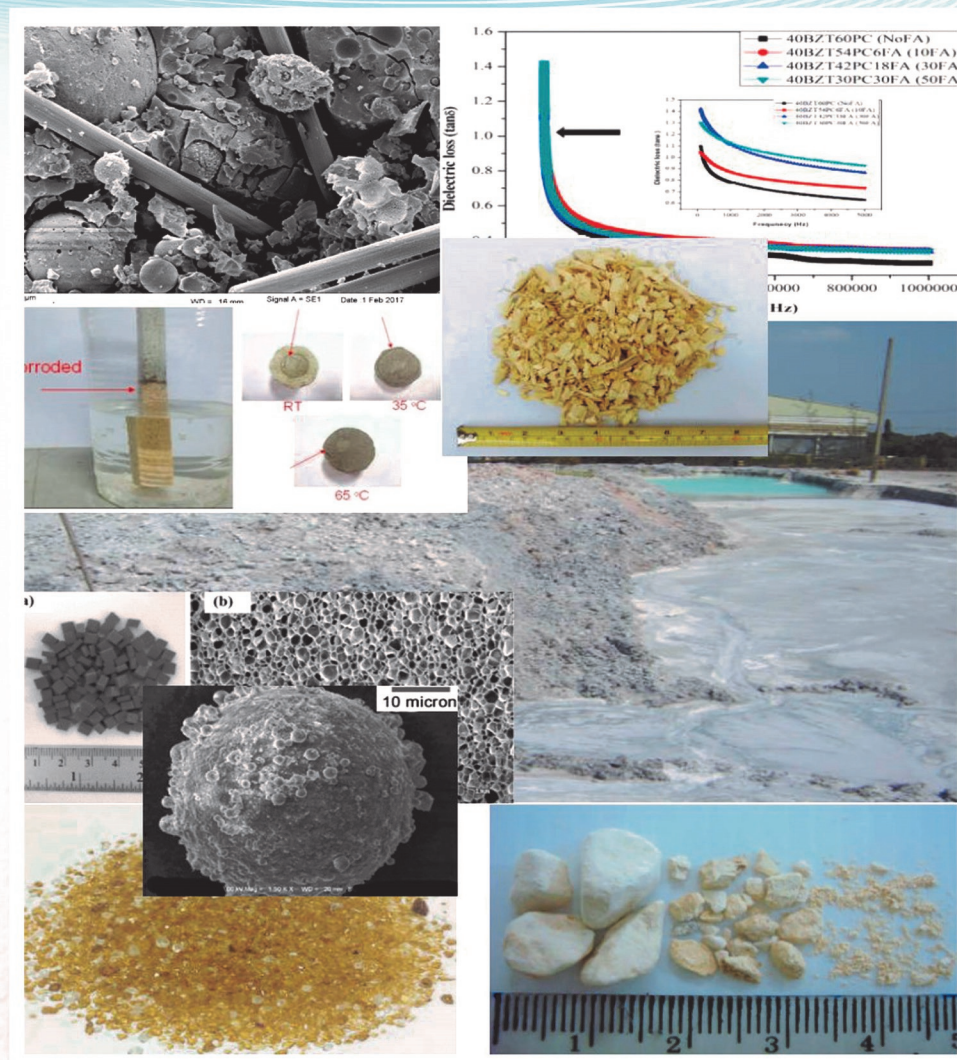


วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีต ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Eco-efficient cement and concrete composite



รวบรวมและเรียบเรียงโดย

ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ
รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ

วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Eco-efficient cement and concrete composite

รวบรวมและเรียบเรียงโดย

ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ

รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 300 เล่ม โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
และมหาวิทยาลัยขอนแก่น (มข.) ภายใต้โครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ประจำปี พ.ศ. 2554

จัดพิมพ์โดย ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สิงหาคม พ.ศ. 2560

ความเห็นในหนังสือเล่มนี้เป็นของผู้เขียน สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

คำนำ

วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-efficient cement and concrete composite materials) จัดทำขึ้นจากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยเรื่อง วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแก่ผู้ที่สนใจ ซึ่งได้แก่ นักวิจัย ผู้ใช้คอนกรีต และผู้ที่สนใจอื่นๆ โดยเนื้อหาของหนังสือครอบคลุมงาน 4 ด้านดังนี้

1. วัสดุปอซโซลาน
2. จีโอโพลิเมอร์และซีเมนต์อื่น
3. มวลรวมนำกลับมาใช้ใหม่และวัสดุรีไซเคิล
4. การปรับปรุงคุณสมบัติของสารซีเมนต์และคอนกรีต

โดยการจัดบทได้แบ่งเป็น 11 บท บทที่ 1 เป็นภาพรวมของวัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม บทอื่นอีก 10 บทได้นำเนื้อหาที่มีความใหม่และสำคัญต่อการวิจัยและการพัฒนาวัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น บทที่ 2 การพัฒนาเฮมพ์คอนกรีต (คอนกรีตผสมแกนกัญชง) บทที่ 3 บทบาทของสารปอซโซลาน : การใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานในคอนกรีต บทที่ 7 การวิเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ผสมคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี บทที่ 8 ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา บทที่ 10 การหาสัดส่วนที่เหมาะสมและสมบัติคอนกรีตมวลเบาด้วยวิธีการออกแบบของทากูชิ และบทที่ 11 คอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาระบบอัดแห้ง

ผลงานจากการเรียบเรียงข้อมูลจากงานวิจัยนี้ นอกจากเป็นข้อมูลการศึกษาวัดได้ให้ความรู้หลากหลายขึ้นยังทำให้ได้วัสดุประสานและผลิตภัณฑ์ใหม่ ได้วัสดุประสานมีสมบัติตามที่ต้องการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ใช้ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับการผลิตและการใช้งานสำหรับวัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในอนาคต

ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ

รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

สิงหาคม พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

หนังสือ “วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม” ได้จากการรวบรวมและเรียบเรียงข้อมูลของงานวิจัยเรื่อง วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ทางคณะผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ ผู้ช่วยวิจัย นักศึกษา เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และสถาบันอื่น ๆ ที่ผู้ร่วมวิจัยสังกัดอยู่ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งหัวหน้าโครงการสังกัดอยู่ ในการสนับสนุนการดำเนินงานตลอดจนสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

การดำเนินงานในครั้งนี้จะไม่สามารถดำเนินการได้ หากขาดการสนับสนุนทุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้โครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ประจำปี พ.ศ. 2557 (RTA5780004) ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
บทที่ 1 วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	1
<i>ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น</i>	
1.1 บทคัดย่อ	1
1.2 บทนำ	1
1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานา (Portland pozzolana cement)	2
1.4 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)	4
1.5 คอนกรีตมวลรวมจากวัสดุรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete)	6
1.6 ซีเมนต์ผสมวัสดุนาโน (Nano Cement Composite)	8
1.7 สรุป	9
1.8 กิตติกรรมประกาศ	10
1.9 เอกสารอ้างอิง	10
บทที่ 2 การพัฒนาเฮมพ์คอนกรีต (คอนกรีตผสมแกนกัญชง)	15
<i>ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี, ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ, สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น</i>	
2.1 บทคัดย่อ	15
2.2 บทนำ	16
2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ	18
2.4 ผลทดสอบและการอภิปรายผลทดสอบ	21
2.5 สรุป	28
2.6 กิตติกรรมประกาศ	29
2.5 เอกสารอ้างอิง	29

บทที่ 3 บทบาทของสารปอซโซลาน : การใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ 33

เป็นวัสดุประสานในคอนกรีต

ผศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เซาฟิร ดือราแม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3.1 บทคัดย่อ	33
3.2 บทนำ	34
3.3 สารปอซโซลาน	36
3.4 ปฏิกริยาปอซโซลานิก	38
3.5 กากแคลเซียมคาร์ไบด์	38
3.6 การใช้เถ้าถ่านหินร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์	39
3.7 การใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ ร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์	48
3.8 สรุปและข้อแนะนำ	52
3.9 กิตติกรรมประกาศ	53
3.10 เอกสารอ้างอิง	53

บทที่ 4 คอนกรีตผสมมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่ 57

รศ.ดร.วันชัย สะตะ, ดร. อำพล วงศ์ษา

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

4.1 บทนำ	57
4.2 ข้อกำหนดสำหรับมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่หรือมวลรวมจากเศษวัสดุ	57
4.3 คอนกรีตผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีต	59
4.4 คอนกรีตผสมมวลรวมจากเถ้าหนัก	66
4.5 คอนกรีตผสมมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากวัสดุอื่นๆ	69
4.6 บรรณานุกรม	75

บทที่ 5 สมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก 81

ไร้สารตะกั่ว-ซีเมนต์เถ้าลอย

รศ.ดร.อานนท์ ชัยพานิช, อ.ดร.รัตติยากร เรียนยอย, นายภาคิณ ชมเย็น

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

5.1 บทคัดย่อ	81
5.2 บทนำ	81

5.3 สมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก ไร้สารตะกั่ว-ซีเมนต์เถ้าลอย	84
5.4 สรุปผลการทดลอง	90
5.5 ข้อเสนอแนะ	90
5.6 กิตติกรรมประกาศ	90
5.7 เอกสารอ้างอิง	91
บทที่ 6 สมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-ไบแอนด์ ไดอิเล็กทริกออกไซด์	95
<i>ผศ.ดร.ประสิทธิ์ ทองใบ, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น</i>	
บทที่ 7 การวิเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ผสมคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	113
<i>รศ.ดร.สุปรีย์ พินิจสุนทร, นางสาวปัญจศิลป์ พยัคฆนิธิ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีบูรณาการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น</i>	
7.1 บทคัดย่อ	113
7.2 บทนำ	113
7.3 วัสดุคอมโพสิตจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยคาร์บอน	115
7.4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยคาร์บอน	116
7.5 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยคาร์บอน	117
7.6 การวิเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ผสมคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	117
7.7 สรุปและข้อเสนอแนะ	122
7.8 เอกสารอ้างอิง	122
บทที่ 8 ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโน ผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	125
<i>ศ.ดร.ปริญญญา จินดาประเสริฐ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ดร.วิรัตน์ เจริญบุญ, ญัฐวัฒน์ รัชพลทวีสิน, รศ.ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น</i>	
8.1 บทคัดย่อ	125
8.2 บทนำ	125
8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	126

8.4 องค์ประกอบของขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	127
8.5 กรรมวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมซีเมนต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	128
8.6 กรรมวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (ขั้วไฟฟ้าเวคกิง) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดสีย้อมไวแสง	129
8.7 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	129
8.8 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอน ผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	130
8.9 การศึกษาความต้านทานเชิงซ้อนภายในและการวัดประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่มีท่อนาโนคาร์บอน ผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	130
8.10 การศึกษาความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาครีตอกซ์ชนิดไอโอไดต์-ไตรไอโอไดต์ ของขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่มีท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	133
บทที่ 9 การศึกษาลักษณะเฉพาะของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง <i>รศ.ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา</i>	137
9.1 บทคัดย่อ	137
9.2 บทนำ	137
9.3 การเตรียมวัสดุจีโอโพลิเมอร์	138
9.4 เถ้าลอย	139
9.5 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์และสัดส่วนผสม	140
9.6 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง	142
9.7 สรุป	145
9.8 บรรณานุกรม	145
บทที่ 10 การหาสัดส่วนที่เหมาะสมและสมบัติคอนกรีตมวลเบาด้วยวิธีการออกแบบ ของทาบูชิ <i>ผศ.ดร.พรนภา เกษมศิริ, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน</i> <i>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น</i>	147
10.1 บทคัดย่อ	147
10.2 บทนำ	147

10.3 คอนกรีตมวลเบา	148
10.4 การออกแบบการทดลอง	150
10.5 การหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาด้วยวิธีของทาคุชิ	151
10.6 เอกสารอ้างอิง	161
บทที่ 11 คอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง	165
<i>ดร.พัชรพล โพธิ์ศรี, สุรสิทธิ์ เลิศนิมุลชัย, รศ.ดร.วันชัย สะตะ, ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน</i>	
<i>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น</i>	
11.1 บทคัดย่อ	165
11.2 บทนำ	166
11.3 คอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบา	168
11.4 สรุปและข้อเสนอแนะ	181
11.5 กิตติกรรมประกาศ	182
11.6 เอกสารอ้างอิง	182
ดัชนี	187
รายชื่อผู้ร่วมโครงการวิจัย	189

บทที่ 1

วัสดุผสมซีเมนต์และคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Eco-efficient cement and concrete composite materials

ศาสตราจารย์ ดร. ปริญญ์ จินดาประเสริฐ, Email: prinya@kku.ac.th

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถนนมิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. ขอนแก่น 40002

1.1 บทคัดย่อ

วัสดุก่อสร้างมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของคน ที่สำคัญและใช้งานกันมากที่สุดได้แก่คอนกรีต ซึ่งมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ปัจจุบันทั่วโลกมีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 4,000 ล้านตัน คิดเป็นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 3,000 ล้านตัน มาตรการในการลดการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถทำได้โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลาน ใช้ซีเมนต์คาร์บอนต่ำ เช่น สารซีเมนต์จากการกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali-activated binder) และ เบไลต์ซีเมนต์ (Belite) สารซีเมนต์เหล่านี้มีคุณสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า และยังสามารถใช้มวลรวมจากวัสดุรีไซเคิล (Recycled aggregate) มวลรวมธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ได้คอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้โดยการปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และคอนกรีตเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต วัสดุผสมเพิ่มที่สำคัญ ได้แก่ วัสดุนาโน (Nano-materials) ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ได้ ทำให้เกิดการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตได้เหมาะสม หลากหลายรูปแบบ และยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

คำสำคัญ: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปอซโซลาน จีโอโพลิเมอร์ วัสดุผสม แก้วลอย มวลรวมจากวัสดุรีไซเคิล วัสดุนาโน

1.2 บทนำ

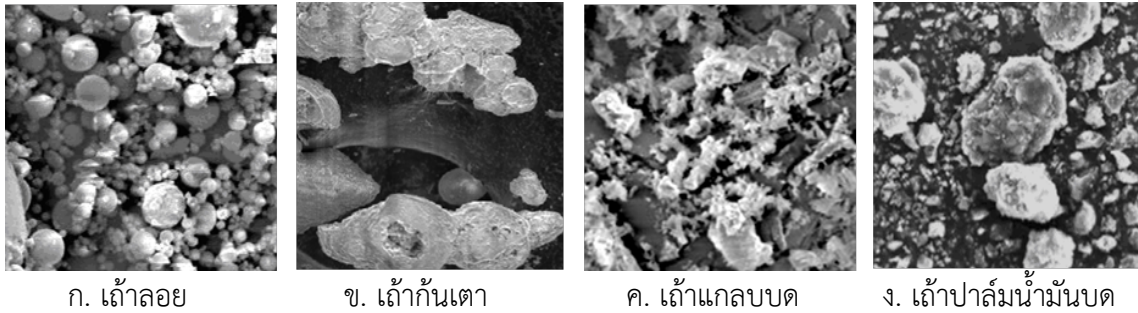
วัสดุก่อสร้างที่สำคัญและใช้งานกันมากที่สุดได้แก่คอนกรีต ซึ่งมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ในประเทศไทยมีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กว่าปีละ 40 ล้านตัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก กระบวนการผลิตใช้หินปูนซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบหลัก ในการผลิตจะเผาส่วนผสมให้ได้ปูนเม็ดที่มีคุณสมบัติที่ต้องการโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกมาจำนวนมาก

จากการเผาวัตถุดิบและจากเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยการผลิตปูนซีเมนต์หนึ่งตันมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกือบหนึ่งตันเช่นกัน (Malhotra, 2002) หรือคิดเป็น 5-6% ของก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นทั่วโลก คาดว่าในปัจจุบันทั่วโลกมีการผลิตปูนซีเมนต์ประมาณ 4,000 ล้านตัน (<https://geopolymerhouses.wordpress.com/2011/09/18/a-blueprint-for-a-climate-friendly-cement-industry/>, 2017) คิดเป็นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 3,000 ล้านตัน

ดังนั้นควรลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลาน เพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารซีเมนต์คาร์บอนต่ำ เช่น ปูนซีเมนต์ Belite (Rungchet et al. 2016; Rungchet et al. 2017) และปูนซีเมนต์ทำจากของเถ้าลอยผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium carbide) (Dueramae et al. 2017) และสารซีเมนต์จากการกระตุ้นด้วยด่าง (Alkali-activated binder) (Davidovits, 1999; Hardjito et al. 2004; Chindaprasirt and Rattanasak, 2017; Detphan and Chindaprasirt, 2009) สารซีเมนต์เหล่านี้มีคุณสมบัติคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า เนื่องจากการผลิตมีการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำหรือสามารถใช้วัสดุที่ได้จากของเสียจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมในอุตสาหกรรมต่างๆ มีของเสียที่สามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ เช่น เศษคอนกรีต เศษอิฐ เศษกระเบื้อง เศษแก้ว มีงานวิจัยหลายโครงการที่ศึกษาถึงการนำวัสดุเหล่านี้มาปรับปรุงเพื่อใช้เป็นมวลรวมจากวัสดุรีไซเคิล (Recycled aggregate) ในส่วนผสมคอนกรีต (Chindaprasirt et al. 2015; Posi et al. 2015; Nuaklong et al. 2016; Phonphuak et al. 2016) และพบว่ามวลรวมจากวัสดุรีไซเคิลสามารถใช้เป็นวัสดุในการทำคอนกรีตได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยการปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และคอนกรีตเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต วัสดุนาโน (Nano-materials) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ คอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์ได้ดี (Jittabut et al. 2016; Phoo-ngernkham et al. 2014) ช่วยให้เกิดการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตได้เหมาะสม หลากหลายรูปแบบ และยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

1.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานา (Portland pozzolana cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลานาทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมสารปอซโซลาน สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลง วัสดุปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนมีหลากหลายชนิดในประเทศไทย เช่น เถ้าลอย เถ้าถ่านเตา (เถ้าหนัก) เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน รูปที่ 1.1 แสดงรูปร่างของเถ้าประเภทต่าง ๆ สารปอซโซลานเป็นสารประกอบที่มี ซิลิกา (Silica) และ/หรือ อะลูมินา (Alumina) ในปริมาณสูง และมีความสามารถในการทำปฏิกิริยา ในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซิลิกาและอะลูมินาจะทำปฏิกิริยากับสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calciumhydroxide) ได้เป็นสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.1 รูปร่างของเถ้าประเภทต่าง ๆ

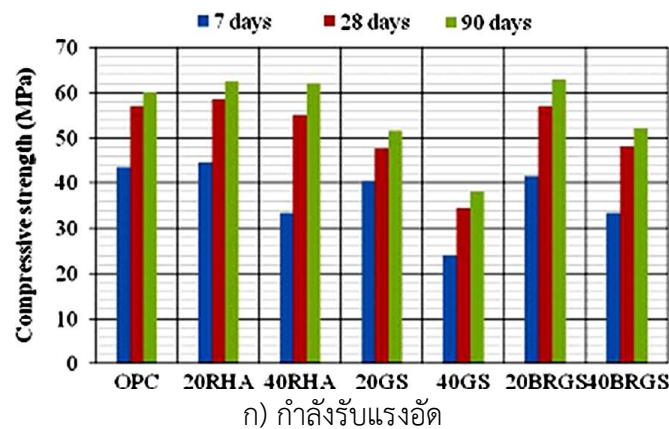
เถ้าลอยเป็นวัสดุที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างกว้างขวาง สำหรับประเทศไทยมีเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและโรงไฟฟ้าขนาดเล็กอื่นๆ ประมาณ 3.5-4.0 ล้านตัน/ปี เถ้าลอยแม่เมาะเป็นสารปอซโซลานที่ได้มีการศึกษาและวิจัยอย่างจริงจัง ทำให้สามารถนำไปใช้งานมากที่สุดเนื่องจากมีคุณภาพค่อนข้างดี อนุภาคกลม มีองค์ประกอบคงที่ เถ้าก้นเตาหรือเถ้าหนักมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับเถ้าลอย จึงสามารถใช้เป็นสารปอซโซลานได้แต่ต้องผ่านการบดละเอียด

การใช้วัสดุปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสมทำให้คอนกรีตมีกำลังดีขึ้นได้ สามารถลดการซึมผ่านได้ ลดขนาดและปริมาตรของโพรงในซีเมนต์เพสต์ทำให้ความทนทานดีขึ้น วัสดุปอซโซลานละเอียดมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วขึ้น ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสม่ำเสมอและแน่นขึ้น เนื่องจากอนุภาคของวัสดุปอซโซลานที่มีขนาดเล็กเมื่อกระจายตัวในเพสต์ นอกจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานหลักแล้ว สารปอซโซลานยังทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้น (Nucleation site) ในการเกิดปฏิกิริยา และยังทำหน้าที่ช่วยอุดช่องว่าง (Filler effect) ทำให้เพสต์มีเนื้อแน่นขึ้นด้วย (Rukzon and Chindaprasirt, 2013) การใช้วัสดุปอซโซลานช่วยทำให้ความทนทานดีขึ้น โดยมีความต้านทานต่อการทำลายของสารซัลเฟต และกรดดีขึ้น การต้านทานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์ก็ดีขึ้นเช่นกัน จากการที่เพสต์มีเนื้อแน่นขึ้นและมีปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง แต่จะมีความสามารถในการต้านทานการคาร์บอนเนชัน (Carbonation) ลดลงบ้าง และจากการทดลองยังพบว่าวัสดุปอซโซลานเหล่านี้สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำจีโอโพลิเมอร์ได้ด้วย เนื่องจากมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก (Davidovits, 1999; Hardjito et al. 2014; Pangdaeng et al. 2015)

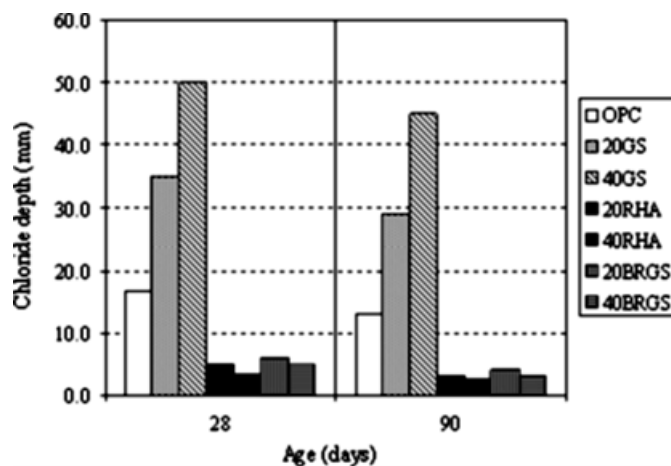
นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารปอซโซลานร่วมกัน (Pangdaeng et al. 2015) หรือร่วมกับวัสดุเหนียว เช่นทรายบด (Chindaprasirt and Rukzon, 2015) ทำให้สมบัติของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบและทรายบด (BRGS) ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.2 กำลังและการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทรายบดอย่างเดียวแทนที่ปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เกิดจากความร่วมมือกัน (Synergic effect) ในการพัฒนาสมบัติของเถ้าแกลบและทรายบด

1.4 จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

ปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ชื่อ “จีโอโพลิเมอร์” (Geopolymer) เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (Si) และอะลูมินา (Al) และสารละลายต่าง ซึ่งหลักการผลิตจีโอโพลิเมอร์ คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินาที่ชะละลายจากวัสดุตั้งต้นในสารละลายต่าง ปฏิกิริยาทำให้ได้โครงสร้างที่เป็นโมเลกุลลูกโซ่เชื่อมต่อกันคล้ายกับการเชื่อมต่อกันของโพลิเมอร์ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวและรับแรงได้เหมือนกับการใช้ปูนซีเมนต์ธรรมดา การนำสารจีโอโพลิเมอร์มาใช้นอกจากช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์แล้ว ยังเป็นการนำผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาใช้ประโยชน์อีกทางหนึ่ง

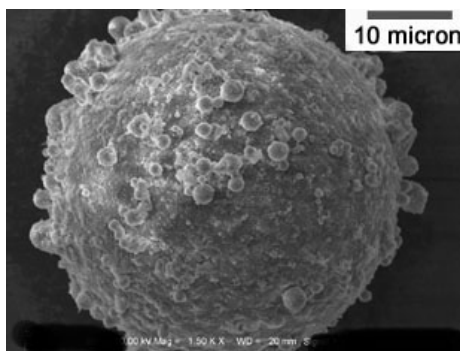


(OPC=ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ RHA=เถ้าแกลบ GS=ทรายบด BRGS=เถ้าแกลบและทรายบด)

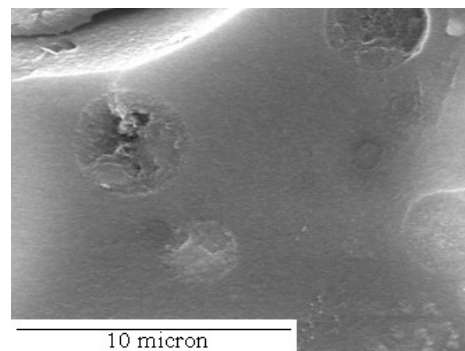


รูปที่ 1.2 กำลังรับแรงอัดและความต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าแกลบและทรายบด (Chindapasirt and Rukzon, 2015)

เถ้าลอยแม่เมาะมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก เหมาะสำหรับการใช้เป็นวัสดุสำหรับการทำจีโอโพลิเมอร์ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซิลิเกตเป็นสารละลาย ไอออนของ Si^{4+} และ Al^{3+} จะถูกชะละลายออกมาผสมอยู่ในสารละลายต่าง (Rattanasak and Chindaprasirt, 2009) เกิดเจลรูปทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-2.0 ไมโครเมตรที่พื้นผิวของอนุภาค เถ้าลอยดังแสดงในรูปที่ 1.3 และมีเจลที่อยู่ในรูปแบบของคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรไปจนถึง 20 ไมโครเมตรกระจายอยู่ เมื่อขนาดของเจลใหญ่ขึ้นจะมีการรวมกันและกลายเป็นจีโอโพลิเมอร์จากพันธะของอลูมิโน-ซิลิเกต (Alumino-silicate geopolymer) ที่ค่อนข้างเหนียวแน่น จากรูปที่ 1.3 พบว่าเถ้าลอยยังคงมีเถ้าลอยหลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้เถ้าชนิดอื่น เช่น เถ้าแกลบ (Detphan and Chindaprasirt, 2009) ก็สามารถใช้เป็นวัสดุในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้



ก) การเกิดเจลที่ผิวของอนุภาคเถ้าลอย



ข) เนื้อเพสต์ที่แน่นของจีโอโพลิเมอร์

(Rattanasak and Chindaprasirt, 2009)

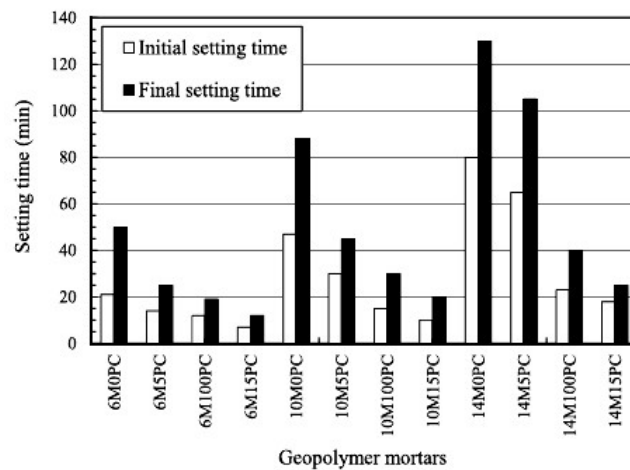
รูปที่ 1.3 การเกิดเจลที่ผิวของอนุภาคเถ้าลอยและเนื้อเพสต์ที่แน่นของจีโอโพลิเมอร์ที่ก่อตัวแล้ว

สมบัติของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยแคลเซียมสูงขึ้นอยู่กับสมบัติของสารตั้งต้นและสารละลายที่ใช้ วัสดุปอซโซลานละเอียดให้จีโอโพลิเมอร์ที่แข็งแรงขึ้น อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกตที่ให้สมบัติทางกลที่ดีอยู่ที่ 1:1 (Chindaprasirt et al., 2017) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อสมบัติทางกลด้วย ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ควรอยู่ในช่วง 8-12 โมล (Somna et al., 2011) ความแข็งแรงของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่มีขนาดละเอียดจะทำให้การชะละลายซิลิกาและอะลูมินาดี ส่งผลให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้มากขึ้น และทำให้ได้กำลังสูงขึ้น (Chindaprasirt et al., 2011)

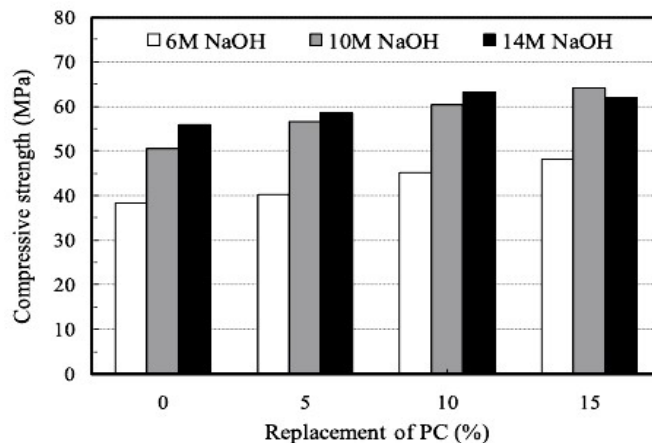
ปัญหาการใช้งาน ของจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยคือการบ่มร้อนเพื่อให้วัสดุแข็งตัวได้เร็วขึ้น จึงได้พัฒนาปัญหาจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยที่สามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ช่วย สารประกอบแคลเซียมออกไซด์จะช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้กำลังสูงขึ้น (Phoo-ngernkham et al., 2015; Phoo-ngernkham et al., 2016) ดังแสดงในรูปที่ 1.4

1.5 คอนกรีตมวลรวมจากวัสดุรีไซเคิล (Recycled Aggregate Concrete)

การใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมซึ่งใช้ประโยชน์ไม่ได้แล้วกลับมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลวัสดุ (Recycling) ได้รับการยอมรับมากขึ้นเพราะนอกจากช่วยลดการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติแล้ว ยังช่วยแก้ไขปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมจากการทำให้ปริมาณขยะและสิ่งย่อยสลายยากลดลง นอกจากนี้ยังได้วัตถุดิบที่มีราคาต่ำกว่าวัตถุดิบใหม่ ในอุตสาหกรรมก่อสร้างเองก็มีของเสียที่สามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ เช่น เศษคอนกรีต เศษอิฐ เศษกระเบื้อง เศษแก้ว มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาถึงการนำวัสดุเหล่านี้มาปรับปรุงเพื่อใช้เป็นมวลรวมจากวัสดุรีไซเคิล (Recycled aggregate) (Chindaprasirt et al., 2015; Posi et al., 2015; Nuaklong et al., 2016; Phonphuak et al., 2016) ในส่วนผสมคอนกรีต



ก) เวลาการก่อตัว

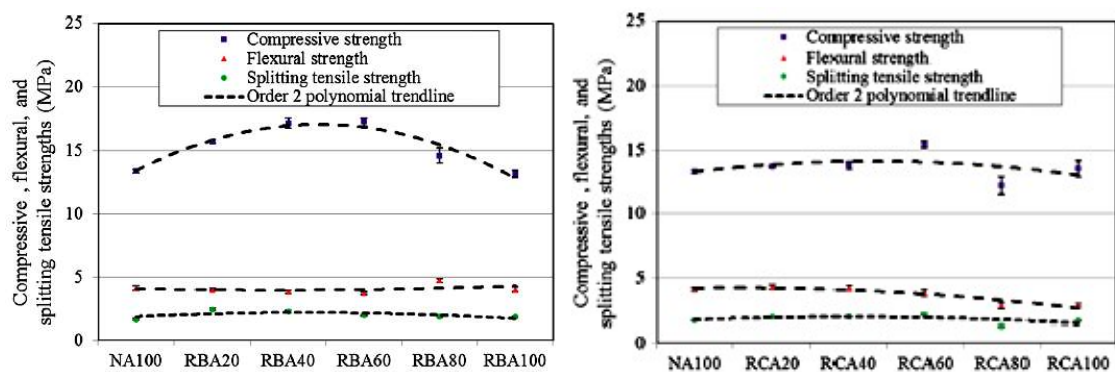


ข) กำลังรับแรงอัด

รูปที่ 1.4 จีโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Phoo-ngernkham et al., 2016)

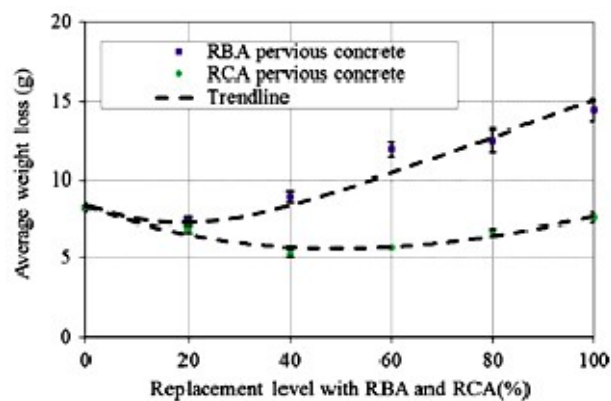
มวลรวมจากวัสดุรีไซเคิลที่มีความสำคัญและเป็นที่นำมาใช้ได้แก่มวลรวมจากคอนกรีตเก่า (Recycled concrete aggregate) เนื่องจากมีปริมาณค่อนข้างมาก จากการวิจัยพบว่า โดยทั่วไปกำลังรับ

แรงของคอนกรีตทำด้วยมวลรวมจากคอนกรีตเก่าจะลดลงบ้าง เนื่องจากมวลรวมจากคอนกรีตเก่าไม่สะอาด มีสิ่งแปลกปลอมเจือปน และมีเศษมอร์ตาร์ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมเดิม และมอร์ตาร์ส่วนใหญ่มีความพรุนสูงทำให้การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น แต่ถ้าสามารถใช้คอนกรีตเก่าที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมเจือปน จะสามารถทำให้สมบัติของคอนกรีตดีขึ้นได้ (Zaetang et al., 2016) เนื่องจากผิวของคอนกรีตเก่ามีความหยาบเพิ่มขึ้น การยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับเพสต์ดีขึ้น เป็นผลให้คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมจากคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมธรรมชาติบางส่วนมีสมบัติต้านกำลังและการทนทานต่อการขัดสีดีขึ้นได้ดังแสดงในรูปที่ 1.5 กำลังรับแรงอัดและการสึกกร่อนจากการขัดสีของคอนกรีตพูนมวลรวมธรรมชาติแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตบล็อก 50% มีค่าดีกว่าคอนกรีตพูนมวลรวมธรรมชาติอย่างชัดเจน และกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงดึงแยกก็มีค่าไม่ลดลง และกำลังรับแรงของคอนกรีตพูนมวลรวมธรรมชาติแทนที่ด้วยมวลรวมจากคอนกรีตเก่ามีใกล้เคียงกับคอนกรีตพูนมวลรวมธรรมชาติ



ก) กำลังรับแรง

(NA= มวลรวมหินปูน, RBA=มวลรวมคอนกรีตบล็อก, RCA=มวลรวมคอนกรีตเก่า)



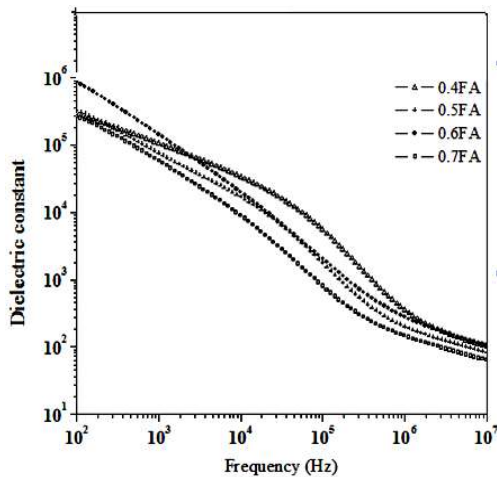
ข) การสูญเสียน้ำหนักจากการขัดสี

รูปที่ 1.5 คอนกรีตพูนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมมวลรวมหินปูนแทนที่ด้วยมวลรวมคอนกรีตเก่า และมวลรวมอิฐดินเผา (Zaetang et al., 2016)

1.6 ซีเมนต์ผสมวัสดุนาโน (Nano Cement Composite)

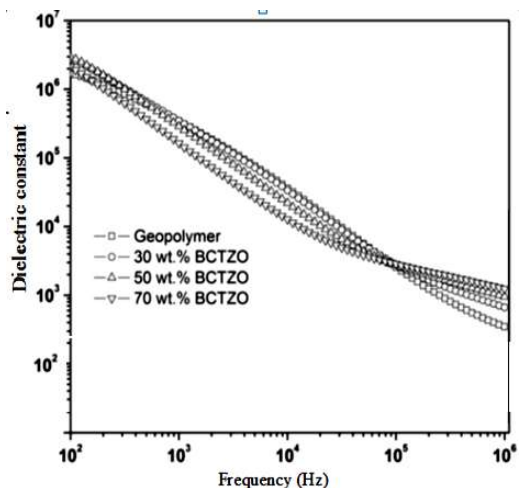
อีกวิธีการหนึ่งที่สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้คือปรับปรุงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และคอนกรีตเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต วัสดุผสมเพิ่มหลายชนิด ได้แก่ วัสดุนาโน (Nano-materials) วัสดุเสริมกำลัง และสารเคมีผสมเพิ่ม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุผสมปูนซีเมนต์และคอนกรีตได้ การใช้วัสดุนาโนเป็นเรื่องค่อนข้างใหม่ และมีผลกระทบที่ดีต่อเทคโนโลยีวัสดุก่อสร้างและสารผสมซีเมนต์ ความเข้าใจถึงพฤติกรรมหรือโครงสร้างอันซับซ้อนของวัสดุผสมซีเมนต์ระดับนาโนถือว่าเป็นสิ่งสำคัญที่จะให้ได้วัสดุก่อสร้างที่มีความแข็งแรงและทนทาน มีพฤติกรรมตอบสนองต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ (Physics) และไฟฟ้า (Electrical) ที่ดี ซึ่งช่วยให้เกิดการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตที่เหมาะสม หลากหลายรูปแบบ และยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

สมบัติทางฟิสิกส์ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหินของประเทศไทยยังเป็นที่น่าสนใจ และเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพัฒนาวัสดุนาโนอนาคต Hanjitsuwan และคณะ (2011) ได้รายงานไว้ที่ช่วงความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ -10 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำจากเถ้าถ่านหินมาเมะที่มีแคลเซียมสูงขึ้นอยู่กับช่วงความถี่และอัตราส่วนของสารละลายต่อเถ้าถ่านหิน ($L/A = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$) ในการใส่สาร $0-3 \text{ Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$ (BCTZO) ในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าถ่านหินมาเมะ (Chindaprasirt et al., 2008) พบว่าสามารถเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 1.6 จึงคาดว่าน่าจะมีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุนาโนไอออนที่รวดเร็วสำหรับงานแบตเตอรี่แบบแข็งและเซนเซอร์ไฟฟ้าเคมี



ก) จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าถ่านหินมาเมะ

(Hanjitsuwan et al., 2011)



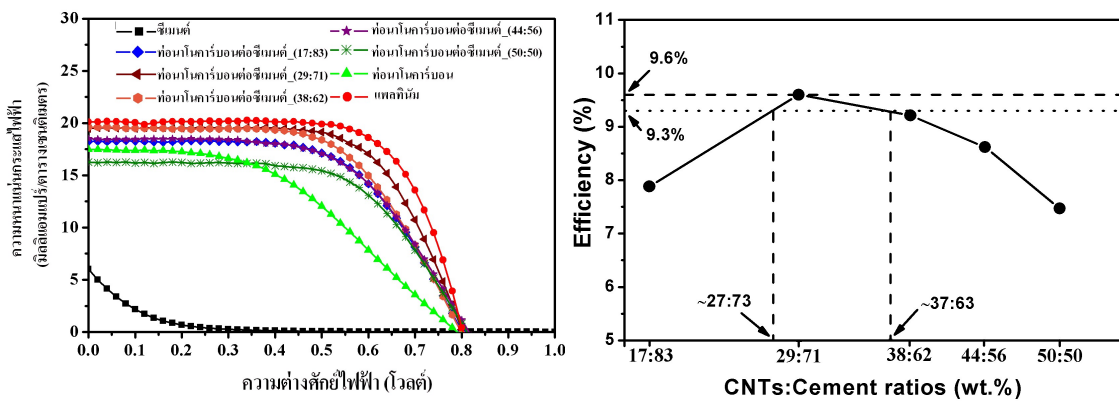
ข) ผสมสาร BCTZO

(Chindaprasirt et al., 2016)

รูปที่ 1.6 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าถ่านหินมาเมะธรรมดา และที่ผสมสาร $0-3 \text{ Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$ (BCTZO)

นอกจากนี้การใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์สามารถพัฒนาและนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Chindaprasirt et al., 2016) ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีใกล้เคียงกับโลหะแพลทินัม โดยใช้ซีเมนต์เป็นตัวประสานช่วยทำให้ท่อนาโนคาร์บอนสามารถติดกับชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสงที่เคลือบอยู่บนกระจกโปร่งแสงได้ และสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยที่ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 9.60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพเท่ากับ 85.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 1.7

การศึกษาวัดคุณสมบัติและจีโอโพลิเมอร์ผสมวัสดุที่มีอนุภาคนาโนนั้นเป็นที่น่าสนใจมาก เพราะสามารถปรับปรุงสมบัติให้มีความหลากหลาย ซึ่งงานวิจัยในส่วนนี้ยังมีไม่มากและต้องการการศึกษาเพิ่มเติม



รูปที่ 1.7 ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าท่อนาโนคาร์บอนผสมซีเมนต์ (Chindaprasirt et al., 2016)

1.7 สรุป

มาตรการในการลดการเพิ่มการใช้งานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถทำได้โดย

1. ใช้สารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน วัสดุปอซโซลานมีหลากหลายชนิดในประเทศไทย เช่น เถ้าลอย เถ้าก้นเตา (เถ้าหนัก) เถ้าแกลบ และเถ้าปาล์มน้ำมัน นอกจากสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลาน แล้วอนุภาคที่ละเอียดสามารถเป็นวัสดุแทรกที่อุดช่องว่าง ช่วยเพิ่มสมบัติการความคงทนให้คอนกรีตได้

2. ใช้ซีเมนต์คาร์บอนต่ำ ได้แก่ สารซีเมนต์จากการกระตุ้นด้วยด่างหรือจีโอโพลิเมอร์ สารตั้งต้นที่ใช้ได้ดี และมีอยู่ในประเทศจำนวนมากคือเถ้าลอยแคลเซียมสูง ส่วนผสมที่เหมาะสมได้แก่ อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต 1:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8-12 โมลาร์ และโดยเถ้าที่

ละเอียดให้จีโอโพลิเมอร์ที่แข็งแรงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เร่งปฏิกิริยาให้ก่อตัวได้ดีและทำให้ได้กำลังสูงขึ้น

3. การแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยมวลรวมจากวัสดุรีไซเคิล ที่สำคัญได้แก่มวลรวมจากคอนกรีตเก่า จากการวิจัยพบว่า โดยทั่วไปกำลังรับแรงของคอนกรีตทำด้วยมวลรวมจากคอนกรีตเก่าจะลดลงบ้างเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมเจือปนและมีเศษมอร์ตาร์ติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมเดิม การใช้คอนกรีตเก่าที่ไม่มีสิ่งแปลกปลอมเจือปนจะสามารถทำให้สมบัติของคอนกรีตดีขึ้นได้ เนื่องจากผิวของคอนกรีตเก่ามีความหยาบเพิ่มขึ้น การยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับเพสต์ดีขึ้น เป็นผลให้คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมจากคอนกรีตเก่าแทนที่มวลรวมธรรมชาติบางส่วนมีสมบัติด้านกำลังและการทนทานต่อการขัดสีดีขึ้นได้

4. การปรับปรุงคุณสมบัติของสารซีเมนต์และคอนกรีต โดยใช้วัสดุนาโน (Nano-materials) ความเข้าใจถึงพฤติกรรมหรือโครงสร้างอันซับซ้อนของวัสดุผสมซีเมนต์ระดับนาโนถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ การใส่วัสดุนาโน เช่น $0-3 \text{ Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$ (BCTZO) ในจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยแม่เมาะ ทำให้สามารถเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กทริกได้อีก นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์สามารถพัฒนาและนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

1.8 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้โครงการเมธีวิจัยอาวุโส สกว. ประจำปี พ.ศ. 2557 (RTA5780004) และบริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด

1.9 เอกสารอ้างอิง

- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S., and Cao, T. (2011). High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 23(3), 2264-270.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivananon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, 29(3), 224-229.
- Chindaprasirt, P., Jarernboon, W., Amornkitbamrung, V. and Ratchapolthavisin, N. (2016). Carbon nanotube-cement composite composition for catalysis on counter electrodes of dye sensitized solar cells. WO2016/175714 A1, Nov. 3.
- Chindaprasirt, P., Nuaklong, P., Zaetang, Y., Sujumnongtokul, P., and Sata, V. (2015). Mechanical and thermal properties of recycled lightweight aggregate pervious concrete. **Arabian journal of Science**, 40(2), 443-450.

- Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. (2017 in press). Characterization of the ultra-high calcium fly ash geopolymer with hot-weather curing systems for sustainable building materials. **Advanced Powder Technology**.
- Chindaprasirt, P. and Rukzon, S. (2015). Strength and chloride resistance of the blended Portland cement mortar containing rice husk ash and ground river sand. **Materials and Structures**, **48**(11), 3771-3777.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S., and Sirivivatnanon, V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. **Construction and Building Materials**, **22**(5), 932-938.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology, Geopolymer'99 International Conference, eds. France, 9-40.
- Detphan, S. and Chindaprasirt, P., (2009). Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, **16**(6), 720-726.
- Dueramae, S., Tangchirapat, W., Chindaprasirt, P., and Jaturapitakkul, C. (2017). Influence of activation methods on strength and chloride resistance of concrete using calcium carbide residue-fly ash mixture as a new binder. **Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)**, **29**(4), art. no. 04016265
- Hanjitsuwan, S., Chindaprasirt, P., and Pimraksa, K. (2011). Electrical conductivity and dielectric property of fly ash geopolymer pastes. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, **18**(1), 94-99.
- Hardjito, D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J., and Rangan B.V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. **ACI Material Journal**, **101**(6), 467-472.
- <https://geopolymerhouses.wordpress.com/2011/09/18/a-blueprint-for-a-climate-friendly-cement-industry/> accessed 1 July, 2017.
- Jittabut, P., Pinitsoontorn, S., Thongbai, P., Amornkitbamrung, V., and Chindaprasirt, P. (2016). Effect of nano-silica addition on mechanical properties and thermal conductivity of cement composites. **Chiang Mai Journal of Science**, **43**(5), 1160-1170
- Malhotra, V.M. 2002. Introduction: sustainable development and concrete technology. **ACI Concrete International**, **24**(7), 22.

- Nuaklong, P., Chindaprasirt, P., and Sata, V. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. **Journal of Cleaner Production**, **112**, 2300-2307.
- Pangdaeng, S., Sata, V., Aguiar, J.B., Pacheco-Torgal, F., and Chindaprasirt, P. (2015). Apatite formation on calcined kaolin-white Portland cement geopolymer, **Materials Science and Engineering: C**, **51**, 1-6.
- Phonphuak, N., Kanyakam, S., and Chindaprasirt, P. (2016) Utilization of waste glass to enhance physical-mechanical properties of fired clay brick. **Journal of Cleaner Production**, **112**, 3057-3062.
- Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S., and Hatanaka, S. (2014). The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Mat and Design**, 58–65.
- Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridditirud, C., Hatanaka, S., and Chindaprasirt, P. (2015). High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material. **Construction and Building Materials**, **98**, 482-488.
- Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridditirud, C., Hatanaka, S., and Chindaprasirt, P. (2016). Compressive strength, bending and fracture characteristics of high calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement cured at ambient temperature. **Arabian Journal of Science and Engineering**, **41**, 1263-1271.
- Posi, P., Ridditirud, C., Ekvong, C., Chammanee, D., Janthowong, K. and Chindaprasirt, P. (2015). Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. **Construction and Building Materials**, **94**, 408-413.
- Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. **Minerals Engineering**, **22**(12), 1073-1078.
- Rukzon, S. and Chindaprasirt, P. (2013). Strength, porosity and chloride resistance of mortar using combination of two kinds of the pozzolanic materials. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, **20**(8), 808-814.
- Rungchet, A., Chindaprasirt, P., Wansom, S., and Pimraksa, K. (2016). Hydrothermal synthesis of calcium sulfoaluminate-belite cement from industrial waste materials. **Journal of Cleaner Production**, **115**, 273-283.
- Rungchet, A Poon, C. S. , P. Chindaprasirt, K. Pimraksa, (2017). Synthesis of low-temperature calcium sulfoaluminate-belite cements from industrial wastes and

their hydration: Comparative studies between lignite fly ash and bottom ash.

Cement and Concrete Composites, **83**, 10-19.

Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. **Fuel**, **90**(6), 2118-2124.

Zaetang, Y. Wongs, A. Sata, V. and Chindaprasirt, P. (2016). Properties of Pervious Concrete Containing Recycled Concrete Block Aggregate and Recycled Concrete Aggregate. **Construction and Building Materials**, **111**, 15-21.

บทที่ 2

การพัฒนาเฮมพ์คอนกรีต (คอนกรีตผสมแกนกัญชง)

Development of hemp concrete

ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี¹, Email: saksit.pantawee@gmail.com

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ², Email: sinsiri@g.sut.ac.th

ศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³, Email: chai.jat@kmutt.ac.th

ศาสตราจารย์ ดร. ปริญญ์ จินดาประเสริฐ⁴, Email: prinya@kku.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

⁴ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

2.1 บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอความเป็นไปได้ในการนำแกนเฮมพ์มาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต แกนเฮมพ์จะถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย อลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ก่อนที่จะนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบเพื่อผลิตเป็นเฮมพ์คอนกรีต จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการใช้ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ เพื่อปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้น โดยมากกว่าเฮมพ์คอนกรีตควบคุมที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพถึง 4 เท่า

คำสำคัญ: แกนเฮมพ์; เฮมพ์คอนกรีต; อลูมิเนียมซัลเฟต; แคลเซียมไฮดรอกไซด์; กำลังอัด

Abstract

This research presents the potential of hemp shiv for use as coarse aggregate in concrete. Hemp shiv was mineralized with aluminium sulfate $Al_2(SO_4)_3$ and calcium hydroxide $Ca(OH)_2$ before being used as a coarse aggregate to produce hemp concrete. The results indicated that the application of $Al_2(SO_4)_3$ and $Ca(OH)_2$ for mineralization increased the compressive strength of hemp concrete by four times compared to that with non-mineralized hemp shiv.

Keywords: Hemp shiv; Hemp concrete; Aluminium sulfate; Calcium hydroxide; Compressive strength

2.2 บทนำ

เฮมพ์ (Hemp) หรือ “กัญชง” มีลักษณะใบและลำต้นใกล้เคียงกับกัญชามาก (รูปที่ 2.1) ทำให้การแยกแยะด้วยสายตาต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษ ทางพฤกษศาสตร์ เฮมพ์ มีชื่อเรียกว่า *Cannabis sativa* L. subsp. *sativa* ส่วนกัญชา (Marijuana) มีชื่อว่า *Cannabis sativa* L. subsp. *Indica* พืชทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบของสารกลุ่ม cannabinoids ที่ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท ได้แก่ Tetrahydro-cannabinol (THC) ออกฤทธิ์กระตุ้นประสาท ทำให้มีอาการตื่นเต้น ช่างพูด หัวเราะ และยังมีสาร Cannabidiol (CBD) ออกฤทธิ์ยับยั้งฤทธิ์ที่ทำให้เกิดอาการกระวนกระวาย (anxiety effect) ในกัญชามีสาร THC ประมาณ 5 ถึง 15% และมีปริมาณ THC สูงกว่า CBD ในขณะที่เฮมพ์มีปริมาณ THC เพียงประมาณ 0 ถึง 1.0% และมีสัดส่วน CBD:THC มากกว่า 2:1 (สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน), 2553) ในปัจจุบันมีการปลูกเฮมพ์เพื่อใช้งานอุตสาหกรรมต่างๆ ในหลายประเทศ เช่น ประเทศจีน และหลายประเทศในทวีปยุโรป (รัสเซีย ฝรั่งเศส ยูเครน อังกฤษ เยอรมัน โปแลนด์ และฟินแลนด์) รวมทั้งประเทศแคนาดา เป็นต้น (DeeDee De Miranda, 2011)



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะใบและลำต้นของเฮมพ์และกัญชา (Minister of Hemp, 2016)

ในประเทศไทยการปลูกและใช้เส้นใยจากเฮมพ์ยังอยู่ในวงจำกัดเฉพาะชาวไทยภูเขาเผ่าม้ง เนื่องจากคณะกรรมการควบคุมยาเสพติดให้โทษ กำหนดให้เฮมพ์เป็นพืชเสพติดประเภท 5 ตามพระราชบัญญัติยาเสพติดให้โทษ พ.ศ. 2522 แต่ต่อมาในปีพุทธศักราช 2547 สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ มีพระราชประสงค์ให้มีการศึกษาและส่งเสริมเกษตรกรชาวไทยภูเขาปลูกเฮมพ์ เพื่อใช้ในครัวเรือนและจำหน่ายสู่ตลาด รวมทั้งเป็นการส่งเสริมอาชีพและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกร (สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน), 2553) ขณะเดียวกันได้มีการศึกษาและวิจัยโดยมูลนิธิโครงการหลวง สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) จนสามารถปลูก พัฒนา และคัดเลือกสายพันธุ์เฮมพ์ให้มีสารเสพติดต่ำและสามารถขึ้นทะเบียนรับรองสายพันธุ์ได้

ภายหลังได้มีการกระทรวง ที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เมื่อวันที่ 6 มกราคม 2560 เรื่อง การขออนุญาตและการอนุญาตผลิต จำหน่าย หรือมีไว้ในครอบครองเฮมพ์นั้น ต้องเป็นไปตามกฎกระทรวงที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา ที่ระบุให้ “เมล็ดพันธุ์รับรอง” มีปริมาณ THC ได้น้อยกว่า 1.0% ของน้ำหนักแห้ง และมีหลักเกณฑ์การตรวจวิเคราะห์ตามที่กำหนด ทั้งนี้ ตามที่คณะกรรมการประกาศกำหนด โดยการตรวจวิเคราะห์ของห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ และเป็นพันธุ์พืชที่ขึ้นทะเบียนตามกฎหมายว่าด้วยพันธุ์พืช ซึ่งผลิตโดยผู้รับอนุญาตผลิตยาเสพติดให้โทษในประเภท 5 เฉพาะเฮมพ์ (ราชกิจจานุเบกษา, 2560)

เฮมพ์สามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน เช่น เมล็ด เปลือก และแกนของลำต้น ผลผลิตที่เป็นเมล็ดสามารถนำไปทำเป็นโปรตีนผง แชมพู เครื่องสำอาง สบู่ โปรตีนเฮมพ์ น้ำมันเฮมพ์ ไอศกรีมเฮมพ์ น้ำมันหอมระเหย ขน และเค้กเฮมพ์ ในส่วนผลผลิตจากเส้นใยเฮมพ์ในการเก็บเกี่ยวแต่ละครั้งจะได้ปริมาณเส้นใยประมาณ 20 ถึง 30% (Vantreese, 1998) (รูปที่ 2.2 (ก)) สามารถนำไปทำเป็นเสื้อผ้า หมวก ผ้าเช็ดตัว กระเป๋า รองเท้า วัสดุทดแทนสิ่งทอ เสื่อเกราะกันกระสุน เป็นต้น และสำหรับผลผลิตในส่วนที่เป็นลำต้นหรือแกนเฮมพ์ (รูปที่ 2.2 (ข)) สามารถทำเป็นกระดานหรือบอร์ด กระเป๋าเดินทาง ชองใส่แผ่นซีดี กระดาษคอนโซลรถยนต์ เฮมพ์กรีต ฉนวนกันความร้อน และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เนื่องจากลำต้นหรือแกนเฮมพ์ มีความแข็งแรง มีรูพรุนภายในที่สามารถระบายอากาศได้ดี และมีน้ำหนักเบา (ธงชัย พุ่มพวง, 2558)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.2 ผลผลิตจากเฮมพ์ (Hemp shiv) ; (ก) เส้นใยเฮมพ์ (ข) แกนเฮมพ์ที่ผ่านการย่อย

ในการเก็บเกี่ยวเฮมพ์ จะมีปริมาณแกนเฮมพ์ (Hemp shiv) ประมาณ 70 ถึง 80% ของผลผลิต (Vantreese, 1998) ในต่างประเทศมีการนำแกนเฮมพ์มาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอย่างกว้างขวาง โดยนำแกนเฮมพ์มาผสมรวมกับปูนขาว เรียกว่า เฮมพ์กรีต (Hempcrete) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในประเทศฝรั่งเศส ในช่วงต้นคริสต์ศักราช 1990 (Peev and Saxgren, 2012) เฮมพ์กรีตสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างได้หลายประเภท เช่น ผนัง พื้น และหลังคา โดยใช้วิธีการอัดเข้าแบบหล่อ หล่อเป็นบล็อก หรือ

โดยการฉีดยา โดยทั่วไปผนังเฮอร์มิติกจะถูกฉาบทั้งสองด้าน แต่บางครั้งอาจมีการใช้งานในรูปแบบผนังเปลือย (Bare wall) ภายในตัวอาคาร (Collet and Pretot, 2014) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเฮอร์มิติกมีความสามารถในการรับแรงอัดได้ค่อนข้างต่ำ เพียงประมาณ 10 กก./ลบ.ซม. จึงนิยมใช้ในงานผนังแบบไม่รับน้ำหนัก (Peev and Saxgren, 2012)

ในการนำวัสดุผสมชีวภาพมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีต จำเป็นต้องผ่านกระบวนการบางอย่างเพื่อเป็นการเพิ่มสมรรถนะให้ดีขึ้นและเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากวัสดุเหล่านี้จะมีองค์ประกอบของ เซลลูโลส (Celluloses) ลิกนิน (Lignin) และเพกติน (Pectin) รวมทั้งเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การยึดเกาะไม่ดี เนื่องจากวัสดุชีวภาพดูดซับความชื้นไว้และส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมให้ลดลงไปด้วย (วันดี ธรรมจารี, 2558) โดยอาจใช้สารเคมีได้หลากหลายชนิด เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Abraham et al., 2013; Blankenhorn et al., 2001; Sedan et al., 2008) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) (Bottryk and Małaszkiwicz, 2017) หรือ อลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) (Balciunas et al., 2015; Bottryk and Małaszkiwicz, 2017) เป็นต้น ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะช่วยปรับปรุงสมรรถนะของวัสดุชีวภาพให้ดีขึ้น และเมื่อนำมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตจะส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตดีขึ้นตามไปด้วย

เนื่องจากเฮอร์มิติกเป็นวัสดุก่อสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุผสมชีวภาพที่ทำจากปูนขาวและแกนเฮอร์มิติก จึงอาจจำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำแกนเฮอร์มิติกผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยเลือกใช้อลูมิเนียมซัลเฟต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ก่อนนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีตเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานก่อสร้างได้จริง และเป็นการรองรับการปลูกเฮอร์มิติกในอนาคต

2.3 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

2.3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1) แกนเฮอร์มิติกจากศูนย์วิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (The Highland Research and Development Institute (Public Organization; HRDI)) มีความกว้างจำเพาะ 0.6 และความหนาแน่นเหมารวม (แบบแห้ง) 120 กก./ลบ.ม. โดยทำการร่อนผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว และใช้ส่วนที่ค้ำเบอร์ 4 (35%) และส่วนที่ค้ำเบอร์ 8 (65%) ขนาดคละของแกนเฮอร์มิติกและทราย แสดงในตารางที่ 2.1

2) อลูมิเนียมซัลเฟต $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (pH = 3.15) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (purity of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ of 90.2% (ASTM C 25); 3.60% retained on 170 mesh and 8.80% retained on 325 mesh (ASTM C 110), moisture content of 0.33%) ในการปรับปรุงคุณภาพ

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Blaine surface area of $348 \text{ m}^2/\text{kg}$) Conformed to the Thai Industrial Standard for Portland cement type I TIS 15-2012, ASTM C 150 Type I and the British Standard B.S.12 (for Ordinary Portland cement)

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของแกนเฮมพ์และทราย (สภาวะแห้งในอากาศ)

Individual size fraction	Hemp shiv, %	Sand, %
9.50 mm (3/8 in.) to 4.75 mm (No. 4)	35	-
3.75 mm (No. 4) to 2.36 mm (No. 8)	65	-
2.36 mm (No. 8) to 1.18 mm (No. 16)	-	14
1.18 mm (No. 16) to 600 μ m (No. 30)	-	41
600 μ m (No. 30) to Pan	-	45
Total	100	100

4) น้ำสะอาด

5) สารลดน้ำจำนวนมาก

2.3.2 สัดส่วนผสม

ใช้อลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; pH = 3 ถึง 5) ในการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ก่อนที่จะปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$; pH = 11 ถึง 12) (Balciunas et al., 2015; Bołtryk and Małaszewicz, 2017) และใช้น้ำสำหรับกระบวนการเตรียมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 1.5 เท่าโดยน้ำหนักของแกนเฮมพ์ (HS)

ในการศึกษานี้เป็นการปรับปรุงสัดส่วนผสม (Balciunas et al., 2015) โดยใช้อัตราส่วนเฮมพ์ต่อซีเมนต์ (HS/C) = 0.16, อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย (C/S) = 1:2, อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) = 0.48, ใช้สารลดน้ำจำนวนมาก (SP) 1% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ (แสดงไว้ในตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนผสมโดยใช้ปริมาณสารประกอบต่างกัน

Mix	HS (kg/m ³)	HS/C	W/C	C/S	SP (%)	Water for mineralization	Complex mineralizer (%) HS mass	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (%) HS mass	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (%) HS mass
HCC	87	0.16	0.48	1:2	1	1.5xHS mass	0	0	0
HC0							18	18	0
HC1							30	10	20
HC3							54	18	36
HC4							63	21	42
HC5							81	27	54

2.3.3 การเตรียมตัวอย่าง

ทำการเตรียมสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต โดยใช้น้ำ 1.5 เท่าของน้ำหนักแกนเฮมพ์ จากนั้นนำไปผสมกับแกนเฮมพ์ในภาชนะ 3 นาที ทิ้งไว้ 15 นาที หลังจากนั้นนำ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เติลงไป คลุกเคล้าให้เข้ากัน

ภายในเวลา 90 วินาที ทันทีที่ขั้นตอนปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์เสร็จสิ้นลง ให้เริ่มเทน้ำผสมสารลดน้ำจำนวนมาก ใส่ลงในโม้ที่มีการเตรียมปูนซีเมนต์ไว้แล้ว ปล่อยให้ น้ำซึมเข้าไปในปูนซีเมนต์ 90 วินาที จึงเริ่มเปิดโม้ ระหว่างนั้นค่อยๆ เททรายลงไปจนได้เนื้อมอร์ตาร์ที่ดี แล้วจึงทยอยเทแกนเฮมพ์ลงในโม้ ผสมให้เสร็จภายในเวลา 3 นาที จากนั้นเทลงแบบหล่อต่างๆ เพื่อทำการทดสอบต่อไป

2.3.4 การทดสอบ

ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแกนเฮมพ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL JSM-6010LV scanning electron microscope (SEM) และทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเฮมพ์ โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายแสง X-ray Fluorescence XGT-5200 (ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกรายงานตามมาตรฐานของสารประกอบออกไซด์ 100%)

วิเคราะห์ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินโดยใช้วิธี Detergent fibre analysis (acid detergent fibre (ADF), neutral detergent fibre (NDF), acid detergent lignin (ADL), cellulose and hemicellulose based on Georing and Van Soest (1970), Van Soest (1991) and AOAC (2000))

การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction (XRD) analysis) ใช้ Bruce: D2 PHASER X-ray Diffractometer เพื่อตรวจสอบความเป็นผลึกของแกนเฮมพ์ การตรวจสอบได้ดำเนินการในช่วง 2θ ที่ 5 ถึง 80° ทำการคำนวณดัชนีความเป็นผลึกโดยเทคนิค XRD (C_{IXRD}) ของเซลลูโลส โดยใช้ Segal empirical method (Segal et al., 1959) ดังสมการ

$$C_{IXRD} = (I_{002} - I_{am}) / I_{002} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยที่ C_{IXRD} คือ ค่าดัชนีความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD

I_{002} คือ ความเข้มสูงสุดของการกระจายตัวของรังสีที่ตำแหน่ง 002 ที่ $2\theta = 22.5^\circ$

I_{am} คือ ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสี ที่ $2\theta = 18^\circ$

ตัวอย่างสำหรับการทดสอบระยะเวลาการก่อดัวใช้ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ลบ.ซม. โดยควบคุมอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส ตรวจสอบค่าการก่อดัวเริ่มต้นและขั้นสุดท้ายเมื่อความต้านทานการจมน้ำของเข็มเท่ากับ 500 และ 4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ (ตามมาตรฐาน ASTM C 403/C 403M) แต่ในการศึกษานี้ แกนเฮมพ์จะไม่ถูกร่อนออกโดยใช้ตะแกรงเบอร์ 4 ตามที่มาตรฐานกำหนด โดยทำการตั้งสมมุติฐานว่าแกนเฮมพ์มีขนาดเล็กและมีความอ่อนกว่าหินที่ใช้ในงานคอนกรีตทั่วไป

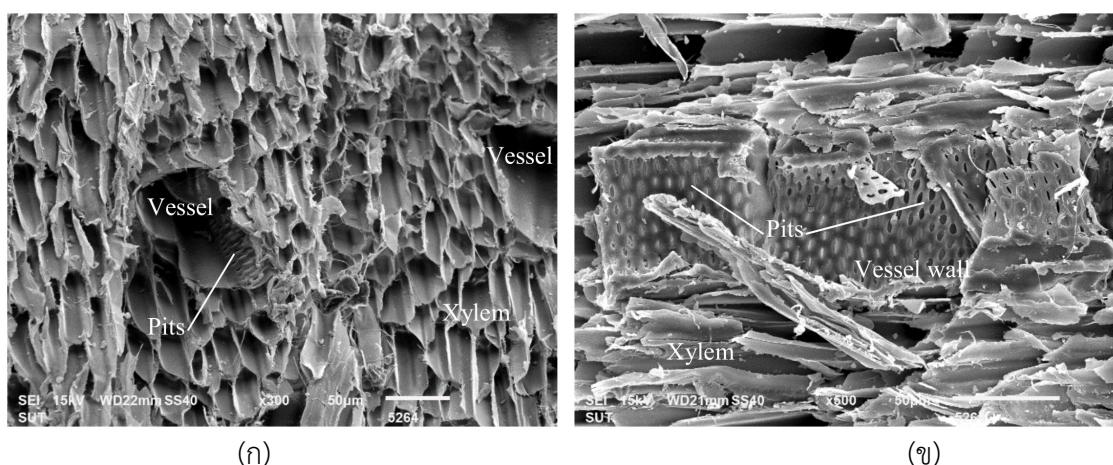
ใช้ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดขนาด $10 \times 10 \times 10$ ลบ.ซม. (ตามมาตรฐาน EN 12390-3) ตัวอย่างทดสอบค่าการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นทรงกระบอกขนาด 5×10 ซม. (ตามมาตรฐาน ASTM C 642-97) ทำการถอดแบบเมื่ออายุคอนกรีตครบ 24 ชั่วโมง (ยกเว้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ผ่าน

การปรับปรุงคุณภาพ จะใช้ระยะเวลาในการถอดแบบ 48 ชั่วโมง) บ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 23 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\%$ ทำการทดสอบเมื่ออายุครบ 7 14 28 และ 56 วัน

2.4 ผลทดสอบและการอภิปรายผลทดสอบ

2.4.1 โครงสร้างจุลภาคของแกนเฮมพ์

ในรูปที่ 2.3 แสดงภาพขยายของแกนเฮมพ์ที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ แกนเฮมพ์มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน กลวงยาว (โดยจะมีรูพรุนที่เป็นของ ไซเลม เรย์ (Xylem ray) เรียงติดกัน และมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าที่เรียกว่า เวสเซล (Vessel); (Balciunas et al., 2015; Indran et al., 2014; Hayward, 1938) ไซเลมเรย์มีความกว้างประมาณ 20 ถึง 50 ไมครอน ส่วนเวสเซลมีความกว้างประมาณ 50 ถึง 80 ไมครอน



รูปที่ 2.3 ภาพขยายแกนเฮมพ์ ด้วยเทคนิค SEM; (ก) ภาคตัดขวาง (ข) ภาคตัดตามยาว

จากรูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) ผนังของเวสเซลมีรูพรุนขนาดเล็กลักษณะเป็นวงรีเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอขนานไปในทิศทางการเจริญเติบโตของเฮมพ์ โดยมีความยาวเฉลี่ยของแกนหลักประมาณ 5 ไมครอน ส่วนแกนรองยาวประมาณ 3 ไมครอน

2.4.2 ปริมาณสารประกอบของแกนเฮมพ์ ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

จากตารางที่ 3 พบว่าแกนเฮมพ์ก่อนการปรับปรุงคุณภาพ (HS) มีปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ที่สูง แต่เมื่อนำแกนเฮมพ์แช่น้ำ (Al_0) เป็นเวลา 15 นาที ทำการล้างด้วยน้ำเปล่า 3 ครั้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 3 วัน แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่ามีปริมาณ K_2O บางส่วนถูกชะละลายปนออกมากับน้ำได้ และเมื่อทำการทดสอบวิธีเดียวกับ Al_0 แต่ทำการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ด้วย $Al_2(SO_4)_3$ ในปริมาณต่างๆ พบว่ามีการลดลงอย่างมากของปริมาณ K_2O ดังนั้นผลการทดสอบยังยืนยันได้ว่า K_2O ในองค์ประกอบทางเคมีของแกนเฮมพ์ ถูกชะล้างออกด้วยน้ำได้บางส่วน

ยิ่งไปกว่านั้นการปรับปรุงคุณภาพแกนเซมพ์โดยใช้ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ แล้วล้างออกด้วยน้ำ สามารถชะล้างโพแทสเซียมออกไซด์ออกได้เกือบทั้งหมด

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแกนเซมพ์ ก่อนและหลังผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วย

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$											
Hemp shiv	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Cr_2O_3	Fe_2O_3	NiO	CuO
HS	-	20.24	16.44	7.30	37.15	14.88	3.54	-	0.14	-	-
Al_0	1.42	14.94	8.27	5.22	22.53	34.12	1.01	2.44	9.13	0.62	0.32
Al_{10}	19.94	28.36	17.57	12.16	1.12	14.00	1.29	0.80	4.49	0.18	0.12
Al_{15}	19.28	29.08	14.83	15.00	0.96	14.41	1.43	0.47	4.37	0.09	0.10
Al_{18}	19.48	30.24	15.89	15.23	0.88	12.10	1.20	0.62	4.16	0.13	0.08
Al_{21}	19.21	29.88	14.44	16.86	0.81	11.23	1.35	0.77	5.16	0.17	0.12
Al_{27}	18.36	30.64	13.26	19.49	0.89	10.74	1.21	0.61	4.59	0.15	0.08

HS –the raw hemp shiv; Al_0 – the hemp shiv test sample was saturated by an amount of water 1.5x that of the hemp shiv mass; Al_{10} to Al_{27} –the shiv was treated using 10, 15, 18, 21 and 27% of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้ใช้แกนเซมพ์ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ และไม่ได้ล้างออกด้วยน้ำ แต่จะทำการผสมกับมอร์ตาร์ทันทีหลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ดังนั้น K_2O เพียงแค่ถูกชะออกมาที่ผิวและกระจายอยู่ในโครงสร้างของแกนเซมพ์เท่านั้น เพื่อที่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์อื่นๆ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์ หรือทำปฏิกิริยากับ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ซึ่งถูกเพิ่มเข้าไประหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งสามารถทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ เช่น ซินจีไนท์ (syngenite; $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Shen et al., 1981; Jurisova et al., 2014) และ จอร์จีไยท์ (gorgeyite; $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Jurisova et al., 2014) โดยจะเกิดกระบวนการตกผลึกและสามารถเร่งการก่อตัวได้ (Shen et al., 1981; Brown, ม.ป.ก.)

2.4.3 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของแกนเซมพ์

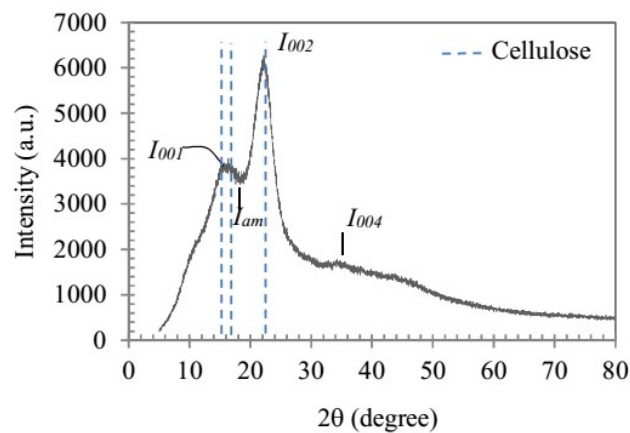
แกนเซมพ์มีเซลลูโลสประมาณ 69% เฮมิเซลลูโลส 14% และลิกนิน 11% โดยน้ำหนัก จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี detergent analysis พบว่าการปรับปรุงคุณภาพแกนเซมพ์ด้วย $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ส่งผลให้สัดส่วนของลิกนินเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.4.4 ดัชนีความเป็นผลึกของเซลลูโลสของแกนเซมพ์

จากกราฟการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (แสดงในรูปที่ 2.4) พบว่าจุดยอดของกราฟตำแหน่ง l_{001} อยู่ระหว่าง $2\theta = 15.0^\circ$ และ $2\theta = 16.5^\circ$ และจุดยอดของกราฟตำแหน่งสูงสุด (l_{002}) ปรากฏที่ $2\theta = 22.5^\circ$ จุดยอดเหล่านี้สามารถบ่งบอกถึงความเป็นผลึกของเซลลูโลสได้

ตารางที่ 2.4 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของแกนเฮมพ์

	Dry matter	ADF	NDF	Lignin	Cellulose	Hemicellulose
HS	95.45	80.37	94.57	11.35	69.02	14.20
Al ₀	93.79	83.04	96.31	21.92	61.12	13.27
Al ₁₀	94.26	86.78	99.24	20.92	65.86	12.46
Al ₁₅	93.90	84.97	98.96	23.83	61.14	13.99
Al ₁₈	93.79	83.49	98.12	24.50	58.99	14.63
Al ₂₁	93.10	88.97	99.65	26.20	62.77	10.68
Al ₂₇	93.88	84.11	99.42	21.27	62.84	15.31



รูปที่ 2.4 X-ray diffractogram of hemp shiv

จากสมการที่ 2.1 พบว่าดัชนีความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิค XRD; C_{rXRD} มีค่าประมาณ 49% และเมื่อลองทำการคำนวณหาปริมาณเซลลูโลสโดยใช้ (Wei and Meye, 2016) ตามสมการที่ 2.2;

$$\%C_{rXRD} = [I_{002} / (I_{002} + I_{am})] \times 100 \quad (2.2)$$

โดยที่ $\%C_{rXRD}$ คือ ปริมาณเซลลูโลสโดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction จากการคำนวณพบว่าปริมาณเซลลูโลสอยู่ที่ประมาณ 67% ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณเซลลูโลส 69% โดยการวิเคราะห์ด้วย Detergent method ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณเซลลูโลสในแกนเฮมพ์มีทั้งอยู่ในรูปของผลึก (crystallinity) และไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Wei and Meye, 2016; Kabir et al., 2013; Portland Cement Association, 2001) ที่พบว่าโครงสร้างของเซลลูโลสในเส้นใยธรรมชาตินั้นจะอยู่ในรูปของผลึกและอสัณฐาน ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินจะเป็นเพียงอสัณฐาน ดังนั้นแกนเฮมพ์จึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบอื่นๆ ได้ (Kabir et al., 2013) และบ่งชี้ว่าแกนเฮมพ์มีองค์ประกอบที่ไม่ปิดกั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์รวมอยู่ด้วย

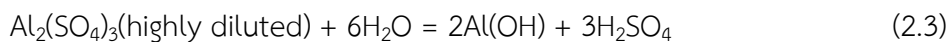
2.4.5 ผลกระทบของการปรับปรุงคุณภาพแกนแฮมพ์โดยใช้ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ต่อการก่อตัวของแฮมพ์คอนกรีต

ตารางที่ 2.5 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของแฮมพ์คอนกรีต จะเห็นได้ว่าแฮมพ์คอนกรีตควบคุม (HCC) ใช้เวลาการก่อตัวนานมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างแฮมพ์คอนกรีตอื่นๆ ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ โดยที่ HCC มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น 645 นาที (ประมาณ 11 ชั่วโมง) และใช้เวลาการก่อตัวขั้นสุดท้าย 2155 นาที (ประมาณ 36 ชั่วโมง) ดังนั้นหากนำแกนแฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมาใช้ในการผลิตแฮมพ์คอนกรีตจะส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของซีเมนต์ เนื่องจากสารประกอบบางอย่างที่สามารถละลายน้ำได้ของแกนแฮมพ์

ตารางที่ 2.5 ระยะเวลาการก่อตัวของแฮมพ์คอนกรีต

	HCC	HC0	HC1	HC2	HC3	HC4	HC5
Initial setting Time, min	645	260	360	380	320	305	230
Final setting Time, min	2155	525	830	870	620	640	520
Slump, cm	4.5	4	5	11	12	4	3

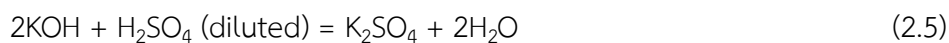
เมื่อพิจารณาสมการเคมีของสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต ตามสมการที่ 2.3:



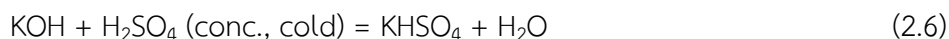
และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ (Rase, 2000) จะอยู่ในรูปของสารละลายที่สามารถชะออกสู่พื้นผิวและกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของแกนแฮมพ์ได้ (สมการที่ 2.4)



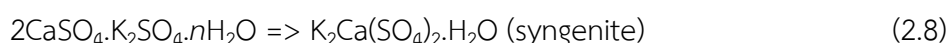
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกได้ ตามสมการที่ 2.5 และ 2.6



หรือ



ดังนั้น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จึงสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และ/หรือ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 (Shen et al., 1981; Brown ม.ป.ก.)

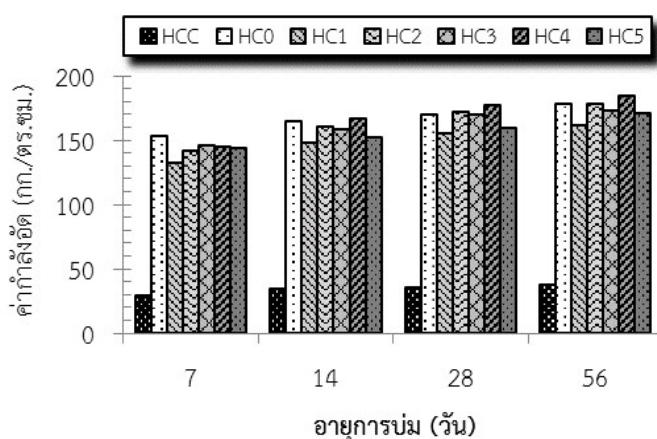


โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้ระบุว่า K_2SO_4 สามารถเร่งระยะเวลาการก่อตัวของยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ได้ (Shen et al., 1981) สำหรับในการศึกษานี้พบว่าแกนเฮมพ์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของเฮมพ์คอนกรีต แต่เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์โดยใช้ $Al_2(SO_4)_3$ ในส่วนผสมของ HC1 ถึง HC5 สามารถปรับปรุงระยะเวลาการก่อตัวให้ดีขึ้น ส่วนในกรณีของตัวอย่างทดสอบ HC0 [$Al_2(SO_4)_3 : Ca(OH)_2 = 18:0$] เมื่อเปรียบเทียบกับ HC3 [$Al_2(SO_4)_3 : Ca(OH)_2 = 18:36$] บ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้ $Ca(OH)_2$ ส่งผลให้เกิดการหน่วงการก่อตัวได้

นอกจากนี้ปริมาณที่เหมาะสมของ $Al_2(SO_4)_3$ ยังช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ (workability) ของเฮมพ์คอนกรีตโดยสังเกตจาก HC1 ถึง HC3 ที่มีค่าการยุบตัวเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามกรณีของ HC4 และ HC5 ที่มีการเพิ่ม $Ca(OH)_2$ ในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้ค่าการยุบตัวลดลงเนื่องจากอนุภาคที่ละเอียดของ $Ca(OH)_2$ ที่มีพื้นที่ผิวสูง

2.4.6 ค่ากำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีต

จากกราฟการพัฒนากำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีต ดังรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าเฮมพ์คอนกรีตที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (HC1 ถึง HC5) มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 150 ถึง 180 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน ในขณะที่เฮมพ์คอนกรีตควบคุม (HCC) มีกำลังอัดเพียงประมาณ 30 ถึง 40 กก./ตร.ซม. ดังนั้นการใช้แกนเฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพในส่วนผสมส่งผลให้ค่ากำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น และการใช้เฮมพ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพยังส่งผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเฮมพ์คอนกรีตควบคุมที่มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่อายุการบ่มจาก 7 ถึง 56 วัน ค่ากำลังอัดโดยเฉลี่ยของ HC1 จนถึง HC5 สูงกว่า HCC ถึง 4 เท่า

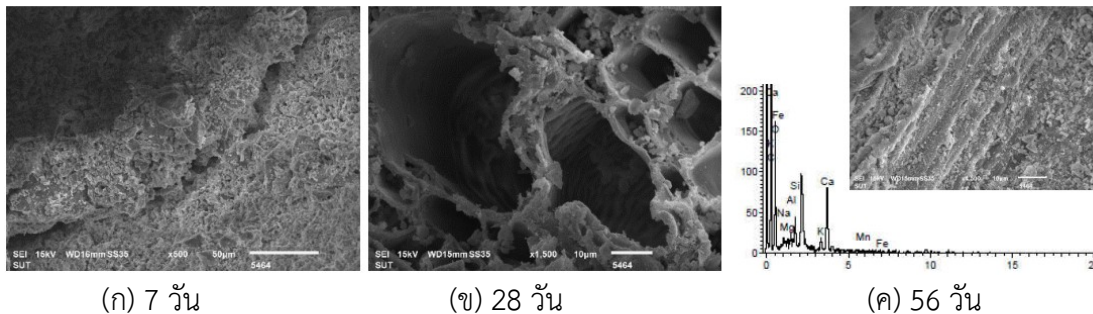


รูปที่ 2.5 กำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีต

และเมื่อย้อนกลับไปพิจารณาผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 2.4) และดัชนีความเป็นผลึกโดยเทคนิค XRD (รูปที่ 2.4) สามารถอธิบายได้ว่าองค์ประกอบหลักของโครงสร้างของแกนเฮมพ์ คือ

เซลลูโลสที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของน้ำตาลกลูโคส ซึ่งสามารถหน่วงการแข็งตัวและยังส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Vaickelionis and Vaickelioniene, 2006; Pehanich, 2004)

จากผลทดสอบ SEM ของแอมพ์คอนกรีตที่อายุ 7, 28 และ 56 วัน แสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 พบว่า HCC ไม่พบเอททรินไจท์ (Ettringite) เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต (รูปที่ 2.6 (ก) และ (ข)) ในทางตรงกันข้าม HC3 มีผลึกของเอททรินไจท์ เกิดขึ้นทั้งในไซเลมเรย์และเวสเซล (รูปที่ 2.7 (ก) และ (ข)) นอกจากนี้บนผนังของไซเลมเรย์และเวสเซลของแกนแฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีการสร้างผลึกเอททรินไจท์ขึ้น (รูปที่ 2.7 (ค)) แต่จะไม่เกิดขึ้นกับแกนแฮมพ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (รูปที่ 2.6 (ค)) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ ในการปรับปรุงคุณภาพแกนแฮมพ์ก่อนใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีต ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ โดยการสร้างเอททรินไจท์ขึ้นในช่องว่างภายในอนุภาคของแกนแฮมพ์ ซึ่งส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

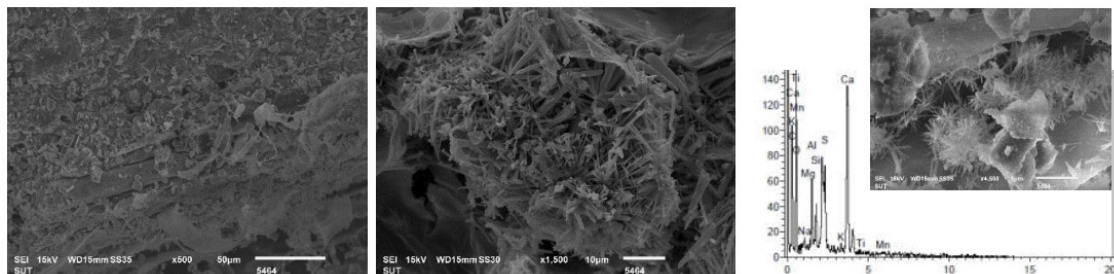


(ก) 7 วัน

(ข) 28 วัน

(ค) 56 วัน

รูปที่ 2.6 ภาพขยายของ HCC



(ก) 7 วัน

(ข) 28 วัน

(ค) 56 วัน

รูปที่ 2.7 ภาพขยายของ HC3

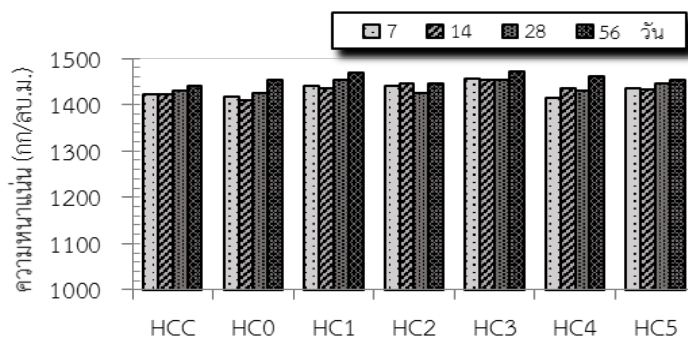
เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพที่อยู่ในรูปของ ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) สามารถควบคุมการปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นได้ โดยป้องกันการเกิดแฟลชเซต (Flash set) และช่วยปรับปรุงการพัฒนากำลังอัดได้ (Portland Cement Association, 2001) ดังนั้นจากการศึกษานี้ยิปซัมที่ได้จากการใช้ $Al_2(SO_4)_3$ ในการปรับปรุงคุณภาพแกนแฮมพ์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินาต์ในส่วนผสมเพื่อสร้างเอททรินไจท์ และเติมเต็มช่องว่างภายในอนุภาคของแกนแฮมพ์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของแกนแฮมพ์ นอกจากนี้ syngenite ($K_2Ca(SO_4) \cdot 2H_2O$) ที่เป็นผลผลิตจาก

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ยังสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของยิปซัมให้เพิ่มขึ้น (Shen et al., 1981) ดังนั้นความแข็งแรงของ HC1 ถึง HC5 จึงมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับ HCC

ในกรณีของตัวอย่างทดสอบ HCO ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 : \text{Ca}(\text{OH})_2 = 18:0$) พบว่ายิปซัมที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและสารประกอบซัลเฟตอื่นๆ ยังสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในปูนซีเมนต์เพื่อสร้างเอททรินไจท์ได้โดยไม่ต้องเพิ่ม $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในส่วนผสม โดยที่ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วันของ HCO สูงกว่าเฮมพ์คอนกรีตที่ใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในส่วนผสม แต่อัตราการพัฒนากำลังอัดจะลดลงเล็กน้อยที่อายุการบ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับ HC1 ถึง HC5 ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในส่วนผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดได้เล็กน้อย

2.4.7 ความหนาแน่นของเฮมพ์คอนกรีต

จากผลการทดสอบในรูปที่ 2.8 พบว่าความหนาแน่นของเฮมพ์คอนกรีตและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น โดยมีค่าระหว่าง 1420 ถึง 1470 กก./ลบ.ม ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตแตกต่างกันเล็กน้อยตามปริมาณของ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ และสรุปได้ว่าเมื่อใช้แกนเฮมพ์แทนมวลรวมหยาบในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตลดลง เนื่องจากเฮมพ์มีความหนาแน่นเพียงประมาณ 120 กก./ลบ.ม. (ตัวอย่างการกระจายตัวของแกนเฮมพ์ในเนื้อคอนกรีต (โดยการตัดแต่ง แสดงในรูปที่ 2.9)



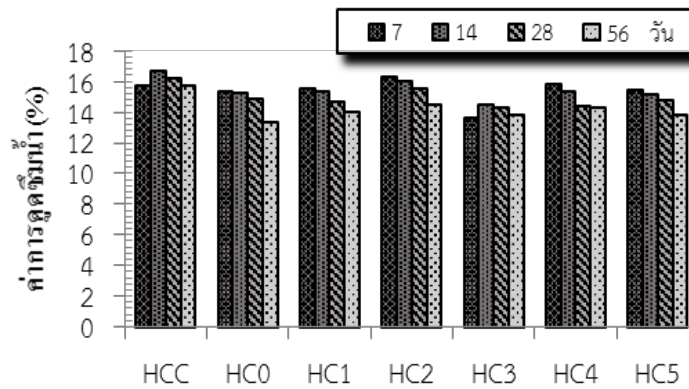
รูปที่ 2.8 ความหนาแน่นของเฮมพ์คอนกรีต

2.4.8 ค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีต

ค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีตอยู่ระหว่าง 14.5 ถึง 16.5% ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และพบว่าทั้งเฮมพ์คอนกรีตที่ใช้แกนเฮมพ์ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงคุณภาพ มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อยที่อายุการบ่มมากขึ้น แต่การลดลงของค่าการดูดซึมน้ำไม่ค่อยคงที่เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของแกนเฮมพ์ในเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 2.9 การกระจายตัวของแกนเฮมพ์ในเนื้อคอนกรีต



รูปที่ 2.10 ค่าการดูดซึมน้ำของเฮมพ์คอนกรีต

2.5 สรุป

การใช้แกนเฮมพ์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ แทนมวลรวมหยาบในส่วนผสมเฮมพ์คอนกรีตส่งผลให้ค่ากำลังอัดมากกว่าเฮมพ์คอนกรีตที่ใช้แกนเฮมพ์ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพถึง 4 เท่า แต่การใช้ปริมาณ $Al_2(SO_4)_3$ และ $Ca(OH)_2$ ในปริมาณที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อกำลังอัดของเฮมพ์คอนกรีตไม่มากนัก

เห็นได้ชัดว่าแกนเฮมพ์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเกิดการหน่วงการก่อตัวของคอนกรีต

การใช้ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ในการปรับปรุงคุณภาพช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังอัดของวัสดุคอมโพสิตให้ดีขึ้น และปริมาณที่เหมาะสมของ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ยังช่วยปรับปรุงระยะเวลาการก่อตัวและการแข็งตัวให้ดีขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพแกนเฮมพ์ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ส่งผลให้เกิดการสร้างผลึกของ ettringite ขึ้นได้ทั้งในไฮเลมเรย์และบนผนังของเวสเซลของแกนเฮมพ์ ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของแกนเฮมพ์ จึงส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในปริมาณมากเกินไปทำให้เกิดการหน่วงการก่อตัว

การใช้แกนเฮมพ์แทนมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลง เนื่องจากแกนเฮมพ์มีน้ำหนักเบาและมีรูพรุนสูง

2.6 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ในด้านการส่งเสริมองค์ความรู้และห้องปฏิบัติการทดสอบต่างๆ สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ในความอนุเคราะห์แกนเฮมพ์และข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

คุณกฤติพงศ์ โบสถ์จะโปะ คุณจักรกฤษณ์ ธนะมณีวุฒิ และชาวคณะฯ ผู้ช่วยวิจัยอื่นๆ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี คุณแพรวพรรณ เครือมั่งกร นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ สำนักพัฒนาอาหารสัตว์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ นครราชสีมา ในข้อมูลการวิเคราะห์ Detergent method คุณเกวลิพร้อมพิพัฒน์พร (SEM), คุณยุธิกา สร้อยระย้า (XRD), คุณนุชจรี เวชวิริยกุล (TGA) และคุณคมสันต์ ต่ายทรัพย์ (XRF) นักวิทยาศาสตร์ ฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการวิเคราะห์และแนะนำแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นอย่างดี

2.7 เอกสารอ้างอิง

ธงชัย พุ่มพวง. (2558) เฮมพ์ พืชเส้นใยธรรมชาติ ส่งเสริมการปลูก มุ่งสู่เชิงพาณิชย์, **มติชน เทคโนโลยีชาวบ้าน**.

ราชกิจจานุเบกษา. 6 มกราคม 2560. กฎกระทรวง การขออนุญาตและการอนุญาตผลิต จำหน่าย นำเข้า ส่งออก หรือมีไว้ในครอบครองซึ่งยาเสพติดให้โทษในประเภท 4 หรือในประเภท 5 พ.ศ. 2559.

วันดี ธรรมจารี. (2558). วัสดุผสมชีวภาพ (biocomposites). **Bio & Nano**, 228(40).

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน), กันยายน 2553. โครงการจัดทำยุทธศาสตร์การพัฒนาเฮมพ์ (แผนปฏิบัติการพัฒนาเฮมพ์บนพื้นที่สูงภาคเหนือ ระยะ 5 ปี พ.ศ. 2553-2557).

Abraham, R.E., Barrow C.J., and Puri, M. (2013). Relationship to reducing sugar production and scanning electron microscope structure to pretreated hemp hurd biomass (*Cannabis sativa*). **Biomass and Bio Energy**, 58, 180-87.

Balciunas, G., Pundiene, I., Lekunaite-Lukosiune, L., Vejelis, S., and Korjajins, A. (2015). Impact of hemp shiv aggregate mineralization on physical-mechanical properties

- and structure of composite with cementitious binding material. **Industrial Crops and Products**, **77**, 724-734.
- Blankenhorn, P.R., Blankenhorn, B.D., Silsbee, M.R., DiCola, M. (2001). Effects of fibre surface treatments on mechanical properties of wood fibre-cement composites. **Cement and Concrete Research**, **31**, 1049-1055.
- Bołtryk, M. and Małaszkiwicz, D. (2007). Influence of reed blade length upon technical properties of reed-concrete. **Białystok Technical University**, 50 pages.
- Brown, P.W. (1991). Early-age cement hydration reactions. Department of Materials Science and Materials Research Laboratory, Penn Sylvania State University, University Park, Pa. **Transportation Research Record**, **1284**, 53-59.
- Collet, F. and Pretot, S. (2014). Experimental highlight of hygrothermal phenomena in hemp concrete wall, **Building and Environment**, **82**, 459-466.
- DeeDee De Miranda. (2011). An evaluation of hemp fibre for furnishing applications. Colorado State University Fort Collins, Colorado.
- Hayward, H.E. (1938). The structure of economic plants, Chapter VIII, Moraceae, Cannabis sativa. The University of Chicago, Hempology.org: **The study of hemp**, 214-245.
- Indran, S., Raj, R. E., and Sreenivasan, V. S. (2014). Characterization of new natural cellulosic fibre from cissus quadrangularis root. **Carbohydrate Polymers**, **110**, 423-429.
- Jurisova, J., Danielik, V., Fellner, P., Lencses, M., and Kralik, M. (2014). Phase diagram of the system $\text{CaSO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-KNO}_3\text{-Ca(NO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$. **Acta Chimica Slovaca**, **7**(1), 20-24.
- Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T., and Cardona, F. (2013). Effects of chemical treatments on hemp fibre structure. **Applied Surface Science**, **276**, 13-23.
- Minister of Hemp. (2016). Cannabis Sativa vs Cannabis Indica: Difference explained in official terms. <https://ministryofhemp.com/hemp/not-marijuana/>
- Peev P.I., and Saxgren, J. (2012). Is industrial hemp a sustainable construction material, Architectural Technology and Construction Management, **VIA University College**, Horsens, Denmark.
- Pehanich, J.L., Blankenhorn, P.R., and Silsbee, M.R. (2004). Wood fibre surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fibre-cement composites. **Cement and Concrete Research**, **34**, 59-65.
- Portland Cement Association. (2001). Ettringite formation and the performance of concrete. **Concrete information**, 16 pages.

- Rase, H. F. (2000). Handbook of Commercial Catalysts. **Heterogeneous Catalysts**. 71.
- Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., and Chotard, T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. **Journal of The European Ceramic Society**, **28**, 183-192.
- Segal, L., Creely, J.J., Martin, A.E., and Conrad. C.M. (1959). An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Textile Research Journal**, 786-794.
- Shen, C., Mohammed, H., and Kamar. A. (1981). Effect of K_2SO_4 and $CaSO_4$: Dihydrate solutions on crystallization and strength of gypsum. College of Dentistry, University of Florida, Gainesville, Florida. **Gypsum Crystallization**, **60**(8), 1410-1417.
- Vaickelionis, G. and Vaickelioniene, R. (2006). Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics-Silikaty**, **50**(2), 115-122.
- Vantreese, V.L. (1998). Industrial hemp: Global operations, Local implications. Department of Agricultural Economics University of Kentucky, **Lexington KY**, 40546-0276.
- Wei, J. and Meye, C. (2016). Degradation of natural fibre in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite. *Corrosion Science*; <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.12.004>.

บทที่ 3

บทบาทของสารปอซโซลาน :

การใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานในคอนกรีต

Role of Pozzolan :

Use of Pozzolan Mixed with Calcium Carbide Residue as Concrete Binder

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, Email : weerachart.tan@kmutt.ac.th

ศาสตราจารย์ ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, Email : chai.jat@kmutt.ac.th

เชาฟีร์ ดือราแม, Email : saofee.drm@gmail.com

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

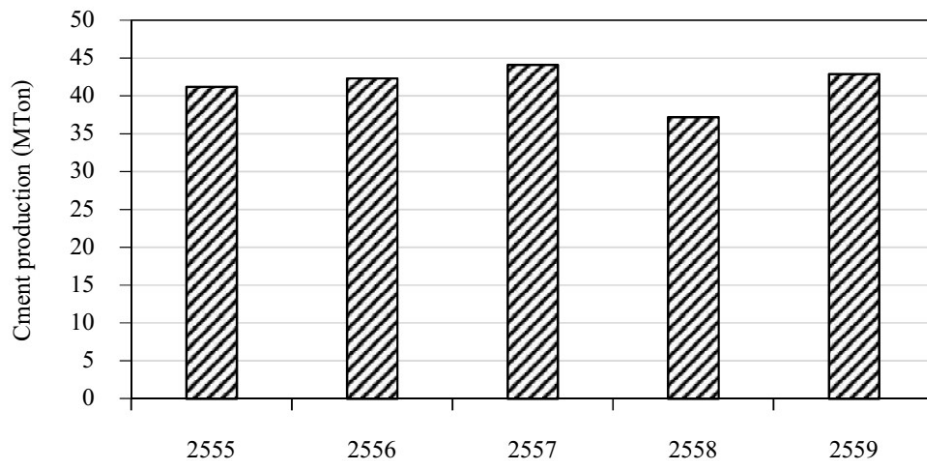
3.1 บทคัดย่อ

จากการศึกษาคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานพบว่ามี การพัฒนากำลังอัดคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังดึงผ่าซีกของ คอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่าสูงขึ้นตามค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้น และมี ทิศทางเหมือนกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน คือมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามกำลังของคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานยังมีค่า กำลังอัดที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อายุต้น ดังนั้นจึงต้องควรมี การปรับปรุงโดยการกระตุ้นกำลัง โดยการกระตุ้นกำลังด้วยวิธีเติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อย ละ 1 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน, บ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเพิ่มความละเอียด ของวัสดุประสานสามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้ดีขึ้นทั้งในอายุต้นและปลาย ด้านความคงทนของ คอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่ใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานมีความสามารถ ในการต้านคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ และมีการหดตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ นอกจากนี้การใช้สารปอซโซลานชนิดอื่นร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานพบว่าคอนกรีตมี ค่ากำลังอัดที่อยู่ในระดับที่สามารถนำมาใช้งานได้ ดังนั้นการใช้สารปอซโซลานร่วมกับกาก แคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานจึงมีศักยภาพที่ดีในการนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ และถือเป็นอีก หนึ่งทางเลือกใหม่สำหรับการผลิตคอนกรีต ซึ่ง ส่งผลให้มีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง และเป็นมิตร ต่อสิ่งแวดล้อม

คำหลัก : กากแคลเซียมคาร์ไบด์, สารปอซโซลาน, วัสดุประสานชนิดใหม่, วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม

3.2 บทนำ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ได้รับความนิยมและเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เนื่องจากความเหมาะสมทางด้านราคา วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตสามารถหาได้ง่าย เช่น หิน ทราย มีราคาไม่แพง สะดวกในด้านการใช้งานและสามารถกำหนดขนาดรูปร่างได้ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ปัจจุบันความต้องการใช้ปูนซีเมนต์มีปริมาณมาก และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามการเติบโตของเศรษฐกิจ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีการผลิตปูนซีเมนต์ 42.88 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2559) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ มากมาย ทั้งด้านการทำลายทรัพยากรธรรมชาติและด้านการทำลายสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการผลิตปูนซีเมนต์ต้องระเบิดหินปูนมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต และในกระบวนการผลิตต้องใช้พลังงานในการเผาสูงถึง $1,500^{\circ}\text{C}$ อีกทั้งยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณที่สูงถึงประมาณ 0.9 ตัน ต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน (ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546)



รูปที่ 3.1 ปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์ในแต่ละปี (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2559)

สารปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในคอนกรีตในรูปของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น โดยทั่วไปการใช้สารปอซโซลานสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตลงได้ เนื่องจากสารปอซโซลานมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง และส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม จึงทำให้ส่งผลที่ดีกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้สามารถกลับมาใช้งานได้

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) เป็นกากที่เหลือใช้จากการผลิตก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) ที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมการตัดเหล็ก และการเชื่อมโลหะ กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแนวโน้มที่จะสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ ตามสถานะการเติบโตทางเศรษฐกิจ โดยในประเทศไทยมีการใช้

แคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ประมาณ 18,500 ตัน/ปี เพื่อใช้ผลิตก๊าซอะเซทิลีน และเหลือเป็นกาก แคลเซียมคาร์ไบด์ประมาณ 21,500 ตัน/ปี ซึ่งกากแคลเซียมคาร์ไบด์จะถูกนำไปทิ้งและใช้ประโยชน์ไม่ได้ ส่วนใหญ่จะกำจัดโดยใช้วิธีการกองทิ้งไว้หรือทำการฝังกลบลงไปในใต้ดิน ดังรูปที่ 3.2 กาก แคลเซียมคาร์ไบด์จะทำให้ดินมีความเป็นด่างสูงขึ้น ทำให้ที่ดินบริเวณนั้นทำการเพาะปลูกหรือใช้ประโยชน์ ไม่ได้ ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อพื้นที่ใกล้เคียง และยิ่งไปกว่านั้นถ้ามีการฝังกลบใกล้กับแหล่งน้ำก็จะทำให้เกิดผลกระทบกับแหล่งน้ำ



รูปที่ 3.2 พื้นที่ทิ้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์ของโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน

การใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่สำหรับใช้ในงาน คอนกรีตถือเป็นว่ายังเป็นงานวิจัยที่ใหม่และได้มีการศึกษามาเมื่อไม่นานนี้ ซึ่งหากเทียบกับการใช้สารปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์แล้วนั้น ยังถือว่ามิงานวิจัยที่น้อยมาก และส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในประเทศไทย เป็นหลัก การใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานนั้นใช้แนวคิดพื้นฐานจาก ปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยใช้ด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์แทนด่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ ซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมินาออกไซด์ที่มีอยู่ในสารปอซโซลาน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้สาร ปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าก้นเตา เป็นต้น ร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อใช้ เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตนั้นมีศักยภาพที่ดีและสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ โดยคอนกรีตที่ ผลิตได้มีคุณสมบัติที่คล้ายกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตยังมีค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์

3.3 สารปอซโซลาน

คอนกรีตที่ขาดมวลรวมที่ค่อนข้างละเอียดมักเกิดการแยกตัวได้ง่าย และไม่เหมาะสมในการลำเลียงโดยการสูบส่งหรือการเทโดยใช้ท่อ การเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีตสามารถทำได้โดยใช้วัสดุละเอียดจำพวกหินปูนบดละเอียด ทรายละเอียด และหินฝุ่น เป็นต้น การใช้วัสดุที่มีความละเอียดสูงผสมเพิ่มในคอนกรีตยังช่วยลดการเย็นน้ำและทำให้การตกแตงผิวของคอนกรีตง่ายขึ้น ปูนซีเมนต์ผสมที่นิยมใช้ในการก่ออิฐและฉาบได้มาจากการบดปูนเม็ดร่วมกับวัสดุละเอียด การใช้วัสดุละเอียดเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์จะลดกำลังของคอนกรีตเพราะปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ในงานโครงสร้างของอาคารซึ่งต้องรับแรงสูง สารปอซโซลาน นอกจากใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตเช่นเดียวกับการใช้วัสดุละเอียดแล้วยังทำให้คอนกรีตมีกำลังและความทนทานดีขึ้นด้วย

มาตรฐาน ASTM C618 (2012) ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน”

วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหนา วัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในเมืองไทยในปริมาณที่ค่อนข้างมากและสามารถนำมาใช้งานได้ เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้ากันตะ เป็นต้น

โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน เถ้ากลบ เถ้าขานอ้อย และเถ้าปาล์มน้ำมัน เป็นต้น

เถ้าภูเขาไฟ (volcanic ash) เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติและมีการนำมาใช้ก่อสร้างอาคารตั้งแต่สมัยกรีกและโรมันโบราณ เถ้าภูเขาไฟเกิดจากหินแข็งและแมกมาที่ระเบิดออกจากภูเขาไฟ และแตกตัวเป็นหินขนาดเล็ก ซึ่งเมื่อนำมาบดละเอียดจะทำให้มีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าภูเขาไฟส่วนใหญ่ประกอบด้วย ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก

ดินขาวเผาหรือเมทาเคอลิน (metakaolin) เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติซึ่งได้มาจากการเผาดินขาวที่อุณหภูมิประมาณ 750 – 800 องศาเซลเซียส ในประเทศไทยมีแหล่งดินขาวหลายแหล่งที่มีคุณภาพดีและมีขนาดใหญ่ เช่น แหล่งดินขาวจังหวัดระนอง แหล่งดินขาวจังหวัดนครราชสีมา เป็นต้น การใช้เมทาเค

ลินในงานคอนกรีตยังไม่เป็นที่รู้จักกันมากนักแม้ว่าในต่างประเทศจะมีการนำมาใช้งานกันค่อนข้างมาก เนื่องจากราคามาเลาเคาลินยังสูง

ซิลิกาฟูม (silica fume) หรือไมโครซิลิกา (microsilica) หรือซิลิกาฟูมควบแน่น (condensed silica fume) เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ต (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (fume) ของ SiO_2 ซึ่งต่อมากจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอนุภาคของซิลิกาขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึก เนื่องจากซิลิกาฟูมมีอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (fly ash) เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า มีลักษณะโดยทั่วไป คือ เป็นฝุ่นผงคล้ายปูนซีเมนต์ มีสีเทาดำ หรือน้ำตาล จัดเป็นวัสดุปอซโซลานอย่างหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบหลักทางเคมี คือ ออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็กเมื่ออยู่ในสภาพแห้งมีลักษณะเป็นฝุ่นและไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน แต่เมื่อมีความชื้นจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับด่างและเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน ยึดเกาะกันได้ดีคล้ายปูนซีเมนต์

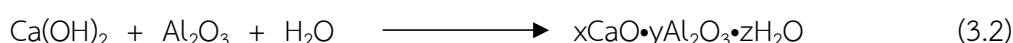
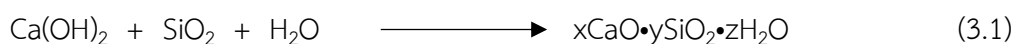
เถ้าแกลบ (rice husk ash) ได้จากการเผาแกลบที่ได้จากโรงสีข้าวเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเผาแกลบที่อุณหภูมิในช่วง 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส ทำให้ SiO_2 อยู่ในรูปไม่เป็นผลึก ซึ่งมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน เถ้าแกลบที่เผาแล้วอาจมีสีเทาหรือเทาดำ เถ้าแกลบที่ดีต้องมีความละเอียดสูงซึ่งเมื่อนำเถ้าแกลบดังกล่าวไปบดให้ละเอียดสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil fuel ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากการนำกากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์ม เผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 800 – 900 องศาเซลเซียส ในแต่ละปีมีปริมาณเถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมากกว่า 100,000 ตัน แต่มีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมาก ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดใหม่ที่มีปริมาณมากเพียงพอและมีศักยภาพที่จะนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ แต่ยังไม่เป็นที่รู้จัก เนื่องจากมีงานวิจัยสนับสนุนข้อมูลยังไม่มากนัก

เถ้าชานอ้อย (sugar cane bagasse ash) เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งใช้ชานอ้อยเผาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้บางส่วนสามารถขายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และบางส่วนใช้สำหรับอุตสาหกรรมภายในโรงงาน มีการประมาณว่าในแต่ละปีมีปริมาณเถ้าชานอ้อยเกิดขึ้นมากกว่า 4.5 แสนตันต่อปี และมีแนวโน้มสูงขึ้น เถ้าชานอ้อยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์ มีเพียงส่วนน้อยที่นำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อปรับสภาพดินในงานเกษตรกรรม เถ้าชานอ้อยมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ เนื่องจากมีปริมาณซิลิกาที่อยู่ในรูปไม่เป็นผลึกเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าครึ่งหนึ่งขององค์ประกอบทางเคมีทั้งหมด แต่เนื่องจากมีงานวิจัยสนับสนุนข้อมูลยังไม่มากนัก จึงทำให้เถ้าชานอ้อยไม่เป็นที่รู้จักมากนักในด้านของการนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต

3.4 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) มีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคล้ายกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, C-S-H) โดยอาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีความเป็นด่างสูง เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลาน ที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกอนออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

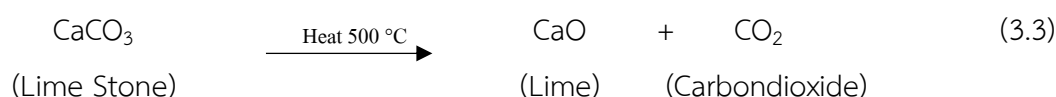


โดย x , y และ z ในสมการที่ 3.1 และ 3.2 เป็นตัวแปรที่ค่าจะแปรผันตามชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น ปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม (Hansen, 1990)

3.5 กากแคลเซียมคาร์ไบด์

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) เป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งเป็นก๊าซที่ใช้ในอุตสาหกรรมงานเชื่อมโลหะและอุตสาหกรรมการตัดโลหะ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) และน้ำ กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเคมีอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลว กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ปล่อยทิ้งจากโรงงานมีลักษณะเป็นโคลนสีเทาอมขาว เมื่อปล่อยให้ตกตะกอนและแห้งตามธรรมชาติจะจับตัวเป็นก้อน และมีสีขาวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นลดลง กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีสภาพความเป็นด่างสูงมาก ทำให้ดินบริเวณพื้นที่ซึ่งมีความเป็นด่างไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

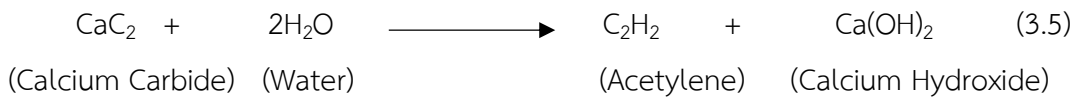
กระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีนทำได้โดยนำหินปูน (CaCO_3) เข้าเตาหลอม จากกระบวนการนี้ได้ผลผลิตคือปูนขาว (CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ตามสมการที่ 3.3



หลังจากนั้น เติมน้ำแล้วให้ทำปฏิกิริยากับปูนขาว (CaO) ที่อยู่ในเตาหลอม จะได้แคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) สมการที่ 3.4



นำแคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) ที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับน้ำ จะได้ผลผลิตคือ ก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) สมการที่ 3.5



แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากสมการที่ 3.5 ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย โดยเมื่อใช้แคลเซียมคาร์ไบด์ (CaC_2) 64 กรัม จะได้ก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) เท่ากับ 26 กรัม และได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) สูงถึง 4 กรัม (Jaturapitakkul and Roongreung, 2003)

จากปฏิกิริยาข้างที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์มีคุณสมบัติเป็นด่างที่สูงมาก และมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งถือว่าเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก ดังนั้นการใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เช่นเดียวกับการใช้สารปอซโซลานร่วมกับปูนซีเมนต์ โดยไม่จำเป็นต้องมีปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์

3.6 การใช้เถ้าถ่านหินร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์

เนื่องจากเถ้าถ่านหินถือเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี และมีจำนวนมาก การใช้เถ้าถ่านหินร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ในการผลิตคอนกรีตโดยไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์จึงถือว่าเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจอย่างมาก เพราะนอกจากจะเป็นการลดการใช้ปูนซีเมนต์และส่งผลที่ดีต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในด้านการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ และการลดปริมาณการทิ้งเถ้าถ่านหินเนื่องจากมีการใช้ในปริมาณที่มากขึ้น เถ้าถ่านหินยังมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลง คอนกรีตที่ผลิตได้ยังถือเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้เถ้าถ่านหินร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถรวบรวมเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

3.6.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ได้โดยตรงจากโรงงานจะมีความชื้นอยู่มาก มีลักษณะเป็นก้อนเล็กและใหญ่ปนกัน จับตัวกันอยู่แบบหลวมๆ คล้ายกับดินเหนียว สามารถละลายน้ำได้ เมื่อแห้งแล้วจะคงสภาพเป็นก้อนที่ไม่แน่นอน มีสีขาวหรือสีเทาอมขาว ส่วนเถ้าถ่านหินจะมีลักษณะเป็นฝุ่นผงละเอียด คล้ายกับปูนซีเมนต์ มีสีน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 3.3

เมื่อนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินมาผสมกันโดยอัตราส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ต่อเถ้าถ่านหิน เท่ากับ 30 : 70 พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบด (OFC) มีสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งจะมีสีคล้ายกับเถ้าถ่านหิน จากนั้นนำมาบดร่วมกันจนมีความ

ละเอียดสูง (FFC) ทำให้วัสดุประสานลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีที่เข้มขึ้นจนมีสีเทาเข้ม คล้ายๆ กับสีของปูนซีเมนต์ทั่วๆ ไป แต่มีความเข้มมากกว่า ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน



รูปที่ 3.4 กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมร่วมกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้บดและแบบบดละเอียด

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ พบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินผสมกันในอัตราส่วน 30 : 70 โดยไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบด มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.43 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Mean Particle Size, d_{50}) เท่ากับ 12.92 ไมครอน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เล็กน้อย (3.15) แต่หลังจากทำการบด จนมีความละเอียดสูง มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 1.1 พบว่าวัสดุประสานมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้นเป็น 2.73 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงเป็น 2.93 ไมครอน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแสดงในตารางที่ 3.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CTI) มี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CCR) พบว่ามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านหินมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) และองค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 30 : 70 (FFC) พบว่ามี CaO เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณร้อยละ 32.6 และมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 50.2 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) เท่ากับร้อยละ 10.1 โดยค่า LOI ที่มีค่าสูง เกิดจาก CCR ที่อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

(Ca(OH)₂) สลายตัวเป็น CaO และ H₂O ซึ่งกลายเป็นไอน้ำระเหยออกไปจากการเผา (Jaturapitakkul และ Roongreung, 2003) ค่า LOI ของ FACR จึงมีค่าสูง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุประสาน

Material	Specific Gravity	Retained on a Sieve No.(%) 325	Mean Particle Size : d ₅₀ micron)
OFC	2.43	22.9	12.92
FFC	2.73	1.1	2.93
Cement Type I (CTI)	3.15	20.0	18.08

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Oxide	Samples			
	FA	CCR	FFC	Cement Type I
Silicon Dioxide (SiO ₂)	41.9	4.3	29.0	20.9
Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	21.5	0.4	13.6	4.8
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	12.7	0.9	7.6	3.4
Calcium Oxide (CaO)	13.9	56.5	32.6	65.4
Sulfur Trioxide (SO ₃)	0.6	0.1	-	2.7
Magnesium Oxide (MgO)	2.6	1.7	1.9	1.3
Sodium Oxide (Na ₂ O)	2.7	-	-	0.3
Potassium Oxide (K ₂ O)	2.5	-	-	0.4
Loss on Ignition (LOI)	5.2	36.1	10.1	2.9

3.6.2 กำลังอัดของคอนกรีต

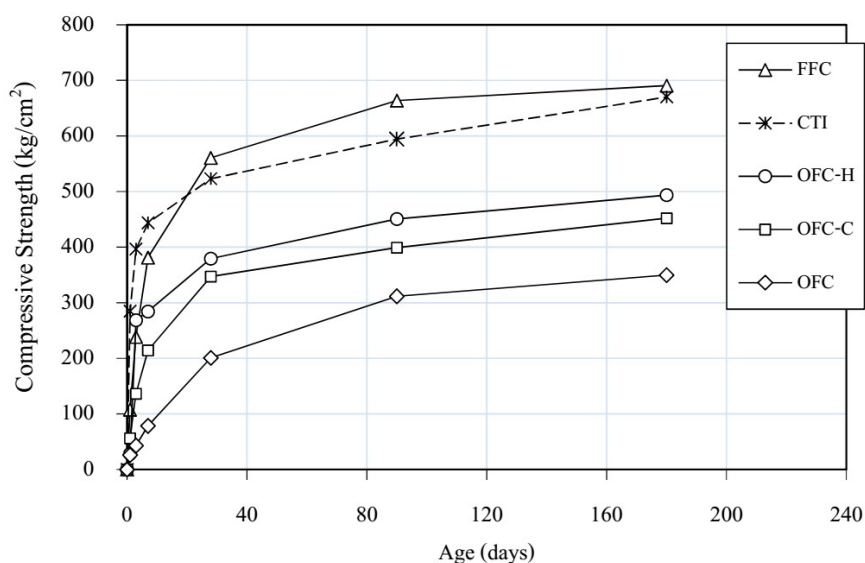
ตารางที่ 3.3 แสดงตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถาถ่านหินผสมร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับ 0.25 และควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ในช่วง 17.5±2.5 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CTI) ส่วนรูปที่ 3.5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถาถ่านหินที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเป็นวัสดุประสาน (OFC) ที่อายุคอนกรีต 1, 3, 7, 28, 90 และ 180 วัน มีค่าเท่ากับ 26, 43, 78, 201, 264 และ 350 กก/ซม² เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตมีกำลังค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะที่อายุดันคอนกรีตมีการพัฒนาที่ค่อนข้างช้า การพัฒนากำลังของคอนกรีตจะมีการพัฒนากำลังอัดที่

ดีในช่วง 28 วัน หลังจากนั้นคอนกรีตจะพัฒนากำลังอัดไปอย่างช้าๆ จนถึงอายุ 180 วัน คล้ายกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน

Mixes	Mix Proportion (kg/m ³)								W/B	Slump (cm.)
	CR	FA	Cement	Fine Agg	Coarse Agg	Water	SP*	NaOH		
OFC	165	385	-	720	915	135	5.5	-	0.25	20.0
OFC-C	165	385	-	720	915	135	5.5	5.5	0.25	18.5
OFC-H	165	385	-	720	915	135	5.5	-	0.25	20.0
FFC	165	385	-	755	960	135	5.5	-	0.25	19.0
CTI	-	-	500	820	1040	126	4	-	0.25	20.0

หมายเหตุ SP* คือ สารลดน้ำพิเศษ โดยในสารลดน้ำพิเศษมีน้ำอยู่มีน้ำอยู่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุและกำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมาพัฒนากำลังอัดโดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และการบ่มคอนกรีตด้วยความร้อนโดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้เพิ่มขึ้นได้ โดยคอนกรีต OFC-C มีกำลังอัดเท่ากับ 56, 136, 214, 347, 387 และ 452 กก/ซม² ที่อายุคอนกรีต 1, 3, 7, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ซึ่งการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานได้ เนื่องจากสารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายที่มีความเป็นเบสสูงจะเกิดการชะละลายของซิลิกาและอลูมินาออกจากผิวของเถ้าถ่านหิน

ออกมาเป็นสารตั้งต้นและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เกิดเป็นเจลของจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymeric gel) และเจลของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H gel) ซึ่งทำหน้าที่ในการรับกำลัง (Yusuf et al., 2014) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kejin Wang et al. (2004) ที่ใช้ฝุ่นจากเตาเผาปูนซีเมนต์ (Cement Kiln Dust, CKD) ซึ่งมี CaO เป็นองค์ประกอบหลักผสมกับเถ้าถ่านหินในอัตราส่วน 50 : 50 โดยน้ำหนัก และเติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0, 2 และ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นได้

ส่วนคอนกรีต OFC-H มีกำลังอัดเท่ากับ 28, 279, 284, 379, 415 และ 494 กก/ซม² ที่อายุคอนกรีต 1, 3, 7, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ การพัฒนากำลังด้วยการบ่มด้วยความร้อน นอกจากความร้อนจะช่วยให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดขึ้นได้ดีแล้ว ยังช่วยให้คอนกรีตมีการพัฒนาโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อคอนกรีตส่งผลให้เนื้อคอนกรีตเกิดการจับตัวและยึดกันเป็นโครงสร้างอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมีผลต่อการพัฒนากำลังในช่วงอายุเริ่มต้น แต่ค่ากำลังอัดในอายุที่มากขึ้นอาจจะไม่สูงเท่าที่ควร เพราะการพัฒนาของปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในช่วงอายุต้น ทำให้โครงสร้างของปฏิกิริยากระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นโครงสร้างที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะเป็นอุปสรรคในการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภายหลัง (Benammar et al., 2013)

อย่างไรก็ตามพบว่าการเร่งกำลังด้วยการใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และการบ่มคอนกรีตด้วยความร้อนโดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถช่วยในการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตได้ แม้ว่าการเร่งของคอนกรีตยังมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม แต่เป็นที่สังเกตได้ว่าการพัฒนากำลังด้วยวิธีดังกล่าวทั้งสองวิธีสามารถพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุดันของคอนกรีตได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ คอนกรีต OFC และมีกำลังอัดในช่วงอายุปลายที่ดีขึ้น

สำหรับการเร่งกำลังด้วยการเพิ่มความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวิธีการพัฒนากำลังที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด สามารถพัฒนากำลังของคอนกรีตได้ดีทั้งในช่วงอายุเริ่มต้นและในช่วงอายุปลายของคอนกรีต โดยกำลังอัดของคอนกรีต FFC มีค่าเท่ากับ 108, 239, 381, 561, 644 และ 691 กก/ซม² ที่อายุ 1, 3, 7, 28, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการพัฒนากำลังของคอนกรีตมีทิศทางเดียวกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ทั่วไปและส่วนผสมอื่นๆ กล่าวคือการพัฒนา กำลังของคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มต้นมีการพัฒนากำลังได้เร็วกว่าอายุในช่วงปลาย และยังพบว่ากำลังอัดของคอนกรีต FFC สามารถพัฒนากำลังให้มีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม ตั้งแต่อายุ 28 วัน โดยมีค่าสูงถึง 561 กก/ซม² ซึ่งถือว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูงตาม ACI363 (2011) ที่กำหนดให้คอนกรีตมีกำลังอัดมากกว่า 550 กก/ซม²

3.6.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตแสดงในรูปที่ 3.6 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสานมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 622,995 ถึง 642,452 กก/ซม² ที่อายุ 28 วัน และมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 658,446 ถึง 673,247 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน ส่วนกลุ่มของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง

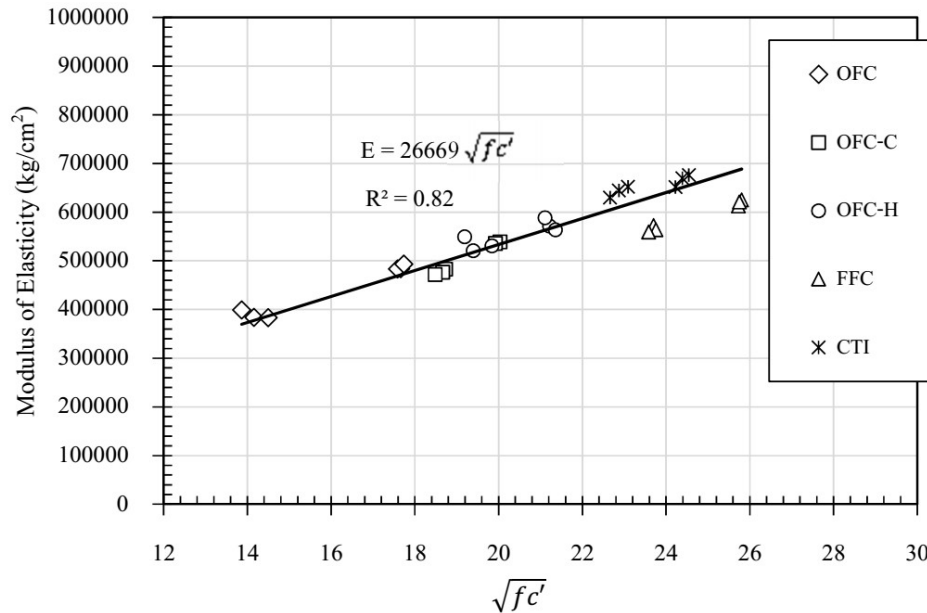
ระหว่าง 389,227 ถึง 565,426 กก/ชม² ที่อายุ 28 วัน และมีค่าระหว่าง 487,035 ถึง 619,866 กก/ชม² ที่อายุ 90 วัน จากผลการทดสอบ พบว่าคอนกรีต FFC มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงที่สุดในกลุ่มของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน เนื่องความละเอียดของวัสดุประสานทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ดีขึ้น คอนกรีตมีกำลังอัดสูง และอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าถ่านหินจะทำหน้าให้เป็นมวลรวมละเอียด ทำให้ปริมาตรของโพรงระหว่างซีเมนต์มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบลดลงส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (Bilodeau et al., 2000) นอกจากนั้นเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน คือมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดคอนกรีตและอายุของคอนกรีต สอดคล้องกับงานวิจัยคอนกรีตทั่วไปของ Cetin and Carrasquillo (1998) และ Sata et al. (2007) ที่พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของกำลังอัดคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานสามารถทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยใช้สมการ $E_{FACR} = 26,669\sqrt{f_c}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่แนะนำตามมาตรฐาน ACI 318 (2008) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hani et al. (2005) ที่ทดสอบคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าสูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากการคำนวณตามสมการตามมาตรฐาน ACI ดังนั้น คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานสามารถใช้สมการของ ACI ในการทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้เช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.6.4 ความต้านทานคลอไรด์ของของคอนกรีต

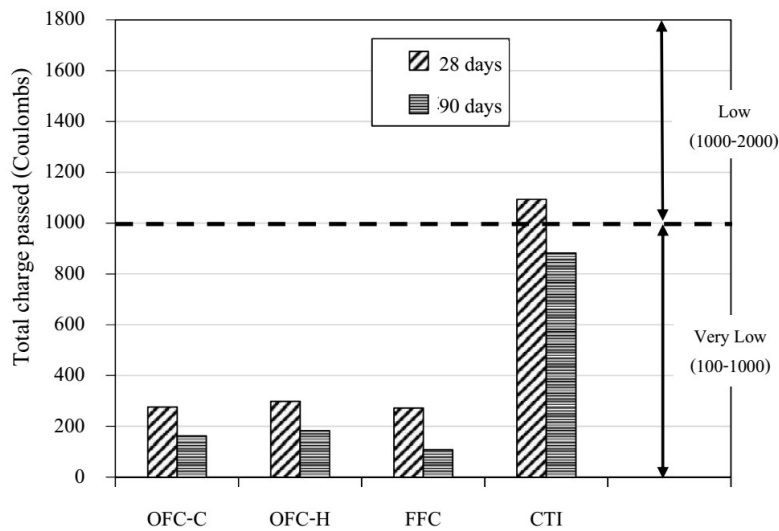
การแทรกซึมคลอไรด์ผ่านเข้าสู่คอนกรีตโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 (2008) ซึ่งอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตทั้งหมด โดยมาตรฐานได้กำหนดค่าระดับของการแทรกซึมของคลอไรด์ไว้ ได้แก่ ระดับต่ำมาก (100 – 1000 coulomb), ระดับต่ำ (1000 – 2000 coulomb), ระดับปานกลาง (2000 – 4000 coulomb) และระดับสูง (มากกว่า 4000 coulomb) ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ผ่านเข้าสู่คอนกรีต แสดงในรูปที่ 3.7 พบว่าคอนกรีตควบคุม CTI ที่อายุ 28 วัน มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมด เท่ากับ 1094 coulomb และที่อายุ 90 วัน มีค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่ไหลผ่านคอนกรีต เท่ากับ 883 coulomb สำหรับกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเป็นวัสดุประสาน มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมด เท่ากับ 1,283 coulomb ที่อายุ 28 วัน ซึ่งยังมีค่ามากกว่าคอนกรีต CTI ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แต่ค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมดลดลงอย่างมากเมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมดลดลงเป็น 355 coulomb ที่อายุ 90 วัน เนื่องจากอายุคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีการพัฒนาของปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ดีขึ้น แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตที่ได้จากปฏิกิริยาจะเปลี่ยนรูปของช่องว่างขนาดใหญ่ให้มี

ขนาดเล็กลง ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Amoudi et al. (2009) ที่ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของคลอไรด์อออนลดลง



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและรากที่สองของกำลังอัดคอนกรีต

ส่วนการพัฒนา กำลังของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการบ่มคอนกรีตด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตทั้งหมดที่มีแนวโน้มลดลงอย่างมากทั้งในช่วงอายุต้นและอายุปลายของคอนกรีต โดยคอนกรีต OFC-C และ OFC-H มีการต้านการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดีกว่าคอนกรีตควบคุม จัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่าระดับของการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในระดับต่ำมาก โดยคอนกรีต OFC-C มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมดเท่ากับ 277 และ 163 coulombs ที่อายุ 28 และ 90 วัน ส่วนคอนกรีต OFC-H มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมดเท่ากับ 299 และ 184 coulombs ที่อายุ 28 และ 90 วัน ค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับคอนกรีต OFC แต่เห็นได้ว่าคอนกรีต OFC-H มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมดที่อายุคอนกรีต 28 และ 90 วัน ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนช่วยให้ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้เร็วขึ้น แต่การพัฒนาปฏิกิริยาโดยการบ่มด้วยความร้อนทำให้การกระจายตัวของโครงสร้างปฏิกิริยาไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ในช่วงอายุปลายของคอนกรีตโครงสร้างจะกระจายตัวได้มากขึ้น (Bingöl et al., 2013) การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าลดลงไม่มากเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้น ต่างจากคอนกรีต OFC ที่มีค่าการแทรกซึมของคลอไรด์อออนลดลงอย่างมากเมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.7 การแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน

การพัฒนากำลังโดยการเพิ่มความละเอียดของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน (คอนกรีต FFC) มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมด เท่ากับ 272 และ 109 คูลอมป์ ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับจัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่าระดับของการแทรกซึมคลอไรด์ต่ำมาก จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความละเอียด

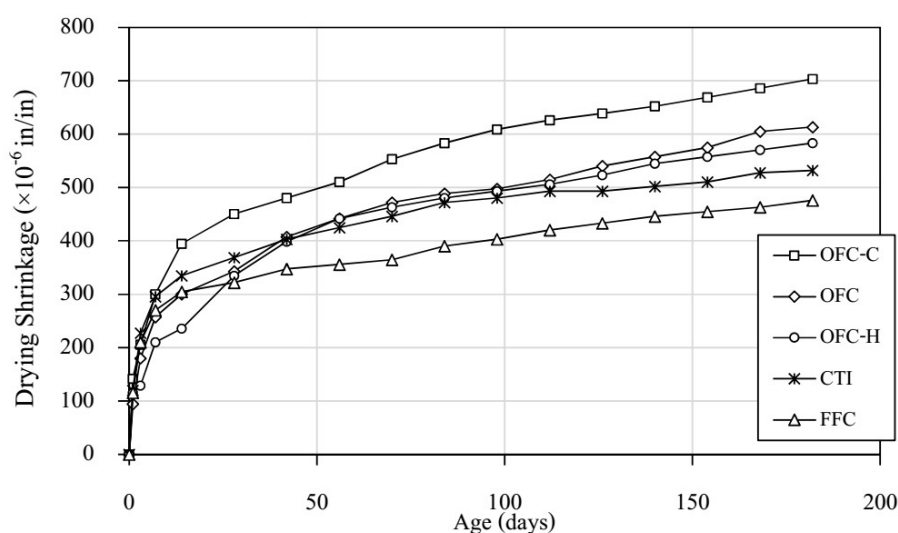
ของวัสดุประสานมีประสิทธิภาพในการต้านทานแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีที่สุด เนื่องจากวัสดุประสานมีอนุภาคขนาดเล็กเข้ามาอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตจึงมีความพรุนลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่พบว่า การเพิ่มความละเอียดของวัสดุประสานทำให้คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ต่ำ อีกทั้งการเพิ่มความละเอียดยังช่วยให้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าถ่านหินได้ดียิ่งขึ้น คลอไรด์ไอออนจึงเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตได้ยาก

สังเกตได้ว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสานและนำมาเร่งกำลังด้วยวิธีต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าค่าระดับของการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน ที่อายุ 90 วัน ทั้งหมดจัดอยู่ในกลุ่มที่มีค่าระดับของการแทรกซึมคลอไรด์ในระดับต่ำมาก และพบว่าคอนกรีต OFC-C, OFC-H และ FFC มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านทั้งหมดน้อยกว่า 300 คูลอมป์ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินทำให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งทำหน้าที่ดักจับคลอไรด์ไอออน และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต จะเข้าทำปฏิกิริยากับคลอไรด์ไอออนทำให้เกิดแคลเซียมคลอไรด์อลูมิเนตหรือเกลือของฟิเดล (Faguan, 2000) คอนกรีตจึงมีความสามารถในการต้านทานคลอไรด์มากขึ้น

3.6.5 การหดตัวของคอนกรีต

รูปที่ 3.8 แสดงผลการทดสอบการหดตัวแห้งของคอนกรีต ซึ่งวัดทุกๆ 7 วัน จนครบอายุ 182 วัน พบว่าในกลุ่มของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดย

การบด มีการหดตัวแห้งมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยคอนกรีต CTI มีค่าการหดตัวแห้งที่อายุ 182 วัน เท่ากับ 532×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว ในขณะที่คอนกรีต OFC, OFC-C และ OFC-H ค่าการหดตัวแห้งที่อายุ 182 วัน เท่ากับ 585×10^{-6} , 652×10^{-6} และ 545×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเพสต์ของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพใช้ปริมาณวัสดุประสานสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน กล่าวคือ คอนกรีต CT มีปริมาณวัสดุประสาณน้อยกว่าซึ่งมีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 500 กก/ม³ แต่คอนกรีต OFC, OFC-C และ OFC-H มีปริมาณวัสดุประสาน เท่ากับ 550 กก/ม³ ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Guneyisi et al. (2010) ที่พบว่าการใช้ปริมาณวัสดุประสาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การหดตัวแห้งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.8 การหดตัวแห้งของคอนกรีต

สำหรับคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินแบบบดละเอียด คือ คอนกรีต FFC มีค่าการหดตัวแห้ง ที่อายุ 182 วัน เท่ากับ 476×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว เห็นได้ว่าคอนกรีต FFC มีการหดตัวแห้งน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากคอนกรีต FFC มีกำลังอัดที่มากกว่า การเพิ่มความละเอียดของวัสดุประสาน ทำให้การทำปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินดีขึ้น คอนกรีตจึงมีกำลังอัดที่สูงส่งผลทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการยึดรั้งได้มากขึ้นทำให้มีการหดตัวแห้งลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ อัครเดช ศรีเสน (2556) ที่ทำการทดสอบการหดตัวแห้งของคอนกรีตกำลังปกติและกำลังสูงที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุประสาน พบว่าในกลุ่มของคอนกรีตกำลังสูงมีการหดตัวแห้งน้อยกว่ากลุ่มของคอนกรีตกำลังปกติ

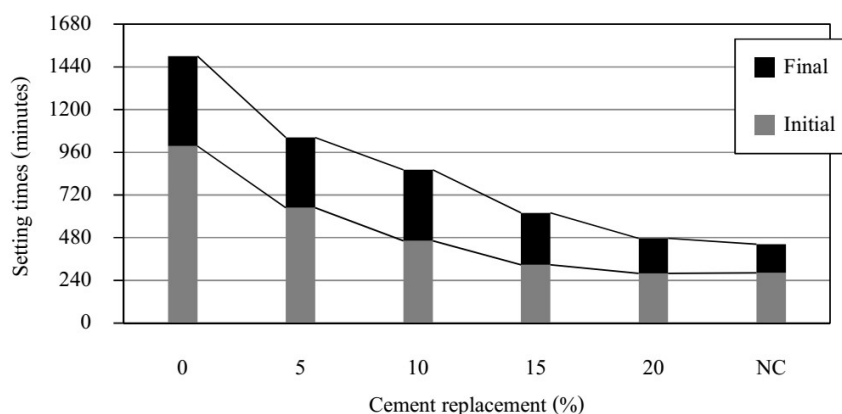
สังเกตได้ว่าอัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตทั้งหมดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ คอนกรีตทั้งหมดมีอัตราการหดตัวแห้งสูงในช่วงอายุนต้น (อายุ 1 - 56 วัน) จากนั้นอัตราการหดตัวแห้งของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงอายุ 182 วัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barr et al. (2003) ที่พบว่าการหดตัวแห้งของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของสภาวะ

แวดล้อม โดยมีค่าการหดตัวแห้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในอายุ 100 วัน และหลังจากนั้นจะหดตัวอย่างช้าๆ และยิ่งพบอีกว่าอิทธิพลของกำลังอัดส่งผลกระทบต่อค่าการหดตัวแห้งมากกว่าปริมาณเพสต์ในคอนกรีต ดังนั้นคอนกรีต FFC ที่มีปริมาณวัสดุประสาน เท่ากับ 550 กก/ม^3 ซึ่งมากกว่าปริมาณวัสดุประสานของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงมีการหดตัวแห้งน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมแม้ว่าจะมีปริมาณวัสดุประสานมากกว่า

3.7 การใช้วัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ ร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์

3.7.1 คอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

สุทธินันท์ แอเดียว (2553) ได้ศึกษาระยะเวลาการก่อตัวและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบด (CR-GP) เป็นวัสดุประสานมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์โดยทั่วไปค่อนข้างมากดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งคอนกรีต CR-GP ไม่มีปูนซีเมนต์ในส่วนผสมต้องอาศัยเฉพาะปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าปาล์มน้ำมันจึงส่งผลให้การก่อตัวระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตธรรมดา อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราเพียงแค่อ้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายมีค่าลดลงมาก เพราะว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นจึงส่งผลให้คอนกรีตเกิดการก่อตัวได้เร็วขึ้น สำหรับการเพิ่มปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังในอัตราอ้อยละ 10 ทำให้คอนกรีตมีเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายใกล้เคียงกับคอนกรีตธรรมดา แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตในอัตราที่สูงขึ้น ทำให้เวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายลดลงตามปริมาณการแทนที่ เพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณ C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทำให้การก่อตัวได้เร็วขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งในอัตราอ้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ของคอนกรีต CR-GP ลดระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตได้ไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์อ้อยละ 5

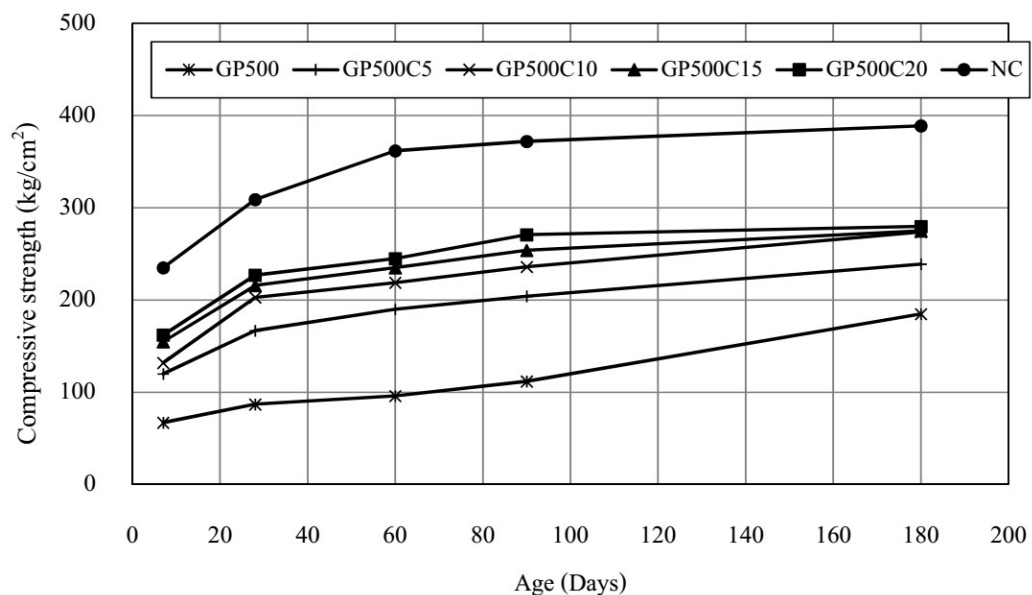


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร้อยละการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์กับระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบด

ด้านกำลังอัดดังแสดงในรูปที่ 3.10 พบว่าคอนกรีต GP500 ที่ไม่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถให้กำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับ 185 กก/ซม² อย่างไรก็ตามการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน คอนกรีต CR-GP สามารถให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 2 เท่า โดยมีค่ากำลังที่อายุ 180 วัน เท่ากับ 239 กก/ซม² และเมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์เป็นร้อยละ 10 (ปูนซีเมนต์ 45 กก/ม³), 15 (ปูนซีเมนต์ 67.5 กก/ม³), และ 20 (ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม³) โดยน้ำหนักวัสดุประสาน คอนกรีตมีค่ากำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับ 274, 275 และ 280 กก/ซม² ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดเป็นวัสดุประสาน พบว่ามีทิศทางเดียวกับกรณีของคอนกรีตธรรมดา NC คือช่วง 28 วัน มีการพัฒนากำลังอัดที่สูงภายหลังจาก 28 วัน การพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

3.7.2 คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

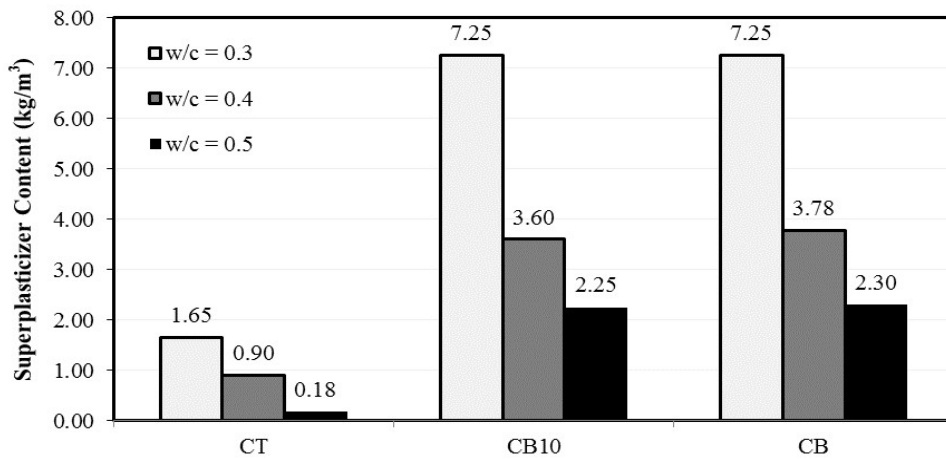
เพ็ญพิชชาและคณะ (2559) ได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตา พบว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุประสานต้องใช้สารลดน้ำพิเศษที่มากกว่าคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ทั่วไปเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสด เนื่องจากรูปร่างที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมสูงของเถ้าก้นเตา ส่งผลให้มีความสามารถในการเทที่ต่ำกว่า คอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานดังแสดงในรูปที่ 3.11



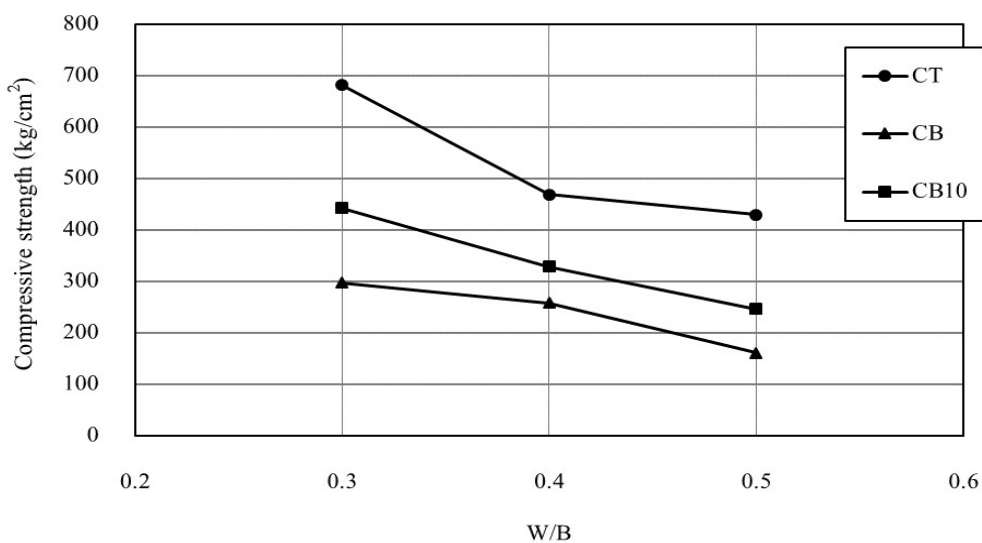
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและอายุของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดเป็นวัสดุประสาน

คอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าก้นเตาโดยไม่มีปูนซีเมนต์ผสมมีปฏิกิริยาหลักในคอนกรีตคือปฏิกิริยาปอซโซลาน การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้วัสดุปอซโซลานมาเป็นวัสดุประสานมี

การพัฒนากำลังต่ำในช่วงอายุต้นของคอนกรีต และอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างต่อเนื่อง การนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเล็กน้อยมาใช้ในการงานคอนกรีต เหมาะสำหรับคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังสูง ในช่วงอายุต้น โดยคอนกรีต 0.3CB, 0.4CB และ 0.5CB ที่อายุ 90 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 368, 310 และ 197 กก/ซม² ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.13



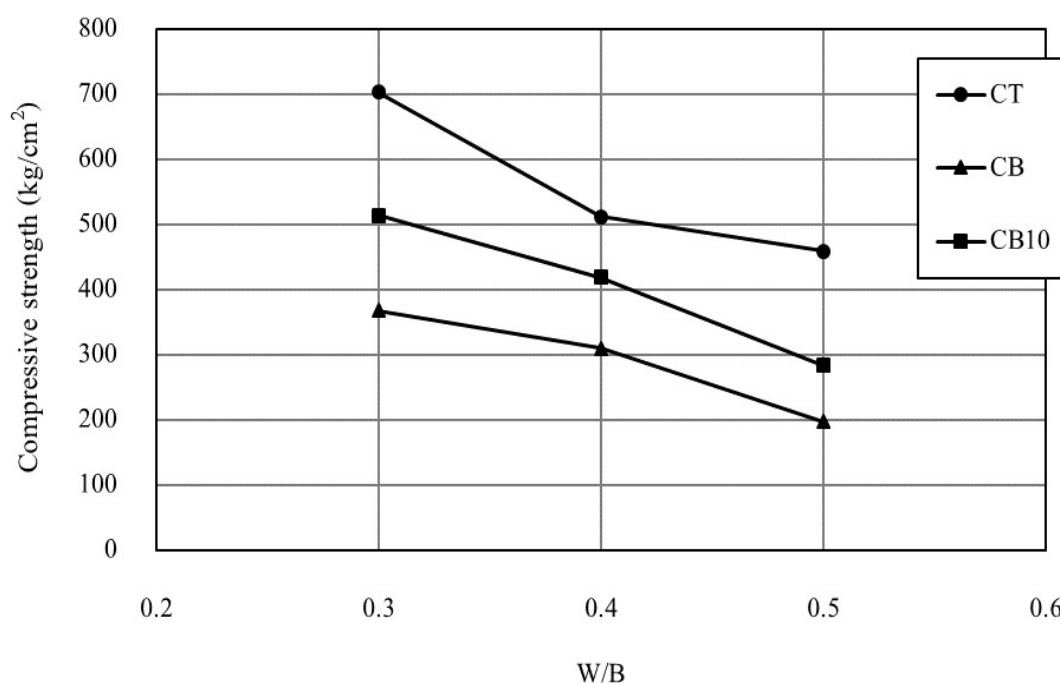
รูปที่ 3.11 ปริมาณความต้องการใช้สารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีต



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

คอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเล็กน้อย และเพิ่มปูนซีเมนต์เพื่อเป็นสารเร่งและเพิ่มกำลังอัดในช่วงอายุต้น ช่วยส่งผลให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีต เกิดทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ได้จากปูนซีเมนต์ และปฏิกิริยาปอซโซลานที่ได้จากเล็กน้อย การแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานส่งผลดีต่อการพัฒนาของกำลังอัดคอนกรีตในทุกๆ ส่วนผสม คอนกรีตที่ทำจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเล็กน้อย และมีปูนซีเมนต์ช่วยเร่งกำลังอัด ให้กำลังอัดสูงเพียงพอต่อการ

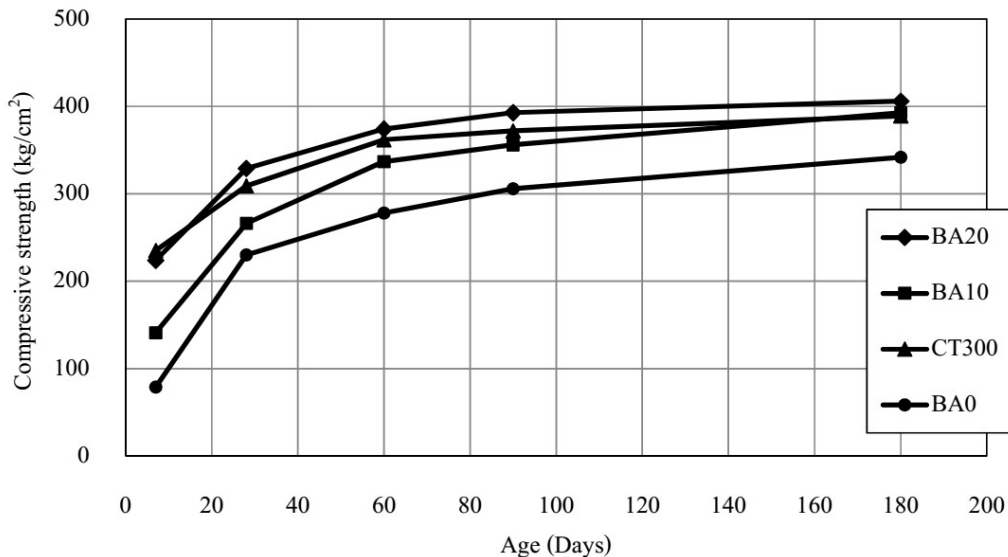
นำมาใช้ในงานคอนกรีตได้จริง ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับ 443 กก/ซม^2 ที่อายุ 28 วัน เมื่อมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.3 โดยใช้ปูนซีเมนต์เพียง 55 กก/ม^3 ยิ่งไปกว่านั้นที่อายุคอนกรีต 90 วัน สามารถพัฒนา กำลังอัดได้สูงถึง 514 กก/ซม^2



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน

3.7.3 คอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์

พงศ์ศิริและคณะ (2554) ได้ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้เถ้าขานอ้อยผสมร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีต BA10 มีการพัฒนากำลังอัดเท่ากับคอนกรีตควบคุมที่อายุของคอนกรีตเท่ากับ 180 วัน และคอนกรีต BA20 ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ 90 กก/ม^3 เป็นสารเร่งกำลัง ทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีต CT300 และคอนกรีต BA0, BA10 และ BA20 มีค่าร้อยละกำลังอัดสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ที่มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานนั้น ไม่สามารถส่งผลให้กำลังอัดช่วงอายุต้นของคอนกรีต BA0, BA10 และ BA20 มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม (CT300) ได้ แต่เมื่อคอนกรีต BA20 มีอายุ 28 วันสามารถพัฒนากำลังได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุม (CT300) ที่ต้องใช้ปูนซีเมนต์สูงถึง 300 กก/ม^3 และในช่วงอายุปลาย (180วัน) คอนกรีต BA10 สามารถพัฒนากำลังได้ใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุประสาน

3.8 สรุปและข้อแนะนำ

การใช้ส่วนผสมของสารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถใช้เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ในการผลิตคอนกรีตได้ โดยคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุประสานที่ทำการกระตุ้นกำลังด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), การบ่มด้วยความร้อน และการเพิ่มความละเอียดของวัสดุประสาน สามารถช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าขานอ้อยได้ดีขึ้น โดยการกระตุ้นกำลังด้วยการเพิ่มความละเอียดของวัสดุประสานเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถพัฒนากำลังอัดคอนกรีตในช่วงอายุเริ่มต้นได้ดี และสามารถพัฒนากำลังอัดสูงถึง 664 กก/ซม² ที่อายุ 90 วัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังดึงผิวซิกของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุประสาน มีแนวโน้มเหมือนกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์ คือมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น มีความสามารถต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน และการเพิ่มความละเอียดของวัสดุประสานสามารถลดการหดตัวแห้งของคอนกรีตลงต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์

สำหรับการใช้สารปอซโซลานอื่นร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสานในงานคอนกรีตพบว่าคอนกรีตที่ได้ยังคงมีกำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารกระตุ้นกำลังเพียงเล็กน้อยก็สามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตทั้งอายุต้นและปลายได้ดี

จากสมบัติของคอนกรีตทั้งทางกลและความทนทานที่ใช้สารปอซโซลานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน สามารถนำคอนกรีตไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้เช่นเดียวกันกับ

คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงคุณสมบัติอื่นๆ ที่จำเป็น เช่น ความร้อนที่เกิดขึ้น ความทนทานในด้านอื่นๆ รวมถึงการหาวิธีที่จะช่วยกระตุ้นกำลังของคอนกรีตให้ดีขึ้นในอายุต้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้เทียบเท่ากับการใช้ปูนซีเมนต์ เป็นต้น

3.9 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาที่ให้ทุนต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ภายใต้โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (NRU) ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานของอาจารย์รุ่นใหม่ สกว. (MRG5480004) และเมธีวิจัยอาวุโส สกว. (RTA5480004)

3.10 เอกสารอ้างอิง

- ไกรวุฒิ เกียรติโกมล. (2546). แก่ถ่านหินในงานคอนกรีต. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการนำถ่านหินในประเทศไทยมาใช้ในงานคอนกรีต, 29 เมษายน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 2-15.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2559). สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรม ปี 2559 และแนวโน้มปี 2560, 241 หน้า
- พงศ์ศิริ ไทยฤทธิ์, ไชยพันธ์ รัตนโชตินันท์, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). คุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุประสาน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 16, 18-20 พฤษภาคม 2554, หน้า MAT 183.
- เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, อรรคเดช อับดุลมาติน, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2559). การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้วัสดุประสานจากเถ้าขานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 11-19
- สุทธินันท์ แอเดียว. (2553). การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมเถ้าถ่านหินและผสมเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 174 หน้า.
- อัครเดช ศรีเสน. (2557). กำลังและความทนทานของคอนกรีตกำลังปกติและกำลังสูงที่ใช้เถ้าถ่านหินและกากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 102 หน้า
- Al-Amoudi, O.S.B., Al-Kutti, W.A., Ahmad, S., and Maslehuddin, M. (2009). Correlation between Compressive Strength and Certain Durability Indices of Plain and Blended Cement Concretes. *Cement and Concrete Composites*, **31**, 672-276.

- American Concrete Institute. (2011). ACI363.2R-11: Guide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete. **ACI Manual of Concrete Practice**, Detroit, 55 p.
- American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM C 618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. **Annual Book of ASTM Standard**, Philadelphia, Vol 04.02, 5 p.
- Barr, B., Hoseinian, S.B., and Beygi, M.A. (2003). Shrinkage of Concrete Stored in Natural Environment. **Cement and Concrete Composites**, **25**(1), 19-29.
- Benammar, B., Mezghich, B., and Guettala, S. (2013). Influence of atmospheric steam curing by solar energy on the compressive and flexural strength of concretes. **Construction and Building Materials**, **49**, 511-518.
- Bilodeau, A. and Malhotra, V.M. (2000). High-Volume Fly Ash System: Concrete Solution for Sustainable Development. **ACI Materials Journal**, **97**(1), 41-48.
- Bingöl, F. and Tohumcu, I. (2009). Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. **Materials and Design**, **51**, 12-18.
- Cetin, A. and Carrasquillo, R.L. (1998). High-performance concrete: Influence of coarse aggregates on mechanical properties. **ACI Materials Journal**, **95**(3), 252-261.
- Faguang, L., Naiqian, F., and Xinying, L. (2000). An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. **Cement and Concrete Composites**, **30**(1), 989-992.
- Guneyini, E., Gesoglu, M., and Ozbay, E. (2010). Strength and Drying Shrinkage Properties of Self-Compacting Concretes Incorporating Multi-System Blended Mineral Admixtures. **Construction and Building Materials**, **24**, 1878-1887.
- Hani, H., Najm, N.H., and Nakin, S. (2005). Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC. **Cement & Concrete Composites**, **27**(1), 661-670.
- Hansen, T.C., (1990). Long-Term Strength of Fly Ash Concrete. **Cement and Concrete Research**, **20**(2), 193-196.
- Jaturapitakkul, C. and Roongreung, B. (2003). Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash. **Journal of materials in Civil Engineering, ASCE**, **15**(5), 470-475.

- Wanga, K., Shahb, S., and Mishulovich, A. (2004). Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders. **Cement and Concrete Research**, **34**, 299-309.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K. (2007). Influence of Pozzolan from Various By-Product Material on Mechanical Properties of High-Strength Concrete. **Construction and Building Materials**, **21**, 1589-1598.
- Yusuf, M.O., Johari, M.A.M., Ahmad, Z.A., and Maslehuddin, M. (2014). Influence of curing methods and concentration of NaOH on strength of the synthesized alkaline activated ground slag-ultrafine palm oil fuel ash mortar/concrete. **Construction and Building Materials**, **66**, 541-547.

บทที่ 4

คอนกรีตผสมมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่

Recycled aggregate concrete

รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย สะตะ, Email: vancsa@kku.ac.th

ดร. อำพล วงศ์ษา, Email: tam_hatori@hotmail.com

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถนนมิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. ขอนแก่น 40002

4.1 บทนำ

เศษวัสดุที่เหลือจากงานก่อสร้างและจากการรื้อถอน (construction and demolition waste) หรือเศษวัสดุจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เศษคอนกรีต เศษกระเบื้องจากงานปูพื้น เศษเซรามิกจากเครื่องสุขภัณฑ์ เศษอิฐและเศษบล็อกคอนกรีตจากงานผนัง เศษเหล็ก เศษไม้ เศษแก้ว เศษพลาสติก เศษยางรถยนต์ เป็นต้น เศษวัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่นำมาใช้ประโยชน์น้อยมาก เช่น การนำไปใช้ซ้ำ (reuse) ของวัสดุจำพวก ไม้ กระจก เป็นต้น ส่วนใหญ่จะนำไปเผาทิ้ง ใช้เป็นวัสดุถมที่หรือถูกกองทิ้งไว้ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมเพราะส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ย่อยสลายยากและนับวันจะมีปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ตามความเจริญเติบโตของงานอุตสาหกรรมหรืองานก่อสร้าง ปัจจุบันพบว่าเศษวัสดุดังกล่าว มีบางส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (recycling) เป็นวัสดุเพื่อทดแทนการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติได้ ซึ่งการนำเศษวัสดุเหล่านี้มาใช้งานแทนมวลรวมจากธรรมชาตินั้นก่อประโยชน์หลายด้าน เช่น ลดพื้นที่ฝังกลบ เพิ่มประโยชน์จากการใช้งานและมูลค่าของเศษวัสดุให้มากขึ้น ส่งผลให้มลพิษที่ย่อยสลายยากลดลง ลดการใช้พลังงาน และลดการทำลายสิ่งแวดล้อม ซึ่งทำให้ธรรมชาติถูกรบกวนน้อยลงอีกด้วย

4.2 ข้อกำหนดสำหรับมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่หรือมวลรวมจากเศษวัสดุ

ข้อกำหนดสำหรับการนำมวลรวมจากเศษวัสดุกลับมาใช้ใหม่ตามข้อกำหนดของ วสท. 1014-46 (2556) จำแนกมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ออกเป็น 3 ระดับชั้นคุณภาพตามสภาพและการดูดซึมน้ำของมวลรวม ถ้าพิจารณาเฉพาะการดูดซึมน้ำต้องไม่เกินร้อยละ 3, 10 และ 20 สำหรับชั้นคุณภาพที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1 นอกจากนั้นยังมีการกำหนดคุณลักษณะเพิ่มเติมดังตารางที่ 4.2 และคุณลักษณะเพิ่มเติมทางเคมีในตารางที่ 4.3 ส่วนตารางที่ 4.4 เป็นแนวทางนำคอนกรีตผสมมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ไปใช้งาน

ตารางที่ 4.1 ประเภทของมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ตามข้อกำหนดของ วสท. 1014-46 (2556)

ชั้นคุณภาพ	คำจำกัดความ
ชั้นคุณภาพที่ 1	มวลรวมหยาบซึ่งประกอบด้วยมวลรวมหยาบจากธรรมชาติไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ไม่มากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก หรือมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ชั้นคุณภาพ 3 ผสมอยู่ไม่มากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ชั้นคุณภาพที่ 1 จะต้องไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
ชั้นคุณภาพที่ 2	มวลรวมหยาบส่วนใหญ่ที่ได้มาจากคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ และมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
ชั้นคุณภาพที่ 3	มวลรวมหยาบส่วนใหญ่ที่ได้มาจากวัสดุก่อหรือผสมระหว่างวัสดุก่อและคอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ และมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะเพิ่มเติมของมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ตามข้อกำหนดของ วสท. 1014-46 (2556)

คุณลักษณะ	ข้อกำหนด		
	ชั้นคุณภาพที่ 1	ชั้นคุณภาพที่ 2	ชั้นคุณภาพที่ 3
ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งของมวลรวมอย่างน้อย	2.40	2.00	1.50
น้ำหนักร้อยละมากที่สุดขององค์ประกอบย่อย			
-มีความถ่วงจำเพาะอิมพัลส์แห้ง < 2.20	10	10	-
-มีความถ่วงจำเพาะอิมพัลส์แห้ง < 1.80	1	1	10
-มีความถ่วงจำเพาะอิมพัลส์แห้ง < 1.00	0.5	0.5	1
น้ำหนักร้อยละมากที่สุดของวัสดุอื่นๆ (เหล็ก แก้ว วัสดุอ่อน ทาร์ แอสฟัลท์ อื่นๆ)	1	1	5

ตารางที่ 4.3 คุณลักษณะเพิ่มเติมทางเคมีของมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ตามข้อกำหนดของ วสท. 1014-46 (2556)

คุณลักษณะ	ข้อกำหนด
ปริมาณคลอไรด์ที่ละลายได้ในกรด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	≤ 0.06
ปริมาณซัลเฟตในรูปองค์ประกอบซัลเฟตที่ละลายในกรดในรูป SO_3 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	≤ 1
ปริมาณซัลเฟตทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	≤ 1
ปริมาณอัลคาไลในรูป $\text{Na}_2\text{O} + 0.65 \text{ K}_2\text{O}$ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	≤ 0.60

ตารางที่ 4.4 กำลังอัดที่ยอมให้และแนวทางการนำไปใช้ในงานคอนกรีตที่ใช้น้ำรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่ตามข้อกำหนดของ วสท. 1014-46 (2556)

มวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่	กำลังอัดที่ยอมให้มากที่สุด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	แนวทางการนำไปใช้งาน
ชั้นคุณภาพที่ 1	ไม่กำหนด	งานคอนกรีตทั่วไป งานคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรง และถนนคอนกรีต
ชั้นคุณภาพที่ 2	500	งานคอนกรีตทั่วไป แต่ไม่แนะนำให้ใช้กับคอนกรีตอัดแรงที่ต้องเผชิญกับสิ่งแวดล้อมที่มีปริมาณคลอไรด์และ/หรือซัลเฟตสูง สำหรับงานคอนกรีตที่ใช้ทำโครงสร้างหลักควรนำผลที่ได้จากการหัดตัวแห้งและการคืบของมวลรวมหยาบที่นำกลับมาใช้ใหม่มาพิจารณาด้วย
ชั้นคุณภาพที่ 3	160	งานปรับระดับคอนกรีตและคอนกรีตไม่เสริมเหล็กที่ไม่ต้องการกำลังอัดสูง

4.3 คอนกรีตผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีต

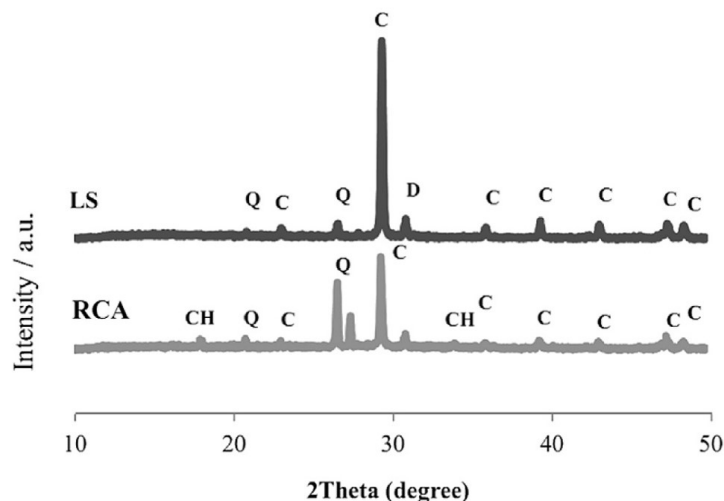
มวลรวมจากเศษคอนกรีต (recycled concrete aggregate) หมายถึงมวลรวมที่นำมาใช้ใหม่ซึ่งประกอบด้วยวัสดุก่อสร้างจากคอนกรีตที่แตกหรือวัสดุที่ได้จากการรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง ซึ่งอาจเป็นมวลรวมหยาบหรือมวลรวมละเอียด (วสท. 1014-46, 2556) โดยเศษคอนกรีตที่ได้มาจากของเหลือทิ้งจากการก่อสร้างและรื้อถอน การตัดแปลง การปรับปรุงสภาพ และการซ่อมแซมของอาคาร ถนน หรือสิ่งก่อสร้างอื่นๆ ซึ่งเศษคอนกรีตที่ได้เบื้องต้นมีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน ดังนั้นก่อนนำเอาไปใช้งานเป็นมวลหยาบหรือมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตจำเป็นต้องมีกระบวนการบดย่อยและคัดแยกขนาดเพื่อให้ได้ขนาดละเอียดตามที่ต้องการ เครื่องที่ใช้ในการบดย่อยอาจเป็นเครื่องบดแบบขบ (jaw crusher) หรือเครื่องบดแบบกระทบ (impact crusher) โดยถ้าเป็นเครื่องบดขนาดใหญ่อาจเป็นเครื่องบดแบบที่เคลื่อนย้ายได้หรือเป็นเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ตั้งอยู่ในโรงงาน

4.3.1 คุณสมบัติของมวลรวมจากเศษคอนกรีต

มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีลักษณะและคุณภาพต่างจากมวลรวมที่ได้จากธรรมชาติ เช่น หินปูน ย่อย หินทราย หรือกรวดแม่น้ำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมวลรวมจากเศษคอนกรีตมักมีคุณภาพที่ด้อยกว่า ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพหรือคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติของมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่สำคัญๆ ได้แก่

ก) ส่วนประกอบของมวลรวมจากเศษคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตได้จากการย่อยคอนกรีตเก่าที่ผ่านการใช้งาน ดังนั้นจึงมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ มวลรวมธรรมชาติจากส่วนผสมคอนกรีตเดิมและเศษมอร์ตาร์เกาะติดอยู่รอบๆ (attached mortar, adhered mortar) ซึ่งการทดสอบ

ปริมาณเศษมอร์ตาร์เก่าที่เกาะติดก่อนมวลรวมยังไม่มีมาตรฐานการทดสอบที่ชัดเจน แต่สามารถทดสอบได้โดยวิธี Hydrochloric dissolution Method (Yagishita et al., 1994) ทำได้โดยนำมวลจากเศษคอนกรีตไปทำให้แห้งสนิทในตู้อบประมาณ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างหินไปล้างน้ำให้สะอาดแล้วอบจนแห้งสนิทอีกครั้ง ในขั้นตอนนี้เศษมอร์ตาร์จะหลุดออกได้ง่าย ซึ่งถ้ามีหลงเหลืออาจใช้แปรงขนเหล็กขัดออกได้ นำมวลรวมที่ได้จากขั้นตอนนี้ไปร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิด 5 มิลลิเมตร แล้วนำส่วนที่ค้างตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น ถือว่าเป็นร้อยละของเศษมอร์ตาร์ที่ปะปนในมวลรวมจากเศษคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วในมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีเศษมอร์ตาร์ปะปนอยู่ประมาณร้อยละ 14-64 (Sata et al., 2013; Duan and Poon, 2014) ซึ่งเศษมอร์ตาร์ที่ปะปนมานี้มีผลต่อคุณภาพของมวลรวมจากเศษคอนกรีตโดยตรง เพราะส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆ ของมวลรวม เช่น ความหนาแน่น ปริมาณโพรง การดูดซึมน้ำ ความต้านทานต่อการสึกกร่อน เป็นต้น ส่วนผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางแร่ (X-Ray Diffraction, XRD) ของมวลรวมจากเศษคอนกรีตเปรียบเทียบกับหินปูนย่อย แสดงดังรูปที่ 4.1 ทั้งมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตและหินปูนย่อยประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, C) ควอตซ์ (quartz, Q) และโดโลไมต์ (dolomite, D) เหมือนๆกัน เพราะมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีหินปูนย่อยเก่าอยู่ด้วย แต่มีความแตกต่างกันที่มวลรวมย่อยจากเศษคอนกรีตจะพบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, CH) เป็นส่วนประกอบด้วย เนื่องจากเศษมอร์ตาร์เก่าในมวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และทราย จึงพบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Nuaklong et al., 2016)



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางแร่ของมวลรวมจากหินปูนย่อย (LS) และมวลรวมจากเศษคอนกรีตโครงสร้าง (RCA) [C: calcium carbonate, Q: quartz, D: dolomite, CH: calcium hydroxide] (Nuaklong et al., 2016)

ข) รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจากเศษคอนกรีตย่อยมีรูปร่างไม่แน่นอน มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมสูง เนื่องจากผ่านการทำให้มีขนาดเล็กลงโดยการใช้เครื่องบดย่อย แล้วทำการคัดเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งรูปร่างจะคล้ายคลึงกับมวลรวมจากหินปูนย่อย เพราะหินปูนย่อยผ่านกระบวนการบดและคัดขนาดเช่นเดียวกันกับเศษคอนกรีต แต่ถ้ามวลรวมปกติที่ได้จากกรวดแม่น้ำจะมีรูปร่างกลมเป็นส่วนใหญ่ ส่วนลักษณะผิวของมวลรวมจากเศษคอนกรีตจะมีผิวหยาบและขรุขระมากกว่ามวลรวมจากหินปูนย่อยเพราะนอกจากมีมวลรวมเก่าที่ปะปนมาแล้วยังมีเศษมอร์ต้าร์เกาะติดอยู่รอบๆ ก้อนมวลรวมด้วย



ก. ก่อนการบดย่อย

ข. หลังการบดย่อยให้มีขนาดเล็กลง

รูปที่ 4.2 มวลรวมจากเศษคอนกรีตงานโครงสร้าง

ค) การดูดซึมน้ำ เนื่องจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีเศษมอร์ต้าร์เก่าเกาะอยู่รอบๆ ก้อนมวลรวมและมีฝุ่นขนาดเล็กๆ ปนมาในขณะย่อยให้มีขนาดเล็กลง ดังนั้นค่าการดูดซึมน้ำจึงมีค่าสูง โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.90 ถึง 13.0 ซึ่งมากกว่ามวลรวมปกติจากธรรมชาติซึ่งมีค่าระหว่างร้อยละ 0 ถึง 4 (Tangchirapat et al., 2008; Thomas et al., 2016; Ozalp et al., 2016) ซึ่งการที่มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงมาก จะส่งผลให้ส่วนผสมมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตมีความต้องการน้ำมากขึ้น

ง) ความหนาแน่นของมวลรวมจากเศษคอนกรีตสภาพอิมมัวผิวแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 2,130 ถึง 2,530 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2,450 ถึง 2,890 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Sagoe-Crentsil et al., 2001; Somna et al., 2012; Nuaklong et al., 2016; Saiz Martinez et al., 2016) ทั้งนี้เพราะว่ามวลรวมจากเศษคอนกรีตมีมอร์ต้าร์เก่าเกาะติดอยู่ที่ผิวของมวลรวมธรรมชาติเดิม

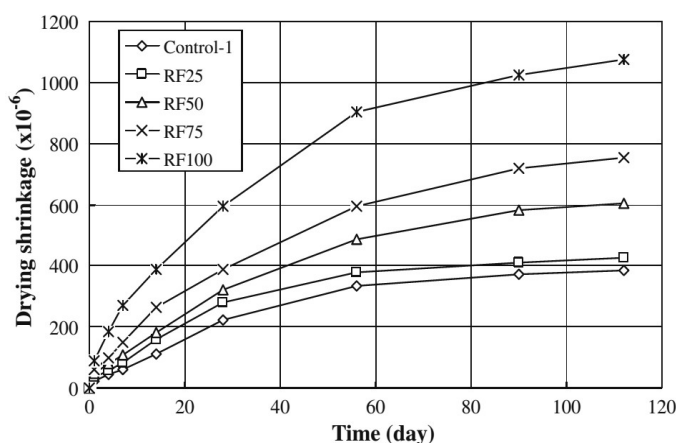
จ) ความต้านทานต่อการสึกกร่อนของมวลรวมหยาบสามารถทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบลอสแองเจลิส (Los Angeles) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแกร่งของมวลรวมในการต้านทานต่อการสึกกร่อนและแรงกระแทก สามารถทำการทดสอบได้ตามมาตรฐาน ASTM C131/C131M-14 (2015)

โดยทั่วไปแล้วมวลรวมหยาบจากธรรมชาติมักมีความต้านทานต่อการสึกกร่อนสูงกว่ามวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตมีมอร์ตาร์ที่เกาะอยู่รอบๆมวลรวมธรรมชาติเดิม ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ นอกจากนี้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตยังผ่านกระบวนการบดย่อยเพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งส่งผลให้มีความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตามมวลหยาบทั้งที่ได้จากธรรมชาติหรือได้จากการย่อยเศษคอนกรีตควรมีค่าการสึกกร่อนจากการทดสอบโดยวิธีลอสมองเจอริสไม่เกินร้อยละ 50 ตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M-13 (2015) โดยทั่วไปแล้วมวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตโครงสร้างมีค่าการสึกกร่อนอยู่ระหว่างร้อยละ 23.0 ถึง 43.3 ขณะที่มวลรวมปกติมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 21.7 ถึง 30.2 (Tangchirapat et al., 2008; Somna et al., 2012; McNeil and Kang, 2013; Sata et al., 2013; Ozalp et al., 2016)

4.3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีต

การนำมวลรวมจากเศษคอนกรีตมาใช้เป็นมวลรวมในงานคอนกรีตมีหลายลักษณะ เช่น การใช้เป็นมวลรวมหยาบหรือการใช้เป็นมวลรวมละเอียดเพียงอย่างเดียว หรือใช้เป็นตัวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดพร้อมๆกัน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในลักษณะแทนที่มวลรวมปกติบางส่วนหรือใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมมอร์ตาร์หรือคอนกรีตทั้งหมดก็ได้ อย่างไรก็ตามก่อนนำไปใช้งานต้องมีการศึกษาหรือทดสอบสมบัติของมวลรวมที่ใช้และสมบัติของคอนกรีตที่ได้ให้ตรงตามที่ต้องการ ทั้งนี้มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีคุณภาพด้อยกว่ามวลรวมปกติซึ่งส่งผลให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติที่ด้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปด้วย

ก) สมบัติของคอนกรีตสด ส่วนผสมของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมมักมีความต้องการน้ำมากกว่าส่วนผสมที่ใช้มวลรวมปกติ เนื่องจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีมอร์ตาร์เกาะติดซึ่งทำให้ผิวมวลรวมไม่เรียบ ขรุขระ และต้องการน้ำมาเคลือบผิวมากขึ้น (Tangchirapat et al., 2008) ถ้าเป็นคอนกรีตกำลังสูงหรือคอนกรีตที่สามารถเทและอัดแน่นได้ด้วยตัวเองที่มีมวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมจะต้องใช้สารลดน้ำพิเศษมากขึ้นด้วย (Senas et al., 2016 ; Waseem, S.A., and Singh, B., 2016) นอกจากนี้การใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตยังทำให้คอนกรีตมีการสูญเสียค่ายุบตัว (slump loss) เร็วกว่าคอนกรีตทั่วไป เพื่อลดปัญหาการความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้นหรือการที่ยุบตัวลดลงอย่างรวดเร็ว อาจแก้ปัญหาโดยการทำให้มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีสภาพอ้อมตัวผิวหยาบก่อนนำไปใช้งาน หรืออาจนำมวลรวมนั้นไปแช่น้ำเพื่อให้มวลรวมมีการดูดน้ำก่อนบางส่วน (Poon et al., 2004) การหดรัดตัวของคอนกรีตพบว่ามีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุมและมากขึ้นตามปริมาณการใช้มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตแทนที่ทรายธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.3 แต่อย่างไรก็ตามสามารถลดการหดรัดตัวที่เพิ่มขึ้นนี้ได้โดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ของคอนกรีตให้น้อยลง (Kou and Poon, 2009) นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตที่ได้จากย่อยคอนกรีตที่มีกำลังสูงมีค่าการหดรัดตัวน้อยกว่าการใช้มวลรวมจากการย่อยเศษคอนกรีตที่กำลังอัดต่ำ (Gonzalez-Corominas and Etxeberria, 2016)



รูปที่ 4.3 การหดตัวแห้งของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตแทนที่ทรายร้อยละ 25 ถึง 100 (RF25-RF100) เทียบกับคอนกรีตที่ใช้ทรายล้วน (Control-1) (Kou and Poon, 2009)

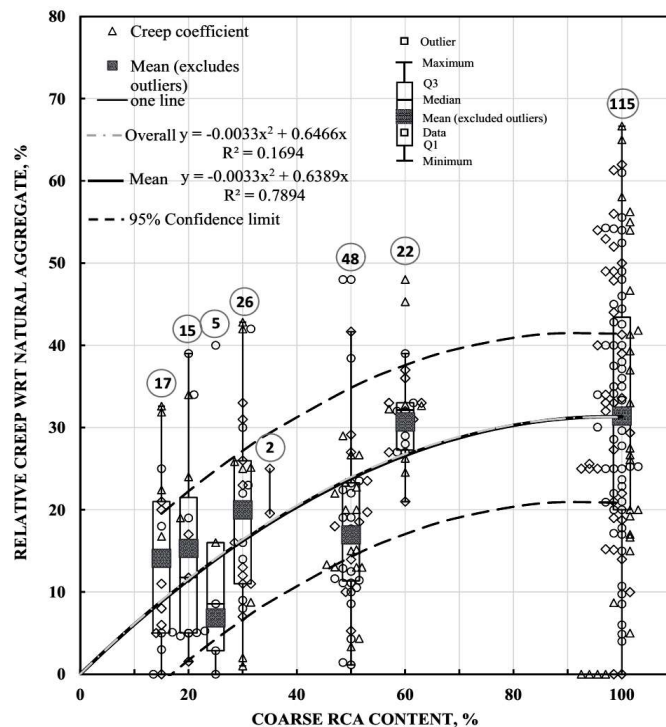
ข) สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักคือ สมบัติและปริมาณของมวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ใช้ในส่วนผสม นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ชนิดและปริมาณที่ใช้ของสารผสมเพิ่ม เป็นต้น เนื่องจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีคุณภาพต่ำกว่ามวลรวมปกติจากธรรมชาติ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตจึงมีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกำลังอัดของมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 10-30 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติที่ใช้ปริมาณน้ำเท่ากันและมีแนวโน้มลดลงมากขึ้นสำหรับคอนกรีตมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำๆ (Limbachiya et al., 2000; Revathi et al., 2013) อย่างไรก็ตามเราสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ เช่น การใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมปกติในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตใกล้เคียงกัน (Exteberria et al., 2007) การใช้วัสดุผสมเพิ่ม เช่น ซิลิกาฟูม ดินขาวเผา หรือวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ในปริมาณและขนาดที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ (Radonjanin et al., 2013; Somna et al., 2012) การใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีคุณภาพ เช่น มีเศษมอร์ตาร์เกาะที่ผิวน้อยหรือมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ จะส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ดีขึ้น (Duan and Poon, 2014) นอกจากนั้นเมื่อต้องการนำคอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตไปใช้สำหรับงานโครงสร้างและให้ได้กำลังอัดตามที่ออกแบบไว้ จำเป็นต้องมีการออกแบบส่วนผสมที่ดีและเหมาะสม โดยอาจมีการปรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้ลดลงหรือใช้สารเคมีผสมเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต เป็นต้น

คุณสมบัติทางกลอื่นๆของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลปกติทั่วไป โดยมีพฤติกรรมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กำลังดึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตแทนที่มวลรวมปกติจากธรรมชาติที่มากขึ้น การทำให้มวลรวมจากเศษคอนกรีตอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งก่อนนำไปผสมคอนกรีตช่วยลดการดูดน้ำของมวลรวมจาก

ส่วนผสมคอนกรีต ทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติทางกลดีขึ้น การใช้สารเคมีผสมเพิ่มหรือแร่ธาตุผสมเพิ่มในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยปรับปรุงค่ากำลังดึงของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตให้ดีขึ้นได้ (Silva et al., 2015) การใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่ย่อยจากคอนกรีตกำลังสูงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกำลังดึงในคอนกรีตได้ (McNeil and Kang, 2013) ตามถึงแม้ว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมจะมีค่ากำลังดึงต่ำคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ แต่อัตราส่วนระหว่างกำลังดึงแยกแบบผ่าซีกและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตยังคงมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับคอนกรีตที่ใช้มวลปกติเป็นส่วนผสม (Sagoe-Crentsil et al., 2001)

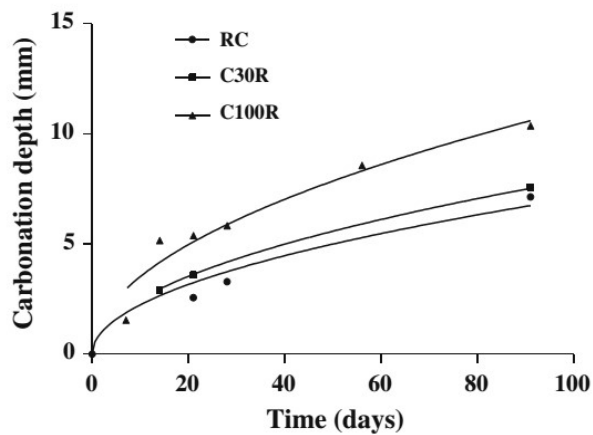
การคืบของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นตามปริมาณการใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม โดยอาจมีค่ามากกว่าร้อยละ 60 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ ดังรูปที่ 4.4 เนื่องจากความไม่แข็งแรงของเศษมอร์ตาร์เก่าที่เกาะรอบๆมวลรวม ทั้งนี้สามารถลดการคืบโดยการออกแบบคอนกรีตที่มวลรวมจากเศษคอนกรีตนี้ให้มีกำลังอัดสูงขึ้น (Lye et al., 2016)



รูปที่ 4.4 ปริมาณการคืบที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตในปริมาณต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ (Lye et al., 2016)

มวลรวมจากเศษคอนกรีตมีการดูดซึมน้ำที่สูงและมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่ามวลรวมปกติจากธรรมชาติ เนื่องจากความพรุนของเศษมอร์ตาร์เก่าและมีเศษซีเมนต์เพสต์ชิ้นเล็กๆผสมอยู่ ดังนั้นคอนกรีตที่ใช้มวลรวมประเภทนี้จึงมีความพรุนและการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ (Bravo et al., 2015) นอกจากนั้นค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ผสมมวลรวมจากเศษคอนกรีตยังสูงกว่าการใช้มวลรวมปกติ (Somna et al., 2012) การดูดซึมน้ำและการซึมผ่านของน้ำที่สูง จะส่งผลให้ความความทนทานต่อ

การแทรกซึมของคลอไรด์และคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตลดลง (Evangelista and de Brito, 2010) ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าระยะความลึกของคาร์บอนเนชั่นที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมมีค่ามากกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติจากธรรมชาติ ส่วนความทนทานต่อการสึกกร่อนพบว่ามีค่าลดลงร้อยละ 12 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ (Sagoe-Crentsil et al., 2001) การใช้เศษคอนกรีตเป็นมวลรวมในส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงกลับพบว่าความทนทานต่อการสึกกร่อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้มวลรวมปกติ (Limbachiya et al., 2000) การใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตที่มีคุณภาพดี นอกจากช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตให้ดีขึ้นแล้วยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านความทนทานอีกทางหนึ่งด้วย (Liu et al., 2016) การปรับปรุงมวลรวมจากเศษคอนกรีตโดยวิธี Carbonation treatment ก่อนนำไปผสมคอนกรีตจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลและความทนทานของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นได้ (Shi et al., 2016)



รูปที่ 4.5 ระยะความลึกของคาร์บอนเนชั่นกับเวลาของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ (RC) และคอนกรีตที่ใช้มวลรวมละเอียดจากเศษคอนกรีตร้อยละ 30 และ 100 (C30R และ C100R)
(Evangelista and de Brito, 2010)

จากที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากมวลรวมจากเศษคอนกรีตมีคุณสมบัติต่ำกว่ามวลรวมปกติที่ใช้ทั่วไป ดังนั้นคอนกรีตที่มีมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสมจึงมีคุณสมบัติทางกลและความทนทานต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ อย่างไรก็ตามเราสามารถปรับปรุงคุณสมบัติที่ด้อยลงเหล่านี้ได้หลายวิธี เช่น ใช้เศษคอนกรีตที่มีคุณภาพดีมากขึ้นหรือปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นก่อนนำมาใช้งาน ใช้สารเคมีผสมเพิ่มหรือแร่ธาตุผสมเพิ่มในปริมาณและชนิดที่เหมาะสม ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นหรือนำไปใช้งานให้เหมาะสม เป็นต้น นอกจากนั้นการใช้เศษวัสดุเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในการเป็นมวลรวมในงานคอนกรีต ถือเป็นการเพิ่มมูลค่าหรือการใช้ประโยชน์ให้กับเศษวัสดุ ส่งผลให้ปริมาณมลพิษของสิ่งย่อยสลายยากลดลง และยังสามารถลดปริมาณการใช้มวลรวมจากธรรมชาติได้อีกด้วย

4.4 คอนกรีตผสมมวลรวมจากเถ้าหนัก

เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา (bottom ash) เป็นอีกหนึ่งผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหิน เช่นเดียวกับเถ้าลอย เถ้าหนักเกิดจากการหลอมละลายรวมกันของเถ้าถ่านหิน ทำให้มีขนาดที่โตกว่าเถ้าลอย มีลักษณะของอนุภาคขนาดใหญ่และรูปร่างที่ไม่แน่นอน ทั้งเป็นก้อนพรุนผิวหยาบและผกคล้ายทราย เถ้าหนักมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับเถ้าลอย แต่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาที่ด้อยกว่าเถ้าลอยค่อนข้างมาก ดังนั้นเถ้าหนักมักถูกนำไปใช้เป็นวัสดุถมหรือกองทิ้งบริเวณพื้นที่รอบๆ โรงผลิตกระแสไฟฟ้าหรือถูกใช้สำหรับเป็นวัสดุชั้นพื้นทางและรองพื้นทางในการก่อสร้างถนน ซึ่งถือเป็นการใช้ประโยชน์ที่ไม่คุ้มค่าเมื่อเทียบกับปริมาณที่มีอยู่มากในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีการนำไปบดให้ละเอียดแล้วนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้เหมือนกับเถ้าลอย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการนำเถ้าหนักไปใช้เป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแทนการใช้มวลรวมที่ได้จากธรรมชาติในงานคอนกรีตเท่านั้น รูปที่ 4.6 แสดงที่กองเก็บและลักษณะเถ้าหนักที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



รูปที่ 4.6 ที่กองเก็บและลักษณะเถ้าหนักที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

เถ้าหนักที่ได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะจับตัวเป็นก้อน ต้องมีการนำไปผ่านกระบวนการย่อยด้วยเครื่องย่อยให้มีขนาดเล็กลงและคัดขนาดเพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ซึ่งมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ และมีความพรุนสูงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหินปูนและทรายแม่น้ำจากธรรมชาติ ดังรูปที่ 4.7 เถ้าหนักมีค่าความถ่วงจำเพาะและค่าหน่วยน้ำหนักต่ำกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำของเถ้าหนักหยาบและเถ้าหนักละเอียดพบว่ามีความสูงกว่าหินปูนและทรายแม่น้ำเล็กน้อยและค่าความต้านทานการสึกกร่อนโดยวิธีลอสมองเจลลิสของเถ้าหนักหยาบมีค่ามากกว่าหินปูนจากธรรมชาติ ตารางที่ 4.5 แสดงตัวอย่างสมบัติทางกายภาพของมวลรวมจากเถ้าหนักเปรียบเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ ส่วนผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ (X-Ray Diffraction, XRD) ดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเถ้าหนักมีส่วนประกอบคล้ายๆกับเถ้าลอย คือประกอบด้วยอะโนไรต์

(anortile), ควอตซ์ (quartz), เหล็กออกไซด์ (iron oxide) เป็นต้น แต่ถ้ำหนักมีความเป็นผลึกมากกว่า ถ้ำลอย (Wongsa et al., 2016)

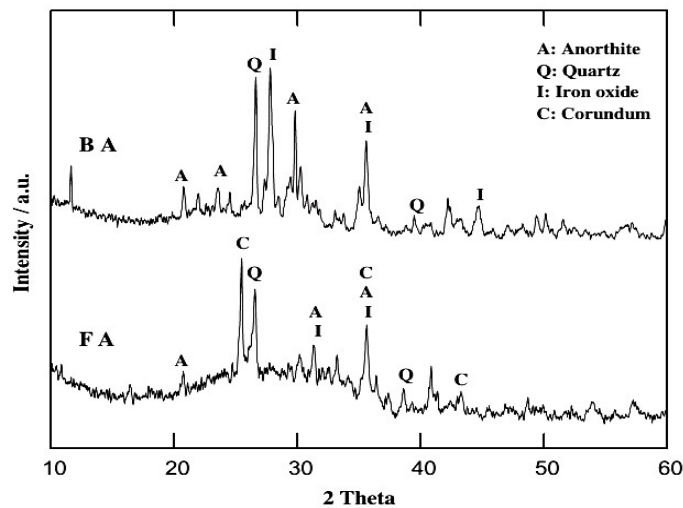
การใช้ถ้ำหนักละเอียดเป็นมวลรวมละเอียดทดแทนการใช้ทรายแม่น้ำในส่วนผสมของคอนกรีต ทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตลดลง เนื่องจากถ้ำหนักละเอียดมีอนุภาคที่ค่อนข้างหยาบ ผิวขรุขระ และมีรูพรุนมากกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคของทรายแม่น้ำซึ่งมีเนื้อที่แน่นและผิวที่เรียบกว่า ทำให้ถ้ำหนักมีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าทรายแม่น้ำ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการทำงานของคอนกรีต ที่ลดลง (Kim and Lee, 2011) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยบางส่วนพบว่าการใช้มวลรวมจากถ้ำหนักในสภาพ อิมมัลชันแห้งแทนที่มวลรวมปกติที่มากขึ้นกลับเพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต ทั้งนี้อาจ เกิดจากการดูดซึมน้ำที่สูงของถ้ำหนักทำให้ต้องชดเชยน้ำในสภาพอิมมัลชันแห้งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อผสมคอนกรีต น้ำส่วนนี้จึงทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตเพิ่มขึ้น (Shi-Cong and Chi-Sun, 2009) นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากถ้ำหนักมีระยะเวลาการก่อตัวและการเย็นน้ำมากขึ้น เนื่องจาก ส่วนผสมมีความต้องการน้ำมากขึ้น (Ghafoori and Bucholc, 1996) การใช้ถ้ำหนักเป็นมวลรวมใน คอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ถ้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้ถ้ำ หนักละเอียดและถ้ำหนักหยาบเป็นมวลรวมในปริมาณร้อยละ 100 อาจมีค่าหน่วยน้ำหนักที่ต่ำกว่า 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากถ้ำหนักเป็นมวลรวมที่มีรูพรุนในตัวเองสูง จากการศึกษาวิจัยของ Kim and Lee (2011) พบว่าการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยถ้ำหนักละเอียดในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้คอนกรีต มีความหนาแน่นที่ลดลง แต่การแทนที่หินธรรมชาติด้วยถ้ำหนักหยาบในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้คอนกรีตมี ความหนาแน่นที่ลดลงมากกว่าเมื่อเทียบกับการแทนที่ด้วยถ้ำหนักละเอียด เนื่องจากถ้ำหนักหยาบมีรูพรุน ในตัวเองที่สูงกว่าถ้ำหนักละเอียด อย่างไรก็ตามการแทนที่หินและทรายด้วยถ้ำหนักหยาบและถ้ำหนัก ละเอียดจะส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นที่ลดลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.9



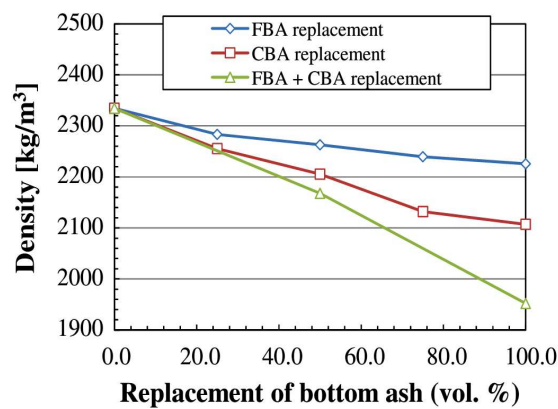
รูปที่ 4.7 รูปร่างของถ้ำหนักที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวมจากเถ้าหนักเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมจากธรรมชาติ (Wongsa et al., 2016)

คุณสมบัติ	เถ้าหนักหยาบ	เถ้าหนักละเอียด	หินปูน	ทรายแม่น้ำ
ค่าหน่วยน้ำหนักบดแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1,116	1,371	1,576	1,671
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.47	2.54	2.63	2.63
ค่าร้อยละของการดูดซึมน้ำ	3.32	3.53	0.54	0.35
ค่าโมดูลัสความละเอียด	6.1	3.2	6.0	3.3
ค่าร้อยละการสึกกร่อน แบบลอสมองเจลลิส	39.4	-	31.0	-

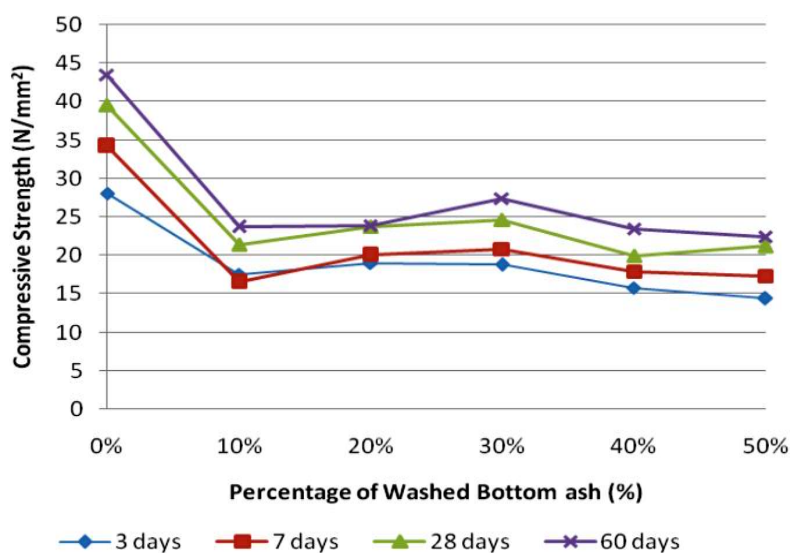


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าหนัก (BA) และเถ้าลอย (FA) (Wongsa et al., 2016)



รูปที่ 4.9 ความหนาแน่นของคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าหนักละเอียด (FBA) และเถ้าหนักหยาบ (CBA) (Kim and Lee, 2011)

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ กำลังของมวลรวมที่ใช้ ความพรุนของเพสต์ และแรงยึดเกาะระหว่างเพสต์กับผิวของมวลรวม เนื่องจากมวลรวมจากเถ้าหนักมีผิวหยาบ ขรุขระ และรูพรุนสูงกว่ามวลรวมจากธรรมชาติ ถึงแม้จะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเพสต์กับมวลรวมดีขึ้น แต่ก็ทำให้ส่วนผสมมีความต้องการน้ำมากกว่า ส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงตามไปด้วย นอกจากนั้นจากปริมาณน้ำที่สูงขึ้น การเย็นน้ำจะสูงขึ้นด้วย ทำให้เกิดโพรงระหว่างผิวมวลรวมจากเถ้าหนักและในซีเมนต์เพสต์สูงขึ้น ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเถ้าหนักจึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เถ้าหนักแทนที่มวลรวมปกติในปริมาณที่มากขึ้นดังรูปที่ 4.10 อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยบางส่วนพบว่าการใช้เถ้าหนักแทนทรายไม่ได้ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทรายล้วน ทั้งนี้อาจเกิดจากเถ้าหนักที่ใช้แทนทรายสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ ดังนั้นกำลังที่ได้จึงไม่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน (Singh and Siddique, 2015) ส่วนการศึกษาอิทธิพลของการแทนที่หินและทรายแม่น้ำด้วยเถ้าหนักหยาบและเถ้าหนักละเอียดที่มีผลต่อสมบัติของคอนกรีตกำลังสูงของ Kim and Lee (2011) พบว่าคอนกรีตมีแนวโน้มของกำลังอัดที่ไม่แน่นอน ซึ่งอาจเกิดจากการใช้สัดส่วนผสมที่มีซีเมนต์เพสต์ในปริมาณที่สูงเกินไปในส่วนผสม จึงทำให้อิทธิพลของการแทนที่เถ้าหนักเหล่านั้นส่งผลต่อกำลังอัดที่ไม่ชัดเจนแสดงดังรูปที่ 4.11 ส่วนคุณสมบัติทางกลอื่นๆ เช่น กำลังดึง กำลังดัด และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักเป็นมวลรวมมีลักษณะที่สอดคล้องกับกำลังอัด ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับคอนกรีตใช้มวลรวมปกติทั่วไป

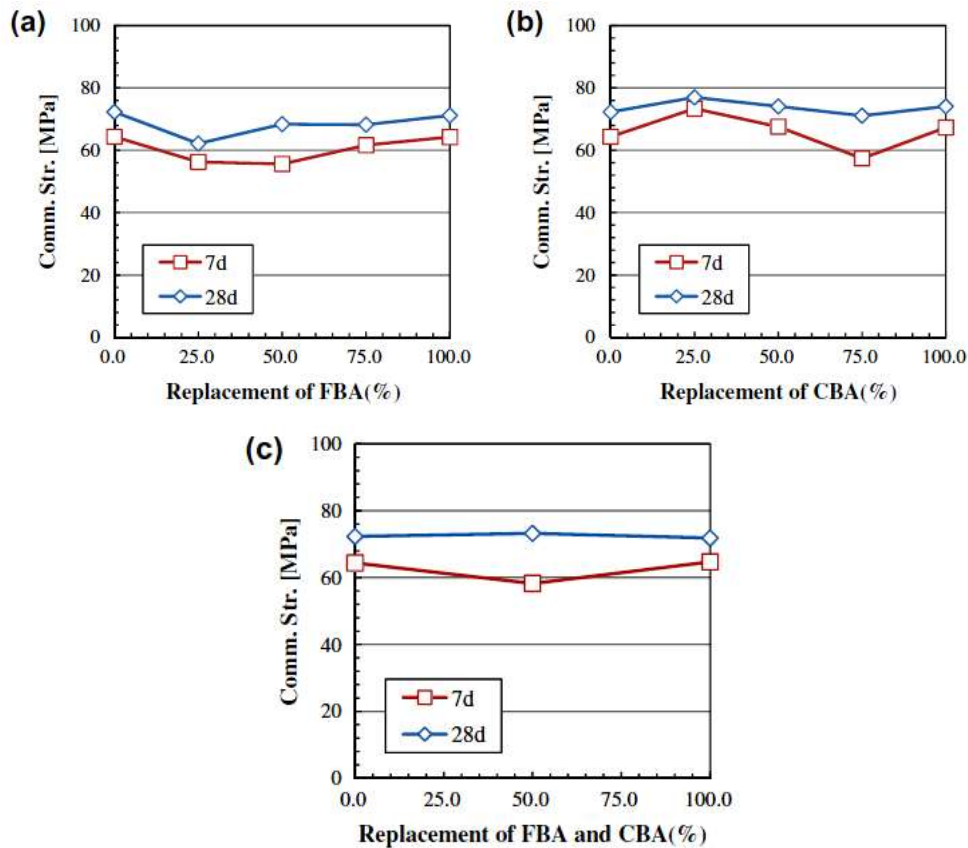


รูปที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักแทนที่ทรายร้อยละ 0-50 (Sani et al., 2010)

4.5 คอนกรีตผสมมวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากวัสดุอื่นๆ

มวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษวัสดุนอกจากเศษคอนกรีตหรือเถ้าหนักแล้ว ยังมีเศษวัสดุอื่นๆ ที่นำมาศึกษาเป็นมวลรวมในงานคอนกรีต เช่น เถ้าหนัก เศษยางรถยนต์ เศษอิฐมวลเบา เศษคอนกรีตบล็อก เศษแก้ว เศษเซรามิก เป็นต้น แต่ข้อมูลจากงานวิจัยของการใช้เศษวัสดุเหล่านี้ยังคงค่อนข้างน้อยและ

การศึกษายังไม่กว้างขวาง จึงควรมีการศึกษาหรือพัฒนาเพิ่มเติม โดยในส่วนนี้จะมีข้อมูลเป็นเบื้องต้นแก่ผู้ที่สนใจดังนี้



รูปที่ 4.11 กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าหนักเป็นมวลรวม (a) ละเอียด (FBA), (b) หยาบ (CBA) และ (c) ละเอียดผสมหยาบ (FBA and CBA) ในปริมาณต่างๆ (Kim and Lee, 2011)

4.5.1 มวลรวมจากเศษยางรถยนต์

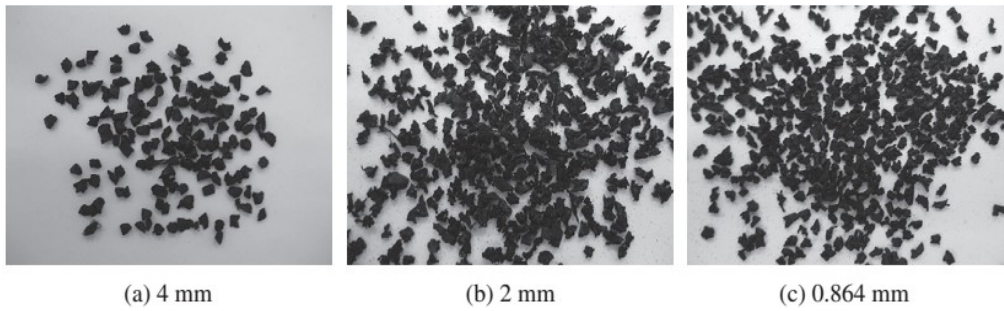
การนำเศษยางรถยนต์เก่าหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเป็นมวลรวมในงานคอนกรีต โดยทั่วไปมวลรวมจากเศษยางรถยนต์สามารถแบ่งตามการใช้งานและขนาดได้ 2 ลักษณะคือ ใช้เป็นมวลรวมหยาบเรียกว่า Shredded rubber หรือ Chipped rubber เป็นเศษยางรถยนต์ที่ได้จากการนำยางรถยนต์เก่ามาย่อยหลายๆช่วงขนาด เช่น 13-76 มิลลิเมตร และใช้เป็นมวลรวมละเอียดเรียกว่า Crumb rubber เป็นเศษยางหรือเม็ดยางที่ได้จากการย่อยและบดให้มีขนาดเล็กประมาณ 0.425-4.75 มิลลิเมตร นอกจากนั้นยังมีการนำมาบดให้ละเอียดลงไปอีกเรียกว่า Ground rubber ซึ่งหลังการบดแล้วมีการคัดแยกกลวดเหล็กที่อยู่ภายในออกด้วยแม่เหล็กและร่อนให้ได้ขนาดเล็กลงอยู่ในช่วง 0.075-0.475 มิลลิเมตร ผงยางรถยนต์บดละเอียดที่ได้จะถูกนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต (Ganjian et al., 2009)

ลักษณะของเศษยางรถยนต์ที่นำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในงานคอนกรีตส่วนใหญ่มีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวหยาบ อาจมีเส้นใย เศษเหล็กหรือลวดสั้นๆแทรกอยู่ในก้อนเม็ดยางดังรูปที่ 4.12 แต่ถ้าเม็ดยางที่เล็กกว่านี้จะถูกใช้เป็นมวลรวมละเอียดซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นเหลี่ยมมุม แต่เศษเหล็กผสมอยู่น้อย เพราะมีการแยกเอาเศษเหล็กออกบางส่วนก่อนนำมาใช้ในงานคอนกรีต ดังรูปที่ 4.13 มวลรวมจากเศษยางรถยนต์มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.61-1.16 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดของยางรถยนต์ กระบวนการย่อยและการแยกเอาเศษเหล็กออก (Hernandez-Olivares and Barluenga, 2004; Khaloo et al., 2008; Sukontasukkul and Tiamlom, 2012)

การใช้มวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมปกติในส่วนผสมคอนกรีตมีผลต่อความสามารถในการทำงานได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และสัดส่วนผสม โดยส่วนใหญ่พบว่าการใช้มวลรวมจากเศษยางรถยนต์ทำให้ความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตลดลง เช่น การใช้มวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลรวมเบาจะส่งผลให้ค่าการยุบตัวลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่มากขึ้น (Jv et al., 2015) ในขณะที่การใช้เศษยางรถยนต์ที่มีขนาดคละดีเป็นมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดแทนที่มวลรวมจากธรรมชาติร้อยละ 0 ถึง 75 โดยปริมาตร จะไม่ส่งผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีต (Aiello and Leuzzi, 2010) ในขณะที่ Wang et al., (2013) พบว่า การใช้เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมปกติไม่เกินร้อยละ 20 คอนกรีตจะมีค่าการยุบตัวมากขึ้น แต่ถ้าใช้ในปริมาณมากกว่านี้จะส่งผลให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตลดลง ส่วนระยะเวลาการก่อตัวและการเย็นตัวของมอร์ตาร์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีเศษยางรถยนต์เป็นส่วนผสม (Pierce and Blackwell, 2003; Al-Akhras and Samadi, 2004) ความหนาแน่นของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตมีค่าลดลงตามปริมาณการใช้เศษยางรถยนต์เป็นส่วนผสมที่มากขึ้น เนื่องจากยางรถยนต์เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำกว่ามวลรวมปกติจากธรรมชาติ เมื่อใช้แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10-30 ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่ได้ลดลงถึงร้อยละ 14-28 (Sukontasukkul, 2009)

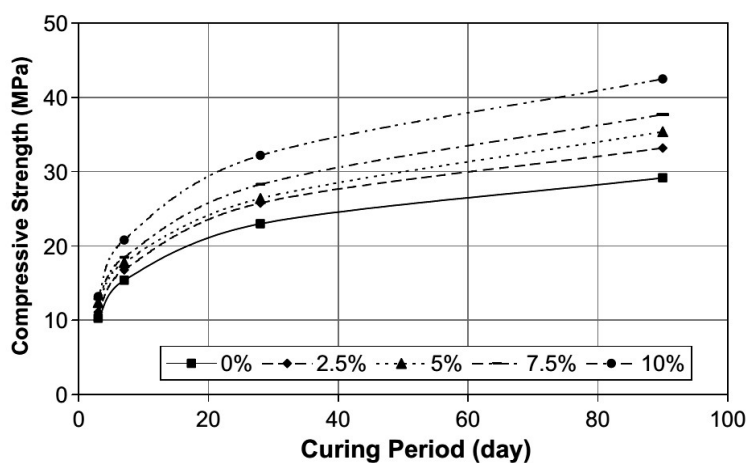


รูปที่ 4.12 มวลรวมหยาบจากเศษยางรถยนต์ (Aiello and Leuzzi, 2010)



รูปที่ 4.13 มวลรวมละเอียดจากเศษยางรถยนต์ (Lijuan et al., 2014)

กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบปกติด้วยเศษยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษยางรถยนต์มีความแข็งแรงน้อยกว่า อีกทั้งยังมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเศษยางกับซีเมนต์เพสต์ที่ต่ำกว่า แสดงดังรูปที่ 4.14 (Al-Akhras and Samadi, 2004) เมื่อใช้ในปริมาณที่มากขึ้น กำลังอัดของกริตก็จะลดลง โดยบางส่วนพบว่าการใช้เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมหยาบปกติทั้งหมดทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดลดลงร้อยละ 85-90 และกำลังดึงแยกแบบผ่าซีกลดลงร้อยละ 50 (Eldin Neil and Senouci Ahmed, 1993) ส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังดัดก็มีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษยางรถยนต์ที่มากขึ้น (Aiello and Leuzzi, 2010; Sukontasukkul and Tiamlom, 2012) ซึ่งสอดคล้องและเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับกำลังอัด

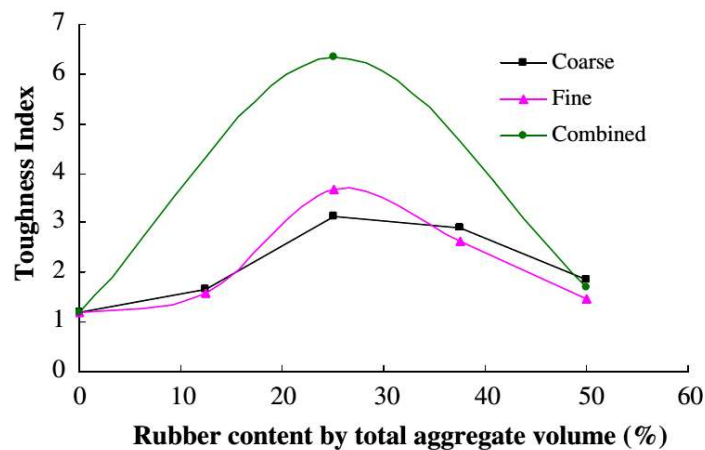


รูปที่ 4.14 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้เศษยางแทนที่ทรายในปริมาณร้อยละ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 ที่อายุการบ่มต่างๆ (Al-Akhras and Samadi, 2004)

ความเหนียว (toughness) ของคอนกรีต (คือความจุในการดูดซับพลังงาน (energy absorption capacity) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงและการแอ่นตัวของตัวอย่างในการทดสอบกำลังดัด) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีมวลรวมจากเศษยางรถยนต์เป็นส่วนผสม (Sukontasukkul and Chaikaew, 2006) แต่อย่างไรก็ตามถ้าใช้เศษยางรถยนต์ในปริมาณที่สูงเกินร้อยละ 25 ค่าความเหนียวจะ

ลดลงเพราะว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตมีค่าลดลงมาก ซึ่งส่งผลให้ค่าความเหนียวลดลงด้วย (Khaloo et al., 2008) ดังรูปที่ 4.15

นอกจากนี้การใช้มวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษยางรถยนต์เป็นส่วนผสมยังส่งผลให้คอนกรีตมีปริมาณโพรงอากาศเพิ่มขึ้นด้วย (Siddique and Naik, 2004) การซึมผ่านของน้ำและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของการแทนที่มวลรวมปกติด้วยเศษยางรถยนต์เก่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษยางรถยนต์จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเศษยางกับเพสต์น้อยกว่ามวลรวมหยาบจากธรรมชาติ เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วจึงทำให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำถูกดูดซับและการซึมผ่านของน้ำมีค่ามากขึ้น (Ganjian et al., 2009) จากความหนาแน่นที่ลดลงของคอนกรีตเมื่อใช้เศษยางรถยนต์เป็นส่วนผสม ทำให้คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติในการดูดซับเสียงดีขึ้นและค่าการนำความร้อนยังมีค่าลดลงอีกด้วย (Sukontasukkul, 2009)



รูปที่ 4.15 ค่าดัชนีความเหนียวของคอนกรีตที่ใช้เศษยางรถยนต์แทนที่มวลรวมปกติสำหรับมวลรวมหยาบ (Coarse) มวลรวมละเอียด (Fine) และมวลรวมหยาบกับมวลรวมละเอียด (Combined) ปริมาณต่างๆกัน (Khaloo et al., 2008)

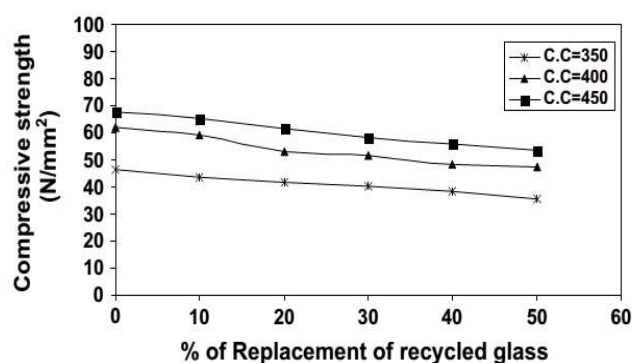
เนื่องเศษยางรถยนต์เก่าที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของเศษยางกับซีเมนต์เพสต์ที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตมีคุณสมบัติทางกลที่ลดลง ซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้เป็นคอนกรีตงานโครงสร้าง ถึงแม้ว่ามวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษยางรถยนต์สามารถปรับปรุงและเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวได้โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbon tetrachloride) (Eldin Neil and Senouci Ahmed, 1993; Siddique and Naik, 2004) แต่คอนกรีตที่ได้ก็มีคุณสมบัติที่ด้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้มวลรวมปกติ ดังนั้นมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษยางเป็นส่วนผสมควรประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ เช่น คอนกรีตมวลเบา คอนกรีตบล็อก แผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปกันเสียงหรือความร้อน เป็นต้น

4.5.2 มวลรวมจากเศษแก้ว

เศษแก้วเป็นอีกเศษวัสดุชนิดหนึ่งที่มีปริมาณมากและย่อยสลายยาก มีหลากหลายลักษณะ เช่น เศษแก้วทรงซึ่งได้จากขวดแก้วเป็นส่วนใหญ่ เศษแก้วแบนได้จากกระจกเป็นหลัก และเศษแก้วพิเศษ เช่น แก้วจากจอมอร์นิเตอร์ หลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น เศษแก้วเหล่านี้เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยผ่านกระบวนการหลอมเป็นแก้วใหม่ อย่างไรก็ตามเศษแก้วบางส่วนก็สามารถนำมาศึกษาใช้ในงานคอนกรีตได้เช่นเดียวกัน เช่น นำไปบดละเอียดเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตซึ่งให้ค่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 110 ทั้งนี้เพราะแก้วมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อบดละเอียดมากๆ จะสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เป็นอย่างดี (Shi et al., 2005) นอกจากนั้นยังมีการนำเศษแก้วไปผ่านกระบวนการย่อยให้มีขนาดเล็ก แล้วใช้เป็นมวลรวมละเอียดในงานคอนกรีตดังรูปที่ 4.16 จากการนำเอาเศษแก้วย่อยใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายในงานคอนกรีตที่อัดแน่นด้วยตัวเองพบว่าคอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากผิวของเศษแก้วมีความเรียบและมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ส่วนค่ากำลังอัด กำลังดึงแยกแบบผ่าซีก และโมดูลัสยืดหยุ่นจะมีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณการแทนที่ทรายที่มากขึ้นดังรูปที่ 4.17 เนื่องจากมวลรวมละเอียดจากเศษแก้วมีผิวที่เรียบจึงส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเศษแก้วและเพสต์ลดลง ความแข็งแรงจึงลดลงตามไปด้วย (Ali and Al-Tersawy, 2012)



รูปที่ 4.16 มวลรวมละเอียดจากเศษแก้ว



รูปที่ 4.17 กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วย่อยแทนที่ทรายร้อยละ 0-50

(Ali and Al-Tersawy, 2012)

4.5.3 มวลรวมจากเศษเซรามิก

เศษเซรามิกส่วนใหญ่ได้จากเครื่องนอนอาคาร เช่น กระเบื้องหรือสุขภัณฑ์ดังรูปที่ 4.18 เศษเซรามิกหลังจากการย่อยให้มีขนาดตามต้องการแล้ว จะมีสมบัติที่แตกต่างกันตามชนิดของเซรามิกที่นำไปใช้งาน แต่ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือมีคุณภาพดีกว่ามวลรวมทั่วไปที่ใช้ในงานคอนกรีต จากการศึกษาของ Bartosz et al., (2016) ได้ใช้มวลรวมจากเศษเซรามิกของสุขภัณฑ์ที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.64 การดูดซึมน้ำร้อยละ 1.5 กำลังอัด 450 เมกะปาสกาล และโมดูลัสยืดหยุ่น 600×10^2 เมกะปาสกาล เป็นส่วนผสมในคอนกรีตกำลังสูง พบว่าคอนกรีตที่ใช้เศษเซรามิกเป็นมวลรวมให้กำลังอัดที่ 28 วันสูงกว่า 120 เมกะปาสกาล โดยกำลังอัดและกำลังดึงสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้กรวดและหินบะซอลต์เป็นมวลรวมถึงร้อยละ 24 และ 34 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเศษเซรามิกมีความแข็งแรงสูง หลังผ่านกระบวนการย่อยจะมีผิวหยาบ ทำให้เพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างเฟสกับผิวมวลรวมได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.18 มวลรวมที่นำกลับมาใช้ใหม่จากเศษเซรามิกสุขภัณฑ์ (Bartosz et al., 2016)

4.6 บรรณานุกรม

- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2556). มาตรฐาน วสท. 1014-46 ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต (ปรับปรุงครั้งที่ 1). วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- Aiello, M.A. and Leuzzi, F. (2010). Waste type rubbrized concrete: Properties at fresh and hardened state. **Waste Management**, 30, 1696-1704.
- Al-Akhras, N. and Samadi, M.M. (2004). Properties of tire rubber ash mortar. **Cement and Concrete Composites**, 26, 821-826.
- Ali, E.E. and Al-Tersawy, S.H. (2012). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in seft compacting concrete. **Construction and Building Materials**, 35, 785-791.

- American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33/C33M-13. **Annual Book of ASTM Standard**, 4(2).
- American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM C131/C131M-14. **Annual Book of ASTM Standard**, 4(2).
- Bartosz, Z., Macciej, S., and Pawel, O. (2016). Ultra-high strength concrete with recycled aggregate from sanitary ceramic waste-The method of production and interfacial transition zone. **Construction and Building Materials**, **122**, 736-742.
- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., and Evangelista, L. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition plants. **Construction and Building Materials**, **77**, 357-369.
- Duan, Z.H. and Poon, C.S. (2014). Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. **Materials and Design**, **58**, 19-29.
- Eldin Neil, N. and Senouci Ahmed, B. (1993). Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, **5**(4), 478-496.
- Evangelista, L. and de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, **32**(1), 9-14.
- Exteberria, M., Vasquez, E., and Mari, A.R. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, **37**, 735-742.
- Ganjian, E., Khorami, M. and Maghsoudi, A.A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction and Building Materials**, **23**(5), 1828-1836.
- Ghafoori, N. and Bucholc, J. (1996). Investigation of lignite based bottom ash for structural concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, **8**(3), 128-37.
- Gonzalez-Corominas, A., and Etxeberria, M. (2016). Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance. **Construction and Building Materials**, **115**, 32-41.
- Hernandez-Olivares, F. and Barluenga, G. (2004). Fire performance of recycled rubberfilled high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, **34**, 109-117.

- Jv, J., Zhou, T., Du, Q., and Wu, H. (2015). Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, **91**, 145-149.
- Khaloo, A.R., Dehestani, M., and Rahamatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. **Waste Management**, **28**, 2472–2482.
- Kim, H.K. and Lee, H.K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregate in high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, **25**, 1115-1122.
- Kou, S.C. and Poon, C.S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, **31**(9), 622-627.
- Lijuan, L., Shenghua, R., and Lan, Z. (2014). Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles. **Construction and Building Materials**, **70**, 291-308.
- Limbachiya, M.C., Leelawat, T., and Dhir, R.K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures**, **33**, 574–580.
- Liu, K., Yan, J., HU, Q., Sun, Y., and Zou, C. (2016). Effect of parent concrete and mixing method on the resistance freezing and thawing of air-entrained recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, **106**, 264-273.
- Lye, C.Q., Dhir, R.K., Ghataora, G.S., and Li, H. (2016). Creep strain of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, **102**, 244-259.
- McNeil, K. and Kang, T.H.K. (2013). Recycled concrete aggregate: A review. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, **7**(1), 61-69.
- Nuaklong, P., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2016). Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymers concrete properties. **Journal of Cleaner Production**, **112**, 2300-2307.
- Ozalp, F., Yilmaz, H.D., Kara, M., Kaya, O., and Sahin, A. (2016). Effect of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. **Construction and Building Materials**, **110**, 17-23.
- Pierce, C.E. and Blackwell, M.C. (2003). Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill. **Waste Management**, **23**, 197–208.

- Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., and Kou, S.C. (2004). Influence of moisture state of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, **34**(1), 31-36.
- Radonjanin, A., Malesev, M., Marinkovic, S., Al Maly, A.E.S. (2013). Green recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, **47**, 1503-1511.
- Revathi, P., Selvi, R.S., and Velin, S.S. (2013). Investigations on fresh and hardened properties of recycled aggregates self compacting concrete. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, **94**(3), 179-185.
- Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., and Taylor, A.H. (2001). Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, **31**, 701-712.
- Saiz Martinez, P., Gonzalez Cortina, M., Fernandez Martinez, F., and Rodriguez Sanchez A. (2016). Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**, **118**, 162-169.
- Sani, M.S.H.M., Muftah, F., and Muda, Z. (2010). The properties of special concrete using washed bottom ash (WBA) as partial sand replacement. **International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology**, **1**(2), 65-76.
- Sata, V., Wongsas, A., and Chindapasirt, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, **42**, 33-39.
- Senas, L., Priano, C., and Marfil, S. (2016). Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes. **Construction and Building Materials**, **113**, 498-505.
- Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., and Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate-A review. **Journal of Cleaner Production**, **112**, 466-472.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C., and Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, **35**, 987-993.
- Shi-Cong, K. and Chi-Sun, P. (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. **Construction and Building Materials**, **23**, 2877-2886.

- Siddique, R. and Naik, T. R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber – An overview. **Waste Management**, **24**(6), 563-569.
- Silva, R.V., de Brito, J., and Dhir, R.K. (2015). Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, **83**, 108-118.
- Singh, M. and Siddique, R. (2015). Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, **91**, 269-278.
- Somna, R., Jaturapitakkul, C., and Made, A.M. (2012). Effect of ground fly ash and bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, **34**, 848-854.
- Sukontasukkul, P. (2009). Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. **Construction and Building Materials**, **23**, 1084–1092.
- Sukontasukkul, P. and Chaikaew, C. (2006). Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. **Construction and Building Materials**, **20**, 450–457.
- Sukontasukkul, P. and Tiamlom, K. (2012). Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size. **Construction and Building Materials**, **29**, 520-526.
- Tangchirapat, W., Buranasing, R., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P. (2008). Influence of rice husk-bark ash on mechanical properties of concrete containing high amount of recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, **22**, 1812-1819.
- Thomas, C., Setien, J., and Polanco, J.A. (2016). Structure recycled aggregate concrete made with precast wastes. **Construction and Building Materials**, **114**, 536-546.
- Wang, H.Y., Chen, B.T., and Wu, Y.W. (2013). A study of fresh properties of control low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC). **Construction and Building Materials**, **41**, 526-531.
- Waseem, S.A. and Singh, B. (2016). Shear transfer strength of normal and high-strength recycled aggregate concrete - An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, **125**, 29-40.
- Wongsa, A., Zeatang, Y., Sata, V., and Chindraprasirt, P. (2016). Properties of lightweight fly ash geopolymer concrete containing bottom ash as aggregates. **Construction and Building Materials**, **111**, 637-643.
- Yagishita, F., Sano, M. and Yamada, M. (1994). **Behaviour of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate**. Erik K. Lauritzen (Ed.), Demolition and reuse of concrete. Rilem:331–42.

บทที่ 5

สมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก ไร้สารตะกั่ว-ซีเมนต์เถ้าลอย

Dielectric and Piezoelectric Properties of Lead-free Piezoelectric Ceramic- Fly ash Cement Composites

รองศาสตราจารย์ ดร. อานนท์ ชัยพานิช, Email: arnon.chaipanich@cmu.ac.th

อ.ดร. รัตติยากร เรียนยอย, นาย ภาคิน ชมเย็น

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จ.เชียงใหม่ 50200

5.1 บทคัดย่อ

วัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถูกนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีต เช่น เซนเซอร์ตรวจสอบแรงเค้นและเซนเซอร์ตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง เป็นต้น ถูกพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาการไม่เข้ากันของเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกหรือพอลิเมอร์กับคอนกรีต มีการใช้วัสดุพอลิเมอร์เช่น เถ้าลอยในงานคอนกรีตเพื่อปรับปรุงสมบัติความทนทานอย่างแพร่หลาย รวมถึงการใช้เถ้าลอยในโครงสร้างขนาดใหญ่ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาของวัสดุผสมเพียโซอิเล็กทริก-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย ได้ขึ้นรูปวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ซีเมนต์เถ้าลอยแบบ 0-3 ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเติมเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริก สมบัติเพียโซอิเล็กทริก และสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมดังกล่าว พบว่า การเติมเถ้าลอยมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงโดยลดลงเล็กน้อยที่ใช้เถ้าลอยที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และลดลงชัดเจนขึ้นเมื่อมีปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น การเติมเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ซีเมนต์เถ้าลอยเมื่อใช้เถ้าลอยที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ เพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่ไม่ใส่เถ้าลอย แต่ค่าจะลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้น

คำหลัก: ซีเมนต์, เถ้าลอย, วัสดุผสม, สมบัติไดอิเล็กทริก, สมบัติเพียโซอิเล็กทริก

5.2 บทนำ

วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Materials) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษเมื่อวัสดุได้รับแรงกล (mechanical force) จะสามารถเปลี่ยนเป็นแรงดันทางไฟฟ้าได้ เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct Piezoelectric Effect) และในทางกลับกันเมื่อเราให้แรงดันทางไฟฟ้าแก่วัสดุจะเกิดการ

เปลี่ยนเป็นแรงกลทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) เรียกว่า ปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ (Converse Piezoelectric Effect) การเปลี่ยนแปลงไปมา ระหว่างพลังงานกล และพลังงานไฟฟ้าสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ โดยส่วนใหญ่วัสดุพิโซอิเล็กทริก มักจะทำมาจากสารจำพวกเซรามิกและพอลิเมอร์ มักถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อาทิ เซนเซอร์ (sensor) ตัวขับเคลื่อน (Actuator) และทรานสดิวเซอร์ (Transducer) (Haertling, 1999; Moulson and Herbert, 1999; Uchino, 2010) สมบัติพิโซอิเล็กทริก จะเกิดขึ้นในวัสดุที่มีสภาพขั้วทางไฟฟ้าเท่านั้น วัสดุพิโซอิเล็กทริกทั้งที่พบในธรรมชาติ และส่วนที่สังเคราะห์ เช่น เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead zirconate titanate) ซึ่งนิยมเรียกว่า “PZT” (Haertling, 1999; Moulson and Herbert, 1999)

เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต, $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ (PZT) เป็นวัสดุพิโซอิเล็กทริกที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ แต่เลดเซอร์โคเนตไททาเนตก่อให้เกิดมลภาวะและปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจาก กระบวนการผลิตเซรามิกในขั้นตอนการแคลไซน์และซินเตอร์ที่มีความร้อนสูงมากกว่า 900 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดเลดออกไซด์ (PbO) ระเหยสู่บรรยากาศจะนำไปสู่ความเป็นพิษ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและมีผลกระทบต่อระบบประสาทของมนุษย์ (Charles et al., 2005; James and Robert, 2008) วัสดุพิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาทดแทนวัสดุพิโซอิเล็กทริกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างพิโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่วได้แก่ แบเรียมไทเทเนต (BT) และ แบเรียมเซอร์โคเนตไทเทเนต (BZT) เป็นต้น งานวิจัยนี้เลือกเซรามิกไร้สารตะกั่วแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต (BZT) ซึ่งได้รับความสนใจในกลุ่มนักวิจัยยุคปัจจุบัน เนื่องจาก แบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีสมบัติไดอิเล็กทริกและพิโซอิเล็กทริกที่ดี (Hennings, 1982; Yu et al., 2002; Ulrich et al, 2001)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธาแต่อย่างไรก็ตามในกรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสาเหตุของการเกิดมลภาวะเรือนกระจกปัจจุบันจึงมีการใช้วัสดุพอลิซิลานเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สำหรับการนำวัสดุทดแทนมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้มีการนำวัสดุพอลิซิลานที่เป็นวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัยและคณะ, 2547; ปริญาและชัย, 2555; Malhotra and Mehta, 1996; Michael, 2007) นอกจากนี้การนำของเสีย หรือวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถจะช่วยลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศและลดพลังงานในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาถ่านหินที่ผ่านการบดละเอียดในโรงไฟฟ้าถ่านหินโดยหลังจากผ่านกระบวนการเผา เถ้าลอยจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส ลดลงเหลือ 200 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 2-3 วินาที เถ้าถ่านหินที่ได้จะจับตัวเป็นรูปร่างทรงกลมและอยู่ในสภาพที่เป็นแก้ว (Glassy phase) (Malhotra and Mehta, 1996) เถ้าลอยเป็นวัสดุพอลิซิลานชนิดหนึ่ง

ที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรมโยธาเพื่อช่วยลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยสามารถใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยตรงเพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในเรื่องปฏิกิริยาปอซโซลานที่ช่วยเพิ่มความทนทานของคอนกรีต (Chindaprasirt et al., 2004; Chindaprasirt et al., 2007; Chalee et al., 2010; Cheewaket et al., 2010) ในปริมาณของเถ้าลอยที่อัตราส่วนที่เหมาะสม และสามารถลดปริมาณการใช้น้ำและลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ป้องกันการเกิดรอยแตกร้าว (Michael, 2007; Davis et al., 1935; Davis et al., 1937; Allen, 1959) สำหรับงานโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา เช่น เชื้อเพลิง สะพานและสิ่งก่อสร้างที่มีขนาดใหญ่หรือคอนกรีตหยาบ เป็นต้น

ผลกระทบของเถ้าลอยต่อสมบัติด้านกำลังอัดนั้น โดยทั่วไปพบว่าเถ้าลอยส่งผลให้กำลังอัดลดลงในช่วงแรกถึง 28 วันและใช้เวลานานขึ้นในการพัฒนากำลังอัดให้เท่าเทียมกับกำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Dhir and Jones, 1999) โดยเฉพาะเมื่อใช้ปริมาณของเถ้าลอยที่มากขึ้น (มากกว่า ร้อยละ 40) ผลต่อกำลังอัดจะเห็นได้ชัด และใช้เวลานานกว่า 365 วัน (Siddique, 2004) แต่ทั้งนี้ขึ้นกับอัตราส่วนเถ้าลอยที่ใช้แทนที่และ ประเภทของเถ้าลอยที่ใช้ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์เป็นต้น (Tangtermsirikul, 2003)

สำหรับวัสดุผสมพิโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นได้รับความสนใจจากนักวิจัยอย่างมาก เนื่องจาก มีความสำคัญอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุฉลาดในงานโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธา มีประโยชน์เพื่อตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างและพัฒนาต่อยอดให้เป็นวัสดุผสมในโครงสร้างพิเศษต่อไปในอนาคต เช่น วัสดุผสมที่รูปแบบโครงสร้างฉลาด หรือนำไปทำเป็นเซนเซอร์ในอาคารขนาดใหญ่ เป็นต้น การนำวัสดุผสมพิโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต้องคำนึงถึงความแตกต่างของสมบัติของวัสดุ เช่น ความไม่เข้ากัน (Mismatching) ของวัสดุพิโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียสัญญาณในวัสดุพิโซอิเล็กทริกอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงนำไปสู่การพัฒนาของวัสดุผสมเซรามิกพิโซอิเล็กทริกที่มีซีเมนต์เป็นฐาน (Piezoelectric Ceramic- Cement-Based Composite) วัสดุผสมแบบใหม่นี้สามารถทำให้มีความเข้ากันได้กับคอนกรีตซึ่งเป็นโครงสร้างหลัก และยังมีคุณสมบัติ พิโซอิเล็กทริกที่ดีอีกด้วย ซึ่งเหมาะต่อการนำไปใช้งานเป็นเซนเซอร์ในโครงสร้างคอนกรีต อาศัยการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีให้ดีขึ้น

ในปี ค.ศ. 2002 Li et al. (2002) ได้ทำการศึกษาวัสดุผสมแบบ 0-3 พิโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ โดยศึกษาถึงขนาดอนุภาคและปริมาตรของ PZT ที่มีต่อค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อน ค่าสัมประสิทธิ์คู่วัดไฟฟ้าเชิงกล และค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก จากการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 พิโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ มีค่าอยู่ระหว่าง 43.5-182.2 ค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกอยู่ระหว่าง 7.2-33.4 pC/N และค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์พิโซอิเล็กทริกมีค่าอยู่ระหว่าง 15.0-20.7 mV·m/N เมื่อใช้ PZT ในปริมาตร 35-70%โดยปริมาตร และใช้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 6.45 ไมโครเมตร และ 153.6 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุผสมแบบ 0-3 พิโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์มีความเข้ากันได้ดีกับคอนกรีต นอกจากนี้ในปี 2004 Huang et al. (2004) ได้ให้ความสนใจในการศึกษาวัสดุผสมพิโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์ซัลเฟอร์โอลูมินต์ ซึ่งปูนซัลเฟอร์โอลูมินต์จะมีสมบัติเด่นทางด้านมีความแข็งแรงสูง

และสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดา นอกจากนี้กลุ่มนักวิจัยดังกล่าวยังได้ให้ความสนใจเรื่องผลของสนามไฟฟ้าและเวลาในการโพล ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าให้แต่วัสดุผสมจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกสูงขึ้น จนถึง 4 kV/mm ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกจะเริ่มคงที่และลดลง และผลของเวลาในการโพลพบว่าที่ 45 นาที ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกจะเริ่มคงที่ซึ่งเกิดจากการอิ่มตัวของไดโพลโมเมนต์ ในปี 2007 Chaipanich (2007) ได้ทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและพีโซอิเล็กทริก ของวัสดุผสม PZT และปูนซีเมนต์ แบบ 0-3 ด้วยปริมาณของ PZT 30-90% โดยปริมาตร ผลการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PZT เพิ่มขึ้นจนถึง 90% โดยปริมาตร ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 291 และยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PZT เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นวัสดุพีโซอิเล็กทริกและปูนซีเมนต์จึงเป็นวัสดุผสมที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการพัฒนาไปเป็นวัสดุผสมที่มีโครงสร้างฉลาดที่ใช้ในโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาวัสดุผสมพีโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-เถ้าลอย เพื่อเป็นพื้นฐานองค์ความรู้ในการพัฒนางานด้านนี้ต่อไป และได้เตรียมชิ้นงานวัสดุผสมพีโซอิเล็กทริกปูนซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยในสัดส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร และทำการศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกไร้สารตะกั่ว-ซีเมนต์เถ้าลอย

5.3 สมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมเซรามิกเพียโซอิเล็กทริก

ไร้สารตะกั่ว-ซีเมนต์เถ้าลอย

ผลการทดลองงานวิจัยนี้ศึกษาถึงสมบัติทางไฟฟ้า (สมบัติไดอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริก) สมบัติความต้านทานเสียงเชิงซ้อน สมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่นและ ความพรุน) ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และภาพการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ของวัสดุผสมแบบ 0-3 แบบเรียบไททานเตเซอร์โคเนตไททานเต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (BZT-PC) และวัสดุผสมแบบ 0-3 แบบเรียบไททานเตเซอร์โคเนตไททานเต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอย (BZT-PC-FA) อัตราส่วนวัสดุผสมแสดงดังตารางที่ 5.1

5.3.1 การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริก ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant: ϵ_r)

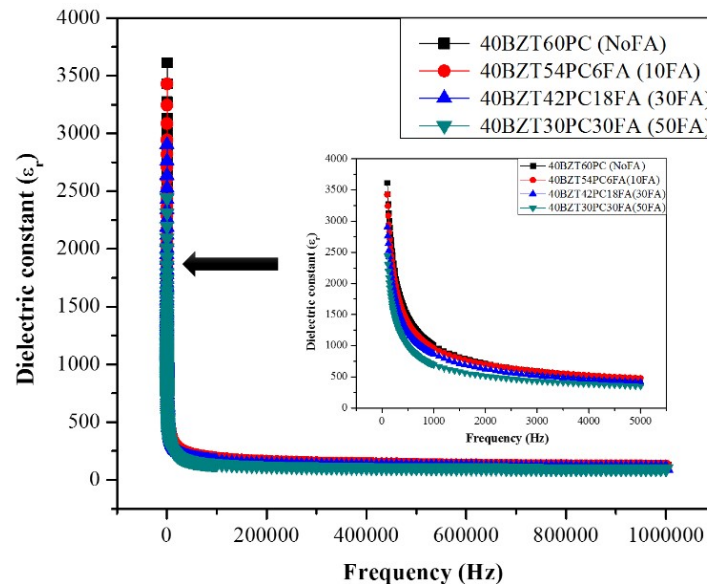
และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss: $\tan \delta$)

จากการศึกษาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant: ϵ_r) ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ของ BZT-PC และ BZT-PC-FA แสดงดังรูปที่ 5.1 พบว่า เมื่อให้ความถี่ตั้งแต่ 100 Hz – 100kHz ช่วงที่ความถี่กำลังเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมมีค่าลดลง อันเนื่อง จากการเกิดโพลาไรเซชันในวัสดุผสมไม่สามารถกลับค่าตามทันความถี่ที่เพิ่มขึ้นเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันได้ (Rianyo et al, 2014)

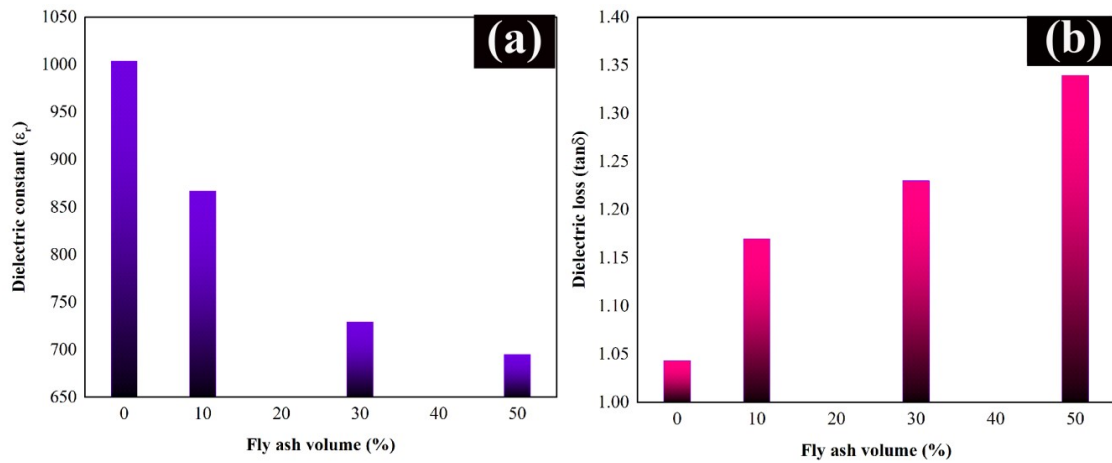
ตารางที่ 5.1 แสดงสัดส่วนวัสดุผสมของงานวิจัย

วัสดุผสม	สัดส่วนเถ้าลอยปริมาตร ทดแทนปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	BaZr _{0.05} Ti _{0.95} O ₃ (Vol %)	PC (Vol %)	FA (Vol %)
40BZT60PC	-	40	60	-
40BZT54PC6FA	10	40	54	6
40BZT42PC18FA	30	40	42	18
40BZT30PC30FA	50	40	30	30

ที่ค่าความถี่ 1 kHz ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียของไดอิเล็กทริก โดยวัสดุผสมที่มีแบบเรียบเซอร์โคเนตไททาเนตสัดส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตร และมีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร พบว่าจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเท่ากับ 1004, 867, 729 และ 695 ตามลำดับ และค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเท่ากับ 1.04, 1.17, 1.23 และ 1.34 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เมื่อสังเกตพบว่า เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงแต่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอย เนื่องจาก องค์ประกอบของเถ้าลอย และความชื้นของน้ำ (น้ำอาจจะระเหยไม่หมด เพราะน้ำมีจุดเดือด 100°C โดยการบ่มใช้เพียง 60°C) แทรกในช่องว่างส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกสูง

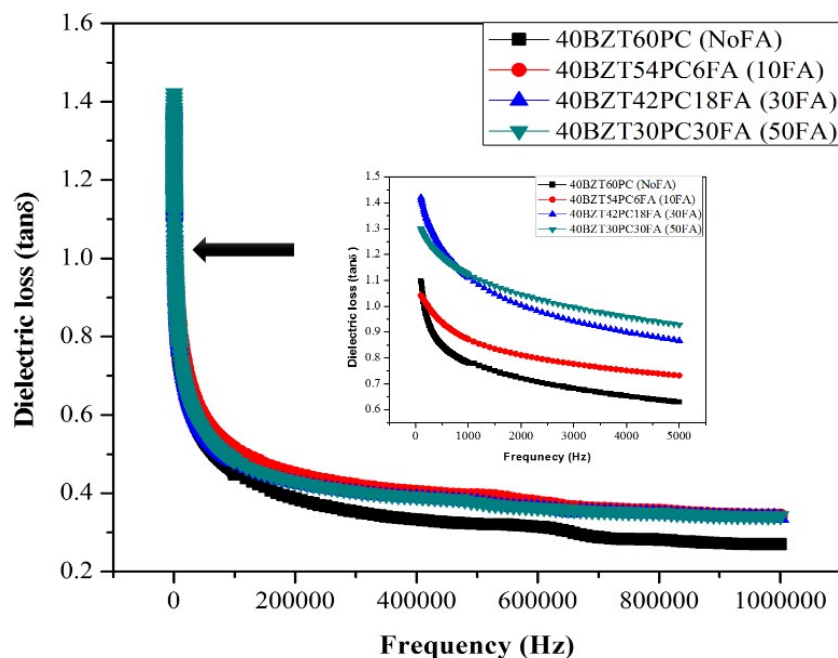


รูปที่ 5.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมของ BZT ร้อยละ 40 โดยปริมาตรไม่มีเถ้าลอยและมีการเติมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่อ ความถี่ 100 Hz -1 MHz



รูปที่ 5.2 แสดงสมบัติไดอิเล็กทริก (a) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และ (b) ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมของ BZT ร้อยละ 40 โดยปริมาตรที่ไม่มีเถ้าลอยและมีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ ต่อความถี่ 1 kHz

จากการศึกษาค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก (dielectric loss: $\tan\delta$) ของวัสดุผสม ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง เพราะ เมื่อให้ความถี่ต่ำ (< 1 kHz) โมเลกุลไดโพลจะมีระยะเวลานานในการปรับตัวทิศทางสอดคล้องสนามไฟฟ้าแต่เมื่อความถี่สูงขึ้น (> 1 kHz) โมเลกุลไดโพลไม่มีระยะเวลาเพียงพอในการปรับตัวทิศทางสอดคล้องสนามไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้านั่นเอง ผลของค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมโดย รูปที่ 5.3 แสดงวัสดุผสมที่มีสัดส่วนแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตร้อยละ 40 โดยปริมาตร

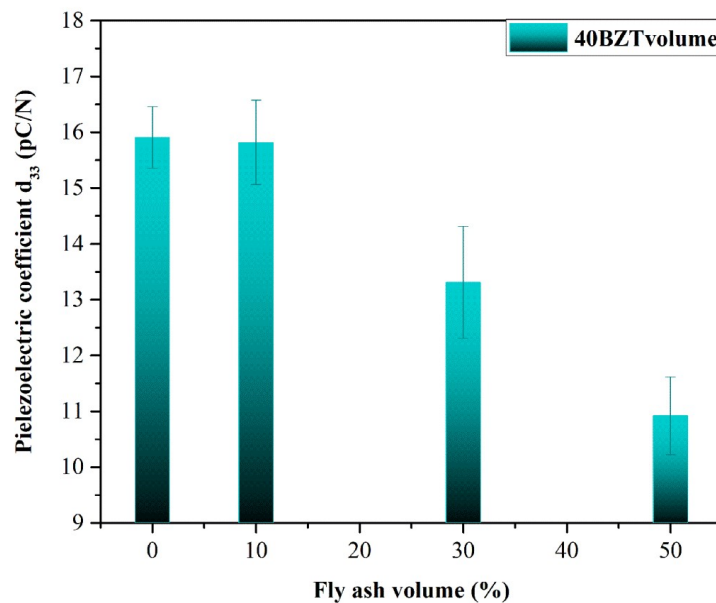


รูปที่ 5.3 แสดงค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมของ BZT ร้อยละ 40 โดยปริมาตรไม่มีเถ้าลอยและมีการเติมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่อ ความถี่ 100 Hz -1 MHz

5.3.2 การศึกษาสมบัติพิโซอิเล็กทริก ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก

(piezoelectric coefficient: d_{33})

การศึกษาสมบัติพิโซอิเล็กทริก ค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของวัสดุผสมแบบ 0-3 ของ BZT-PC และ BZT-PC-FA พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริก (d_{33}) ของวัสดุผสมมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอย และวัสดุผสมที่มีเถ้าลอยสัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกใกล้เคียงกับวัสดุผสมแบบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีเถ้าลอย ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมที่มีแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตสัดส่วนร้อยละ 40 ไม่มีเถ้าลอยและมีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

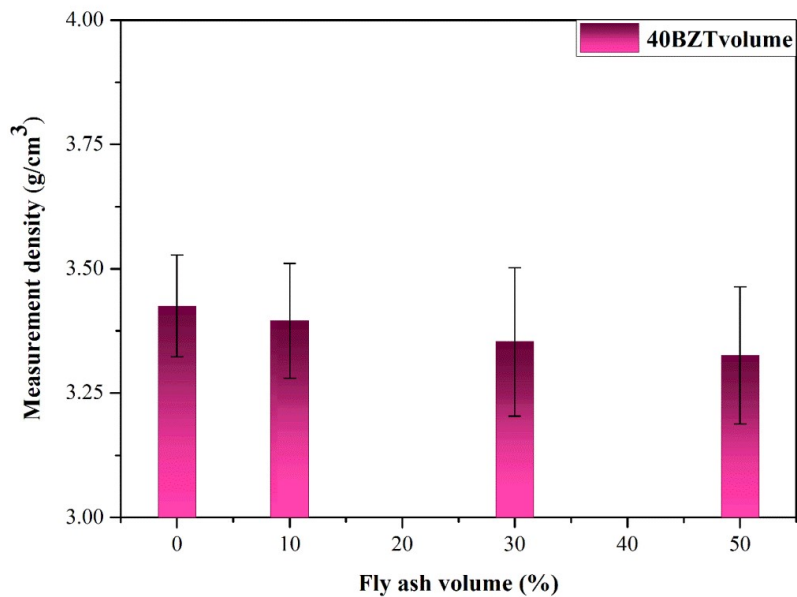
5.3.3 ความหนาแน่นของวัสดุผสม (Density)

จากการวัดความหนาแน่น ของวัสดุผสมที่มีแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตสัดส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตรที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสัดส่วนร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมมีแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตสัดส่วนร้อยละ 40 เท่ากับ 3.425 g/cm^3 , 3.395 g/cm^3 , 3.353 g/cm^3 และ 3.326 g/cm^3 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 5.5 พบว่า ค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอย อันเนื่องมาจาก องค์ประกอบของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุที่มีความสูงส่งผลค่าความหนาแน่นโดยตรง

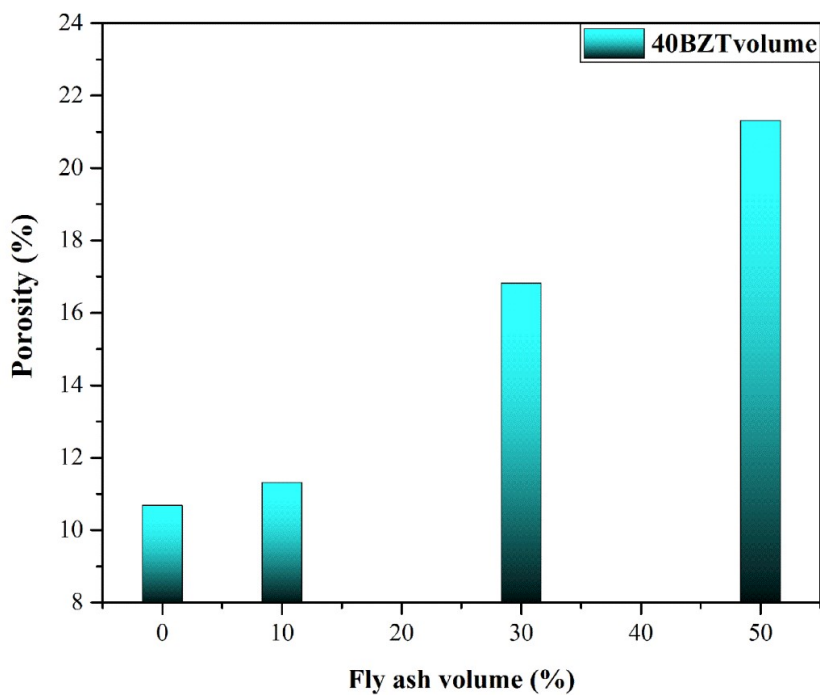
5.3.4 การศึกษาค่าความพรุนของโครงสร้างวัสดุผสม (Porosity)

จากผลการทดลองการวัดค่าความพรุนของวัสดุผสมที่มีแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตสัดส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตร ที่มีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 0, 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร พบว่า

ค่าความพรุนมีค่า เท่ากับ 10.68%, 11.31%, 16.82% และ 21.32% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อใช้เถ้าลอยที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีค่าความพรุนใกล้เคียงกับวัสดุผสมที่ไม่ใส่เถ้าลอย แต่ถ้าใช้เถ้าลอยในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้มีค่าความพรุนเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 แสดงความหนาแน่นของวัสดุผสม BZT สัดส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตร ที่ไม่มีเถ้าลอยและมีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร



รูปที่ 5.6 แสดงความพรุนของวัสดุผสม BZT สัดส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตรที่ไม่มีเถ้าลอยและมีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

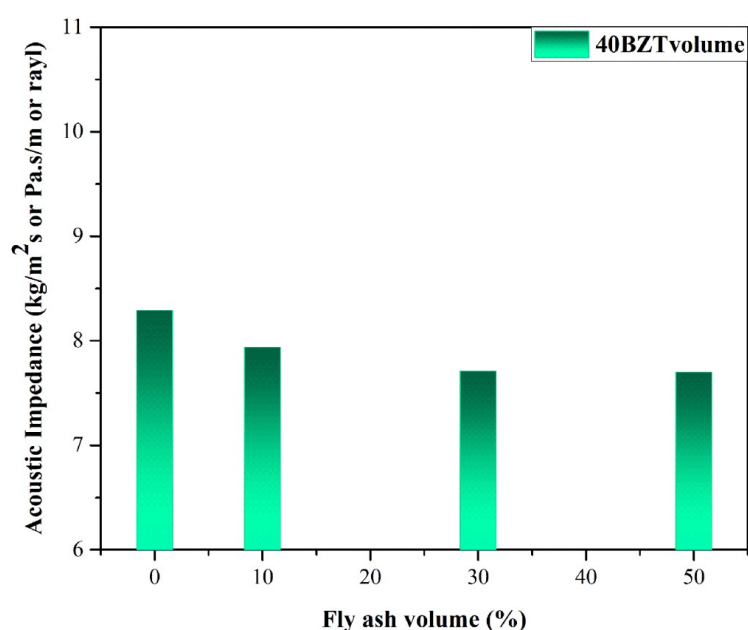
5.3.5 การศึกษาความต้านทานเสียงเชิงซ้อน (Acoustic Impedance: Z_C)

จากการศึกษาความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมแบบ 0-3 ของ BZT-PC และ BZT-PC-FA แสดงสัดส่วนดังตารางที่ 5.1 พบว่าค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมที่มีสัดส่วนแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตร้อยละ 40 ที่ไม่มีเถ้าลอยและที่มีการเติมเถ้าลอยแทนปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร เท่ากับ 8.29×10^6 kg/m²s, 7.94×10^6 kg/m²s, 7.71×10^6 kg/m²s และ 7.70×10^6 kg/m²s ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อมีการเติมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมลดลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมลดลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 5.1 (Li et al., 2002)

$$Z_C = \rho_C V_C \quad (5.1)$$

เมื่อ Z_C คือ ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสม ρ_C คือค่าความหนาแน่นของวัสดุผสม และ V_C คือความเร็วเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสม

ซึ่งค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีเถ้าลอยและที่มีเถ้าลอยผสมสัดส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตประมาณ $6.9-11.3 \times 10^6$ (kg/m²s หรือ Pas/m หรือ rayl) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมวัสดุผสมแบเรียมเซอร์โคเนตไททาเนตกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่มีเถ้าลอยและที่มีเถ้าลอยผสมสัดส่วนร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร มีความเข้ากันได้ (matching) กับโครงสร้างของคอนกรีต และมีแนวโน้มที่จะสามารถนำไปประยุกต์เป็นเซนเซอร์ใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตได้ (Cheng et al., 2007)



รูปที่ 5.7 แสดงค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมของ BZT สัดส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตร ไม่มีเถ้าลอยและมีเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยปริมาตร

5.4 สรุปผลการทดลอง

- ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 เมื่อวัดค่าสมบัติไดอิเล็กทริก (ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก) ที่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอยในทางกลับกันค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น สาเหตุมาจากองค์ประกอบและลักษณะโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ความชื้น
- ค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าลอย และวัสดุผสมที่มีเถ้าลอยสัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตรใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์พีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 แบบเรียบเซอร์โคเนตไททาเนต-ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- ค่าความหนาแน่นและค่าความพรุนของวัสดุผสมแบบ 0-3 มีค่าลดลง เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะโครงสร้างของวัสดุ
- จากผลการทดลองค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมแบบ 0-3 พบว่า ค่าความต้านทานเสียงเชิงซ้อนของวัสดุผสมลดลง เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น

5.5 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่ายังมีประเด็นปัญหาและข้อสงสัยที่น่าสนใจอีกมากมายที่สามารถนำมาศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยนี้ ที่สามารถทำการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อต้องการความชัดเจนและคำตอบที่ถูกต้องในการพัฒนาวัสดุผสมพีโซอิเล็กทริกให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ได้แก่

1. การศึกษาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมในระยะเวลาอื่น (น้อยกว่าและมากกว่า 28 วัน) มีผลต่อสมบัติมากน้อยเพียงใด
2. การศึกษาสมบัติพีโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมช่วงระยะเวลาอื่นๆ หลังจากการบ่มมีผลต่อสมบัติต่างจากเดิมหรือไม่อย่างไร
3. ศึกษาการถึงสมบัติไดอิเล็กทริกและพีโซอิเล็กทริกระบบการเชื่อมต่อ (connectivity) ของวัสดุผสมลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากระบบ 0-3 เช่น 1-3, 2-2, หรือ 3-3 เป็นต้น

5.6 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับงบประมาณสนับสนุนจากทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. 2557-2560 ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัยต่างๆ

5.7 เอกสารอ้างอิง

- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2543). คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: **บริษัทผลิตภัณฑ์ และวัสดุก่อสร้าง จำกัด**.
 ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จีงเกษมโชคชัย, และวราภรณ์ คุณาวนาภิ. (2542). คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอย, เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต. **วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์**.
- ปริญญ์ จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2555). ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. กรุงเทพฯ: **สมาคมคอนกรีตไทย**.
- Allen, A.C. (1959). Features of Lednock dam, including the use of fly ash, **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, **13**(2), 179-196.
- Chaipanich, A. (2007). Dielectric and piezoelectric properties of PZT–cement composites. **Current Applied Physics**, **7**(5), 537–539.
- Chalee, W., Ausapanit, P., and Jaturapitakkul, C. (2010). Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis, **Materials and Design**, **31**, 1242–1249.
- Charles, A.S., Edward, F.M., Robert, C.K., Herbert, T., Albert, M., and Hermann, M.B. (2005). Lead, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, April 30, 2005.
- Cheewaket, T., Jaturapitakkul, C., and Chalee, W. (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. **Construction and Building Materials**, **24**, 1352–1357.
- Cheng, X., Huang, S., Chang, J., and Li, Z. (2007). Piezoelectric, dielectric, and ferroelectric properties of 0–3 ceramic/ cement composites., **Journal of Applied Physics**, **101**(9).
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymers, **Cement & Concrete Composites**, **29**, 224–229.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. **Cement and Concrete Research**, **34**, 1087–1092.
- Davis, R.E., Carlston, R.W., Kelly, J.W., and Davis, H.E. (1937). Properties of cements and concretes containing fly ash. **American Concrete Institute**, **33**(5), 577-612.

- Davis, R.E., Kelly, J.W., Troxell, G.E., and Davis, H.E. (1935). Proportions of mortars and concretes containing Portland-pozzolan cements. **American Concrete Institute**, **32**, 80-114.
- Dhir, R.K. and Jones, M.R. (1999). Development of chloride-resisting concrete using fly ash. **Fuel**, **78**(2), 137-142.
- Haertling, G.H. (1999). Ferroelectric Ceramics: History and Technology. **J. Am. Ceram. Soc.**, **82**, 797-818.
- Hennings, D., Schnell, A., and Simon, G. (1982). Diffuse ferroelectric phase transitions in $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-y}\text{Zr}_y)\text{O}_3$ ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, **65**, 539-544.
- Huang, S., Chang, J., Liu, F., Lu, L.C., Ye, Z.M., and Cheng, X. (2004). Poling process and piezoelectric properties of lead zirconate titanate/ sulphoaluminate cement composites. **Journal of Materials Science**, **39**, 6975-6978.
- James, F.S. and Robert, H.D. (2008). Chapter 9: Lead compounds, Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing, **Published by Springer**.
- Li, Z., Zhang, D., and Wu, K. (2002). Cement-based 0–3 piezoelectric composites. **Journal of the American Ceramic Society**, **85**, 305–313.
- Malhotra, V.M. and Mehta, P.K. (1996). Pozzolan and cementitious materials: Gordon and Breach Publishers.
- Michael, T. (2007). Optimizing the use of fly ash in concrete. **Portland Cement Association**, 1-19.
- Moulson, A.J. and Herbert, J.M. (1999). Electroceramics: Materials-Properties-Application. **2nd ed. Chapman and Hall**, London.
- Moura F., Simoes A. Z., Stojanovic B.D., M. A. Zaghet, E. Longo and J. A. Varela., Dielectric and ferroelectric characteristics of barium zirconate titanate ceramics prepared from mixed oxide method, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 462, 2008, 129–134.
- Rianyo, R., Potong, P., Ngamjarurojana, A., Yimnirun, R., Guo, R., Bhalla, A.S., and Chaipanich, A. (2014). Acoustic and electrical properties of 1–3 connectivity bismuth sodium titanate–Portland cement composites, **Materials Research Bulletin**, **60**, 353-358.

- Siddique, R. (2004). Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**. **34**(3), 487-493.
- Tangtermsirikul, S. (2003). Durability and Mix Design of Concrete: **Printing House of Thammasat University**.
- Uchino, K. (2010). Advanced piezoelectric materials: science and technology, Woodhead Publishing 525 South 4th Street #241 Philadelphia PA 19147 USA,
- Ulrich, W., George, G., Ulrich, B., Sophie, W., Detlev, H. and Rainer, W. (2001). Dielectric properties of Ba(Zr,Ti)O₃ - based ferroelectrics for capacitor applications. **Journal of the American Ceramic Society**, **84**, 759.
- Yu, Z., Ang, C., Guo, R., and Bhalla, A.S. (2002). Piezoelectric and strain properties of BaTi_{1-x}Zr_xO₃ ceramic under DC electric field. **Journal of Applied Physics**, **92**, 1489-1493.

บทที่ 6

สมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ -ไฮดรอกไซด์ไดอิเล็กตริกออกไซด์

Dielectric properties of Portland cement-giant dielectric oxide composites

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสิทธิ์ ทองใบ, Email: pthongbai@kku.ac.th

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถ. มิตรภาพ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40002

ในปัจจุบัน วัสดุเซรามิกฉนวนไฟฟ้า (insulating ceramics) ทั้งที่เป็นวัสดุเซรามิกแบบดั้งเดิม (conventional ceramics) และวัสดุเซรามิกขั้นสูง (advanced ceramics) จัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่อเทคโนโลยีต่างๆ อย่างมาก นับตั้งแต่การใช้งานเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานในระบบส่งกำลังไฟฟ้า เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้าซึ่งทำจากพอร์ซเลน (porcelain) ไปจนถึงการใช้งานของวัสดุเซรามิกขั้นสูงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ล้ำสมัย เนื่องด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีต่างๆ ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วตามกลไกการแข่งขันทางการตลาดที่เน้นความล้ำหน้าของอุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ที่เปี่ยมไปด้วยประสิทธิภาพสูง น้ำหนักเบา รวมทั้งเป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่การทำงานได้หลากหลายฟังก์ชันมากขึ้น ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์หลายๆ จะมีชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มากมาย โดยชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ คือ **ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor)** ผลิตจากวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่สามารถแสดงสมบัติทางไดอิเล็กตริก (dielectric properties) ที่ดีตรงตามมาตรฐานการใช้งานด้านต่างๆ นั่นคือมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง (dielectric constant, ϵ') มีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กตริกที่ต่ำ (dielectric loss tangent, $\tan\delta$) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะต้องมีความเสถียรทางความร้อนสูง นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 ได้มีการประมาณการเกี่ยวกับการผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้าสู่ท้องตลาดในปริมาณที่มากถึง 10^{19} ชิ้นต่อปี แนวโน้มของการผลิตจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การผลิตโทรศัพท์อัจฉริยะ (smart phone) แท็บเล็ต (tablet) และคอมพิวเตอร์ (Krohns et al., 2011; Moulson, 2003) ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดจิ๋วจึงนับว่าเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีบทบาทและมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสื่อสารในปัจจุบันและอนาคต เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้า (capacitance, C) ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดเซรามิกมีการ

เปลี่ยนแปลงกับลักษณะทางกายภาพ (geometric factors) ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมา คือ ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าและความหนาของชั้นวัสดุไดอิเล็กตริก และปัจจัยภายในของวัสดุไดอิเล็กตริก (intrinsic factor) นั่นคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก สำหรับเทคโนโลยีการผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้าในปัจจุบัน วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการลดขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าโดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า คือการเลือกใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าวัสดุไดอิเล็กตริกแบบดั้งเดิมที่ใช้ผลิตเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าในปัจจุบัน (Moulson, 2003; Homes et al., 2001) ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการผลิตเก็บประจุไฟฟ้าจึงมุ่งเน้นการพัฒนาและค้นคว้าวัสดุไดอิเล็กตริกชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

ในปัจจุบันได้มีการค้นพบปรากฏการณ์พิเศษใหม่ๆ หลายประการในวัสดุไดอิเล็กตริกออกไซด์ เช่น การที่วัสดุสามารถแสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงโดยปราศจากการแสดงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กตริกพร้อมด้วย รวมทั้งการแสดงสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า (nonlinear current-voltage properties) หรือการมีโครงสร้างทางทางจุลภาคแบบตัวเก็บประจุขวางกั้นภายใน (internal barrier layer capacitor, IBLC) ที่สามารถประดิษฐ์ได้โดยการเผาผนึก (sintering) เพียงขั้นตอนเดียว (one-step IBLC) ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ นับเป็นองค์ความรู้ที่มีคุณค่าอย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยเพื่อเป้าหมายในการพัฒนาอุปกรณ์ที่ล้ำสมัย โดยพื้นฐานแล้วการนำวัสดุเซรามิกไดอิเล็กตริกไปใช้งานเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าเซรามิกกลุ่ม II และ III จะถูกกำหนดคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุตามมาตรฐานของสมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (The Electronics Industries Alliance, EIA) (Moulson, 2003) ดังนี้

- ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ต้องน้อยกว่า 0.025 และ 0.04 (ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 kHz) สำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้ากลุ่ม II และ III ตามลำดับ
- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต้องสูงกว่า 10^3 (ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 kHz)
- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างมากตามช่วงอุณหภูมิมาตรฐานที่กำหนดขึ้นโดย EIA เช่น ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิด X8R ต้องเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิน้อยกว่า $\pm 15\%$ ในช่วงอุณหภูมิ -55 ถึง 150 °C (เทียบกับค่าที่อุณหภูมิ 25 °C)

ดังนั้นวัสดุไดอิเล็กตริกที่ดีจะต้องมีค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียที่น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานที่ความถี่สูง และจะต้องมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อลดขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าหรือเพิ่มค่าการเก็บพลังงานไฟฟ้า รวมทั้งค่าคงที่

ไดอิเล็กตริกต้องมีเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิกว้างเพื่อให้ได้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีค่าความจุไฟฟ้าเสถียรเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งปัจจุบันตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิดเซรามิกกลุ่ม II และกลุ่ม III ในทางการค้าผลิตจากวัสดุเซรามิกจำพวกเฟอร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric materials) เช่น BaTiO_3 และ PbTiO_3 หรือวัสดุ BaTiO_3 ที่เจือด้วยธาตุหายากชนิดต่างๆ (rare earths) วัสดุเหล่านี้มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\sim 2000-5000$ และมีค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียน้อยกว่า 0.02 ที่อุณหภูมิห้องและความถี่ 1 kHz (West et al., 2004) อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของวัสดุกลุ่มดังกล่าวนี้ คือ

(1) วัสดุกลุ่มนี้ส่วนมากมีตะกั่ว (Pb) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต วัสดุไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานควรเป็นวัสดุที่ไม่มี Pb เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากเป็นสารที่มีพิษและมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่สูง

(2) วัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริกมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเป็นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเข้าอุณหภูมิคูรี (Curie temperature; T_C) เช่น ในวัสดุเซรามิก BaTiO_3 ค่า $T_C = 120^\circ\text{C}$ ผลดังกล่าวนี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการสำหรับการนำวัสดุไดอิเล็กตริกประยุกต์ใช้งานในช่วงอุณหภูมิสูง

(3) การสังเคราะห์วัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริกส่วนมากแล้วจะใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 1400°C ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต

(4) เมื่อพิจารณาถึงแหล่งการผลิตและแนวโน้มของราคาต้นทุนของธาตุ Ba ที่ใช้ในการสังเคราะห์วัสดุเหล่านี้พบว่า ปริมาณธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติที่มีการสำรวจพบนั้นอาจจะไม่เพียงพอต่อความต้องการทางด้านการผลิตในอนาคตอันใกล้

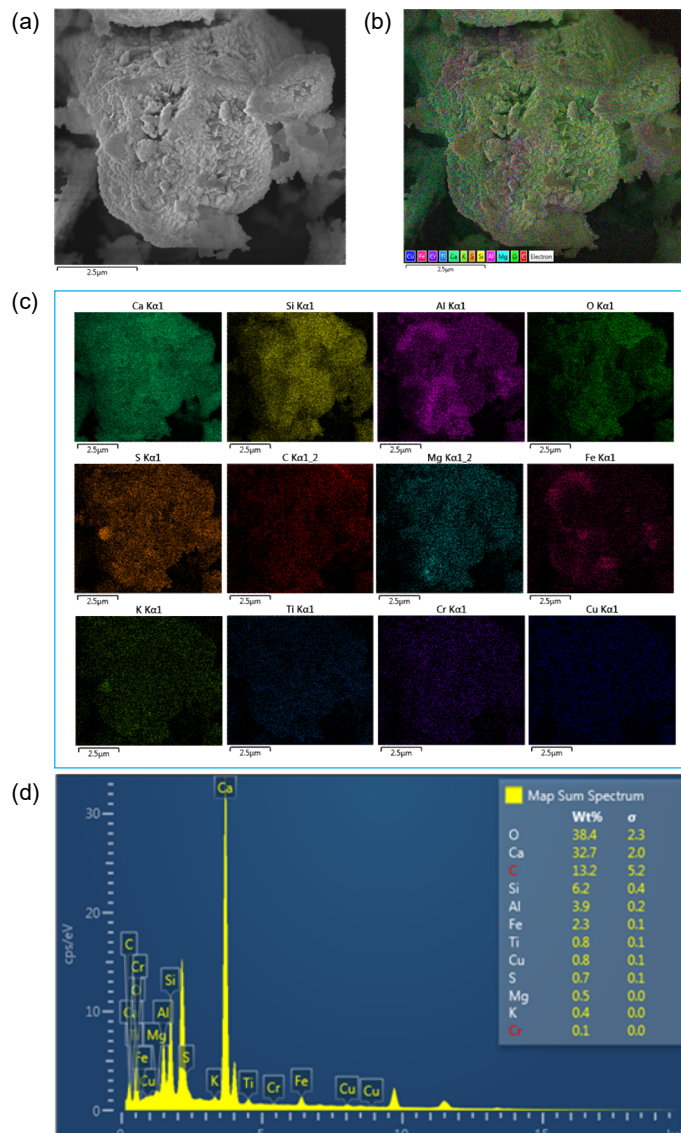
ในปี 2000 ได้มีรายงานการค้นพบวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงถึง 1.02×10^4 พร้อมกันนี้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อยมากในช่วงอุณหภูมิประมาณ -173 ถึง 320°C วัสดุดังกล่าวนี้คือวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (Subramanian et al., 2000; Ramirez et al., 2000) อย่างไรก็ตาม $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ยังคงมีค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน EIA (โดยทั่วไปแล้ว $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ มีค่า $\tan\delta > 0.1$ ที่ 1 kHz) ซึ่งถือเป็นอุปสรรคที่สำคัญที่ยังคงปิดกั้นโอกาสของการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีการผลิตตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาดจิ๋วที่เปี่ยมไปด้วยประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยปริมาตรสูง ในขณะที่การศึกษาวิจัยเพื่อลดค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียในวัสดุ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ มักจะส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงอย่างมากด้วยเช่นกัน เช่นการเจือ La ใน $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ จะสามารถลดค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียได้อย่างมากและมีค่าเพียง 0.02 แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าที่ลดลงอย่างมากเช่นกันโดยมีค่าเพียง 2×10^3 เท่านั้น (Feng et al., 2006; Vangchangyia et al., 2013) หรือแม้แต่การปรับปรุงเพื่อลดค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียด้วยวิธีอื่นๆ ผลลัพธ์ที่ได้มักจะ

เป็นไปในทิศทางเดียวกันนี้ กล่าวคือได้วัสดุ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วจะมีค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียลดลงจนอยู่ในช่วงมาตรฐานการใช้งาน แต่ด้วยกระบวนการเดียวกันนี้ได้ส่งผลให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุมีค่าลดลงอย่างมากด้วยเช่นกัน นอกจากนี้แล้วธาตุที่ใช้เจือใน $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ มักจะมีราคาแพงเนื่องจากเป็นธาตุหายาก (rare earth)

ดังแสดงในรูปที่ 6.1 เนื่องจากองค์ประกอบหลักและองค์ประกอบย่อยต่างๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และมีหลายองค์ประกอบที่มีส่วนสำคัญต่อการปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ไม่ว่าจะเป็น Ca Si Al และ Fe รวมทั้งธาตุอื่นๆ ที่อาจจะตรวจพบได้เช่น Mg Ti Cu Cr K และ Na (Kim et al, 2007; Choi et al., 2007; Mu et al., 2009; Boonlakhorn et al., 2015; Liang et al., 2014) ดังแสดงในรูปที่ 6.1(d) สัดส่วนองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย O Ca Si Al และ Fe ประมาณ 38.4 32.7 6.2 3.9 และ 2.3 wt.% ตามลำดับ อีกทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ยังมีราคาที่ถูกมากเมื่อเทียบกับธาตุเจือต่างๆ ที่ได้มีรายงานการใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กตริกของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ เช่น La Sm Yb Nd Ni Ta หรือ Nb ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ด้วยการเติมส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะเป็นหนึ่งในวิธีการที่มีความน่าสนใจต่อการพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุไดอิเล็กตริกในระดับอุตสาหกรรม

โครงสร้างทางจุลภาค (microstructure) ของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ในอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0 1 2.5 และ 5 wt.% ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 6.2 และ 6.3 ตามลำดับ พบว่าที่เงื่อนไขการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ สามารถปรับปรุงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุเซรามิก โดยวัสดุคอมโพสิตระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กับ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ มีความแน่นตัวสูงและปราศจากรูพรุนเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ เกรนที่ปรากฏในวัสดุคอมโพสิตประกอบด้วยเกรนที่มีผิวเรียบและผิวหยาบ ซึ่งเกรนที่มีผิวหยาบอาจจะเกิดจากองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมลงไปก่อเกิดเป็นเฟสอื่นในวัสดุคอมโพสิต ในขณะที่เกรนผิวเรียบซึ่งอาจจะเป็นเกรนของเฟส $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ นั้นมีขนาดเล็กลงอย่างมากเมื่อเทียบกับวัสดุ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ไม่มีการผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยทั่วไปแล้วการเติบโตของเกรน (grain growth) ในวัสดุเซรามิกแบบหลายผลึกเกิดขึ้นโดยอาศัยกลไกการแพร่ของอะตอม ไอออน หรือ ประจุไฟฟ้าต่างๆ ระหว่างกระบวนการเผาผนึก อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลเชิงเคมีในวัสดุ (Rahaman, 2003) โดยอะตอมหรือไอออนจะแพร่ผ่านแนวขอบเกรน ทำให้เสมือนว่าแนวขอบเกรนกำลังเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของไอออน ถ้าแนวขอบเกรนที่มีการเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางเกรนจะทำให้เกรนนั้นเกิด

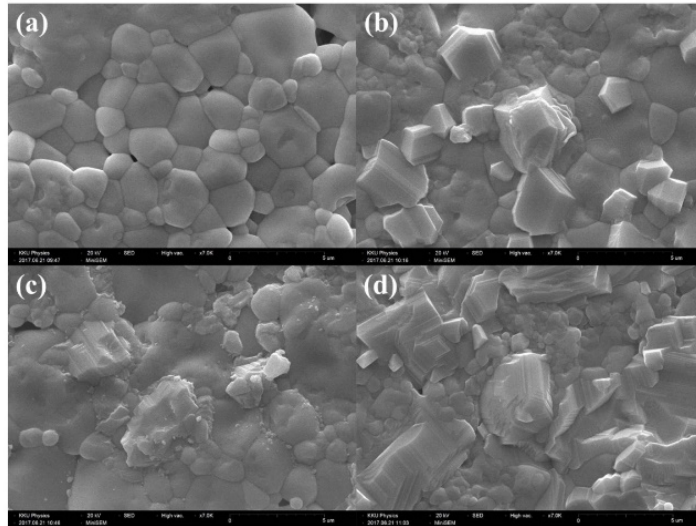
การขยายตัว หรือเกรนมีการเติบโต ในวัสดุคอมโพสิตนั้น เกรนของเฟส $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ มีขนาดเล็กลง แสดงได้ว่าการเติบโตของเกรนถูกขัดขวางโดยอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมลงไป การเคลื่อนที่ของแนวขอบเกรนถูกขัดขวางโดยอนุภาคเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยโครงสร้างเกรนละเอียดของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ เป็นโครงสร้างทางจุลภาคที่ต้องการสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุ



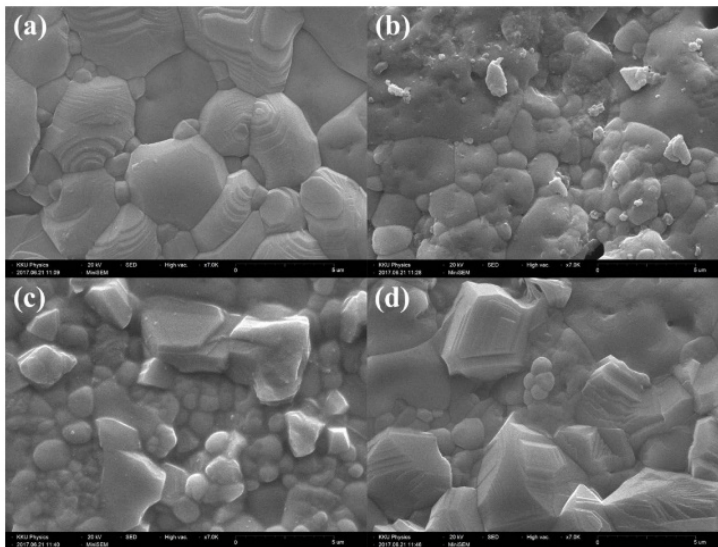
รูปที่ 6.1 (a) ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

(b-c) ภาพถ่าย SEM-mapping การกระจายตัวของของทุกองค์ประกอบธาตุและแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

(d) สเปกตรัมจากการทดสอบด้วยเทคนิค energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS) เพื่อหาปริมาณสัดส่วนของธาตุต่างๆ ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



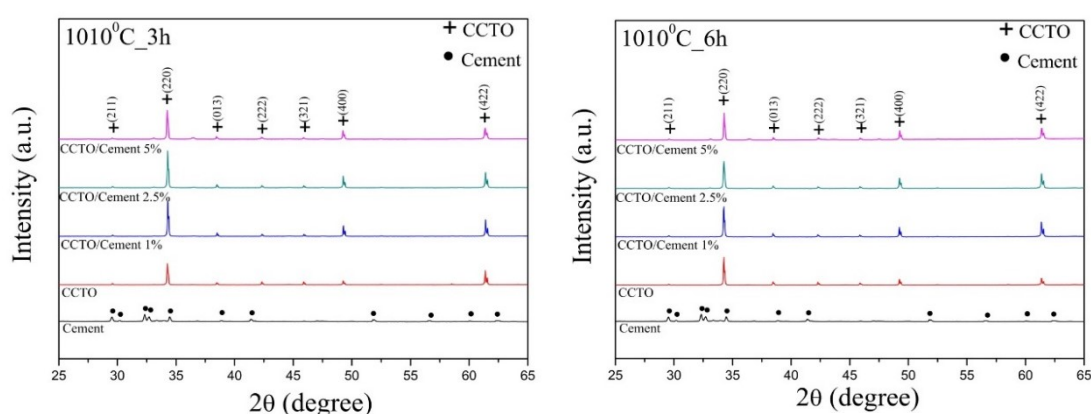
รูปที่ 6.2 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ในอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (a) 0 ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$) (b) 1% (c) 2.5% และ (d) 5 wt.% ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 6.3 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ในอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (a) 0 ($\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$) (b) 1% (c) 2.5% และ (d) 5 wt.% ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

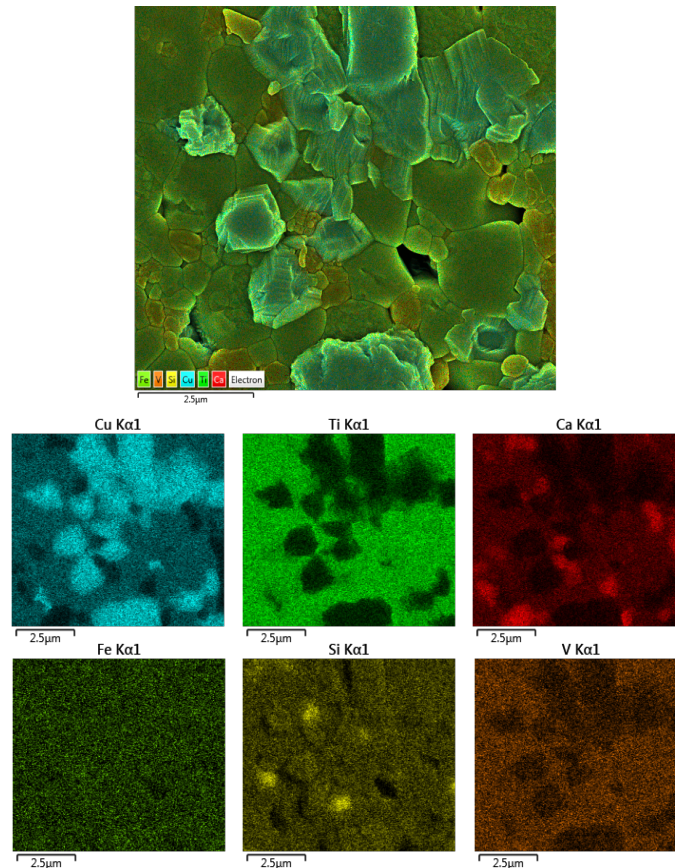
จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ทำให้เกิดข้อสงสัยเกี่ยวกับองค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นในวัสดุคอมโพสิต ดังแสดงในรูปที่ 6.4 เฟสเจือปนของ CuO เกิดขึ้นในวัสดุคอมโพสิตที่ผ่านการเผาผนึก แต่ไม่พบเฟสต่างๆ ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ทั้งนี้ อาจจะมีสาเหตุเนื่องจากสัดส่วนปริมาณของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีปริมาณน้อยเกินกว่าที่ความละเอียดของเครื่องมือจะตรวจวัดได้ รวมทั้งอาจเกิดจากองค์ประกอบของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในวัสดุคอมโพ

สัต์เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง และธาตุบางส่วนได้เข้าแทนที่ตำแหน่งของธาตุในองค์ประกอบหลักของโครงสร้างผลึก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ เช่น Fe Al Si และ Cr สามารถแทนที่ในตำแหน่งของ Ti ได้ (Kim et al, 2007; Choi et al., 2007; Mu et al., 2009; Zheng et al., 2012) ในขณะที่ Fe Al Cr และ Mg สามารถเข้าแทนที่ตำแหน่งของ Cu ได้ (Boonlakhorn et al., 2015; Ni and Chen, 2009) รวมทั้งจากรายงานวิจัยต่างๆ ยังพบว่า Na และ K สามารถเข้าแทนที่ตำแหน่งของ Ca ได้ (Liang et al., 2014) ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรัศมีไอออนของ Fe Al Cr Mg และ Si มีขนาดใกล้เคียงกับรัศมีไอออนของ Cu และ Ti ในขณะที่รัศมีไอออนของ Na และ K มีขนาดใกล้เคียงกับรัศมีไอออนของ Ca (Shannon, 1976)



รูปที่ 6.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง

จากการตรวจสอบด้วยเทคนิคภาพถ่าย SEM-mapping เพื่อแสดงการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 พบการเกิดการสลายตัวของ Cu ในโครงสร้างทางจุลภาคอย่างชัดเจน โดยบริเวณเกรนที่มีผิวหยาบนั้นจะพบการกระจายตัวของ Cu และไม่มีองค์ประกอบของธาตุ Ti อยู่เลย ดังนั้นสามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าเกรนที่มีผิวหยาบไม่ใช่เฟสของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ในขณะเดียวกันเกรนที่มีผิวเรียบนั้นสามารถยืนยันได้ว่าเป็นเกรนของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ในขณะที่ยังคงประกอบธาตุอื่นๆ เช่น Fe V และ Si สามารถตรวจพบได้ทั่วทั้งโครงสร้าง ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบธาตุต่างๆ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้แทนที่ตำแหน่งของ Ca Cu และ Ti ในโครงสร้างผลึกของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$



รูปที่ 6.5 ภาพถ่าย SEM-mapping การกระจายตัวขององค์ประกอบธาตุและแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 5 wt.% วัสดุผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

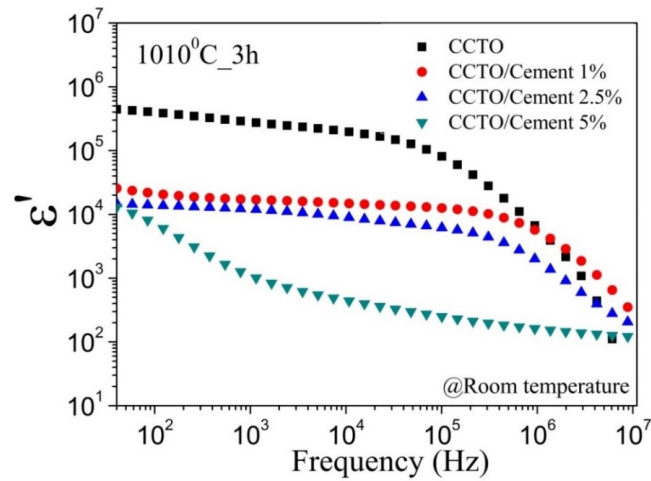
จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและการเกิดเฟสต่างๆ ในวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ยืนยันได้ถึงการเกิดเฟสหลักของ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และเฟสประกอบอื่นๆ ในระบบคอมโพสิต รวมทั้งวัสดุคอมโพสิตระบบดังกล่าวนี้มีโครงสร้างทางจุลภาคที่ดี กล่าวคือมีความแน่นตัวของเกรน รวมทั้งมีขนาดของเกรนที่เล็กลงอีกด้วย โดยพื้นฐานแล้วโครงสร้างดังกล่าวนี้เป็นโครงสร้างที่จะส่งผลดีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางไดอิเล็กตริก และสมบัติทางไฟฟ้าอื่นๆ ของวัสดุเซรามิกแบบหลายผลึก นั่นคือวัสดุที่มีความแน่นตัวของเกรนสูงจะมีความแข็งแรงและความต้านทานต่อการแตกสูงกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่ และการมีขนาดของเกรนที่เล็กจะหมายถึงการมีจำนวนชั้นขอบเกรน (grain boundary) ที่มากซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นฉนวน ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริกมีค่าที่สูงมาก ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง รวมทั้งสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าซึ่งเป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์วาริสเตอร์

(varistor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในขณะที่แหล่งจ่ายไฟเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน โดยที่วัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ เป็นวัสดุที่สามารถแสดงสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าได้เช่นกัน (Chung, 2004)

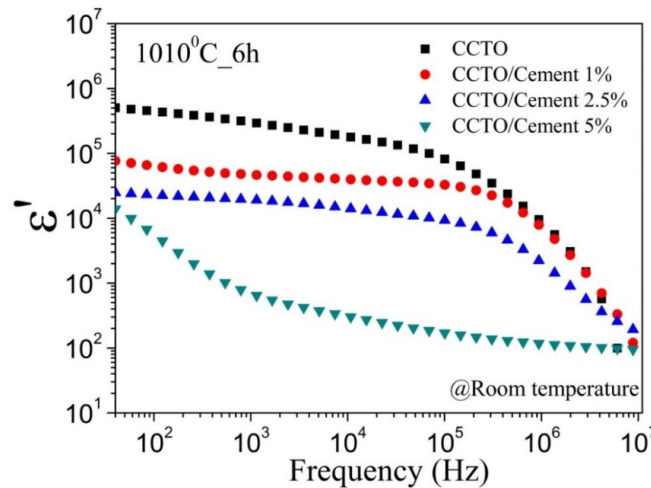
สมบัติทางไดอิเล็กตริกและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ผ่านการเผาผนึกสามารถทดสอบโดยใช้เทคนิคตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นคู่ขนานอย่างง่าย โดยสร้างขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่ทราบพื้นที่บนผิวหน้าทั้งสองด้านของวัสดุตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9 มิลลิเมตร และมีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยการเคลือบทอง (Au) ลงบนผิวของตัวอย่างทดสอบด้วยเครื่องสปัตเตอริง (sputtering) การใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากทองโดยวิธีการเคลือบเป็นวิธีการทำขั้วไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมเพื่อที่จะให้แน่ใจว่าค่าที่วัดได้เป็นค่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตอบสนองทางไฟฟ้าจากภายในวัสดุจริง โดยไม่ได้เป็นค่าที่เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยภายนอกวัสดุ (Lunkenheimer et al., 2004) สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') ของวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\epsilon' = \frac{C_p d}{\epsilon_0 A} \quad (6.1)$$

เมื่อ C_p คือค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ของวัสดุที่ใช้ทดสอบโดยใช้เครื่อง KEYSIGHT E4990A Impedance Analyzer ในช่วงความถี่ $40\text{-}10^7$ Hz ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 210 °C ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 6.6 และ 6.7 โดยการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับการเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ของชุดตัวอย่างทั้งสองเงื่อนไขการเผาที่ 1010 °C เป็นเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง มีแนวโน้มเหมือนกันคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าลดลงตามปริมาณของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ผสมลงไป ที่สัดส่วนการผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 5 wt% ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกตลอดทั้งช่วงของความถี่มีค่าลดลงอย่างมาก อีกทั้งค่ามีการเปลี่ยนแปลงกับความถี่เป็นอย่างมากโดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำกว่า 1 kHz สิ่งดังกล่าวนี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการสำหรับการนำวัสดุไดอิเล็กตริกไปใช้งานเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ในขณะที่การผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในปริมาณ 1 และ 2.5 wt.% นั้น แม้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุ $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังคงมีค่าที่สูงมากในระดับ $10^4\text{-}10^5$ ตลอดช่วงความถี่ $40\text{-}10^5$ Hz โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1 kHz และที่อุณหภูมิห้องสรุปดังตารางที่ 6.1 และ 6.2 สำหรับวัสดุที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 6.6 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') ที่อุณหภูมิห้องของวัสดุคอมโพสิต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 6.7 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') ที่อุณหภูมิห้องของวัสดุคอมโพสิต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

โดยทั่วไปแล้วการมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงมากของวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ มีสาเหตุเนื่องจากการมีโครงสร้างทางจุลภาคแบบพิเศษ นั่นคือมีโครงสร้างคล้ายตัวเก็บประจุแบบชั้นขวางกันภายใน (internal barrier layer capacitor, IBLC) เป็นไปตามสมการ (Wu et al., 2002)

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_{gb} S}{t_{gb}} \quad (6.2)$$

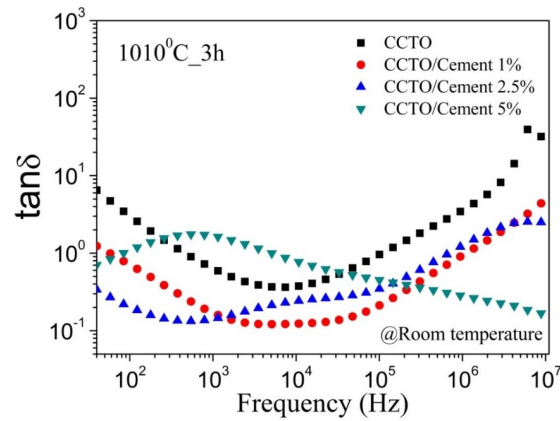
เมื่อ ϵ_{gb} คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของขอบเกรน (dielectric constant of grain boundary) S คือ ขนาดของเกรน (grain size) และ t_{gb} คือ ความหนาของขอบเกรน (grain boundary thickness)

เมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย SEM พบว่าขนาดเกรนของเฟส $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ซึ่งเป็นเกรนผิวเรียบมีขนาดลดลงเมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามขนาดเกรนมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น ดังนั้นขนาดของเกรนที่เล็กลงจึงเป็นเพียงหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุคอมโพสิตลดลง อาจเป็นไปได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ลดลงของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ อาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ จากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการแพร่ (diffusion) ในระหว่างกระบวนการเผาผนึก (sintering process) และเกิดการสะสมที่ขอบเกรน รวมทั้งเกิดเฟสผสมที่ขอบเกรน อีกหนึ่งปัจจัยที่สามารถส่งผลต่อการลดลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก คือการสะสมของไอออนต่างๆ รวมทั้งการแทนที่ในโครงสร้างผลึก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ อาจส่งผลต่อโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ขอบเกรน เช่น ความสูงของศักย์ไฟฟ้าสถิตที่ขอบเกรน (electrostatic potential barrier height, Φ_B) และค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของขอบเกรน ดังสมการ (Adams et al., 2006)

$$\Phi_B = \frac{qN_s^2}{8\epsilon_0\epsilon'N_d} \quad (6.3)$$

$$C_0 = \left(\frac{\epsilon'qN_d}{8\Phi_B} \right)^{1/2} \quad (6.4)$$

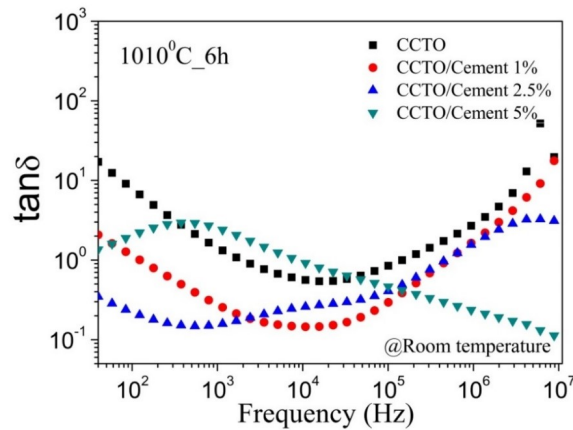
เมื่อ N_s และ N_d คือ ความหนาแน่นประจุเชิงพื้นผิวที่ขอบเกรน (surface charge) และ ความเข้มข้นของประจุไฟฟ้าภายในเกรน $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}$ F/cm ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$) ที่อุณหภูมิห้องแสดงดังรูปที่ 6.8 และ 6.9 พบว่าค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียที่ความถี่ต่ำของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ มีค่าลดลงตามปริมาณการผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งบ่งชี้ถึงการปรับปรุงสมบัติทางไดอิเล็กตริกของวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ การเพิ่มขึ้นของค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียที่ความถี่สูงเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการผ่อนคลายทางไดอิเล็กตริก (dielectric relaxation) เป็นผลเนื่องจากการกลับทิศของสนามไฟฟ้ากระแสสลับก่อนที่ไดโพลไฟฟ้าภายในวัสดุจะสามารถกลับทิศตามได้ทันและความถี่เชิงมุมของสนามที่ให้สอดคล้องกับเวลาของการผ่อนคลายทางไดอิเล็กตริกทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานอย่างมากในเวลาอันรวดเร็ว สำหรับค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียที่ความถี่ 1 kHz และที่อุณหภูมิห้องสรุปดังตารางที่ 6.1 และ 6.2 สำหรับวัสดุที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 6.8 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)

ที่อุณหภูมิห้องของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 6.9 การเปลี่ยนแปลงกับความถี่ของค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก ($\tan\delta$)

ที่อุณหภูมิห้องของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 6.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสีย ($\tan\delta$) ที่ความถี่ 1 kHz และที่อุณหภูมิห้อง ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (E_b) และค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า (α) ของวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (PC-CCTO) ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ตัวอย่างทดสอบ	ϵ'	$\tan\delta$	α	E_b
$\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$	278996	0.63	2.1	41.9
1.0%PC-CCTO	17056	0.17	3.5	439.3
2.5%PC-CCTO	12034	0.14	6.5	5472.0
5.0%PC-CCTO	1081	1.67	3.5	689.5

ตารางที่ 6.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสีย ($\tan\delta$) ที่ความถี่ 1 kHz และที่อุณหภูมิห้อง ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (E_b) และค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า (α) ของวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ และวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (PC-CCTO) ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ตัวอย่างทดสอบ	ϵ'	$\tan\delta$	α	E_b
$\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$	300614	1.42	2.2	43.0
1.0%PC-CCTO	46888	0.27	2.8	264.1
2.5%PC-CCTO	19231	0.15	4.1	1295.3
5.0%PC-CCTO	687	2.51	2.2	1859.6

นอกจากนี้แล้ว การผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ลงในวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ยังสามารถปรับปรุงสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ได้อีกด้วย สมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างสนามไฟฟ้า (E) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) ทดสอบด้วยเครื่อง High voltage measurement unit ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเซรามิกไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์วารีสเตอร์ การออกแบบชุดอุปกรณ์การทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.10 ค่าที่ได้จากการบันทึกผลทดลองคือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) และค่ากระแสไฟฟ้า (I) โดยค่า J และ E คำนวณจากสมการ

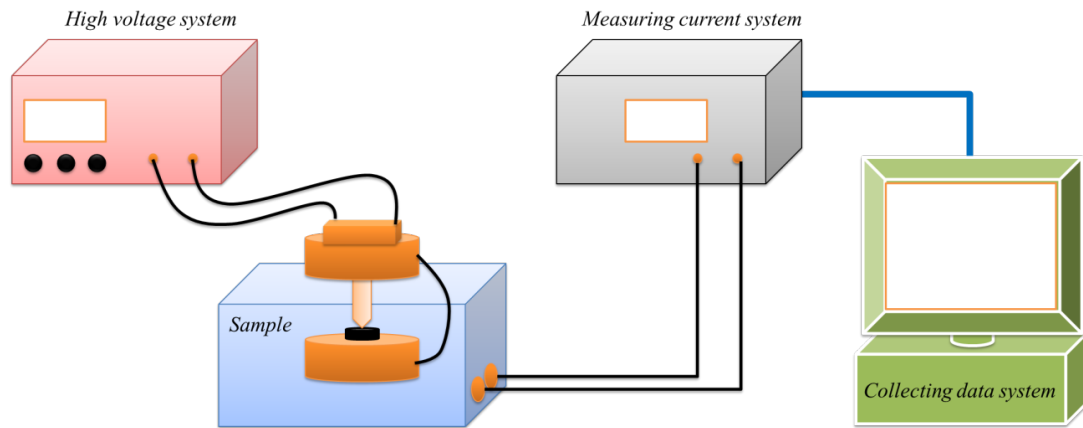
$$J = I / A \quad (6.5)$$

$$E = V / d \quad (6.6)$$

โดยที่ A และ d คือพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าและความหนาของวัสดุตัวอย่างทดสอบ ตามลำดับ ผลจากการศึกษาความไม่เป็นเชิงเส้นระหว่าง J - E ได้นำไปคำนวณค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต (breakdown electric field, E_b) โดยคำนวณจากค่าสนามไฟฟ้าที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากับ $J = 1 \text{ mA/cm}^2$ และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า (nonlinear coefficient, α) จากสมการ

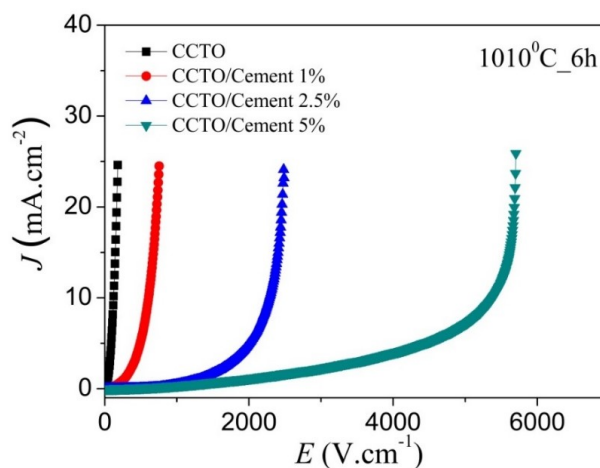
$$\alpha = \frac{\log J_2 - \log J_1}{\log E_2 - \log E_1} \quad (6.7)$$

เมื่อ J_1 และ J_2 คือค่าความหนาแน่นกระแสที่ 1 และ 10 mA/cm^2 ตามลำดับ และ E_1 และ E_2 คือค่าสนามไฟฟ้าของค่า J_1 และ J_2 ตามลำดับ



รูปที่ 6.10 การจัดอุปกรณ์การทดสอบสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างสนามไฟฟ้า
กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 6.11 แสดงความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่าง J - E ของทุกเงื่อนไขการผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า ลักษณะโดยรวมประกอบด้วย 2 ช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า คือช่วงก่อนที่จะเกิดการเพิ่มขึ้นของค่า J อย่างรวดเร็ว (ช่วงที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง) และช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งในช่วงนี้วัสดุจะเปลี่ยนตัวเองจากฉนวนเป็นตัวนำไฟฟ้า นั่นคือเมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่ง (E_b) วัสดุจะยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ โดยการผสมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ลงในวัสดุเซรามิก $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ยังสามารถปรับปรุงสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า นั่นคือสนามไฟฟ้าวิกฤตมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตและค่าสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า (α) ของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ สรุปดังตารางที่ 6.1 และ 6.2 สำหรับวัสดุที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1010°C เป็นเวลา 3 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคที่เป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้นดังแสดงในภาพถ่าย SEM และเกิดขึ้นเนื่องจากการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าที่ขอบเกรนตามสมการที่ 6.3 โดยค่าความสูงของศักย์ไฟฟ้าสถิตที่ขอบเกรนอาจจะมีค่าเพิ่มขึ้นอันเป็นผลเนื่องมาจากการแทนที่ของไอออนในมืออยู่ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ เช่น Al Fe Cr และ Mg (Chung et al., 2004; Adams et al., 2006)



รูปที่ 6.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (J) กับ สนามไฟฟ้า (E)

ที่อุณหภูมิห้องของวัสดุคอมโพสิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์- $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

ที่ผ่านการเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 1010 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

เอกสารอ้างอิง

- Adams, T., Sinclair, D., and West, A. (2006). Characterization of grain boundary impedances in fine- and coarse-grained $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics. **Phys. Rev. B**, **73**(9), 094124.
- Boonlakhorn, J., Kidkhunthod, P., and Thongbai, P. (2015). A novel approach to achieve high dielectric permittivity and low loss tangent in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics by co-doping with Sm^{3+} and Mg^{2+} ions. **J. Eur. Ceram. Soc.**, **35**(13), 3521-3528.
- Choi, S.W., Hong, S.H., and Kim, Y.M. (2007). Effect of Al Doping on the Electric and Dielectric Properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. **J. Am. Ceram. Soc.**
- Chung, S.Y., Kim, I.D., and Kang, S.J.L. (2004). Strong nonlinear current-voltage behaviour in perovskite-derivative calcium copper titanate, **Nat. Mater.**, **3**(11), 774-778.
- Feng, L., Tang, X., Yan, Y., Chen, X., Jiao, Z., and Cao, G. (2006). Decrease of dielectric loss in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics by La doping. **Physica Status Solidi**, **203**(4), 22-24.
- Homes, C.C., Vogt, T., Shapiro, S.M., Wakimoto, S., and Ramirez, A.P. (2001). Optical Response of High-Dielectric-Constant Perovskite-Related Oxide. **Science**, **293**, 673-676.

- Kim, K.M., Kim, S.J., Lee, J.H., and Kim, D.Y. (2007). Microstructural evolution and dielectric properties of SiO₂-doped CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics. **J. Eur. Ceram. Soc.**, **27**(13-15), 3991-3995.
- Krohns, S., Lunkenheimer, P., Meissner, S., Reller, A., Gleich, B., Rathgeber, A., Gaugler, T., Buhl, H.U., Sinclair, D.C., and Loidl, A. (2011). The route to resource-efficient novel materials. **Nat. Mater**, **10**(12), 899-901.
- Liang, P., Chao, X., and Yang, Z. (2014). Low dielectric loss, dielectric response, and conduction behavior in Na-doped Y₂/3Cu₃Ti₄O₁₂ ceramics. **J. Appl. Phys.**, **116**(4), 044101.
- Lunkenheimer, P., Fichtl, R., Ebbinghaus, S., and Loidl, A. (2004). Nonintrinsic origin of the colossal dielectric constants in CaCu₃Ti₄O₁₂. **Phys. Rev. B**, **70**(17), 172102.
- Moulson, A.J. and Herbert, J.M. (2003). *Electroceramics : materials, properties, applications*, 2nd ed., Wiley, West Sussex ; New York.
- Mu, C., Zhang, H., He, Y., Shen, J., and Liu, P. (2009). Influence of dc bias on the dielectric relaxation in Fe-substituted CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics: grain boundary and surface effects. **J. Phys. D: Appl. Phys.**, **42**(17), 175410.
- Ni, L. and Chen, X.M. (2009). Enhanced giant dielectric response in Mg-substituted CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics. **Solid State Commun.**, **149**(9-10), 379-383.
- Rahaman, M.N. (2003). *Ceramic processing and sintering*, 2nd ed., M. Dekker, **New York**.
- Ramirez, A.P., Subramanian, M.A., Gardel, M., Blumberg, G., Li, D., Vogt, T., and Shapiro, S.M. (2000). Giant dielectric constant response in a copper-titanate. **Solid State Commun**, **115**(5), 217-220.
- Shannon, R.D. (1976). Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides. **Acta Cryst**, 751-767.
- Subramanian, M.A., Li, D., Duan, N., Reisner, B.A., and Sleight, A.W. (2000). High Dielectric Constant in ACu₃Ti₄O₁₂ and ACu₃Ti₃FeO₁₂ Phases. **J. Solid State Chem.**, **151**(2), 323-325.

- Vangchangyia, S., Yamwong, T., Swatsitang, E., Thongbai, P., and Maensiri, S. (2013). Selectivity of doping ions to effectively improve dielectric and non-ohmic properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics. **Ceram. Int.**, **39**(7), 8133-8139.
- West, A.R., Adams, T.B., Morrison, F.D., and Sinclair, D.C. (2004). Novel high capacitance materials:- $\text{BaTiO}_3\text{:La}$ and $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$. **J. Eur. Ceram. Soc.**, **24**(6), 1439-1448.
- Wu, J., Nan, C.W., Lin, Y., and Deng, Y. (2002). Giant Dielectric Permittivity Observed in Li and Ti Doped NiO . **Phys. Rev. Lett.**, **89**(21), 217601.
- Zheng, Q., Fan, H., and Long, C. (2012). Microstructures and electrical responses of pure and chromium-doped $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramics. **J. Alloys Compd.**, **511**(1), 90-94.

บทที่ 7

การวิเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ผสมคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี Impedance spectroscopy analysis of carbon fiber reinforced geopolymer

รองศาสตราจารย์ ดร. สุปรีย์ พิณจุสนทร, Email: psupree@kku.ac.th

นางสาวปัญจศีล พยัคฆนิธิ, Email: p.payakaniti@kkumail.com

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีบูรณาการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถ. มิตรภาพ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40002

7.1 บทคัดย่อ

ซีเมนต์คอมโพสิตผสมกับวัสดุเสริมแรงจากคาร์บอนนอกจากจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดหรือสมบัติเชิงกลอื่นๆดีขึ้นแล้ว ยังทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าของซีเมนต์ยังดีขึ้นด้วย ซึ่งสามารถพัฒนานำไปเป็นวัสดุฉลาด เช่นเซนเซอร์ หรือวัสดุผลิตหรือกักเก็บพลังงานได้ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการผสมซีเมนต์กับวัสดุกลุ่มคาร์บอนเพื่อเพิ่มสภาพการนำไฟฟ้าให้ดีขึ้น แต่งานวิจัยที่ใช้เมทริกซ์ที่เป็นจีโอโพลิเมอร์ยังมีรายงานออกมาค่อนข้างน้อย ในงานวิจัยนี้ได้ผสมเส้นใยคาร์บอนเข้ากับจีโอโพลิเมอร์เฟสแล้วทดสอบการรับกำลังอัด พบว่ากำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นการกระจายตัวที่สม่ำเสมอแบบไม่มีทิศทางของเส้นใยคาร์บอนในเนื้อจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ ผลการวิเคราะห์ด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีพบว่าการเติมเส้นใยคาร์บอนส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าและการเก็บประจุของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการพิทผลการทดลองเข้ากับวงจรไฟฟ้าเทียบเคียง

คำหลัก: จีโอโพลิเมอร์, แก้วลอย, เส้นใยคาร์บอน, สมบัติทางไฟฟ้า, สมบัติเชิงกล

7.2 บทนำ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีความสำคัญมากในงานก่อสร้าง แต่การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้พลังงานมาก ทั้งยังปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมหาศาลสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามหาวัสดุอื่นมาทดแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จีโอโพลิเมอร์เป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งที่จะนำมาเป็นวัสดุก่อสร้างแทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์ประกอบไปด้วยอะลูมินาและซิลิกายึดจับกันเป็นโครงข่ายสามมิติ มีความสามารถในการทนความร้อนสูง ด้านการกัดกร่อน มีหดรัดตัวต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Lin et al., 2008; Saafi et al., 2013) จีโอโพลิเมอร์สามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ เช่น แก้วลอย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าถ่านหิน

ข้อจำกัดการใช้งานจีโอโพลิเมอร์ในงานก่อสร้าง เช่นเดียวกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือความเปราะ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการผสมเส้นใยเสริมแรง หากพิจารณาความคุ้มค่าและความสะดวกในการนำมาใช้งานแล้ว เส้นใยเสริมแรงแบบเส้นมีความเหมาะสมที่สุด (Matthews and Rawlings, 1999; Masi et al., 2015) จึงได้มีการศึกษาโดยนำเส้นใยชนิดต่างๆมาผสมกับจีโอโพลิเมอร์เพื่อลดความเปราะ ได้แก่ ท่อคาร์บอนนาโน (CNT) เส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เส้นใยบะซอลต์ เส้นใยพอลิโพรไพลีน (PP) และเส้นใยคาร์บอน (CF) (Sakulich, 2011; Shaikh, 2013)

ในบรรดาเส้นใยทั้งหมดที่มีการผสมในจีโอโพลิเมอร์หรือซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เส้นใยจากคาร์บอน ได้รับความนิยมอย่างมาก เพราะนอกจากการเพิ่มสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นแล้ว การผสมเส้นใยจากคาร์บอน ยังทำให้ฟังก์ชันการใช้งานอื่นๆมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้นไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น การเติม CNT ในจีโอโพลิเมอร์ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการเติม CNT และยังทำให้ค่าสภาพต้านทานเมื่อได้รับแรงกดอัด (piezoresistivity) เปลี่ยนไปแบบเชิงเส้นตามโหลดที่ได้รับ (Saafi et al., 2013) นอกจากนี้ ยังมีการทดลองให้เห็นว่าการเติมเส้นใยคาร์บอน (CF) ในจีโอโพลิเมอร์จะช่วยให้สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นตามการดัดโค้งของชิ้นงาน (Vaidya and Allouche, 2011) ส่วนผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการเติม CNT กับ CF ในจีโอโพลิเมอร์พบว่า สภาพการนำไฟฟ้าเมื่อเติม CNT ดีกว่าเมื่อเติม CF แต่การเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นตรง (MacKenzie and Bolton, 2009)

สมบัติเชิงไฟฟ้าของจีโอโพลิเมอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุฉลาด (smart material) ได้หลากหลายประเภท เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดโครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์ในช่วงอายุการใช้งาน หรือ ใช้เป็นโครงสร้างสายดินเพื่อป้องกันฟ้าผ่าในตึกสูง นอกจากนี้ จีโอโพลิเมอร์นำไฟฟ้ายังสามารถใช้กระจายประจุสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง สามารถใช้สำหรับการละลายน้ำแข็งบนผิวถนน สามารถใช้เป็นกำแพงป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หรือเป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานจากความร้อนหรือแสงอาทิตย์ (Chung, 2003; Lu et al., 2015) อย่างไรก็ตาม องค์ความรู้เรื่องการนำไฟฟ้าของจีโอโพลิเมอร์ยังมีงานตีพิมพ์ไม่มากนัก และต้องการการศึกษาเพิ่มเติมอีกมาก

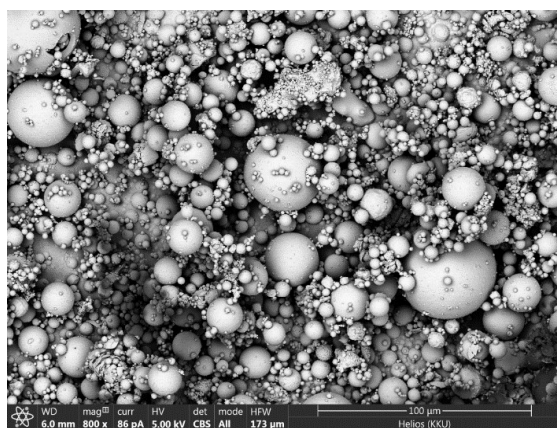
ในเชิงสมบัติทางไฟฟ้า วัสดุจีโอโพลิเมอร์ประกอบไปด้วยหลายเฟส ทั้งเฟสที่นำไฟฟ้า (จากสารละลาย หรือประจุอิสระ) และเฟสที่ไม่นำไฟฟ้า (โครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต หรือรูพรุน) การวัดการนำไฟฟ้าโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ไม่เป็นที่นิยมมากนัก เพราะค่าที่ได้จะแกว่ง เนื่องจากการอัดและคายประจุตลอดช่วงเวลาการวัด นอกจากนี้การเติมเส้นใยคาร์บอน จะเป็นการเปลี่ยนแปลงกลไกการนำไฟฟ้าในโครงสร้าง ทำให้การวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าแบบ DC มีความซับซ้อนขึ้นไปอีก ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีการใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้าแบบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี มาวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของวัสดุซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือจีโอโพลิเมอร์ วิธีนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า electrochemical impedance spectroscopy หรือ EIS ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบที่ไม่ทำลายชิ้นงาน มีการประยุกต์ใช้วิธีนี้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงไฟฟ้าของวัสดุเชื่อมประสานที่เติมเส้นใยเสริมแรง เช่น ในการทดลองของ Wansom and Janjaturaphan (2013) พบว่า ผลการวัด EIS สัมพันธ์กับความแข็งแรงต่อแรงดัด และยังใช้ผล EIS ประเมินการเรียงตัวของเส้นใยในซีเมนต์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยจากพืชได้ (Wansom and Janjaturaphan, 2013) นอกจากนี้

EIS ยังสามารถใช้หาการกระจายตัวของ CNT ในซีเมนต์เมทริกซ์ (Wansom et al., 2006) หรือหาผลของการเรียงตัวของเส้นใยต่อความแข็งแรงของพอลิเมอร์เมทริกซ์เมื่อเติมเส้นใยแก้วได้ (Norman and Robertson, 2003) เมื่อไม่นานมานี้ Li et al. (2016) ได้ใช้เทคนิค EIS เพื่อหาความแข็งแรงของซีเมนต์คอมโพสิตที่เติม CNT ซึ่งพบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างผลจาก EIS กับค่าความแข็งแรงที่วัดได้ (Li et al., 2016)

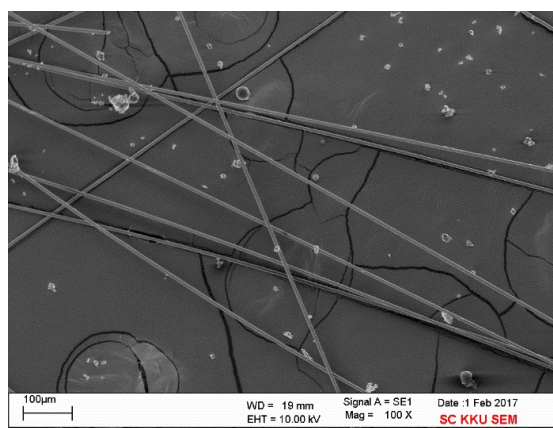
เนื้อหาต่อไปในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยผสมเส้นใยคาร์บอน สมบัติเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เมื่อเติมเส้นใยคาร์บอน โครงสร้างเชิงจุลภาค และสมบัติเชิงไฟฟ้าจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี EIS โดยสาเหตุที่เลือกใช้เส้นใยคาร์บอนเพราะเมื่อคำนึงถึงราคา ปริมาณวัตถุดิบ และความสะดวกในการจัดหาแล้ว เส้นใยคาร์บอนมีราคาถูกและหาได้ง่าย นอกจากนี้ เส้นใยคาร์บอนยังมีความอดุลัส ความแข็งแรง ความแข็งแรงที่สูง และน้ำหนักเบา และมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม

7.3 วัสดุคอมโพสิตจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยคาร์บอน

จีโอโพลิเมอร์เตรียมจากเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ส่วนเส้นใยคาร์บอนใช้เส้นใยคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $7\ \mu\text{m}$ (จากบริษัท New bright carbon fiber products co., ltd. ประเทศจีน) รูปถ่ายของวัตถุดิบแสดงดังรูปที่ 7.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เถ้าลอยประกอบไปด้วยอนุภาคทรงกลมที่มีผิวเรียบ ขนาดอนุภาคมีการกระจายตัวในช่วงที่กว้างตั้งแต่ระดับหลายสิบล้านไมโครเมตรไปจนถึงเล็กระดับร้อยนาโนเมตร เส้นใยคาร์บอนมีขนาดใกล้เคียง $7\ \mu\text{m}$ และมีความยาว 6 mm



(ก)

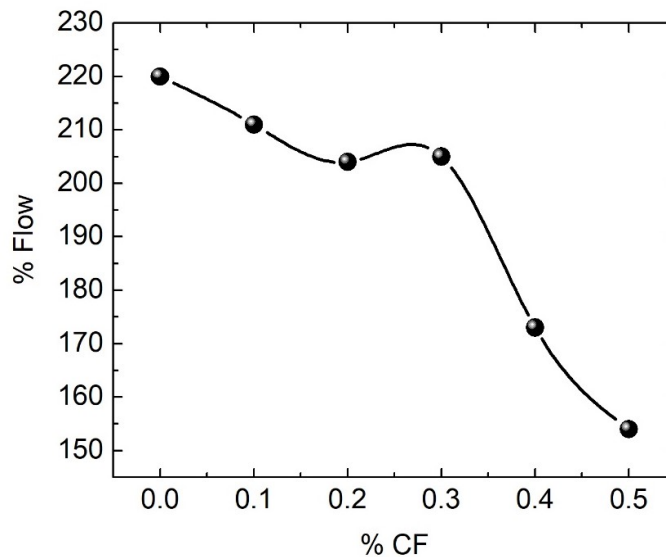


(ข)

รูปที่ 7.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของวัสดุได้แก่ (ก) เถ้าลอย (ข) เส้นใยคาร์บอน

ขั้นตอนการผสมเริ่มต้นด้วยการแยกเส้นใยคาร์บอนที่เกาะกลุ่มอยู่ออกจากกันด้วยมือ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จนกระทั่งเส้นใยกระจายตัวออกจากกัน จากนั้นเติมเถ้าลอยลงในสารละลายแล้วผสมด้วยเครื่องผสมด้วยความเร็วใบพัด 1400 rpm เป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_4) ผสมด้วยอัตราเร็วเท่าเดิมเป็นเวลาอีก 5 นาที โดยที่อัตราส่วนระหว่าง

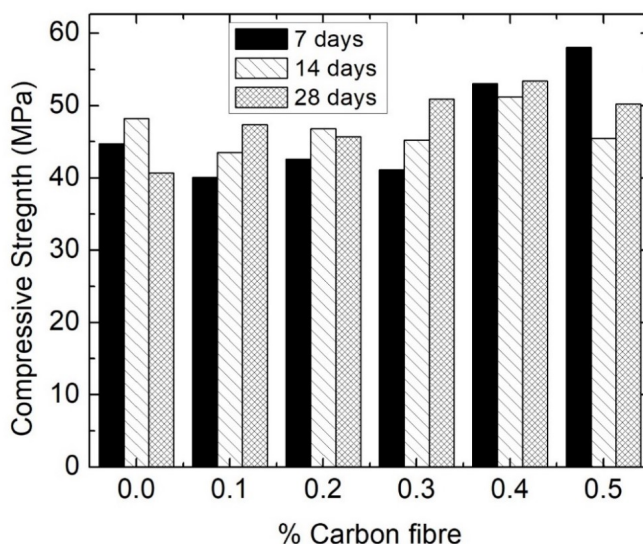
$\text{Na}_2\text{SiO}_4:\text{NaOH}$ กำหนดเท่ากับ 1 และอัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 0.4 ปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่เติมอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การทดสอบการไหลตัวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตามมาตรฐาน ASTM C143 ได้ผลตามรูปที่ 7.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเพสต์ไหลน้อยได้น้อยลงเมื่อปริมาณเส้นใยคาร์บอนเพิ่มขึ้น จึงเป็นการจำกัดปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่จะเติมลงไปได้ เมื่อผสมจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตเสร็จเรียบร้อยแล้ว เทลงในโมลด์แล้วบ่มที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการนำไปทดสอบ



รูปที่ 7.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลตัว (%Flow) ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อผสมเส้นใยคาร์บอน (%CF)

7.4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยคาร์บอน

ผลของการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ (ASTM C109/C109M – 13) เมื่อเติมเส้นใยคาร์บอนปริมาณ 0.1 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงได้ดังรูปที่ 7.3 จะเห็นได้ว่าปริมาณของเส้นใยคาร์บอนส่งผลต่อการรับกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์โดยเมื่อเติมเส้นใยคาร์บอนในปริมาณที่สูงขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงกด (compressive strength) อัดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เกิดจากการที่เส้นใยคาร์บอนทำหน้าที่เป็นสะพานขนาดเล็กช่วยยึดจับชิ้นส่วนระดับจุลภาคของเมทริกซ์จีโอโพลิเมอร์เข้าด้วยกัน รูปที่ 7.3 ยังแสดงผลการวัดกำลังอัดเมื่อจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตมีอายุ 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งอายุของตัวอย่างส่งผลที่ไม่ชัดเจนต่อกำลังอัดของคอมโพสิต อย่างไรก็ตาม สำหรับทุกๆ ตัวอย่างในการทดลองนี้ มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกดค่อนข้างสูงในช่วง 40-60 MPa สอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้สำหรับจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูงเป็นองค์ประกอบหลัก (Chindaprasirt et al., 2007; Hanjitsuwan et al., 2014)



รูปที่ 7.3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์เมื่อเติมเส้นใยคาร์บอนปริมาณ 0.1 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

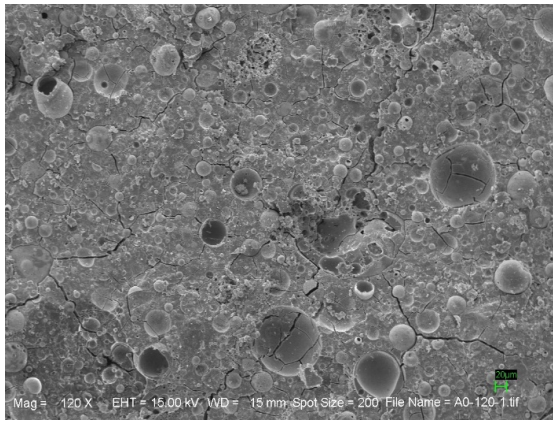
7.5 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยคาร์บอน

เส้นใยคาร์บอนที่ผสมลงในจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ใช้การกระจายตัวแบบเชิงกล (การปั่น) และไม่ได้เติมสารช่วยกระจายตัว ปรากฏว่าวิธีนี้ให้ผลที่น่าพอใจ คือได้ลักษณะของเส้นใยคาร์บอนที่กระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ ภาพถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายต่ำ (120x) (รูปที่ 7.4) แสดงภาพมุมกว้างของตัวเมทริกซ์และเส้นใยคาร์บอนที่ถูกไฮโดรไลต์ด้วยลูกศร เส้นใยคาร์บอนกระจายตัวได้ดีในทุกทิศทาง ไม่มีการกระจุกตัว หรือแนวโน้มของทิศทางของเส้นใยคาร์บอนที่แน่ชัด ส่งผลให้ตัวอย่างมีสมบัติไม่ขึ้นกับทิศทาง นอกจากนี้ จากรูปที่ 7.4 จะเห็นได้ว่า เส้นใยคาร์บอนในภาพเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เติมเข้าไป ส่วนรูปที่ 7.5 แสดงภาพถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายสูงขึ้น (1000x) จะเห็นเนื้อของจีโอโพลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งมีลักษณะเรียบเนียนเป็นเฟสเดียว แตกต่างจากลักษณะของเถ้าลอยอย่างสิ้นเชิง แสดงว่าปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นค่อนข้างสมบูรณ์แล้ว ส่วนเส้นใยคาร์บอนมีลักษณะฝังตัวเข้าไปในเนื้อเมทริกซ์อย่างแนบแน่น ไม่ปรากฏร่องรอยที่เส้นใยคาร์บอนหลุดออกจากเมทริกซ์ แสดงว่าเกิดพันธะที่แข็งแรงขึ้นระหว่างรอยต่อของผิวจีโอโพลิเมอร์กับเส้นใยคาร์บอน ทำให้เมื่อมีแรงกระทำ แรงจะถูกส่งผ่านไปยังเส้นใยคาร์บอนเพื่อให้อยู่รับแรง และช่วยยึดเกาะเนื้อเมทริกซ์ที่ได้รับแรงไม่ให้แยกออกจากกัน ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดในรูปที่ 7.3

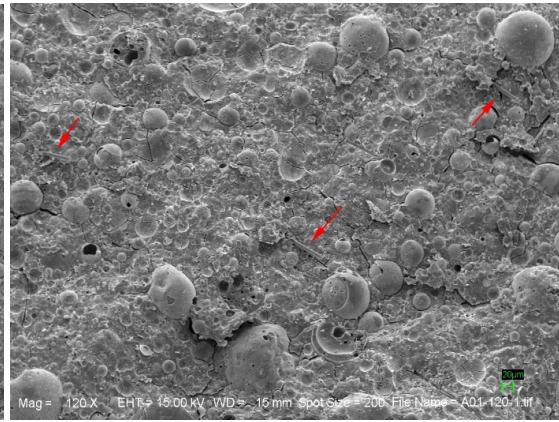
7.6 การวิเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ผสมคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี

โดยทั่วไปแล้วผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ในวัสดุที่ประกอบไปด้วยหลายเฟส ทั้งส่วนที่เป็นตัวนำและฉนวนไฟฟ้า ผลที่ได้จะเป็นส่วนของเส้นโค้งสองอันหรือมากกว่านั้นคล้ายกับรูปที่ 7.6 เรียกกราฟดังกล่าวว่า ไนควิสต์พลอต (Nyquist plot) โดยแกนนอนเป็นค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจริง (real part) และแกนตั้งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ส่วนจินตภาพ (imaginary part) ส่วนของเส้นโค้งทางขวามือเป็นผลมาจากการวัดที่ความถี่ต่ำ สภาพต้านทานไฟฟ้าในย่านนี้เกิดขึ้นจากรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้ากับเนื้อวัสดุ ส่วนของเส้นโค้งทางซ้าย

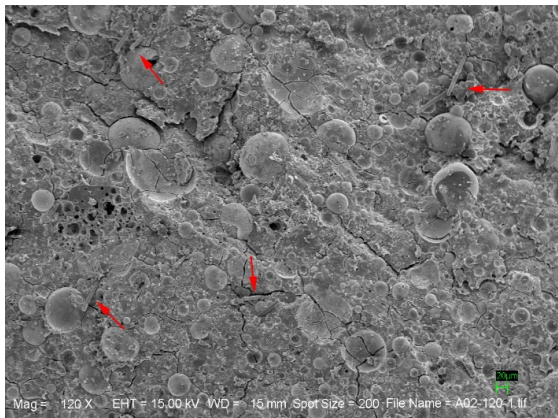
เป็นผลมาจากการวัดที่ความถี่สูง ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากภายในเนื้อวัสดุ (Zeng and Wang, 2016)



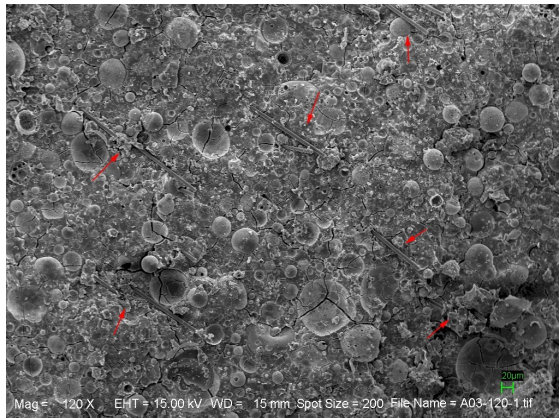
(ก) 0%CF



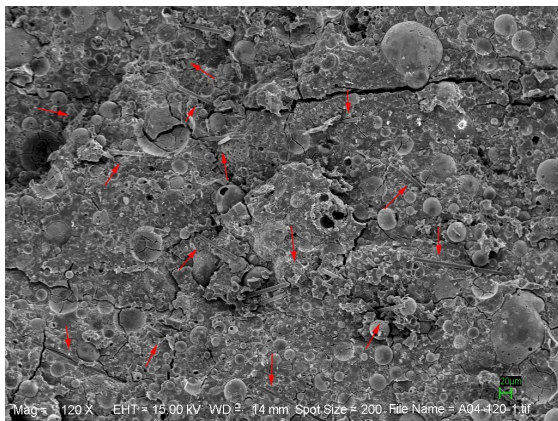
(ข) 0.1%CF



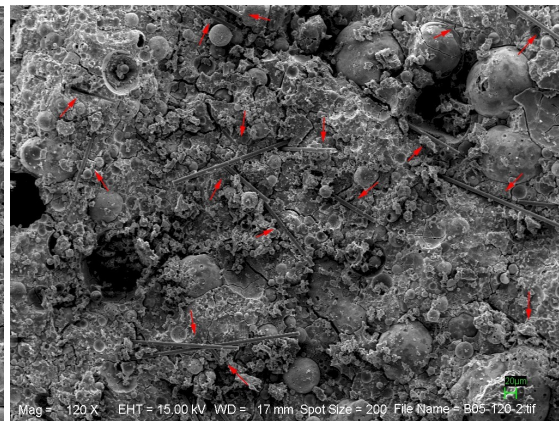
(ค) 0.2%CF



(ง) 0.3%CF

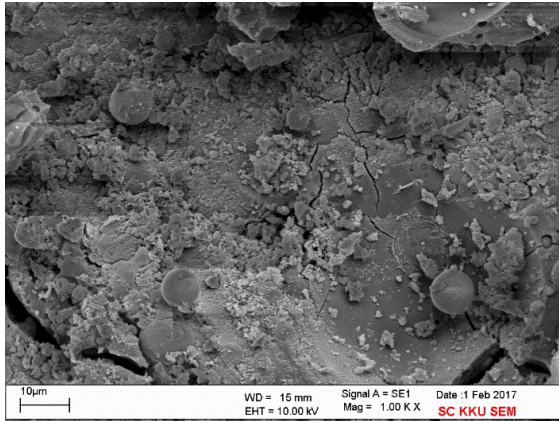


(จ) 0.4%CF

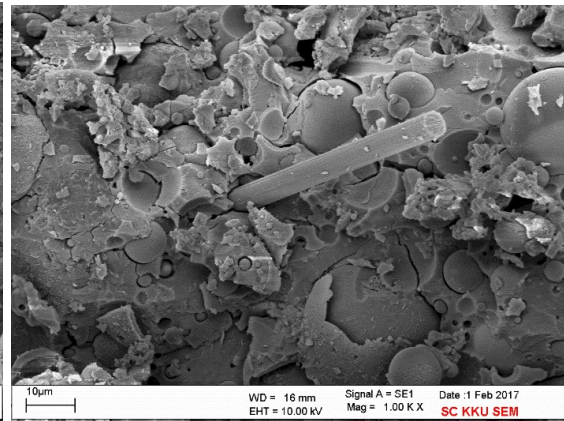


(ฉ) 0.5%CF

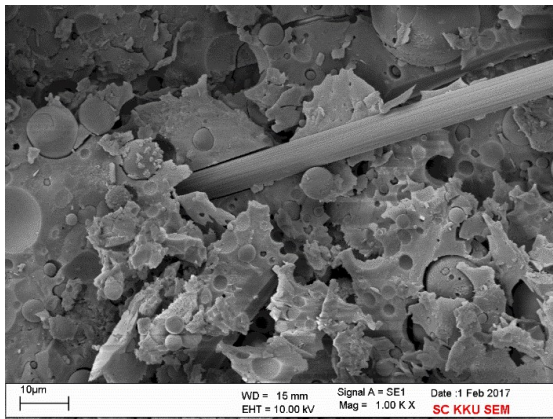
รูปที่ 7.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 120 เท่า แสดงโครงสร้างจุลภาคของอีพอกซีโพลีเมอร์คอมโพสิตกับเส้นใยคาร์บอนในปริมาณ 0.1 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



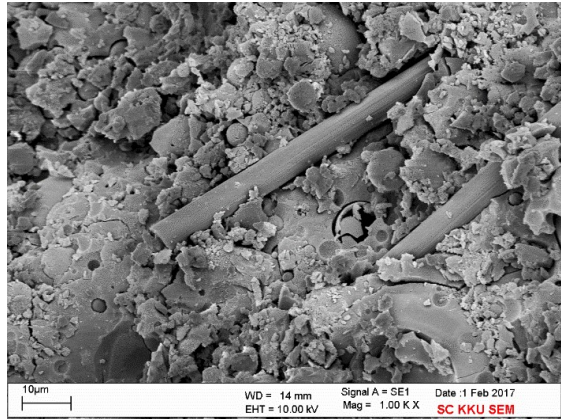
(ก) 0%CF



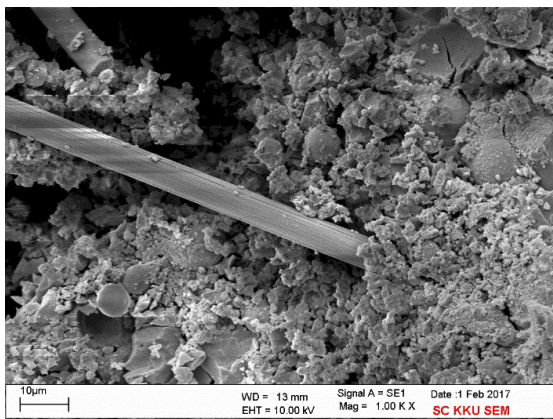
(ข) 0.1%CF



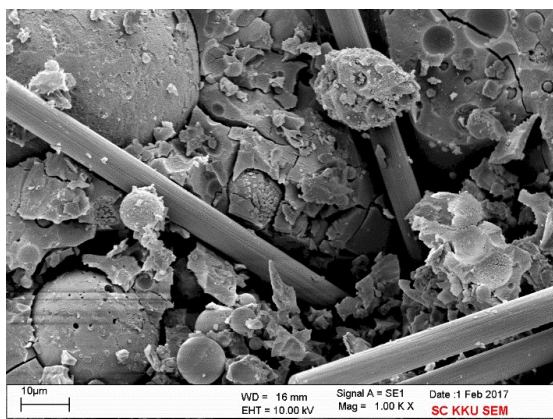
(ค) 0.2%CF



(ง) 0.3%CF

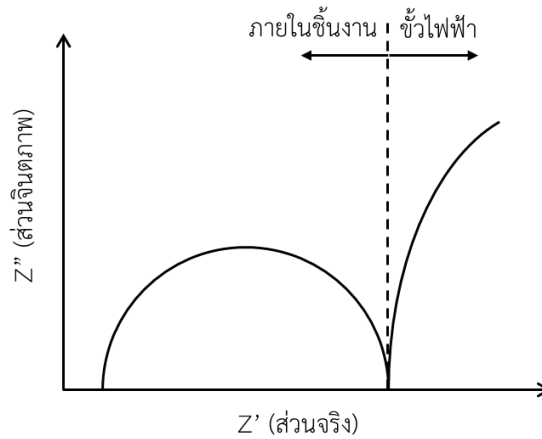


(จ) 0.4%CF



(ฉ) 0.5%CF

รูปที่ 7.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตกับเส้นใยคาร์บอนในปริมาณ 0.1 ถึง 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 7.6 ไนควิสต์พลอต (Nyquist plot)

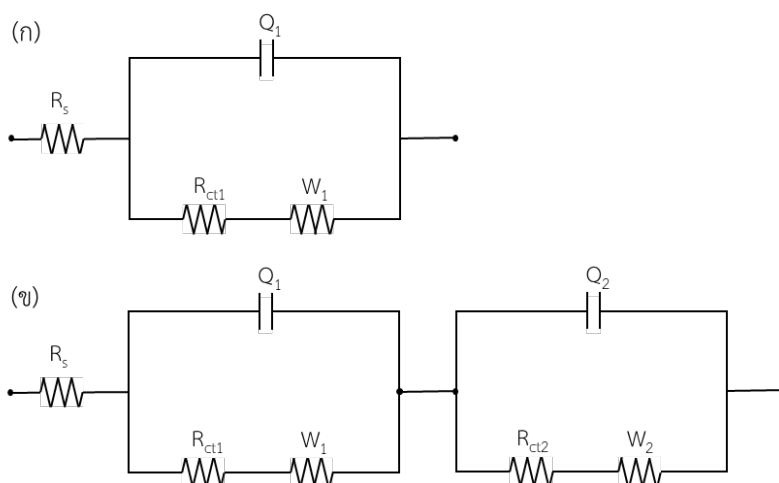
ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EIS เมื่อวัดสมบัติเชิงไฟฟ้าของจีโอโพลิเมอร์ ส่วนประกอบต่างๆที่อยู่ในระบบสามารถแทนได้ด้วยวงจรไฟฟ้าเทียบเคียงดังรูปที่ 7.7 (ก) โดย R_s คือความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ภายในเนื้อจีโอโพลิเมอร์ Q_1 คือชั้นตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (double layer capacitance) ระหว่างเนื้อจีโอโพลิเมอร์กับขั้วไฟฟ้า R_{ct} คือความต้านทานการส่งผ่านประจุระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับขั้วไฟฟ้า W_1 เรียกว่าความต้านทานวาร์เบิร์ก (Warburg resistance) เกิดจากการแพร่ของประจุภายในระบบ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับเส้นใยคาร์บอน จึงทำให้มีส่วนประกอบเพิ่มมาอีกหนึ่งเฟส การวิเคราะห์ด้วย EIS กับวงจรไฟฟ้าเทียบเคียงจึงจำเป็นต้องมีวงจรอื่นเพิ่มเข้ามาดังรูปที่ 7.7 (ข) โดยส่วนที่เพิ่มเข้ามาได้แก่ Q_2 คือชั้นตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นระหว่างเนื้อจีโอโพลิเมอร์กับเส้นใยคาร์บอน (Li et al., 2016) R_{ct2} คือ ความต้านทานการส่งผ่านประจุระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับเส้นใยคาร์บอน และ W_2 คือ ความต้านทานวาร์เบิร์กจากการแพร่ของประจุในเฟสคอมโพสิต การหาค่าตัวแปรต่างๆเหล่านี้ทำได้โดยการฟิตโมเดลดังรูปที่ 7.7 กับเข้าผลการทดลองตามความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์

$$Z = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{ct1} + W_1} + j\omega Q_1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{ct2} + W_2} + j\omega Q_2} \quad \text{โดย } \omega \text{ คือความถี่}$$

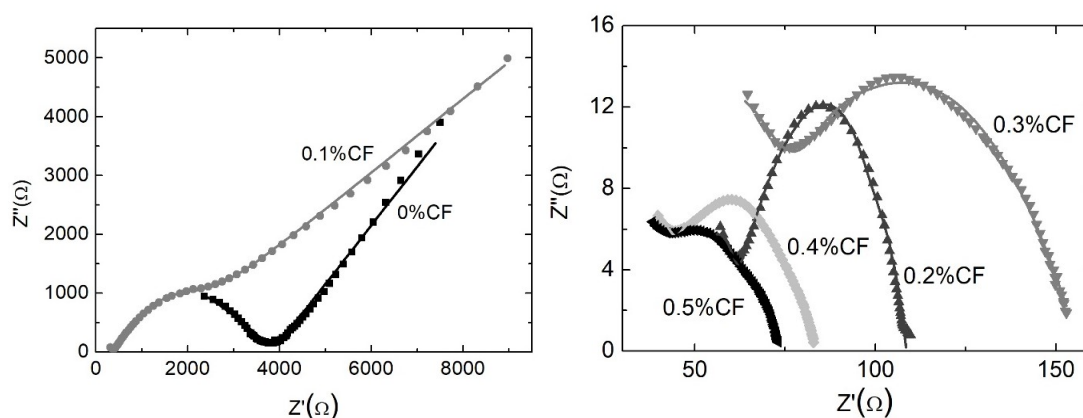
เชิงมุม

ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของจีโอโพลิเมอร์ผสมกับเส้นใยคาร์บอน และผลการฟิตข้อมูลจากผลการทดลองกับวงจรเทียบเคียงในรูป 7.7 แสดงได้ดังรูปที่ 7.8 จะเห็นได้ว่าผลการฟิตข้อมูลสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี แสดงว่าวงจรเทียบเคียงที่ใช้เป็นโมเดลมีความเหมาะสมทั้งสำหรับจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมเส้นใยคาร์บอน (ใช้วงจรในรูป 7.7ก) และจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่ผสมเส้นใยคาร์บอน (ใช้วงจรในรูป 7.7ข) จากรูป 7.8 (ก) และ (ข) สังเกตสเกลในแกนนอนและแกนตั้ง จะเห็นได้ว่ารูป 7.8 (ข) มีค่าอิมพีแดนซ์ทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพต่ำกว่ารูป 7.8 (ก) เป็นอย่างมาก หรือขนาดของส่วนของเส้นโค้งทั้งสองส่วนเล็กลง หรือนั่นคือการเติมเส้นใยคาร์บอนมีส่วนช่วยลดสภาพต้านทานไฟฟ้าของจีโอโพลิเมอร์

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆในวงจรที่ได้จากการฟิตข้อมูลแสดงดังตารางที่ 7.1 อย่างไรก็ตาม ไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างค่าความต้านทานกับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต



รูปที่ 7.7 วงจรเทียบเคียงเพื่อวิเคราะห์ผลการวัด EIS สำหรับ (ก) จีโอโพลิเมอร์ (ข) จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิต



รูปที่ 7.8 ผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์พร้อมกับการฟิตข้อมูลเข้ากับวงจรเทียบเคียงของจีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมเส้นใยคาร์บอนในปริมาณ 0 – 0.5%

ตารางที่ 7.1 พารามิเตอร์จากการฟิตข้อมูล EIS ของจีโอโพลิเมอร์ผสมเส้นใยคาร์บอน

%CF	R_s	Q_1	R_{ct1}	W_1	Q_2	R_{ct2}	W_2
0	1.14E-02	6.28E-11	3.83E+03	1.19E+04	-	-	-
0.1	4.30E+02	4.41E-06	9.74E+02	2.29E+02	4.44E-04	1.52E+04	1.23E+06
0.2	1.83E+02	1.31E-06	6.34E+01	2.55E+01	1.17E-06	8.68E+00	1.11E+01
0.3	1.79E-01	2.73E-11	3.45E-01	9.88E+01	1.62E-03	5.42E+01	3.94E+00
0.4	1.55E+02	3.43E-08	3.73E+01	1.88E+01	1.86E-05	2.73E+01	3.92E-08
0.5	2.11E+02	1.29E-22	1.80E+01	8.20E+00	2.95E-07	4.85E+01	2.39E-03

7.7 สรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผสมเส้นใยคาร์บอนลงในจีโอโพลิเมอร์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและปรับปรุงสภาพการนำไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้พบว่า จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่เติมเข้าไป และเมื่อวิเคราะห์ด้วยอิมพีแดนซ์สเปคโตรสโคปีพบว่า จีโอโพลิเมอร์คอมโพสิตมีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น การวิเคราะห์ด้วยโมเดลวงจรเทียบเคียงให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี

จากงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะคือ ในงานวิจัยชิ้นนี้การแยกเส้นใยคาร์บอนให้ออกจากกันยังทำด้วยมือ ดังนั้นจึงควรหาวิธีการอื่นที่จะทำให้เส้นใยคาร์บอนกระจายตัวได้ดี นอกจากนี้ความสามารถในการไหลของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นตัวกำหนดปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่จะเติมเข้าไปได้ หากต้องการเพิ่มปริมาณเส้นใยคาร์บอนที่เติมเข้าไป อาจสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งให้เพิ่มขึ้นจากเดิม

7.8 เอกสารอ้างอิง

- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement Concrete Comp**, 29(3), 224-229.
- Chung, D.D.L. (2003). Multifunctional Cement-Based Materials. New York: CRC Press.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. **Cement Concrete Comp**, 45, 9-14.
- Li, W.W., Ji, W.M., Fang, G.H., Liu, Y.Q., Xing, F., Liu, Y.K., et al. (2016). Electrochemical impedance interpretation for the fracture toughness of carbon nanotube/cement composites. **Constr Build Mater**, 114, 499-505.
- Lin, T., Jia, D., He, P., Wang, M., and Liang, D. (2008). Effects of fiber length on mechanical properties and fracture behavior of short carbon fiber reinforced geopolymer matrix composites. **Mat Sci Eng a-Struct**, 497(1-2), 181-185.
- Lu, S.N., Xie, N., Feng, L.C., and Zhong, J. (2015). Applications of Nanostructured Carbon Materials in Constructions: The State of the Art. **J Nanomater**, 807416.
- MacKenzie, K.J.D. and Bolton, M.J. (2009). Electrical and mechanical properties of aluminosilicate inorganic polymer composites with carbon nanotubes. **J. Mater. Sci.** 44(11). 2851-2857.
- Masi, G., Rickard, W.D.A., Bignozzi, M.C., and Riessen, V.A. (2015). The effect of organic and inorganic fibres on the mechanical and thermal properties of aluminate activated geopolymers. **Compos Part B-Eng** 76, 218-228.

- Matthews, F.L. and Rawlings, R.D. (1999). Composite materials : engineering and science. **Cambridge: CRC Press.**
- Norman, D.A. and Robertson, R.E. (2003). The effect of fiber orientation on the toughening of short fiber-reinforced polymers. **J Appl Polym Sci**, **90**(10), 2740-2751.
- Saafi, M., Andrew, K., Tang, P.L., McGhon, D., Taylor, S., Rahman, M., et al. (2013). Multifunctional properties of carbon nanotube/fly ash geopolymeric nanocomposites. **Constr Build Mater**, **49**, 46-55.
- Sakulich, A.R. (2011). Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability. **Sustain Cities Soc**, **1**(4), 195-210.
- Shaikh, F.U.A. (2013). Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites. **Constr Build Mater**, **43**, 37-49.
- Vaidya, S., Allouche, E.N., (2011). Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete. **Mater Struct**, **44**(8), 1467-1475.
- Wansom, S. and Janjaturaphan, S. (2013). Evaluation of fiber orientation in plant fiber-cement composites using AC-impedance spectroscopy. **Cement Concrete Res**, **45**, 37-44.
- Wansom, S., Kidner, N.J., Woo, L.Y., and Mason, T.O. (2006). AC-impedance response of multi-walled carbon nanotube/cement composites. **Cement Concrete Comp**, **28**(6), 509-519.
- Zeng, S.X. and Wang, J.L. (2016). Characterization of mechanical and electric properties of geopolymers synthesized using four locally available fly ashes. **Constr Build Mater**, **121**, 386-399.

บทที่ 8

ชีวไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อนคาร์บอนนาโน ผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Carbon Nanotube-cement Composite for Catalysis on Counter Electrodes of Dye-sensitized Solar Cells

ปริญญญา จินดาประเสริฐ¹, วิรัตน์ เจริญบุญ², ณัฐวัฒน์ รัชพลทวีสิน², วิทยา อมรกิจบำรุง^{2*}

*Email: vittaya@kku.ac.th

¹ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 ถ. มิตรภาพ ต. ในเมือง อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40002

8.1 บทคัดย่อ

ชีวไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อนคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วยชั้นฟิล์มของท่อนคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์ ชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง และชั้นกระจกโปร่งแสง โดยที่ชั้นฟิล์มของท่อนคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์จะถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีดอกซ์ (Reduction-Oxidation reaction) ในระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยคู่อิเล็กโทรดรีดอกซ์ของไอโอดีนและไตรไอโอดีน โดยซีเมนต์จะทำหน้าที่สำคัญคือเป็นตัวประสานระหว่างชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสงและท่อนคาร์บอนนาโนช่วยให้มีการยึดติดได้แน่นมากขึ้น นอกจากนั้นฟิล์มผสมระหว่างท่อนคาร์บอนนาโนและซีเมนต์ยังสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่จำเป็นต้องผ่านการเผาด้วยความร้อน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ชีวไฟฟ้าด้านหลังชนิดท่อนคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะให้ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 9.60 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็น 85.7 เปอร์เซ็นต์ ของการใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 11.22 เปอร์เซ็นต์

8.2 บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงถูกคิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นมีประสิทธิภาพสูงประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1991 โดยโอรีแกน (O'Regan) และแกรซเซล (Grätzel) (B. O'Regan and M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films". *Nature*. 1991; 353: 737-739.) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นนี้มี

ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) ส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte solution) และส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (Counter electrode) โดยที่ส่วนของขั้วไฟฟ้าทำงาน ซึ่งเป็นขั้วลบจะทำหน้าที่รับแสง ขั้วไฟฟ้าทำงานประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มที่มีรูพรุนของสารกึ่งตัวนำแบบช่องว่างแถบพลังงานกว้าง เช่น ดีบุกไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ที่มีขนาดของอนุภาคในระดับนาโนเมตรเคลือบอยู่บนฐานรองรับกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง โดยผิวของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีโมเลกุลของสีย้อม (Dye sensitizer) เกาะอยู่ ซึ่งสีย้อมจะทำหน้าที่ในการดูดกลืนแสงโดยเฉพาะแสงในย่านที่ตามองเห็น (400 – 700 nm)

ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นส่วนที่เชื่อมอยู่กึ่งกลางระหว่างส่วนขั้วไฟฟ้าทำงานและส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ประกอบไปด้วยคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) ของไอโอไดต์ (Iodide) และไตรไอโอไดต์ (Triiodide) ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าด้านหลังไปยังโมเลกุลสีย้อมผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์

ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ซึ่งเป็นขั้วบวก ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนกลับคืนไปสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เช่น แพลทินัม (Platinum; Pt) หรือ คาร์บอน (Carbon; C) ชั้นฟิล์มของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเคลือบอยู่บนฐานรองรับกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงอีกทีหนึ่ง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อแสงตกกระทบบนขั้วไฟฟ้าทำงาน โมเลกุลของสีย้อมจะดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นส่วนแสงที่มีพลังงานสูงกว่านี้จะถูกดูดกลืนด้วยสารดีบุกไดออกไซด์ เมื่อสีย้อมดูดกลืนพลังงานจากแสงทำให้อิเล็กตรอน (Electron) ที่อยู่ในโมเลกุลของสีย้อม มีระดับพลังงานที่สูงขึ้นไปอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น เมื่อระดับพลังงานที่ถูกกระตุ้นนี้มีค่าสูงกว่าระดับพลังงานแถบการนำ (Conduction band,) ของสารดีบุกไดออกไซด์ อิเล็กตรอนจะถูกฉีด (Injection) เข้าไปในแถบการนำ ของสารกึ่งตัวนำดีบุกไดออกไซด์แล้วเคลื่อนที่ผ่านออกไปยังโหลด (Load) ซึ่งอยู่ภายนอกเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะไหลมายังขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ และถูกส่งต่อไปยังสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนขั้วไฟฟ้าด้านหลัง สุดท้ายอิเล็กตรอนจะถูกส่งคืนไปให้โมเลกุลของสีย้อมซึ่งเสียอิเล็กตรอนไปในตอนแรกโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กระบวนการทำงานนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องตราบใดที่ยังมีแสงตกลงมายังเซลล์แสงอาทิตย์

8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังเพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมีความสำคัญพอๆกับการพัฒนาขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยปกติแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่บนขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเป็นโลหะแพลทินัม แต่เนื่องจากโลหะแพลทินัมมีราคาแพงจึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีต้นทุนการผลิตที่สูง ดังนั้นการหาวัสดุชนิดอื่นซึ่งมีราคาถูกกว่ามาแทนโลหะแพลทินัมจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาถูกลงไปอีกได้ ได้มีกลุ่มนักวิจัยหลายๆ กลุ่มพยายามใช้คาร์บอนซึ่งเป็นธาตุที่มีอยู่มากในโลกและ

หาได้ง่ายมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยคาร์บอนที่มีทั้งอยู่ในรูปของท่อที่มีขนาดระดับนาโนเมตร อยู่ในรูปของอนุภาคนาโนเมตร และอยู่ในรูปของแผ่นแกรฟีน (Graphene) เป็นต้น

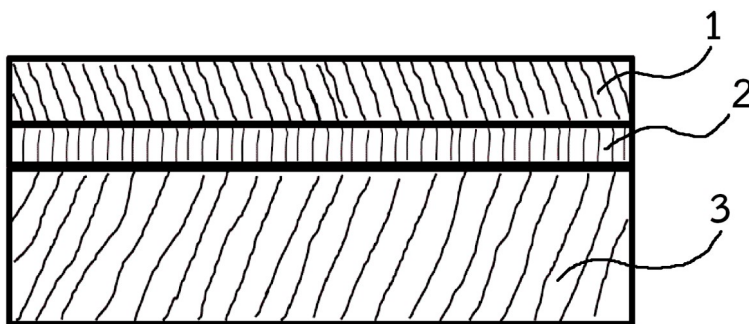
วอน เจ ลี (Won Jae Lee) และคณะ (Won Jae Lee et al. “Efficient Dye-Sensitized Solar Cells with Catalytic Multiwall Carbon Nanotube Counter Electrodes” . *Applied Materials&Interfaces*. 2009: 1(6); 1145-1149) ได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนำผงท่อคาร์บอนนาโนผนังหลายชั้นผสมเข้าด้วยกันกับตัวประสาน จากนั้นนำไปเตรียมเป็นฟิล์มเคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง ด้วยวิธีสกรีนพริ้นท์ติ้ง (Screen printing) แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อไล่ตัวตัวประสาน ชิ้นงานที่เตรียมได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จากการวัดประสิทธิภาพพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนผนังหลายชั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 7.67 เปอร์เซ็นต์ ใกล้เคียงกับที่ใช้แพลทินัมซึ่งให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 7.83 เปอร์เซ็นต์

ดิงเวน ซาง (Dingwen Zhang) และคณะ (Dingwen Zhang et al. ” Performance of dye-sensitized solar cells with various carbon nanotube counter electrodes” *Microchimica Acta*. 2011; 174: 73-79) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้คาร์บอนโครงสร้างต่างๆ ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว ท่อนาโนคาร์บอนผนังสองชั้นและท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากการวัดประสิทธิภาพพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผนังสองชั้นให้ประสิทธิภาพสูงถึง 8.03 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวและท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 7.61 และ 7.06 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เปรียบเทียบกับแพลทินัมที่ให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 8.49 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลของการวิจัยในเบื้องต้นพบว่าท่อคาร์บอนนาโนแบบผนังหลายชั้นสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้ ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงพอสมควรและใกล้เคียงกับโลหะแพลทินัม แต่การที่จะทำให้ท่อนาโนคาร์บอนสามารถยึดติดกับวัสดุฐานรองได้ดีนั้นจำเป็นจะต้องใช้ตัวประสาน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ตัวประสานประเภทพอลิเมอร์นำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์นำไฟฟ้ายังมีราคาค่อนข้างแพงและไม่เสถียรทำให้เป็นจุดด้อยในการนำมาใช้ระหว่างท่อคาร์บอนนาโนกับวัสดุรองรับ ดังนั้นในสิ่งประดิษฐ์นี้จึงได้ใช้ซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาถูกหาได้ง่าย มีความเสถียรสูงและสามารถเตรียมฟิล์มแบบมีรูพรุนได้ มาใช้เป็นตัวประสานช่วยยึดท่อคาร์บอนนาโนให้เกาะติดกับวัสดุฐานรองได้ดียิ่งขึ้น

8.4 องค์ประกอบของขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตามรูปที่ 8.1 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นๆ เรียงเชื่อมต่อกันจำนวน 3 ชั้น ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 8.1 แสดงแบบโครงสร้างของขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ชั้นฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำจากท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์ 1 เป็นชั้นบนสุดของส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์ 1 เคลือบอยู่บนชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง 2 และทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์ 1 ประกอบด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ จากช่วง 0% - 100% โดยน้ำหนัก ซึ่งที่อัตราส่วนของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นผสมกับซีเมนต์เท่ากับ 29% จะให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุด ซึ่งความหนาของชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์ 1 จะหนาประมาณ 45 ไมโครเมตร

ชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง 2 เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์ 1 และชั้นกระจกโปร่งแสง 3 ของส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง 2 ทำหน้าที่นำประจุพาหะอิเล็กตรอนจากโพลีเมอร์ไปให้ชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์ 1 โดยชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง 2 เป็นฟิล์มที่เลือกได้จากสารหลายชนิด เช่น สารฟลูออรีนเจือในสารทินไดออกไซด์ (Fluorine-doped tin oxide; FTO), สารอินเดียมเจือในสารทินไดออกไซด์ (Indium-doped tin oxide; ITO), สารอะลูมิเนียมเจือในสารสังกะสีออกไซด์ (Aluminum-doped Zinc Oxide; AZO), สารแกลเลียมเจือในสารสังกะสีออกไซด์ (Gallium-doped Zinc Oxide; GZO), สารเจอร์เมเนียมเจือในสารอินเดียมออกไซด์ (Germanium-doped indium oxide; GIO) อย่างใดอย่างหนึ่ง

ชั้นกระจกโปร่งแสง 3 เป็นชั้นอยู่ด้านล่างสุดของส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยชั้นกระจกโปร่งแสง 3 จะทำหน้าที่เป็นวัสดุฐานรองรับ

8.5 กรรมวิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนผสมซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มท่อนาโนคาร์บอนผสมกับซีเมนต์ 1 เคลือบบนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง ถูกเตรียมด้วยวิธีการเคลือบแบบปาด (ปาดโดยใช้แท่งแก้ว) โดยมีรายละเอียดการเตรียมดังนี้

นำท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นมาผสมกับผงปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 0% 17% 29% 38% 44% 50% และ 100% โดยน้ำหนัก ในแต่ละเงื่อนไขส่วนผสมทั้งสองจะถูกนำไปปาดในครกสำหรับบดสารจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนลงไปในครกบด 4 มิลลิลิตร

แล้วบดอีกครั้งจนส่วนผสมระหว่างท่อคาร์บอนนาโนแบบผนังหลายชั้นและผงปูนซีเมนต์เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันนี้ไปเคลือบลงบนชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งแสง 2 ที่เคลือบอยู่บนกระจกโปร่งแสง 3 โดยใช้วิธีการเคลือบแบบปาด จากนั้นทิ้งไว้ให้ฟิล์มแข็งตัวโดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นรอการนำไปประกอบเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงต่อไป

8.6 กรรมวิธีในการเตรียมขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (ขั้วไฟฟ้าเวคกิง) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ฟิล์มแบบมีรูพรุนของสารติเตเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จะถูกเคลือบอยู่บนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงด้วยวิธีการเคลือบแบบพิมพ์สกรีน (Screen printing method) สารติเตเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กประมาณ 20 นาโนเมตร จะถูกเคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงให้หนาประมาณ 15 ไมโครเมตร จากนั้นสารติเตเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 400 นาโนเมตร จะเคลือบทับลงไปอีกชั้นหนึ่งซึ่งชั้นนี้มีความหนาประมาณ 2.5 ไมโครเมตร และเพื่อให้อนุภาคติเตเนียมไดออกไซด์สามารถเกาะกันได้แน่นขึ้น ฟิล์มติเตเนียมไดออกไซด์จะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากการเผาจะปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เมื่อเตรียมฟิล์มแบบมีรูพรุนของสารติเตเนียมไดออกไซด์เสร็จแล้ว ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์จะถูกนำไปฉายด้วยอัลตราไวโอเล็ต(Ultraviolet, UV) ความเข้มสูงเป็นเวลานาน 10 นาที หลังจากนั้น จะนำไปย้อมสีด้วยสีย้อมไวแสง โดยสีย้อมไวแสงที่ใช้ในสิ่งประดิษฐ์นี้เป็นชนิด N719 ($[\text{RuL}_2(\text{NCS})_2]$: 2 TBA (L= 2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic acid; TBA=tetra-n-butylammonium)) ซึ่งมีธาตุรูทีเนียม (Ru) เป็นองค์ประกอบสำคัญ และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (carboxyl group) เป็นหมู่ที่ใช้ในการยึดเกาะกับผลึกติเตเนียมไดออกไซด์ ซึ่งความเข้มข้นของสีย้อมไวแสงที่ใช้เท่ากับ 3×10^{-4} โมล โดยมีสารอะซิโตไนไตรล์(acetonitrile) ผสมกับสารเตท-บิวทานอล (tert-butanol) ในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 โดยปริมาตร เป็นตัวทำละลาย ซึ่งในการย้อมสีจะแช่ฟิล์มติเตเนียมไดออกไซด์ไว้นานประมาณ 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาในการย้อมสีแล้ว จะถูกนำมาล้างในสารละลายอะซิโตไนไตรล์เพื่อเอาโมเลกุลของสีย้อมไม่ติดออกไป

8.7 ขั้นตอนการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

นำขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมาประกบกัน โดยมีฟิล์มฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้กั้นทำหน้าที่สองอย่างคือ ป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้าและป้องกันการรั่วไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นเติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ลงไปภายในเซลล์ระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งสารอิเล็กโทรไลต์มีส่วนผสมดังนี้ สารลิเทียมไอโอไดด์(LiI) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์, สารไอโอดีน (I_2) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์, สารลิเทียมคาร์บอเนต(LiCO_3) ความเข้มข้น 0.0025 โมลาร์, สารเตทบิวทิลไพริดีน(4-tert-Butypridine, TBP) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และสาร 1-Methyl-3-propylimidazolium iodide (MPII) ความเข้มข้น 0.6 โมลาร์ สารทั้งหมดจะถูกผสมกันและละลายในตัวทำละลาย 10 มิลลิลิตร ของสารอะซิโตไนไตรล์ (acetonitrile)

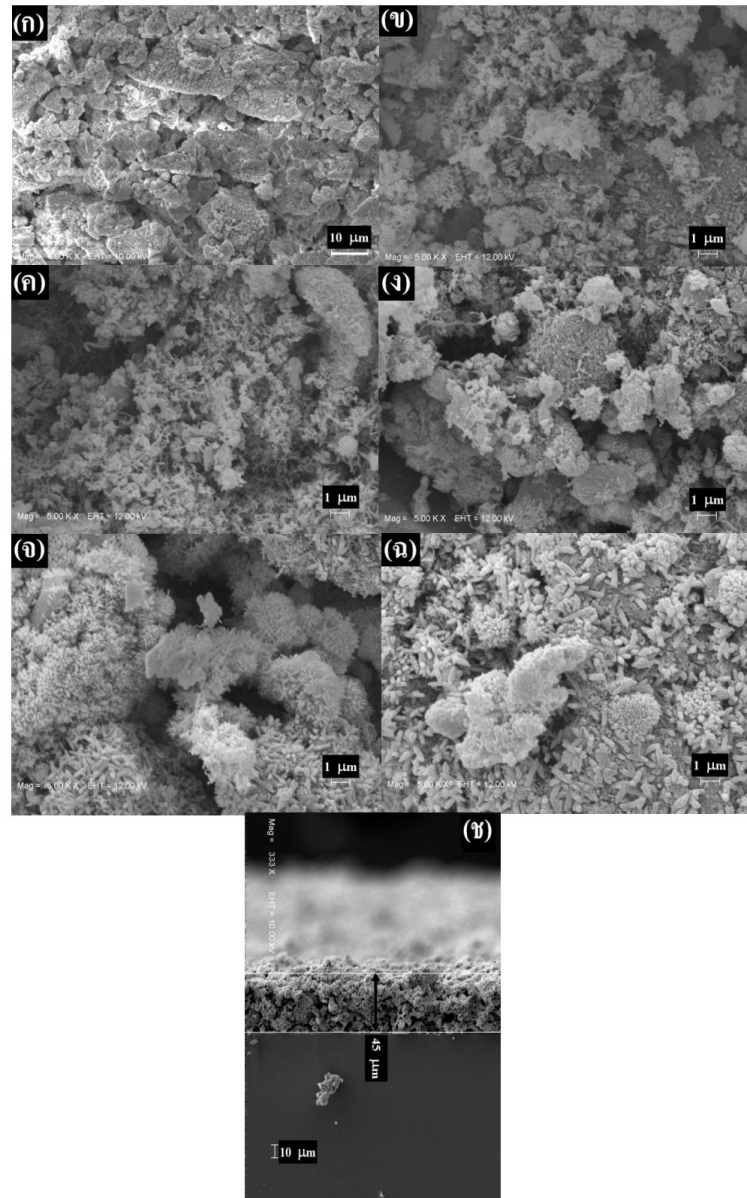
8.8 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อนำฟิล์มท่อคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์ 1 ที่เตรียมด้วยอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 0% 17% 29% 38% 44% 50% และ 100% โดยน้ำหนัก มาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 8.2 ซึ่งพบว่าทุกอัตราส่วนฟิล์มมีรูพรุนจำนวนมากแต่ไม่เป็นระเบียบ และยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เป็น 38% โดยน้ำหนัก จะเริ่มมีผลึกที่มีลักษณะเป็นแท่งเล็กๆ เกิดขึ้น และพบว่าแท่งผลึกเล็กๆ นี้จะมีขนาดโตขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เพิ่มเป็น 44% และ 50% ตามลำดับ การเกิดผลึกที่มีขนาดโตขึ้นนี้ถือเป็นข้อดีในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพราะเมื่อผลึกในฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวของฟิล์มลดลงและเมื่อพื้นที่ผิวลดลงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงไปด้วยซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ความหนาของฟิล์มท่อคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ในขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีขนาดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 8.2 (ข)

8.9 การศึกษาความต้านทานเชิงซ้อนภายในและการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ขั้วไฟฟ้าด้านหลังที่มีท่อคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

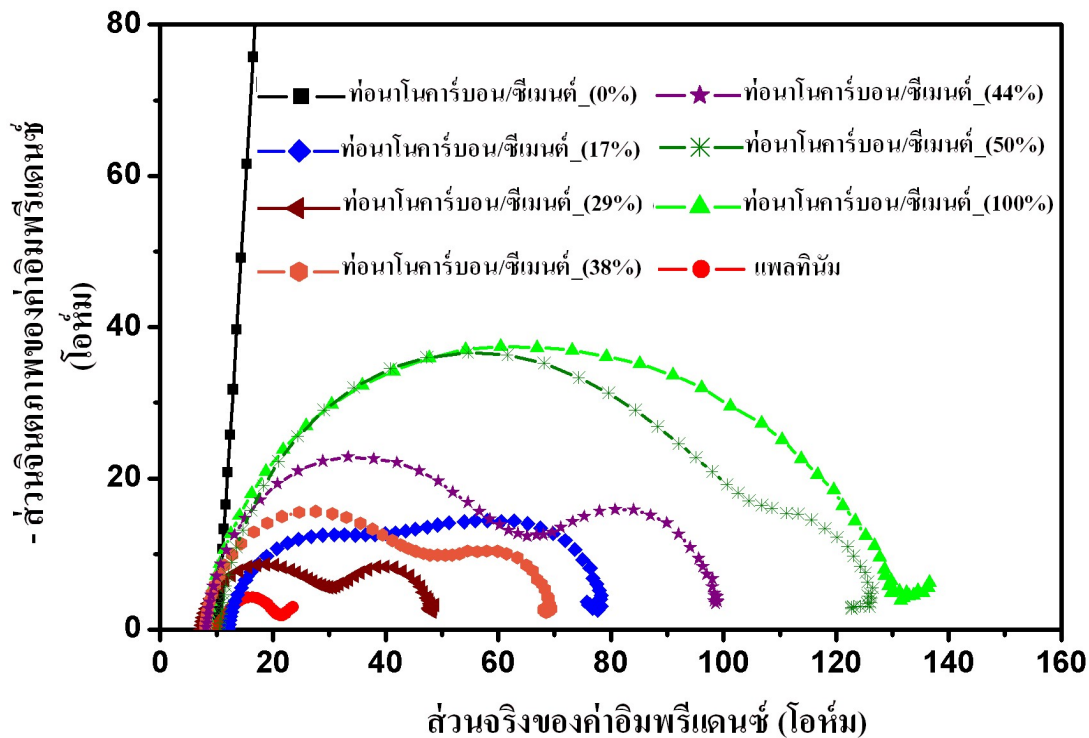
8.9.1 การศึกษาความต้านทานเชิงซ้อนภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ผลของการศึกษาความต้านทานเชิงซ้อนภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันด้วยเทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอล อิมพีแดนซ์ สเปกโตรสโกปี (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) (EIS, Gamry Instrument Reference 3000, U.S.A.) โดยใช้ความถี่ตั้งแต่ 0.1 ถึง 100,000 เฮิตซ์ และแอมพลิจูด (Amplitude) ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเท่ากับ 10 มิลลิโวลต์ แสดงในรูปที่ 8.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจินตภาพของค่าอิมพีแดนซ์ (ค่ารีแอคแตนซ์) และส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ (ความต้านทานไฟฟ้า) ตามลำดับ ค่ารีแอคแตนซ์และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความต้านทานเชิงซ้อนรวมภายในเซลล์ที่ประกอบด้วย ชาร์จทรานสเฟอร์รีซิสแตนซ์ (Charge transfer resistance; R_{ct}) ซึ่งเป็นความต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนและค่ากักเก็บ (Capacitance) อิเล็กตรอนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากรอยต่อของสองวัสดุที่ต่างชนิดกัน จากรูปพบว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนรวมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์ด้วยอัตราส่วน 29 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ อย่างไรก็ตามก็ยังมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงกว่ากรณีที่ใช้โลหะแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การที่อัตราส่วนผสมของท่อคาร์บอนนาโนสูงกว่า 29 เปอร์เซ็นต์ กลับทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์รวมที่สูงขึ้นนั้นอาจจะเป็นผลมาจากการเกิดผลึกที่มีขนาดโตขึ้นเมื่อท่อคาร์บอนนาโนเพิ่มขึ้นนั่นเองดังรูปที่ 8.2 (ง)-(ฉ)



รูปที่ 8.2 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในตัวอย่างที่เตรียมด้วยเงื่อนไขต่างๆ

- (ก) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เท่ากับ 0%
- (ข) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เท่ากับ 17%
- (ค) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เท่ากับ 29%
- (ง) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เท่ากับ 38%
- (จ) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เท่ากับ 44%
- (ฉ) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เท่ากับ 50%
- (ข) ภาพตัดขวางของตัวอย่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของท่อคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เท่ากับ 29%



รูปที่ 8.3 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างส่วนจินตภาพและส่วนจริงของค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

8.9.2 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกทดสอบภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานคือ ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จำลอง คลาสเอ (Solar simulator class A, Peccell, PEC-L11, Japan) ความเข้มแสงเฉลี่ย 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) ทดสอบภายใต้แสงมาตรฐานแอร์แมส 1.5 (A.M. 1.5) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) เป็นดังสมการด้านล่าง โดยค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้างดงามการ

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\max} V_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{J_{\text{sc}} V_{\text{oc}} FF}{P_{\text{in}}} \times 100$$

โดย $P_{\max}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร

P_{in} คือ ผลรวมของกำลังของแสงที่แผ่รังสีตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร

J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด มีหน่วยเป็น แอมแปร์ต่อตารางเมตร

V_{oc} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด มีหน่วยเป็น โวลต์

$J_{\max}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร

V_{max}	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น โวลต์
FF	คือ ฟิลล์แฟกเตอร์ มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1
η	คือ ค่าประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เปอร์เซนต์

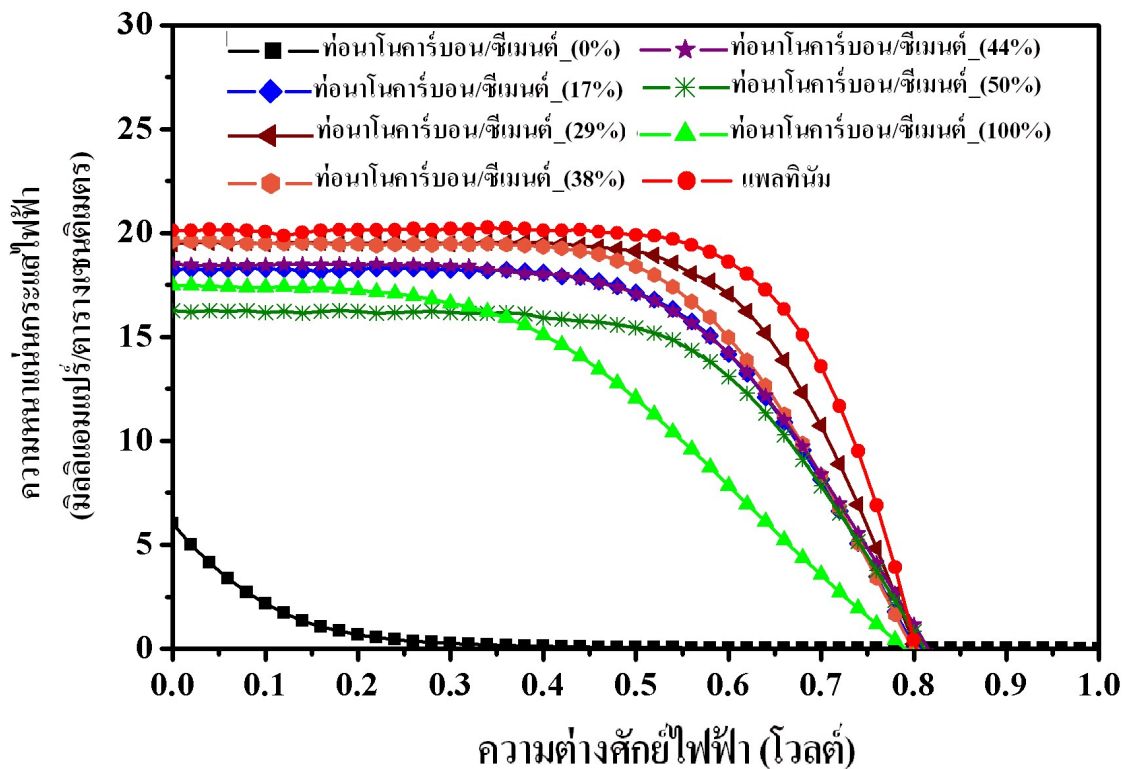
จากสมการด้านบนพบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงได้เมื่อค่าทั้งสามนี้มีค่าสูงไปด้วย

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ส่วนหัวไฟฟ้าด้านหลังที่มีชั้นฟิล์มทอคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์ (1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถูกวัดประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับที่ใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดสอบประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 8.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ฟิลล์แฟกเตอร์และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้คาร์บอน แพลทินัม และเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่ใช้คาร์บอนโครงสร้างต่างๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสรุปได้ดังตารางที่ 8.1 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของทอคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 0 เปอร์เซนต์ เป็น 17 เปอร์เซนต์และ 29 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์รวมที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 8.4 แต่เมื่ออัตราส่วนผสมของทอคาร์บอนนาโนต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 38, 44, 50 และ 100 เปอร์เซนต์ กลับพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ค่าฟิลล์แฟกเตอร์และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มลดลง ดังตารางที่ 8.1 ซึ่งการลดลงนี้น่าจะมาจากการเกิดผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นภายในฟิล์มทอคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์ 1 ทำให้ฟิล์มมีความต้านทานรวมสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูปที่ 8.4

8.10 การศึกษาความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีดอกซ์ชนิดไอโอด์-ไตรไอโอด์ของหัวไฟฟ้าด้านหลังที่มีทอคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 8.5 แสดงผลการศึกษาความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของฟิล์มทอคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์ 1 ด้วยเทคนิคโวลแทมเมทรีแบบรอบ (Cyclic Voltammetry, CV) พบว่าทุกตัวอย่างจะปรากฏคู่ของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เด่นชัดอยู่ด้วยกันสองพิก ซึ่งคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ 1 จะเป็นไปตามปฏิกิริยานี้ $I_3^- + 2e^- \leftrightarrow 3I^-$ ส่วนคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ 2 จะเป็นไปตามปฏิกิริยานี้ $3I_2 + 2e^- \leftrightarrow 2I_3^-$ ซึ่งการที่จะบอกว่าสารใดมีความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ดี จะต้องบอกด้วยสมบัติสองอย่างคือ สมบัติที่หนึ่งจะต้องมีค่าของกระแสไฟฟ้าที่มาก การมีค่ากระแสไฟฟ้าที่มากกว่าบอกถึงปฏิกิริยาสามารถเกิดได้มากกว่า

และอย่างที่สองคือจะต้องมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (k_s) ที่สูงด้วย ซึ่งค่า k_s จะแปรผกผันกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างพิกของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ ΔE_p ซึ่งค่า $\Delta E_p \propto \frac{1}{k_s}$ ตามลำดับ จากรูปที่ 8.5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อคาร์บอนนาโนผสมกับซีเมนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วน 29 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ และสูงกว่าตัวอย่างโลหะแพลทินัมมาก เป็นการบอกถึงความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้เป็นอย่างดีซึ่งเหมาะต่อการนำไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 8.2 พบว่าขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากโลหะแพลทินัม ก็มีค่า ΔE_{p1} และ ΔE_{p2} ของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ 1 และที่ 2 เท่ากับ 200 มิลลิโวลต์และ 130 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ ส่งผลทำให้มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาที่สูง สอดคล้องกับการมีประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงกว่านั่นเอง



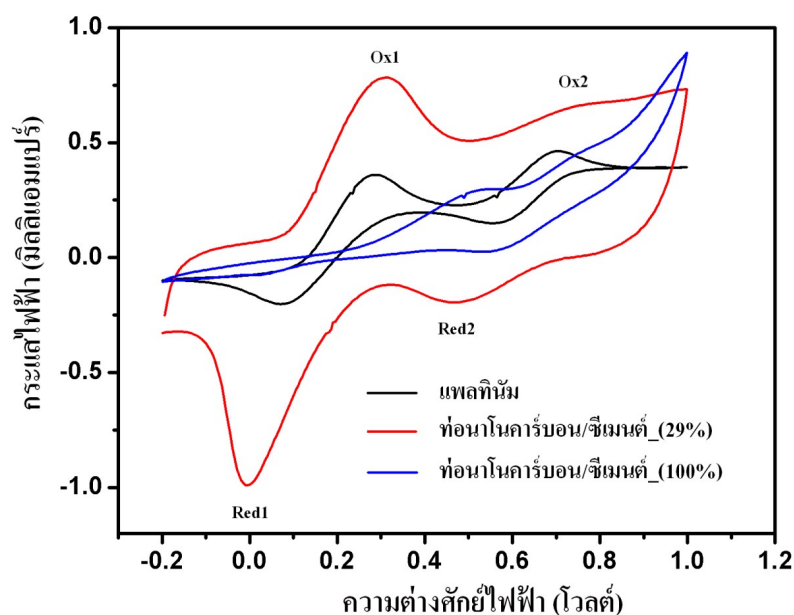
รูปที่ 8.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ตารางที่ 8.1 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (η) ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในชั้นไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (Volt)	FF	η (%)
แพลทินัม	20.83	0.790	0.675	11.22
ท่อนคาร์บอนนาโนผสมซีเมนต์ (0%)	6.09	1.000	0.04	0.22
ท่อนคาร์บอนนาโนผสมซีเมนต์ (17%)	17.85	0.790	0.560	7.88
ท่อนคาร์บอนนาโนผสมซีเมนต์ (29%)	18.66	0.800	0.640	9.60
ท่อนคาร์บอนนาโนผสมซีเมนต์ (38%)	17.72	0.800	0.610	9.21
ท่อนคาร์บอนนาโนผสมซีเมนต์ (44%)	17.86	0.810	0.590	8.62
ท่อนคาร์บอนนาโนผสมซีเมนต์ (50%)	15.58	0.820	0.580	7.47
ท่อนคาร์บอนนาโนผสมซีเมนต์ (100%)	16.98	0.790	0.370	4.99
เส้นใยคาร์บอนนาโน (<i>Prakash Joshi et al. ACS Applied Material and Interfaces. 2010; 2(12): 3572-3577</i>)	12.60	0.76	0.57	5.50
คาร์บอนแบล็ค (<i>Takuro N. et al. Journal of The Electrochemical Society. 2006; 153(12): A2255-A2261</i>)	16.80	0.79	0.69	9.10
แกรไฟต์ (<i>D.W. Zhang et al. Carbon. 2011; 49: 5382-5388</i>)	16.99	0.75	0.54	6.81
คาร์บอนแบล็คผสมกับแกรไฟต์ (<i>Gratzel M. and Kay A., Solar Energy Materials and Solar Cells. 1996; 44: 99-117</i>)	11.34	0.83	0.71	6.70
ท่อนคาร์บอนนาโนผนังชั้นเดียว (<i>Dingwen Zhang et al. Microchim Acta. 2011; 174: 73-79</i>)	14.94	0.80	0.64	7.61
ท่อนคาร์บอนนาโนผนังสองชั้น (<i>Dingwen Zhang et al. Microchim Acta. 2011; 174: 73-79</i>)	15.43	0.80	0.65	8.30
ท่อนคาร์บอนนาโนผนังหลายชั้น (<i>Dingwen Zhang et al. Microchim Acta. 2011; 174: 73-79</i>)	15.25	0.80	0.56	7.06
ท่อนคาร์บอนนาโนผนังหลายชั้น (<i>Won Jae Lee et al. Letter. 2009; 1(6); 1145-1149</i>)	16.20	0.74	0.64	7.67

หมายเหตุ;

- J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าวงจรปิด มีหน่วยเป็น มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (mA/cm²)
- V_{oc} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด มีหน่วยเป็น โวลต์ (Volt)
- FF คือ ฟิลล์แฟกเตอร์
- η คือ ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เปอร์เซนต์ (%)



รูปที่ 8.5 กราฟโวลแทมเมทรีแบบรอบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันโดยวัดเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดเงิน-เงินคลอไรด์ (Ag/AgCl)

ตารางที่ 8.2 แสดงตำแหน่งพีคของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์และเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างพีคของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ 1 และที่ 2 ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาใน ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	ตำแหน่งของพีคในปฏิกิริยา ของรีดอกซ์ (โวลต์)				ΔE_{p1} (มิลลิโวลต์)	ΔE_{p2} (มิลลิโวลต์)
	Red1	Red2	Ox1	Ox2		
แพลทินัม	+0.080	+0.570	+0.280	+0.700	200	130
ท่อคาร์บอนนาโนผสมกับ ซีเมนต์ (29%)	-0.010	+0.470	+0.310	+0.740	320	270
ท่อคาร์บอนนาโนผสมกับ ซีเมนต์ (100%)	+0.040	+0.570	+0.520	+0.750	480	180

หมายเหตุ : Red1 คือ ตำแหน่งของพีคที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันของรีดอกซ์คู่ที่ 1

Red2 คือ ตำแหน่งของพีคที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันของรีดอกซ์คู่ที่ 2

Ox1 คือ ตำแหน่งของพีคที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของรีดอกซ์คู่ที่ 1

Ox2 คือ ตำแหน่งของพีคที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของรีดอกซ์คู่ที่ 2

ΔE_{p1} คือ ความต่างระหว่างพีคของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ 1

ΔE_{p2} คือ ความต่างระหว่างพีคของคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ 2

บทที่ 9

การศึกษาลักษณะเฉพาะของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง

Characterisation of high calcium fly ash geopolymers

รองศาสตราจารย์ ดร. อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, Email: ubolluk@buu.ac.th

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

9.1 บทคัดย่อ

วัสดุจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะเถ้าลอย ภายใต้การเตรียมสภาวะเบสและบ่มที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคงทนต่อสภาวะกรดได้ดี ให้ค่ากำลังอัดที่สูงได้ในระยะเวลาอันสั้น และสามารถวัสดุประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ เถ้าลอยที่นำมาผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ในประเทศไทยจะได้จากกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งเถ้าถ่านหินดังกล่าวเป็นเถ้าชนิดเดียวกันที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ในสิ่งก่อสร้างต่างๆ ในประเทศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากถ่านหินลิกไนต์เป็นถ่านหินที่ให้ค่าความร้อนต่ำ และพบว่าเถ้าลอยที่ได้มีปริมาณแคลเซียมสูงและจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามความลึกของการขุดเหมืองถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งอาจมีปัญหาในส่วนผสมปูนซีเมนต์ได้ ดังนั้นบทความนี้ จึงเสนอการนำเถ้าลอยปริมาณแคลเซียมสูงผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ และศึกษาสมบัติของวัสดุดังกล่าว เพื่อเป็นแนวทางการนำเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมาใช้งานให้หลากหลายขึ้น และเป็นวัสดุทางเลือกใหม่สำหรับงานวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมวัสดุที่ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

คำหลัก : จีโอโพลิเมอร์, เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง, เถ้าลอยลิกไนต์

9.2 บทนำ

ในประเทศไทยมีการใช้งานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานก่อสร้างจำนวนมาก โดยปูนซีเมนต์ผลิตจากการเผาวัสดุที่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 – 1,600 °C และปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศจำนวนมาก โดยการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 1/2 ตัน หรือประมาณร้อยละ 5-8 ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในโลกที่ถูกปลดปล่อย และส่งผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) (Moholtra, 2002) ดังนั้นจึงมีการลดปัญหาดังกล่าว โดยมีการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสม วัสดุดังกล่าวมักจะเป็นเถ้าลอยที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินในโรงไฟฟ้า โดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ และผสมปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต และใช้เถ้าลอยอย่างเป็นประโยชน์

(ปริญาและชัย, 2548) ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต และใช้เถ้าลอยอย่างเป็นประโยชน์ อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด เนื่องจากซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) จากเถ้าลอย ต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไป เพื่อให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติยัดประสาน พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่ผสมในเถ้าลอยมากที่สุด คือ 50% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ (ปริญาและชัย, 2548) ดังนั้น ยังเหลือเถ้าลอยอีกปริมาณมากที่ต้องการการกำจัดและนำไปใช้งานอย่างเหมาะสม

วัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุทางเลือกที่มีสมบัติการยัดประสาน หรือสมบัติคล้ายสารซีเมนต์ที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน สามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าลอย ดินขาวเผา เป็นต้น โดยผสมกับสารละลายเบส และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ คือประมาณ 60-80 °C ทำให้ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีสมบัติในการยัดประสานโดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม (Davidovits, 1991; Davidovits, 1999) ในงานวิจัยของประเทศไทย นิยมใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นสารตั้งต้น และให้สมบัติทางกายภาพ เช่น ค่ากำลังอัดที่สูง ทัดเทียมกับคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ (Chindaprasirt et al., 2007) ซึ่งทำให้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุทางเลือกใหม่สำหรับงานวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมวัสดุ ที่สามารถลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และกำจัดของเสียจากโรงงานไฟฟ้าถ่านหินได้อีกด้วย

9.3 การเตรียมวัสดุจีโอโพลิเมอร์

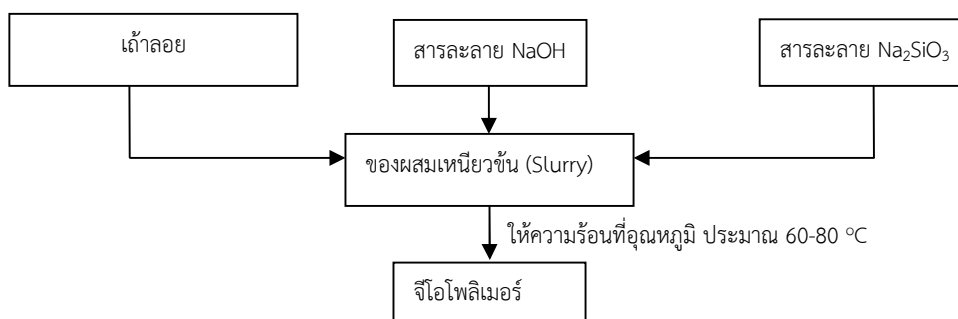
จีโอโพลิเมอร์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานประเภทสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในสารละลายเบส ที่นิยมใช้คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (อุบลศักดิ์, 2560; Davidovits, 1991; Davidovits, 1999) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำหน้าที่ชะซิลิกาและอะลูมินาออกจากสารตั้งต้น (ซึ่งในบทความนี้ สารตั้งต้นคือเถ้าลอย) ส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการก่อตัวเป็นเจลในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ และเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิประมาณ 60 – 80 °C เพื่อให้เกิดสายโซ่โพลิเมอร์ของอะลูมิโนซิลิเกตดังแสดงในสมการที่ 9.1 ทำให้ได้สารประกอบที่มีแข็งตัวและรับแรงได้



เมื่อ M คือ โลหะอัลคาไลน์, n คือ จำนวนหน่วยโมเลกุลที่ต่อการเป็นสายโซ่, z คือ ตัวเลข 1, 2 หรือ 3 และ w คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำ (Hua and Van Deventer, 2003) โดยแผนผังการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 9.1

การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่อุณหภูมิปกติที่ไม่สูงมากทำให้ได้โครงสร้างแบบอสัณฐานหรือแบบกึ่งผลึก การสังเคราะห์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงประมาณ 150-180 °C ทำให้ได้โครงสร้างแบบผลึก

(Comrie and Kriven, 2003) อัตราส่วนอะตอมของ Si : Al ในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มีผลต่อสมบัติและประเภทการใช้งาน โดยอัตราส่วนระดับต่ำ (1, 2, หรือ 3) ทำให้ได้โครงสร้างเป็น 3 มิติและได้วัสดุที่แข็งแรง เหมาะสมสำหรับงานซีเมนต์และคอนกรีต ซึ่งการใช้เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้น จะให้ค่าอัตราส่วนอะตอมในช่วงที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นวัสดุสำหรับงานซีเมนต์ (Chindaprasirt et al., 2009)



รูปที่ 9.1 การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์

9.4 เถ้าลอย

เถ้าลอย ได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าที่มีขนาดเบาจะลอยและถูกดักจับด้วยเครื่องดักจับแบบใช้กระแสไฟฟ้า (Electrostatic precipitator) เพื่อให้ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ ส่วนที่หกลมและมีน้ำหนักมากจะตกสู่กันเตา เรียกว่าเถ้ากันเตาหรือเถ้าหนัก (Chindaprasirt et al., 2007) โรงไฟฟ้าแม่เมาะจะเผาถ่านหินลิกไนต์ด้วยด้วยระบบการเผาที่ใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion, PCC) ที่ใช้ความร้อนปานกลาง อุณหภูมิระหว่าง 1100-1400 °C เถ้าถ่านหินที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเถ้าลอย ประมาณ 80% ที่เหลือเป็นเถ้าหนักหรือเถ้ากันเตา เถ้าลอยที่ได้มีสมบัติเป็นสารปอซโซลานที่เหมาะสมในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อผลิตคอนกรีต และสามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2548)

องค์ประกอบของเถ้าลอยแม่เมาะ แสดงในตารางที่ 9.1 พบว่าเป็นเถ้าลอย Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 คือมีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มีค่าระหว่าง 50 – 70% ปริมาณแคลเซียมที่เพิ่มสูงขึ้นในเถ้าลอย เกิดจากการใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และการขุดเหมืองถ่านหินที่ลึกลงไปมักจะทำให้พบแคลเซียมในถ่านหินปริมาณสูง

สัณฐานวิทยาของเถ้าลอยมีผลต่อการทำปฏิกิริยา โดยเถ้าลอยแม่เมาะจะมีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous phase) หรือแก้ว (Glassy phase) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสได้ โดยส่วนที่เป็นอสัณฐานจะอยู่บริเวณผิวเถ้าลอย ส่วนที่เป็นผลึกจะอยู่บริเวณแกนกลางเถ้าลอย (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2560) เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง เมื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตอาจมีผลกระทบต่อความคงทนที่เกี่ยวกับการขยายตัว เช่น การขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ Free Lime ปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม และการต้านทานซัลเฟต เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อนำเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมาผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ พบว่า ส่วนผสมสามารถก่อตัวได้เร็วหลังจากเถ้าลอย

ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยไม่ต้องการบ่มร้อน ในขณะที่การใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (Class F) ต้องการความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาและให้ส่วนผสมแข็งตัว

ตารางที่ 9.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะที่มีปริมาณแคลเซียมสูง

(Chindaprasirt and Rattanasak, 2017)

องค์ประกอบของออกไซด์	ปริมาณ (%)
SiO ₂	25.0
Al ₂ O ₃	13.2
CaO	30.0
Fe ₃ O ₄	15.0
SO ₃	7.1
MgO	2.1
K ₂ O	1.8
Na ₂ O	1.4
ออกไซด์อื่น	4.5

9.5 ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์และสัดส่วนผสม

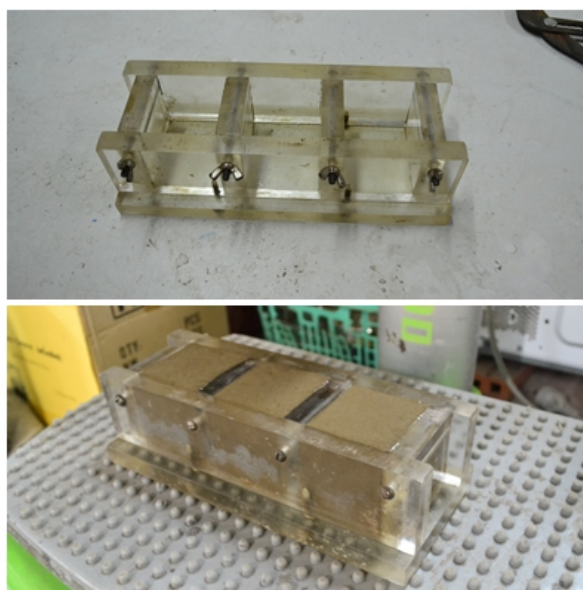
จีโอโพลิเมอร์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาแบบอสัณฐานและกึ่งผลึก สารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารซิลิกาและอะลูมินาที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา และสามารถถูกชะออกมากจากผิวอนุภาคด้วยสารละลายเบสได้ทั้งอุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิสูงได้ (60 – 80 °C) โดยปฏิกิริยาแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ (อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์, 2560)

ขั้นตอนที่ 1 การชะละลาย (Dissolution) : เถ้าลอยจะถูกชะด้วยสารละลายเบส คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ซิลิกาและอะลูมินาอสัณฐานบริเวณผิวอนุภาคชะออกมา อีออนซิลิกอน อะลูมิเนียมและสารละลายเบสเกิดการก่อตัวเป็นเจลเกิดขึ้นที่ผิวอนุภาคของเถ้า สำหรับเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงไม่ควรใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นสูง (มากกว่า 10 โมลาร์) เนื่องจากทำให้ส่วนผสมมีความสามารถในการทำงานต่ำ (Workability) และแข็งตัวเร็ว หรือค่าการก่อตัวเร็ว

ขั้นตอนที่ 2 การทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polymerization) : อีออนซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่ชะออกมาเกิดการรวมตัวกับอีออนออกซิเจนอยู่ในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างหน่วยโมเลกุลของ Si, O และ Al ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต [Si – O – Al – O] ดังกลไกที่เสนอโดย Hua and van Deventer, (1999)

สัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์สามารถบอกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักได้ เช่น แก้วล่อย 50-60% สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10-20% สารละลายโซเดียมซิลิเกต 20-25% โดยสารละลายเบสทำหน้าที่ชะอิมูนซิลิกอนและอะลูมิเนียมจากผิวแก้วล่อย ส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เพิ่มปริมาณซิลิกอนที่ละลายได้ (Dissolved silica) แก่ส่วนผสม และช่วยให้เกิดการก่อตัวของเจลในส่วนผสม

การผสมจีโอโพลิเมอร์นิยมผสมแก้วล่อยและสารละลายเบส (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายโซเดียมซิลิเกต) พร้อมกัน ในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์หรือคอนกรีต สามารถทำได้เหมือนกับกรณีของปูนซีเมนต์ แต่สำหรับแก้วล่อยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมักจะผสมทรายหรือหินเข้ากับแก้วล่อยให้เข้ากันก่อนเติมสารละลายเบสผสม เพื่อป้องกันการแข็งตัวที่รวดเร็วเมื่อสารประกอบแคลเซียมในแก้วล่อยสัมผัสกับสารละลายเบส นอกจากนี้ สามารถเติมน้ำลงในส่วนผสม เพื่อเพิ่มค่าการไหลหรือความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสม แบบหล่อที่ใช้สามารถเป็นได้ทั้งแบบหล่อโลหะหรืออะคริลิก ซึ่งแบบหล่ออะคริลิกจะเป็นที่นิยม เนื่องจากน้ำหนักเบาและทนความร้อนกรณีที่บ่มร้อนก่อนแกะแบบ ดังแสดงในรูปที่ 9.2



รูปที่ 9.2 แบบหล่ออะคริลิก

ในการบ่มจีโอโพลิเมอร์ จีโอโพลิเมอร์จากแก้วล่อยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงสามารถบ่มได้ที่อุณหภูมิห้องและในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C ความร้อนจะช่วยให้ปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เกิดได้ดี เกิดเป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตในวัสดุ ให้ค่ากำลังอัดในระยะเวลาดังนั้น ระยะเวลาดังนั้นในการบ่มขึ้นกับขนาดของแบบหล่อ โดยทั่วไปจะบ่มร้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Chindaprasirt et al., 2007) ส่วนการบ่มที่อุณหภูมิห้องทำให้จีโอโพลิเมอร์พัฒนากำลังที่ช้า เมื่อเทียบกับการบ่มร้อน (Somna et al., 2011) อย่างไรก็ตามค่ากำลังอัดจะใกล้เคียงหรือสูงกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่อายุการบ่มเดียวกัน ขึ้นกับสัดส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์

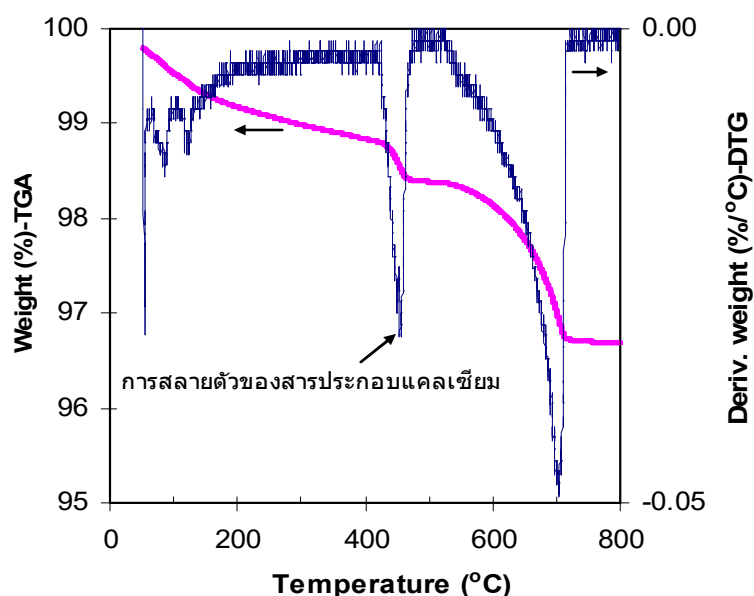
9.6 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง

9.6.1 สมบัติเชิงความร้อนของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง

เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) จะพบการสลายตัวของสารประกอบแคลเซียมในเถ้าลอยที่ตำแหน่ง 450 และ 700 °C ดังแสดงในรูปที่ 9.3 ซึ่งที่ตำแหน่ง 450 °C เป็นการสลายตัวของ Ca(OH)_2 ส่วนที่ตำแหน่ง 700 °C เป็นการสลายตัวของ CaCO_3 ได้ CaO และ CO_2 สารประกอบแคลเซียมปริมาณสูงในเถ้าลอยทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความคงทนทางความร้อนที่ลดลง เมื่อเทียบกับจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ

9.6.2 สันฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง

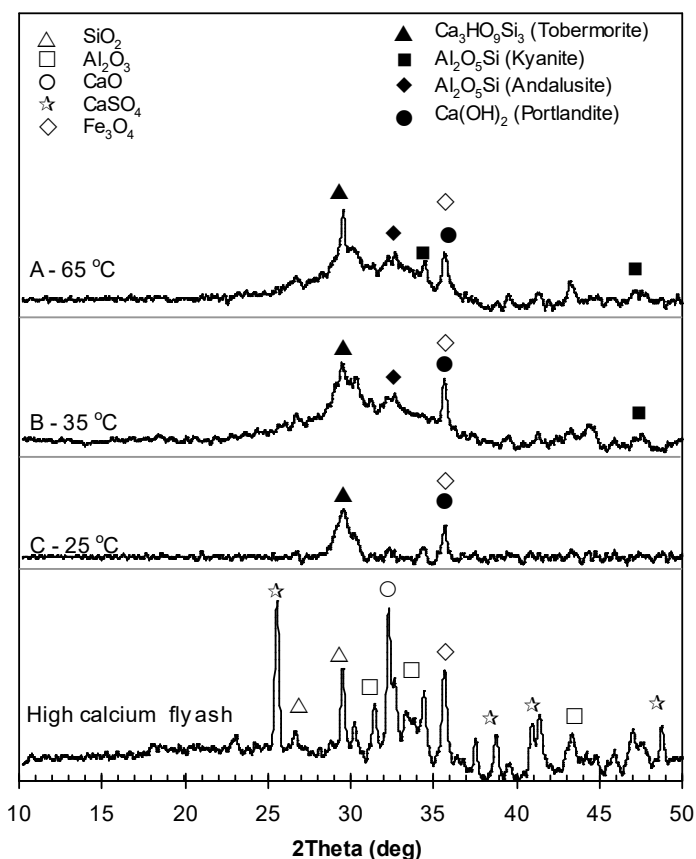
จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงสามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องการบ่มด้วยความร้อน เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบแคลเซียมในเถ้าลอยกับสารละลายเบสผสมคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ได้สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือพอร์ตแลนด์ (Portlandite) และสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ที่เกิดจากซิลิกาในเถ้าลอยทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสผสม ดังแสดงในรูปที่ 9.4 ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)



รูปที่ 9.3 กราฟ TGA ของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง

เมื่อบ่มจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงด้วยความร้อนที่ 65 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิทั่วไปที่ใช้ในการบ่มวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (Class F) พบว่าเกิดสารประกอบสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ($\text{Al}_2\text{O}_5\text{Si}$) ที่ 33 – 34° 2θ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในจีโอโพลิเมอร์ และพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($\text{Ca}_3\text{HO}_9\text{Si}_3$) ที่ประมาณ 29° 2θ และพบ

สารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เช่นเดียวกับการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 35 °C (จำลองบรรยากาศอากาศร้อนของประเทศไทย) พิกที่เด่นชัดของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่ 33 – 34° 2 θ ทำให้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงที่ผ่านการบ่มร้อนมีค่ากำลังอัดที่สูงและคงทนต่อสภาวะเป็นกรดได้ดีกว่าตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิ 35 °C มีน้อยกว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิ 65 °C และทนต่อสภาวะเป็นกรดน้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิ 65 °C เล็กน้อยเช่นกัน

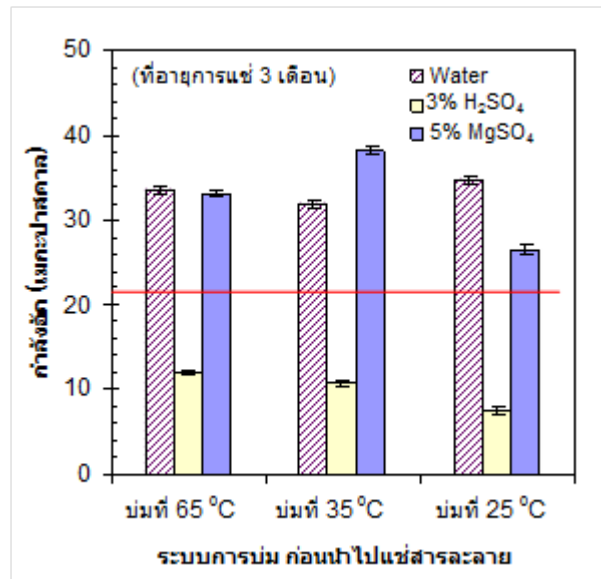


รูปที่ 9.4 XRD ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงบ่มที่อุณหภูมิต่างกัน (Chindaprasirt and Rattanasak, 2016)

9.6.3 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง

เมื่อทำการขึ้นรูปจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงเพื่อศึกษาความคงทนในสภาวะกรด คือสารละลาย 3% H_2SO_4 และสภาวะเกลือ คือสารละลาย 5% $MgSO_4$ เปรียบเทียบกับสภาวะการแช่น้ำ โดยวัดผลในรูปค่ากำลังอัดที่อายุการแช่ในสารละลายเป็นเวลา 3 เดือน จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงก่อนนำมาบ่มในสารละลาย จะผ่านการเตรียมที่มีการบ่ม 3 สภาวะ คือสภาวะที่ 1 บ่มที่อุณหภูมิห้อง 7 วัน หรือสภาวะที่ 2 บ่มที่อุณหภูมิ 35 °C 72 ชั่วโมง หรือสภาวะที่ 3 บ่มที่อุณหภูมิ 65 °C 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายต่างๆ เพื่อศึกษาความคงทน

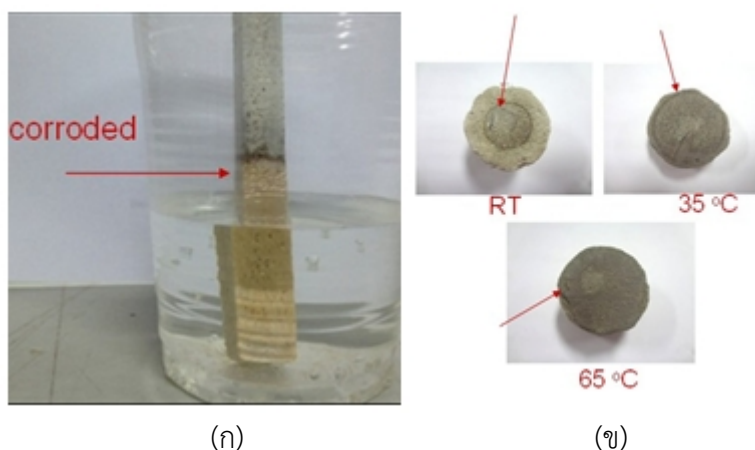
ได้ผลกำลังอัดดังแสดงในรูปที่ 9.5 เส้นขีดที่ตำแหน่ง 20.7 เมกะปาสคาลแสดงค่ากำลังอัดต่ำสุดที่ยอมรับได้สำหรับนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ไปใช้งานเป็นอิฐสำหรับปูพื้นทางเท้า ตามมาตรฐาน ASTM C902 (Standard Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving Brick)



รูปที่ 9.5 กำลังอัดจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงที่แช่ในสารละลายต่างๆ (Chindaprasirt and Rattanasak, 2016)

จากค่ากำลังอัดพบว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมีความคงทนต่อสภาวะเกลือ 5% MgSO₄ โดยเฉพาะระบบที่บ่มด้วยความร้อน คือ 65 °C และ 35 °C ในขณะที่การบ่มในน้ำทำให้จีโอโพลิเมอร์ที่บ่มอุณหภูมิห้องมีค่ากำลังอัดสูงสุด เนื่องจากสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีการพัฒนากำลังตามช่วงอายุบ่ม ในขณะที่การบ่มร้อนทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตน้อยกว่าองค์ประกอบบางส่วนในเถ้าลอยทำปฏิกิริยาได้เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและอะลูมิโนซิลิเกต

เมื่อพิจารณาการแช่ตัวอย่างในสภาวะกรด คือ 3% H₂SO₄ พบว่าการบ่มจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงที่อุณหภูมิห้องให้ค่ากำลังอัดประมาณ 8 เมกะปาสคาล ส่วนตัวอย่างที่บ่มร้อนให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าเล็กน้อยคือ 12 เมกะปาสคาล เนื่องจากสารประกอบแคลเซียมคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถถูกกรดชะออกมาได้ เมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่า จะเกิดการกัดกร่อนและถูกชะละลายภายในเวลา 1 สัปดาห์ ดังรูปที่ 9.6 (ก) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมีความคงทนต่อสภาวะกรดได้ดีกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์รูปที่ 9.6 (ข) แสดงตำแหน่งการซึมเข้าไปของกรด 3% H₂SO₄ ในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงเมื่อใช้เคลือบแท่งปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ การบ่มที่อุณหภูมิห้องทำให้กรดซึมเข้าไปในเนื้อจีโอโพลิเมอร์ได้มากกว่าการบ่มร้อน



รูปที่ 9.6 การซึมผ่านของกรด 3% H_2SO_4 :

(ก) แท่งปูนซีเมนต์มอร์ตาร์เริ่มกัดกร่อนด้วยกรด,

(ข) ระยะการซึมผ่านของกรดในจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มในสถานะต่างๆ (RT คืออุณหภูมิห้อง)

9.7 สรุป

จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง สามารถเตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นไม่สูงมาก (น้อยกว่า 10 โมลาร์) เพื่อป้องกันการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว หรือสามารถเติมน้ำในส่วนผสมเพื่อเพิ่มค่าการไหล นอกจากนี้ การบ่มวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูงสามารถบ่มที่อุณหภูมิห้องได้ ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบแคลเซียมในเถ้าลอยและสารละลายเบส ซึ่งสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดทำให้จีโอโพลิเมอร์มีการพัฒนากำลังอัดตามอายุการบ่ม เช่นเดียวกับกรณีของปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม หากต้องการให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมีความคงทนในสถานะกรด ควรบ่มด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ที่เกิดขึ้นร่วมกับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังนั้น วัสดุจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นวัสดุทางเลือกในการใช้ประโยชน์ของเสียจากทางอุตสาหกรรม และสามารถพัฒนาไปใช้ในเชิงสาธารณะและเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

9.8 บรรณานุกรม

ปริญญญา จินดาประเสริฐ. (2548). เถ้าลอยในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย.

ปริญญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2548). ปูนซีเมนต์ ปอชโซลาน และคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย.

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (2560). วัสดุจีโอโพลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1, สมาคมคอนกรีตไทย.

Chindaprasit P., Chareerat, T., and Sirivivananon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cem Concr Compos*, 29, 224-229.

- Comrie, D.C. and Kriven, W.M. (2003). Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application. **Ceram Trans**, **153**, 211-225.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Rattanasak, U. (2009). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. **Waste Manage**, **29**, 539–543.
- Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. (2017). Characterization of high calcium fly ash geopolymer mortar with hot-weather curing systems for sustainable application. **Submitted for publication**.
- Chindaprasirt, P. and Rattanasak, U. (2016). Improvement of durability of cement pipe with high calcium fly ash geopolymer covering. **Constr Build Mater**, **112**, 956-961.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivananon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cem Concr Compos**, **29**, 224-229.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymer: Inorganic polymeric new materials. **J Therm Anal**, **37**, 1633-59.
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology. **Proceedings: 2nd International conference on geopolymers'99**, 9-39.
- Hua, X. and Van Deventer, J.S.J (1999). The geopolymerisation of natural aluminosilicates. **Proceedings: 2nd International conference on geopolymers'99**, 43-63.
- Moholtra, V.M. (2002). Introduction: Sustainable development and concrete technology. **ACI Concr Int**, **24**, 7-22.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Fuel**, **90**, 2118-2124.

บทที่ 10

การหาสัดส่วนที่เหมาะสมและสมบัติคอนกรีตมวลเบาด้วยวิธีการออกแบบของทาгуชิ

Optimizing mix proportion and Properties of Lightweight Concrete

Using Taguchi's Approach

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรนภา เกษมศิริ, Email: pornkas@kku.ac.th

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

123 ถนนมิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. ขอนแก่น 40002

10.1 บทคัดย่อ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาและนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ อาทิเช่น มีความแข็งแรงทนต่อแรงอัดได้ดี มีน้ำหนักเบา ลอยน้ำได้ มีคุณสมบัติในการดูดซับเสียงได้ดี และมีค่าการนำความร้อนต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของคอนกรีตมวลเบา จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบา เช่น อัตราส่วนน้ำ/ซีเมนต์ ปริมาณน้ำ มวลรวมเบา และทราย/ซีเมนต์ วิธีการออกแบบการทดลองของทาгуชิเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนิยมนในการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตมวลเบา ผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองสามารถบอกได้ถึงสัดส่วนที่เหมาะสม สมการทำนายความสัมพันธ์ส่วนผสมและสมบัติรวมถึงอิทธิพลของส่วนผสมที่แสดงต่อสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ได้

10.2 บทนำ

ในปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่มีความจำเป็นสำหรับงานก่อสร้างส่วนใหญ่ โดยทั่วไปคอนกรีตจะมีน้ำหนักประมาณ 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Nadim, 2002) ส่งผลให้โครงสร้างมีขนาดใหญ่ เนื่องจากต้องออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Life Load) เพื่อที่จะได้โครงสร้างที่มีความปลอดภัย ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยคอนกรีตมวลเบาจะมีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่า 1840 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Lamond and Pielert, 2006) การใช้คอนกรีตมวลเบาสามารถลดน้ำหนักบรรทุกคงที่ของโครงสร้างได้ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง รวมไปถึงการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม ลดปริมาณการใช้เหล็กเสริม ลดค่าแรงและไม้แบบ นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบายังมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ อาทิเช่น มีความสามารถในการรับกำลังอัดในเกณฑ์การใช้งานได้ มีน้ำหนักเบา ลอยน้ำได้ มีคุณสมบัติในการดูดซับเสียงได้ดี และมีค่าการเหนียวนำความร้อนต่ำ อีกทั้งยังลด

ความเสี่ยงทางโครงสร้างต่อการเกิดแผ่นดินไหว (Ergul, 2003; Semiha and Akcaozoglu, 2010) แต่อย่างไรก็ตามในทางวิศวกรรม คอนกรีตมวลเบายังมีข้อจำกัดในการใช้งานสำหรับโครงสร้างหรืออุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เพราะคอนกรีตมวลเบาที่กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนเดียวกัน (Jianming and Morinob, 1997) ในปัจจุบันการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาให้มีความสามารถในการรับแรงอัดเทียบเคียงกับคอนกรีตทั่วไปโดยมีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงเป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาการใช้มวลรวมเบาจากวัสดุที่เป็นของเสีย เช่น รีไซเคิลพอลิเมอร์และคอนกรีต มาประยุกต์ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา สามารถปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตให้มีความเหนียว หน่วงน้ำหนักมีค่าต่ำ ช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ อีกทั้งยังด้านการขีดข่วน (Ibrahim et al., 1997; Ohama, 1978; Chen et al., 1995; Cabrera and AlHasan, 1997; Fowler, 1999; Wang et al., 2005; Zhang et al., 2012) การใช้วัสดุที่เป็นของเสียเป็นส่วนผสมในคอนกรีตจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดต้นทุนการผลิตและพัฒนาสมบัติของคอนกรีตมวลเบา โดยทั่วไปสมบัติโดยรวมของคอนกรีตจะขึ้นกับสัดส่วนของมวลรวมที่เหมาะสม การเติมวัสดุเหล่านี้ลงในคอนกรีตมักส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดที่ลดลง เนื่องจากมวลรวมเบาจากรีไซเคิลพอลิเมอร์และคอนกรีตมีความแข็งแรงต่ำและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้เกิด Interface ในซีเมนต์เมตริกซ์ ดังนั้นการออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้สมบัติของคอนกรีตที่เหมาะสมกับการใช้งานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปในงานด้านคอนกรีตวิธีการออกแบบการทดลองที่ได้รับความนิยมคือวิธีของทาคุชิ (Taguchi method) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบที่สามารถกำหนดได้หลายตัวแปรและหลายระดับ (Khalaj et al., 2015; Nazari et al., 2012) นิยมกันใช้อย่างแพร่หลายเพื่อที่จะหาสัดส่วนที่เหมาะสมของมวลรวมต่อสมบัติของคอนกรีต การออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีทาคุชิจะช่วยลดจำนวนการทดลอง ทำให้ประหยัดเวลา ประหยัดวัสดุที่นำมาใช้ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ (Xu et al., 2012)

10.3 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete : LWC) คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป คือ หน่วยน้ำหนักเมื่อแข็งตัวแล้วน้อยกว่า 1840 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งโดยทั่วไปคอนกรีตเบามีหน่วยน้ำหนักประมาณ 240-1840 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 0.7-17 เมกะปาสคาล และมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.065-0.43 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Mindess et al., 2002) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่มีน้ำหนักประมาณ 2100-2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 14.7-98.0 เมกะปาสคาล และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 1.6-1.9 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (Newman and Choo, 2003) สามารถจัดกลุ่มของคอนกรีตมวลเบาตามการใช้งาน ดังตารางที่ 10.1

คอนกรีตมวลเบายังมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ อาทิเช่น อัตราส่วนของกำลังรับแรงอัดต่อ น้ำหนักสูง ลดน้ำหนักของอาคาร ลดความเสี่ยงทางโครงสร้างต่อการเกิดแผ่นดินไหว ความสามารถในการ

ทนต่อแรงดึงได้ดี มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ และเป็นฉนวนกันเสียงได้ดี (Ergul et al., 2003; Düzgün et al., 2005; Tanyildizi, 2008; Alshihri et al., 2009; Sengul et al., 2011) ซึ่งในคอนกรีตมวลเบานั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสียสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 10.2

ตารางที่ 10.1 การจัดกลุ่มของคอนกรีตมวลเบาตามการใช้งาน (Mindess et al., 2002)

ประเภท	กำลังรับแรงอัด รูปทรงลูกบาศก์ ที่อายุ 28 วัน (เมกะปาสคาล)	หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร)	ค่าการเหนียวนำ ความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structure lightweight Concrete) ASTM C330 (2009)	>17	1440–1840	ไม่ได้ระบุใน ASTM C330
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อ (Masonry Concrete) ASTM C331 (2013)	3.4–17	800–1440	0.22–0.43
คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานฉนวนกัน ความร้อน (Insulating Concrete) ASTM C332 (2013)	0.7–3.4	240–800	0.065–0.22

ตารางที่ 10.2 ข้อดีและข้อเสียของคอนกรีตมวลเบา (Mohd, 1997)

ข้อดี	ข้อเสีย
- น้ำหนักเบา - ความหนาแน่นต่ำ - มีความเป็นฉนวนได้ดี - เป็นตัวต้านทาน - ลดความเสี่ยงทางโครงสร้างต่อการเกิดแผ่นดินไหว - ช่วยลดน้ำหนักอาคาร - ประหยัดในแง่ของการขนส่งเนื่องจากมีน้ำหนักเบา	- ค่อนข้างอ่อนไหวกับน้ำในสัดส่วนการผสม - ใช้เวลาในการผสมค่อนข้างนานเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการผสมทั่วถึงและสม่ำเสมอ - อาจเกิดการแยกตัวกันระหว่างซีเมนต์กับมวลรวมและเกิดการลอยไปยังพื้นผิว

คอนกรีตมวลเบาสามารถผลิตโดยใช้เทคนิคดังต่อไปนี้

1. คอนกรีตที่ไม่มีส่วนละเอียด (Non-fines Concrete) เป็นคอนกรีตที่ไม่ยอมให้มีอนุภาคขนาดเล็ก หรือส่วนผสมละเอียดอยู่ในส่วนผสมของคอนกรีตเลย เพื่อมิให้อนุภาคขนาดเล็กลงไปอุดตันช่องว่างที่

เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา คอนกรีตประเภทนี้จึงไม่ใส่ทรายลงในส่วนผสม โดยมีเพียงแต่มวลรวมหยาบ (หินหรือมวลรวมเบาอื่นๆ) ซึ่งปกติจะใช้มวลรวมหยาบขนาดเดียว และมีน้ำปูนเคลือบอยู่หนาไม่เกิน 1-3 มิลลิเมตร คอนกรีตประเภทนี้มีช่องว่างหรือโพรงอยู่มาก ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมีค่าประมาณ 640 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2. โฟมคอนกรีต (foam concretes) ซีเมนต์เฟลสหรือคอนกรีตชนิดหนึ่งประกอบด้วยการผสมอากาศขนาดเล็ก มีขนาดตั้งแต่ 0.1-1 มิลลิเมตร อยู่ล้อมรอบกระจายอยู่ทั่วไป ฟองอากาศเหล่านี้เรียกว่าเซลล์อากาศ (Air cell) ผสมลงในคอนกรีตเพื่อให้มีน้ำหนักเบา ซึ่งฟองอากาศ (Micro air bubble) อาจอยู่ในรูปแบบของก๊าซที่เกิดขึ้นภายในมอร์ตาร์ หรือทำให้เกิดฟอง (Foam) จากการผสมสารเพิ่มฟองซึ่งเครื่องกำเนิดโฟม (Foam generator) ก่อนนำไปผสมกับคอนกรีต

3. คอนกรีตผสมด้วยมวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งมวลรวมนี้จะมีความหนาแน่นต่ำ ภายในจะประกอบด้วยรูพรุนที่มีอากาศอยู่ โดยมวลรวมเบาจำแนกออกเป็นมวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ เช่น pumice, diatomite, volcanic cinders และมวลรวมเบาที่ได้จากขบวนการสังเคราะห์ เช่น perlite, clay, sintered fly ash และ expanded shale ซึ่งจะมีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 600-1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เทียบกับมวลรวมปกติซึ่งมีน้ำหนัก 1100-1700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากงานวิจัยที่ผ่านมามวลรวมเบาที่ได้จากของเสียได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ซึ่งเมื่อนำมวลรวมเบาเหล่านี้มาใช้จะสามารถลดต้นทุนกระบวนการผลิต รวมถึงยังเป็นการลดการใช้มวลรวมที่ได้จากธรรมชาติอีกด้วย อาทิเช่น เถ้าลอย (fly ash) (Huang et al., 2007) ตะกรันเตาจากหลอม (Clark, 1993) เถ้าที่ตกค้างจากเหมืองแร่ และขยะพลาสติก (Düzgün et al., 2005) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา

10.4 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะสามารถช่วยลดจำนวนการทดลองลง เนื่องจากวิธีการโดยทั่วไปมักเป็นแบบการลองผิดลองถูก (Trial and Error) หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่าทีละตัวเรื่อยๆ (One Factor One Time) โดยวิธีการแบบลองผิดลองถูกนี้ทำให้กระบวนการจะเข้าสู่จุดหมายที่ต้องการได้ช้า อีกทั้งเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์และเก็บข้อมูลสูงมาก การออกแบบการทดลองจึงถือว่าเป็นส่วนสำคัญในการวางแผนการศึกษา ซึ่งการออกแบบการทดลองมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (factorial design) การออกแบบรูปผสมจุดศูนย์กลาง (central composite design, CCD) (Tongaroonsri and Kunajamjarus, 2012) การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design) (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2008) และวิธีทาгуชิ (Taguchi Method) (Peace, 1993) โดยการออกแบบพื้นผิวตอบสนองเป็นการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของระบบหรือกระบวนการผลิต โดยปกติจะหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิตซึ่งทำให้ค่าเฉลี่ย (Mean) ของผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งสถานะที่หาได้นั้นจะเหมาะกับกรณีที่มีความแปรปรวน (Variance)

ของผลตอบสนองมีค่าน้อยและคงที่ หากไม่คงที่ที่จะต้องใช้วิธีอื่นในการแก้ปัญหา ในขณะที่การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางทฤษฎีเป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผล และมีระดับการทดลอง มีลักษณะเป็นแบบการทดลองออร์ทogonal (Orthogonal Array) โดยเหมาะในการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main effects) โดยเป็นการทดลองที่มีตารางสำเร็จรูปให้เลือกใช้ สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกแบบแผนการทดลอง คือ L_A^B โดยที่ A คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อแผน (ไม่รวมการทำซ้ำ) B คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา และ C คือ จำนวนปัจจัยสูงสุดที่ได้มีการทดลอง (จำนวนปัจจัยหลัก + จำนวนปัจจัยร่วม) (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2008) รูปแบบแผนการทดลองของทางทฤษฎีนิยมใช้แสดงไว้ในตารางที่ 10.3 ดังนั้นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตมวลเบา จึงเป็นการออกแบบด้วยวิธีทางทฤษฎี โดยจะหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของส่วนผสมหรือปัจจัยที่มีผล โดยจะบอกถึงอิทธิพลของปัจจัยแต่ละระดับ

นอกจากนี้สามารถวิเคราะห์ผลด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVAs) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง (Response) หรือลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristics) นำมาวิเคราะห์ร่วมกับการออกแบบด้วยวิธีทางทฤษฎี เพื่อบอกถึงปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติที่สนใจมากที่สุด (% Contribution) ดังแสดงการคำนวณในตารางที่ 10.4

ตารางที่ 10.3 แบบแผนการทดลองของทางทฤษฎีที่นิยมใช้ (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2008)

รูปแบบ	จำนวนระดับ	จำนวนปัจจัยสำหรับ full factorial	จำนวนปัจจัยหลัก resolution V	จำนวนปัจจัย ในการคัดกรอง
L_4	2	2	2	3
L_8	2	3	3	7
L_9	3	2	-	4
L_{12}	2	-	-	11
L_{16}	2	4	5	15
L_{18}	Mixed	-	-	8
L_{27}	3	3	-	13

10.5 การหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาด้วยวิธีของทางทฤษฎี

จากวิธีของทางทฤษฎีสามารถใช้ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตที่เหมาะสมต่อสมบัติโดยรวมได้ดังนี้

10.5.1 หน่วยน้ำหนักและค่ากำลังรับแรงอัด

จากงานวิจัยของ Dulsang et al. (2014) ศึกษาการเติมของเสียพอลิไวนิลอะซิเตต (EVA) เป็นส่วนผสมในคอนกรีตมวลเบาโดยใช้การออกการทดลองของวิธีทางทฤษฎี โดยมีสัดส่วนการผสมดังแสดงในตารางที่ 10.5 และ 10.6 จากการทดลองหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมด้วยของเสีย EVA ที่

อายุ 7 และ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 10.7 จะเห็นได้ว่าเมื่ออายุ 28 วันของส่วนผสมที่ 7 มีหน่วยน้ำหนักน้อยที่สุด คือ 1171.58 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถลดค่าบรรทุกคงที่ (Dead load) ได้ถึง 51 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่หน่วยน้ำหนัก 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าเฉลี่ยของหน่วยน้ำหนักของแต่ละปัจจัยทั้ง 3 ระดับสรุปดังแสดงในตารางที่ 10.8 และแสดงในรูปที่ 10.1 สัดส่วนของหน่วยน้ำหนักที่ต่ำที่สุดทำให้คอนกรีตมวลเบา มีน้ำหนักเบา ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) คือ 0.55 น้ำ คือ 65 กรัม ของเสีย EVA 0.075 และ อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ (S/C) คือ 0.2

ตารางที่ 10.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมกับข้อมูลจากการออกแบบการทดลองวิธีทางสถิติ

ระดับ (Level)	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2	ปัจจัยที่ 3	ปัจจัยที่ 4
1	X_i	X_i	X_i	X_i
2	X_i	X_i	X_i	X_i
3	X_i	X_i	X_i	X_i
Mean	Mean 1	Mean 2	Mean 3	Mean 4
ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด ($\bar{x}$)	$\bar{x} = \sum \frac{X_i}{N_{x_i}}$			
Between – groups sum of squares (SS_B)	SS_{B1}	SS_{B2}	SS_{B3}	SS_{B4}
Within – group sum of squares (SS_W)	SS_{W1}	SS_{W2}	SS_{W3}	SS_{W4}
Varian	V1	V2	V3	V4
P (% Contribution)	P1	P2	P3	P4

โดยที่ i แทนด้วยข้อมูลปัจจัยที่ 1 2 3 และ 4
 j แทนด้วยข้อมูลในคอลัมน์

$$SS_{Bi} = \text{Level}(\sum (X_j - \bar{X})^2)$$

$$SS_{Wi} = \sum (X_j - \bar{X})^2$$

$$V_i = \frac{SS_{Bi}}{\text{Level} - 1}$$

$$P_i = \frac{SS_{Bi}}{\sum SS_{Bi}}$$

ตารางที่ 10.5 ปัจจัยและระดับที่ศึกษาในงานวิจัยของ Dulsang et al. (2014)

ระดับ	ปัจจัย			
	W/C	น้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ปริมาณของเสีย EVA (เปอร์เซ็นต์)	ทราย/ซีเมนต์ (S/C)
1	0.45	65	4.5	0.2
2	0.50	70	6.0	0.3
3	0.55	75	7.5	0.4

ตารางที่ 10.6 ส่วนผสมของแต่ละตัวอย่างจากการออกแบบการทดลองของทาคุชิในงานวิจัยของ Dulsang et al. (2014)

จำนวนส่วนผสม	ปัจจัย			
	W/C	น้ำ	EVA	S/C
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C3	D3
4	A2	B1	C2	D3
5	A2	B2	C3	D1
6	A2	B3	C1	D2
7	A3	B1	C3	D2
8	A3	B2	C1	D3
9	A3	B3	C2	D1

จากผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักที่กล่าวมาข้างต้นสามารถหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของหน่วยน้ำหนักคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน ดังสมการที่ 10.1

$$\rho = 2022.95 - 1277.87 x_1 + 2.95367 x_2 - 6175 x_3 + 312.717 x_4 \quad (10.1)$$

เมื่อ ρ คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมด้วยของเสีย EVA (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

x_1 คือ อัตราส่วนของ W/C

x_2 คือ ปริมาณของซีเมนต์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

x_3 คือ ปริมาณของของเสีย EVA (เปอร์เซ็นต์)

x_4 คือ อัตราส่วนของทราย (เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 10.7 ตารางผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา
(Dulsang et al., 2014)

จำนวน ส่วนผสม	หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)		กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	
	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
1	1410.87	1440.76	9.21	10.78
2	1382.02	1360.32	9.98	9.65
3	1335.35	1347.59	7.62	8.08
4	1289.64	1292.57	5.33	6.08
5	1194.05	1184.72	4.65	3.80
6	1442.83	1435.54	5.96	7.71
7	1154.05	1171.58	3.20	3.49
8	1391.56	1383.34	7.22	8.04
9	1214.85	1210.39	3.48	3.55

ตารางที่ 10.8 ค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักกับระดับต่างๆ ของส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน
(Dulsang et al., 2014)

ระดับ	หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			
	W/C	น้ำ	EVA	S/C
1	1382.89	1301.63	1419.88	1278.62
2	1304.27	1322.54	1322.48	1322.48
3	1255.10	1331.01	1234.63	1341.17

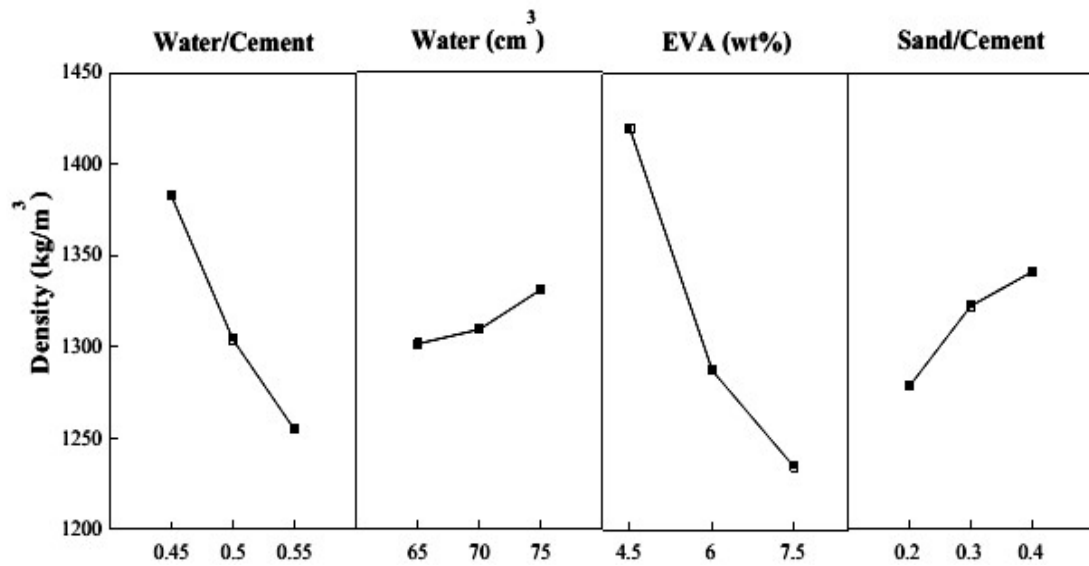
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมด้วยของเสีย EVA ที่อายุ 7 และ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 10.7 ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดในแต่ละปัจจัยสรุปในตารางที่ 10.9 และแสดงในรูปที่ 10.2 พบว่าส่วนผสมที่มี W/C คือ 0.45 น้ำ คือ 70 กรัม EVA 0.045 และทรายต่อซีเมนต์ คือ 0.4 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดได้สูงที่สุด จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสามารถหาสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน จากสมการที่ 10.2 และ 10.3 ตามลำดับ

$$f_{C7} = 32.5961 - 43.0333 x_1 + 0.0226667 x_2 - 76.8889 x_3 + 4.71667 x_4 \quad (10.2)$$

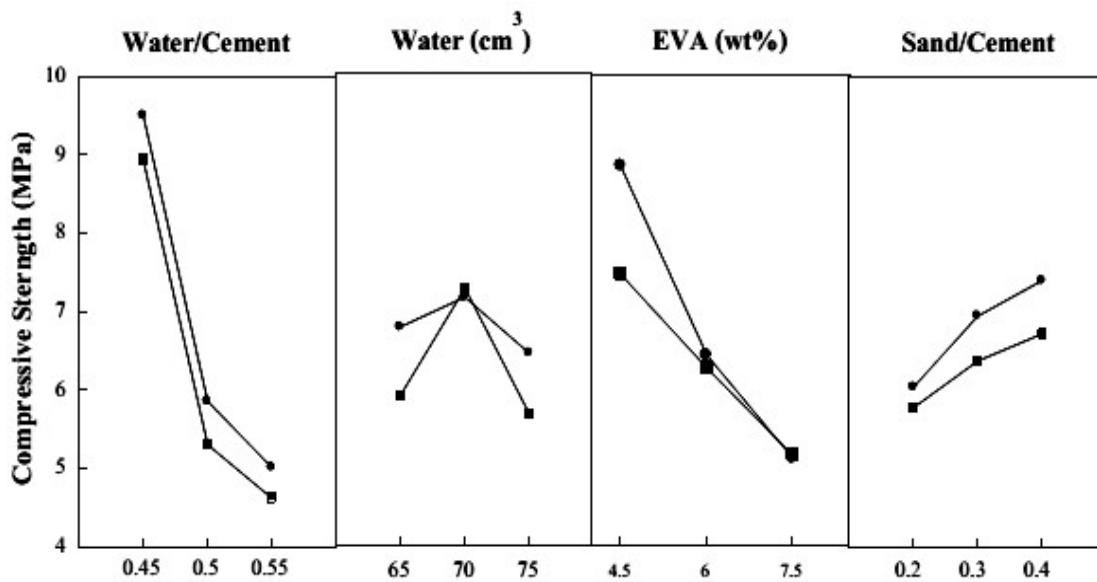
$$f_{C28} = 36.9428 - 44.7667 x_1 - 0.0336667 x_2 - 124 x_3 + 6.78333 x_4 \quad (10.3)$$

เมื่อ f_{C28} คือ ค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน (เมกะปาสคาล)

- x_1 คือ อัตราส่วนของ W/C
 x_2 คือ ปริมาณของซีเมนต์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 x_3 คือ ปริมาณของของเสีย EVA (เปอร์เซ็นต์)
 x_4 คือ อัตราส่วนของทราย (เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 10.1 ปัจจัยที่มีผลต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน (Dulsang et al., 2014)



รูปที่ 10.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดที่ 7 และ 28 วัน

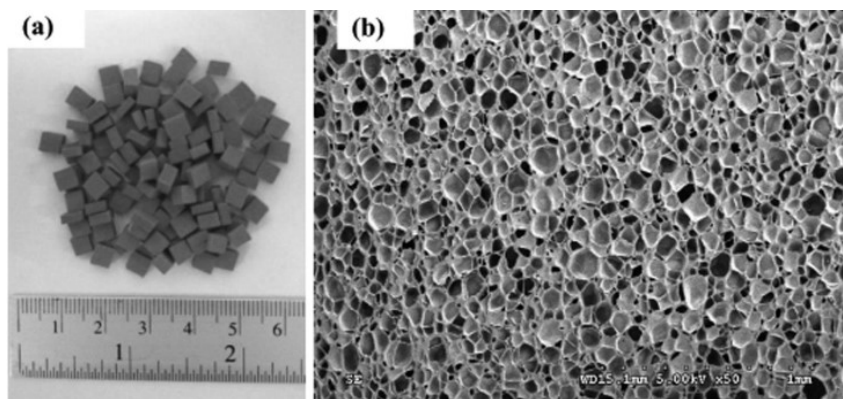
โดยที่ [■] ที่อายุ 7 วัน [●] ที่อายุ 28 วัน (Dulsang et al., 2014)

ตารางที่ 10.9 ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด กับระดับต่างๆ ของส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 7 และ 28 วัน (Dulsang et al., 2014)

ระดับ	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)							
	W/C		น้ำ		EVA		S/C	
	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
1	8.94	9.50	5.91	6.78	7.46	8.84	5.78	6.04
2	5.31	5.86	7.28	7.16	6.27	6.43	6.38	6.95
3	4.63	5.02	5.68	6.45	5.16	5.12	6.72	7.40

เมื่อพิจารณาหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดร่วมกันของคอนกรีตมวลเบา เพื่อจัดกลุ่มตามมาตรฐาน ASTM C331 (2013) พบว่าทั้ง 9 การทดลองที่อายุ 28 วัน มีหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 1171.85–1440.76 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 3.49–10.78 เมกะปาสคาล เมื่อจัดกลุ่มการใช้งานของคอนกรีตมวลเบา กล่าวคือหน่วยน้ำหนักอยู่ในช่วง 800-1440 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 3.4-17 เมกะปาสคาล สามารถจัดอยู่ในกลุ่มประเภทงานก่อ (Masonry Concrete)

จากผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน นำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVAs) เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาดังแสดงในตารางที่ 10.10 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบามากที่สุดคือปริมาณของเสีย EVA โดยมีผลมากถึง 62.67 เปอร์เซ็นต์ ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา เนื่องจากความหนาแน่นที่ต่ำของของเสีย EVA (0.93-0.95 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) (Mark, 1999) และรูพรุนภายในของเสีย EVA ดังแสดงในรูปที่ 10.3 จึงส่งผลให้คอนกรีตนั้นมีน้ำหนักเบา ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบามากที่สุดคือ W/C มีผลมากถึง 57.63 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำและซีเมนต์จะเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรง (Vu et al., 2009)



รูปที่ 10.3 (a) ชิ้นงาน EVA และ (b) ลักษณะรูพรุนของ EVA (Dulsang et al., 2014)

ตารางที่ 10.10 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน (Dulsang et al., 2014)

ปัจจัย	Degree of Freedom	หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)			กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)		
		SS*	V**	Contribution (%)	SS*	V**	Contribution (%)
W/C	2	24927.59	12463.80	28.62	34.02	17.01	57.63
ปริมาณน้ำ	2	1405.20	702.60	1.61	0.77	0.38	1.30
ปริมาณของเสีย EVA	2	54595.01	27297.51	62.67	21.38	10.69	36.23
S/C	2	6184.64	3092.32	7.10	2.86	1.43	4.84
รวม	8	87112.45	-	100	59.10	-	100

SS* : Sum of square

V** : Variance

10.5.2 สมบัติทางความร้อน

Suttaphakdee et al. (2016) ได้ศึกษาการหาสัดส่วนที่เหมาะสมและสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ประกอบด้วยวัสดุประกอบเปลี่ยนสถานะคงรูปพาราฟิน/คอนกรีตมวลเบาที่ใช้แล้ว (PCMPC) โดยสัดส่วนผสมที่ออกแบบด้วยวิธีทางสถิติแสดงในตารางที่ 10.11 และ 10.12

ตารางที่ 10.11 ปัจจัยระดับที่ศึกษาในงานวิจัยของ Suttaphakdee et al. (2016)

ปัจจัย	ระดับ		
	1	2	3
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ : W/C (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.40	0.45	0.50
ปริมาณน้ำ : W (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	68.55	73.55	78.55
ปริมาณ PCMPC (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	4	7	10
อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ : S/C (กรัมต่อกรัม)	0.16	0.26	0.36

การกักเก็บความร้อน (Heat storage: S) ของคอนกรีตที่มีที่ผสม PCMPC ซึ่งประกอบด้วยพาราฟิน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน สามารถคำนวณได้โดยการประยุกต์ตามงานวิจัยของ Li et al. (2013) การกักเก็บความร้อน ค่าความจุความร้อนในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนสถานะ และค่าความร้อนแฝงของคอนกรีตที่ผสมวัสดุประกอบเปลี่ยนสถานะคงรูป PCMPB สามารถหาได้จากสมการ 10.4, 10.5 และ 10.6 ตามลำดับ

$$\Delta H_{\text{LWC-PCMPC}} = \Delta H_{\text{Paraffin}} \cdot \beta \quad (10.4)$$

$$C = (\Delta H_{\text{LWC-PCMPC}}) / (T_E - T_S) \quad (10.5)$$

$$S = 0.51 \sqrt{\lambda C \rho} \quad (10.6)$$

โดยค่า $\Delta H_{\text{LWC-PCMPC}}$ คือความร้อนแฝงของคอนกรีตมวลเบาที่ผสม PCMPC (กิโลจูลต่อกิโลกรัม) ค่า $\Delta H_{\text{Paraffin}}$ คือความร้อนแฝงของพาราฟิน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม) ค่า β คือสัดส่วนมวลของ PCMPC ที่ผสมอยู่ในคอนกรีตมวลเบา ค่า C คือความจุความร้อนจำเพาะ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน) ค่า ρ คือความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ค่า T_S คืออุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (องศาเซลเซียส) ค่า T_E คืออุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (องศาเซลเซียส) ค่า S คือสัมประสิทธิ์การกักเก็บพลังงานความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน) และค่า λ คือค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)

ตารางที่ 10.12 ส่วนผสมของแต่ละตัวอย่างจากการออกแบบการทดลองของทาคุชิในงานวิจัยของ Suttaphakdee et al. (2016)

สูตรที่	ระดับของปัจจัย			
	W/C	W	PCMPC	S/C
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	3	3
5	2	2	2	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

จากตารางที่ 10.13 แสดงค่าการกักเก็บความร้อนของคอนกรีต มีค่า 7.37 – 11.58 วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวินค่าเฉลี่ยจากการคำนวณการกักเก็บความร้อนของคอนกรีตที่ผสม PCMPC รูปที่ 10.4 ค่าการกักเก็บความร้อนสูงสุดจะได้จาก W/C เท่ากับ 0.40 ปริมาณน้ำ 68.55 กรัม ปริมาณ PCMPC เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ S/C เท่ากับ 0.36 เมื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้น สามารถทำนายค่าการกักเก็บความร้อนของคอนกรีตที่ผสม PCMPC จากสมการที่ 10.7

$$S = 8.9113 - 10.333x_1 + 0.030172x_2 + 51.505x_3 - 3.1505x_4 \quad (10.7)$$

เมื่อ S คือ ค่าการกักเก็บความร้อนของคอนกรีตที่ผสม PCMPC ที่ 28 วัน
(วัดต่อตารางเมตรเคลวิน)

x_1 คือ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)

x_2 คือ ปริมาณของน้ำ (กรัม)

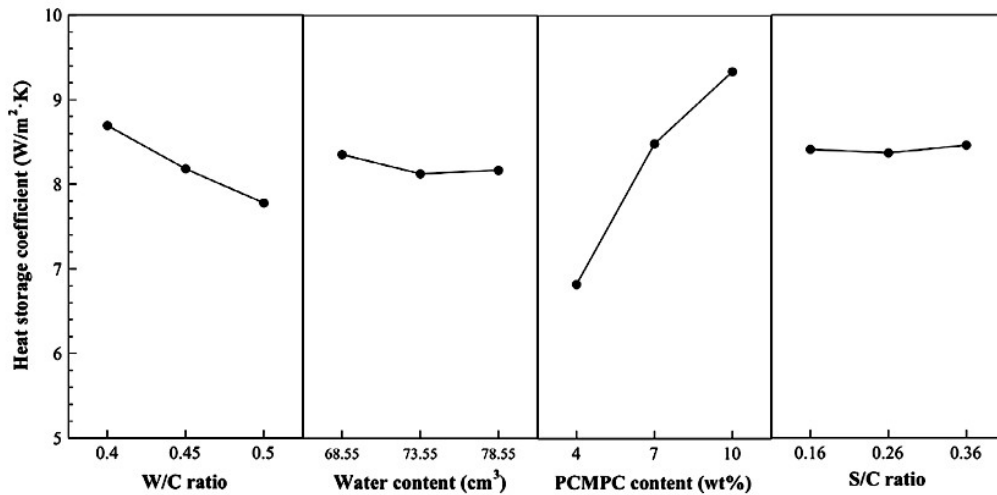
x_3 คือ ปริมาณของ PCMPC (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

x_4 คือ อัตราส่วนของทรายต่อซีเมนต์ (S/C)

ตารางที่ 10.13 ผลการกักเก็บความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมวัสดุประกอบเปลี่ยนสถานะคงรูป PCMPC ที่อายุ 28 วัน (Suttaphakdee et al., 2016)

สูตรที่	สมบัติทางความร้อน			
	ค่าการนำความร้อน (วัดต่อเมตร-เคลวิน)	ค่าความร้อนแฝงของ คอนกรีตมวลเบา ผสม PCMPC (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)	ความจุความร้อน จำเพาะ (กิโลจูลต่อกิโลกรัม/ เคลวิน)	สัมประสิทธิ์การกักเก็บ พลังงานความร้อน (วัดต่อตารางเมตร/เคลวิน)
1	0.861	1.64	0.13	7.32
2	0.722	2.61	0.20	8.49
3	0.769	3.54	0.28	10.27
4	0.759	2.63	0.21	8.56
5	0.643	3.76	0.29	9.36
6	0.764	1.59	0.12	6.63
7	0.639	3.78	0.30	9.19
8	0.723	1.60	0.13	6.53
9	0.592	2.81	0.22	7.61

จากตารางที่ 10.14 เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าการกักเก็บความร้อนของคอนกรีตพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการกักเก็บความร้อนของคอนกรีตที่ผสม PCMPC มากที่สุด ได้แก่ปริมาณการเติม PCMPC โดยส่งผลมากถึง 85.95 เปอร์เซ็นต์ จากปัจจัยทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา เนื่องจากการวัสดุประกอบเปลี่ยนสถานะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือความสามารถในการกักเก็บความร้อนที่ดีเยี่ยม (Kuznik et al., 2011) สอดคล้องผลการทดลอง เมื่อเพิ่มปริมาณ PCMPC ค่าการกักเก็บความร้อนจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



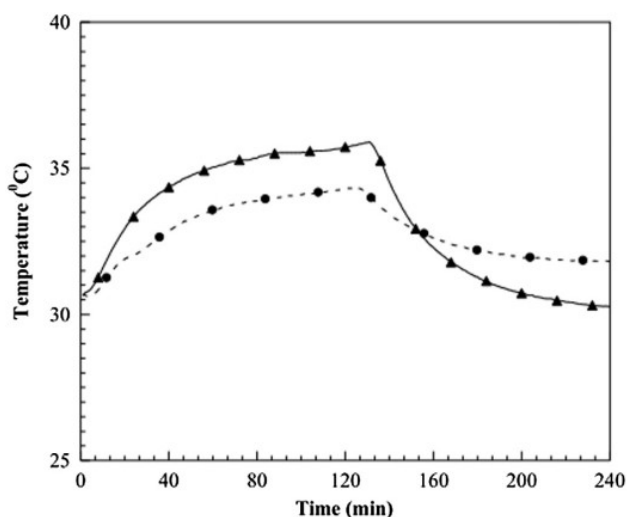
รูปที่ 10.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการกักเก็บความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผสม PCMPCC
(Suttaphakdee et al., 2016)

ตารางที่ 10.14 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการกักเก็บความร้อนของคอนกรีตที่เตรียมขึ้น
ที่อายุ 28 วัน (Suttaphakdee et al., 2016)

ปัจจัย	ระดับของ ตัวแปรอิสระ	การกักเก็บความร้อน (วัดต่อตารางเมตรเคลวิน)
		Contribution (%)
น้ำต่อซีเมนต์	2	11.06
น้ำ	2	0.78
PCMPCC	2	85.95
ทรายต่อซีเมนต์	2	2.21
รวม	8	100

ประสิทธิภาพทางความร้อนจากชุดทดสอบ โดยการวัดอุณหภูมิอากาศภายในห้องจำลองที่มีการให้ความร้อนจากหลอดไฟ 275 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 10.5 จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิในห้องจำลองที่มีคอนกรีตสูตรที่ 9 (คอนกรีตมวลเบาที่มีหน่วยน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1711 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 33 เมกะปาสคาล ตามลำดับ) และคอนกรีตควบคุมที่ไม่มีการเติมวัสดุเปลี่ยนเฟสคงรูป เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีตสูตรที่ 9 และคอนกรีตควบคุม พบว่าคอนกรีตสูตรที่ 9 มีอุณหภูมิต่ำกว่า 1.9 องศาเซลเซียส หลังจากการลดอุณหภูมิภายในห้องจำลองที่เวลา 2 ชั่วโมง คอนกรีตสูตรที่ 9 สามารถลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 5.8 องศาเซลเซียส ถึง 2.3 องศาเซลเซียส การเติมวัสดุประกอบวัสดุเปลี่ยนสถานะคงรูป PCMPCC ในคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความสามารถในการกักเก็บ

ความร้อนและเป็นฉนวนกันความร้อน ในการถ่ายเทอุณหภูมิภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในอาคารเมื่อ ปรยุคที่ใช้เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างอาคารจะสามารถลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอาคาร ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าในการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิภายในอาคารที่อาศัย (Memon et al., 2015)



รูปที่ 10.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่เติม PCMPc (---●) กับตัวอย่างควบคุม (—▲) (Suttaphakdee et al., 2016)

10.6 เอกสารอ้างอิง

- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2008). **Design and Analysis of Experiments**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.
- Alshihri, M.M., Azmy, A.M., and El-Bisy, M.S. (2009). Neural networks for predicting compressive strength of structural light weight concrete. **Construction and Building Materials**, 23(6), 2214-9.
- American Society for Testing and Materials. (2009). ASTM C330 Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. USA: **ASTM International**.
- American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM C331 Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units. USA: **ASTM International**.
- American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM C332 Standard Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete. USA: **ASTM International**.
- Cabrera, J.G. and AlHasan, A.S. (1997). Performance properties of concrete repair materials. **Construction and Building Materials**, 11(5), 283-90.

- Chen, P.W., Fu, X., and Chung, D.D.L. (1995). Improving the bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the new concrete. **Cement and Concrete Research**, 25(3), 491-6.
- Clark, J.L. (1993). Structural lightweight aggregate concrete. UK: **Chapman & Hall**.
- Dulsang, N., Chindaprasirt, P., Posi, P., Hiziroglu, S., Sutaphakdee, P., Dangawat, R. et al. (2014). Optimizing Mix Proportion of Lightweight Concrete Containing Plastic Waste by Taguchi Method. **Advanced Materials Research**, 931-932, 431-5.
- Düzgün, O.A., Gül, R., and Aydin, A.C. (2005). Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. **Materials Letters**, 59(27), 3357-63.
- Ergul Yasar, C.D.A., Kilic, A., and Gulsen, H. (2003). Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. **Materials Letters**, 57(15), 2267-70.
- Fowler, D.W. (1999). Polymers in concrete: a vision for the 21st century. **Cement and Concrete Composites**, 21(5), 449-52.
- Huang, S.C., Chang, F.C., Lo, S.L., Lee, M.Y., Wang, C.F., and Lin, J.D. (2007). Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge, and incinerator fly ash. **Journal of Hazardous Materials**, 144(1-2), 52-8.
- Ibrahim, M., Al-Gahtani, A.S., Maslehuddin, M., and Almusallam, A.A. (1997). Effectiveness of concrete surface treatment materials in reducing chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, 11(7), 443-51.
- Jianming Gao, W.S. and Morinob, K. (1997). Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**, 19(4), 307-13.
- Khalaj, M.J. et al. (2015). Split tensile strength of slag-based geopolymer composites reinforced with steel fibers: Application of Taguchi method in evaluating the effect of production parameters and their optimum condition. **Ceramics International**, 41(9), 10697-10701.
- Kuznik, F., David, D., Johannes, K., and Roux, J.J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15(1), 379-91.
- Lamond, J.F. and Pielert J.H. (2006). Significance of Tests and Properties of Concrete & Concrete-Making Materials. **Structural Lightweight Concrete**.

- Li, M., Wu, Z., and Tan, J. (2013). Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material. **Applied Energy**, **103**, 393-9.
- Mark, J.E. (1999). Polymer Data Handbook. Ethylene-vinyl acetate copolymer. UK: **Oxford University Press**.
- Memon, S.A., Cui, H.Z., Zhang, H., and Xing, F. (2015). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. **Applied Energy**, **139**, 43-55.
- Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D. (2002). Concrete. 2nd ed. USA: **Pearson Education**.
- Mohd, R.S. (1997). First report research project on lightweight concrete. **Malaysia: University Technology Malaysia**.
- Nadim, H.M. (2002). Structural concrete; Theory and design Upper Sandle River. **New Jersey: Prentice-Hall**.
- Nazari, A., et al. (2012). Production geopolymers by Portland cement: Designing the main parameters' effects on compressive strength by Taguchi method. **Materials & Design**, **41**, 43-49.
- Newman, J. and Choo, B.S. (2003). Advanced Concrete Technology: Processes. UK: **Butterworth-Heinemann**
- Ohama, Y. (1987). Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes. **ACI Materials Journal**, **84**(6), 511-8.
- Peace, G.S. (1993). Taguchi Methods: A Hands-On Approach. **Massachusetts: Corporate&Profession Publishing Group**.
- Semiha Akcaozoglu, C.D.A. and Akcaozoglu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. **Waste Management**, **30**(2), 285-90.
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., and Tasdemir, M.A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. **Energy and Buildings**, **43**(2-3), 671-6.
- Suttaphakdee, P., Dulsang, N., Lorwanishpaisarn, N., Kasemsiri, P., Posi, P., and Chindaprasirt, P. (2016). Optimizing mix proportion and properties of lightweight concrete incorporated phase change material paraffin/ recycled concrete block composite. **Construction and Building Materials**, **127**, 475-83.

- Tanyildizi, H. (2008). Effect of temperature, carbon fibers, and silica fume on the mechanical properties of lightweight concretes. **New Carbon Materials**, 23(4), 339-44.
- Tongaroonsri, S. and Kunajamjarus, A. (2012). Applications of Statistical Model in Proportioning of Concrete Block to Minimum Cost. **The Journal of Industrial Technology**, 8(1), 1-11.
- Vu, X.H., Malecot, Y., Daudeville, L., and Buzaud, E. (2009). Effect of the water/cement ratio on concrete behavior under extreme loading. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 33(17), 1867-88.
- Wang, J., Zhang, S., Yu, H., Kong, X., Wang, X., and Gu, Z. (2005). Study of cement mortars modified by emulsifier-free latexes. **Cement and Concrete Composites**. 27(9–10), 920-5.
- Xu, Y., Jiang, L., Xu, J., and Li, Y. (2012). Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction and Building Materials**, 27(1), 32-8.
- Zhang, Z., Wang, P., and Wu, J. (2012). Dynamic Mechanical Properties of EVA Polymer-Modified Cement Paste at Early Age. **Physics Procedia**, 25, 305-10.

บทที่ 11

คอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง

Pressed lightweight Portland cement and geopolymer concretes

ดร.พัชรพล โพธิ์ศรี, Email: Mister_wing@hotmail.com

สุรสิทธิ์ เลิศนิมุลชัย, Email: Cpuudon22@yahoo.com

รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ, Email: Vansa@kku.ac.th

ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ จินดาประเสริฐ, Email: prinya@kku.ac.th

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

123 ถนนมิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ. ขอนแก่น 40002

11.1 บทคัดย่อ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการผลิตคอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง ได้นำมวลรวมเบามาใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบา ซึ่งในส่วนของการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้นำมวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติคือ ไดอะตอมไมต์หรือแรดินเบานำมาทำการย่อยให้มีขนาดต่างๆกันและจัดให้เป็น มวลรวมขนาดใหญ่ (CA) มวลรวมขนาดกลาง (MA) และขนาดละเอียด (FA) นำมาทำการพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้นด้วยการนำไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 400-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำมาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบา ระบบอัดแห้ง ทำการศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิในการเผาและปริมาณของส่วนละเอียดที่เพิ่มสูงขึ้นต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้งพบว่า อุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น และทำให้หน่วยน้ำหนัก และค่าการเหนียวนำความร้อนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ไดอะตอมไมต์ที่ไม่ทำการเผา และการใช้ไดอะตอมไมต์เผาจะมีผลกระทบต่อการดูดซึมน้ำ และปริมาณโพรงอากาศเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อปริมาณของส่วนละเอียดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ กำลังรับแรงอัด หน่วยน้ำหนัก และค่าการเหนียวนำความร้อน เพิ่มสูงขึ้น แต่ทำให้ การดูดซึมน้ำ และปริมาณโพรงอากาศลดลง

และในส่วนของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบา ได้นำมวลรวมเบาที่ได้จากใช้เศษคอนกรีตมวลเบาที่ใช้แล้ว เป็นมวลรวมเบาในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบา ระบบอัดแห้ง และทำการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5, 10 และ 15 % โดยน้ำหนักของเถ้าลอย เพื่อพัฒนากำลังรับแรงอัดให้เพิ่มสูงขึ้น และทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนพารามิเตอร์ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดได้แก่ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง(L/S), อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์(NS/NH), ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NHC), อุณหภูมิในการบ่ม(Temp), และอัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง (A/S)

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเพิ่ม อัตราส่วน A/S จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่ออัตราส่วนของ L/S เพิ่มขึ้น 1.2-1.6 ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นแต่เมื่อเพิ่มเป็น 1.6-1.8 ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่ออัตราส่วน NS/NH เพิ่มขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NHC) เพิ่มขึ้น 5 – 10 M ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NHC) เพิ่มขึ้น 10 – 15 M ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง และอุณหภูมิในการบ่ม(Temp)เพิ่มสูงขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้งที่ได้นี้สามารถทำเป็นคอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบา สำหรับงานก่อผนังได้

คำหลัก: คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง, จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง, ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, โดอะตอมไมต์, คอนกรีตมวลเบาที่ใช้แล้ว

11.2 บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งก่อสร้างต่างๆเกิดขึ้นมากมายซึ่งในการก่อสร้างโดยปกติแล้วจะใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete) เป็นโครงสร้างหลักของสิ่งปลูกสร้างเหล่านั้นโดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะมีหน่วยน้ำหนักมากประมาณ 2400 กก./ลบ.ม. ส่งผลให้โครงสร้างมีขนาดใหญ่ โดยจะส่งผลให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ของสิ่งปลูกสร้างนั้นมากขึ้นทำให้ต้องออกแบบขนาดโครงสร้างให้มีขนาดใหญ่พอที่จะรับน้ำหนักของโครงสร้างเอง (Dead Load) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ที่จะมากระทำกับโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นจึงทำให้ต้องใช้วัสดุเป็นปริมาณมากในการก่อสร้าง ทำให้สิ้นเปลืองและทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างมีค่าสูง เพื่อที่จะลดต้นทุนในการก่อสร้าง จึงได้มีการพัฒนาวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างโดยให้มีหน่วยน้ำหนักลดลง แต่ยังคงมีกำลังรับแรงอัด เทียบเท่ากับคอนกรีตธรรมดาซึ่งวัสดุนั้นคือ คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาคือ คอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตทั่วไป การใช้คอนกรีตมวลเบาในการก่อสร้างสามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างได้ ไม่ว่าจะเป็นบล็อกคอนกรีตมวลเบา(Lightweight Concrete Block) หรือคอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้าง (Structure Lightweight Concrete) ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาในงานโครงสร้างอาจมีราคาต่อลูกบาศก์สูงกว่าคอนกรีตปกติแต่ทำให้โครงสร้างราคาต่ำกว่า เนื่องจากการใช้คอนกรีตมวลเบาสามารถลดน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) ของโครงสร้างได้ ทำให้ประหยัดราคาก่อสร้าง ซึ่งการใช้คอนกรีตมวลเบาในการก่อสร้างจะลดขนาดพื้นที่หน้าตัด ลดปริมาณการใช้เหล็กเสริม ลดราคาค่าแรงและไม้แบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างได้สูง นอกจากนี้ศักยภาพในการทำงานของคอนกรีตมวลเบายังเทียบเท่าคอนกรีตปกติอีกด้วย

แต่มีปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งคือ อุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้พลังงานสูงในกระบวนการผลิตและปล่อยก๊าซที่มีผลทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ออกสู่ชั้นบรรยากาศจำนวนมากถึงปีละ 13,500 ล้านตันหรือประมาณ 7 เปอร์เซ็นของก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาทั้งหมด ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการวิจัยเพื่อผลิตสารซีเมนต์โดยไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเป็นการอนุรักษ์และ

รักษาสีแวดล้อมจากการระเบิดภูเขาเพื่อผลิตปูนซีเมนต์และยังต้องเข้าสู่กระบวนการผลิตปูน ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

สารซีเมนต์ที่จะกล่าวถึงคือวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (geopolymer) ถ้าจะกล่าวถึงวัสดุจีโอโพลิเมอร์ นั้นก็คือ วัสดุเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ โดยจะใช้หลักการของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ให้เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (polymer) ดังสมการที่ 11.1

$$M = M_n [-(Si-O_2)_z - Al-O]_n \cdot wH_2O \quad (11.1)$$

โดย M เป็นธาตุอัลคาไล
- เป็นการยึดเกาะ (bond)
z เป็นจำนวนโมเลกุลของ Si - O₂ เท่ากับ 1, 2 หรือ 3
n บ่งบอกปริมาณของการทำโมเลกุลลูกโซ่
w เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำ

โดยการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al จะใช้สารละลายที่เป็นต่างสูงและใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นและวัสดุที่มีองค์ประกอบของ Si และ Al เป็นหลักและสามารถใช้ผลิตเป็นวัสดุ จีโอโพลิเมอร์นั้นได้แก่ เถ้าลอย ดินขาวเผา เถ้าแกลบ และวัสดุอื่นๆ ที่มีอีกมากมายที่กำลังนำมาใช้ และที่ยังไม่ได้นำมาใช้เพราะว่าสารที่ประกอบด้วย Si และ Al นั้นมีอยู่ทุกหนทุกแห่งบนโลกนี้ ตั้งแต่หิน กรวด ทราย ดิน เป็นต้น แต่สัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุจำพวกหิน ทราย นั้นยังไม่เหมาะสำหรับการทำเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์

จากการวิจัยพบว่าสามารถใช้เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ได้จากการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในการทำจีโอโพลิเมอร์ที่สามารถรับแรงได้ดี เช่นเดียวกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สารจีโอโพลิเมอร์ดังกล่าวได้มาจากการผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยา (activator) และใช้ความร้อนในช่วง 60 – 90 °C ในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นสารพวกอัลคาไลซิลิเกต (alkali silicate) และอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) เช่น โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาทั้งคุณสมบัติและวิธีการผลิตทั้งคอนกรีตมวลเบาปกติโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาและใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารพัฒนากำลัง เพื่อเป็นข้อมูลที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้าง และเป็นข้อมูลในการพัฒนาการผลิตคอนกรีตมวลเบาต่อไป อีกทั้งยังสามารถเพิ่มผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง และสามารถรองรับความต้องการในอนาคต นอกจากนี้ยังสามารถลดของเสียจากอุตสาหกรรมและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

11.3 คอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา เป็นคอนกรีตที่นิยมในต่างประเทศมาเป็นเวลานาน ซึ่งนำไปใช้ในงานก่อสร้าง ตั้งแต่ทำเป็นฉนวนกันความร้อน จนถึงใช้เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างเช่น พื้น เสา คาน ฐานรากและผนังอาคาร เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานโครงสร้างที่สำคัญคือ ลดน้ำหนักของอาคาร ส่งผลให้เป็นการประหยัดต้นทุนโดยรวม

คอนกรีตเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป คือ หน่วยน้ำหนักคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว(แห้ง)น้อยกว่า 1850 กก./ลบ.ม. โดยทั่วไปมีความหนาแน่นประมาณ 400-1850 กก./ลบ.ม. มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 10 ถึง 450 กก./ตร.ซม. (ASTM C330/C330M-14, 2014)

โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ตามวัสดุที่ใช้คือ

1. คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา (Lightweight concrete)
2. คอนกรีตไม่มีส่วนละเอียด (Non-fines concrete)
3. โฟมคอนกรีต (Aerated or foam concrete)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับคอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาสามารถรวบรวมเป็นหัวข้อย่อยได้ดังนี้

11.3.1 การผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และใช้ไดอะทอมไมต์เผาเป็นมวลรวมเบา

การผลิตคอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งตามการใช้งานคือ คอนกรีตมวลเบาสำหรับการผลิตบล็อกที่มีความหนาแน่นต่ำ ประมาณ 400-1200 กก./ลบ.ม. และ 1000-1840 กก./ลบ.ม. สำหรับคอนกรีตโครงสร้าง (Chandra et al., 2002) และยังสามารถแบ่งคอนกรีตมวลเบาด้วยวิธีการผลิตคอนกรีตมวลเบา จำแนกได้เป็นสามประเภทคือ (1) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวมเบาที่มีความมึนฟูสูงและมีความถ่วงเฉพาะต่ำ (2) คอนกรีตมวลเบาที่มีฟองอากาศปริมาณมากแทรกภายในเนื้อคอนกรีตหรือเนื้อมอร์ตาร์ (3) คอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีมวลรวมละเอียด (Neville, 1987) การนำคอนกรีตมวลเบาทั้งในลักษณะคอนกรีตบล็อกมวลเบาสำหรับงานก่อ และคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้างสามารถลดต้นทุนของการก่อสร้างได้โดยสามารถลดน้ำหนักกระทำได้ พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้าง และปริมาณเหล็กเสริมของโครงสร้างได้

คอนกรีตมวลเบา ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับคอนกรีตมวลเบา (Chen et al., 2008, Kayali et al., 2003) โดยนักวิจัยส่วนใหญ่จะใช้คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่ออิฐฉนวน หรืองานคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้างเนื่องจากมี อัตราส่วนกำลังอัดต่อหน่วยน้ำหนักที่สูง มีประสิทธิภาพนำความร้อนที่ต่ำ และมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนกันเสียงที่ดีเนื่องจากช่องอากาศในมวลรวมเบา (Demirdag et al., 2008) มวลรวมเบา (LWA) มาจากทั้งแหล่งธรรมชาติเช่น perlite, diatomite และ pumice หรือจากการผลิตเช่น expanded clay, expanded shale และ sintered fly ash.

ไดอะตอมเป็นสาหร่ายเซลล์เดี่ยวและอาจเป็นที่แพร่หลายมากที่สุดกลุ่มพืชบนโลก มีมากกว่ายี่สิบห้าพันชนิดของไดอะตอม (Round et al., 1990) เมื่อไดอะตอมตาย เหลือเปลือกบางจมนและสะสมหลายศตวรรษที่ผ่านมาและกลายเป็นชั้นหนา ในที่สุดซากไดอะตอมเหล่านี้กลายเป็นฟอสซิลและถูกบีบอัดให้เป็นก้อนหินซอล์กและเรียกว่าตอนนี้เรียกว่าดินเบา (diatomaceous earth)

ดินไดอะตอมเป็นหินตะกอนชนิดหนึ่ง มีลักษณะเด่นคือมีน้ำหนักเบาและเปราะกว่าหินทั่วไปอย่างเห็นได้ชัด หินชนิดนี้เกิดจากการทับถมกันของเปลือกสาหร่ายเซลล์เดี่ยวขนาดเล็กมาก (50-100 ไมครอน) ที่เรียกว่า “ไดอะตอม (diatom)” จำนวนมหาศาล เปลือกของไดอะตอมมีองค์ประกอบเป็นซิลิกาเนื้อโอปอล (opaline silica) มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปมากมายและมีลักษณะที่สำคัญคือมีรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมดินไดอะตอมจึงมีความหนาแน่นของมวลรวมน้อยจนบางครั้งสามารถลอยน้ำได้ สีของหินมักเป็นสีโทนอ่อนๆ เช่น สีครีม ขาวอมเหลือง หรือขาวอมชมพู เป็นต้น ไดอะตอมมีสายพันธุ์หลากหลาย มีทั้งที่อาศัยในน้ำทะเล น้ำกร่อย และน้ำจืด ในทะเลสาบ บนพื้นทวีป สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตและแพร่พันธุ์ของไดอะตอมคือบริเวณที่มีอากาศอบอุ่น น้ำใส นิ่ง หรือน้ำที่ไหลเข้ามาในแอ่งสะสมตัวมีตะกอนพัดพาจำนวนน้อย และที่สำคัญที่สุดคือจะต้องมีการเติมซิลิกา (SiO_2) เข้ามาอย่างต่อเนื่อง ในปริมาณมากพอต่อการนำไปสังเคราะห์เป็นเปลือก ดังนั้นจึงมักพบแหล่งดินไดอะตอมในพื้นที่ภูเขาไฟซึ่งเป็นแหล่งที่ให้ซิลิกาทั้งในรูปของตะกอนที่เกิดจากการผุพังของหินและขี้เถ้าภูเขาไฟ เมื่อซิลิกาในแอ่งถูกใช้หมดไป การแพร่พันธุ์ของไดอะตอมก็จะหยุดชะงักจนกว่าจะมีการเพิ่มซิลิกาเข้ามาใหม่ในธรรมชาติ จึงมักพบชั้นดินไดอะตอมเป็นช่วงชั้นบางๆ สลับกับหินดินดาน หินโคลนที่เกิดร่วมในแอ่งสะสม ดินเบาหรือไดอะตอมมีคุณสมบัติการนำความร้อนต่ำ แต่เป็นวัสดุค่อนข้างอ่อนที่มีปฏิกิริยาต่ำ (Pimraksa and Chindaprasirt, 2009) ไดอะตอมผสมถูกนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีความแข็งแรงประมาณ 2.5-8.0 MPa น้ำหนักหน่วยจาก 900-1190 กก./ลบ.ม. (Degirmenci and Yilmaz, 2009) และการเผาไดอะตอมที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส ทำให้เพิ่มปฏิกิริยาปอซโซลานิกให้ดียิ่งขึ้น (Pimraksa and Chindaprasirt, 2009) ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาถึงการใช้ไดอะตอมไหม้เป็นมวลรวมเบาและทำการปรับปรุงคุณสมบัติโดยทำการเผาที่อุณหภูมิต่างกัน และผลของปริมาณส่วนละเอียดที่เพิ่มสูงขึ้นต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

สำหรับการออกแบบคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไหม้เผา จะออกแบบให้มีน้ำหนักหน่วยอยู่ระหว่าง 1100-1200 กก./ลบ.ม. และทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ทำการเผาต่อคุณสมบัติของไดอะตอมไหม้และคอนกรีตมวลเบา การผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไหม้เผา ดังแสดงในรูปที่ 11.1 โดยขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งส่วนผสมทั้งหมดตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้ โดยใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.1 กรัม
2. ใส่ปูนซีเมนต์ และไดอะตอมไหม้หรือเปลือกคอนกรีตมวลเบาที่ใช้แล้ว ลงในเครื่องผสมคอนกรีต เปิดเครื่องผสมให้ปูนซีเมนต์และไดอะตอมไหม้คลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกันในเครื่องผสม เป็นเวลา 1.5 นาที

3. จากนั้นจึงใส่น้ำลงในเครื่องผสมคอนกรีต เดินเครื่องเพื่อให้ส่วนผสม ปูนซีเมนต์ ไดอะตอมไมต์หรือบล็อกคอนกรีตมวลเบาที่ใช้แล้ว และน้ำคลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกันในเครื่องผสม เป็นเวลา 1.5 นาที สำหรับเนื้อคอนกรีตที่แห้งต้องเทเข้าเครื่องอัด และทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำพลาสติกมาห่อไว้รอบตัวอย่างโดยก่อนที่จะทำการห่อฉีดน้ำใส่ตัวอย่างทดสอบให้ชุ่มแล้วทำการห่อเป็นจำนวน 3 ชั้นเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำระเหยออก หลังจากนั้นนำเข้าบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25 °C และความชื้นที่ 50% R.H.
5. หลังจากการบ่มคอนกรีตแล้ว เมื่อคอนกรีตมีอายุครบตามที่กำหนดคือ 28 วัน จึงนำคอนกรีตมาวัดขนาดทั้ง 3 ก้อน และ นำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ทำการกวดหา กำลังอัดของตัวอย่าง



รูปที่ 11.1 การผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไมต์เผา

11.3.2 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาโดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และใช้ไดอะตอมไมต์เผาเป็นมวลรวมเบา

ในการเตรียมไดอะตอมไมต์สำหรับผสมคอนกรีตมวลเบา โดยจะใช้ไดอะตอมไมต์เป็นมวลรวมเบาแทนที่ หิน และทราย ในการผสมคอนกรีตมวลเบา โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. บดไดอะตอมไมต์ บดไดอะตอมไมต์ให้ละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานตามขนาดดังนี้

- 1) ไดอะตอมไมต์ขนาดเบอร์ 3/8 นิ้ว และเบอร์ 4
- 2) ไดอะตอมไมต์ขนาด เบอร์ 8

3) ไดอะตอมไมต์ขนาด เบอร์ 16

4) ไดอะตอมไมต์ขนาด ผ่านตะแกรงเบอร์ 16

ทำการแบ่งมวลออกเป็น

1) มวลรวมขนาดหยาบ ใช้สัญลักษณ์ CA ใช้ขนาด 3/8 นิ้ว และเบอร์ 4

2) มวลรวมขนาดกลาง ใช้สัญลักษณ์ MA ใช้ขนาดเบอร์ 8 และ 16

3) มวลรวมขนาดละเอียด ใช้สัญลักษณ์ FA ใช้ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 16

ต่อมาทำการแบ่งชุดทดสอบเพื่อการศึกษาถึงผลที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของขนาดละเอียดโดย

Series A คือ มีส่วนผสม CA 30% MA 70% FA 0%

Series B คือ มีส่วนผสม CA 30% MA 40% FA 30%

Series C คือ มีส่วนผสม CA 30% MA 0% FA 70%

2. ทำการเผาไไดอะตอมไมต์ นำไไดอะตอมไมต์ที่ผ่านการบดแล้วไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อศึกษาถึงผลที่เกิดจากการเผาไไดอะตอมไมต์ขนาดหยาบ (CA) ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

1) สัญลักษณ์ 25DE คือ ไม่ทำการเผา

2) สัญลักษณ์ 400DE คือ เผา FA 600 °C MA 600 °C CA 400 °C

3) สัญลักษณ์ 600DE คือ เผา FA 600 °C MA 600 °C CA 600 °C

4) สัญลักษณ์ 800DE คือ เผา FA 600 °C MA 600 °C CA 800 °C

5) สัญลักษณ์ 1000DE คือ เผา FA 600 °C MA 600 °C CA 1000 °C

โดยไไดอะตอมไมต์ที่ทำการบดให้มีขนาดต่างๆกันดังแสดงในรูปที่ 11.2 และเมื่อนำมาผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบาจะมีลักษณะของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 11.3



รูปที่ 11.2 ไไดอะตอมไมต์ที่ทำการบดแล้ว



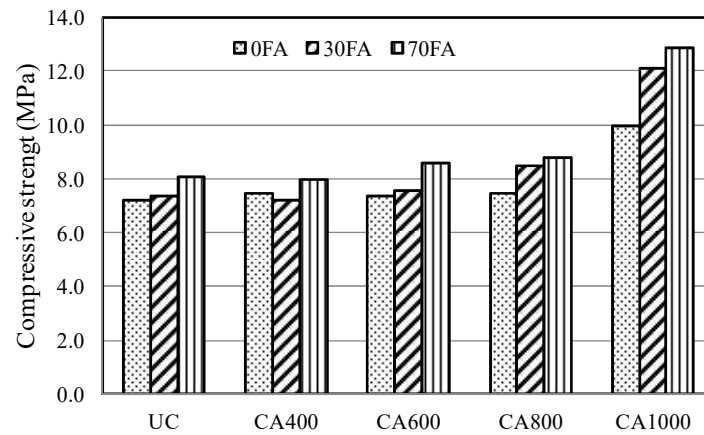
รูปที่ 11.3 ไดอะตอมไมต์ที่ทำการบดแล้ว ก. Series A, ข. Series B, ค. Series C

จากผลการใช้ไดอะตอมไมต์เผาเพื่อผลิตคอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง และทำการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไดอะตอมไมต์ขนาดหยาบ (CA) และปริมาณของขนาดละเอียดที่เพิ่มสูงขึ้น พบว่า คอนกรีตมวลเบามีความหนาแน่น 1000 – 1200 กก./ลบ.ม. ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณ 50 % (ความหนาแน่นคอนกรีตทั่วไปประมาณ 2400 กก./ลบ.ม.) มีกำลังรับแรงอัด 7.8 – 12.9 เมกะปาสคาล ดังแสดงในรูปที่ 11.4 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้งที่ผสมไดอะตอมไมต์ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการเผาไดอะตอมไมต์ขนาดหยาบ (CA) เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้โครงสร้างภายในของไดอะตอมไมต์มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น จึงทำให้คอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไมต์มีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย อีกทั้งเมื่อเผาไดอะตอมไมต์ขนาดละเอียด (FA) ที่อุณหภูมิ 600 °C จะทำให้เกิดปฏิกิริยา ปอซโซลานิกได้ดีจึงทำให้สามารถเพิ่มกำลังของคอนกรีตได้อีก (Pimraksa et al., 2009, Pimraksa et al., 2011, Yilmaz and Ediz, 2008) เมื่อพิจารณาถึงขนาดของมวลรวม เมื่อขนาดของมวลรวมขนาดละเอียด FA เพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัด เพิ่มขึ้น มวลรวมที่มีขนาดละเอียดจะมีพื้นที่ผิวที่มาก ทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อของคอนกรีตมีค่าสูงจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงด้วย (Husem, 2003)

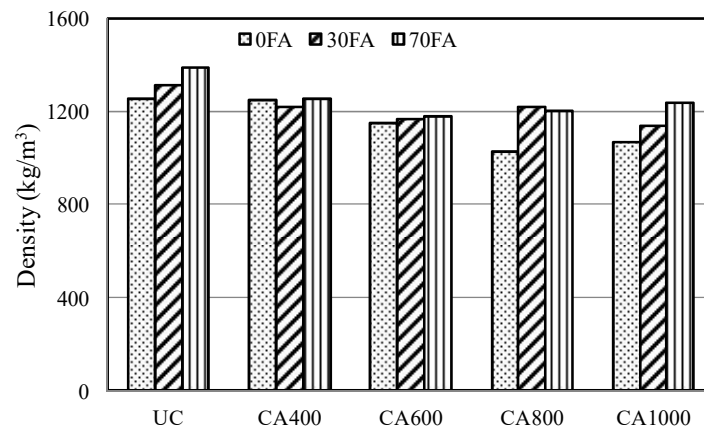
การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการเผาไดอะตอมไมต์ขนาดหยาบ (CA) ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับไดอะตอมไมต์ที่ไม่ทำการเผา เนื่องมาจากกระบวนการเผาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุของไดอะตอมไมต์ทำให้หน่วยน้ำหนักลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในรูปที่ 11.5 เมื่อเผาอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 600 °C จะมีแร่ดินเหนียวเป็นส่วนประกอบซึ่งทำให้ดูดน้ำมากและทำให้คอนกรีตมวลเบามีหน่วยน้ำหนักที่สูง และเมื่อปริมาณของขนาดละเอียด (FA) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหน่วยน้ำหนักของ FA, MA และ CA มีค่าดังนี้คือ 600, 425 และ 417 กก./ลบ.ม.

อีกทั้งผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไดอะตอมไมต์ขนาดหยาบ (CA) และปริมาณของขนาดละเอียด ที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำ ปริมาณโพรงอากาศ และค่าการเหนียวนำความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 11.6 จากผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาไดอะตอมไมต์ ส่งผลให้การดูดซึมน้ำและปริมาณ

โพรงอากาศ ของคอนกรีตมวลเบาไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากการผลิตตัวอย่างทดสอบโดยวิธีอัดแห้งนั้น ทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีปริมาณโพรงที่สูง จึงทำให้การดูดซึมน้ำที่อุณหภูมิต่างๆมีค่าที่ใกล้เคียงกัน



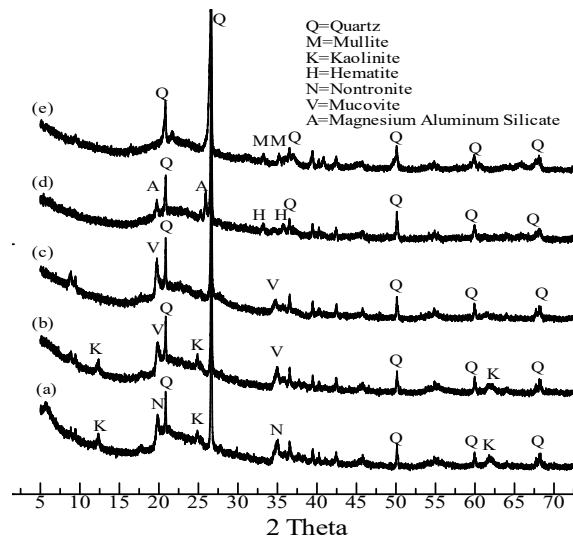
ก. กำลังรับแรงอัด



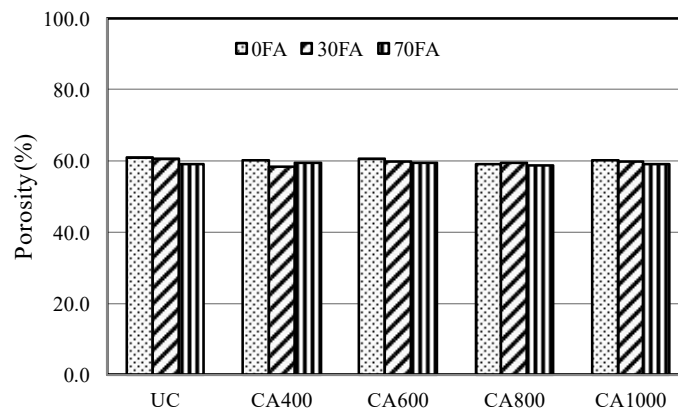
ข. ความหนาแน่น

รูปที่ 11.4 กำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเผาไดอะทอมไมต์ และเพิ่มปริมาณส่วนละเอียด ที่อายุ 28 วัน

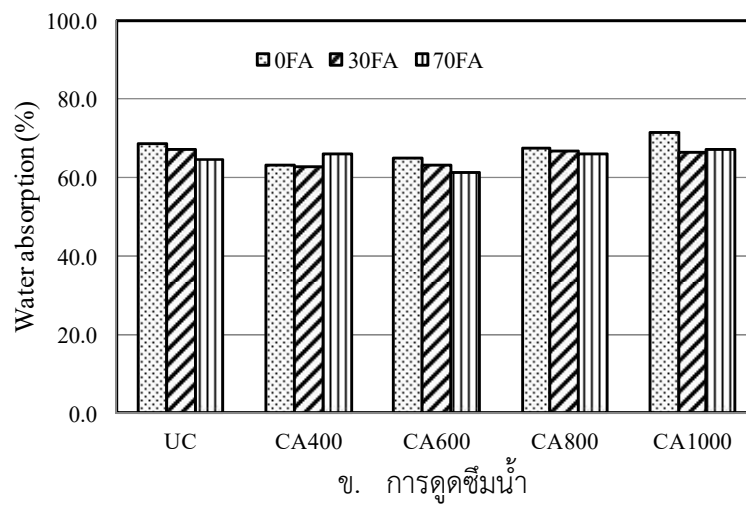
ผลของค่าการเหนี่ยวนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะทอมไมต์เผา เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าการเหนี่ยวนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องมาจากเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงเกิดการกำจัดโมเลกุลของน้ำและแร่ธาตุอื่นอีกทั้งยังส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาลดลงด้วย (Pimraksa et al., 2009) และเมื่อปริมาณส่วนละเอียด (FA) เพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าการเหนี่ยวนำความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ปริมาณของส่วนละเอียด (FA) ที่เพิ่มขึ้นจะเข้าไปอุดโพรงอากาศ และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมให้ดียิ่งขึ้นจึงส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

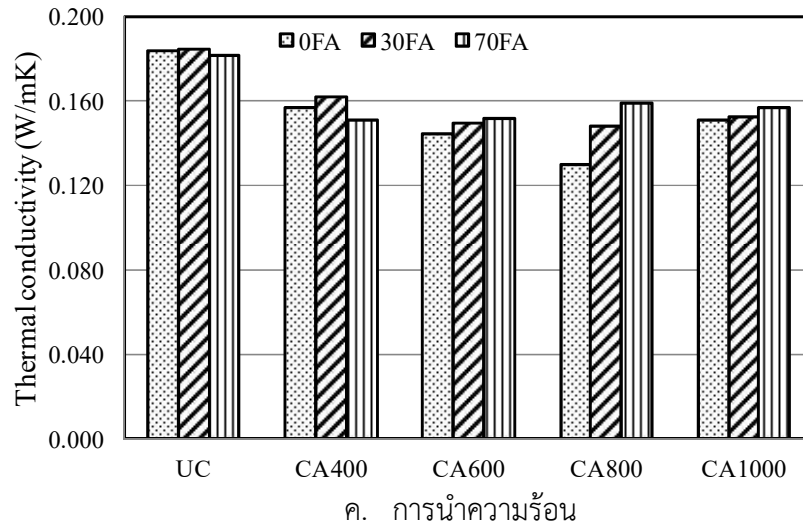


รูปที่ 11.5 กราฟ XRD ของไดอะตอมไมต์ (a) ไม่เผา, (b) เผาที่ 400 °C, (c) เผาที่ 600 °C, (d) เผาที่ 800 °C และ (e) เผาที่ 1000 °C



ก. ความพรุน





รูปที่ 11.6 การดูดซึมน้ำ ปริมาณโพรงอากาศ และค่าการเหนียวนำความร้อน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเผาไดอะตอมไมต์ และเพิ่มปริมาณส่วนละเอียด ที่อายุ 28 วัน

ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัด การนำความร้อน และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาดังแสดงในรูปที่ 11.7 พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นดังสมการ 11.2

$$f'_c = (1 \times 10^{-0.5}) T^2 - 0.0067T + 7.7068 \quad (11.2)$$

เมื่อ f'_c คือกำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)

T คืออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไดอะตอมไมต์ (องศาเซลเซียส)

ส่วนค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไมต์เผาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผาเช่นกัน ดังสมการที่ 11.3

$$k = 0.2236T^{-0.058} \quad (11.3)$$

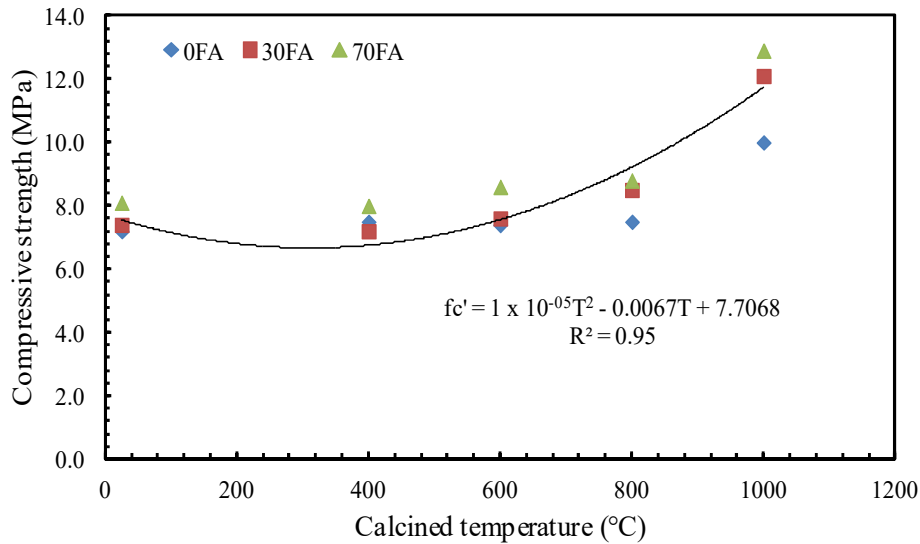
เมื่อ k คือค่าการนำความร้อน (วัตต์ / เมตร.เคลวิน)

T คืออุณหภูมิในการเผา (องศาเซลเซียส)

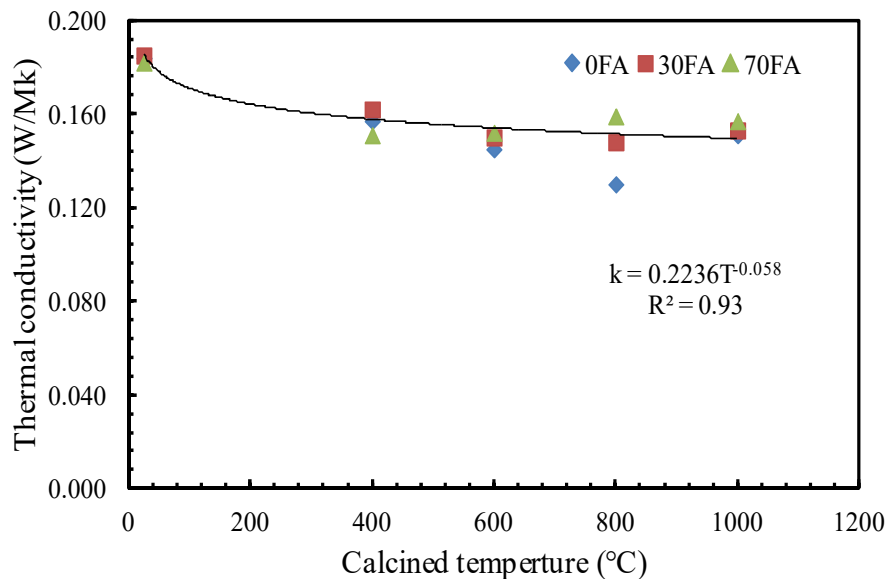
11.3.3 คุณสมบัติของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และใช้รีไซเคิลบล็อกมวลเบาเป็นมวลรวมเบา

จากการศึกษาใช้เศษคอนกรีตมวลเบาที่ใช้แล้ว (recycled lightweight concrete aggregate, RLCA) เป็นมวลรวมเบาในจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบา ระบบอัดแห้ง และทำการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 5, 10 และ 15 % โดยน้ำหนักของถ้ำลอย เพื่อพัฒนากำลังรับแรงอัดให้เพิ่มสูงขึ้น และทำการศึกษถึงการเปลี่ยนพารามิเตอร์ ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดได้แก่ อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสาน

ที่เป็นของแข็ง (L/FA) อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NHC) อุณหภูมิในการบ่ม (Temp) และอัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง (A/S) ได้ลักษณะเนื้อภายนอกและภายในเมื่อเปลี่ยนปริมาณมวลรวมดังแสดงในรูปที่ 11.8 และลักษณะเนื้อภายนอกและภายในเมื่อเปลี่ยนปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการพัฒนากำลังดังแสดงในรูปที่ 11.9



ก. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและอุณหภูมิในการเผา



ข. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและอุณหภูมิในการเผา

รูปที่ 11.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงอัด การนำความร้อน และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา
ไดอะแกรมไม้



ก. A/S of 1.6



ข. A/S of 1.8



ค. A/S of 2.0



ง. A/S of 2.2

รูปที่ 11.8 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้งที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และใช้รีไซเคิลบล็อกมวลเบาเป็นมวลรวมเบา เมื่อเปลี่ยนปริมาณมวลรวม

กำลังรับแรงอัดเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NHC) อุณหภูมิในการบ่ม (Temp) และอัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง (A/S) ดังแสดงในรูปที่ 11.10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้งที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และใช้รีไซเคิลบล็อกมวลเบาเป็นมวลรวมเบา มีค่าอยู่ระหว่าง 4.5-17.5 เมกะปาสกาล เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง ทำให้กำลังรับแรงอัดจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณของ RLCA เพิ่มขึ้น ซึ่ง RLCA จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเนื้อพื้นของจีโอโพลิเมอร์ จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาลดลง (Kockal et al., 2011; Xu et al., 2012; Yang and Huang, 1998) แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการเพิ่มปริมาณอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม และปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดให้เพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มสูงขึ้นเพราะว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน (geopolymerization) เพิ่มขึ้น (Noushini et al., 2016; Rovnaník, 2010; Soutsos et al., 2016) และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณต่ำๆ 5 โมลาร์ จะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ เพราะว่ามีสารละลายซิลิกา และอะลูมินา เพื่อนำมาใช้ในการเกิดพันธะในปริมาณที่ต่ำ (Rattanasak and

Chindaprasirt, 2009; Rattanasak et al., 2011; Hanjitsuwan et al., 2014) และเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่สูงมากเกินไปที่ 15 โมลาร์ จะมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนสูงเกินไปทำให้เกิดการตกตะกอนของอลูมิโนซิลิเกตเจล (aluminosilicate gel) ในระยะแรก ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง (Somna et al., 2011; Lee et al., 2001; Pimraksa et al., 2011)



ก. 0% OPC



ข. 5% OPC



ค. 10% OPC



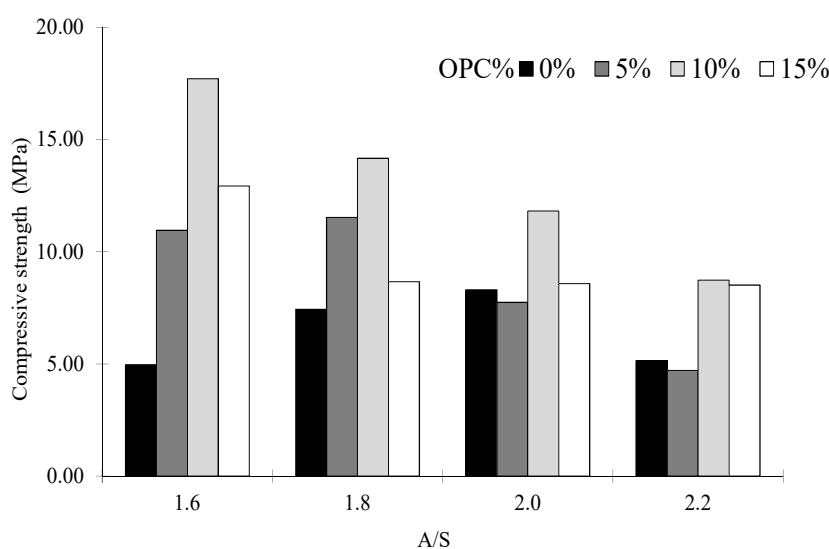
ง. 15% OPC

รูปที่ 11.9 จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้งที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และใช้รีไซเคิลบล็อกมวลเบาเป็นมวลรวมเบาเมื่อเปลี่ยนปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการพัฒนากำลัง

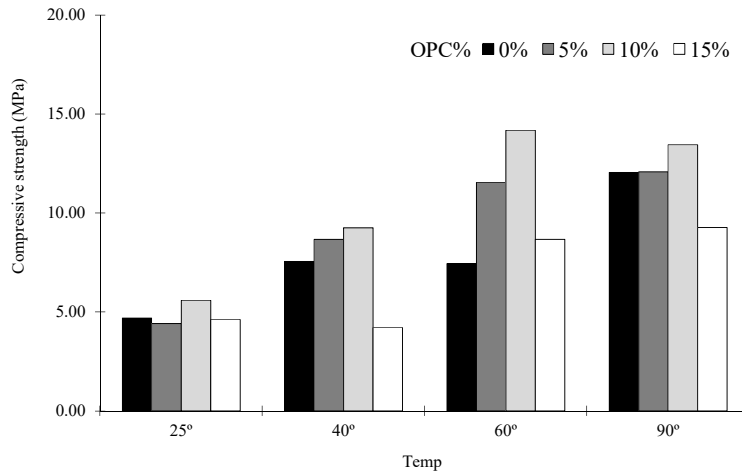
เมื่อพิจารณาผลกระทบของการเติมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง พบว่าเมื่อเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) เข้าไปในจีโอโพลิเมอร์ จะเกิดการรวมตัวของ OPC ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอยู่ในรูปของ C-S-H และ C-A-S-H ร่วมกับ ผลิตภัณฑ์ของ จีโอโพลิเมอร์ปกติ ส่งผลให้ กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 10 % (Somna et al., 2011) แต่เมื่อเติม OPC ในปริมาณที่มากขึ้น ที่ 15 % อีกทั้งร่วมกับอุณหภูมิในการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส ผลกระทบเชิงลบของการบ่มด้วยอุณหภูมิและมี

ปริมาณ OPC ที่สูงทำให้มีการลดลงของกำลังรับแรงอัดซึ่งเป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของผลิตภัณฑ์ไฮดรเจนด้วยการบ่มด้วยอุณหภูมิที่สูง (Temuujin et al., 2009; Pangdaeng et al., 2014) ดังแสดงในรูปที่ 11.11

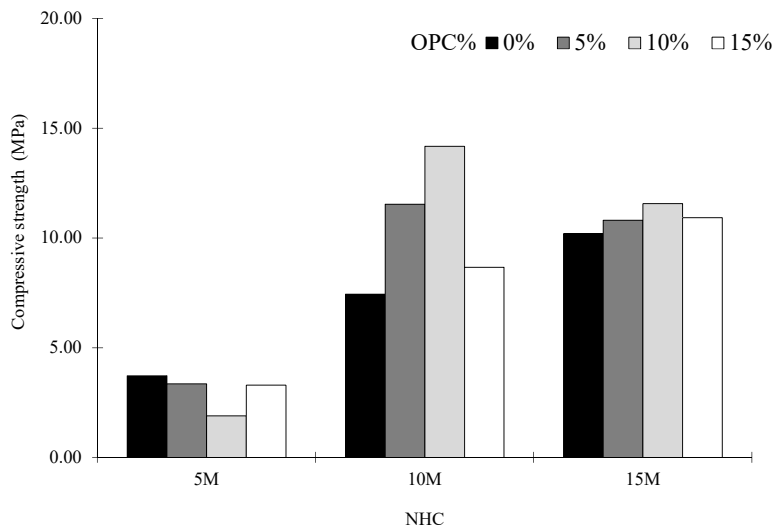
ผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง อัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 11.11 เมื่อทำการเปลี่ยนอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็งเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น และสูงสุดเมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานมีค่า เท่ากับ 1.6 แต่เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานสูงกว่า 1.6 ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ที่ปริมาณของเหลวต่างๆจะทำให้ส่วนผสมแห้ง ยากต่อการผสม การหล่อ และการอัดส่งผลให้กำลังอัดต่ำ ในทางตรงกันข้ามเมื่อส่วนผสมมีอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานสูงกว่า 1.6 จะมีปริมาณของเหลวมากเกินไป และทำให้ส่วนผสมไม่มีความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปของบล็อกมวลเบาในระบบอัด (Temuujin et al., 2009) เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NS/NH) ต่อกำลังรับแรงอัด พบว่าเมื่อ (NS/NH) เพิ่มขึ้นจาก 0.33 ถึง 1.00 ทำให้กำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อ (NS/NH) เพิ่มมากกว่า 1.00 ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง จะเห็นว่าสำหรับเถาลอยแคลเซียมสูงอัตราส่วน (NS/NH) เท่ากับ 1.00 จะทำให้ผลิตจีโอโพลีเมอร์ที่มีกำลังสูง (Chindaprasirt et al., 2007) และเมื่อปริมาณของโซเดียมซิลิเกตเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตเพิ่มสูงขึ้น (Hardjito and Rangan, 2004) อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณโซเดียมซิลิเกตยังทำให้ส่วนผสมมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น การทำงานได้ลดลงและทำให้การหล่อและการอัดขึ้นรูปเป็นไปด้วยความลำบาก (Sathonsaowaphak et al., 2009) อีกทั้ง เมื่อทำการเติม OPC เข้าไปแทนที่เถาลอย ทำให้การทำงานได้ลดลงการอัดขึ้นรูปเป็นไปด้วยความลำบาก จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงเช่นกัน



ก. เปลี่ยนอัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง



ข. เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม



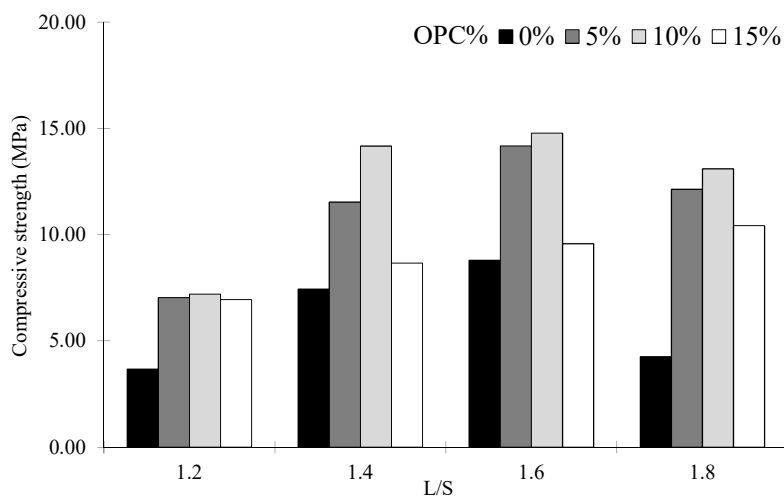
ค. เปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 11.10 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง ที่อายุ 28 วัน:

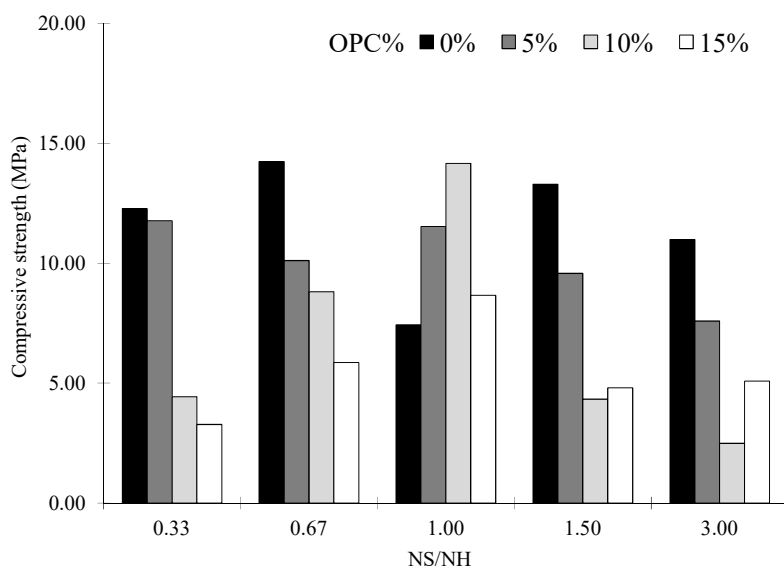
ก. อัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง (A/S) ข. อุณหภูมิในการบ่ม (Temp)

และ ค. ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ NHC

สำหรับการใช้งานของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตมวลเบา ระบบอัดแห้ง สามารถจัดเป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีความแข็งแรงปานกลางตาม ACI 213R-03 (ACI 213R-03, 2003) ซึ่งแนะนำความหนาแน่นที่ 800–1350 กก./ลบ.ม. และกำลังรับแรงอัดที่ 7.0–14.0 เมกกะปาสกาล ประกอบไปด้วย จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตบล็อกมวลเบาที่มีความหนาแน่น และกำลังค่อนข้างต่ำเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุน มีความหนาแน่นที่ 1300 กก./ลบ.ม. กำลังรับแรงอัดที่ 4.5 เมกกะปาสกาล, จีโอโพลีเมอร์คอนกรีตบล็อกมวลเบาที่มีกำลังอัดที่สูงขึ้นที่ ความหนาแน่นเท่ากับ 1400 กก./ลบ.ม. กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 14.5 เมกกะปาสกาล และจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตบล็อกมวลเบาที่มีกำลังอัดที่สูงที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1500 กก./ลบ.ม. กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 17.5 เมกกะปาสกาล



ก. เปลี่ยนอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง



ข. เปลี่ยนอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 11.11 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้ง ที่อายุ 28 วัน:

ก. เปลี่ยนอัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง

ข. เปลี่ยนอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

11.4 สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไมต์เผาแบบอัดแห้งสามารถสรุปได้คือ การใช้ไดอะตอมไมต์เผาทำเป็นมวลรวมเบาในการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ผสมไดอะตอมไมต์เผาแบบอัดแห้ง ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น และทำให้หน่วยน้ำหนัก และค่าการเหนียวนำความร้อนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ไดอะตอมไมต์ที่ไม่ทำการเผา และการใช้ไดอะตอมไมต์เผามีผลกระทบต่อ การดูดซึมน้ำ และปริมาณโพรงอากาศเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อปริมาณของส่วนละเอียดเพิ่มสูงขึ้นทำให้ กำลังรับแรงอัด หน่วยน้ำหนัก และค่าการเหนียวนำความร้อน เพิ่มสูงขึ้น แต่ทำให้ การดูดซึมน้ำ และปริมาณโพรงอากาศ ลดลง อุณหภูมิในการเผาขนาดละเอียด (FA) ควรเผาที่ 600 °C เพื่อที่จะให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี, เผา 600-800 °C สำหรับขนาดกลาง (MA) เพื่อให้เกิดทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานิก และให้แข็งแกร่งขึ้น และ 1000 °C สำหรับขนาดหยาบ (CA) เพื่อให้แข็งแกร่งและให้กำลังสูง

และจากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบบล็อกคอนกรีตมวลเบาที่ใช้แล้วสามารถสรุปได้คือ เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนมวลรวมต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่ออัตราส่วนของของเหลวต่อวัสดุประสานที่เป็นของแข็ง เพิ่มจาก 1.2-1.6 ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นแต่เมื่อเพิ่มเป็น 1.6-1.8 ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง เมื่ออัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพิ่มสูงขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพิ่มขึ้น 5 – 10 M ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพิ่มเป็น 10 – 15 M ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง อุณหภูมิในการบ่มเพิ่มสูงขึ้น ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากสมบัติของคอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาแบบอัดแห้งที่ได้นี้สามารถนำไปทำเป็นคอนกรีตมวลเบาและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานก่อผนังได้

11.5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาภายใต้คลัสเตอร์วัสดุหน้าที่พิเศษขั้นสูง มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. (RTA57800004)

11.6 เอกสารอ้างอิง

- Ahmmad, R., Jumaat, M.Z., Alengaram, U.J., Bahri, S., Rehman, M.A., Hashim, H.b. (2016). Performance evaluation of palm oil clinker as coarse aggregate in high strength lightweight concrete. **Journal of Cleaner Production**, 112(1), 566-74.
- ACI 213R-03. (2003). Guide for structural lightweight aggregate concrete. Farmington Hills: **American Concrete Institute**.
- ASTM C109/ C109M-13. (2013). Standard Test Method of Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). **Annual Book of ASTM Standard**. Vol.04.01.
- ASTM C138/C138M-14. (2014). Standard test of method for unit weight of mortar. **Annual Book of ASTM Standard**. Vol.04.01.

- ASTM C33/C33M-16. (2016). Standard Specification for Concrete Aggregates. **Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.02.**
- ASTM C 618. (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. **Annual Book of ASTM Standard. Vol.04.01.**
- Binici, H. (2013). Engineering properties of geopolymer incorporating slag, fly ash, silica sand and pumice. **Advances in Civil and Environmental Engineering**, **3**, 108-23.
- Chandra, D.S. (2005). Conference report. **Cement and Concrete Composites**. **27**(6), 738-41.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**. **29**(3), 224-9.
- Hardjito, D.S. and Rangan, B.V. (2004). On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. **Materials Journal**. **101**(6).
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. **Cement and Concrete Composites**, **45**, 9-14.
- Henry, M., Pardo, G., Nishimura, T., and Kato, Y. (2011). Balancing durability and environmental impact in concrete combining low-grade recycled aggregates and mineral admixtures. **Resources, Conservation and Recycling**, **55**(11), 1060-9.
- Kockal, N.U. and Ozturan, T. (2011). Strength and elastic properties of structural lightweight concretes. **Materials & Design**, **32**(4), 2396-403.
- Lee, W.K.W. and Van, D.J.S.J. (2002). The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **211**(2-3), 115-26.
- Nath, S.K., Maitra, S., Mukherjee, S., Kumar, S. (2016). Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**, **111**, 758-65.
- Noushini, A. and Castel, A. (2016). The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, **112**, 464-77.
- Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. **Materials & Design**, **53**, 269-74.

- Park, S.B., Seo, D.S., and Lee, J. (2005). Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio. **Cement and Concrete Research**, **35**(9), 1846-54.
- Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridditirud, C., Hatanaka, S., and Chindaprasirt, P. (2015). High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material. **Construction and Building Materials**, **98**, 482-8.
- Pimraksa, K., Chindaprasirt, P., Rungchet, A., Sagoe-Crentsil, K., and Sato, T. (2011). Lightweight geopolymer made of highly porous siliceous materials with various Na₂O/Al₂O₃ and SiO₂/Al₂O₃ ratios. **Materials Science and Engineering**, **528**(21), 6616-23.
- Posi, P., Lertnimoolchai, S., Sata, V., and Chindaprasirt, P. (2013). Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. **Construction and Building Materials**, **47**, 896-901.
- Posi, P., Teerachanwit, C., Tanutong, C., Limkamoltip, S., Lertnimoolchai, S., Sata, V., et al. (2013). Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block. **Materials & Design**, **52**, 580-6.
- Posi, P., Thongjapo, P., Thamultree, N., Boontee, P., Kasemsiri, P., Chindaprasirt, P. (2016). Pressed lightweight fly ash-OPC geopolymer concrete containing recycled lightweight concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, **127**, 450-6.
- Rao, A., Jha, K.N., and Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, **50**(1), 71-81.
- Rattanasak U, Chindaprasirt P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. **Minerals Engineering**. **22**(12), 1073-8.
- Rattanasak, U., Pankhet, K., and Chindaprasirt, P. (2011). Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, **18**(3), 364-9.
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, **24**(7), 1176-83.
- Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., and Pimraksa, K. (2009). Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of Hazardous Materials**, **168**(1), 44-50.

- Shi, C., Jiménez, A.F., and Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, **41**(7), 750-63.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., and Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Fuel**, **90**(6), 2118-24.
- Soutsos, M., Boyle, A.P., Vinai, R., Hadjierakleous, A., and Barnett, S.J. (2016). Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**, **110**, 355-68.
- Temuujin, J., Riessen, V.A., and Williams, R. (2009). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. **Journal of Hazardous Materials**, **167**(1-3), 82-8.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T., and Yildiz, A. (2007). Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. **Building and Environment**, **42**(2), 584-90.
- Xu, Y., Jiang, L., Xu, J., and Li, Y. (2012). Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. **Construction and Building Materials**, **27**(1), 32-8.
- Yang, C.C. and Huang, R. (1998). Approximate Strength of Lightweight Aggregate Using Micromechanics Method. **Advanced Cement Based Materials**, **7**(3-4), 133-8.
- Zhang, Z., Provis, J.L., Reid, A., and Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. **Construction and Building Materials**, **56**, 113-27.
- Zhang, Z., Provis, J.L., Zou, J., Reid, A., and Wang, H. (2016). Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture. **Cement and Concrete Research**, **85**, 163-73.

ดัชนี

ก

การก่อตัว	6, 20, 22, 24-25, 29, 48, 67, 71, 138, 140-141
การกัดกร่อน	34, 84, 113, 144
การชะละลาย	5, 42, 140, 177
การดูดกลืน	105, 126
การทำปฏิกิริยาลูกโซ่	140, 167
การละลาย	114
การตกตะกอน	178
การสึกกร่อน	7, 61-62, 65-66, 68

ค

ความทนทานของคอนกรีต	34, 65, 83
โครงสร้างจุลภาค	20-21, 117-119, 179
ความเข้มข้น	5, 9, 105, 129, 140, 145, 166, 176-178, 180, 182
คอนกรีตพูน	7, 10

จ

จีโอโพลิเมอร์เพสต์	8, 10-9, 116, 122
จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต	166-167, 182
จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์	141, 143

ช

ซีเมนต์คอมโพสิต	113-115
ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผสม	1-3, 7, 81, 84

ด

ไดอิเล็กตริก	95-97, 103-107
ดินขาวเผา	36, 63, 138, 167

ถ

ถั่วแกลบ	2-5, 9, 37, 167
ถั่วขนอ้อย	33-37, 51-52
ถั่วปาล์มน้ำมัน	2-3, 9, 36-37, 48-49, 53
ถั่วลยแคลเซียมสูง	5, 9, 179
ถั่วลยแม่เมาะ	3, 5, 8, 10, 139-140
ถั่วหนัก	2-3, 9, 66-70, 139
ถั่วแกลบ	2-5, 9, 37, 167

น

นาโนคาร์บอน	9-10, 127-128, 131
-------------	--------------------

บ

เบไลต์ซีเมนต์	1
ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	22-24, 26-27, 36, 38, 50, 149, 156
ปฏิกิริยาปอซโซลาน	9, 37-38, 49

ว

วัสดุเหลือทิ้ง	33-34, 113, 137-138
วัสดุทางเลือก	137-138
วัสดุปอซโซลาน	2-3, 5, 9, 36-39, 48-49, 63, 66, 74, 81-82

ศ

เศษวัสดุ	57, 65, 69, 74
----------	----------------

ส

สารผสมเพิ่ม	63
-------------	----

อ

องค์ประกอบทางเคมี	3, 20-22, 25, 36-7, 40-41, 90, 140, 167
-------------------	---

รายชื่อผู้ร่วมโครงการวิจัย

1. ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ (Prinya Chindaprasirt) หัวหน้าโครงการ
สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
โทรศัพท์ (043) 202-355 E-mail prinya@kku.ac.th
2. รศ.ดร.วิทยา อมรภิจำรุง (Vittaya Amornkitbamrung) ผู้ร่วมวิจัย
สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
โทรศัพท์ (043) 009-700 ext 42194 E-mail vittaya@kku.ac.th
3. รศ.ดร.อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ (Ubolluk Rattanasak) ผู้ร่วมวิจัย
สังกัด ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
โทรศัพท์ (038) 103-066 E-mail ubolluk@buu.ac.th
4. ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ (Theerawat Sinsiri) ผู้ร่วมวิจัย
สังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
โทรศัพท์ (044) 244-420-1 E-mail sinsiri@ sut.ac.th
5. ผศ.ดร.เกศรินทร์ พิมรักษา (Kedsarin Pimraksa) ผู้ร่วมวิจัย
สังกัด ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
โทรศัพท์ (053) 943-401 E-mail kedsarin.p@cmu.ac.th
6. รศ.ดร.สำเริง รักซ้อน (Sumrerng Rukzon) ผู้ร่วมวิจัย
สังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
โทรศัพท์ (02) 497-8573 E-mail rerng197@rmutp.ac.th
7. รศ.ดร.วันชัย สะตะ (Vanchai sata) ผู้ร่วมวิจัย
สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
โทรศัพท์ (043) 202-846-7 ext 127 E-mail vancsa@kku.ac.th
8. รศ.ดร.อรอนนท์ ชัยพานิช (Arnon Chaipanich) ผู้ร่วมวิจัย
สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
โทรศัพท์ (053) 943-367 E-mail arnonchaipanich@gmail.com

9. ผศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร (Weerachart Tangchirapat) ผู้ช่วยวิจัย
 สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 โทรศัพท์ (02) 470 9322 E-mail weerachart.tan@kmutt.ac.th

10. รศ.ดร.สุปรีย์ พินิจสุนทร (Supree Pinitsoontorn) ผู้ช่วยวิจัย
 สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 โทรศัพท์ (043) 202-222 E-mail psupree@kku.ac.th

11. ผศ.ดร.ประสิทธิ์ ทองใบ (Prasit Thongbai) ผู้ช่วยวิจัย
 สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 โทรศัพท์ (043) 202-222 E-mail pthongbai@kku.ac.th

12. ดร.ปริญญา สายน้ำทิพย์ (Prinya Sainamthip) ที่ปรึกษาโครงการ
 สังกัด Siam Research and Innovation Co., Ltd.
 โทรศัพท์ (036)273-152 E-mail prinyas@scg.co.th

13. มนสิข สาริกภูริ (Manasit Sarigaphuti) ที่ปรึกษาโครงการ
 สังกัด Siam Research and Innovation Co., Ltd.
 โทรศัพท์ (036)273-152 E-mail manasits@scg.co.th

14. ศักดิ์ประยุท สินธุภิญโญ (Sakprayut Sinthupinyo) ที่ปรึกษาโครงการ
 สังกัด Siam Research and Innovation Co., Ltd.
 โทรศัพท์ (036)273-152 E-mail sakprays@scg.co.th

16. ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (Chai Jaturapitakkul) ที่ปรึกษาโครงการ
 สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 โทรศัพท์ (02) 470-9314 E-mail chai.jat@kmutt.ac.th

17. ศ.ดร.ปิติ สุขนธสุขกุล (Piti Sukontasukkul) ที่ปรึกษาโครงการ
 สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 โทรศัพท์ (02)9132500 (8621-27) E-mail piti.kmutnb@gmail.com