

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าและเถ้าลอย

4.1.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า

รูปที่ 4.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ที่ใช้ในการวิจัยเป็นวัสดุผิวทางเก่าที่เก็บมาจากถนนทางหลวงหมายเลข 331 เขต ตำบลบ่อวิน อำเภอสรีราชา จังหวัดชลบุรี ซึ่งเป็นวัสดุผิวทางเก่าที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเก่าดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเป็นวัสดุเกรด ก. จากการทดสอบ 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

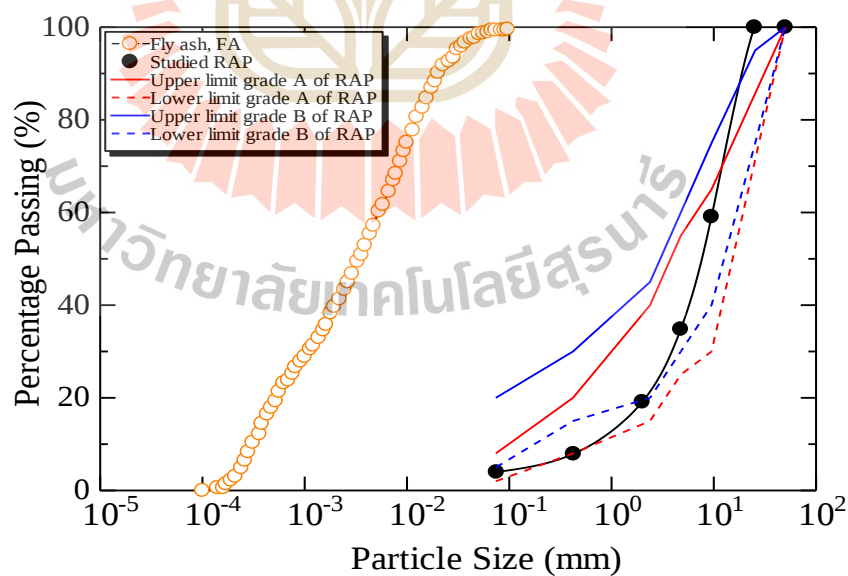


รูปที่ 4.1 วัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่า

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 ³)	20.72	-	-
California Baring Ratio, CBR at 95% of p_d , max (%)	38.00	> 25	> 80
Swelling (%)	0.39	-	-
Los Angeles abrasion (%)	38.09	< 60	< 40

*NP = Non Plastic



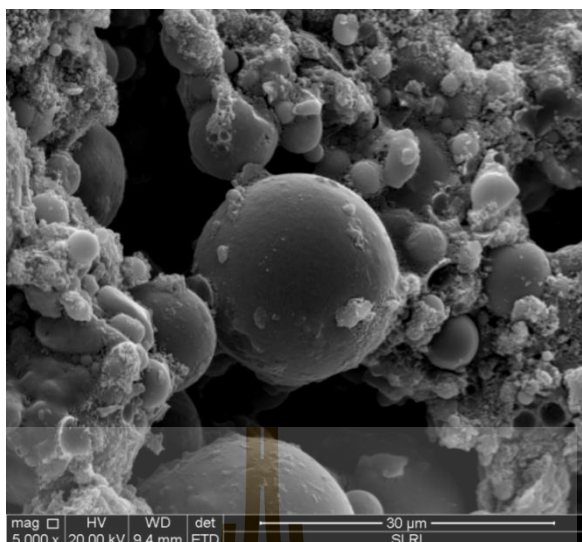
รูปที่ 4.2 ขนาดกะของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าและถั่วลย

4.1.2 เถ้าลอย

เถ้าลอย (Fly ash, FA) ที่ใช้ในการศึกษา ได้มาจากโรงไฟฟ้าบีแอลซีพีของบริษัท บีแอลซีพี เพาเวอร์ จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง มีองค์ประกอบทางเคมีที่ได้มาจากการทดสอบด้วยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) คือ SiO_2 ร้อยละ 61.98, Al_2O_3 ร้อยละ 29.29, CaO ร้อยละ 1.81, Fe_2O_3 ร้อยละ 3.37 และ 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

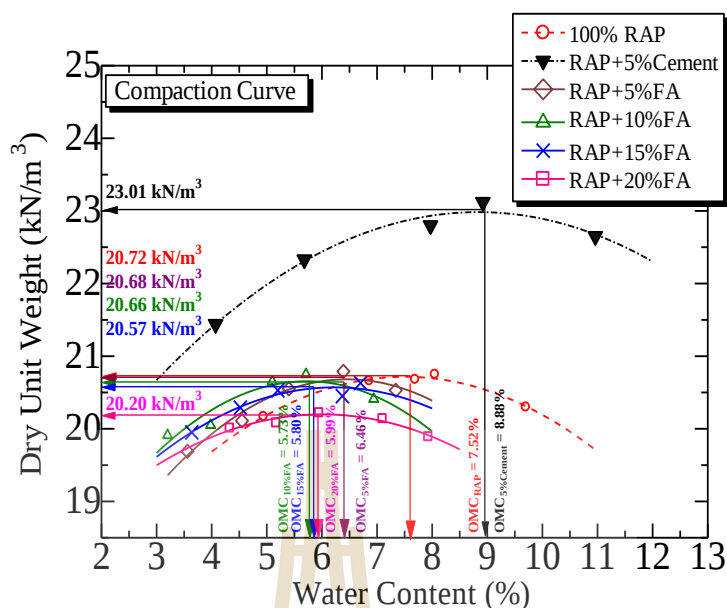
องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย (FA)
SiO_2	61.98
Al_2O_3	29.29
Fe_2O_3	3.37
CaO	1.81
SO_3	1.18
TiO_2	1.30
K_2O	0.84



รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย (FA)

4.2 การบดอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

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^3 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 ³)
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

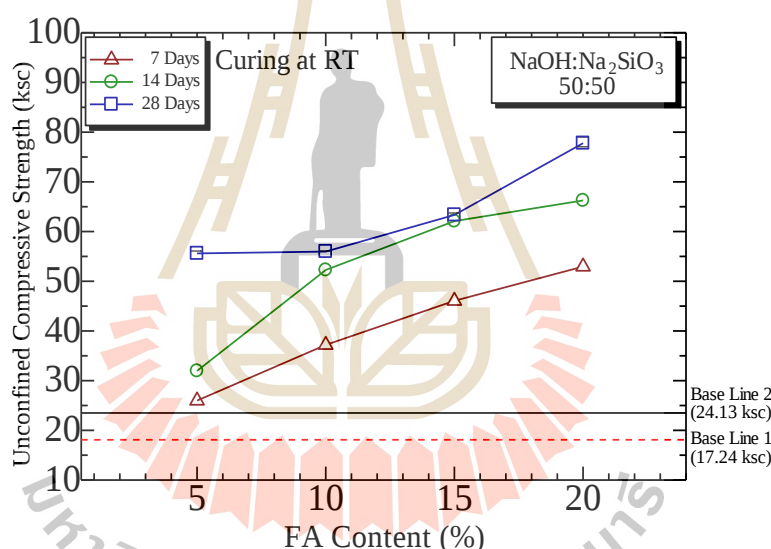
4.3 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

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 : Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 จากรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณเถ้าลอยมีอิทธิพลต่อการ

พัฒนากำลังอัดของตัวอย่าง โดยกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น จากกราฟจะสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดทุกช่วงอายุบ่ม รองลงมาคือปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 15, 10 และ 5 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5 ให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด นอกจากนี้การพัฒนากำลังอัดจะเกิดขึ้นได้ดีในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 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)



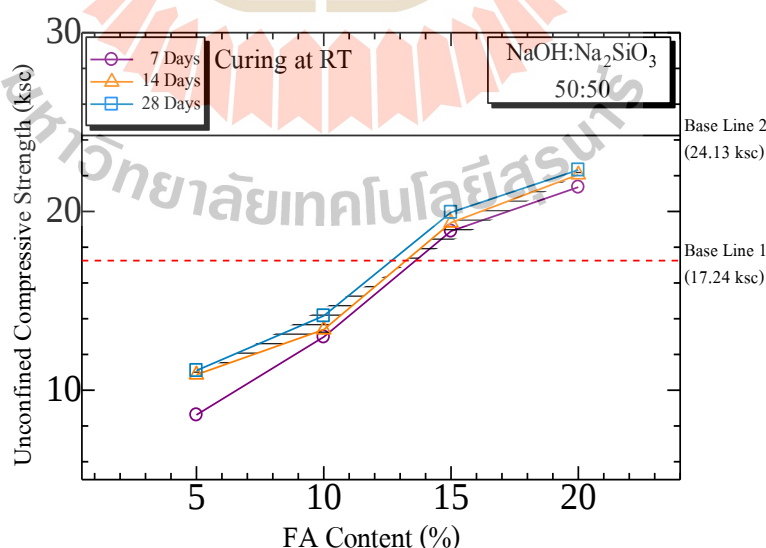
รูปที่ 4.5 กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

เมื่อวิเคราะห์กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ทั้ง 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]

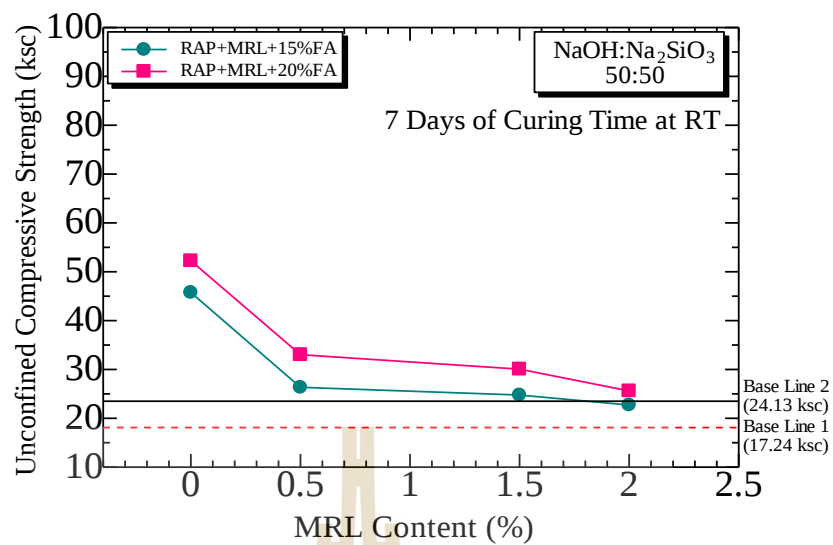
4.3.2 กำลังอัดแกนเดียวของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์

รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์ โดยที่มีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ตัวอย่างจิโอะโพลิเมอร์จะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน โดยตัวอย่างมีอัตราส่วนของ $\text{NaOH} : \text{Na}_2\text{SiO}_3$ 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

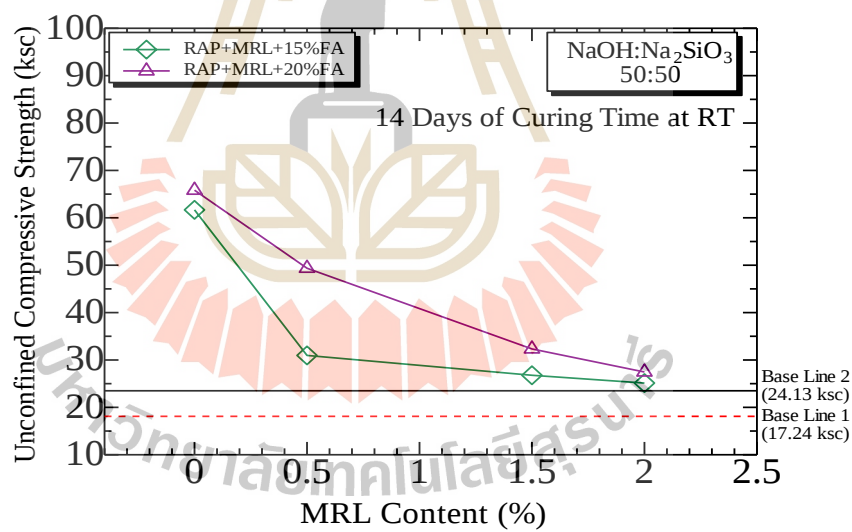
เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการควบคุมและ เป็นข้อกำหนดตามมาตรฐานด้านงานทางของกรมทางหลวงชนบทและกรมทางหลวง พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างที่มีส่วนผสมของน้ำยางพาราและปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 19.82 และ 22.11 ksc ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่สูงกว่ากำลังอัดสำหรับปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้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



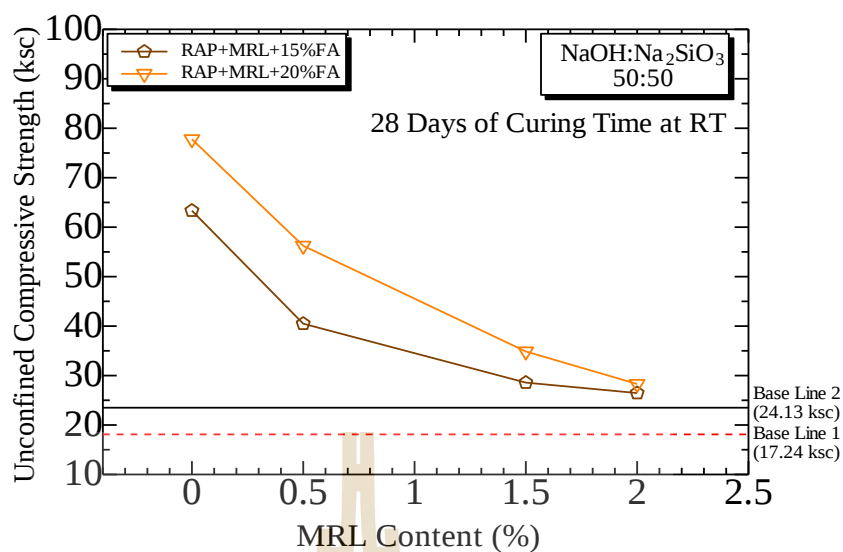
รูปที่ 4.6 กำลังอัดแกนเดียวของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจิโอะโพลิเมอร์



(n)



(u)



(ค)

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

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังดัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราที่ 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 : Na₂SiO₃ เท่ากับ 50:50 จากรูปที่ 4.7 พบว่าการเพิ่ม ปริมาณน้ำยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังดัดของตัวอย่าง โดยกำลังดัดจะ มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น [46] รูปที่ 4.7 ก) กำลังดัดสูงสุดของตัวอย่างที่อายุ บ่ม 7 วัน พบที่ตัวอย่างผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 45.76 และ 52.25 ksc ตามลำดับ ในขณะที่กำลังดัดต่ำสุดของตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน พบที่ตัวอย่าง ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 2 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 22.72 และ 25.60 ksc ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 0 ให้ค่ากำลังดัดสูงสุดทุกช่วงอายุ บ่ม รองลงมาคือปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 0.5 และมีการพัฒนากำลังดัดที่ค่อนข้างดี โดยที่ ปริมาณน้ำยางพาราร้อยละ 2 ให้ค่ากำลังดัดต่ำสุด และไม่มีการพัฒนากำลังดัดในทุกช่วงอายุการบ่ม

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

40.48 และ 56.24 ksc สำหรับปริมาณเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 20 ตามลำดับ มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้นเกี่ยวกับตัวอย่างที่ผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0

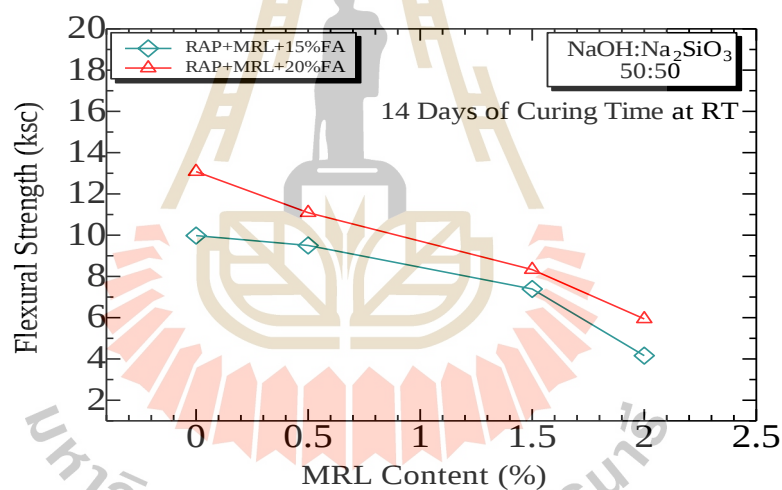
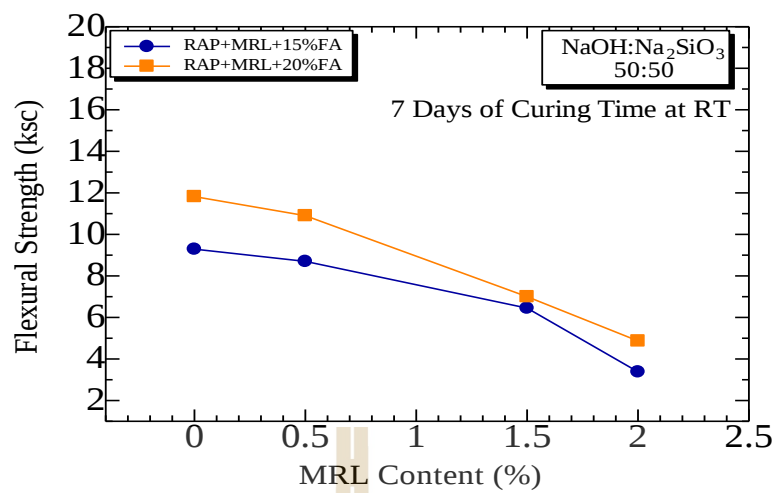
อย่างไรก็ตาม การผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อปริมาณน้ำยางพาราเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง [47] เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณที่อัตราส่วนเถ้าลอยเดียวกัน และกำลังอัดของตัวอย่างยังคงสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) และยังสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc)

4.4 กำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

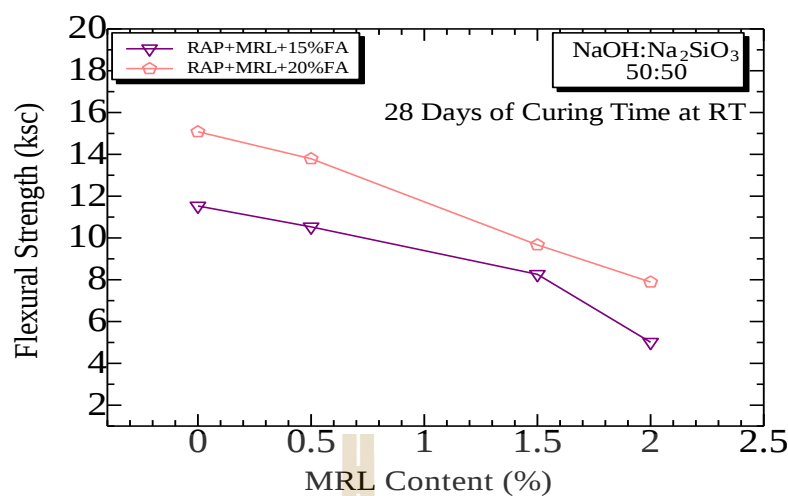
4.4.1 กำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

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 เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมามากเกินไปน้ำยางพาราจึงไม่สามารถเชื่อมประสานอย่างทั่วถึงในส่วนผสม และการเพิ่มปริมาณของน้ำยางพาราในส่วนผสมที่จุด OMC ไปลดปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์ที่เถ้าลอยจำเป็นต้องใช้ในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังอัดและกำลังรับแรงดัดลดลง [49]



(g)

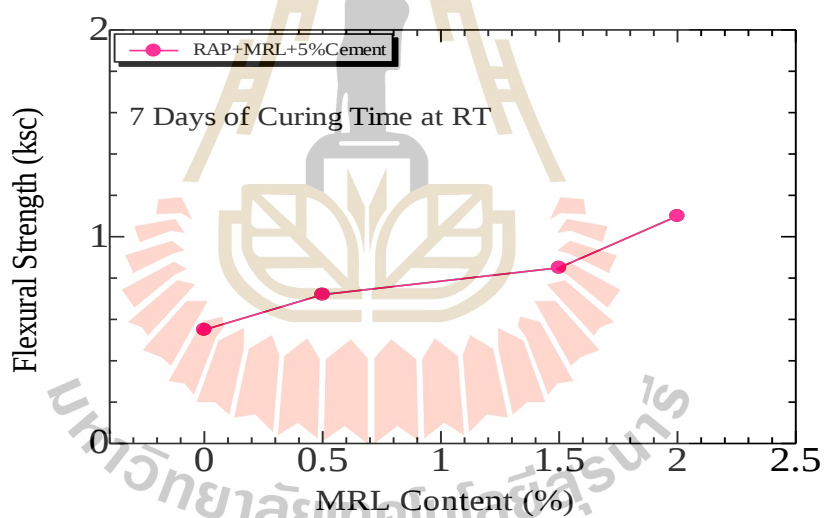
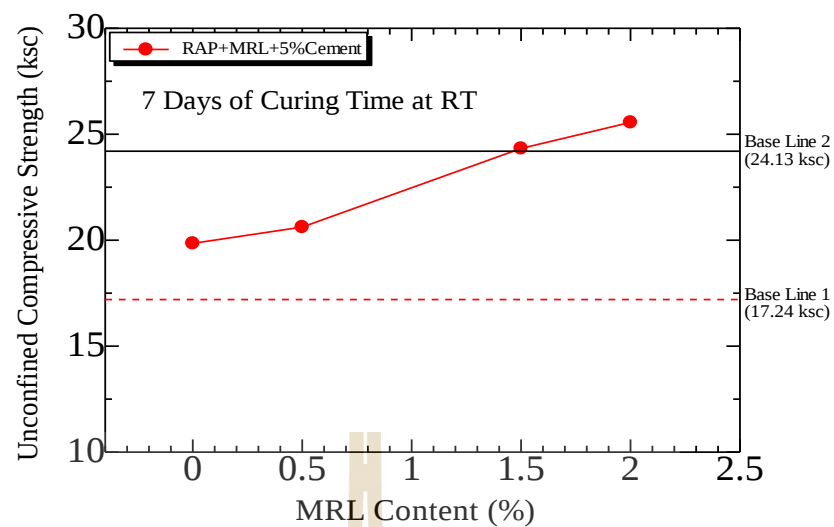


(ก)

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

4.5 กำลังอัดแกนเดียว และกำลังรับแรงคดของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบกำลังอัด และกำลังรับแรงคดของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2 และปูนซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยตัวอย่างจะถูกบ่มที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 28 – 30 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำยางพาราที่อัตราส่วนต่างๆ มีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดและกำลังรับแรงคดของตัวอย่าง โดยกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงคดของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าน้ำยางพารานั้นมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดและกำลังรับแรงคด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคยางในน้ำยางพาราสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์สามารถยึดเกาะกับวัสดุผิวทางเก่าได้ดี เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีเกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนาแน่นมากขึ้น [53] จึงทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังอัดและกำลังรับแรงคดเพิ่มขึ้น



(ข)

รูปที่ 4.9 กำลังอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์

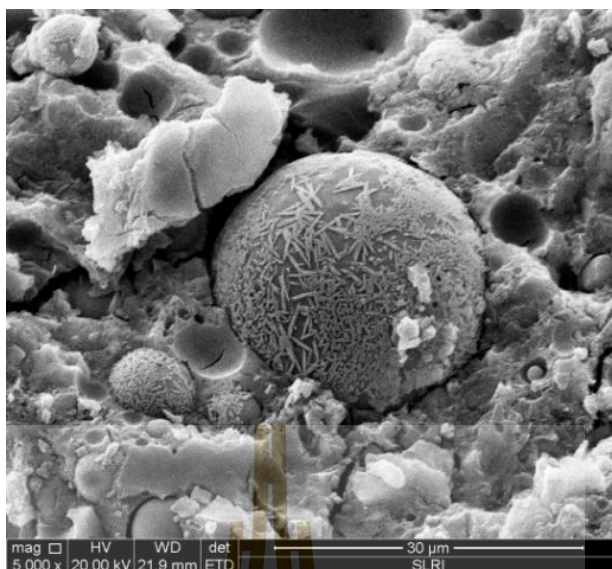
(ก) กำลังอัดแกนเดียวที่อายุบ่ม 7 วัน และ (ข) กำลังรับแรงดัดที่อายุบ่ม 7 วัน

4.6 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

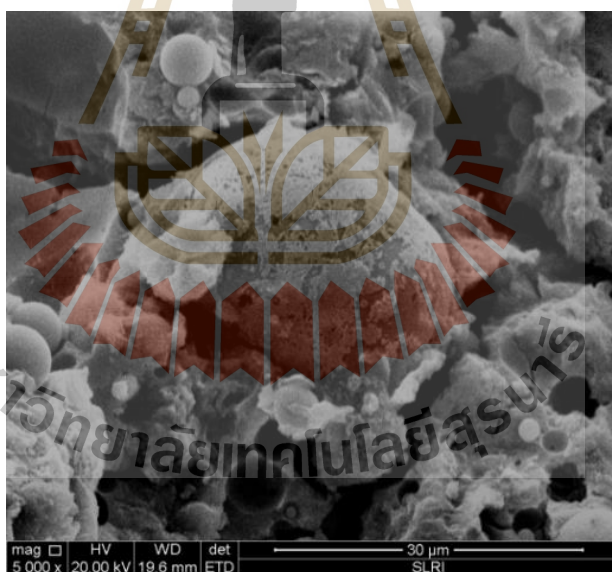
การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ถ่ายภาพโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นส่วนขนาดเล็กที่อยู่แกนกลาง เพื่อนำมาวิเคราะห์การพัฒนากำล้างอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ โดยศึกษาจากปฏิกิริยาระหว่างสารกระตุ้นอัลคาไลน์กับเถ้าลอยในแต่ละช่วงอายุบ่ม

4.6.1 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

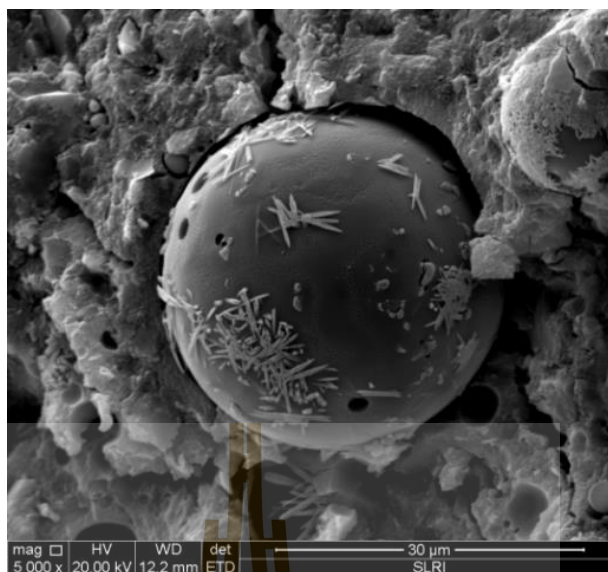
รูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน พบว่าเถ้าลอยที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้ ซึ่งเถ้าลอยมีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยาหรือสารกระตุ้นอัลคาไลน์แล้ว การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินาให้เป็นลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไร้เซชันขึ้น 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) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H gel) ทำให้จีโอโพลิเมอร์สามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ [50] รูปที่ 4.10 ข) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 14 วัน สังเกตได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นที่ผิวตัวอย่างและผิวของเถ้าลอยมากขึ้นจากการทำปฏิกิริยาของสารกระตุ้นอัลคาไลน์ สามารถสังเกตเห็นหลุมและอนุภาคเถ้าลอยขนาดเล็ก ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์นี้ยังสามารถพัฒนากำล้างอัดต่อไปได้อีก เนื่องจากการเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตในจีโอโพลิเมอร์ซึ่งสารดังกล่าวพัฒนากำล้างอัดตามอายุบ่ม [44, 45] รูปที่ 4.10 ค) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วัน จะสังเกตเห็นรูพรุนที่บริเวณผิวของเถ้าลอย เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายด่างเพื่อชะซิลิกาและอะลูมินาจากผิวเถ้าลอยทำให้อนุภาคซีโนสเฟีย (Cenosphere) และพลีโรสเฟีย (Plerosphere) ภายในเถ้าลอยออกมาทำปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้น [32]



(ก)



(ข)



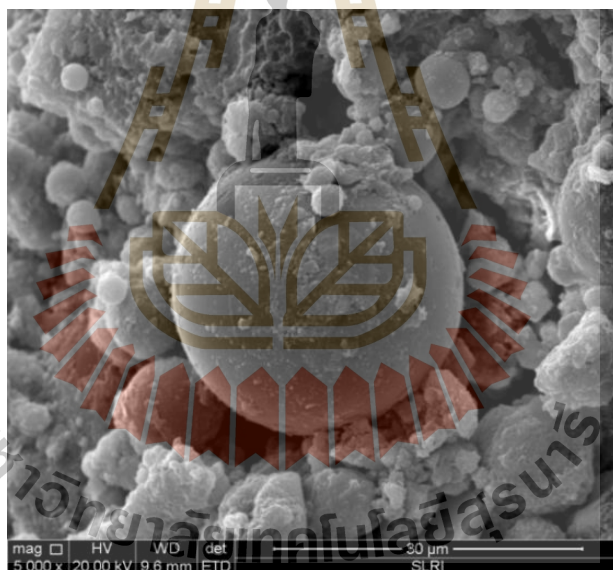
(ก)

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

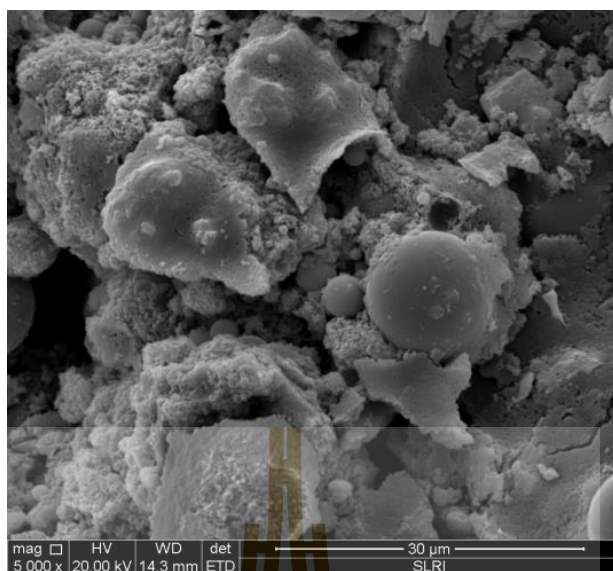
4.6.2 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เมื่อเพิ่มน้ำยางพาราลงในส่วนผสมพบว่ามีส่วนที่คล้ายแผ่นฟิล์มสีขาวปกคลุมอนุภาคเถ้าลอยและพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งแผ่นฟิล์มนี้จัดเป็นส่วนที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย (Gel fraction) ในน้ำยางพารา [15] ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ยังคงเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันขึ้นบริเวณผิวของเถ้าลอยรวมตัวกันเป็นจีโอโพลิเมอร์เจลอยู่ รูปที่ 4.11 ก) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 7 วัน เกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์บนผิวเถ้าลอยเพียงเล็กน้อย ลักษณะพื้นผิวของเถ้าลอยค่อนข้างเรียบและมีอนุภาคเถ้าลอยจำนวนมากที่ยังไม่ถูกทำปฏิกิริยากระจายอยู่โดยรอบ ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ทั้งโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H gel) และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H gel) ที่เกิดขึ้นยังคงทำให้จีโอโพลิเมอร์สามารถรับแรงได้ดี [51] รูปที่ 4.11 ข) ตัวอย่างที่อายุบ่ม 14 วัน สังเกตได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์บริเวณผิวของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นและมีอนุภาคเถ้าลอยขนาดเล็กที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ภายในช่องว่างของโครงสร้าง รูปที่ 4.11 ค) ตัวอย่างที่อายุบ่ม

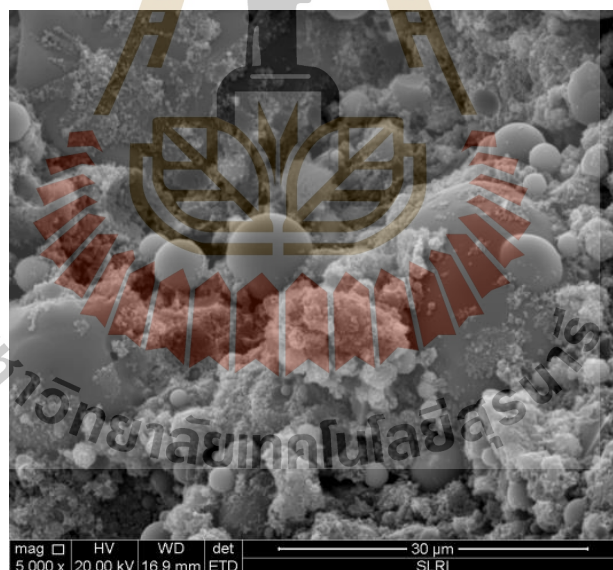
28 วัน มีอนุภาคเถ้าลอยกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวตัวอย่างที่มีส่วนผสมของยางพารา จึงยังพอสังเกตเห็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นอยู่บ้าง ลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างนี้มีการพัฒนากำลังอัดค่อนข้างต่ำ เนื่องจากน้ำยางพารามีองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางหรือส่วนที่เป็นเจล ซึ่งการเติมน้ำยางพาราจะก่อให้เกิดกำแพงฟิล์มยางพารา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



(ก)



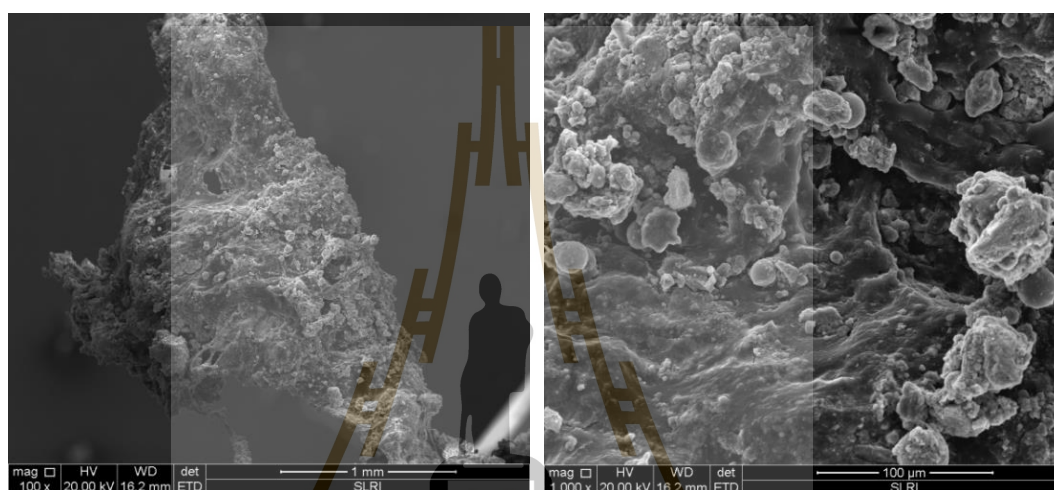
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.11 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพารา
และถั่วลยจีโอโพลิเมอร์ที่อาซุ่ม (ก) 7 วัน (ข) 14 วัน และ (ค) 28 วัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ผสมน้ำยางพาราที่อัตราส่วนเท่าลดยเดียวกัน ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมน้ำยางพาราจะมีสัดส่วนปริมาณสารกระตุ้นอัลคาไลน์ที่ใช้ทำปฏิกิริยาน้อยกว่า จึงทำให้ให้ตัวอย่างมีปริมาณสารละลายต่างรวมทั้งซิลิกาและอะลูมินาลดลงไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับเถาลอยเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เป็นโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H gel) จึงสังเกตเห็นอนุภาคเถาลอยที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยามากมายกระจายอยู่ทั่วไปบนผิวของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์



(ก)

(ข)

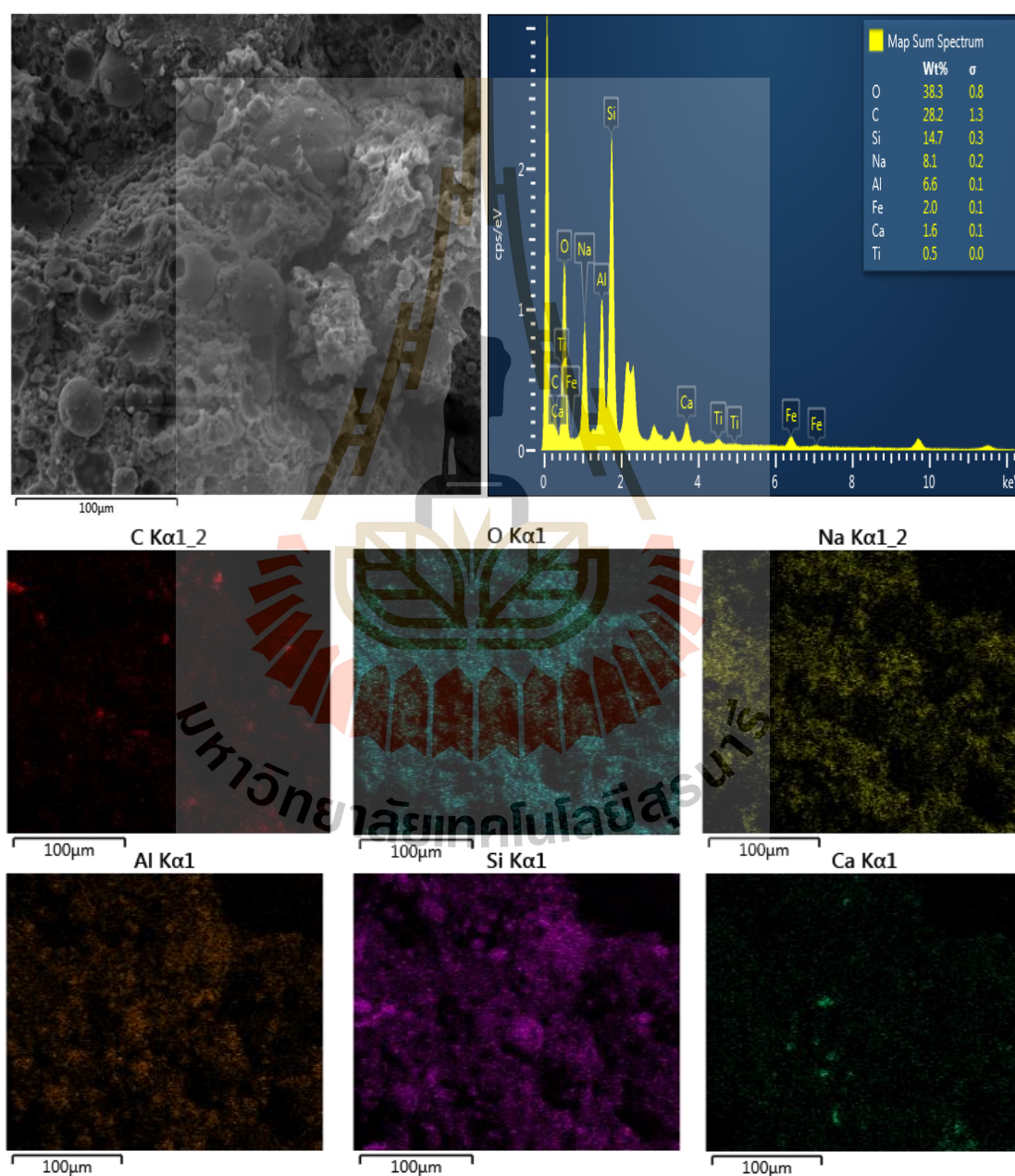
รูปที่ 4.12 โครงสร้างทางจุลภาคของแผ่นฟิล์มยางพารา (ก) กำลังขยาย 100 เท่า (100X) และ (ข) กำลังขยาย 1,000 เท่า (1,000X)

4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์

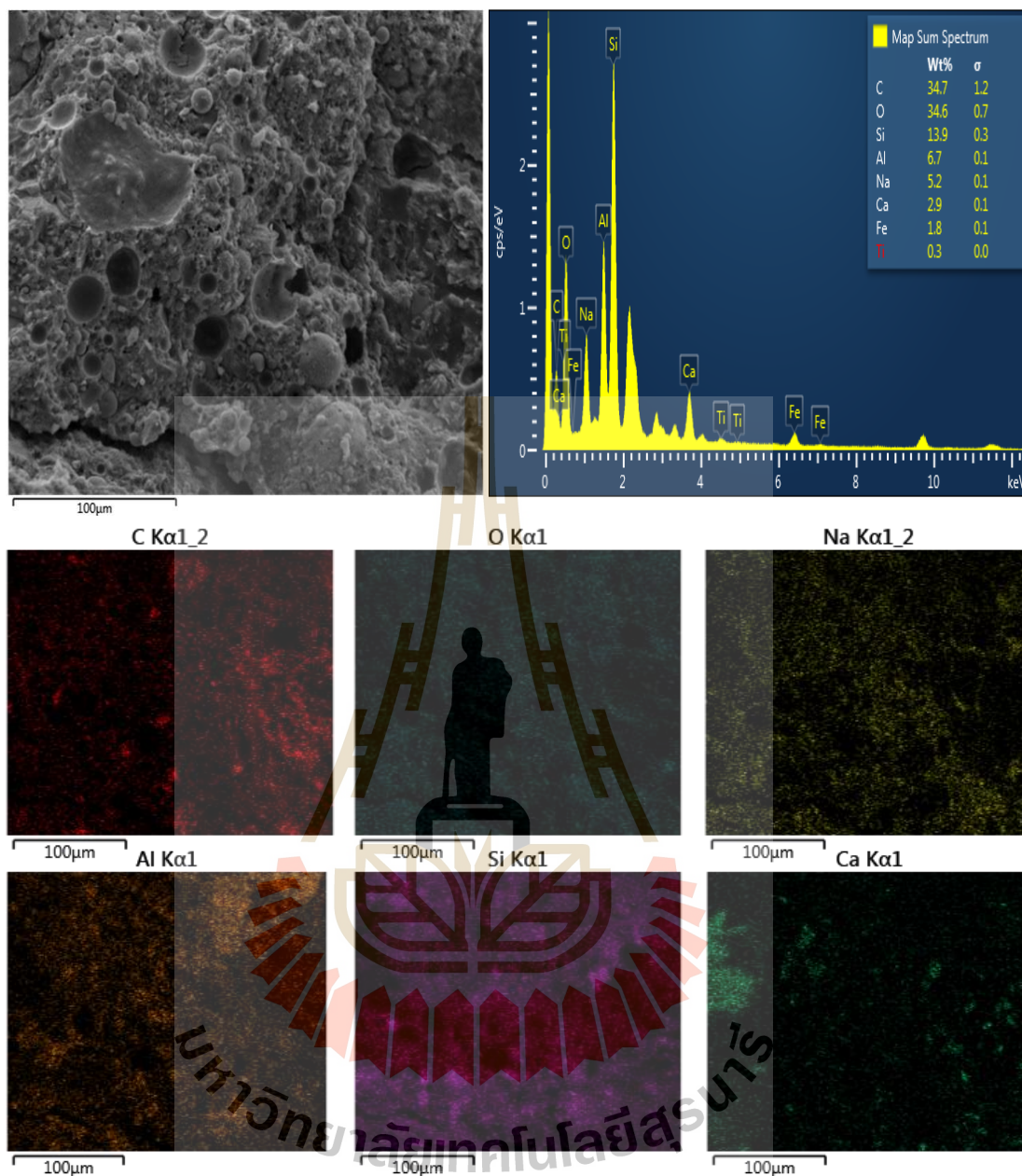
4.7.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถาลอยจีโอโพลิเมอร์

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 บ่งชี้ได้ว่าการเกิดปฏิกิริยา จีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ผลิตพันธะโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) ในปริมาณสูงจึงทำให้กำลังอัดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 ข) ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ซึ่งจะพบอะตอมของธาตุ Si, Al, Na, C และ O ในปริมาณที่สูงกว่า และยังพบว่าปริมาณอะตอมของธาตุ Ca น้อย จึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ได้ในปริมาณน้อย



(ก)



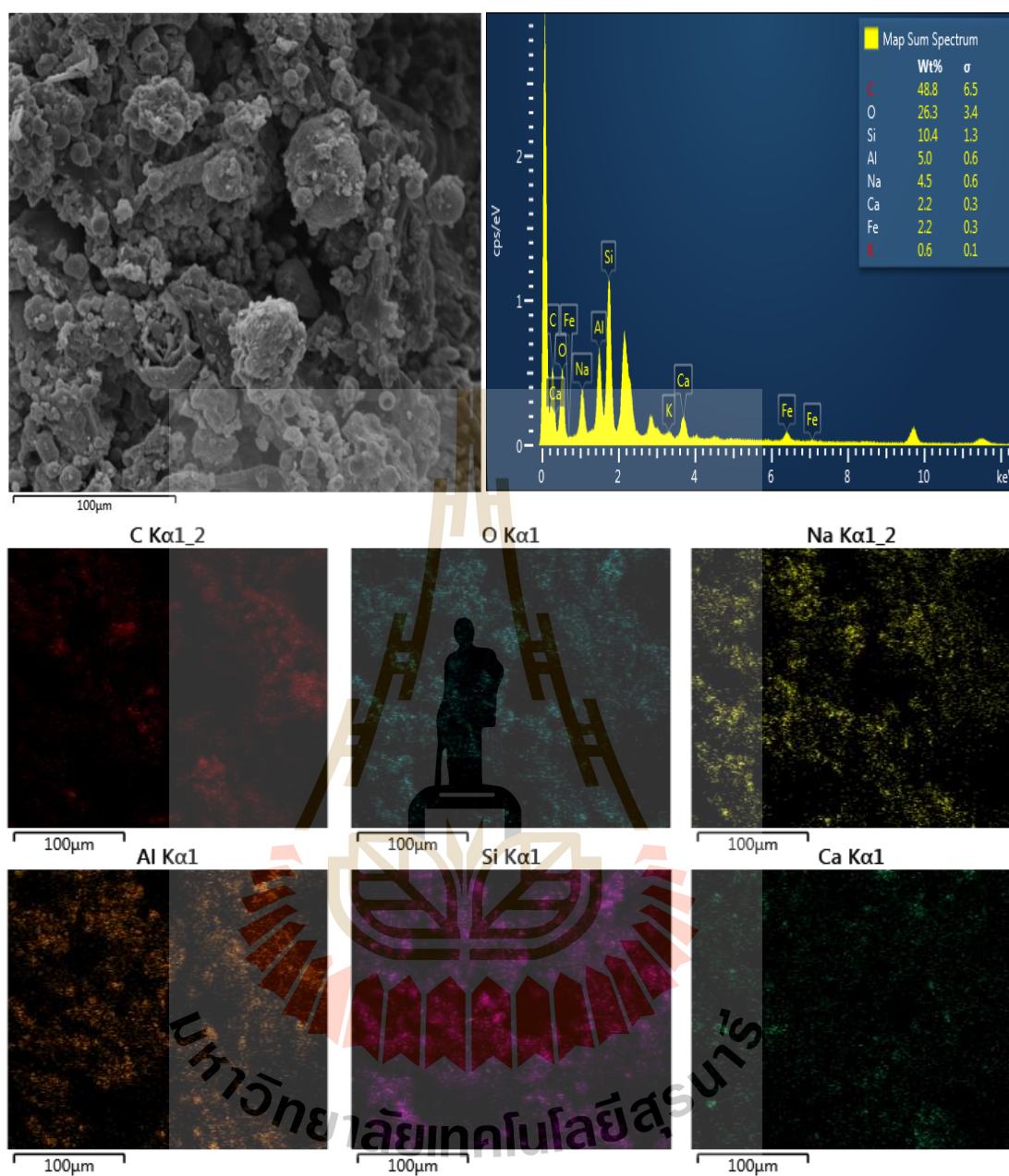
(ข)

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

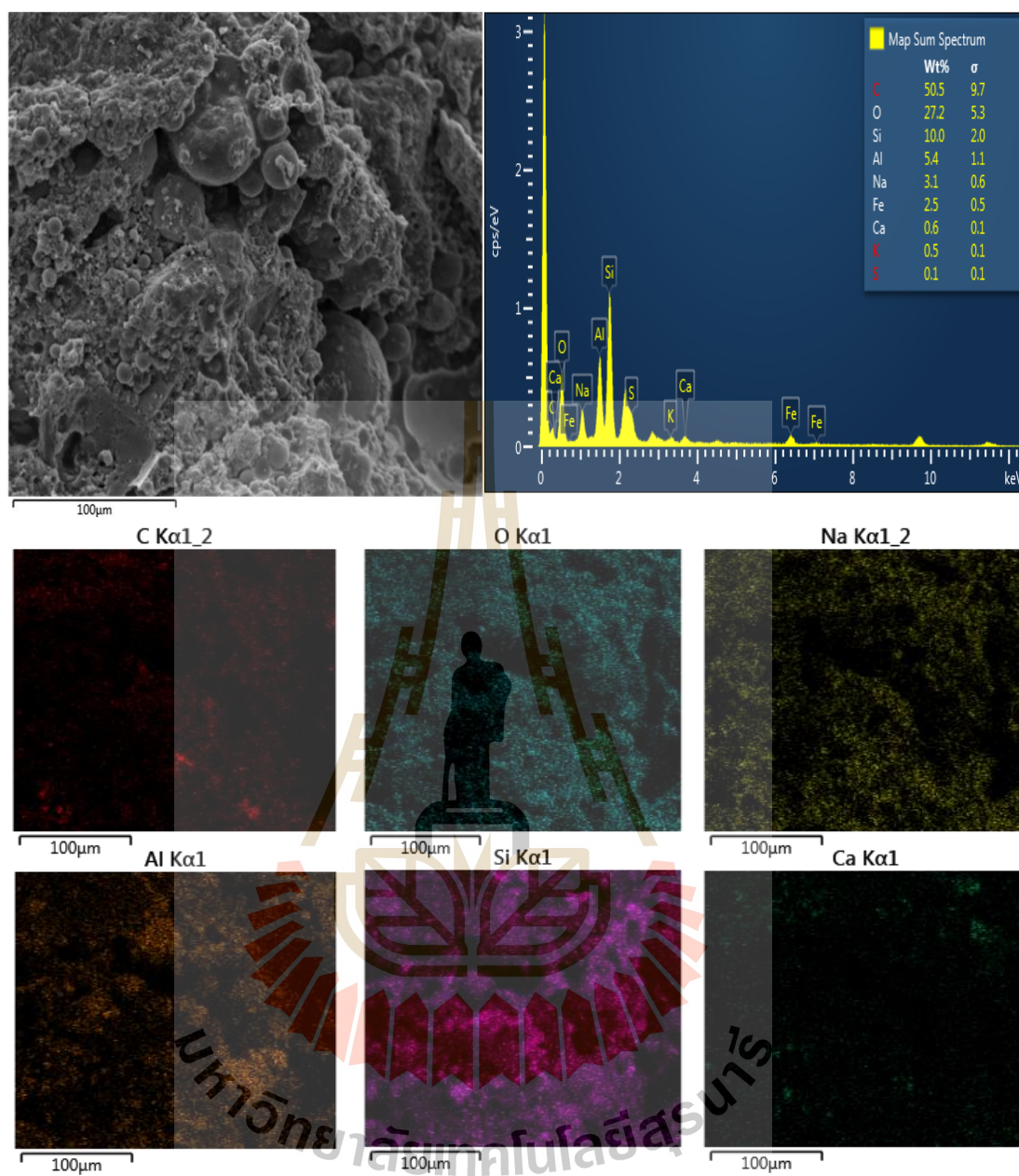
4.7.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอย จิโอโพลิเมอร์

องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผิวทางเก่าผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอย จิโอโพลิเมอร์ด้วยเทคนิค SEM/EDS (Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectrometer) จากภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างจิโอโพลิเมอร์ และผลวิเคราะห์ด้วย EDS ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าตัวอย่างจิโอโพลิเมอร์มีปริมาณอะตอมของธาตุ Si, Al, Na, C และ O เป็นองค์ประกอบหลัก และจากภาพ mapping แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ รูปที่ 4.14 ก) ตัวอย่างจิโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7 วัน จะเห็นการกระจายตัวของ Si, Al และ Na บ่งชี้ได้ว่าเกิดปฏิกิริยาจิโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้ผลิตภัณฑ์โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) [53] เมื่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.14 ข) ตัวอย่างจิโอโพลิเมอร์ที่ อายุบ่ม 28 วัน จะสังเกตได้ว่าพบอะตอมของธาตุ Si, Al และ Na ในปริมาณน้อยซึ่งไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นอนุภาคของเถ้าลอยที่ยังไม่ถูกชะล้างด้วยสารกระตุ้นอัลคาไลน์ เนื่องจากน้ำยางพาราขัดขวางการทำปฏิกิริยาจิโอโพลิเมอร์ไรเซชัน





(ก)



(ข)

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 SiO_2 ร้อยละ 61.98, Al_2O_3 ร้อยละ 29.29, CaO ร้อยละ 1.81, Fe_2O_3 ร้อยละ 3.37 และ SO_3 ร้อยละ 1.18 องค์ประกอบของเก้าลอยจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค 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) และยังคงสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc)

5.1.5 กำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์

กำลังรับแรงดัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ที่ปริมาณร้อยละ 15 และ 20 กำลังรับแรงดัดจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงดัดสูงสุดที่อายุบ่ม 7 วัน พบที่ตัวอย่างผสมน้ำยางพาราร้อยละ 0 และเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์ร้อยละ 15 และ 20 มีค่า 9.29 และ 11.82 ksc ตามลำดับ วัสดุผิวทางแก่ไม่สามารถยึดเกาะกับอนุภาคน้ำยางพาราได้ ทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมามากเกินไปน้ำยางพาราจึงไม่สามารถเชื่อมประสานอย่างทั่วถึงในส่วนผสม ลดการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ตัวอย่างมีค่ากำลังอัดและกำลังรับแรงดัดลดลง

5.1.6 กำลังอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงดัดของวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราและปูนซีเมนต์

กำลังอัดแกนเดียวและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างวัสดุผิวทางแก่ผสมน้ำยางพาราที่ปริมาณร้อยละ 0, 0.5, 1.5 และ 2 และปูนซีเมนต์ที่ปริมาณร้อยละ 5 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้น เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีเกิดผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ทำให้ส่วนผสมของตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้กำลังอัดและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.7 โครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพื่อให้เห็นการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอย เกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันขึ้น เกิดการเชื่อมประสานระหว่างโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (N-A-S-H gel) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H gel) ทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดสูงขึ้นตามระยะเวลา และตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมน้ำยางพารา จะมีอนุภาคเถ้าลอยจำนวนมากที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยา จึงมีการพัฒนา กำลังอัดค่อนข้างต่ำ เนื่องจากน้ำยางพารามีองค์ประกอบที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางซึ่งไปล้อมรอบอนุภาคเถ้าลอยจึงส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ลดลงอย่างมาก

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 เนื่องจากเถ้าลอยที่ยังไม่ถูกชะล้างด้วยสารกระตุ้นอัลคาไลน์

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาในอนาคตควรศึกษาชนิดและอัตราส่วนที่จะทำให้ส่วนผสมระหว่างน้ำยางพาราและวัสดุสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การหาสารผสมเพิ่มเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างน้ำยางพารากับเถ้าลอย หรือการลดขนาดอนุภาคละเอียดของวัสดุผิวทางเก่าให้เล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา โดยจะต้องได้มาตรฐานตามข้อกำหนดของงานก่อสร้าง นอกจากนี้ควรศึกษาผลของเถ้าลอยชนิด C เปรียบเทียบด้านการพัฒนากำลังอัด หรืออิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มที่มีผลกำลังกำลังอัดและกำลังรับแรงดัด



เอกสารอ้างอิง

- [1] บัญชา พุตระกูล, วิจิตรอัจฉรา สรรพกิจจำนง, เสรี ศรีธรรมธำรง, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ และพรชัย ศิลาธรรมย์, การตรวจวัดการอุดซ่อมโพรงใต้แผ่นคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ GPR และ FED. 2547, กรมทางหลวง: สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง.
- [2] สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท, โครงข่ายทางหลวงชนบท สำหรับปีงบประมาณ 2561. 2560, กระทรวงคมนาคม: สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท.
- [3] ชานี เกษมศรี, การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าผสมด้วยน้ำมันดีเซล. 2557, สำนักงานทางหลวงที่ 4: กรมทางหลวง.
- [4] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, วัสดุอีโพอลิเมอร์. 2560, กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.
- [5] วราภรณ์ ขจรไชยกุล, รายงานการศึกษาเชิงลึกประกอบการเสวนาหัวข้อ “การผลักดันการใช้ยางพาราในการสร้างและซ่อมถนน”, in โครงการพัฒนาระบบฐานข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา (Rubber Intelligence Unit). 2559, สถาบันพลาสติก และฝ่ายอุตสาหกรรม: ไปเทคฯ 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
- [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
- [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.

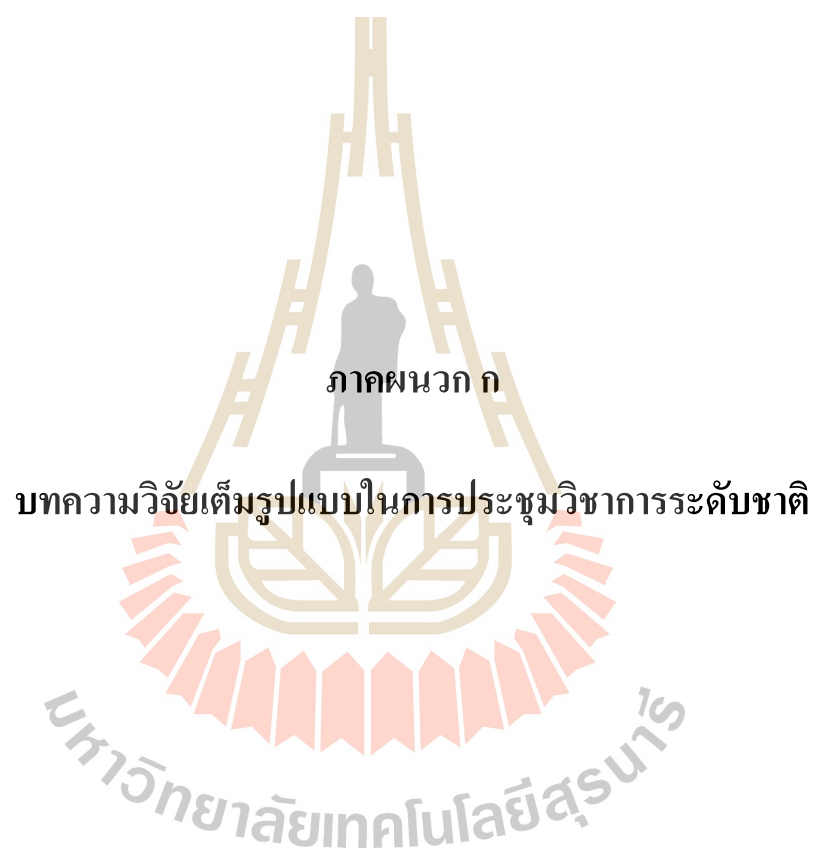
- [12] นราชัย ดันติวรวิทย์, ลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา กับที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม, in สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา 2546, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] California Department of Transportation (Caltrans) 2008a, *Maintenance Technical Advisory 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] วิชุดา จันทรข้างแรม, 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
- [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
- [22] ASTM D388-18, *Standard Classification of Coals by Rank*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- [23] ปริญญ์ จินดาประเสริฐ, เถ้าลอยในงานคอนกรีต(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] ไพบุญย์ โตวิริยะเวช, 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, พัทธ์ชัย บุญนุ่น, กิจฉาร 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., & Siridaothong, 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).
การศึกษากำลังและโครงสร้างทางจุลภาคของผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสม
น้ำยางพาราและเส้นใยโพลิเมอร์สำหรับชั้นพื้นทาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา
แห่งชาติ 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 กิจเจริญ¹ อธิธิกร ภูมิพันธ์² ชามยุพร กองเกิด³ และ สุขสันต์ หอพิบูลสุข⁴

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

² วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ แขวงทางหลวงชนบทสิงห์บุรี สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 2 (สระบุรี) กรมทางหลวงชนบท

³ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

⁴ ศาสตราจารย์, สาขาวิชาการบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา

*Corresponding author; E-mail address: itthikom95@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 (Na_2SiO_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 (Na_2SiO_3) solution and 8 M sodium hydroxide (NaOH) solution at Na_2SiO_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 เพื่อป้องกันอันตรายและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ใช้งาน 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 แก้วเคลือบ แก้วชานอ้อย เป็นต้น แก้วลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารปฏิกิริยาที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) ได้ ผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์จากแก้วสามารถรับแรงได้ดีเช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงมีการประยุกต์ใช้แก้วลอยจีโอโพลิเมอร์กับคอนกรีตเพื่อใช้ในการก่อสร้างถนน [3] และจากงานวิจัยของ Menglim [4] ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุของวัสดุผิวทางเก่า (RAP) สำหรับงานโครงสร้างถนนโดยการผสมแก้วลอยชนิด C และใช้สารละลาย $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ เป็นสารกระตุ้นอัลคาไลน์ ตัวอย่างทดสอบ คือ RAP-FA Geopolymer และ RAP-FA Blend (ใช้น้ำเป็นตัว Control) ผลการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดในช่วง 7 วันแรกที่สูง OWC เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงประเทศไทย ทั้งการบ่มที่อุณหภูมิห้องและ 40 องศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ของตัวอย่างทดสอบ RAP-FA Geopolymer และ RAP-FA Blend พบว่า RAP มีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมสูง และแก้วลอยมีปริมาณซิลิกาและอลูมินาสูงจึงมีผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นตลอดเวลา ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Itthikorn [5] ที่ได้ศึกษาการพัฒนาวัสดุของวัสดุผิวทางเก่าที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแก้วลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกั่วเหล็กจีโอโพลิเมอร์สำหรับการนำไปใช้งานพื้น จากผลการทดลองพบว่าการใช้ตะกั่วเหล็กจีโอโพลิเมอร์รวมกับการใช้แก้วลอยร้อยละ 5 ผลตะกั่วเหล็กร้อยละ 5 ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีค่ากำลังอัดที่ 7 วันเป็นไปตามข้อกำหนดขั้นต่ำสุด (มากกว่า 1.724 เมกะปาสคาล) ซึ่งค่ากำลังอัดสูงสุดของตะกั่วเหล็กจีโอโพลิเมอร์ (RAP+10%Slag geopolymer) อยู่ที่ 5.73 เมกะปาสคาล เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและแคลเซียมของตะกั่วเหล็กและสารกระตุ้นอัลคาไลน์ได้เป็นผลิตภัณฑ์ C-A-S-H ดังนั้นผลิตภัณฑ์ จีโอโพลิเมอร์จะเกิดขึ้นและอยู่ร่วมกับเจล C-A-S-H เมื่อผสมแก้วลอย กากแคลเซียมคาร์ไบด์และตะกั่วเหล็ก โดยใช้ตะกั่วเหล็กเป็นสารตั้งต้น

นอกจากนี้ในสภาวะเศรษฐกิจในปัจจุบัน ทำให้ราคายางพารา (Para Rubber Latex) มีราคาค่อนข้างต่ำลงอย่างมากและที่ผ่านมาได้มีการนำยางพาราไปประยุกต์ใช้อุตสาหกรรมมากมาย รวมถึงการนำ

ยางพาราไปผสมกับยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (Asphalt) ซึ่งส่วนผสมของยางพารานี้ได้มีการศึกษาและทดลองใช้ในพื้นที่ชุมชนและมีการรับรองสูตรโดยกรมทางหลวงแล้วแต่ถนนที่มีส่วนผสมของยางพารายังไม่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากต้นทุนการก่อสร้างสูงกว่าการสร้างถนนแบบปกติประมาณร้อยละ 20 – 30 [6] นอกจากนี้วัสดุ [7] ได้รายงานว่าการบำบัดน้ำเสียจากอินเดียได้ทดลองการใช้ยางธรรมชาติผสมแอสฟัลต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ราคถนนเป็นระยะทาง 1 กิโลเมตรเปรียบเทียบกับถนนราคาแอสฟัลต์ธรรมดา พบว่าถนนราคาแอสฟัลต์ต้องซ่อมผิวถนนใหม่ครั้งแรกในอีก 5 ปีต่อมาและซ่อมครั้งที่ 2 ในปี 10 ในขณะที่ถนนที่ราดด้วยแอสฟัลต์ผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 2 ยังมีสภาพดีจนถึงปีที่ 14 นอกจากนี้ยังได้มีการขยายผลการใช้งานไปทั่วประเทศ สรุปได้ว่าการผสมยางธรรมชาติสามารถยืดอายุถนนได้อย่างน้อยร้อยละ 50 โดยค่าใช้จ่ายในการราดผิวถนนเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เมื่อผสมยางธรรมชาติที่อัตราส่วนร้อยละ 2 กับแอสฟัลต์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาดังแนวทางในการนำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่ากลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยการผสมน้ำยางพาราและแก้วลอยจีโอโพลิเมอร์ โดยนำไปใช้กับงานชั้นพื้นทาง เพื่อให้ได้ถนนที่มีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้นและผ่านข้อกำหนดมาตรฐานของกรมทางหลวง รวมทั้งยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าและส่งเสริมการใช้ยางพาราในประเทศไทยให้มีมากขึ้นอีกด้วย

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุผิวทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)

วัสดุผิวทางเก่าที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากถนนหลวงหมายเลข 331 ตำบลบ่อวิน อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี เป็นวัสดุผิวทางเก่าที่ได้จากการขุดหรือผิวทางถนนเพื่อการซ่อมแซม (รูปที่ 1 ภาพถ่ายของวัสดุผิวทางเก่า) การทดสอบขนาดผลัด 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 ($\gamma_{d, max}$) 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_2 ร้อยละ 61.98, Al_2O_3 ร้อยละ 29.29, CaO ร้อยละ 1.81, Fe_2O_3 ร้อยละ 3.37 และ SO_3 ร้อยละ 1.18 ตามมาตรฐาน ASTM C618 สามารถจัดจำแนกเป็นเถ้าลอยชนิด F โดยมีปริมาณรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 ขนาดคลของ เถ้าลอยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Laser Particle Size ดังแสดงในรูปที่ 2 ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) พบว่ามีอนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 วัสดุผิวทางเก่า

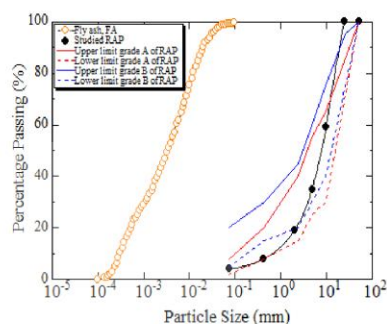
ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุผิวทางเก่า

คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ	RAP	คุณสมบัติมาตรฐานตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง	
		ชั้นรองพื้นทาง	ชั้นพื้นทาง
Gradation	ก	-	-
Liquid Limit, LL (%)	NP*	< 35	< 25
Plastic Index, PI (%)	NP*	< 11	< 6
Optimum Moisture Content, OMC (%)	7.52	-	-
Maximum Dry Unit Weight, $\gamma_{d, \max}$ (kN/m^3)	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

2.3 นํ้ายางพารา (Natural Rubber, NR)

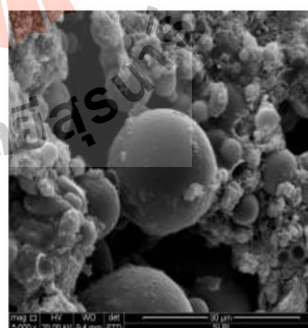
นํ้ายางพาราที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นนํ้ายางพาราชนิด DRC30 ที่ผสมสารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยให้นํ้ายางพาราสมกับวัสดุได้ดีขึ้น



รูปที่ 2 ขนาดคลของวัสดุผิวทางเก่าและเถ้าลอย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย (FA)
SiO_2	61.98
Al_2O_3	29.29
Fe_2O_3	3.37
CaO	1.81
SO_3	1.18
TiO_2	1.30
K_2O	0.84



รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของเถ้าลอย

2.4 สารกระตุ้นอัลคาไลน์ (Alkaline Activator, AA)

สารกระตุ้นอัลคาไลน์เหลวเตรียมได้จากส่วนผสมระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) กับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 8 โมลาร์ อัตราส่วนของ $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 50:50 สารละลายโซเดียมซิลิเกตประกอบด้วย Na_2O ร้อยละ 14.50, SiO_2 ร้อยละ 31.50 และ H_2O 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 นำส่วนผสมไปขึ้นรูปโดยการกดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (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

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค นำชิ้นส่วนของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบกำลังอัด มาผ่านกระบวนการ Freeze Dry ด้วยไนโตรเจนเหลว แล้วนำชิ้นส่วนมาทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 – 4 มิลลิเมตร ก้อนตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้งบนแท่นติดตั้งตัวอย่าง หลังจากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำบริสุทธิ์ แล้วนำมาถ่ายภาพด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope

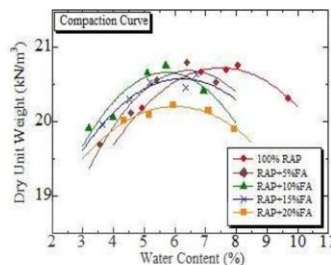
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

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 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



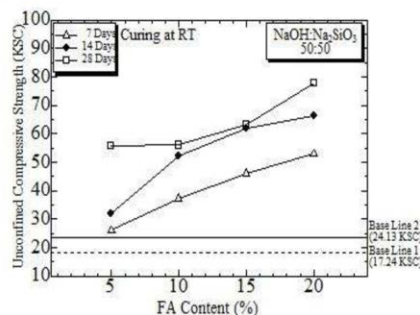
รูปที่ 4 การบดอัดของวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่าผสมเถ้าลอย

ตารางที่ 3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม และความแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผิวทางเก่าผสมเถ้าลอย

Sample	Optimum Moisture Content , OMC (%)	Dry Unit Weight γ_d , max (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

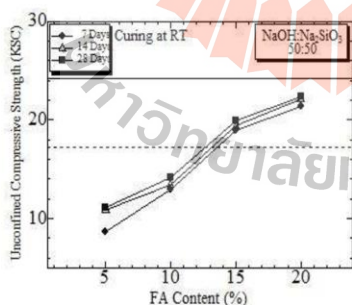
การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่าง RAP-FA Geopolymer ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 จากรูปที่ 5 พบว่ากำลังอัดของ RAP-FA Geopolymer จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นและให้กำลังอัดสูงกว่าข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้ (17.24 ksc) สำหรับทุกอัตราส่วนทดสอบ และยังสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (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 มีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องและตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 5 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีกำลังอัดใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 15 ที่อายุบ่ม 14 และ 28 วัน กล่าวคือตัวอย่างที่ผสมด้วยเถ้าลอยร้อยละ 10 และ 15 หลังอายุบ่ม 14 วัน มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น 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 ที่ทุกอัตราส่วนทดสอบมีการพัฒนากำลังอัดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น 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

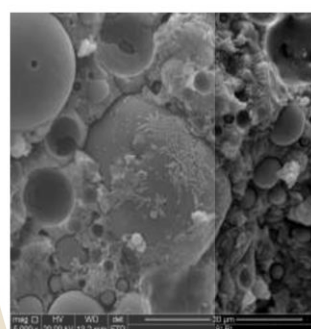


รูปที่ 6 กำลังอัดของ RAP-NR-FA Geopolymer

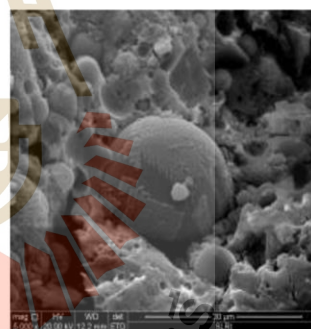
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

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

เปลี่ยนแปลงเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นที่ผิวเถ้าลอยอย่างชัดเจน และอนุภาคของเถ้าลอยมีรูพรุนจากการชะของ NaOH จึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวอย่างไฮดรอกไซด์โพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 14 และ 28 วันนั้นยังอยู่ในขั้นตอนของการชะซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) จากบริเวณผิวของอนุภาคเถ้าลอย ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างมีปริมาณของ Na_2SiO_3 สูงจึงมีปริมาณของผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์โพลิเมอร์เกิดขึ้นมาก ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการเกิดไฮดรอกไซด์โพลิเมอร์ไรเซชัน [8] ส่งผลให้กำลังอัดในช่วง 7 วันแรกมีค่าสูงและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Menglim [4]



(ก.)



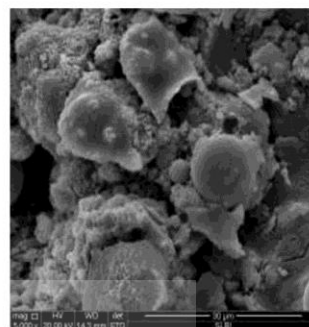
(ข.)



(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 แสดงให้เห็นผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ที่เริ่มก่อตัวขึ้นบนผิวของเถ้าลอย เมื่อพิจารณาที่รูป 8(ข) และ 8(ค) ที่อายุบ่ม 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย บนพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอยมีผลิตภัณฑ์ขึ้นแต่สังเกตได้ยากและพบอนุภาคเถ้าลอยจำนวนมากที่ไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นบริเวณพื้นผิว เนื่องจากมีผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายฟิล์มสีขาวปกคลุมพื้นผิวเถ้าลอย ดังนั้นจึงเกิดการชะของ NaOH ได้ยาก ทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน มีปริมาณซิลิกา (Si) และอลูมินา (Al) ที่จะใช้ในกระบวนการเกิดจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันมีปริมาณน้อย ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างมีปริมาณของ NaOH และ Na_2SiO_3 ต่ำลง จึงมีสารเชื่อมประสานเกิดขึ้นน้อย และเนื่องจากการผสมน้ำยางพาราเข้าไปเพิ่มจึงส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ใส่น้ำยางพารา มาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของสิทธิชัย และคณะ [9] การผสมน้ำยางพาราในคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 60



(ก.)

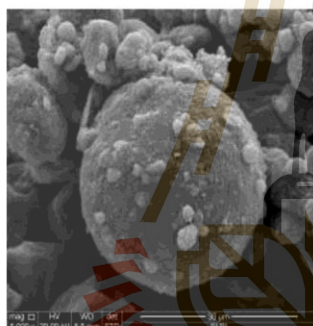
รูปที่ 8 โครงสร้างทางจุลภาคของ RAP-NR-FA Geopolymer ที่อายุบ่ม
ก. 7 วัน ข. 14 วัน และ ค. 28 วัน

4. สรุปผลการทดลอง

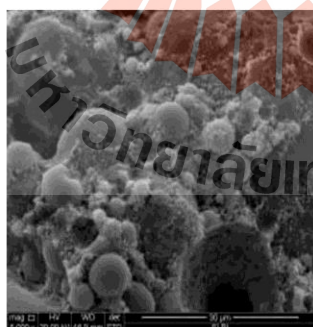
จากผลการศึกษาการนำวัสดุผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีตเก่ามาผสมน้ำยางพาราและเถ้าลอยจีโอโพลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง เมื่อบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง กำลังอัดของ RAP-FA Geopolymer พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น มีการพัฒนากำลังอัดจากอายุบ่ม 7 ถึง 28 วัน และที่อายุบ่ม 7 วัน ทุกอัตราส่วนทดสอบให้ค่ากำลังอัดสูงกว่า 17.24 ksc สำหรับงานปรับปรุงโครงสร้างทางที่กำหนดไว้และที่ปริมาณการเพิ่มเถ้าลอยร้อยละ 5 และ 20 ให้การพัฒนากำลังอัดดีที่สุดและยังสูงกว่ากำลังอัดของงานปรับปรุงชั้นพื้นทาง (24.13 ksc) ซึ่งเกิดจากการชะซิลิกาและอลูมินาจากอนุภาคเถ้าลอยและเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชันขึ้นมาก

กำลังอัดของ RAP-NR-FA Geopolymer พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ไม่มีการพัฒนาถึงจุดที่ดีเช่นเดียวกับ RAP-FA Geopolymer เนื่องจากการใส่น้ำยางพาราจะทำให้สัดส่วนของสารกระตุ้นอัลคาไลน์ลดลง ไม่เพียงพอต่อการชะซิลิกาและอลูมินาเพื่อเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชันได้อย่างเพียงพอ 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)

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ มีประโยชน์เพื่อให้เห็นลักษณะความแตกต่างตามระยะเวลาการบ่มของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ ตัวอย่าง RAP-FA Geopolymer โครงสร้างทางจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลงเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นที่ผิวเถ้าลอยอย่างชัดเจน ซึ่งทำให้เห็นขั้นตอนและกระบวนการเกิดปฏิกิริyajีโอโพลิเมอร์ไรเซชันหรือการเกิดผลิตภัณฑ์จีโอโพลิเมอร์ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนา กำลังอัดของตัวอย่าง



(ข.)



(ค.)

ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงของการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมในส่วนของการทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) เพื่อหาข้อมูลมาสนับสนุนการใช้น้ำยางพาราในงานวิจัยนี้ ซึ่งการทดสอบกำลังรับแรงดัดจะเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้างานวิจัยนี้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักบำรุงทาง กรมทางหลวงชนบท. (2560). โครงข่ายทางหลวงชนบท สำหรับปีงบประมาณ 2561. กระทรวงคมนาคม
- [2] Malhotra VM. (2002). Introduction: Sustainable development and concrete technology. *ACI Concrete International*, 24, 7-22
- [3] อุบลลักษณ์ รัดนาคี. (2560). วัสดุซีไอโพลีเมอร์. 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] Phummiphan 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 ขจรไชยกุล. (2559). รายงานการศึกษาเชิงลึกประกอบการเสวนาหัวข้อ "การผลักดันการใช้น้ำยางพาราในการสร้างและซ่อมถนน". สถาบันพลาสติกและฝ่ายอุตสาหกรรม. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- [7] วิสุทธิ ศุภรัตน์. (2543). การรื้อถอนด้วยแอสฟัลต์ผสมยางพารา. 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, กิจฉวี โลหะ และ อนุรักษ์ กำเนิดว่า (2548). "การใช้ยางธรรมชาติเพื่องานพัฒนาคอนกรีต. 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 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่ 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 แอ์ลอย จีโอโพลิเมอร์ และซีเมนต์เป็นอย่างดี

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี