ 4.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ที่ใช้ในการวิจัยเป็นวัสดุผิวทางเก่าที่เก็บมาจากถนนทางหลวงหมายเลข 331 เขต ตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นวัสดุผิวทางเก่าที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเก่าดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเป็นวัสดุเกรด ก. จากผลการทดสอบ Atterberg's Limit พบว่าไม่มีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL) และไม่มีค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Index, PI) ค่าซี.บี.อาร์ (CBR) ที่ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าร้อยละ 38.00 ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดของกรมทางหลวงชนบทสำหรับชั้นพื้นทาง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80) ขนาดคละของเม็ดวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

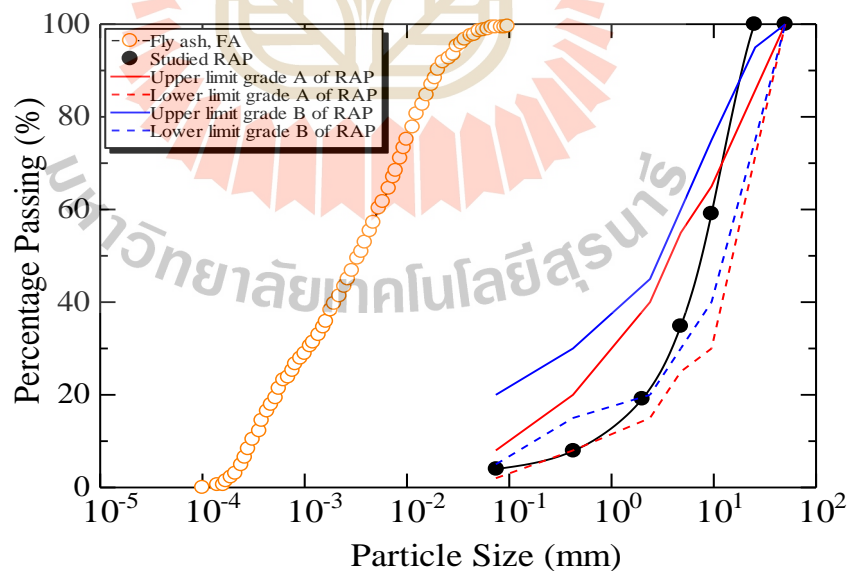


รูปที่ 4.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	RAP	คุณสมบัติมาตรฐานตามข้อกำหนดของ กรมทางหลวงชนบท	
		ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นพื้นทาง
Gradation	ก	-	-
Liquid Limit, LL (%)	NP*	< 35	< 25
Plastic Index, PI (%)	NP*	< 11	< 6
Optimum Moisture Content (%)	7.52	-	-
Maximum Dry Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	20.72	-	-
California Baring Ratio, CBR at 95% of $\rho_d$ , max (%)	38.00	> 25	> 80
Swelling (%)	0.39	-	-
Los Angeles abrasion (%)	38.09	< 60	< 40

\*NP = Non Plastic



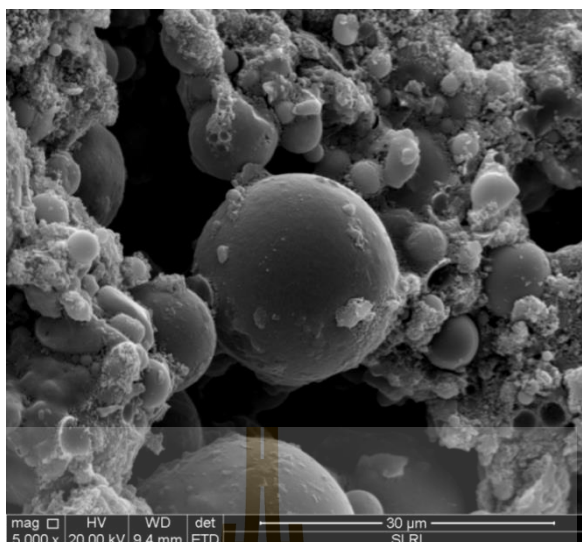
รูปที่ 4.2 ขนาดคละของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าและถั่วลอย

#### 4.1.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly ash, FA) ที่ใช้ในการศึกษา ได้มาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพีของบริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง มีองค์ประกอบทางเคมีที่ได้มาจากการทดสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) คือ  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 61.98,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 29.29,  $\text{CaO}$  ร้อยละ 1.81,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 3.37 และ  $\text{SO}_3$  ร้อยละ 1.18 และตามมาตรฐาน ASTM C618 [20] จำแนกเป็นเถ้าลอยชนิด F ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2 ขนาดคละของเถ้าลอยดังแสดงในรูปที่ 4.1 และลักษณะรูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) มีลักษณะเป็นทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

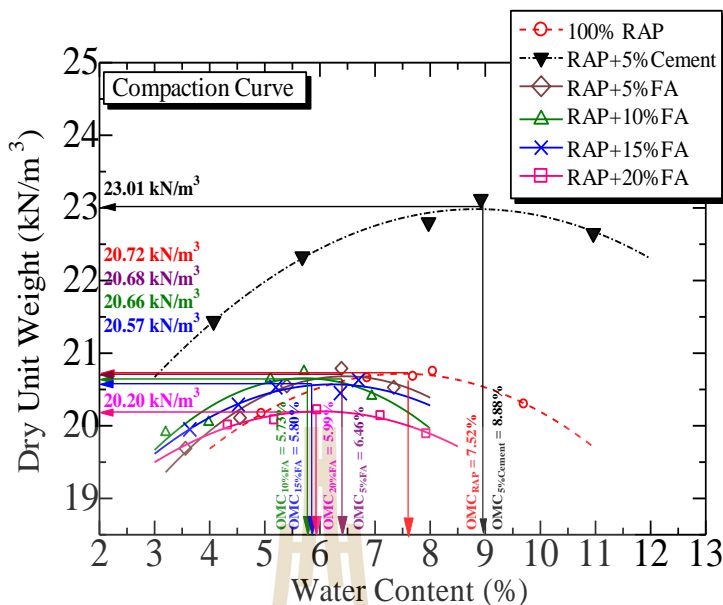
องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย (FA)
$\text{SiO}_2$	61.98
$\text{Al}_2\text{O}_3$	29.29
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.37
$\text{CaO}$	1.81
$\text{SO}_3$	1.18
$\text{TiO}_2$	1.30
$\text{K}_2\text{O}$	0.84



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย (FA)

#### 4.2 การบดอัดของตัวอย่างอีโพอลิเมอร์

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่า วัสดุผิวทางเก่าผสมปูนซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 5 และวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยที่ปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผิวทางเก่า หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมปูนซีเมนต์และเถ้าลอย คือ 23.01, 20.72, 20.68, 20.66, 20.57 และ 20.20 kN/m<sup>3</sup> ตามลำดับ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 8.88, 7.52, 6.46, 5.73, 5.80 และ 5.99 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสมเพิ่มขึ้นเมื่อผสมปูนซีเมนต์กับวัสดุผิวทางเก่า และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเถ้าลอยในส่วนผสมเพิ่มขึ้น รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 การบดอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอย

ตารางที่ 4.3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

ตัวอย่าง	Optimum Moisture Content, OMC (%)	Dry Unit Weight, $\gamma_{d, \max}$ (kN/m <sup>3</sup> )
100% RAP	7.52	20.72
RAP+5% Cement	8.88	23.01
RAP+5% FA	6.46	20.68
RAP+10% FA	5.73	20.66
RAP+15% FA	5.80	20.57
RAP+20% FA	5.99	20.20

### 4.3 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

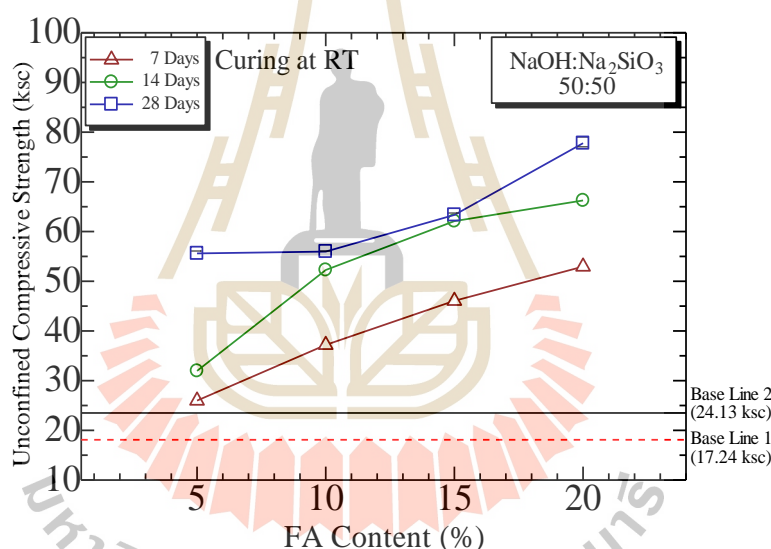
#### 4.3.1 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างมีอัตราส่วนของ NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เท่ากับ 50:50 จากรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณเถ้าลอยมีอิทธิพลต่อการ



พัฒนากำลังอัดของตัวอย่าง โดยกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น จากกราฟจะสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดทุกช่วงอายุบ่ม รองลงมาคือปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 15, 10 และ 5 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด นอกจากนี้การพัฒนากำลังอัดจะเกิดขึ้นได้ดีในตัวอย่างจีโอ โพลิเมอร์ที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5 และ 20

เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการควบคุมและเป็นข้อกำหนดตามมาตรฐานด้านงานทางของกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง พบว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5 และ 20 มีค่า 25.98 ksc และ 52.98 ksc และเป็นค่ากำลังอัดที่สูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) และยิ่งสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc)



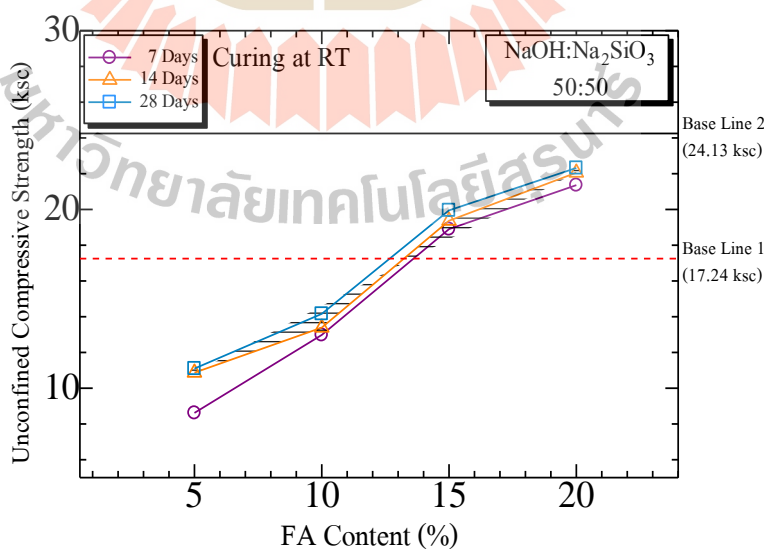
รูปที่ 4.5 กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอ โพลิเมอร์

เมื่อวิเคราะห์กำลังอัดของตัวอย่างจีโอ โพลิเมอร์ทั้ง 4 อัตราส่วนเทียบกับอายุบ่ม พบว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5 และ 20 มีการพัฒนากำลังอัดที่รวดเร็วและดี ตั้งแต่ช่วงอายุบ่ม 7 วัน ถึง 28 วัน ที่อัตราส่วนเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 15 กำลังอัดพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุบ่ม 7 ถึง 14 วัน และหลังจาก 14 วันไปแล้ว กำลังอัดพัฒนาขึ้นไม่มากนักแม้จะมีเถ้าลอยในปริมาณสูง ดังนั้นกำลังอัดของตัวอย่างจึงพัฒนาขึ้นตามอายุบ่ม [44, 45]

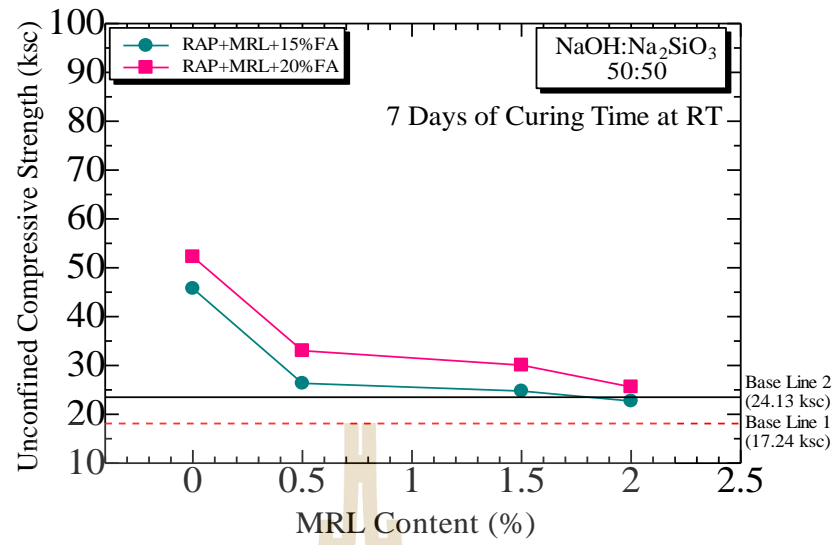
#### 4.3.2 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างมีอัตราส่วนของ NaOH :  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  เท่ากับ 50:50 จากรูปที่ 4.6 พบว่าปริมาณเถ้าลอยและน้ำยางพารามีอิทธิพลต่อการพัฒนา กำลังอัดของตัวอย่าง โดยกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่การผสมน้ำยางพาราจะทำให้กำลังอัดลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการผสมน้ำยางพาราที่มีปริมาณการเพิ่มเถ้าลอยเดียวกัน จากกราฟจะสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดทุกช่วงอายุบ่ม รองลงมาคือปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 15, 10 และ 5 ตามลำดับ โดยที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบว่าการพัฒนา กำลังอัดเป็นไปได้ช้าและไม่ดีในทุกอัตราส่วนทดสอบ

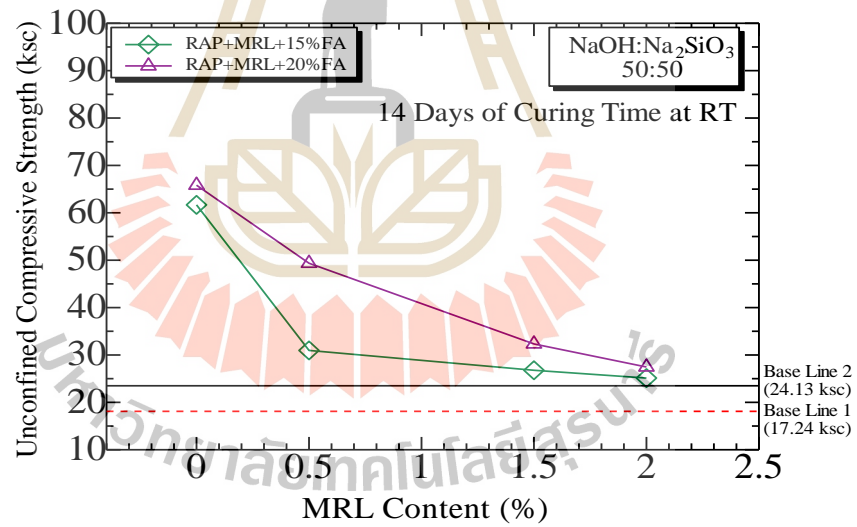
เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการควบคุมและ เป็นข้อกำหนดตามมาตรฐานดำเนินงานทางของกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของน้ำยางพาราและปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 19.82 และ 22.11 ksc ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่สูงกว่ากำลังอัดสำหรับปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ นอกจากนี้กำลังอัดของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของน้ำยางพาราและปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5 และ 10 มีค่าต่ำกว่า 17.24 ksc และยังคงต่ำกว่า 24.13 ksc ทุกอัตราส่วนทดสอบ



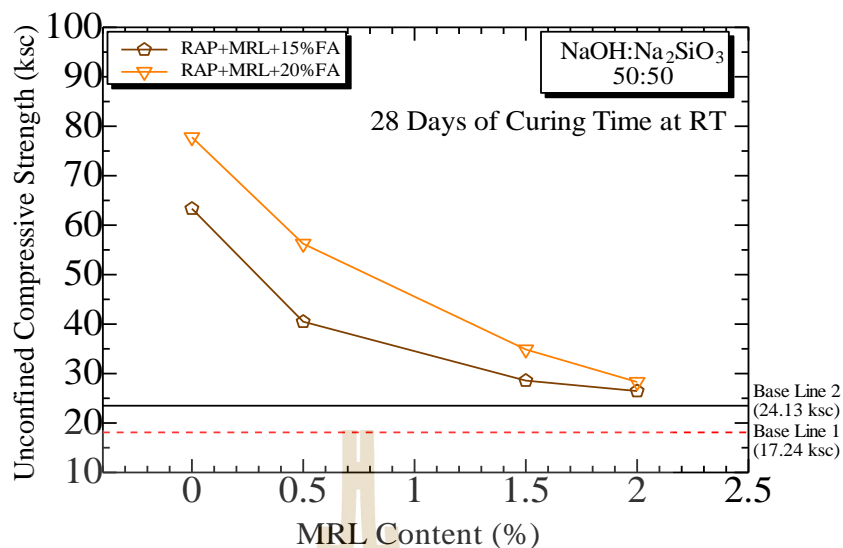
รูปที่ 4.6 กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์



(n)



(u)



(ค)

รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงคดของตัวอย่างวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน (ข) 14 วัน และ (ค) 28 วัน

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังคดของตัวอย่างวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราที่ ปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณร้อยละ 15 และ 20 ตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์จะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างมีอัตราส่วนของ NaOH : Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> เท่ากับ 50:50 จากรูปที่ 4.7 พบว่าการเพิ่ม ปริมาณน้ำยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังคดของตัวอย่าง โดยกำลังคดจะ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น [46] รูปที่ 4.7 (ก) กำลังคดสูงสุดของตัวอย่างที่อายุ บ่ม 7 วัน พบที่ตัวอย่างผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 45.76 และ 52.25 ksc ตามลำดับ ในขณะที่กำลังคดต่ำสุดของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน พบที่ตัวอย่าง ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 22.72 และ 25.60 ksc ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 0 ให้ค่ากำลังคดสูงสุดทุกช่วงอายุ บ่ม รองลงมาคือปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 0.5 และมีการพัฒนากำลังคดที่ค่อนข้างดี โดยที่ ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 2 ให้ค่ากำลังคดต่ำสุด และไม่มีการพัฒนากำลังคดในทุกช่วงอายุการบ่ม

นอกจากนี้ รูปที่ 4.7 (ข) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 14 วัน และ รูปที่ 4.8 (ค) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ยังพบว่ากำลังคดของตัวอย่างที่ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0.5 มีค่า 30.96 และ 49.36 ksc สำหรับปริมาณเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 15 ตามลำดับ และมีค่า

40.48 และ 56.24 ksc สำหรับปริมาณเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 20 ตามลำดับ มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังอัดที่ดีเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0

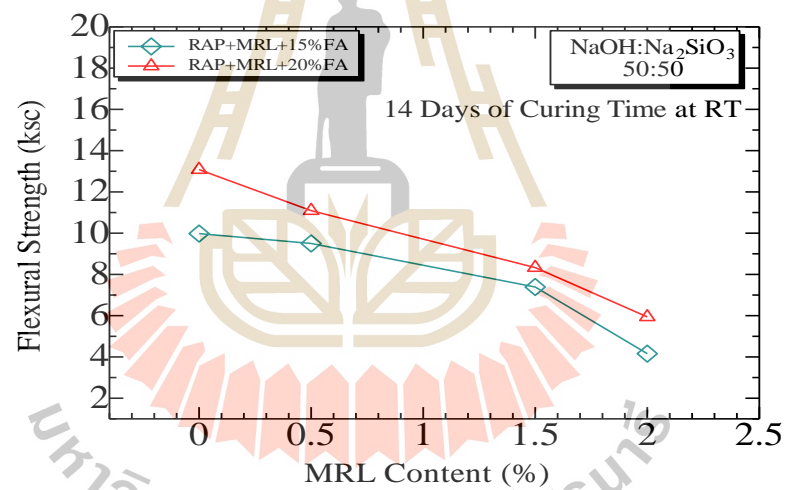
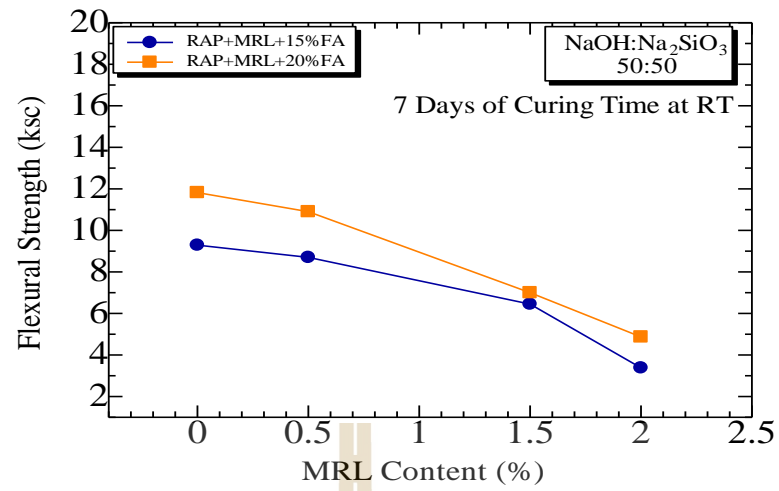
อย่างไรก็ตาม การผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อปริมาณน้ำยางพาราเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง [47] เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีส่วนผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณที่อัตราส่วนเถ้าลอยเดียวกัน และกำลังอัดของตัวอย่างยังคงสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) และยังคงสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc)

#### 4.4 กำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

##### 4.4.1 กำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

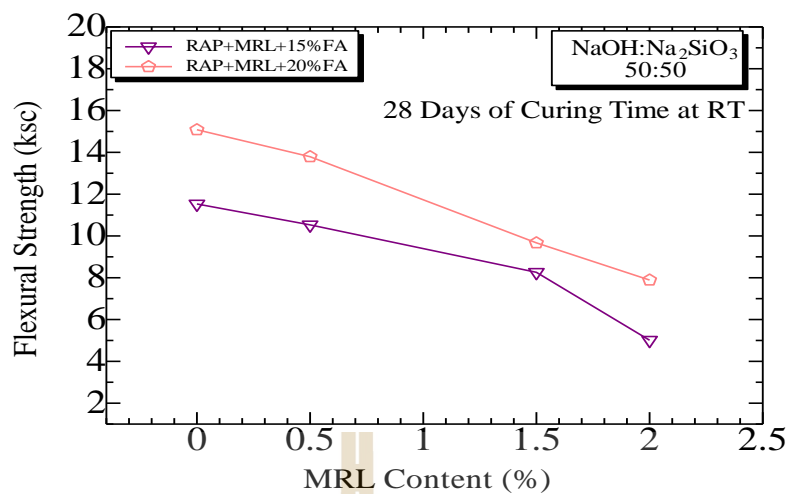
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณร้อยละ 15 และ 20 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างมีอัตราส่วนของ  $\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$  เท่ากับ 50:50 จากรูปที่ 4.8 พบว่าปริมาณน้ำยางพารามีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงดัดของตัวอย่าง โดยกำลังรับแรงดัดจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.8 ก) กำลังรับแรงดัดสูงสุดของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน พบที่ตัวอย่างผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 9.29 และ 11.82 ksc ตามลำดับ ในขณะที่กำลังรับแรงดัดต่ำสุดของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน พบที่ตัวอย่างผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 3.38 และ 4.87 ksc ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 0 ให้ค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุดทุกช่วงอายุบ่ม รองลงมาคือปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 0.5, 1.5 และ 2 ตามลำดับ รูปที่ 4.8 ข) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 14 วัน และ รูปที่ 4.8 ค) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 28 วัน จากกราฟพบว่ากำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่ผสมน้ำยางพารามีการพัฒนาได้เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าน้ำยางพารานั้นไม่มีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงดัด [48]

ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวัสดุผิวทางเก่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถยึดเกาะกับอนุภาคยางในน้ำยางพาราได้ ทำให้ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากเกินไปน้ำยางพาราจึงไม่สามารถเชื่อมประสานอย่างทั่วถึงในส่วนผสม และการเพิ่มปริมาณของน้ำยางพาราในส่วนผสมที่จุด OMC ไปลดปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์ที่เถ้าลอยจำเป็นต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังอัดและกำลังรับแรงดัดลดลง [49]



(๖)



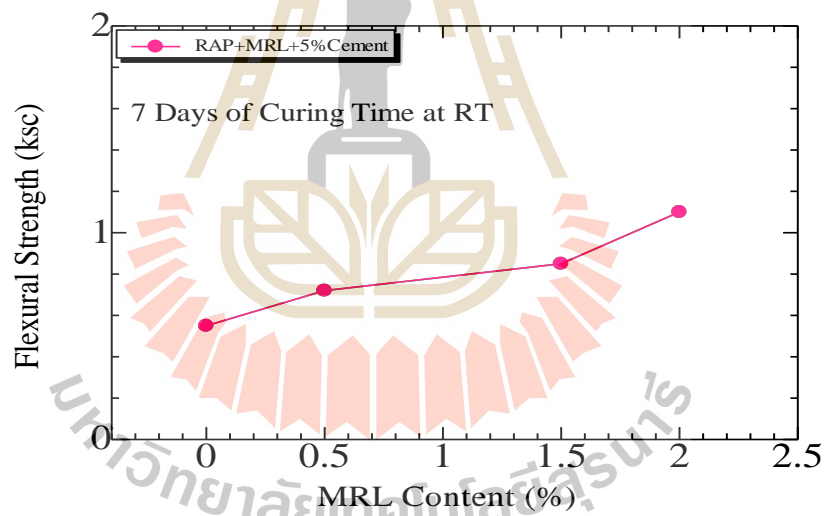
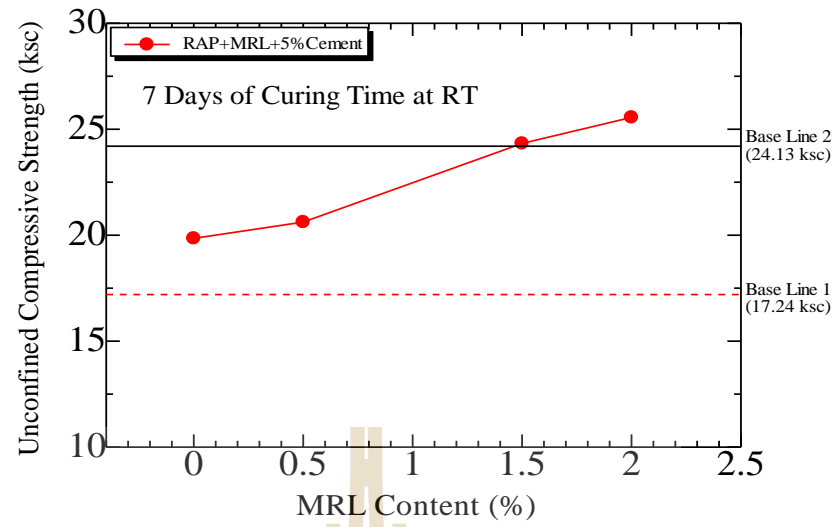


(ก)

รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงค้ดของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและถั่วลยจีโอโพลิเมอร์ ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน (ข) 14 วัน และ (ค) 28 วัน

#### 4.5 กำลังอัดแกนเดียว และกำลังรับแรงค้ดของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังอัด และกำลังรับแรงค้ดของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2 และปูนซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยตัวอย่างจะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดและกำลังรับแรงค้ดของตัวอย่าง โดยกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงค้ดของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าน้ำยางพารานั้นมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและกำลังรับแรงค้ด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคยางในน้ำยางพาราสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์สามารถยึดเกาะกับวัสดุผิวทางเก่าได้ดี เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีเกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนาแน่นมากขึ้น [53] จึงทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังอัดและกำลังรับแรงค้ดเพิ่มขึ้น



(ข)

รูปที่ 4.9 กำลังอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์

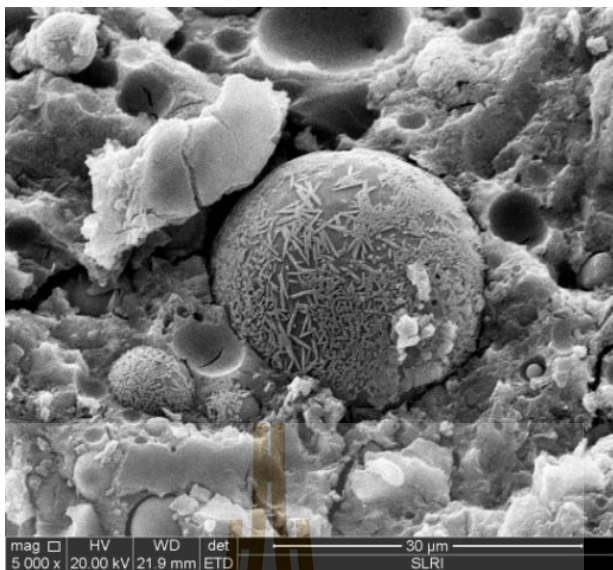
(ก) กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน และ (ข) กำลังรับแรงดัดที่อายุบ่ม 7 วัน

## 4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

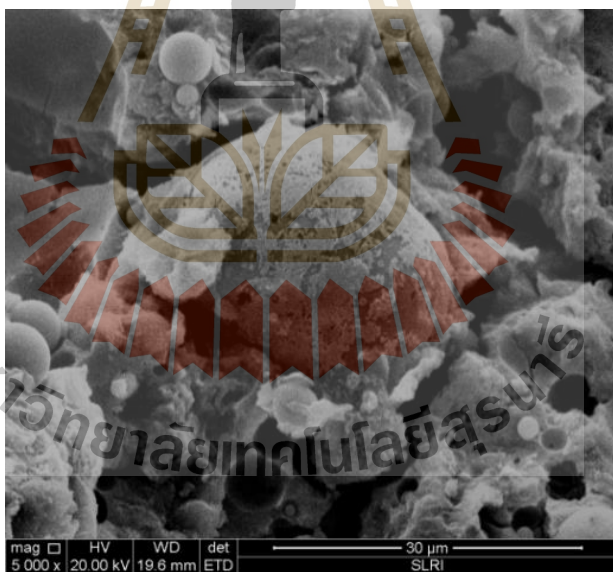
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ถ่ายภาพโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นส่วนขนาดเล็กที่อยู่แกนกลาง เพื่อนำมาวิเคราะห์การพัฒนากำล้างอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ โดยศึกษาจากปฏิกิริยาระหว่างสารกระตุ้นอัลคาไลน์กับเถ้าลอยในแต่ละช่วงอายุบ่ม

### 4.6.1 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

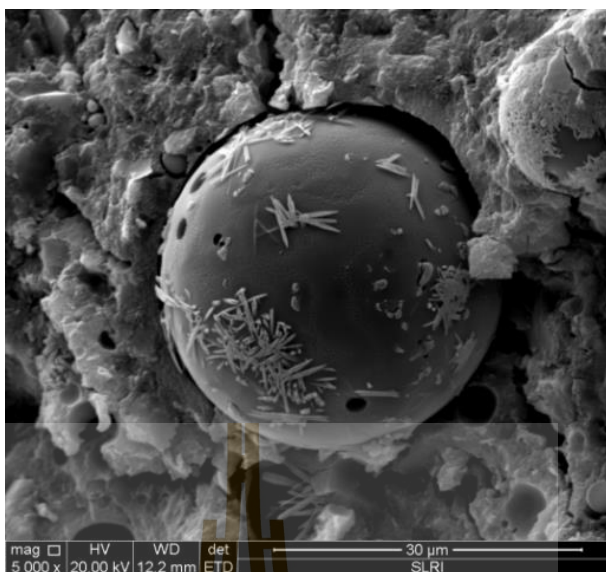
รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่าเถ้าลอยที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้ ซึ่งเถ้าลอยมีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยาหรือสารกระตุ้นอัลคาไลน์แล้ว การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินาให้เป็นลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันขึ้น เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si, O และ Al ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Si-O-Al-O) ที่บริเวณผิวของเถ้าลอย [4] และรวมตัวกันเป็นจีโอโพลิเมอร์เจลต่อไป รูปที่ 4.10 ก) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณผิวเถ้าลอยเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์อย่างชัดเจน เกิดการเชื่อมประสานระหว่างโซ่เคียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H gel) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) ทำให้จีโอโพลิเมอร์สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ [50] รูปที่ 4.10 ข) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 14 วัน สังเกตได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นที่ผิวตัวอย่างและผิวของเถ้าลอยมากขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของสารกระตุ้นอัลคาไลน์ สามารถสังเกตเห็นหลุมและอนุภาคเถ้าลอยขนาดเล็ก ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์นี้ยังสามารถพัฒนากำล้างอัดต่อไปได้อีก เนื่องจากมีการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในจีโอโพลิเมอร์ซึ่งสารดังกล่าวพัฒนากำล้างอัดตามอายุบ่ม [44, 45] รูปที่ 4.10 ค) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน จะสังเกตเห็นรูพรุนที่บริเวณผิวของเถ้าลอย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายด่างเพื่อชะซิลิกาและอะลูมินาจากผิวเถ้าลอยทำให้อนุภาคซีโนสเฟีย (Cenosphere) และพลีโรสเฟีย (Pterosphere) ภายในเถ้าลอยออกมาทำปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น [32]



(ก)



(ข)



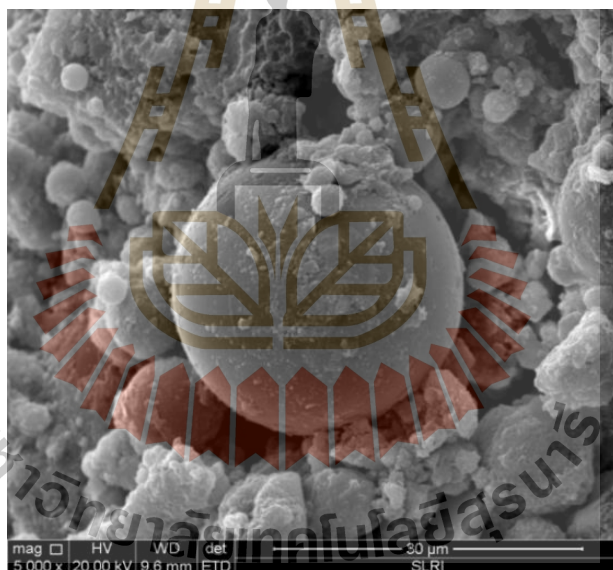
(ค)

รูปที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์  
ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน (ข) 14 วัน และ (ค) 28 วัน

#### 4.6.2 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอย ซีโอโพลิเมอร์

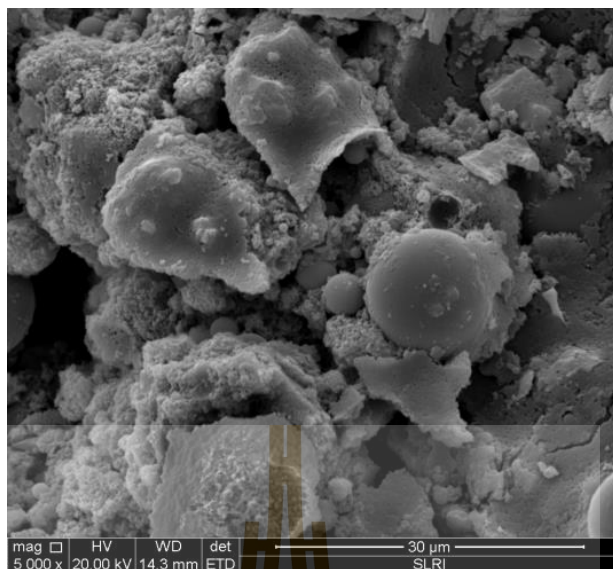
รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยซีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เมื่อเพิ่มน้ำยางพาราลงในส่วนผสมพบว่ามีส่วนที่คล้ายแผ่นฟิล์มสีขาวปกคลุมอนุภาคเถ้าลอยและพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งแผ่นฟิล์มนี้จัดเป็นส่วนที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย (Gel fraction) ในน้ำยางพารา [15] ตัวอย่างซีโอโพลิเมอร์ยังคงเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาซีโอโพลิเมอร์ไรเซชันขึ้นบริเวณผิวของเถ้าลอยรวมตัวกันเป็นซีโอโพลิเมอร์เจลอยู่ รูปที่ 4.11 ก) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน เกิดผลิตภัณฑ์ซีโอโพลิเมอร์บนผิวเถ้าลอยเพียงเล็กน้อย ลักษณะพื้นผิวของเถ้าลอยค่อนข้างเรียบและมีอนุภาคเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ถูกทำปฏิกิริยากระจายอยู่โดยรอบ ผลิตภัณฑ์ซีโอโพลิเมอร์ทั้งโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H gel) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H gel) ที่เกิดขึ้นยังคงทำให้ซีโอโพลิเมอร์สามารถรับแรงได้ดี [51] รูปที่ 4.11 ข) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 14 วัน สังเกตได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดผลิตภัณฑ์ซีโอโพลิเมอร์บริเวณผิวของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นและมีอนุภาคเถ้าลอยขนาดเล็กที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ภายในช่องว่างของโครงสร้าง รูปที่ 4.11 ค) ตัวอย่างที่อายุบ่ม

28 วัน มีอนุภาคเถ้าลอยกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวตัวอย่างที่มีส่วนผสมของยางพารา จึงยังพอสังเกตเห็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นอยู่บ้าง ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างนี้มีการพัฒนา กำลังอัดค่อนข้างต่ำ เนื่องจากน้ำยางพารามีองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางหรือส่วนที่เป็นเจล ซึ่งการเติมน้ำยางพาราจะก่อให้เกิดกำแพงฟิล์มยางพารา (รูปที่ 4.12) ล้อมรอบอนุภาคเถ้าลอยและป้องกันการดูดซึมสารกระตุ้นอัลคาไลน์ระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งจะหน่วงหรือชะลอการทำปฏิกิริยาระหว่างสารกระตุ้นอัลคาไลน์กับซิลิกาและอะลูมินาจากผิวเถ้าลอยเพื่อทำปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ ป้องกันการดูดซึมน้ำสำหรับการแข็งตัวและการเติบโตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) ในกระบวนการไฮเดรชันจึงส่งผลให้กำลังของจีโอโพลิเมอร์ลดลงอย่างมาก [52] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของสิทธิชัย และคณะ [31] ที่ได้ศึกษาการนำยางพารามาใช้พัฒนางานคอนกรีตพบว่าการผสมน้ำยางพาราในคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 6

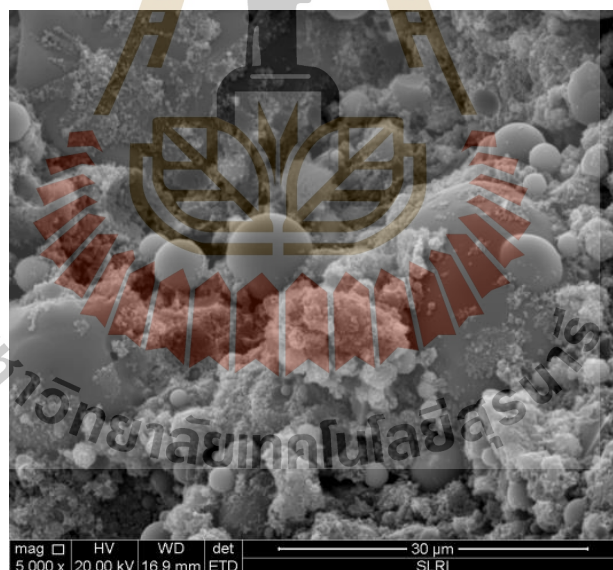


(ก)





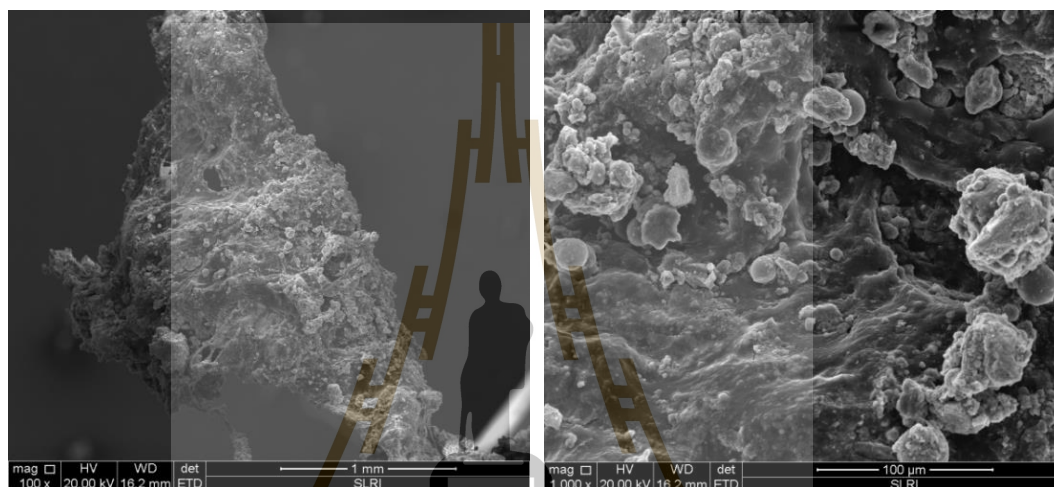
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพารา  
และถั่วงอกซีไอโพลีเมอร์ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน (ข) 14 วัน และ (ค) 28 วัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ผสมน้ำยาพาราที่อัตราส่วนเท่าลดยเดียวกัน ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมน้ำยาพาราจะมีสัดส่วนปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาน้อยกว่า จึงทำให้ให้ตัวอย่างมีปริมาณสารละลายต่างรวมทั้งซิลิกาและอะลูมินาลดลงไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับเถาลอยเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เป็นโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H gel) จึงสังเกตเห็นอนุภาคเถาลอยที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยามากมายกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์



(ก)

(ข)

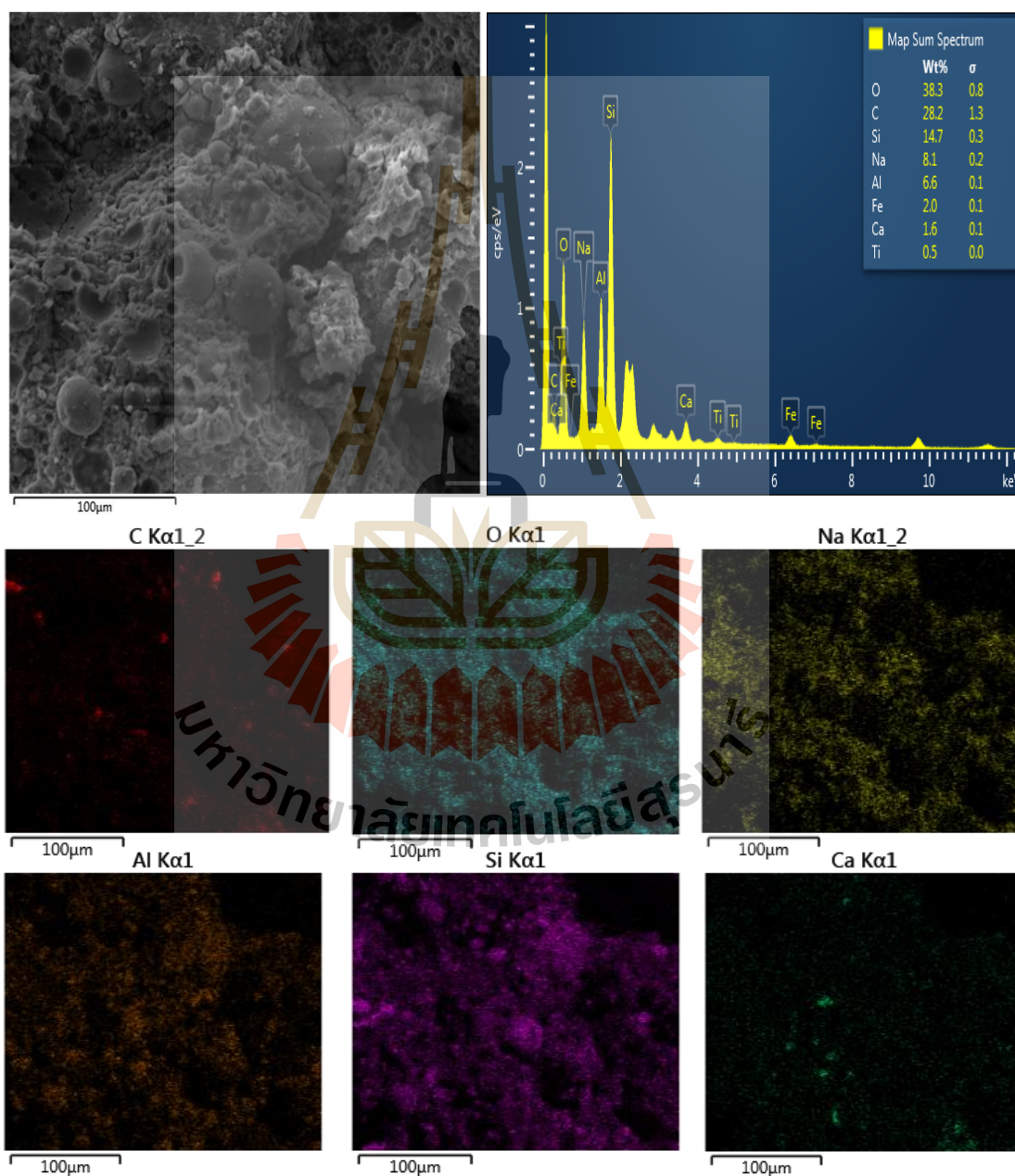
รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นฟิล์มยางพารา (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (100X) และ (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า (1,000X)

#### 4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์

##### 4.7.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถาลอยจีโอโพลิเมอร์

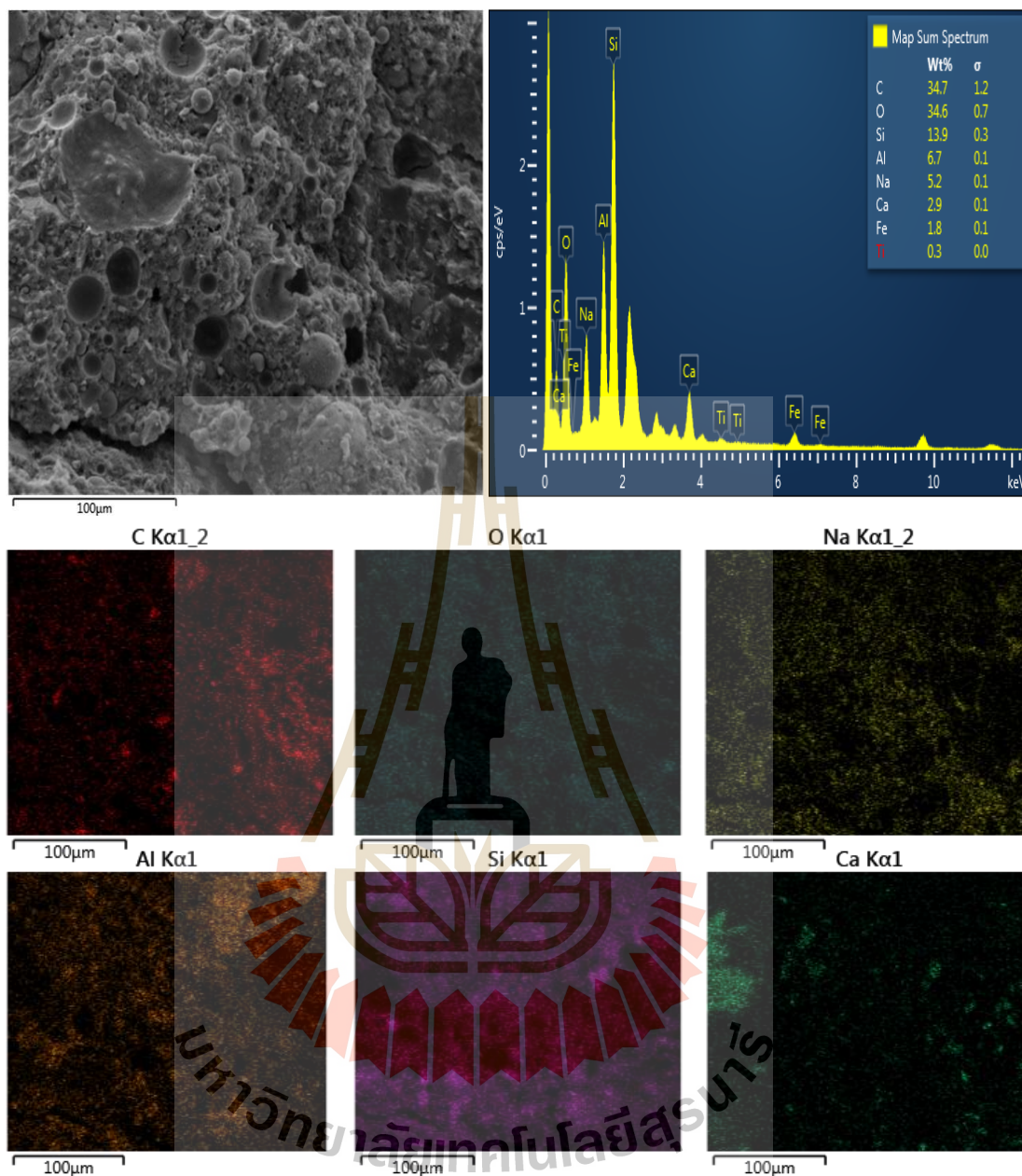
องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถาลอยจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค SEM/EDS (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer) จากภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ และผลวิเคราะห์ด้วย EDS ดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มีปริมาณอะตอมของธาตุ Si, Al, Na, C และ O เป็นองค์ประกอบหลัก และจากภาพ mapping แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ รูปที่ 4.13 ก) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

ที่อายุบ่ม 7 วัน จะเห็นการกระจายตัวของ Si, Al และ Na อย่างหนาแน่น บ่งชี้ได้ว่าเกิดปฏิกิริยา  
 จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ผลิตภัณฑ์โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) ในปริมาณสูงจึงทำให้กำลัง  
 อัดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 ข) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งจะพบอะตอม  
 ของธาตุ Si, Al, Na, C และ O ในปริมาณที่สูงกว่า และยังพบว่าปริมาณอะตอมของธาตุ Ca น้อย  
 จึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) ได้ในปริมาณน้อย



(ก)





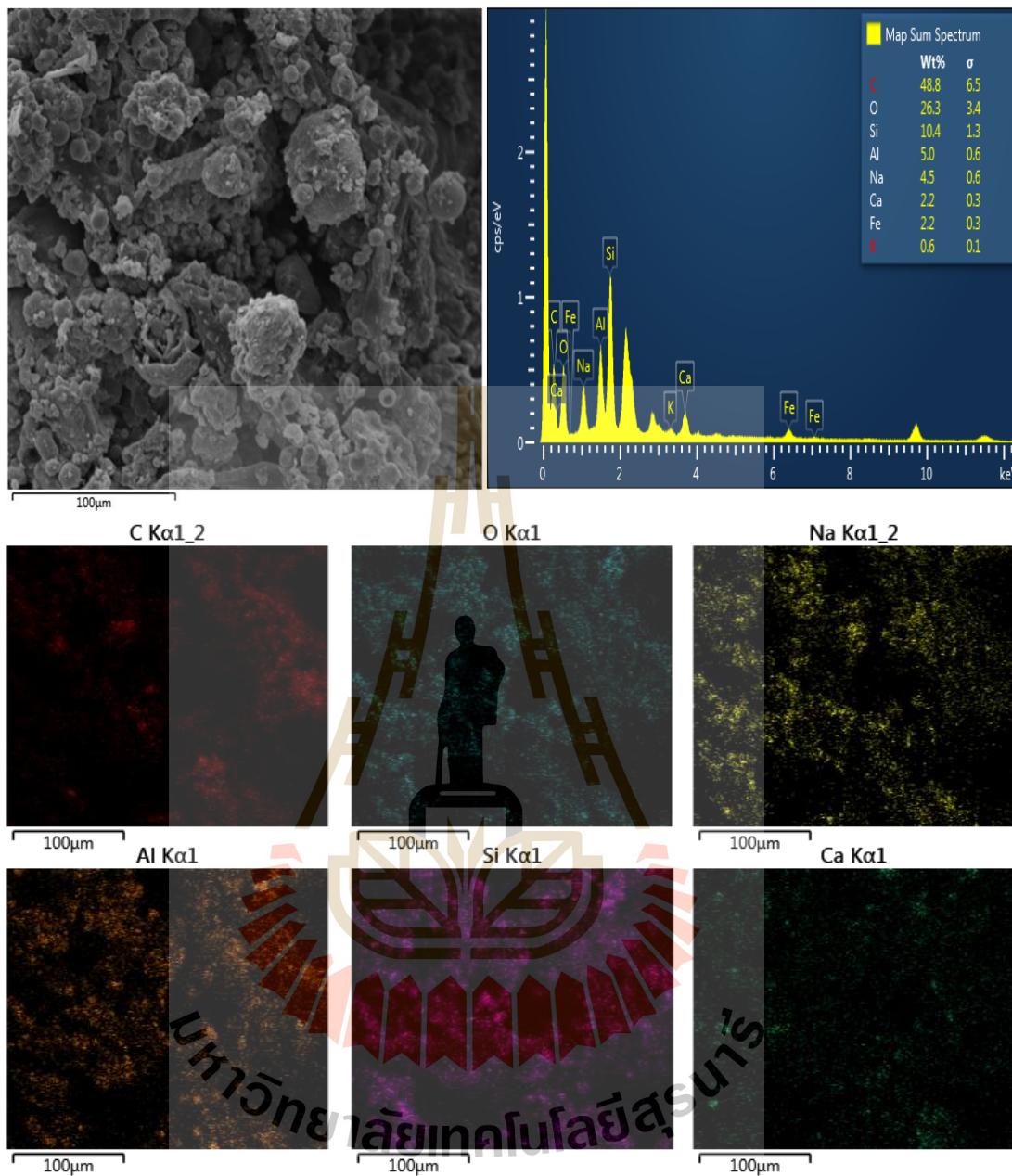
(ข)

รูปที่ 4.13 SEM/EDS และ mapping ของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์ที่อายุป่ม  
(ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน

#### 4.7.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอย จีโอโพลิเมอร์

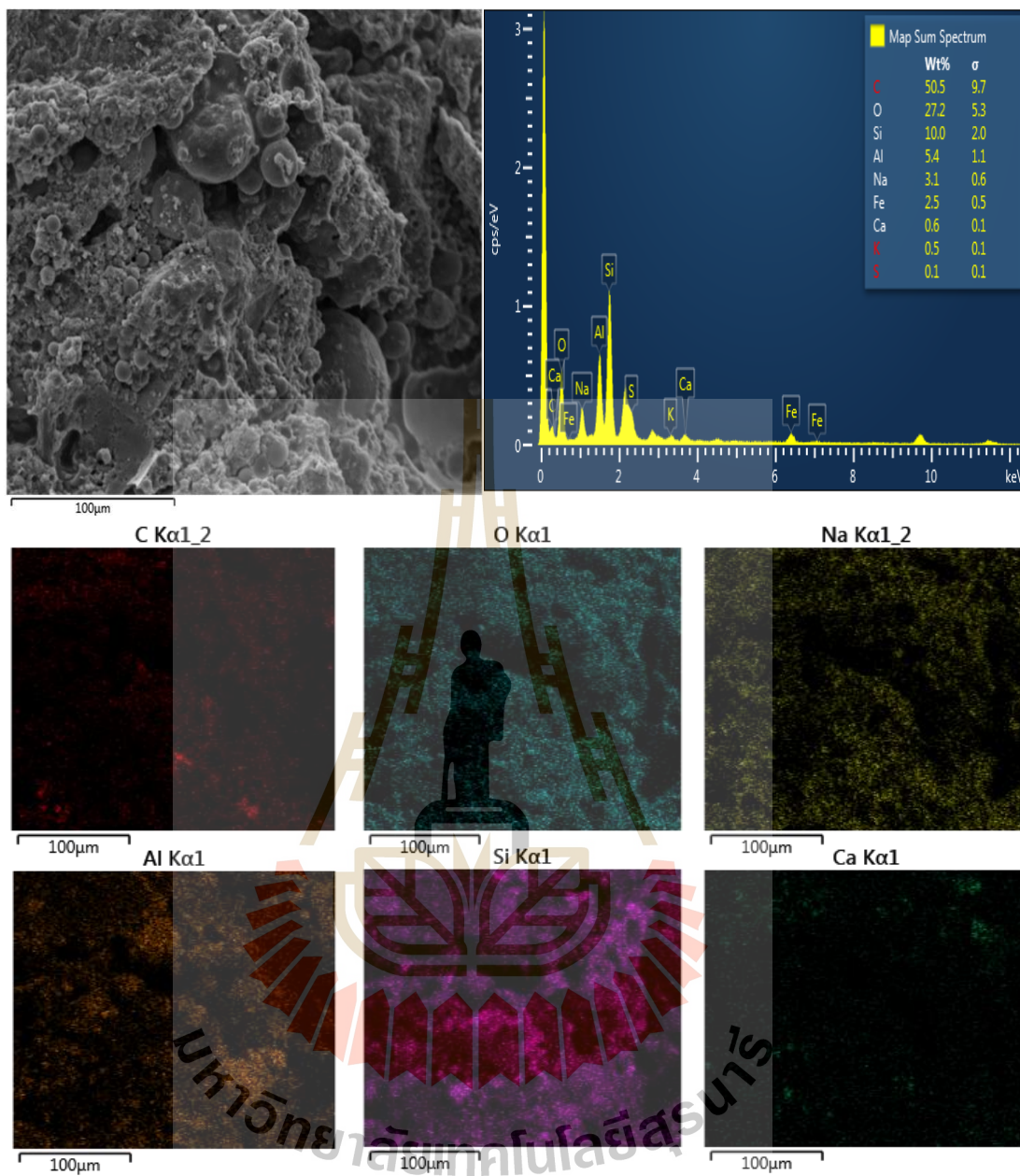
องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค SEM/EDS (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer) จากภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ และผลวิเคราะห์ด้วย EDS ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มีปริมาณอะตอมของธาตุ Si, Al, Na, C และ O เป็นองค์ประกอบหลัก และจากภาพ mapping แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ รูปที่ 4.14 ก) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วัน จะเห็นการกระจายตัวของ Si, Al และ Na บ่งชี้ได้ว่าเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ผลิตภัณฑ์โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) [53] เมื่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.14 ข) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 28 วัน จะสังเกตได้ว่าพบอะตอมของธาตุ Si, Al และ Na ในปริมาณน้อยซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นอนุภาคของเถ้าลอยที่ยังไม่ถูกชะล้างด้วยสารกระตุ้นอัลคาไลน์ เนื่องจากน้ำยางพาราขัดขวางการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน





(ก)





(จ)

รูปที่ 4.14 SEM/EDS และ mapping ของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอย  
 จีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าและเก่าลอย

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า พบว่าเป็นวัสดุเกรด ก. ไม่มีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL) และไม่มีค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Index, PI) ค่าซี.บี.อาร์ (CBR) ที่ร้อยละ 95 ของความหนาแน่นแห้งสูงสุดมีค่าร้อยละ 38.00 ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดของกรมทางหลวงชนบทสำหรับชั้นพื้นทาง (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80) ขนาดคละของเม็ดวัสดุ

##### 5.1.2 เก้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C618 เป็นเก้าลอยชนิด F มีองค์ประกอบทางเคมีที่ได้มาจากการทดสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) คือ  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 61.98,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 29.29,  $\text{CaO}$  ร้อยละ 1.81,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ร้อยละ 3.37 และ  $\text{SO}_3$  ร้อยละ 1.18 อนุภาคของเก้าลอยจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) มีลักษณะเป็นทรงกลม

##### 5.1.3 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมเก้าลอยจีโอโพลิเมอร์

กำลังอัดของตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเก้าลอยเพิ่มขึ้น ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณเก้าลอยร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดทุกช่วงอายุบ่ม รองลงมาคือปริมาณเก้าลอยร้อยละ 15, 10 และ 5 ตามลำดับ ค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วันของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณเก้าลอยร้อยละ 5 และ 20 มีค่า 25.98 ksc และ 52.98 ksc เป็นค่ากำลังอัดที่สูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) และยังสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc) กำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณเก้าลอยร้อยละ 5 และ 20 มีการพัฒนากำลังอัดที่รวดเร็วและดีตั้งแต่ช่วงอายุบ่ม 7 วัน ถึง 28 วัน

##### 5.1.4 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเก้าลอยจีโอโพลิเมอร์

การผสมน้ำยางพาราจะทำให้กำลังอัดลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการพัฒนากำลังอัดเป็นไปได้ช้า และเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่าง ตัวอย่างที่ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 0 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดทุกช่วงอายุบ่ม รองลงมาคือปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 0.5 และมีการพัฒนากำลังอัดที่ค่อนข้างดี โดยที่ปริมาณน้ำยางพารา

ร้อยละ 2 ให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด กำลังอัดของตัวอย่างยังคงสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) และยิ่งสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc)

#### 5.1.5 กำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์

กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2 และเถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์ที่ปริมาณร้อยละ 15 และ 20 กำลังรับแรงดัดจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดัดสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน พบที่ตัวอย่างผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0 และเถ้าลอยจีโอ โพลีเมอร์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 9.29 และ 11.82 ksc ตามลำดับ วัสดุผิวทางแก่ไม่สามารถยึดเกาะกับอนุภาคยางในน้ำยางพาราได้ ทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากเกินไปน้ำยางพาราจึงไม่สามารถเชื่อมประสานอย่างทั่วถึงในส่วนผสม ลดการเกิดปฏิกิริยาจีโอ โพลีเมอร์ไรเซชัน ทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังอัดและกำลังรับแรงดัดลดลง

#### 5.1.6 กำลังอัดแกนเดี่ยวยและกำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์

กำลังอัดแกนเดี่ยวยและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2 และปูนซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 5 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้กำลังอัดและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 5.1.7 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์เพื่อให้เห็นการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอย เกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอ โพลีเมอร์ไรเซชันขึ้น เกิดการเชื่อมประสานระหว่างโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H gel) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) ทำให้ตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์มีกำลังอัดสูงขึ้นตามระยะเวลา และตัวอย่างจีโอ โพลีเมอร์ที่ผสมน้ำยางพารา จะมีอนุภาคเถ้าลอยจำนวนมากที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยา จึงมีการพัฒนา กำลังอัดค่อนข้างต่ำ เนื่องจากน้ำยางพารามีองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางซึ่งไปล้อมรอบอนุภาคเถ้าลอยจึงส่งผลให้กำลังอัดของจีโอ โพลีเมอร์ลดลงอย่างมาก

#### 5.1.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์พบว่าปริมาณอะตอมของธาตุ Si, Al, Na, C และ O เป็นองค์ประกอบหลัก ผลวิเคราะห์ด้วย EDS mapping บ่งชี้ได้ว่าเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ผลิตภัณฑ์โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมน้ำยางพารา เมื่อเปรียบเทียบอายุบ่ม 7 วัน และ 28 วัน จะสังเกตได้ว่าพบอะตอมของธาตุ Si, Al และ Na ในปริมาณน้อยซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากเถาวัลย์ที่ยังไม่ถูกชะล้างด้วยสารกระตุ้นอัลคาไลน์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาในอนาคตควรศึกษาชนิดและอัตราส่วนที่จะทำให้ส่วนผสมระหว่างน้ำยางพาราและวัสดุสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การหาสารผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างน้ำยางพารากับเถาวัลย์ หรือการลดขนาดอนุภาคละเอียดของวัสดุผิวทางเก่าให้เล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา โดยจะต้องได้มาตรฐานตามข้อกำหนดของงานก่อสร้าง นอกจากนี้ควรศึกษาผลของเถาวัลย์ชนิด C เปรียบเทียบด้านการพัฒนากำลังอัด หรืออิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มที่มีผลกำลังกำลังอัดและกำลังรับแรงดัด



## เอกสารอ้างอิง

- [1] บัญชา พุทธระกูล, วิจิตรอัจฉรา สรรพกิจจำนง, เสรี ศรีธรรมธำรง, เศกชัย อนุเวชศิริเกียรติ และพรชัย สิตารมย์., การตรวจวัดการดูดซ้มน้ำของโพรงใต้แผ่นคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ GPR และ FED. 2547, กรมทางหลวง: สำนักวิจัยและพัฒนาทาง.
- [2] สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท, โครงข่ายทางหลวงชนบท สำหรับปีงบประมาณ 2561. 2560, กระทรวงคมนาคม: สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท.
- [3] ชานี เกษมศรี, การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมด้วยน้ำมันดีเซล. 2557, สำนักงานทางหลวงที่ 4: กรมทางหลวง.
- [4] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วัสดุอีโพลิเมอร์. 2560, กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [5] วราภรณ์ ขจรไชยกมล, รายงานการศึกษาเชิงลึกประกอบการเสวนาหัวข้อ “การผลักดันการใช้ยางพาราในการสร้างและซ่อมถนน”, in โครงการพัฒนาระบบฐานข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา (Rubber Intelligence Unit). 2559, สถาบันพลาสติก และฝ่ายอุตสาหกรรม: ไบเทคฯ กรุงเทพฯ.
- [6] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว. 2545. มทข. (ท) 303-2545
- [7] ASTM D1632-17, *Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [8] ASTM D1635 / D1635M-12, *Standard Test Method for Flexural Strength of Soil-Cement Using Simple Beam with Third-Point Loading*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [9] Lay, M.G., *Ways of the World: A history of the World's Roads and of the Vehicles That Used Them*. 1st ed. 1992, New Brunswick: Rutgers University Press.
- [10] McAdam, J.L., *Remarks on the Present System of Road Making: With Observations, Deduced from Practice and Experience*. 8th ed. 1824, London.
- [11] วัชรินทร์ วิทย์กุล, การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนวิธีมาร์แชล. 2544, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



- [12] นราชัย ตันติวรวิทย์, ลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา กับที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม, in สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา 2546, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] California Department of Transportation (Caltrans) 2008a, *Maintenance Technical Advisory Guide (MTAG) Volume I - Flexible Pavement Preservation*. 2nd ed. 2008, California: California Department of Transportation.
- [14] วราภรณ์ ขจรไชยกูล, น้ำยางธรรมชาติ. ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน (*Natural rubber : Production and applications*). 2549, กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 37-46.
- [15] พงษ์ธร แซ่อู๋, ยางธรรมชาติ (*Natural rubber, NR*). ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. 2547, กรุงเทพฯ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 11-12.
- [16] วิชดา จันทร์ข้างแรม, โปर्टแลนด์ในน้ำยางพารา. วารสารวิจัย มข., 2556. 8(6).
- [17] Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Application*. 4th ed. 2015, Saint-Quentin: Institute Geopolymer.
- [18] Rangan, B.V., , Cpeng, F., & Fici H, *Fly ash-based geopolymer concrete*. International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete, 2010.
- [19] Davidovits, J., *Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materials*. Thermal Analysis, 1991(37).
- [20] ASTM C618-17a, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [21] ASTM C593-06(2011), *Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [22] ASTM D388-18, *Standard Classification of Coals by Rank*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [23] ปริญญา จินดาประเสริฐ, ถ้ำลอยในงานคอนกรีต(ฉบับปรับปรุง). 2548, กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

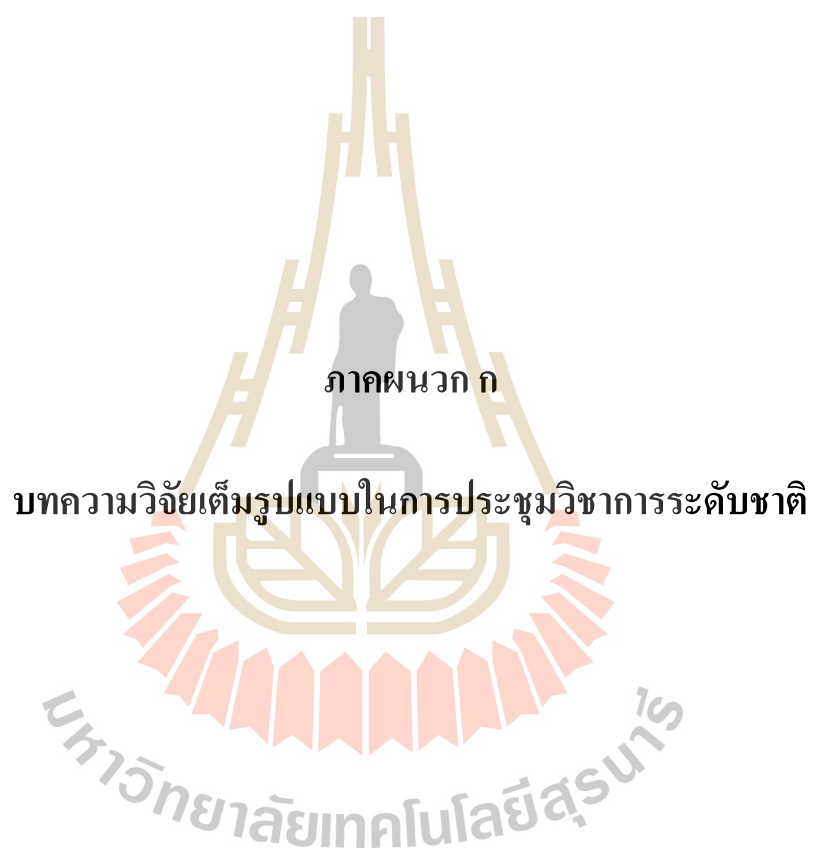


- [24] Inada, M., Tsujimoto, H., Eguchi, Y., Enomoto, N., & Hono, J, *Microwave-assisted zeolite synthesis from coal fly ash in hydrothermal process*. Fuel, 2005. **84**(1): p. 1482-1486.
- [25] ไพบุลย์ โทวีริยะเวช, การประยุกต์ใช้ *Addition Method* เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้อยโดยเทคนิค *X-ray Fluorescence Spectroscopy*. 2546. ฉบับที่ กวท 7/2546.
- [26] แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. 1st ed. 2534, กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- [27] สัมพันธ์ วงศ์นาวา, เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน. 2541, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์: สงขลา.
- [28] Lyon, D.J., *Specification for the Manufacture and Use of Rubberized Bituminous Road Materials and Binders*. Road Research Laboratory, 1967(3).
- [29] วิสุทธิ์ สุกรัตน์, การราดห้วยถนนด้วยแอสฟัลต์ผสมยางพารา. รายงานการประชุมวิชาการยางพารา, 2543. **2543**(2).
- [30] Palomo, A., Grutzeck, M.W., & Blanco, M.T, *Alkali activated fly ashes: a cement for the future*. Cement and Concrete Research, 2010. **29**.
- [31] สิทธิชัย สิริพันธ์, พิทักษ์ บุญนุ่น, กิจถาวร โลหะ และอนุรักษ์ กำเนิดวาด, การใช้ยางธรรมชาติเพื่องานพัฒนาคอนกรีต. 2548, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [32] Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P, *Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer*. Minerals Engineering, 2009. **22**(12): p. 1073-1078.
- [33] Cristelo, N., , Glendinning, S., Fernandes, L., & Pinto, A.T, *Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilization*. Acta Geotechnica, 2013. **8**(4).
- [34] ชยกฤต เพชรช่วย, การปรับปรุงดินเหนียวบนดินตะกอนผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย. 2553, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: นครราชสีมา.
- [35] Phummiphan, I., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Wattana, K., & Siridothong, S, *Strength Evaluation of Reclaimed Asphalt pavement (RAP) Stabilized by fly ash, Calcium Carbide Residue and slag geopolymer in pavement applications*. Geomate and Rural Road, 2016. **6**.
- [36] Hoy, M., Horpibulsuk, S., & Arulrajah, A, *Strength development of Recycled Asphalt Pavement – Fly ash geopolymer as a road construction material*. Construction and Building Materials, 2016(117).

- [37] Phummiphan, I., Horpibulsuk, S., Rachan, R., Arulrajah, A., Shen, S.L., & Chindaprasirt, P, *High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material*. Journal of Hazardous Materials, 2018(341).
- [38] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ. 2545. มทช. (ท) 501.8-2545
- [39] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดเหลว. 2545. มทช. (ท) 501.5-2545
- [40] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าขีดพลาสติก. 2545. มทช. (ท) 501.6-2545
- [41] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. วิธีการทดสอบหาความสึกหรอของวัสดุชนิดเม็ดหยาบโดยใช้เครื่องมือทดสอบหาความสึกหรอ LOS ANGELES ABRASION. 2545. มทช. (ท) 501.9-2545
- [42] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน. 2545. มทช. (ท) 501.2-2545
- [43] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา. วิธีการทดสอบเพื่อหาค่า ซี.บี.อาร์. 2545. มทช. (ท) 501.3-2545
- [44] Chindaprasirt, P., P. Paisitsrisawat, and U. Rattanasak, *Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fume alkali-activated composite*. Advanced Powder Technology, 2014. 25(3): p. 1087-1093.
- [45] Chindaprasirt, P., et al., *Controlling ettringite formation in FBC fly ash geopolymer concrete*. Cement and Concrete Composites, 2013. 41: p. 24-28.
- [46] Azmi, A., et al., *Effect Of Crumb Rubber On Compressive Strength Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Vol. 78. 2016. 01063.
- [47] Ismail, M., B. Muhammad, and N. Aiza Mohamad, *Durability Performance of Natural Rubber Latex Modified Concrete*. Vol. 21. 2009. 195-203.
- [48] Han, J.-W., J.-H. Jeon, and C.-G. Park, *Mechanical and Permeability Characteristics of Latex-Modified Pre-Packed Pavement Repair Concrete as a Function of the Rapid-Set Binder Content*. Materials, 2015. 8(10): p. 6728-6737.

- [49] Barluenga, G. and F. Hernández-Olivares, *SBR latex modified mortar rheology and mechanical behaviour*. Cement and Concrete Research, 2004. **34**(3): p. 527-535.
- [50] Hardjito, D., et al., *On The Development of Fly Ash-based Geopolymer Concrete*. 2018.
- [51] Somna, K., et al., *NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature*. Fuel, 2011. **90**(6): p. 2118-2124.
- [52] Yaowarat, T., et al., *Compressive and Flexural Strength of Polyvinyl Alcohol-Modified Pavement Concrete Using Recycled Concrete Aggregates*. Vol. 30. 2018. 04018046.
- [53] Guo, X., H. Shi, and W. Dick, *Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer*. Vol. 32. 2010. 142-147.





## รายชื่อบทความวิจัยเต็มรูปแบบในการประชุมวิชาการระดับชาติ

กฤษฎา กิจเจริญ, อธิกร ภูมิพันธ์, ชาญยุทธ กองเกิด และสุขสันต์ หอพิบูลสุข (2561). การศึกษากำลังและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมน้ำยางพาราและเส้นใยโพลีเมอร์สำหรับชั้นพื้นทาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23 (NCCE23). โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ.นครนายก. 18 – 20 กรกฎาคม 2561





## การศึกษากำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า ผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์สำหรับงานชั้นพื้นทาง

### The study on compressive strength and microstructure of reclaimed asphalt pavement (RAP) mixed fly ash geopolymer and natural rubber for base pavement

กฤษฎา กิจเจริญ<sup>1</sup> อธิกร กุมพันธ์<sup>2</sup> ชัยยุทธ กองเกิด<sup>3</sup> และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา  
<sup>2</sup> วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ แขวงทางหลวงชนบทสิงห์บุรี สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) กรมทางหลวงชนบท  
<sup>3</sup> นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา  
<sup>4</sup> คณาจารย์, สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

\*Corresponding author; E-mail address: ithikom95@gmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัด (Compressive Strength) และโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) ของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ และผสมด้วยน้ำยางพาราสด (Natural Rubber, NR) ที่อัตราส่วนต่างๆ ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า วัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ (RAP-FA Geopolymer) และวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์และน้ำยางพาราสด (RAP-NR-FA Geopolymer) สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline Activator, AA) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 8 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ผลผสมกันที่อัตราส่วน 50:50 เก็บกักตัวอย่างโดยบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน นำก้อนตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นทดสอบกำลังอัด และวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope จากผลการทดลองพบว่าทั้ง RAP-FA Geopolymer และ RAP-NR-FA Geopolymer ค่ากำลังอัดที่ 7 วันมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐานผิวทางที่กำหนดที่ 17.24 ksc การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคได้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพ

คำสำคัญ: แอสฟัลติกคอนกรีต, ยางพารา, เถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์, กำลังอัด, โครงสร้างทางจุลภาค

#### Abstract

This research aims to study on unconfined compressive strength (UCS) and microstructure of reclaimed asphalt pavement (RAP) stabilized with fly ash (FA) geopolymer and

mixed with natural rubber (NR) at various ratios. There were 3 types of material tested in basic engineering properties before stabilizing: RAP, RAP-FA geopolymer and RAP-NR-FA geopolymer. A liquid alkali activator is a mixture of sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) solution and 8 M sodium hydroxide (NaOH) solution at  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ : NaOH ratio of 50:50. The samples were compacted with modified compaction and cured at room temperature for 7, 14 and 28 days. The results showed that both RAP-FA Geopolymer and RAP-NR-FA Geopolymer had a 7-day UCS higher than base pavement strength requirement of 17.24 ksc. The microstructural analysis confirms the formation of geopolymerization gels in the stabilized materials.

Keywords: Asphalt Concrete, Natural Rubber, Fly ash Geopolymer, Compressive Strength, Microstructure

#### 1. บทนำ

จากปัญหาการขาดหรือเสียหายของถนน ทำให้ต้องมีการซ่อมแซมหรือปรับปรุงถนนให้สามารถกลับมาใช้งานได้ตามปกติ เพื่อป้องกันอันตรายและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ใช้ถนน แต่เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนวัสดุและแหล่งวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างถนนที่ได้มาตรฐานก็เหลือน้อยลง รวมทั้งปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมทำให้การหาแหล่งวัสดุใหม่เป็นไปด้วยความยากลำบาก ในแต่ละปีมีการซ่อมแซมถนนเป็นระยะทางหลายกิโลเมตรผิวทางเก่าจากการซ่อมแซมถนนจึงกลายเป็นขยะที่ไม่ได้ใช้งานอีกต่อไป ซึ่งมีปริมาณมากและคาดการณ์ว่าในอนาคตอาจมีปริมาณผิวทางเก่าสูงถึง 463,271 ตัน [1]

ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคในการนำแอสฟัลติกคอนกรีตเก่ากลับมาใช้ใหม่ (Asphalt Concrete Recycling) คือ การนำวัสดุผิว



ทางเก่ามาปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณภาพตามข้อกำหนด แล้วนำไปใช้งานใหม่โดยการเพิ่มวัสดุจำพวก หิน หวาย ทราย และเพิ่มวัสดุผสมอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพ เช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แอสฟัลต์หรือสารผสมอื่นๆ เป็นต้น วิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการซ่อมบำรุงทางด้วยวิธีการหมุนเวียนใช้วัสดุผิวทางเก่าเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นพื้นทางโดยการกัดโครงสร้างทางเดิมที่มีอยู่แล้วผสมกับปูนซีเมนต์ในสัดส่วนที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ประมาณ 1 ตัน [2] ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจกและทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

จากแนวคิดในการพัฒนาเทคโนโลยีในการนำผิวทางเก่ากลับมาใช้ใหม่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่มีการประกอบอาชีพอุตสาหกรรมเป็นหลัก ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมากมาย เช่น แก้วลอย แก้วแอลกอฮอล์ เป็นต้น แก้วลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินมีองค์ประกอบของซิลิกา ( $SiO_2$ ) และอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ซึ่งเป็นสารปอซโซลานที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลีเมอร์ (Geopolymer) ได้ ผลิตภัณฑ์จีโอโพลีเมอร์จากแก้วสามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงมีการประยุกต์ใช้แก้วจีโอโพลีเมอร์กับคอนกรีตเพื่อใช้ในการก่อสร้างถนน [3] และจากงานวิจัยของ Menglim [4] ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุของวัสดุผิวทางเก่า (RAP) สำหรับงานโครงสร้างถนนโดยการผสมแก้วลอยชนิด C และใช้สารละลาย  $NaOH/Na_2SiO_3$  เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลน์ ตัวอย่างทดสอบ คือ RAP-FA Geopolymer และ RAP-FA Blend (ใช้น้ำเป็นตัว Control) ผลการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดในช่วง 7 วันแรกที่จุด OWC เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย ทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้องและ 40 องศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของตัวอย่างทดสอบ RAP-FA Geopolymer และ RAP-FA Blend พบว่า RAP มีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมสูง และแก้วลอยมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาสูงจึงมีผลิตภัณฑ์จีโอโพลีเมอร์เกิดขึ้นตลอดเวลา ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Ithikorn [5] ที่ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุของวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแก้วลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกั่วเหล็กจีโอโพลีเมอร์สำหรับการนำไปใช้ในทางพื้น จากผลการทดลองพบว่าการใช้ตะกั่วเหล็กจีโอโพลีเมอร์รวมกับการใช้แก้วลอยร้อยละ 5 ผลตะกั่วเหล็กร้อยละ 5 ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีค่ากำลังอัดที่ 7 วันเป็นไปตามข้อกำหนดขั้นต่ำสุด (มากกว่า 1.724 เมกะปาสคาล) ซึ่งค่ากำลังอัดสูงสุดของตะกั่วเหล็กจีโอโพลีเมอร์ (RAP+10%Slag geopolymer) อยู่ที่ 5.73 เมกะปาสคาล เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและแคลเซียมของตะกั่วเหล็กและสารกระตุ้นอัลคาไลน์ได้เป็นผลิตภัณฑ์ C-A-S-H ดังนั้นผลิตภัณฑ์ จีโอโพลีเมอร์จะเกิดขึ้นและอยู่ร่วมกับเจล C-A-S-H เมื่อผสมแก้วลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกั่วเหล็ก โดยใช้ตะกั่วเหล็กเป็นสารตั้งต้น

นอกจากนี้ในสภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบัน ทำให้ราคายางพารา (Para Rubber Latex) มีราคาตกต่ำลงอย่างมากและที่ผ่านมาได้มีการนำยางพาราไปประยุกต์ใช้อุตสาหกรรมมากมาย รวมถึงการนำ

ยางพาราไปผสมกับยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (Asphalt) ซึ่งส่วนผสมของยางพาราไม่ได้มีการศึกษาและทดลองใช้ในพื้นที่ชุมชนและมีการรับรองสูตรโดยกรมทางหลวงแล้วแต่ถนนที่มีส่วนผสมของยางพารายังไม่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากต้นทุนการก่อสร้างสูงกว่าการสร้างถนนแบบปกติประมาณร้อยละ 20 - 30 [6] นอกจากนี้วิสุทธิ [7] ได้รายงานว่าสถาบันวิจัยยางอินเดียได้ทดลองการใช้อย่างธรรมชาติผสมแอสฟัลต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ราคถนนเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตรเปรียบเทียบกับถนนราคาแอสฟัลต์ธรรมดา พบว่าถนนราคาแอสฟัลต์ต้องซ่อมผิวถนนใหม่ครั้งแรกในอีก 5 ปีต่อมาและซ่อมครั้งที่ 2 ในปีที่ 10 ในขณะที่ถนนที่ราคาด้วยแอสฟัลต์ผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ยังมีสภาพดีจนถึงปีที่ 14 นอกจากนี้ยังได้มีการขยายผลการใช้งานไปทั่วประเทศ สรุปได้ว่าการผสมยางธรรมชาติสามารถยืดอายุถนนได้อย่างน้อยร้อยละ 50 โดยค่าใช้จ่ายในการราดผิวถนนเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เมื่อผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 2 กับแอสฟัลต์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาดังแนวทางในการนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมน้ำยางพาราและแก้วลอยจีโอโพลีเมอร์ โดยนำไปใช้กับงานชั้นพื้นทาง เพื่อให้ได้ถนนที่มีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้นและผ่านข้อกำหนดมาตรฐานของกรมทางหลวง รวมทั้งยังเป็นอีกทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าและส่งเสริมการใช้อย่างพาราในประเทศไทยให้มีมากขึ้นอีกด้วย

## 2. วัสดุและวิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

วัสดุผิวทางเก่าที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากถนนหลวงหมายเลข 331 ตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี เป็นวัสดุผิวทางเก่าที่ได้จากการขุดหรือผิวทางถนนเพื่อการซ่อมแซม (รูปที่ 1 ภาพถ่ายของวัสดุผิวทางเก่า) การทดสอบขนาดคละ ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.8-2545 ดังแสดงในรูปที่ 2 และวัสดุผิวทางเก่าจัดเป็นวัสดุเกรด ก. การทดสอบ Modified Proctor Compaction ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.2-2545 และทดสอบ Optimum Moisture Content (OMC) ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.1-2545 มีค่า Maximum Dry Unit Weight ( $Y_{d, max}$ ) 20.72  $kN/m^3$  และค่า OMC ร้อยละ 7.52 ตามลำดับ การทดสอบค่า California Bearing Ratio (CBR) ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.3-2545 เท่ากับร้อยละ 38.00 และมีค่าการบวมน้ำร้อยละ 0.39 การทดสอบ Atterberg's Limit (ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 501.5-2545 และ มทข.(ท) 501.6-2545) พบว่าไม่มีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, LL) และค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, PL) จากการทดสอบดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าวัสดุผิวทางเก่ายังสามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับงานชั้นพื้นทางได้ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

### 2.2 แก้วลอย (Fly Ash, FA)

แก้วลอยที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพี ของบริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด ตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยที่ได้จากการทดสอบ

ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ประกอบด้วย SiO<sub>2</sub> ร้อยละ 61.98, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 29.29, CaO ร้อยละ 1.81, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 3.37 และ SO<sub>3</sub> ร้อยละ 1.18 ตามมาตรฐาน ASTM C618 สามารถจัดจำแนกเป็นเถ้าลอยชนิด F โดยมีปริมาณรวมของ SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มากกว่าร้อยละ 50 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 ขนาดคลของ เถ้าลอยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Laser Particle Size ดังแสดงในรูปที่ 2 ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่ามีอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 วัสดุผิวทางเก่า

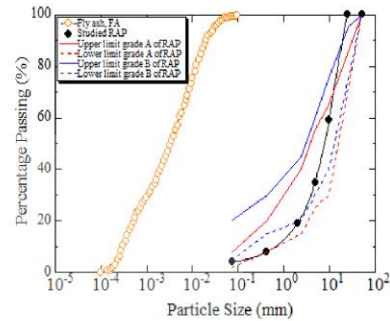
ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเก่า

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	RAP	คุณสมบัติมาตรฐานตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง	
		ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นพื้นทาง
Gradation	n	-	-
Liquid Limit, LL (%)	NP*	< 35	< 25
Plastic Index, PI (%)	NP*	< 11	< 6
Optimum Moisture Content, OMC (%)	7.52	-	-
Maximum Dry Unit Weight, Y <sub>d, max</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	20.72	-	-
California Baring Ratio, CBR at 95% of P <sub>d, max</sub> (%)	38.00	> 25	> 80
Swelling (%)	0.39	-	-
Los Angeles abrasion (%)	38.09	< 60	< 40

\*NP = Non Plastic

2.3 น้ยางพารา (Natural Rubber, NR)

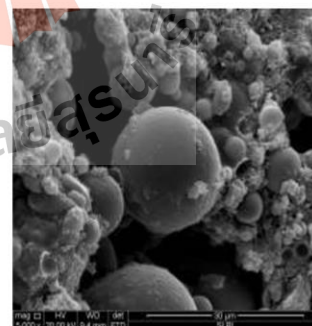
น้ยางพาราที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ยางพาราชนิด DRC30 ที่ผสมสารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยให้น้ยางพาราผสมกับวัสดุได้ดีขึ้น



รูปที่ 2 ขนาดคลของวัสดุผิวทางเก่าและเถ้าลอย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย (FA)
SiO <sub>2</sub>	61.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.37
CaO	1.81
SO <sub>3</sub>	1.18
TiO <sub>2</sub>	1.30
K <sub>2</sub> O	0.84



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย

2.4 สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline Activator, AA)

สารกระตุ้นอัลคาไลน์เหลวเตรียมได้จากส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) กับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ไซต์ (NaOH) ความเข้มข้น 8 โมลาร์ อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$  ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 50:50 สารละลายโซเดียมซิลิเกตประกอบด้วย  $\text{Na}_2\text{O}$  ร้อยละ 14.50,  $\text{SiO}_2$  ร้อยละ 31.50 และ  $\text{H}_2\text{O}$  ร้อยละ 54 โดยน้ำหนัก มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.575

2.5 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่าง RAP-FA Geopolymer ประกอบด้วย RAP, FA และ AA ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ ) และ RAP-NR-FA Geopolymer ประกอบด้วย RAP, FA, NR และ AA ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ ) อัตราส่วนของ AA เท่ากับ 50:50 โดยที่อัตราส่วนของ FA เท่ากับร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของ RAP ส่วนผสมจะถูกเตรียมโดยการนำ RAP มาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 นิ้ว ผสม RAP กับ FA เข้าด้วยกัน จากนั้นเติม AA ลงในส่วนผสมแล้วคลุกเคล้าให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาที นำส่วนผสมไปขึ้นรูปโดยการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor) ด้วยแม่พิมพ์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร สูง 116.3 มิลลิเมตร โดยตัวอย่าง RAP-FA Geopolymer และ RAP-NR-FA Geopolymer จะถูกเตรียมที่จุด OMC ก่อนตัวอย่างที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วจะถูกแกะออกจากแม่พิมพ์แล้วห่อหุ้มด้วยพลาสติกใส นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง (28-30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 7, 14 และ 28 วัน

2.6 การทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบกำลังอัด (Unconfined Compressive Strength, UCS) นำก้อนตัวอย่างที่ครบอายุบ่มแล้วออกจากพลาสติกใส แช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วผึ่งด้วยอากาศอีก 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาทดสอบ UCS ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 303-2545 เทียบเท่ามาตรฐาน AASHTO T.207 และ T.208

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค นำชิ้นส่วนของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบกำลังอัด มาผ่านกระบวนการ Freeze Dry ด้วยไนโตรเจนเหลว แล้วนำชิ้นส่วนมาทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 - 4 มิลลิเมตร ก้อนตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้งบนแท่นติดตั้งตัวอย่าง หลังจากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำบริสุทธิ์ แล้วนำมาถ่ายภาพด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope

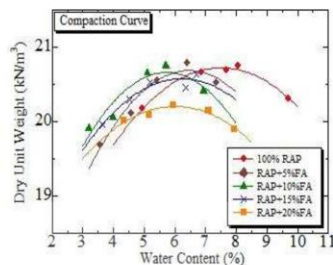
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 การทดสอบการบดอัด

ความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักแห้งและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของตัวอย่างวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า (RAP) และเถ้าลอย (FA) ประกอบด้วยวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอย (RAP+FA) ที่ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุผิวทางเก่า

หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของตัวอย่าง คือ 20.72, 20.68, 20.66, 20.57 และ 20.20  $\text{kN/m}^3$  ตามลำดับ และปริมาณความชื้นที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 7.52, 6.46, 5.73, 5.80 และ 5.99 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดลดลงเมื่อปริมาณของเถ้าลอย (FA) ในส่วนผสมเพิ่มขึ้นและค่าความชื้นเหมาะสมจะลดลงเมื่อปริมาณของ

เถ้าลอย (FA) ในส่วนผสมเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยที่ร้อยละ 15 และ 20 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3



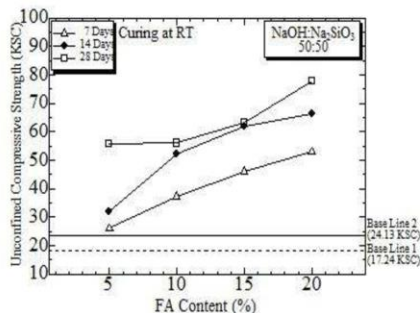
รูปที่ 4 การบดอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอย

ตารางที่ 3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอย

Sample	Optimum Moisture Content , OMC (%)	Dry Unit Weight $\gamma_d$ , max ( $\text{kN/m}^3$ )
100%+RAP	7.52	20.72
RAP+5%FA	6.46	20.68
RAP+10%FA	5.73	20.66
RAP+15%FA	5.80	20.57
RAP+20%FA	5.99	20.20

3.2 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่าง RAP-FA Geopolymer ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 จากรูปที่ 5 พบว่ากำลังอัดของ RAP-FA Geopolymer จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและให้กำลังอัดสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) สำหรับทุกอัตราส่วนทดสอบ และยังสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc)

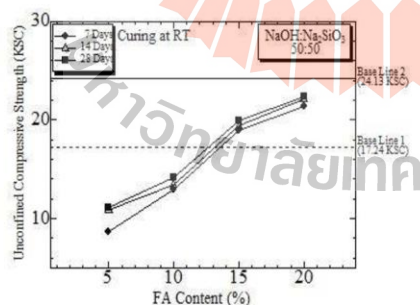


รูปที่ 5 กำลังอัดของ RAP-FA Geopolymer



เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการควบคุมและเป็นข้อกำหนดตามมาตรฐานด้านงานทางของกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง พบว่ากำลังอัดของตัวอย่างที่ปริมาณ เถ้าลอยร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 มีค่า 25.98, 47.0, 59.93 และ 62.03 ksc และเป็นค่ากำลังอัดที่สูงกว่ากำลังอัดที่กำหนดไว้มาก และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ หลังจากอายุบ่ม 14 วันไปแล้ว ตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 5 และ 20 มีการพัฒนาค่ากำลังอัดอย่างต่อเนื่องและตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 5 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีกำลังอัดใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 15 ที่อายุบ่ม 14 และ 28 วัน กล่าวคือตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 15 หลังอายุบ่ม 14 วัน มีการพัฒนาค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อพิจารณา RAP-FA Geopolymer ทั้ง 4 อัตราส่วน (เถ้าลอยร้อยละ 5, 10, 15 และ 20) ตัวอย่างที่ให้กำลังอัดสูงสุดคือตัวอย่าง RAP-FA Geopolymer ที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20

รูปที่ 6 กำลังอัดของ RAP-NR-FA Geopolymer จะมีค่าเพิ่มเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและให้กำลังอัดสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) ที่ปริมาณการเพิ่มเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 20 และยิ่งต่ำกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc) สำหรับทุกอัตราส่วนทดสอบ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่าง RAP-NR-FA Geopolymer ที่ทุกอัตราส่วนทดสอบมีการพัฒนาค่ากำลังอัดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งกำลังอัดของตัวอย่าง RAP-NR-FA Geopolymer มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 20 ที่อายุบ่ม 7 ถึง 28 วัน มีค่า 19.82 และ 22.11 ksc ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่สูงกว่ากำลังอัดสำหรับปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) แต่หลังจากอายุบ่ม 14 วันไปแล้ว กำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และกำลังอัดของ RAP-NR-FA Geopolymer ที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5 และ 10 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่ามีค่าต่ำกว่า 17.24 ksc และกำลังอัดยังคงต่ำกว่า 24.13 ksc ทุกอัตราส่วนทดสอบ

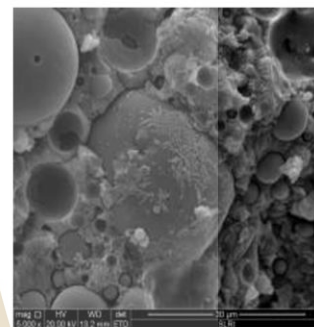


รูปที่ 6 กำลังอัดของ RAP-NR-FA Geopolymer

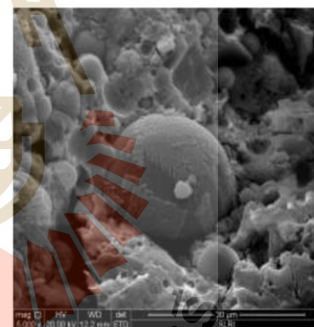
### 3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างทางจุลภาคของ RAP-FA Geopolymer บ่มที่อุณหภูมิห้องเพื่อเป็นการจำลองสภาพการก่อสร้างหรือใช้งานจริง รูปที่ 7(ก) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงให้เห็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ที่ก่อตัวบนผิวของเถ้าลอย เมื่อพิจารณาที่รูป 7(ข) และ 7(ค) ที่อายุบ่ม 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคมีการ

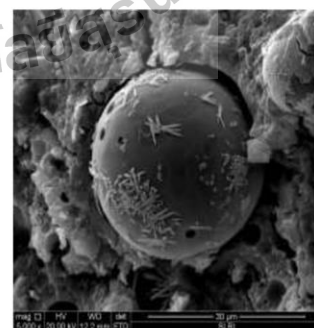
เปลี่ยนแปลงเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นที่ผิวเถ้าลอยอย่างชัดเจน และอนุภาคของเถ้าลอยมีรูพรุนจากการระเหยของ NaOH จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 14 และ 28 วันนี้ยังอยู่ในขั้นตอนของการระเหยซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) จากบริเวณผิวของอนุภาคเถ้าลอย ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างมีปริมาณของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  สูงจึงมีปริมาณของผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นมาก ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน [8] ส่งผลให้กำลังอัดในช่วง 7 วันแรกมีค่าสูงและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Menglim [4]



(ก.)



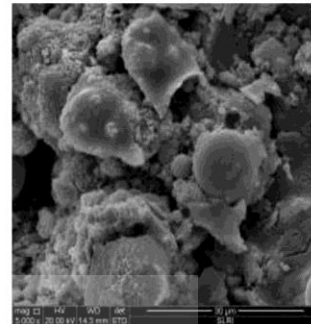
(ข.)



(ค.)

รูปที่ 7 โครงสร้างทางจุลภาคของ RAP-FA Geopolymer ที่อายุบ่ม ก. 7 วัน ข. 14 วัน และ ค. 28 วัน

โครงสร้างทางจุลภาคของ RAP-NR-FA Geopolymer รูปที่ 8(ก) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน แสดงให้เห็นผลึกภัณฑ์โอโพลีเมอร์ที่เริ่มก่อตัวขึ้นบนผิวของเถ้าลอย เมื่อพิจารณาที่รูป 8(ข) และ 8(ค) ที่อายุบ่ม 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย บนพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอยมีผลึกภัณฑ์ขึ้นแต่สังเกตเห็นได้ยากและพบอนุภาคเถ้าลอยจำนวนมากที่ไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นบริเวณพื้นผิว เนื่องจากมีผลึกภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายฟิล์มสีขาวปกคลุมพื้นผิวเถ้าลอย ดังนั้นจึงเกิดการชะของ NaOH ได้ยาก ทำให้ตัวอย่างโอโพลีเมอร์ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน มีปริมาณซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ที่จะใช้ในกระบวนการเกิดจีโอโพลีเมอร์ไรเซชันมีปริมาณน้อย ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างมีปริมาณของ NaOH และ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่ำลง จึงมีสารเชื่อมประสานเกิดขึ้นน้อย และเนื่องจากมีการผสมน้ำยางพาราเข้าไปเพิ่มจึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ใส่น้ำยางพารา มาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของสิทธิชัย และคณะ [9] การผสมน้ำยางพาราในคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 60



(ก.)

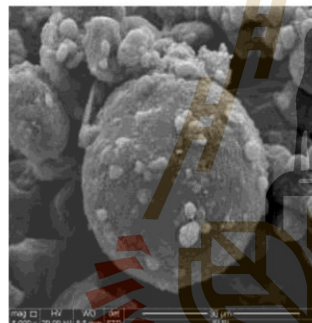
รูปที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาคของ RAP-NR-FA Geopolymer ที่อายุบ่ม ก. 7 วัน ข. 14 วัน และ ค. 28 วัน

#### 4. สรุปผลการทดลอง

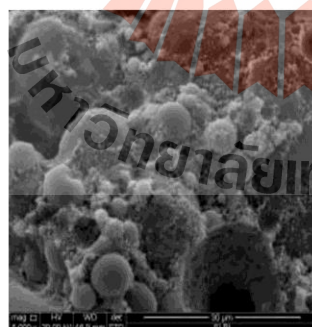
จากผลการศึกษาการนำวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลีเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง กำลังอัดของ RAP-FA Geopolymer พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น มีการพัฒนากำลังอัดจากอายุบ่ม 7 ถึง 28 วัน และที่อายุบ่ม 7 วัน ทุกอัตราส่วนทดสอบให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 17.24 ksc สำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้และที่ปริมาณการเพิ่มเถ้าลอยร้อยละ 5 และ 20 ให้การพัฒนากำลังอัดที่สูงสุดและยังสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc) ซึ่งเกิดจากการชะซิลิกาและอลูมินาจากอนุภาคเถ้าลอยและเกิดผลึกภัณฑ์จากปฏิกิริyajีโอโพลีเมอร์ไรเซชันขึ้นมา

กำลังอัดของ RAP-NR-FA Geopolymer พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ไม่มีการพัฒนากำลังอัดที่ดีเช่นเดียวกับ RAP-FA Geopolymer เนื่องจากการใส่น้ำยางพาราจะทำให้สัดส่วนของสารกระตุ้นอัลคาไลน์ลดลง ไม่เพียงพอต่อการชะซิลิกาและอลูมินาเพื่อเกิดผลึกภัณฑ์จากปฏิกิริyajีโอโพลีเมอร์ไรเซชันได้อย่างเพียงพอ จึงเป็นผลทำให้กำลังอัดลดลงอย่างมาก ตัวอย่าง RAP-NR-FA Geopolymer มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 20 ที่อายุบ่ม 7 ถึง 28 วัน มีค่า 19.82 และ 22.11 ksc ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่สูงกว่ากำลังอัดสำหรับปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc)

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์ มีประโยชน์เพื่อให้เห็นลักษณะความแตกต่างตามระยะเวลาการบ่มของตัวอย่างจีโอโพลีเมอร์ ตัวอย่าง RAP-FA Geopolymer โครงสร้างทางจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงเกิดผลึกภัณฑ์ขึ้นที่ผิวเถ้าลอยอย่างชัดเจน ซึ่งทำให้เห็นขั้นตอนและกระบวนการเกิดปฏิกิริyajีโอโพลีเมอร์ไรเซชันหรือการเกิดผลึกภัณฑ์จีโอโพลีเมอร์ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนา กำลังอัดของตัวอย่าง



(ข.)



(ค.)

### ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้ยังอยู่ในช่วงของการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) เพื่อหาข้อมูลมาสนับสนุนการใช้น้ำยางพาราในงานวิจัยนี้ ซึ่งการทดสอบกำลังรับแรงดัดจะเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้างานวิจัยนี้ต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท. (2560). *โครงสร้างทางหลวงชนบท สำหรับปีงบประมาณ 2561*. กระทรวงคมนาคม
- [2] Malhotra VM. (2002). Introduction: Sustainable development and concrete technology. *ACI Concrete International*, 24, 7-22
- [3] อุบลลักษณะ รัตน์ศักดิ์. (2560). *วัสดุซีโอไฟลิเมอร์*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย
- [4] Hoy, M., Horpibulsuk, S. and Arulrajah A. (2016). Strength development of Recycled Asphalt Pavement – Fly ash geopolymer as a road construction material, *Construction and Building Materials*, vol.117, pp. 209-219.
- [5] Phummiphon I., Hoy M., Horpibulsuk S., Arulrajah A., Wattana K. and Siridothong S., (2016). Strength Evaluation of Reclaimed Asphalt pavement (RAP) Stabilized by fly ash, Calcium Carbide Residue and slag geopolymer in pavement applications. *Geomate and Rural Road*. Bangkok.
- [6] วราภรณ์ ขจรไชยกมล. (2559). *รายงานการศึกษาเชิงลึกประกอบการเสวนาหัวข้อ "การผลักดันการใช้น้ำยางพาราในการสร้างและซ่อมถนน". สถาบันพลาสติกและฝ่ายอุตสาหกรรม. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย*
- [7] วิสุทธิ์ ศุภรัตน์. (2543). การราดหัวถนนด้วยแอสฟัลต์ผสมยางพารา. *รายงานการประชุมวิชาการยางพารา ประจำปี 2543 ครั้งที่ 2*, สถาบันวิจัยยาง, หน้า 37-45.
- [8] Fernandez-Jimenez A, Palomo M, Criado M. (2005). *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model*. Eduardo Torroja Institute (CSIC), 28080 Madrid, Spain. *Cement and Concrete Research* 35, pp. 1204-1209
- [9] สิทธิชัย ศิริพันธ์, พิทักษ์ บุญนุ่น, กิจฉาวร โลหะ และ อนุรักษ์ กำเนิดว่า (2548). "การใช้อย่างธรรมชาติเพื่องานพัฒนาคอนกรีต. *เอกสารการประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10*, ชลบุรี, หน้า MAT-205 - MAT-210.



## ประวัติผู้เขียน

นายกฤษฎา กิจเจริญ เกิดเมื่อวันอังคารที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2534 ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 207/6 หมู่ 8 ต.สามพราน อ.สามพราน จ.นครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จาก ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ในปี พ.ศ. 2557 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่ บริษัท ฟู้ดสตาร์ จำกัด ในตำแหน่งหัวหน้าฝ่ายผลิต และต่อมาในปี พ.ศ. 2558 ได้เปลี่ยนมา ประกอบอาชีพธุรกิจส่วนตัวของครอบครัว ซึ่งเป็นธุรกิจรับเหมาก่อสร้างและจัดจำหน่ายหินอ่อน และหินแกรนิต ทำให้เกิดแรงจูงใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโททางด้านบริหารงานก่อสร้าง เพื่อเป็นการเสริมสร้าง พัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาโทในหลักสูตรการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จ.นครราชสีมา ในปี พ.ศ. 2559 จากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจ ทางด้านการปรับปรุงคุณภาพของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตแก้ด้วยน้ำยางพาราปรับสภาพ แอ็ลลอย จีโอโพลิเมอร์ และซีเมนต์เป็นอย่างดี

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความวิจัยเข้าร่วมในการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 23 ประจำปี พ.ศ. 2561 เรื่องการศึกษากำลังอัดและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทาง แอ็ลลอยจีโอโพลิเมอร์แก้ผสมน้ำยางพาราและแอ็ลลอยจีโอโพลิเมอร์สำหรับงานชั้นพื้นทาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี