



รายงานโครงการวิจัย

เรื่อง

การใช้ประโยชน์จากพลาสติกรีไซเคิลเป็นส่วนผสมในคอนกรีต
Utilization of Recycled Plastic as Mixture in Concrete

คณะวิจัย

ผศ. ดร.นันทชัย ชูศิลป์

ผศ. ดร.จุฑามาศ ลักษณะกิจ

ดร. วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ

งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2561

(งบบูรณาการวิจัยและนวัตกรรม รหัส 8661)

รายงานโครงการวิจัย

เรื่อง

การใช้ประโยชน์จากพลาสติกรีไซเคิลเป็นส่วนผสมในคอนกรีต
Utilization of Recycled Plastic as Mixture in Concrete

คณะวิจัย

ผศ. ดร.นันทชัย ชูศิลป์

ผศ. ดร.จุฑามาศ ลักษณะกิจ

ดร. วิศิษฐ์ศักดิ์ ทับยัง

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ

งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติในสภาวะที่เป็นของเหลวและที่เป็นของแข็งของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล แต่ละอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ผสมกับเม็ดพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) ที่ผ่านการใช้งานแล้วและนำมาหลอมเป็นเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) 3.20 mm มาแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีตใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) 10.40 mm ผสมกับมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด ก่อนนำมาทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ทุกอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตใช้ระยะเวลาการบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน

ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลพบว่าการเพิ่มขึ้นของร้อยละของเม็ดพลาสติกส่งผลให้มอร์ตาร์มีการไหลแผ่ได้ดีขึ้นแต่ในทางกลับกันหน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงทุกอัตราส่วนผสม

ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลพบว่ามีปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มขึ้นการไหลแผ่ของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณซีเมนต์มากกว่า 500 kg/m^3 ลดลงแต่ในทางกลับกันค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า 500 kg/m^3 การไหลแผ่และความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนควบคุมเห็นได้ชัดว่าคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลมีการสูญเสียค่าการยุบตัวที่เร็วกว่า การสูญเสียค่าการยุบตัวเกิดขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล สำหรับค่าการไหลผ่านอุปสรรคที่ทดสอบโดยวิธี L-box ไม่พบรูปแบบที่ชัดเจน แต่ผลการวัดค่าการไหลผ่านอุปสรรคโดยวิธี J-ring พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเม็ดพลาสติก

ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลพบว่าการกำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงตามการเพิ่มขึ้นของร้อยละของเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ทั้งนี้พบรอยร้าวขนาดเล็กรอบเม็ดพลาสติกกระจายอยู่ทั่วหน้าตัดคอนกรีต รอยร้าวนี้เกิดจากการที่เม็ดพลาสติกกรีไซเคิลมีผิวลื่นทำให้การยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เฟลทกับเม็ดพลาสติกลดลง สำหรับผลการทดสอบความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงพบว่าเมื่อปริมาณเม็ดพลาสติกมากขึ้นความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตลดลง ทำให้ความเร็วคลื่นเสียงความถี่สูงลดลงสัมพันธ์กับกำลังอัดที่มีค่าลดลงตามไปด้วย สำหรับผลทดสอบการต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลพบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่

ระหว่าง 5-10 kΩcm ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C1760 จัดว่าเป็นคอนกรีตที่มีอัตราการกัดกร่อนสูง ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่

สำหรับความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เวลา 10-14 ชั่วโมง หลังจากผสมคอนกรีตแล้วเสร็จเช่นเดียวกับอัตราส่วนควบคุม แต่ค่าอุณหภูมิสูงสุดจะลดลงเมื่อปริมาณเม็ดพลาสติกมากขึ้นเนื่องจากเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ สำหรับคุณสมบัติการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ พบว่าค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของทุกอัตราส่วนผสมมีค่าอยู่ระหว่าง 1,000-2,000 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C1202 จัดว่าเป็นคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำ ในขณะที่อัตราส่วนควบคุมมีค่าต่ำกว่า 1,000 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก

จากการทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบโดยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithms) ที่ทำให้ผลรวมต้นทุนรวมน้อยที่สุด โดยทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 320 kg/m^3 เพื่อหาค่าตอบที่เหมาะสมของร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบในช่วง 0-20 โดยใช้ค่าหน่วยน้ำหนักเป็นขอบเขตในการค้นหาค่าตอบ พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 1700 kg/m^3 และ 1600 kg/m^3 เท่ากับร้อยละ 3 11 และ 18 ตามลำดับ และให้ค่าผลรวมต้นทุนเท่ากับ 1,476.73 1,641.38 และ 1,785 บาท ตามลำดับ และจากคำตอบดังกล่าวพบว่าการเพิ่มการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบร้อยละ 1 จะทำให้ต้นทุนรวมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.3 และทำให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันลดลงเฉลี่ยร้อยละ 4.5 อย่างไรก็ตามการเพิ่มการแทนที่ซีเมนต์ทำให้คอนกรีตน้ำหนักเบาลงเฉลี่ยร้อยละ 0.77

จากการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนของห้องน้ำสำเร็จรูปขนาดเล็กและบล็อกคอนกรีตประสานโดยใช้คอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบที่ทางผู้วิจัยได้จัดทำขึ้น สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบเหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็กและโครงสร้างชนิดไม่รับแรง เพราะมีข้อจำกัดด้านแรงยึดเหนี่ยว การใช้ประโยชน์จากคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบไม่เพียงแต่เป็นการนำพลาสติกซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ยังเป็นทางเลือกสำหรับงานก่อสร้างต้นทุนต่ำอีกด้วย

คำสำคัญ : เม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบ, คอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกไร้ซิลิกาเคลือบ, คอนกรีตสด, คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว, อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

Abstract

This research aims to study properties of fresh and hardened mortar and concrete with recycled plastic mixtures. Each mixtures of mortar fabricated from the High Density Polyethylene (HDPE) recycled plastic, which has the average particle size 3.20 mm and using as the replacements of fine aggregate with 0, 20, 40, 60, 80, and 100 percent by volume of fine aggregate. For mixtures of concrete made with coarse aggregate, which has the average particle size 10.40 mm, mortar mixed with the percentages of recycle plastic replacement of 0, 5, 10, 15, and 20 by weight of fine aggregate. Before testing the mortar and concrete properties, all mixtures were cured 3, 7, 14, and 28 days.

It was found for the test of mortar mixtures that, an increase in the percentage of recycled plastic had a direct consequence in increasing of flow-ability, conversely had an inverse contribution on the unit weight and modulus of elasticity for all curing age.

It was found for the test of fresh concrete mixtures that, an increasing of percentage of recycled plastic for mixtures with high volume of cement exceeding 500 kg/m^3 contributed to the decreasing of flow-ability, while the gradual rise of viscosity. However, for low volume of cement less than 500 kg/m^3 the flow-ability and viscosity remained stable. It can be highlighting that, concrete with recycled plastic mixtures presented the higher slump loss comparing with control mixture. The slump loss increased faster depended on the increasing of recycled plastic replacements. For passing ability, the results from L-box test found an unclear pattern, but the results from J-ring test showed the rose trend depend on the higher percent of recycled plastic.

The results of hardened concrete test exposed that, compressive strength and modulus of elasticity slightly dropped depended on the higher percent of recycled plastic. As far as, a spread of small creak around recycled plastic particle was obtained in concrete. This is because a consequence of smooth surface that caused a weaker bonding between cement paste and recycled plastic particles. The results of homogeneous properties of the hardened concrete using Ultrasonic Pulse Velocity test illustrated that the higher percent of recycled plastic caused a heterogeneous of hardened concrete. For electrical resistivity, the results showed that the electrical resistivity were in the range of 5-10 $\text{k}\Omega\text{cm}$ which means that concrete has a high corrosion rate based on ASTM C1760. So that, these concrete were not suitable for large-scale reinforced concrete structures.

For the heatdratration reaction in concrete, the results verified that the highest temperature was found during 10-14 hours after completed mixing as same as the control mixture. The temperature dropped when percentage of recycled plastic increase since it has a low thermal conductivity coefficient. The outcomes of chloride ion penetration presented that, the chloride ion penetration of all mixtures were ranged of 1,000-2,000 Conlomb which means that concrete has a high resistance to chloride ion penetration based on ASTM C1202 meanwhile the control mixture has a lower range of not exceeding 1,000 Conlomb which is a very chloride ion penetration.

Genetic algorithm (GA) is used as a method of optimizing recycled plastic concrete mix proportioning for a given unit weight to minimize total cost solutions. Three examples of concrete mixture proportion at cement 320 kg/m³ by volume are used to search the optimal solutions of the percentage of the recycled plastic replacement in the range of 0–20. The given unit weights are used as the searching constrains. The results show that the optimal solutions at 1800 kg/m³, 1700 kg/m³ and 1600 kg/m³ by unit weight are 3%, 11% and 18, respectively. The minimize total cost solutions are provided at 1,476.73-baht, 1,641.38-baht and 1,785-baht, respectively. Moreover, the results also show that the percentage of total cost is reduced 1.3% on average as the recycled plastic replacement increased 1%, the percentage of strength of concrete at the age of 28 days is reduced 4.5% on average as the recycled plastic replacement increased 1%, but the higher recycled plastic content mixes yielded lower unit weight throughout.

The consequential outcomes of design and production of prefabricated structures of portable toilet and interlocking concrete blocks using concrete with recycled plastic created by researchers. It can be summarizing that, concrete with recycled plastic is appropriate for small-scale reinforced concrete structure and unloading structure since a limitation of bonding. The utilization of concrete with recycled plastic, therefore, not only help to make effective use of waste materials but also can be an alternative for low-cost construction.

Keywords: recycled plastic particle, concrete with recycled plastic, fresh concrete, hardened concrete, optimization

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนสนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย และสำนักงานวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยประเภททุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2561 ให้งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย ณ การประชุมวิชาการระดับชาติ และอำนวยความสะดวกให้กับผู้วิจัย

ขอขอบคุณ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมโยธานางสาวกมลชนก ว่างคงบุญ คง นายกษิต์เดช อยู่ประเสริฐ นายอภิสิทธิ์ ชูช่วยคำ นายอานัส หมดออด นายภาณุวัฒน์ ทองขาว นางสาวจุฬาลักษณ์ ชุนอักษิต นายภาณุวัฒน์ ทองแกมแก้ว นางสาวอัจฉราภรณ์ บังหมัด นางสาวรินรดา ขาวจันทร์คง นายแหวอาแซ บินมามะ นายณัฐวุฒิ คำชู และบุคลากรสาขาวิศวกรรมโยธาทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงเป็นรายงานฉบับสมบูรณ์

คณะผู้วิจัย

สิงหาคม 2562

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 จุดประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของโครงการ	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 พลาสติกคืออะไร	7
2.2 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)	9
2.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์โพลีเมอร์	10
2.4 ประเภทและการใช้งาน	12
2.5 พลาสติกที่ใช้มากในปัจจุบัน	14
2.6 พลาสติกและสิ่งแวดล้อม	17
2.7 ขั้นตอนรีไซเคิลพลาสติก	20
2.8 ตัวอย่างเม็ดพลาสติก	22
2.9 เทคนิคการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม (Optimization techniques)	23
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	43
3.1 การเตรียมวัสดุเพื่อการทดสอบ	43
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบคุณสมบัติคอนกรีต	45
3.3 การศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุ	48
3.4 การออกแบบอัตราส่วนผสมมอร์ต้าและคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคล	49
3.5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย	52
3.6 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้า	54
3.7 การทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยพลาสติกกรีซเคล	54
3.8 การทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่ผสมด้วยพลาสติกกรีซเคล	57
บทที่ 4 ผลการวิจัย	65
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	65
4.2 คุณสมบัติของมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคล	67
4.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก	75
4.4 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วผสมเม็ดพลาสติก	86
4.5 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลใช้วิธีเชิงพันธุกรรม	103
4.6 การใช้ประโยชน์จากคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก	107
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	119
5.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	119
5.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคล	119
5.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก	119
5.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วผสมเม็ดพลาสติก	120
5.5 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลใช้วิธีเชิงพันธุกรรม	120
5.6 การใช้ประโยชน์จากคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก	121

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	122
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	126
ภาคผนวก ข ตารางแสดงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล	129
ภาคผนวก ค ตารางการทดสอบคอนกรีตสด	190
ภาคผนวก ง ตารางการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วผสมเม็ดพลาสติก	193

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต	14
3.1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลโดยปริมาตร	50
3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลโดยปริมาตร	51
4.1 ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และขนาดอนุภาคของวัสดุ	65
4.2 การไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล	67
4.3 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	68
4.4 กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	71
4.5 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน	73
4.6 เกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547	75
4.7 ผลการทดสอบหาค่าการทรุดตัว	76
4.8 ผลการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน	83
4.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล	89
4.10 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ระยะบ่มต่าง ๆ	92
4.11 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ GA	106
4.12 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลใช้วิธีเชิงพันธุกรรม ที่หน่วยน้ำหนักต่าง ๆ	107

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ขยะพลาสติกจากผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ	2
1.2	แผ่นผนัง TPR	4
1.3	แนวคิดการนำพลาสติกรีไซเคิลมาใช้เป็นถนน	4
2.1	ผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยพลาสติก	7
2.2	Copolymers	8
2.3	เม็ดพลาสติกและผลิตภัณฑ์จากพลาสติก	8
2.4	การกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบ	9
2.5	โพลีเอธิลีน	10
2.6	ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่	11
2.7	ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น	11
2.8	เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)	12
2.9	เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)	13
2.10	โพลีเอทธิลีนเทเรฟทาเลต (Poly Ethylene Terephthalate, PET)	14
2.11	โพลีเอทธิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)	15
2.12	โพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly Vinyl Chloride, PVC)	15
2.13	โพลีเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)	16
2.14	โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)	16
2.15	โพลิสไตรีน (Polystyrene, PS)	17
2.16	พลาสติกอื่น ๆ	17
2.17	โรงงานรีไซเคิลพลาสติก	21
2.18	ลักษณะรูปร่างของเม็ดพลาสติกรีไซเคิล	22
2.19	แสดงกระบวนการทำงานของเจเนติกอัลกอริธึมส์	27
2.20	แสดงการเข้ารหัสโครโมโซมแบบ Bit String	28
2.21	ตัวอย่างการทำครอสโอเวอร์แบบ 1 จุดโดยมีตำแหน่งของครอสซิงไซด์เท่ากับ 7	33
2.22	แสดงตัวอย่างการทำมิวเตชันในตำแหน่งที่ 3 ของโครโมโซม	34
2.23	ผลงานนวัตกรรมวัสดุก่อสร้างของขยะพลาสติกของบริษัท Affresol	37
3.1	มวลรวมหยาบ	43
3.2	ทรายแม่น้ำ	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.3	เม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล	44
3.4	Dial gage ความละเอียด 0.01 mm	45
3.5	ชุด Vernier Caliper	45
3.6	ชุด Data logger	46
3.7	เครื่องผสมมอร์ต้า	46
3.8	เครื่องผสมคอนกรีต	47
3.9	แบบหล่อมอร์ต้า (Cube 50 x 50 x 50 mm)	47
3.10	แบบหล่อคอนกรีต(Cylinder Ø 100x200 mm)	48
3.11	แท่งตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ (Cube 50 × 50 × 50 mm)	52
3.12	แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (Cylinder Ø 100 x 200 mm)	52
3.13	ก้อนตัวอย่างคอนกรีตทดสอบความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	53
3.14	แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์	53
3.15	เครื่องมือทดสอบ Slump flow	55
3.16	เครื่องมือทดสอบ V-funnel	55
3.17	เครื่องมือทดสอบ L-box	56
3.18	ระยะ H1 และ H2 ของเครื่องมือทดสอบ L-box	56
3.19	เครื่องมือทดสอบ J-ring	57
3.20	เครื่องทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้า	58
3.21	เครื่องทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต	59
3.22	เครื่องทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	60
3.23	เครื่องมือทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก	61
3.24	เครื่องมือทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต	62
3.25	ทดสอบหาอุณหภูมิความร้อน	63
3.26	ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบหาอุณหภูมิความร้อน	63
3.27	เครื่องมือทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต	64
4.1	ค่าการกระจายขนาดส่วนคละของมวลรวม	66
4.2	หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์กับปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซเคลิล ที่อายุบ่ม 14 วัน	69
4.4 กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ	72
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิลกับปริมาณ เม็ดพลาสติกกรีซเคลิลที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน	72
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์กับปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซเคลิลที่ ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน	74
4.7 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด	76
4.8 การไหลแผ่ของคอนกรีตสด	77
4.9 ผลการทดสอบการเสีรูปร่างของคอนกรีตสดที่ C560 และ C660	78
4.10 ผลการทดสอบการเสีรูปร่างของคอนกรีตสดที่ C320	78
4.11 ผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด	79
4.12 การทดสอบความหนืดของคอนกรีตสด	80
4.13 ผลการทดสอบความหนืดของคอนกรีตสดที่ C560 และ C660	81
4.14 ผลการทดสอบความหนืดของคอนกรีตสดที่ C320	81
4.15 การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน	82
4.16 ผลการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนของคอนกรีตสด	83
4.17 การทดสอบการไหลแผ่ผ่านสิ่งกีดขวางซี่เหล็ก	84
4.18 การไหลแผ่ผ่านสิ่งกีดขวางซี่เหล็กของคอนกรีตสดที่มี C560 และ C660	85
4.19 การไหลแผ่ผ่านสิ่งกีดขวางซี่เหล็กของคอนกรีตสดที่ C320	85
4.20 หน้าตัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติก (ก) ภาพขนาดปกติ (ข) ภาพขยาย 800 เท่า	87
4.21 หน้าตัดของคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติก (ก) ภาพขนาดปกติ (ข) ภาพขยาย 800 เท่า	87
4.22 ภาพขยายขนาด 800 เท่าของคอนกรีต (ก) ผสมเม็ดพลาสติก (ข) ไม่ผสมเม็ดพลาสติก	87
4.23 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 7 วัน	90
4.24 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 14 วัน	90
4.25 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 21 วัน	91
4.26 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 28 วัน	91

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 7 วัน	93
4.28 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 14 วัน	93
4.29 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 21 วัน	94
4.30 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 28 วัน	94
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสม เม็ดพลาสติกกรีซไคเซล	95
4.32 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C560 - 0.4 บ่มที่ 7 วัน	96
4.33 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C560 - 0.4 บ่มที่ 14 วัน	97
4.34 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C560 - 0.4 บ่มที่ 28 วัน	97
4.35 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C660 - 0.4 บ่มที่ 7 วัน	98
4.36 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C660 - 0.4 บ่มที่ 14 วัน	98
4.37 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C660 - 0.4 บ่มที่ 28 วัน	99
4.38 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C320 - 0.5 บ่มที่ 28 วัน	99
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มกับการต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสม เม็ดพลาสติก	100
4.40 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคอนกรีตของ C560 และ C660 ที่ใช้ W/C = 0.40	101
4.41 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคอนกรีตของ C320 ที่ใช้ W/C = 0.50	102
4.42 ค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเซล	103
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซไคเซลและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสม เม็ดพลาสติกกรีซไคเซลที่ทุกอัตราส่วนผสม และอายุบ่มเท่ากับ 28 วัน	105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลและ StrengthRPPP/StrengthRPPP =0 ของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่ทุกอัตราส่วนผสม และอายุบ่มเท่ากับ 28 วัน	105
4.45 ลักษณะอิฐบล็อก นาโน	108
4.46 ตัวอย่างการติดตั้งบล็อกนาโนในลักษณะต่าง ๆ	109
4.47 ต้นแบบอิฐบล็อก STUR	110
4.48 แบบจำลองลักษณะการติดตั้งอิฐบล็อก STUR ในรูปแบบต่าง ๆ	110
4.49 ออกแบบอิฐบล็อก STUR ครั้งที่ 1	111
4.50 ออกแบบอิฐบล็อก STUR ครั้งที่ 2	111
4.51 ออกแบบอิฐบล็อก STUR ครั้งที่ 3	112
4.52 ลักษณะการติดตั้งอิฐบล็อก STUR ในรูปแบบต่าง ๆ	113
4.53 แบบจำลองชิ้นส่วนทั้งหมดของห้องน้ำสำเร็จรูป	114
4.54 แบบจำลองการประกอบและติดตั้งห้องน้ำสำเร็จรูป	115
4.55 การประกอบและติดตั้งห้องน้ำสำเร็จรูป	116

คำอธิบายสัญลักษณ์

ρ_{si}	เป็นพื้นที่สำหรับโครโมโซมที่ i บนวงล้อ
f_i	เป็นค่าพิตเนสของโครโมโซมที่ i
$\sum f_i$	เป็นผลรวมของค่าพิตเนสของทุกโครโมโซม
f_{ave}	เป็นค่าพิตเนสเฉลี่ยของประชากรในรุ่นปัจจุบัน
num_i	เป็นจำนวนของชุดโครโมโซมลำดับที่ i
$nxps_i$	เป็นพื้นที่บนวงล้อที่จะถูกสร้างซ้ำในรุ่นต่อไป
\mathcal{N}_t	หน่วยน้ำหนักมวลรวม หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
W	น้ำหนักของมวลรวม หน่วยกิโลกรัม
V	ปริมาตรของมวลรวม หน่วยลูกบาศก์เมตร
f'_m	กำลังอัดของมอร์ต้า (MPa)
f'_c	กำลังอัดของคอนกรีต (MPa)
P	แรงอัดประลัย (kN)
A	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m^2)
E_c	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (MPa)
w	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (kN/m^3)
f'_c	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (MPa)
V	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิค, เมตรต่อวินาที
E	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น
ρ	ความหนาแน่น
ν	ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)
ρ	ความต้านทานไฟฟ้า, กิโลโอห์มเซนติเมตร
a	ระยะห่างของหัววัด
V	ศักย์กระแสไฟฟ้าที่วัดได้
I	กระแสไฟฟ้าที่ป้อน
Q	กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างทดสอบหรือ Charge passed (Coulombs)
I_0	กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหลังจากให้แรงดันไฟฟ้า (Amperes)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

I_t	กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างที่ระยะเวลา t นาที
Y_{28day}	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลที่อายุบ่มเท่ากับ 28 วัน
$RPPP$	ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซเคล (ร้อยละ)
$Strength_{RPPP}$	ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ที่ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซเคลต่าง ๆ
$Strength_{RPPP=0}$	คือ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ที่ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซเคลร้อยละ 0

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในแต่ละปีพลาสติกประมาณพันล้านตันถูกผลิตขึ้นมาใช้ในโลกรวม และถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการดำรงชีวิตเพื่อความทันสมัยและความสะดวกสบาย เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ โดยเฉพาะความหนาแน่นต่ำ ทนทาน มีความยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบาเหมาะสำหรับการใช้งานด้านต่าง ๆ ตั้งแต่บรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ เฟอร์นิเจอร์ ของเล่นเด็กตลอดจนอุปกรณ์ในงานก่อสร้าง นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่ถูกนำมาทำเป็นภาชนะและของใช้แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งเนื่องจากมีราคาถูก ในขณะที่พลาสติกที่ใช้แล้วจะถูกทิ้งจึงทำให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจนก่อให้เกิดมลภาวะอันเนื่องมาจากขยะดังรูปที่ 1.1 พลาสติกไม่ย่อยสลายหรือย่อยสลายได้ยากในอดีตขยะมักจะถูกขนส่งและนำไปกำจัดอย่างไม่ถูกหลักสุขาภิบาลมากนักส่วนใหญ่มักจะถูกนำไปฝังกลบรวมกับขยะทั่วไป ขยะพลาสติกจะใช้พื้นที่ในการฝังกลบมากกว่าขยะประเภทเศษอาหารประมาณ 3 เท่า (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) เนื่องจากขยะพลาสติกมีความคงทนและสามารถทนต่อแรงอัดได้สูง นอกจากนี้ก่อให้เกิดปัญหาติดตามมาอย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้อยู่อาศัยใกล้เคียงและน้ำชะล้างขยะอาจปนเปื้อนในน้ำผิวดินและใต้ดินได้อีกทั้งก่อให้เกิดปัญหาแหล่งพาหะนำโรค ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคม และชุมชนที่อยู่อาศัยโดยรอบบริเวณได้ จากสถิติการเก็บข้อมูลขยะพลาสติกในประเทศไทยที่ทิ้งไปกว่าปีละ 2.5 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) พบว่ามีพลาสติกอยู่ 4 ชนิด ที่สามารถนำกลับมาผลิตใช้ใหม่หรือรีไซเคิลประกอบด้วย โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงปริมาณ 1.0 ล้านตัน โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำปริมาณ 0.7 ล้านตัน โพลีโพรพิลีนปริมาณ 0.4 ล้านตัน และ อื่น ๆ อีก 0.4 ล้านตัน ซึ่งในการนำกลับมาผลิตใช้ใหม่หรือรีไซเคิลวัสดุด้วยกัน ถือว่าการรีไซเคิลพลาสติกอยู่ในขั้นกำลังพัฒนา โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยโพลีเอทิลีนเทอร์พลาสต์และโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงซึ่งเป็นวัสดุที่ได้รับการยอมรับการนำกลับมาผลิตใช้ใหม่หรือรีไซเคิลมากในสหรัฐอเมริกาและเอเชียและรวมทั้งประเทศไทยด้วย ซึ่งเห็นได้จากการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติก ในงานอุตสาหกรรมทุกประเภทซึ่งล้วนแล้วเกี่ยวข้องกับพลาสติกทั้งสิ้น สำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องใช้พลาสติกเป็นวัตถุดิบหรือเป็นส่วนประกอบในการผลิต เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องแต่งกาย รองเท้า วัสดุก่อสร้าง เฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้สำนักงาน เครื่องเขียน ของเล่น เครื่องกีฬา และบรรจุภัณฑ์อาหารแปรรูป เป็นต้น จึงส่งผลทำให้มีขยะพลาสติกจำนวนมากและปัจจุบันได้มีการนำขยะพลาสติกไม่ว่าจะเป็นขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม หรือขวดพลาสติกอื่น ๆ ที่ใช้แล้วนำกลับมาผลิตใช้ใหม่หรือนำกลับมารีไซเคิล

เพื่อใช้ใหม่กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูกทำให้ผู้ผลิตสนใจที่จะนำพลาสติกดังกล่าวมาแปรรูป เพื่อส่งโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและช่วยลดปัญหาขยะพลาสติก รวมไปถึงการลดปัญหาภาวะโลกร้อนได้อีกด้วย (กลุฑล ทองศรี, 2550)



รูปที่ 1.1 ขยะพลาสติกจากผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการสร้างสิ่งก่อสร้างเพื่อใช้อำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ เช่น อาคารบ้านเรือน ถนน เขื่อน และกำแพง เป็นต้น ซึ่งการได้มาของคอนกรีต จำเป็นต้องนำวัสดุจากธรรมชาติมาแปรรูป เช่น ปูนซีเมนต์ ได้จาก หินปูน ส่วนมวลหยาบและละเอียด ได้จาก การระเบิดภูเขาแล้วนำหินมาย่อย หรือทราย ได้จาก แม่น้ำ เป็นต้น ซึ่งกิจกรรมเหล่านี้เป็นการทำลายสิ่งแวดล้อมด้วย ในปัจจุบันหลายประเทศเริ่มมีข้อกำหนดในการปกป้องสิ่งแวดล้อมเหล่านี้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เริ่มมีการนำวัสดุรีไซเคิลมาใช้งานวิศวกรรมโยธา และงานคอนกรีตมากขึ้น เช่น การนำคอนกรีตเก่าจากอาคารที่ถูกรื้อทิ้งมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตให้กับอาคารที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ การพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานทดแทนการใช้ซีเมนต์ ตลอดจนการนำวัสดุเพื่อใช้ทดแทนมวลรวมในคอนกรีต

การศึกษาถึงการนำพลาสติกรีไซเคิลมาใช้งานคอนกรีต (Payakapo (a) and Payakapo (b) , 2008) ได้นำของเสียประเภทฉลากพลาสติกมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตมวลเบาชนิดรับน้ำหนัก ฉลากพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากกระบวนการรีไซเคิลแก้ว โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่คอนกรีตด้วยฉลากพลาสติกร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตรของคอนกรีต และใช้โฟมผสมร้อยละ 18 ถึง 57 โดยปริมาตรของส่วนผสมคอนกรีต การแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 0.35 และ 0.40 นำตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาซึ่งหล่อให้มีขนาด 5×5×5 เซนติเมตร มาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำหลังจากทำการบ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำของเสียประเภทฉลากพลาสติกมาใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยปริมาณฉลากพลาสติกที่ใส่เข้าไปนั้นมีผลทำให้กำลัง

รับแรงอัดสูงกว่าค่ามาตรฐาน พบว่าเมื่อมีการแทนที่ของเสียประเภทพลาสติกลงในตัวอย่าง 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และทำการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นเท่ากับ 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และ 1900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

นอกจากนี้ทีมงานวิจัยนวัตกรรมในต่างประเทศพบว่า บริษัท Affresol ซึ่งเป็นผู้ผลิตนวัตกรรมใหม่ของประเทศอังกฤษ โดยนวัตกรรมใหม่ที่บริษัทจะผลิตขึ้นต้องมีคุณภาพดี ราคาต่ำและแยกส่วนได้ โดยพัฒนาวัสดุสำหรับการก่อสร้างที่เรียกว่า TPR (Thermo Poly Rock) ซึ่งใช้กระบวนการผลิตที่เป็นกระบวนการประหยัดพลังงานที่มีสิทธิบัตรรองรับ ใช้กระบวนการเย็นเปลี่ยนขยะพลาสติกให้เป็นวัสดุกันน้ำและแผง TPR ที่หน่วยการตีไฟ ดังรูปที่ 1.2 วัสดุชนิดนี้มีน้ำหนักเบาและทำให้แผง TPR มีความแข็งแรงกว่าคอนกรีต มีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเยี่ยม รวมทั้งรีไซเคิลได้ 100% การตกแต่งภายในอาคารสามารถฉาบบน TPR หรือทำให้มีสมบัติเป็นฉนวนเหมือนบ้านมาตรฐานที่ใช้คอนกรีตปกติ อีกทั้งแผง TPR ยังสามารถใช้กับอิฐและหินได้อีกด้วย วัสดุรีไซเคิลนี้ยังเหมาะสำหรับการผลิตหลังคา วัสดุใหม่นี้สามารถสร้างอาคารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาคารที่สร้างจากวัสดุนี้แต่ละยูนิตต้องใช้วัสดุ 18 ตัน ส่วนราคาของอาคารก็ไม่สูงคืออยู่ที่ประมาณ 40,000 ปอนด์ สมบัติพิเศษของอาคารแบบนี้คือถอดประกอบได้ทำให้ก่อสร้างบ้านภายใน 4 วัน การก่อสร้างที่เร็วเหมาะกับการฟื้นฟูอาคารที่อยู่ในพื้นที่ภัยพิบัติได้อย่างรวดเร็ว นวัตกรรมนี้เป็นผลผลิตจากงานวิจัยของ Cardiff และ Glamorgan Universities ซึ่งได้รับการสนับสนุนด้านการเงินจาก BRE (Building Research Establishment) และบริษัท Carbon Trust

ดังนั้นการนำกลับมาผลิตใช้ใหม่หรือพลาสติกกรีซเคิลนับเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ และควรให้การส่งเสริมสนับสนุนเพื่อให้การพัฒนาอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นใช้วัตถุดิบในประเทศ รวมถึงการลดต้นทุน เช่นแนวคิดการนำพลาสติกกรีซเคิลมาใช้เป็นถนนดังรูปที่ 1.3 ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาศมบัติของคอนกรีตผสมพลาสติกกรีซเคิล โดยพิจารณาเลือกพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงซึ่งเป็นขยะที่มีปริมาณการทิ้งมากที่สุด (ประกายดาว, 2550) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) และสมบัติของคอนกรีตผสมพลาสติกกรีซเคิล เพื่อเป็นฐานความรู้ในการนำพลาสติกกรีซเคิลมาใช้ในงานคอนกรีต ซึ่งจะส่งผลต่อการลดปริมาณของขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมต่อไป



รูปที่ 1.2 แผ่นผนัง TPR



รูปที่ 1.3 แนวคิดการนำพลาสติกกรีซเคิลมาใช้เป็นถนน

1.2 จุดประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติในสภาวะที่เป็นของเหลวและที่แข็งตัวแล้วของคอนกรีตผสมพลาสติกกรีซไคเคิลในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรในต่าง ๆ ในแต่ละอัตราส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตผสมพลาสติกกรีซไคเคิลเพื่อใช้พิจารณาอัตราส่วนที่เหมาะสม เมื่อคำนึงถึงสมบัติด้านต่าง ๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน

1.2.3 เพื่อนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) มาประยุกต์ใช้ ในการออกแบบคัดเลือกร้อยละอัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมพลาสติกกรีซไคเคิล

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุเชื่อมประสานในส่วนผสมที่ใช้ในการวิจัย

1.3.2 เม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลชนิดโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากกระบวนการแปรรูปพลาสติกที่ใช้งานแล้ว

1.3.3 ทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุซีเมนต์ และพลาสติกกรีซไคเคิล เช่น ความถ่วงจำเพาะ ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสเมื่อแทนที่ด้วยพลาสติกกรีซไคเคิลในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนต่าง ๆ

1.3.4 ทดสอบสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่ อุณหภูมิและปริมาณอากาศของคอนกรีตสด ความสามารถในการไหล การสูญเสียค่าของการยุบตัว ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด โมดูลัสความยืดหยุ่น การตรวจสอบความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยกระบวนการทดสอบแบบไม่ทำลาย ความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมพลาสติกกรีซไคเคิลที่มีอัตราส่วนการแทนที่ต่างกัน โดยคาดว่าจะใช้อัตราร้อยละของปูนซีเมนต์ต่อพลาสติกกรีซไคเคิลอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 0 ถึง 60 ขึ้นอยู่กับลักษณะความยากง่ายในการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์ และทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 3 7 14 21 และ 28 วัน

1.3.5 ทดสอบสมบัติในการต้านทานอุณหภูมิ และความสามารถในการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตผสมพลาสติกกรีซไคเคิลที่มีอัตราส่วนการแทนที่ต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นการสร้างฐานงานวิจัยภายในประเทศ ผ่านขบวนการศึกษาในระดับปริญญาตรีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี เพราะงานวิจัยนี้ใช้นักศึกษาในระดับปริญญาตรี 2 คน ซึ่งนักศึกษาที่สำเร็จการศึกษา และองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้ จะมีส่วนสำคัญในการส่งเสริมการใช้วัสดุที่ใช้แล้วพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับงานก่อสร้าง เพื่อพัฒนาประเทศไทยต่อไป

1.4.2 ส่งเสริมและให้ความรู้ของวัสดุที่ใช้แล้วในงานก่อสร้างแก่วิศวกร ผ่านรายงานการวิจัย และบทความของงานวิจัยที่นำเสนอในวารสารและ สัมมนาในระดับชาติหรือนานาชาติ ซึ่งจะทำให้มีคนได้รับความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาคอนกรีตจากวัสดุที่ใช้แล้วในงานก่อสร้างได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกคืออะไร

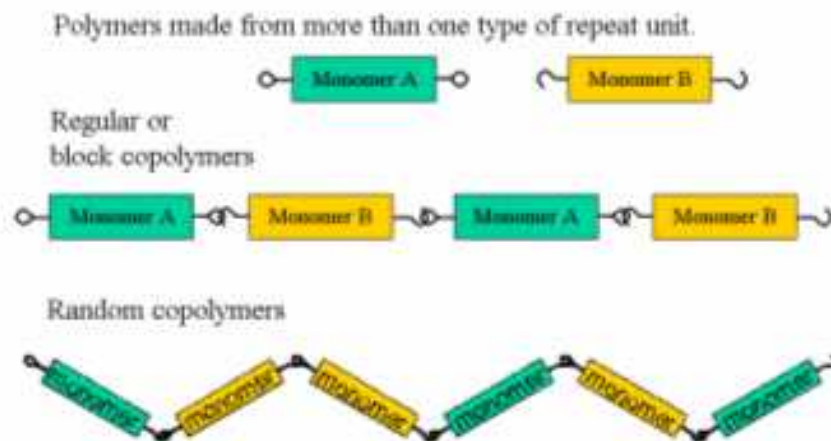
พลาสติกดังรูปที่ 2.1 เป็นวัสดุที่มนุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นเพื่อช่วยให้เรามีชีวิตที่สะดวกสบายยิ่งขึ้น ในอดีตเราไม่เคยรู้จักพลาสติกเลยจนกระทั่งกลางศตวรรษที่ 19 วัสดุดั้งเดิมที่มนุษย์ค้นเคยและใช้อยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันในยุคก่อนหน้านี้นี้ล้วนเป็นวัสดุจากธรรมชาติทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็น แก้ว ไม้ กระดาษ โลหะ ยาง หรือ ขนสัตว์ สิ่งเหล่านี้เคยเป็นวัสดุที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมนุษย์ยังคงพยายามค้นหาวัสดุใหม่ ๆ มาใช้งานอยู่เสมอ



รูปที่ 2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยพลาสติก

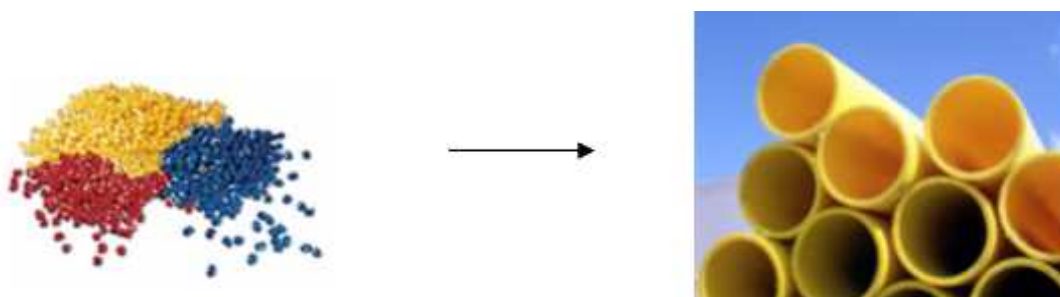
พลาสติกจัดเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ กันต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาว ๆ ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น

Copolymers



รูปที่ 2.2 Copolymers

บางครั้งพบว่ามีการใช้คำว่า "พลาสติก" และ "โพลิเมอร์" ในความหมายเดียวกัน หรือใกล้เคียงกัน แต่คำว่า "โพลิเมอร์" มักหมายถึงวัสดุประเภทพลาสติก ยาง เส้นใย และกาว ส่วนคำว่า "พลาสติก" จะหมายถึงสารผสมระหว่างโพลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สี สารพลาสติกไซเซออร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปทรงต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.3 เช่นถัง จาน และช้อน เป็นต้น หากแปลตามรากศัพท์คำว่า โพลิเมอร์ หรือ Polymer มาจากคำกรีก 2 คำ คือคำว่า Poly แปลว่ามาก และคำว่า Mer แปลว่าหน่วย โพลิเมอร์จึงแปลว่า สารที่มีโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กันต่อกันเป็นสายยาว ๆ

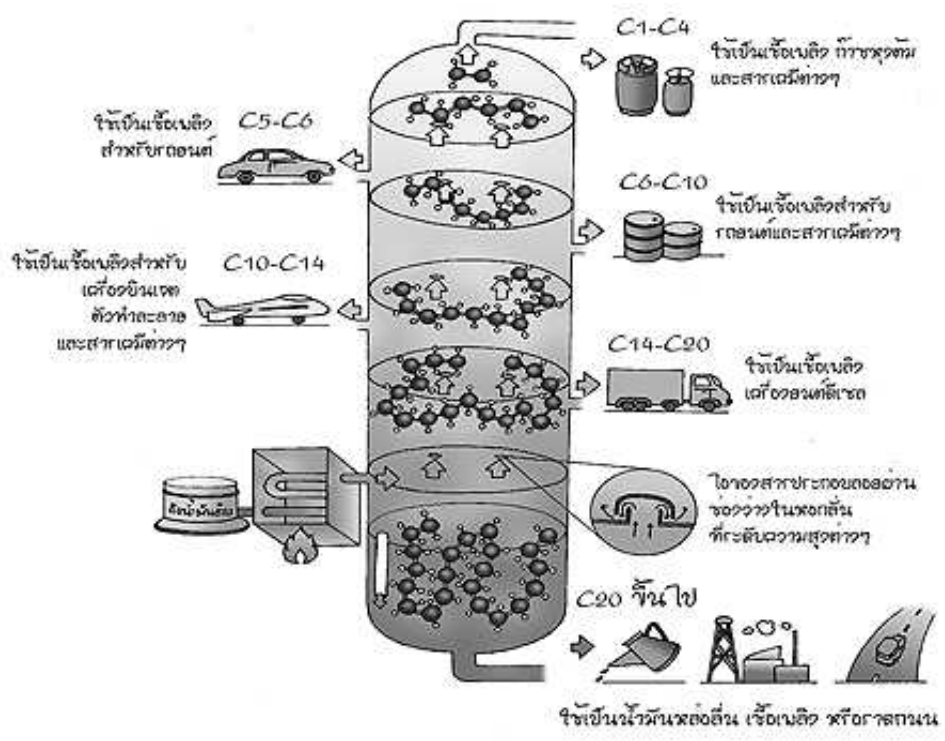


รูปที่ 2.3 เม็ดพลาสติกและผลิตภัณฑ์จากพลาสติก

2.2 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติก (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

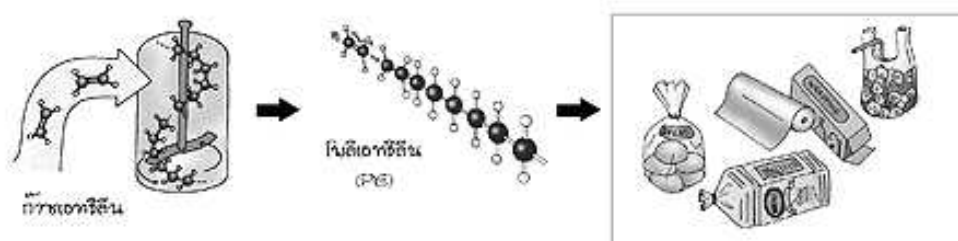
พลาสติกที่ใช้กันมากในปัจจุบันอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ถัง ก่อ่ง ท่อ และแผ่นฟิล์ม ส่วนมากมีแหล่งกำเนิดจากปิโตรเลียมซึ่งรวมถึงน้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติใต้ผิวดินและมีความสำคัญต่อชีวิตมนุษย์เพราะเป็นทั้งแหล่งพลังงานและแหล่งวัตถุดิบสำหรับผลิตวัสดุสังเคราะห์ต่าง ๆ ปิโตรเลียมจะอยู่ในสถานะเป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง ขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน และจำนวนหรือการจัดเรียงตัวของคาร์บอนในโมเลกุล โดยทั่วไปสารไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนไม่เกิน 4 อะตอม จะมีสถานะเป็นก๊าซ ถ้ามีคาร์บอนระหว่าง 5-19 อะตอมจะมีสถานะเป็นของเหลว และถ้ามีคาร์บอนตั้งแต่ 20 อะตอม จะมีสถานะเป็นของแข็ง

การกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบ ทำให้เราสามารถแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งพบว่าปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาวเกินกว่าความต้องการใช้งานอยู่ปริมาณมาก แต่กลับมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายสั้นที่มีการนำไปใช้ประโยชน์มากกว่าอยู่น้อย จึงต้องนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกินความต้องการมาผ่านกระบวนการแยกสลายเพื่อตัดความยาวให้สั้นลง ได้เป็นสารประกอบขนาดเล็ก เช่น ก๊าซเอทิลีนและโพรพิลีน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติกบางชนิดโดยก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งไปยังโรงงานผลิตเม็ดพลาสติก



รูปที่ 2.4 การกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบ

รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกเริ่มต้นจากการนำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กซึ่งได้จากกลั่นลำดับส่วนน้ำมันดิบมาทำปฏิกิริยากันจนได้เป็นสายโซ่ยาว เรียกว่าโพลิเมอร์ ซึ่งโพลิเมอร์แต่ละชนิดสังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้นที่แตกต่างกันไป ทำให้โพลิเมอร์มีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปด้วย โดยโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นี้ จะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต่อไป ตัวอย่างเช่น การผลิตเม็ดพลาสติกโพลิเอทิลีน (PE) โดยเริ่มต้นจากก๊าซเอทิลีนซึ่งถูกเก็บในถังปฏิกิริยา เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยาขึ้น โมเลกุลขนาดเล็ก ๆ จำนวนมากจะเข้ามาต่อกันเป็นโมเลกุลที่ยาวมากๆ ได้โพลิเอทิลีนที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ขวด ถัง และของเล่น เป็นต้น



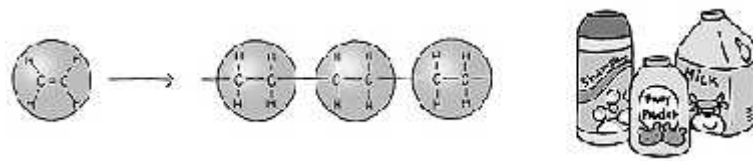
รูปที่ 2.5 โพลิเอทิลีน

2.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์โพลิเมอร์

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์โพลิเมอร์ หรือที่เรียกโดยทั่วไปว่าปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) คือปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้โมโนเมอร์โมเลกุลเล็ก ๆ เกิดปฏิกิริยาต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ๆ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.3.1 การสังเคราะห์โพลิเมอร์แบบลูกโซ่หรือรวมตัว

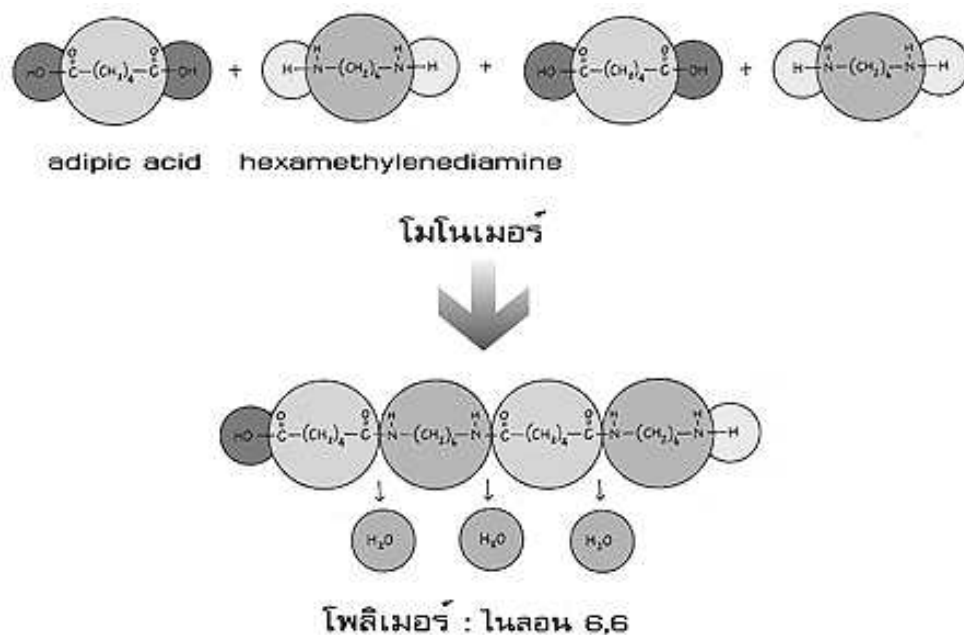
กระบวนการสังเคราะห์แบบรวมตัวเป็นการนำเอาโมโนเมอร์ซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและไม่อิมมิตัวคือมีพันธะคู่หรือพันธะสามอยู่ในโมเลกุลมาทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันจนได้เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งการทำปฏิกิริยาเริ่มต้นจากโมเลกุลที่มีพันธะคู่หรือพันธะสามจะถูกความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่เหมาะสมทำให้พันธะ 1 พันธะแตกออกซึ่งว่องไวในการทำปฏิกิริยายึดติดกับพันธะที่แตกออกของโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงกันทำให้เกิดการต่อกันที่ละโมเลกุลจนได้โมเลกุลใหม่ที่มีลักษณะเป็นเป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้น การสังเคราะห์โพลิเมอร์แบบนี้ไม่มีผลิตภัณฑ์อื่น ๆ หลุดออกมาทำให้จำนวนอะตอมของธาตุในหน่วยซ้ำของโพลิเมอร์เท่ากับจำนวนอะตอมในโมเลกุลของโมโนเมอร์ ตัวอย่างพลาสติกที่เกิดจากการสังเคราะห์โพลิเมอร์แบบนี้ ได้แก่ โพลีไวลิลครอไรด์ โพลีพรพิลีน และโพลิเอทิลีน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันแบบลูกโซ่

2.3.2 การสังเคราะห์โพลิเมอร์แบบขั้นหรือควบแน่น

กระบวนการสังเคราะห์แบบควบแน่นเกิดจากโมโนเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งแต่ละชนิดเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและมีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกันอย่างน้อย 2 หมู่ที่ปลายสุดของโมเลกุล หรืออาจเกิดจากโมโนเมอร์เพียง 1 ชนิดที่มีหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกันอย่างน้อย 2 หมู่ที่ปลายสุดของโมเลกุล ที่สามารถทำปฏิกิริยากันระหว่างหมู่ฟังก์ชันอย่างต่อเนื่องได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ การสังเคราะห์โพลิเมอร์แบบนี้ส่วนใหญ่จะเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเช่น H_2O HCl และ CH_3OH เป็นผลพลอยได้ (By Product) เป็นสาเหตุให้จำนวนอะตอมของธาตุในหน่วยซ้ำของโพลิเมอร์มีน้อยกว่าจำนวนอะตอมในโมเลกุลของโมโนเมอร์ ตัวอย่างพลาสติกที่เกิดจากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการควบแน่น ได้แก่ ไนลอน และโพลีเอสเทอร์ เป็นต้นดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น

2.4 ประเภทและการใช้งาน

หากแบ่งประเภทของพลาสติกตามสมบัติทางความร้อน เราสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

โพลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่โพลิเมอร์เป็นแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งสั้น ๆ สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืดเนื่องจากโมเลกุลของโพลิเมอร์ที่พันกันอยู่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันไปได้ง่ายขึ้น เมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัวซึ่งการหลอมเหลวและเย็นตัวนี้สามารถเกิดกลับไปกลับมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพหรือโครงสร้างของโพลิเมอร์เปลี่ยนไปมากนัก

พลาสติกประเภทนี้สามารถขึ้นรูปโดยการฉีดขณะที่พลาสติกถูกทำให้อ่อนตัวและไหลได้ด้วยความร้อนและความดันเข้าไปในแม่แบบที่มีช่องว่างเป็นรูปร่างตามต้องการ ภายหลังจากที่พลาสติกไหลเข้าจนเต็มแม่พิมพ์จะถูกทำให้เย็นตัวและถอดออกจากแม่พิมพ์ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการดังรูปที่ 2.8 สามารถนำไปใช้งานได้ เมื่อใช้เสร็จแล้วสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้โดยการบดและหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีก แต่พลาสติกประเภทนี้มีข้อเสียและขีดจำกัดของการใช้งานคือไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะอาจเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรงไป ตัวอย่างเช่น ขวดน้ำดื่มไม่เหมาะสำหรับใช้บรรจุน้ำร้อนจัดหรือเดือด



รูปที่ 2.8 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

2.4.2 เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

โพลีเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบร่างแหซึ่งจะหลอมเหลวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ทำให้โพลีเมอร์มีรูปร่างที่ถาวร ไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกเมื่อได้รับความร้อน และหากได้รับความร้อนสูงเกินไป จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออก ได้สารที่ไม่มีสมบัติของความเป็นโพลีเมอร์ต่อไป

การผลิตพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตจะแตกต่างจากพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกดังตาราง 2.1 คือ ในขั้นตอนแรกต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันเพียงบางส่วน มีการเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย และยังสามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถขึ้นรูปภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงได้ เมื่อผลิตภัณฑ์มีรูปร่างตามต้องการแล้ว ให้คงอุณหภูมิไว้ประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบร่างแหที่เสถียรและแข็งแรง สามารถนำผลิตภัณฑ์ออกจากแบบโดยไม่ต้องรอให้เย็น เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอยู่ในแม่พิมพ์ ดังนั้นการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมเซตกลับทำให้วัสดุแข็งขึ้น ต่างจากกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมพลาสติกที่การให้ความร้อนจะทำให้พลาสติกนิ่ม และหลอมเหลว พลาสติกเทอร์โมเซตเมื่อใช้งานเสร็จแล้วไม่สามารถนำมาผ่านการหลอมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) ได้อีก และถ้าให้ความร้อนมากเกินไป จะทำให้พลาสติกเกิดการสลายตัวหรือไหม้ โดยไม่เกิดการหลอมเหลว ตัวอย่างของพลาสติกในกลุ่มนี้เช่น เบคเคอไลต์ และเมลามีน เป็นต้นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

ตาราง 2.1 ความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต

เทอร์โมพลาสติก	เทอร์โมเซต
1. เป็นโพลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกึ่ง	1. เป็นโพลิเมอร์แบบเชื่อมโยงหรือแบบร่างแห
2. จะอ่อนตัวหรือหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน	2. จะแข็งตัวเมื่อได้รับความร้อน
3. ต้องทำให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ มิฉะนั้นจะเสียรูปทรงได้	3. ไม่ต้องรอให้เย็นก่อนเอาออกจากแม่แบบ
4. ไม่เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์	4. เกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันในแม่พิมพ์
5. นำมารีไซเคิลโดยการหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้	5. ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้

2.5 พลาสติกที่ใช้มากในปัจจุบัน

พลาสติกที่ถูกนำมาใช้ในปริมาณมากในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิดที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ จึงมีการใส่สัญลักษณ์ตัวเลขเพื่อให้ง่ายต่อการแบ่งประเภทของพลาสติก ตัวเลขทั้ง 7 ตัวนี้ จะอยู่ในสัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมที่มีลูกศรสามตัววิ่งตามกันและมักพบบริเวณก้นของภาชนะพลาสติก

2.5.1 โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly Ethylene Terephthalate, PET)

PET ทนแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย สามารถทำให้ใสมาก และมองเห็นสิ่งที่บรรจุอยู่ภายใน จึงนิยมใช้บรรจุน้ำดื่ม น้ำมันพืช และเครื่องสำอาง ดังรูปที่ 2.10 โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly Ethylene Terephthalate, PET) นอกจากนี้ขวด PET ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี จึงใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำอัดลม PET สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้โดยนิยมนำมาผลิตเป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม และเส้นใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอนหรือเสื่อสำหรับเล่นสกี



รูปที่ 2.10 โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly Ethylene Terephthalate, PET)

2.5.2 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

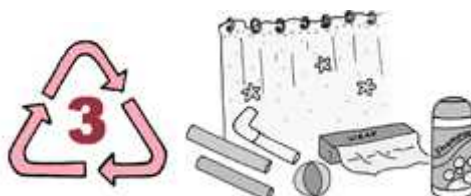
HDPE มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายตรง ค่อนข้างแข็งแต่ยืดได้มาก ไม่แตกง่าย ส่วนใหญ่ทำให้มีสีสนสวยงาม ยกเว้นขวดที่ใช้บรรจุน้ำดื่ม ซึ่งจะขุ่นกว่าขวด PET ราคาถูกขึ้นรูปได้ง่าย ทนสารเคมีจึงนิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับน้ำยาทำความสะอาด แชมพูสระผม แป้งเด็ก และถุงหิ้ว นอกจากนี้ภาชนะที่ทำจาก HDPE ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้ดี จึงใช้เป็นขวดนม เพื่อยืดอายุของนมให้นานขึ้น HDPE สามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อผลิตขวดต่าง ๆ เช่น ขวดใส่น้ำยาซักผ้า แท่งไม้เทียมเพื่อใช้ทำรั้วหรือม้านั่งในสวนดังแสดงรูปที่ 2.11 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)



รูปที่ 2.11 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE)

2.5.3 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly Vinyl Chloride, PVC)

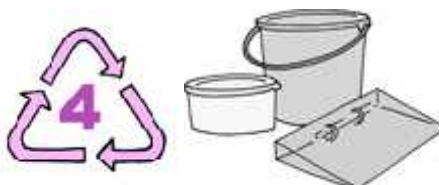
PVC เป็นพลาสติกแข็งใช้ทำท่อ เช่น ท่อน้ำประปา แต่สามารถทำให้นิ่มโดยใส่สารพลาสติกไซเซอร์ ใช้ทำสายยางใส แผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ม่านในห้องอาบน้ำ แผ่นกระเบื้องยาง แผ่นพลาสติกปูโต๊ะ ขวดใส่แชมพูสระผม PVC เป็นพลาสติกที่มีสมบัติหลากหลาย สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อื่นได้อีกมาก เช่น ประติมากรรม หน้าต่าง วงกบ และหนังเทียม PVC ดังรูปที่ 2.12 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly Vinyl Chloride, PVC) PVCสามารถนำกลับมารีไซเคิล เพื่อผลิตท่อประปาสำหรับการเกษตร กรวยจราจร และเฟอร์นิเจอร์ หรือม้านั่งพลาสติก



รูปที่ 2.12 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Poly Vinyl Chloride, PVC)

2.5.4 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

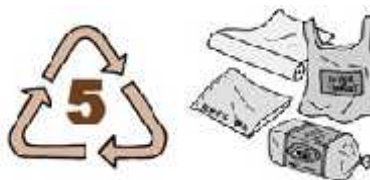
LDPE เป็นพลาสติกที่นิยมนำมาผลิตได้มากที่สุด มีความใส นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มสำหรับห่ออาหารและห่อของ ถุงใส่ขนมปัง และถุงเย็นสำหรับบรรจุอาหาร LDPE สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้โดยใช้ผลิตเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหิ้ว หรือถังขยะดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

2.5.5 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

PP เป็นพลาสติกที่แข็งแรง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อสารเคมี ความร้อน และน้ำมัน ทำให้มีสีสันทนสวยงามได้ ส่วนใหญ่นิยมนำมาทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่อง ขาม จาน ถัง ตะกร้า หรือกระบอกสำหรับใส่น้ำแช่เย็น PP สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยนิยมนำมาผลิตเป็นกล่องแบตเตอรี่รถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชน และกรวยสำหรับน้ำมันดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

2.5.6 โพลิสไตรีน (Polystyrene, PS)

PS เป็นพลาสติกที่แข็งแรง ใส แต่เปราะ และแตกง่าย ราคาถูก นิยมนำมาทำเป็นภาชนะบรรจุของใช้ เช่น เทปเพลง สำลี หรือของแห้ง เช่น หมูแผ่น หมูหยอง และคุกกี้ เนื่องจาก PS เปราะและแตกง่าย จึงไม่นิยมนำพลาสติกประเภทนี้มาบรรจุน้ำดื่มหรือแชมพูสระผม เนื่องจากอาจลื่นตกแตกได้ มีการนำพลาสติกประเภทนี้มาใช้ทำภาชนะหรือถาดโฟมสำหรับบรรจุอาหาร โฟมจะมีน้ำหนักที่เบาเนื่องจากประกอบด้วย PS ประมาณ 2-5 % เท่านั้น ส่วนที่เหลือเป็นอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง PS สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดังรูปที่ 2.15 โดยนิยมนำมาผลิตเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวีดีโอ ไม้บรรทัด หรือ ของใช้อื่น ๆ

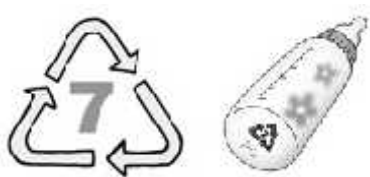


รูปที่ 2.15 โพลีสไตรีน (Polystyrene, PS)

พลาสติกอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ 6 ชนิดแรก หรือไม่ทราบว่าเป็นพลาสติกชนิดใด ปัจจุบันเรามีพลาสติกหลายชนิดให้เลือกใช้ พลาสติกที่ใช้ในครัวเรือนส่วนใหญ่สามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อหลอมใช้ใหม่ได้ การมีสัญลักษณ์ตัวเลข ทำให้เราสามารถแยกพลาสติกออกเป็นชนิดต่าง ๆ เพื่อนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ง่ายขึ้น สำหรับพลาสติกในกลุ่มที่ 7 เป็นพลาสติกชนิดอื่นที่ไม่ใช่ 6 ชนิดแรก นอกจากมีตัวเลขระบุแล้ว ควรใส่สัญลักษณ์

ภาษาอังกฤษระบุชนิดของพลาสติกนั้นๆ ไว้ด้วย

2.5.7 รูปที่ 2.16 เพื่อสะดวกในการแยกและนำกลับมารีไซเคิล เช่น โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)



รูปที่ 2.16 พลาสติกอื่น ๆ

2.6 พลาสติกและสิ่งแวดล้อม

2.6.1 พลาสติกรีไซเคิล

พลาสติกเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นเพราะใช้ทดแทนทรัพยากรธรรมชาติ เช่น ไม้และเหล็กได้เป็นอย่างดี และมีราคาถูก น้ำหนักเบาสามารถผลิตให้มีสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้จากการเลือกชนิดของวัตถุดิบ ปฏิกิริยาเคมี กระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังสามารถปรุงแต่งสมบัติได้ง่ายโดยการเติมสารเติมแต่ง (Additives) เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) สารเสริม (Filler) สารคงสภาพ (Stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี (Pigment) เป็นต้น

ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ก้าวหน้าและทันสมัยในปัจจุบันทำให้เรามีผลิตภัณฑ์พลาสติกหลากหลายรูปแบบและสีสันทันใจให้เลือกใช้อย่างมากมาย ด้วยสมบัติที่โดดเด่นหลายด้านทำให้พลาสติก

ได้รับการยอมรับอย่างรวดเร็วและมีปริมาณการใช้งานเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกในปริมาณสูงมากขึ้นตามด้วย ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่หรือการรีไซเคิลจึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะนอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกแล้วยังเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย การพัฒนาทางเทคโนโลยีในช่วงหลายปีที่ผ่านมาทำให้การรีไซเคิลพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) และการรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (Quaternary recycling)

1) การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ

เป็นการนำขวดหรือเศษพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อนที่เกิดในกระบวนการผลิตหรือขึ้นรูปกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

2) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ

การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิหรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาด บด หลอมและขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นหลายเทคนิค คือ

- การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling)

เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภทและสีมาล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยคุณภาพของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลนี้จะเป็นตัวกำหนดการนำไปใช้งานและปริมาณการผสมที่ต้องการ ปัญหาในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกคือหลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งพลาสติกจะมีคุณภาพต่ำลงปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุลของ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในเกิดประโยชน์สูงสุด และมีราคาถูกลงเรื่อย ๆ จนบางครั้งไม่คุ้มต่อการลงทุน สาเหตุที่สำคัญเนื่องมาจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ฉลากเล็ก ๆ หรือ เศษกาวทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเข้มขึ้นหรือมีความใสลดลง นอกจากนี้ความชื้นในพลาสติก และความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติก ทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเหลือง และมีสมบัติเชิงกลลดลงด้วย

- การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical modification)

เนื่องจากเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติ การขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้น การปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวหรือทำให้เม็ดรีไซเคิลมีลักษณะ

ใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี แต่ถ้าเป็นพลาสติกผสมมักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากันที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า Compatibilizer

- การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Coextrusion and Coinjection moulding)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการรีไซเคิลแบบทุติยภูมิซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ เหมือนแซนด์วิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดีและมีสีสน้ำใช้ ส่วนชั้นกลางเป็นชั้นของพลาสติกรีไซเคิล

1) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ

การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน

- การรีไซเคิลทางเคมี (Chemical recycling)

เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก (Depolymerisation) ได้มอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นพेटได้ใหม่

- การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis)

โครงสร้างของพेटสามารถเกิดการแตกหรือขาดได้โดยใช้ความร้อน เรียกว่า Thermolysis แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) และ การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation)

Pyrolysis เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบแน่นเป็น ของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthetic Crude Oil) สามารถนำกลับไปใช้ในโรงกลั่นและส่วนที่ไม่เกิดการควบแน่นจะถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในกระบวนการ

Gasification เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของพेटเกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบใช้ออกซิเจน กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า Pyrolysis ผลลัพธ์ที่ได้คือ Syngas ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง แต่ถ้าทำการแยกก่อนนำมาใช้ในรูปของสารเคมีจะมีมูลค่าสูงขึ้น 2 – 3 เท่า

Hydrogenation เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสายโซ่พอลิเมอร์ของเพทจะถูกทำให้แตกหรือขาดออกจากกันด้วยความร้อนและสัมผัสกับไฮโดรเจนที่มากเกินไปที่ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ จนเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Cracking) และเกิดการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันแก๊สโซลีนหรือดีเซล

กระบวนการรีไซเคิลทางความร้อนถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์และคุ้มค่ากว่าการรีไซเคิลทางเคมีเพราะสามารถจัดการขยะที่เป็นพลาสติกผสมที่มีสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่พลาสติกได้ ในขณะที่การรีไซเคิลทางเคมีต้องใช้พลาสติกที่มีความสะอาดค่อนข้างสูงและมีการผสมหรือปนเปื้อนได้เพียงเล็กน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบสูง อย่างไรก็ตามพลาสติกเพทที่นำมารีไซเคิลทางความร้อนก็ควรมีการคัดขนาดหรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกบ้าง

3) การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ

พลาสติกสามารถนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ

แม้ว่าทุกวันนี้การรีไซเคิลพลาสติกยังไม่ได้รับความนิยมมากนัก แต่ก็กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาที่เราให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติ การนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมารีไซเคิลใช้ซ้ำจึงเป็นอีกหนทางหนึ่งที่จะช่วยให้เรารักษาความสวยงามและความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรธรรมชาติไว้ได้ ซึ่งอีกไม่นานเราก็จะก้าวข้ามเข้าสู่ศตวรรษใหม่ที่วิทยาการและเทคโนโลยีต่าง ๆ จะได้รับการพัฒนาให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น คนแห่งศตวรรษใหม่อาจต้องเปลี่ยนนิสัยทัศนคติเกี่ยวกับพลาสติก เมื่อพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในศตวรรษหน้าไม่ได้กลายเป็นขยะอีกต่อไป แต่กลับกลายเป็นทรัพยากรสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

2.7 ขั้นตอนรีไซเคิลพลาสติก

2.7.1 การตรวจสอบประเภทของพลาสติก

ขั้นตอนนี้เป็นการแยกประเภทของพลาสติก เช่น พลาสติกชนิดพีพี พลาสติกชนิดพีอี และพลาสติกชนิดไฮเดน เมื่อแยกประเภทของพลาสติกเสร็จแล้ว ต้องแยกคุณลักษณะของพลาสติกด้วย เช่น พลาสติกใช้สำหรับงานฉีด พลาสติกสำหรับงานเป่า หลังจากนั้นทางเราจะแยกเศษพลาสติกเป็นเศษพลาสติกใหม่ที่ผ่านการใช้งานเพียงครั้งเดียว สะอาด กับเศษพลาสติกผ่านการล้างน้ำมาแล้วหรือเศษพลาสติกเก่าที่สกปรก

2.7.2 การบดโมพลาสติก

ขั้นตอนนี้ทางเราจะบดพลาสติกที่ได้แยกประเภทไว้แล้วให้เป็นชิ้นเล็ก หรือเรียกว่าสแครป เพื่อง่ายต่อการหลอมพลาสติก หากเศษพลาสติกใดสกปรกจะต้องไปขั้นตอนล้างเพื่อทำความสะอาด หากเศษพลาสติกสะอาดจะถูกเตรียมเข้าเครื่องหลอม

2.7.3 การล้างพลาสติก

ล้างให้สะอาด ขั้นตอนนี้สิ่งสกปรกจะถูกกำจัดออกไป โดยผ่านน้ำ และนำมาตากให้แห้งสนิท

2.7.4 การผสมแม่สีให้กับเศษพลาสติก

ขั้นตอนนี้เป็นการผสมแม่สีเข้ากับเศษพลาสติกที่ได้มา เพื่อเม็ดพลาสติกที่ได้มาจะมีสีเฉดเดียวกัน โดยแม่สีนี้มีทั้งแบบชนิดเม็ด และแม่สีชนิดผง

2.7.5 หลอม (รีไซเคิล) พลาสติกด้วยความร้อน

นำเศษพลาสติกที่ได้มาหลอมใหม่ดังรูปที่ 2.17 โดยใช้ความร้อนโดยผ่านทางเครื่องหลอมพลาสติกที่อุณหภูมิที่เหมาะสมทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก พลาสติกเหลวที่ได้จะถูกส่งผ่านตะแกรงสแตนเลสที่มีขนาดละเอียดเพื่อดักสิ่งแปลกปลอมที่ยังตกค้างอยู่ในเศษพลาสติก จากนั้นพลาสติกเหลวจะผ่านเข้าสู่เครื่องอัดรีดออกมาเป็นเส้น เส้นพลาสติกเหล่านี้จะผ่านน้ำ โดยรางน้ำจะยาวประมาณ 5-10 เมตร เพื่อให้พลาสติกแข็งตัวได้โดยใช้ระยะเวลาไม่นาน เส้นพลาสติกจะถูกตัดให้เป็นเม็ดเล็ก ๆ ผ่านเครื่องตัดเม็ดพลาสติกหลังจากนั้นบรรจุลงถุง โดยที่น้ำหนักทั่วไปหนักถุงละ 25 กิโลกรัม



รูปที่ 2.17 โรงงานรีไซเคิลพลาสติก

2.8 ตัวอย่างเม็ดพลาสติก

ลักษณะของเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลซึ่งได้จากการนำพลาสติกชนิดต่าง ๆ มาหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ แสดงดังรูปที่ 2.18 โดยเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลดังกล่าวมาขนาดระหว่าง 3 – 5 มิลลิเมตร และมีสีสันท่างต่างกันตามความต้องการของผู้ใช้งาน



(ก) เม็ดพลาสติกพีพี



(ข) เม็ดพลาสติกพีอี



(ค) เม็ดพลาสติกไฮเดน

รูปที่ 2.18 ลักษณะรูปร่างของเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล

2.9 เทคนิคการแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม (Optimization techniques)

เทคนิคในการหาคำตอบที่เหมาะสมมีอยู่หลายวิธี ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลักคือ Heuristic methods Mathematical methods Simulations และ Searching algorithms

1) Heuristic methods เป็นวิธีดั้งเดิมที่สามารถใช้ได้กับปัญหาที่หลากหลายรูปแบบ ด้วยการใช้กฎหรือขั้นตอนมาตรฐานที่เป็น Rules of thumb โดยไม่มีเหตุผลทางคณิตศาสตร์ เป็นวิธีที่เรียบง่าย ใช้เวลาไม่มากในการหาคำตอบและมีประสิทธิภาพ งานวิจัยที่ผ่านมาในยุคเริ่มต้นมักทำการสร้างโมเดลปัญหาและหาคำตอบด้วยวิธีการแบบ Heuristic หรือ Analytical และเลือกกระทำกับเป้าหมายอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงเป้าหมายเดียว (Single objective function) ทั้งนี้เนื่องจากความจำกัดของความสามารถในการหาคำตอบของวิธีการแบบ Heuristic ที่ไม่สามารถหาคำตอบของปัญหาที่ซับซ้อนหรือที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งคำตอบที่ได้ก็อาจขึ้นอยู่กับตัวโจทย์ปัญหานั้น ๆ (Problem dependent) และไม่รับประกันว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal solutions)

2) Mathematical methods เป็นการจัดรูปปัญหาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อการแก้สมการและหาคำตอบที่ Optimal ด้วย Linear programming Non-linear programming Integer programming และ Dynamic programming mathematical methods เป็นวิธีที่มีประสิทธิผลกับปัญหาที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก แต่ต้องใช้ความพยายามในการคำนวณหาคำตอบมาก

3) Simulation เป็นวิธีการหาคำตอบด้วยการสุ่มค่าพารามิเตอร์บางตัวของโมเดลปัญหา และให้คอมพิวเตอร์เป็นตัวกำหนดเลือกค่าพารามิเตอร์เหล่านี้แบบสุ่ม เพื่อนำมาคำนวณหาผลลัพธ์แผนงานตามที่ต้องการ คำตอบที่ได้จากวิธีนี้ก็รับประกันว่าเป็น Optimal แต่เป็นประมาณหาคำตอบที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุด

4) Searching algorithms เป็นวิธีการสุ่มเลือกคำตอบใด ๆ จากคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible solutions) ขึ้นมาพิจารณาเปรียบเทียบว่าคำตอบใดดีกว่ากัน โดยจะมีการบังคับทิศทางการค้นหาคำตอบให้ได้คำตอบที่ดียิ่งขึ้นเรื่อย ๆ วิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้ได้แก่ Simulated Annealing Tabu Search Genetic Algorithms Swarm Particle และ Neural Networks นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการหาคำตอบแบบ Searching algorithms ยังสามารถใช้ได้ดีกับโมเดลปัญหาที่มีหลายเป้าหมาย (Multi-objective function) เนื่องจากให้คำตอบที่เป็น Non-dominated solutions และกับโมเดลปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ในบางงานวิจัยเรียกวิธีการหาคำตอบกลุ่มนี้ว่า Metaheuristic methods การพัฒนาของวิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้คือ ความพยายามลดเวลาที่ใช้เพื่อให้ได้คำตอบที่ดี และการปรับปรุงคุณภาพของคำตอบที่ได้โดยการหลีกเลี่ยงการติดอยู่ใน Local optima

หากพิจารณาที่คำตอบที่ได้อาจแบ่งวิธีการหาคำตอบออกเป็นแบบ Exact solution methods กับ Approximate solution methods วิธีการแก้ปัญหาก็ให้คำตอบแบบ Exact solution หรือคำตอบที่รับประกันว่าเป็น Optimal solution ได้แก่ วิธี Linear และ Non-linear programming Integer programming และ Constraint programming ส่วนวิธีแบบ Approximate solution จะพยายามหาคำตอบที่ดีที่สุดที่หาได้ ซึ่งในปัญหาที่มีขนาดใหญ่อาจได้คำตอบที่ไม่ใช่ Optimal solution ได้แก่ วิธี Simulated annealing Tabu search Genetic algorithms Swarm particle และ Neural networks ในความเป็นจริงแล้ว โมเดลปัญหามักมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการหาคำตอบ Searching algorithms จะเป็นวิธีการที่เหมาะสม ทำให้สามารถสร้างโมเดลปัญหาที่ซับซ้อนใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด โดยไม่ต้องใช้สมมติฐานเพื่อทำให้ง่าย (Simplification)

2.9.1 เจเนติกอัลกอริธึม (Genetic algorithms)

เจเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithm: GA) จัดเป็นกระบวนการค้นหาคำตอบ (Search Algorithms) ที่เลียนแบบหลักการทางธรรมชาติ โดยการจำลองแบบวิธีการทำงานของวิวัฒนาการทางธรรมชาติแล้วนำมาปรับประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาต่าง ๆ เพื่อใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงที่สุดให้กับปัญหา เจเนติกอัลกอริธึมถูกพัฒนามาจากทฤษฎีวิวัฒนาการที่นำเสนอโดย Charles Darwin ซึ่งทฤษฎีนี้ได้อธิบายถึงหลักการในการดำรงอยู่ของเผ่าพันธุ์สิ่งมีชีวิตในธรรมชาติว่าสิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงที่สุดจะเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถมีชีวิตรอดเพื่อทำการสืบพันธุ์และดำรงเผ่าพันธุ์ได้ ในขณะที่สิ่งมีชีวิตที่อ่อนแอจะต้องตายเนื่องจากไม่สามารถปรับตัวและต่อสู้กับสภาพแวดล้อมได้ทำให้หมดโอกาสในการสืบพันธุ์และในที่สุดก็ต้องสูญพันธุ์ไป

หลักการของเจเนติกอัลกอริธึมได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Holland ในปี 1973 (Holland, 1973) โดยใช้หลักการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่ดีจากบรรพบุรุษไปสู่ลูกหลานเป็นแนวทางในการหาคำตอบของปัญหา และใช้การอ้างอิงข้อมูลของประชากรในรุ่นก่อนหน้าสำหรับการสร้างจุดค้นหา (Search point) ภายใต้ขอบเขตที่เป็นไปได้ของคำตอบ ผนวกกับการใช้ฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function) หรือฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) เป็นตัวกำหนดลักษณะคำตอบของปัญหา เจเนติกอัลกอริธึมจะใช้โครโมโซม (Chromosome) ซึ่งโดยปกติแล้วเป็นตัวที่บ่งบอกถึงลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตแทนลักษณะคำตอบของปัญหาที่ต้องการแก้ และจะมีกระบวนการพัฒนาลักษณะคำตอบของปัญหาให้ดีขึ้นตามขั้นตอนการทำงานของเจเนติกอัลกอริธึม ลักษณะการทำงานจะเทียบได้กับกระบวนการทางธรรมชาติที่มีการพัฒนาลักษณะของประชากรอันหมายถึงโครโมโซมให้มีลักษณะที่ดีขึ้นตามหลักการอยู่รอดของผู้ที่มีความเหมาะสมที่จะดำรงชีวิตอยู่ต่อไปและสามารถถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมที่ดีส่งต่อไปยังลูกหลานได้ การพัฒนาลักษณะของประชากรให้ดีขึ้นนี้จะต้องผ่านกระบวนการทางธรรมชาติหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการ

คัดเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสมเพื่อนำมาใช้ขยายพันธุ์ (Reproduction) การแลกเปลี่ยนลักษณะทางพันธุกรรมที่ระหว่างโครโมโซม (Cross breeding) และการผ่าเหล่า (Mutation) เป็นต้น กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จะทำให้ได้ลักษณะของโครโมโซมที่มีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของยีนส์ (Genes) ที่อยู่ภายในโครโมโซม หรือลักษณะที่ได้รับจากการถ่ายทอดทางพันธุกรรมจากโครโมโซมรุ่นก่อนหน้า ในขณะที่เดียวกันโครโมโซมแต่ละตัวซึ่งมีค่าความเหมาะสมที่แตกต่างกันจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อกำหนดว่าโครโมโซมใดควรจะยังคงอยู่เพื่อใช้ในการขยายพันธุ์ในประชากรรุ่นถัดไปและโครโมโซมใดควรจะถูกคัดออก ดังนั้นโครโมโซมที่มีลักษณะด้อยย่อมมีแนวโน้มที่จะสูญพันธุ์ไปในที่สุด ในขณะที่โครโมโซมที่มีแนวโน้มที่จะขยายพันธุ์ต่อไปตามรุ่นประชากร (Generation) ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการพัฒนาทิศทางในการค้นหาคำตอบของกระบวนการ เมื่อพิจารณาลักษณะในการหาคำตอบของเจเนติกอัลกอริธึมที่รวมคุณสมบัติที่ดีในการถ่ายทอดทางพันธุกรรมระหว่างโครโมโซมรุ่นหนึ่งไปยังโครโมโซมรุ่นต่อไปโดยการใช้ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic operator) และการใช้โครโมโซมจำนวนหลายตัวในการหาคำตอบไปพร้อม ๆ กันในแต่ละรุ่นประชากรเป็นผลทำให้เจเนติกอัลกอริธึมมีความสามารถในการหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

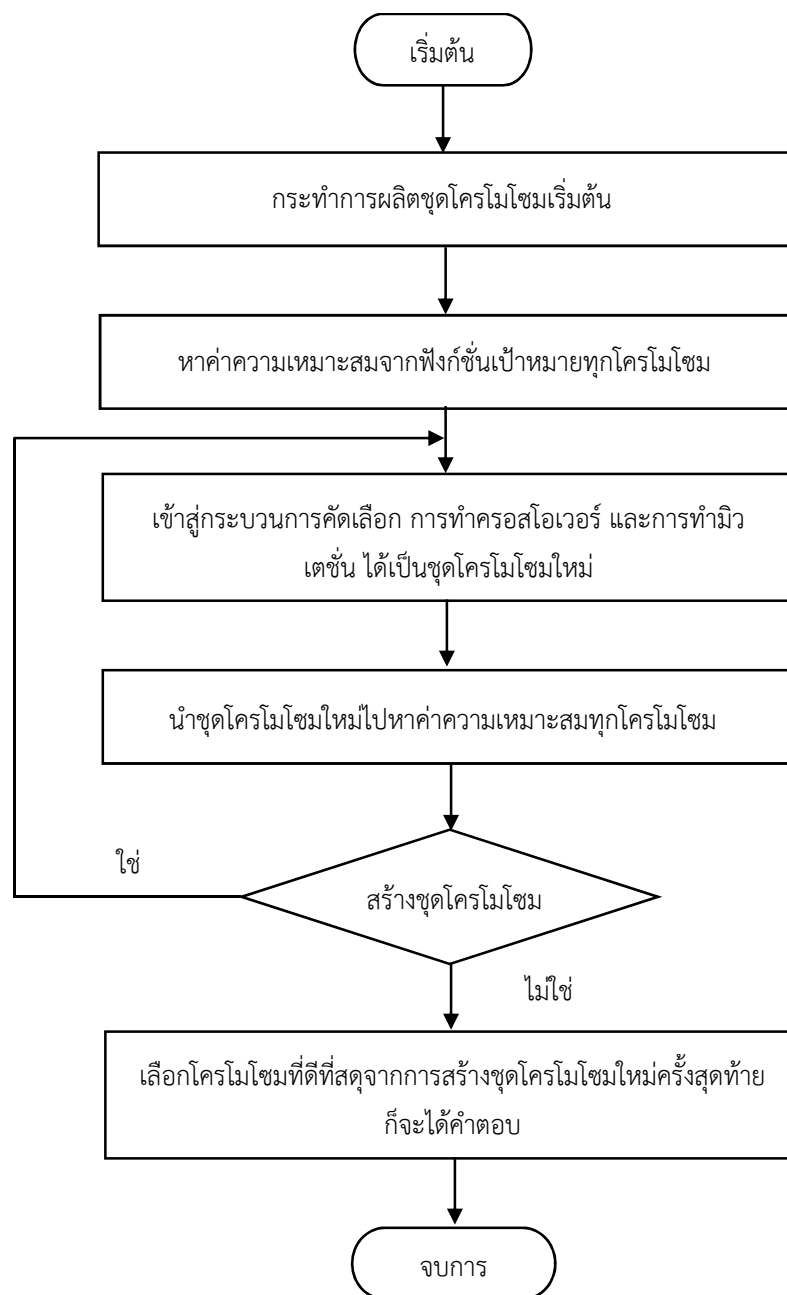
2.9.2 การหาคำตอบที่เหมาะสมโดยวิธีเจเนติกอัลกอริธึม

เจเนติกอัลกอริธึมเป็นกลวิธีการหาคำตอบอย่างหนึ่ง ซึ่งใช้วิธีการสุ่มหาคำตอบโดยการนำกลุ่มของคำตอบที่อยู่ภายในขอบเขตที่เป็นไปได้ของปัญหา (Search space) ไปหาค่าความเหมาะสมของคำตอบพร้อม ๆ กัน ซึ่งกลุ่มของคำตอบนี้จะเรียกว่าประชากร (Population) คำตอบแต่ละคำตอบนี้จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของรหัสโครโมโซม (Chromosome encoding) และจำนวนยีนส์ที่อยู่ภายในโครโมโซมจะขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรที่ต้องใช้ในการแก้ปัญหา การทำงานในขั้นตอนแรก เจเนติกอัลกอริธึมจะทำการสุ่มสร้างชุดคำตอบเริ่มต้นสำหรับปัญหาซึ่งอยู่ภายใต้ขอบเขตที่เป็นไปได้ของคำตอบในรูปแบบของกลุ่มโครโมโซม ซึ่งเรียกกันว่าประชากรรุ่นพ่อแม่ (Parent population) โครโมโซมแต่ละตัวจะมีความเหมาะสมที่ได้มาจากการคำนวณตามฟังก์ชันเป้าหมายเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสมบูรณ์ของตัวโครโมโซมเอง ดังนั้นในประชากรแต่ละรุ่น (Generation) ก็จะถูกประกอบไปด้วยโครโมโซมที่มีลักษณะเด่นและด้อยแตกต่างกันและกระจายอยู่ จากนั้นประชากรโครโมโซมทั้งหมดจะถูกถอดรหัสเพื่อแปลความหมาย (Chromosome decoding) ให้เป็นค่าของตัวแปรที่ต้องใช้ในการคำนวณเพื่อแก้ปัญหา หลังจากนั้นค่าต่าง ๆ ที่ได้จะถูกส่งไปประมวลผลในฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function) เพื่อหาค่าความสมบูรณ์หรือค่าความเหมาะสมของคำตอบที่ได้จากแต่ละโครโมโซม ชุดโครโมโซมทั้งหมดที่ผ่านการหาค่าความเหมาะสมจะเข้าสู่กระบวนการทำงานของเจเนติกโอเปอเรเตอร์โดยในลำดับแรกจะเป็นการหาค่าความน่าจะเป็นในการอยู่รอดของแต่ละโครโมโซม ซึ่งหลักการโดยทั่วไปของเจเนติกอัลกอริธึมนั้นจะพิจารณาให้โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมของคำตอบหรือค่าฟิตเนสสูงกว่าสามารถมีโอกาสอยู่รอดและ

กระจายอยู่ในประชากรรุ่นถัดไปได้มากกว่าโครโมโซมที่มีค่าเหมาะสมหรือค่าฟิตเนสต่ำ ในลำดับถัดมาชุดโครโมโซมที่เหลือรอดจากประชากรในรุ่นก่อนหน้าทั้งหมดซึ่งจัดว่าเป็นชุดโครโมโซมที่ให้ค่าความสมบูรณ์ของคำตอบสูงจะเข้าสู่กระบวนการของเจเนติกโอเปอเรเตอร์ได้แก่ การทำครอสโอเวอร์ (Cross over) และการทำ (Mutation) ในขั้นตอนนี้ของโครโมโซมบางส่วนจะถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับบิตหรือยีนส์ของแต่ละโครโมโซมทำให้เกิดเป็นโครโมโซมใหม่ที่มีลักษณะแตกต่างออกไปจากโครโมโซมเดิม การดำเนินการดังกล่าวเป็นไปเพื่อเพิ่มความหลากหลายและเป็น การขยายขอบเขตการค้นหาคำตอบของเจเนติกอัลกอริธึมส์ให้มีความครอบคลุมขอบเขตของคำตอบให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานจากประชากรโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมของคำตอบสูงนั่นเอง เหตุผลที่จำเป็นต้องมีความหลากหลายในการหาคำตอบนั้นเป็นเพราะคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอาจอยู่ที่ส่วนใดส่วนหนึ่งภายในขอบเขตที่เป็นไปได้ของปัญหาก็ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนหรือมีคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible solution) เป็นจำนวนมาก ถ้า กำหนดขอบเขตในการหาคำตอบแคบเกินไปจะทำให้ไม่สามารถพบคำตอบที่ดีที่สุดได้ แต่อาจจะพบ จุดต่ำสุดหรือสูงสุดสัมพัทธ์ (Local minima or maxima) แทน ในระหว่างการดำเนินการเพื่อค้นหา คำตอบที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่นประชากรอยู่นั้น โครโมโซมที่มีความเหมาะสมสูงจะถูกถ่ายทอดไปสู่ โครโมโซมรุ่นต่อ ๆ ไปโดยผ่านกระบวนการทำครอสโอเวอร์และมิวเตชัน เพื่อใช้เป็นตัวหลักในการ ค้นหาโครโมโซมที่มีความเหมาะสมสูงสุดในที่นี้ก็คือคำตอบที่แท้จริงของปัญหานั้นเอง หลังจากที่ผ่านมา กระบวนการทำงานของเจเนติกโอเปอเรเตอร์แล้วชุดโครโมโซมใหม่ที่ได้หรือที่เรียกว่าออฟสปริง (Offspring) เหล่านี้จะถูกนำกลับเข้าสู่กระบวนการเดิมอีกครั้งซึ่งได้แก่การถอดรหัสเพื่อแปลค่า การหาค่าความเหมาะสมหรือค่าฟิตเนส และการผ่านกระบวนการจากเจเนติกโอเปอเรเตอร์ จนกระทั่งประชากรแต่ละรุ่นมีแนวโน้มในการให้ค่าความเหมาะสมของคำตอบใกล้เคียงกันหรือสิ้นสุด รอบการประมวลผลตามที่ได้กำหนดจึงจะทำให้ได้คำตอบสำหรับปัญหา จากวิธีการดังกล่าวนี้จะทำให้เจเนติกอัลกอริธึมส์สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดหรือค่าสูงสุดสมบูรณ์ของปัญหาได้

เจเนติกอัลกอริธึมส์มีความยืดหยุ่นสูงสามารถนำมาปรับประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดีทั้งนี้เนื่องจากวิธีการแก้ปัญหามาจากการใช้เจเนติกอัลกอริธึมส์เป็นเพียงการเปลี่ยน รูปแบบของปัญหาต่าง ๆ ให้อยู่ในลักษณะของโครโมโซมและจากนั้นก็ใช้กระบวนการค้นหาคำตอบ โดยวิธีเจเนติกอัลกอริธึมส์เพียงอย่างเดียว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับรูปแบบของปัญหาเดิมแต่ อย่างใด เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของปัญหาเดิมที่มีความซับซ้อนให้อยู่ในรูปแบบของปัญหา ใหม่ที่มีความสะดวกและเหมาะสมแล้ว เมื่อได้รับคำตอบแล้วจะต้องมีการเปลี่ยนคำตอบที่ได้กลับมา เป็นคำตอบจริงของปัญหาที่อยู่ในรูปแบบเดิม จากหลักการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ วิธีเจเนติกอัลกอริธึมส์ในการแก้ปัญหาไม่เพียงจะสามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เท่านั้น แต่ยังมี ความยืดหยุ่นในการแก้ปัญหาซึ่งไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนกระบวนการทำงาน

ภายในในการหาคำตอบของเจเนติกอัลกอริธึมส์แต่อย่างใด แต่ส่วนที่สำคัญในการประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริธึมส์ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ นั้นคือการกำหนดรูปแบบลักษณะของโครโมโซมให้สอดคล้องและเหมาะสมกับปัญหา การกำหนดรูปแบบการทำงานของเจเนติกโอเปอเรเตอร์ให้มีความสอดคล้องกับลักษณะของโครโมโซม และการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายให้สัมพันธ์กับปัญหาที่ต้องการจะหาคำตอบ กระบวนการทำงานของเจเนติกอัลกอริธึมส์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19

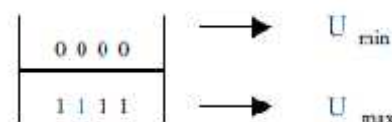


รูปที่ 2.19 แสดงกระบวนการทำงานของเจเนติกอัลกอริธึมส์

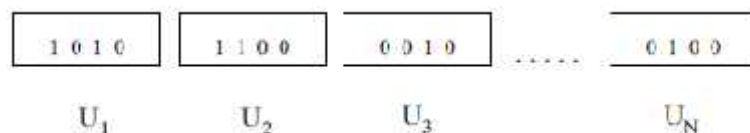
2.9.3 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome encoding)

การเข้ารหัสโครโมโซมเป็นวิธีการเปลี่ยนลักษณะหรือรูปแบบคำตอบของปัญหาให้อยู่ในรูปแบบโครโมโซม ซึ่งมีลักษณะรูปแบบของโครโมโซมที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของปัญหา ในทางปฏิบัตินั้นจะมีรูปแบบการใส่รหัสโครโมโซมหลายแบบด้วยกันตัวอย่างเช่น แบบ Bit string Array list Tree Matrix ฯลฯ

สำหรับการเข้ารหัสอย่างง่ายนั้น ตัวอย่างเช่นการเข้ารหัสแล้วได้ผลออกมาเป็นการเปิดหรือปิดของสวิตช์ เราจะมีโครโมโซมเป็น 0 หรือ 1 ซึ่ง 0 หมายถึงสวิตช์เปิดและ 1 หมายถึงสวิตช์ปิด หรือการเข้ารหัสที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อจำนวนตัวแปรที่มีจำนวนมากขึ้น ในกรณีนี้การเข้ารหัสอาจอยู่ในรูปแบบของการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด และลักษณะการเข้ารหัสแบบนี้อาจทำได้ดังรูปที่ 2.20 โดยในรูปที่ 2.20 (ก) จะแสดงการเข้ารหัสของตัวแปรเดียวที่ให้ผลการถอดรหัสออกมาเป็นค่าพารามิเตอร์สูงสุดและต่ำสุด ส่วนในรูปที่ 2.20 (ข) นั้นแสดงเป็นลักษณะชุดโครโมโซมที่มีการเข้ารหัสแบบหลายตัวแปรจำนวน N ตัวแปร โดยค่า U_1 ถึง U_N เป็นค่าพารามิเตอร์ของแต่ละตัวแปรโดยทั่วไปขนาดของโครโมโซมที่ใช้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาและความละเอียดของคำตอบที่ต้องการ การกำหนดลักษณะรูปแบบของโครโมโซมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อการแก้ไขปัญหาไม่ว่าจะเป็นเรื่องข้อระยะเวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหา ความถูกต้องในการแก้ปัญหา และความละเอียดของคำตอบ อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสในวิธีเจเนติกควรกระทำให้มีความยุ่งยากน้อยที่สุดและมีความสอดคล้องกับการแก้ไขปัญหามากที่สุด ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการแก้ปัญหา



(ก) ตัวแปรเดียวบอกค่าต่ำสุดและสูงสุดของพารามิเตอร์



(ข) หลายตัวแปรที่ประกอบเป็นโครโมโซม

รูปที่ 2.20 แสดงการเข้ารหัสโครโมโซมแบบ Bit String

2.9.4 การหาค่าฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness function)

การหาค่าฟังก์ชันความเหมาะสมเป็นวิธีที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งในเจเนติกอัลกอริธึมส์ เนื่องจากเจเนติกอัลกอริธึมส์จะใช้ค่าความเหมาะสมเป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างโครโมโซมในแต่ละรุ่นเพื่อใช้ในการคัดเลือกโครโมโซม (Selection) ที่จะใช้ในการขยายพันธุ์ (Reproduction) การกำหนดฟังก์ชันความเหมาะสมนั้นจะต้องมีความสอดคล้องกับเป้าหมายของปัญหา ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปแล้วผู้ที่ต้องการแก้ปัญหาจะต้องทำการกำหนดเป้าหมายของการแก้ปัญหาไว้ก่อน จากนั้นจึงทำการกำหนดเป็นฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับใช้เป็นจุดอ้างอิงเพื่อค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดในขั้นตอนของเจเนติกอัลกอริธึมส์

ในกรณีของปัญหาบางปัญหาที่ไม่สามารถแก้ปัญหาได้โดยอาศัยการหาค่าจากฟังก์ชันความเหมาะสมแต่เพียงอย่างเดียวเช่นในปัญหาที่มีข้อจำกัด (Constraints) มาก การแก้ปัญหาจะต้องดำเนินไปพร้อมกับการใช้ฟังก์ชันการลงโทษเพื่อให้การแก้ปัญหาเป็นไปตามข้อจำกัดที่มีอยู่โดย Goldberg ได้เสนอวิธีการใช้ฟังก์ชันการลงโทษ (Penalty function) ซึ่งต้องทำการพิจารณาร่วมกับฟังก์ชันเดิมเพื่อป้องกันข้อผิดพลาดในระหว่างการหาค่าของโครโมโซมเช่น การผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในช่วงระหว่างการขยายพันธุ์โดยการทำครอสโอเวอร์หรือการทำมิวเตชัน ซึ่งในขบวนการนี้อาจทำให้เกิดโครโมโซมที่ผิดปกติที่ให้ค่าความเหมาะสมไม่สอดคล้องกับข้อจำกัดที่กำหนดไว้ในกรณีแก้ปัญหาเป็นผลทำให้ค่าตอบที่ได้จะมีความผิดพลาดอยู่ด้วย เมื่อมีการใช้ฟังก์ชันการลงโทษร่วมกันจะทำให้โครโมโซมที่ผิดปกติที่มีลักษณะไม่สอดคล้องกับข้อจำกัดถูกกำจัดโดยการทำให้โครโมโซมดังกล่าวมีค่าความเหมาะสมน้อยลงและในที่สุดก็จะสูญพันธุ์ไปจากประชากรในรุ่นนั้น ๆ

แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติวิธีดังกล่าวจะไม่สามารถใช้ได้กับทุกปัญหา เนื่องจากบางปัญหาไม่สามารถที่จะเขียนในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถหาค่าฟังก์ชันการลงโทษและสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการลงโทษได้โดยตรง ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้รูปแบบของโครโมโซมและการใช้ฟังก์ชันความเหมาะสมที่ถูกต้องยังเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการนำเอาเจเนติกอัลกอริธึมส์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา

นอกจากนี้ในบางกรณีที่มีค่าความแตกต่างของค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัวมีค่าน้อยมากซึ่งหมายความว่าจำนวนต้นแบบของแต่ละโครโมโซมมีความใกล้เคียงกัน ส่งผลทำให้ความสามารถในการค้นหาค่าตอบของเจเนติกอัลกอริธึมส์ลดลงจนเหมือนกับการค้นหาแบบสุ่ม (Random search) ดังนั้นต้องทำการปรับปรุงฟังก์ชันความเหมาะสมเพื่อแก้ไขค่าความเหมาะสมให้มีลักษณะที่สามารถแสดงค่าความแตกต่างของโครโมโซมแต่ละตัวได้อย่างชัดเจนมีอยู่หลายวิธี เช่น Linear scaling Sigma truncation scaling และ Power law scaling เป็นต้น

2.9.5 การคัดเลือกโครโมโซม (Selection)

การคัดเลือกโครโมโซมเป็นขั้นตอนการสร้าง Mating pool โดยอาศัยหลักการที่มาจากหลักการคัดเลือกทางธรรมชาติ นั่นคือสิ่งมีชีวิตใดแข็งแรงกว่าย่อมมีโอกาสอยู่รอดได้มากกว่า เจเนติกอัลกอริธึมส์ทำการเลียนแบบหลักการนี้โดยการคัดเลือกชุดโครโมโซมพ่อแม่ จากโครโมโซมรุ่นเก่าที่ดี โดยการสุ่มเพื่อนำมาเป็นต้นแบบสำหรับการสร้างโครโมโซมรุ่นลูกถัดไป ในระบบทางชีววิทยานั้น จำนวนประชากรในธรรมชาติที่อยู่รอดได้จริงๆ อาจถูกกำหนดได้โดยสิ่งที่มาเบียดเบียนต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น โรคติดต่อ ซึ่งในลักษณะเช่นนี้สามารถจำลองเป็นการเลียนแบบธรรมชาติได้โดยใช้ค่าจากฟังก์ชันเป้าหมายเป็นเครื่องชี้ว่าโครโมโซมจะสามารถมีชีวิตอยู่รอดต่อไปหรือไม่สำหรับรอบการสร้างชุดโครโมโซมใหม่ ซึ่งการอยู่รอดของโครโมโซมนั้นแสดงให้เห็นว่าโครโมโซมนั้นมีความสมบูรณ์และถ้าเป็นคำตอบของปัญหาก็จะเป็นคำตอบที่ดีนั่นเอง ความแข็งแรงของโครโมโซมนั้นจะพิจารณาจากค่าความเหมาะสมที่ได้จากฟังก์ชันความเหมาะสมซึ่งค่าดังกล่าวอาจเป็นค่าที่ได้จากฟังก์ชันความเหมาะสมโดยตรงหรืออาจเป็นค่าที่ได้หลังจากทำการปรับแต่งแล้ว

โดยทั่วไปวิธีการคัดเลือกโครโมโซมจะใช้วิธีพื้นฐานที่เรียกว่าวิธีการคัดเลือกแบบวงล้อ (Roulette wheel selection) ซึ่งจะใช้ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัวในกลุ่มประชากรเป็นตัวกำหนดโดยที่ถ้าค่าความเหมาะสมของโครโมโซมมีค่ามากเท่าใด โครโมโซมตัวนั้นๆ ย่อมมีโอกาสที่จะถูกคัดเลือกมากยิ่งขึ้น และในทางปฏิบัติโครโมโซมแต่ละตัวอาจมีโอกาสถูกเลือกขึ้นมาได้มากกว่า 1 ครั้ง เนื่องจากค่าคะแนนที่มากของโครโมโซมเอง ในขณะที่เดียวกันจะพบว่าโครโมโซมที่มีค่าคะแนนต่ำย่อมมีโอกาสน้อยกว่าในการถูกคัดเลือกเพื่อใช้ในการขยายพันธุ์ต่อไปและยังมีแนวโน้มที่จะสูญพันธุ์ไปในประชากรรุ่นนั้นหรือรุ่นถัดไปอีกด้วย ในการคัดเลือกแบบวงล้อนั้นค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือกสามารถหาค่าได้จากค่าฟิตเนสของแต่ละโครโมโซมเมื่อเทียบกับผลรวมของค่าฟิตเนสของโครโมโซมทั้งหมดดังสมการที่ 2.1

$$ps_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (2.1)$$

เมื่อ ps_i เป็นพื้นที่สำหรับโครโมโซมที่ i บนวงล้อ
 f_i เป็นค่าฟิตเนสของโครโมโซมที่ i
 $\sum f_i$ เป็นผลรวมของค่าฟิตเนสของทุกโครโมโซม

ในทางทฤษฎี จำนวนของชุดโครโมโซมลำดับที่ i จะถูกสร้างซ้ำในรุ่นต่อไปสามารถหาได้จาก

$$num_i = nxps_i = \frac{f}{f_{ave}} \quad (3.2)$$

เมื่อ f_{ave} เป็นค่าฟิตเนสเฉลี่ยของประชากรในรุ่นปัจจุบัน
 num_i เป็นจำนวนของชุดโครโมโซมลำดับที่ i
 $nxps_i$ เป็นพื้นที่บนวงล้อที่จะถูกสร้างซ้ำในรุ่นต่อไป

ในปัจจุบันงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีเจเนติกอัลกอริธึมมาใช้ในการแก้ปัญหา นั้น ได้เสนอวิธีการคัดเลือกโครโมโซมที่จะนำมาขยายพันธุ์ไว้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีก็มีลักษณะและรายละเอียดที่แตกต่างกันโดยมีรูปแบบใหญ่ ๆ ในการคัดเลือกโดยอ้างอิงค่าความเหมาะสมและการคัดเลือกโดยการอ้างอิงลำดับโดยวิธีการคัดเลือกโครโมโซมชนิดต่าง ๆ มีดังนี้

- Roulette wheel selection
- Rank selection
- Tournament selection
- Deterministic sampling selection
- Stochastic remainder sampling selection
- Stochastic uniform sampling selection
- Spatially oriented selection

สำหรับรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเลือกโครโมโซมต่าง ๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน

2.9.6 การขยายพันธุ์ (Reproduction)

คุณสมบัติของเจเนติกอัลกอริธึมที่ใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดประกอบไปด้วยคุณสมบัติสองอย่างด้วยกันคือ คุณสมบัติที่กลุ่มของโครโมโซมมีความสามารถในการสืบค้นทั่วทั้งบริเวณ Search space ซึ่งเรียกว่า “Exploration” และคุณสมบัติที่กลุ่มของโครโมโซมมีความสามารถที่จะเข้าสู่คำตอบเมื่อทราบบริเวณที่แน่นอนซึ่งเรียกว่า “Exploitation” คุณสมบัติทั้งสองนี้เองที่เป็นคุณสมบัติเด่นของการหาคำตอบด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริธึม เนื่องจากเจเนติกอัลกอริธึมจะมีความสามารถในการหาคำตอบโดยใช้กลุ่มของคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible solution) ซึ่งก็คือโครโมโซมแต่ละตัวนั่นเอง เมื่อโครโมโซมที่มีค่าคะแนนสูงได้ถูกเลือกขึ้นมาเพื่อทำการขยายพันธุ์ขั้นตอนการขยายพันธุ์นี้เองที่มีบทบาทสำคัญในการบ่งชี้ว่าเจเนติกอัลกอริธึมจะมีความสามารถในการหาคำตอบได้มากน้อยเพียงใดเนื่องจากการขยายพันธุ์จะเป็นตัวกำหนดถึงศักยภาพของโครโมโซมที่จะต้องทำการสืบค้นคำตอบในบริเวณ Search space โดยในระหว่างขั้นตอนการหาคำตอบของเจเนติกอัลกอริธึมนั้น กลุ่มของโครโมโซมในประชากรทั้งหมดจะต้องพยายามกระจายตัวเพื่อค้นหาคำตอบที่มีแนวโน้มที่เป็นคำตอบของปัญหา (Exploration) และใน

ขณะเดียวกันกลุ่มของโครโมโซมเองจะต้องมีความสามารถในการลู่เข้าคำตอบที่ถูกต้อง (Exploitation) หลังจากทราบบริเวณที่แน่นอนแล้วว่าคำตอบควรจะอยู่ในบริเวณใดใน Search space

ขั้นตอนการขยายพันธุ์นั้นจะใช้ตัวดำเนินการทางเจเนติกอยู่ด้วยกัน 2 อย่างคือการทำครอสโอเวอร์ (Crossover) และการทำมิวเทชัน (Mutation) ซึ่งตัวดำเนินการทั้งสองนี้เองที่จะเป็นตัวสร้างคุณสมบัติที่สำคัญในการค้นหาคำตอบดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นให้กับเจเนติกอัลกอริทึมส์

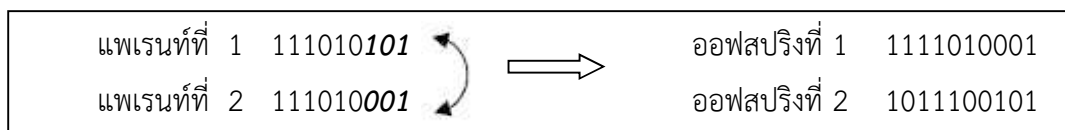
1) การทำครอสโอเวอร์ (Crossover)

กระบวนการครอสโอเวอร์เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างคู่โครโมโซมที่ต่างกัน (Parent chromosome) ซึ่งในการทำครอสโอเวอร์นั้นจะต้องกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ (Probability of crossover; P_c) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ตัวอย่างเช่น ถ้าประชากรมีจำนวนโครโมโซม 100 ตัว และมีค่า P_c เท่ากับ 0.7 หมายความว่าต้องมีการทำครอสโอเวอร์กับโครโมโซมทั้งหมด $0.7 \times 100 = 70$ ตัว และถ้าค่า P_c เท่ากับ 1 หมายความว่าต้องทำครอสโอเวอร์กับโครโมโซมทั้งหมด 100 ตัว และในกรณีพิเศษถ้าค่า P_c เท่ากับ 0 จะแสดงว่าไม่มีการทำครอสโอเวอร์เกิดขึ้นเลย ซึ่งหมายความว่าจะมีเพียงการลอกแบบ (Duplication) หรือการทำสำเนาจากโครโมโซมของประชากรรุ่นปัจจุบันไปยังรุ่นถัดไปเท่านั้น ซึ่งการทำเช่นนี้จะไม่เกิดประโยชน์ในการหาคำตอบของเจเนติกอัลกอริทึมส์แต่อย่างใด ขั้นตอนการทำงานของการครอสโอเวอร์นั้นมีอยู่ด้วยกันสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะนำโครโมโซมที่ได้จากขั้นตอนการคัดเลือกโครโมโซมทั้งหมดมาทำการสุ่มค่าตัวเลขทศนิยมที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 เพื่อทำการเปรียบเทียบตัวเลขที่สุ่มได้ของโครโมโซมกับค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ โดยถ้าหากค่าตัวเลขที่สุ่มมาได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความน่าจะเป็นในการทำครอสโอเวอร์ให้นำโครโมโซมนั้นมาดำเนินการในขั้นตอนที่สองต่อไป ในขั้นตอนที่สองนั้นจะทำการจับคู่โครโมโซมที่ได้จากขั้นตอนแรกเพื่อมาทำเป็นโครโมโซมพ่อ-แม่ (Parent chromosome) โดยจะทำการสุ่มค่าตัวเลขสำหรับแต่ละคู่โครโมโซมซึ่งเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม k ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง $L-1$ เมื่อ L คือจำนวนบิตของโครโมโซม (ความยาวของโครโมโซม) เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงที่จะใช้ในการตัดต่อคู่โครโมโซม (Crossing site) ต่อจากนั้นจะทำการสลับค่าระหว่างคู่โครโมโซมที่ตำแหน่ง $k + 1$ ถึง L เกิดเป็นโครโมโซมคู่ใหม่ (Offspring) ขึ้น ซึ่งการสร้างโครโมโซมใหม่ที่เกิดจากการทำครอสโอเวอร์นี้เป็นไปเพื่อให้ได้มาซึ่งโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากขึ้นกว่าโครโมโซมรุ่นก่อนเป็นการเพิ่มศักยภาพและความหลากหลายของโครโมโซมเพื่อใช้ในการหาคำตอบในประชากรรุ่นถัดไป

รูปแบบในการทำครอสโอเวอร์นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับลักษณะและความยาวของโครโมโซมที่กำหนดขึ้น รูปแบบการทำครอสโอเวอร์แบบต่าง ๆ มีดังนี้คือ

- ครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด (One point crossover)
- ครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด (Two point crossover)
- ครอสโอเวอร์แบบ N จุด (N-Point crossover)
- ครอสโอเวอร์แบบสม่ำเสมอ (Uniform crossover)

นอกจากการทำครอสโอเวอร์ทั้ง 4 แบบในข้างต้นซึ่งเป็นรูปแบบพื้นฐานที่ใช้กับโครโมโซมชนิด Bit String แล้วก็ยังมีรูปแบบการทำครอสโอเวอร์แบบอื่น ๆ ที่มีรูปแบบที่แตกต่างออกไปตัวอย่างเช่น วิธี Partially Mapped Crossover (PMX) Order Crossover (OX) Cycle Crossover (CX) ซึ่งใช้สำหรับปัญหาบางชนิดที่ไม่สามารถที่จะนำโครโมโซมแบบ Bit string มาประยุกต์ใช้ได้โดยตรง ตัวอย่างเช่นปัญหาการเดินทางของเซลส์แมน (Travelling Salesman Problem; TSP) ซึ่งรายละเอียดของการกระทำครอสโอเวอร์แบบต่าง ๆ นี้สามารถศึกษาได้จากรูปที่ 2.21



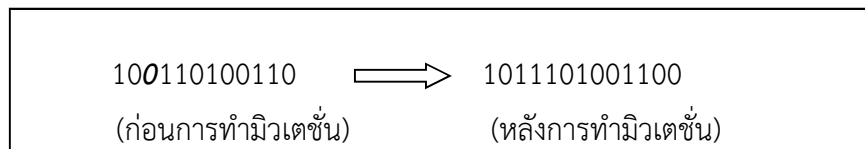
รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการทำครอสโอเวอร์แบบ 1 จุดโดยมีตำแหน่งของครอสซิงไซด์เท่ากับ 7

2) การทำมิวเตชัน (Mutation)

เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าโครโมโซมที่ผ่านขั้นตอนการครอสโอเวอร์มาแล้ว ขั้นตอนนี้จะกระทำกับทุกโครโมโซม โดยในแต่ละบิตของทุกโครโมโซมจะมีโอกาสถูกเปลี่ยนแปลง การถูกเปลี่ยนแปลงของแต่ละบิตนั้นขึ้นอยู่กับค่าที่ได้จากการสุ่มค่าตัวเลขขึ้นมาว่าจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความเป็นไปได้ในการทำมิวเตชัน (Probability of Mutation; P_m) ที่กำหนดไว้หรือไม่ การทำมิวเตชันนั้นจะมีบทบาทสำคัญในการปรับเปลี่ยนโครโมโซมให้มีลักษณะดีขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มความหลากหลาย (Diversity) ในการหาคำตอบให้กับเจเนติกอัลกอริทึมและป้องกันการสูญเสียข้อมูลที่สำคัญในระหว่างกระบวนการของการรีโพรดักชันและครอสโอเวอร์ เนื่องจากคุณสมบัติ Exploitation ที่เกิดจากการทำงานของครอสโอเวอร์ซึ่งทำการแลกเปลี่ยนยีนส์ของโครโมโซมแต่ละคู่ จะทำให้การหาคำตอบมีความใกล้เคียงบริเวณคำตอบจริงมากขึ้น แต่ถ้าขอบเขตของ Search space ที่เล็กลงนี้ ไม่ได้อยู่ในบริเวณคำตอบที่แท้จริงก็จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการหาคำตอบได้เพราะใน

บริเวณ Search space อาจมีจุดต่ำสุดหรือสูงสุดสัมพัทธ์ (Local minima หรือ Maxima) กระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมากและถ้าโครโมโซมมีการกระจุกตัวอยู่ในบริเวณดังกล่าวนี้ย่อมจะทำให้ไม่สามารถที่จะกระจายตัวหรือมีการกระโดดข้ามไปยังบริเวณของ Search space อื่น ๆ ที่อาจจะมีคำตอบที่ดีกว่าได้ ซึ่งโดยทั่วไปกรณีที่อาจเกิดขึ้นนี้จะเรียกว่าการลู่เข้าคำตอบเร็วเกินไป (Premature convergence) ซึ่งในที่สุดแล้วโครโมโซมจะไม่สามารถหาคำตอบที่ถูกต้องอย่างแท้จริงได้

วิธีการทำมิวเตชันเป็นวิธีการที่ง่ายเพียงแต่จะต้องทำการสุ่มหาค่าตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในโครโมโซมเพื่อทำการสลับค่า (Swap) เช่นการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเลขจาก 0 ไปเป็น 1 หรือจาก 1 ไปเป็น 0 ดังตัวอย่างต่อไปนี้ที่มีการทำมิวเตชันในตำแหน่งที่ 3 ของโครโมโซมดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างการทำมิวเตชันในตำแหน่งที่ 3 ของโครโมโซม

2.9.7 พารามิเตอร์สำหรับเจเนติกอัลกอริทึม

ในการดำเนินการของเจเนติกอัลกอริทึมนั้นจำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้สำหรับตัวดำเนินการทางเจเนติกอยู่ด้วยกันหลายค่าประกอบไปด้วย จำนวนประชากรในแต่ละรุ่นประชากร (Population number) ความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ (Probability of Crossover; Pc) และความน่าจะเป็นของการมิวเตชัน (Probability of Mutation; Pm) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของปัญหาที่แตกต่างกันไป และยังไม่มียุทธวิธีหรือวิธีการใดที่จะสามารถบอกหรือกำหนดได้ว่าต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้เท่าใดจึงจะทำให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด แต่ก็มีข้อเสนอแนะจากผู้ที่ได้ทำการศึกษาวิจัยในการกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ เช่น De Jong ได้เสนอให้ใช้ความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ที่สูง ความน่าจะเป็นของการมิวเตชันที่ต่ำ และขนาดของประชากรปานกลางจึงจะเหมาะสม นอกจากนี้ยังได้เสนอให้ขนาดของประชากรเป็น 50-100 ความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์เป็น 0.50 และความน่าจะเป็นของการมิวเตชันเป็น 0.001 สำหรับ Goldberg และ Smatani แนะนำให้ใช้ขนาดของประชากรเป็น 20-30 ความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์อยู่ในช่วง 0.75-0.95 และความน่าจะเป็นของการมิวเตชันอยู่ในช่วง 0.005-0.01

นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่พบว่าการทำมิวเตชันที่กำหนดค่าความน่าจะเป็นของการมิวเตชันไว้สูงเกินไปอาจส่งผลให้การทำงานของเจเนติกอัลกอริธึมส์กลายเป็นการทำงานที่คล้ายกับการหาคำตอบแบบ Random เนื่องจากคุณสมบัติการทำมิวเตชันจะเพิ่มความหลากหลายให้กับโครโมโซม ดังนั้นถ้าโครโมโซมมีการกระจายตัวมากจนเกินไป จะทำให้ผลของการทำครอสโอเวอร์ไม่สามารถที่จะเอาชนะผลของการทำมิวเตชันได้ซึ่ง และสำหรับในบางกรณีที่กำหนดค่าความน่าจะเป็นของการทำครอสโอเวอร์และมิวเตชันให้เป็นค่าคงที่ตลอดเพียงอย่างเดียว อาจจะทำให้การลู่เข้าของคำตอบของโครโมโซมทำได้ไม่ทัน หรืออาจไม่สามารถลู่เข้าหาคำตอบได้ เช่นในกรณีที่ปัญหาที่ต้องการจะแก้มีจุดสูงสุดหรือต่ำสุดสัมพัทธ์ของคำตอบเป็นจำนวนมากในบริเวณ Search Space ดังนั้นนอกจากจะต้องคำนึงถึงค่า Pc และ Pm ที่เหมาะสมกับปัญหาแล้ว อาจจะต้องมีการปรับแต่งค่าความน่าจะเป็นของทั้ง 2 ค่าในระหว่างที่เจเนติกอัลกอริธึมส์กำลังหาคำตอบ ซึ่งการปรับค่าเหล่านี้จะใช้หลักการที่ว่าค่าของความน่าจะเป็นของการทำครอสโอเวอร์ควรมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรุ่นประชากรเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าความน่าจะเป็นของการทำมิวเตชันควรมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดการลู่เข้าสู่คำตอบเร็วเกินไป

2.9.8 การลู่เข้าคำตอบ (Convergence)

หลักการการทำงานของเจเนติกอัลกอริธึมส์นั้นจะเป็นการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาโดยใช้ตัวดำเนินการทางเจเนติกในการพัฒนาลักษณะคำตอบของปัญหาให้ดีขึ้น การดำเนินการดังกล่าวจะมีกระบวนการเป็นลักษณะการวนซ้ำ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดจุดสิ้นสุดในการทำงานให้กับเจเนติกอัลกอริธึมส์เมื่อมีการลู่เข้าหาคำตอบซึ่งวิธีการที่ใช้ในการกำหนดการลู่เข้าสู่คำตอบมี 3 วิธีดังนี้

1) การกำหนดจำนวนรุ่นประชากร

การกำหนดจำนวนรุ่นประชากรเป็นการกำหนดจำนวนรอบการทำงานของตัวดำเนินการทางเจเนติกดังนั้นจะทำให้สามารถประมาณระยะเวลาในการหาคำตอบของเจเนติกอัลกอริธึมส์ได้ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการในแต่ละรุ่นประชากรจะขึ้นอยู่กับลักษณะ ความยาว และจำนวนของโครโมโซมที่ใช้ แต่ในกรณีที่ปัญหามีความซับซ้อนมากวิธีการกำหนดจำนวนรุ่นประชากรเพียงอย่างเดียวนั้นอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากอาจเกิดกรณีที่มีการกำหนดจำนวนรุ่นของประชากรไว้น้อยเกินไปทำให้เจเนติกอัลกอริธึมส์ยังไม่สามารถที่จะหาคำตอบได้ถึงแม้จะมีการทำงานจนถึงจำนวนรุ่นประชากรที่กำหนดไว้แล้วก็ตามทำให้คำตอบสุดท้ายที่ได้ อาจไม่ใช่คำตอบที่ถูกต้อง ในทางกลับกันถ้ากำหนดจำนวนรุ่นประชากรไว้มากเกินไปและเจเนติกอัลกอริธึมส์สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ก่อนที่จะถึงจำนวนรุ่นที่ได้กำหนดไว้ก็จะทำให้เกิดการเสียเวลาในการทำงานไปโดยเปล่าประโยชน์

2) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของโครโมโซม

วิธีการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของโครโมโซมจะกระทำโดยการนำค่าเฉลี่ยของคะแนนของโครโมโซมไปเปรียบเทียบกับค่าคะแนนสูงสุดของประชากรนั้น และกำหนดให้มีค่าฐานกำหนด (Threshold) ค่าหนึ่งเป็นมาตรฐาน ตัวอย่างเช่น $\frac{MeanScore}{MaxScore} > 0.95$ แสดงว่าอัตราส่วนดังกล่าวจะเป็นตัวชี้ว่าในขณะนั้นการกระจายตัวของค่าความเหมาะสมในกลุ่มประชากรเป็นอย่างไร โดยที่ถ้าการกระจายตัวของค่าความเหมาะสมมีน้อยกว่าค่าที่กำหนดก็จะถือเป็นการสิ้นสุดกระบวนการหาคำตอบ แต่ถ้ายังมีการกระจายตัวมากกว่าค่าที่กำหนดก็จะต้องทำการค้นหาคำตอบต่อไปจนกระทั่งการกระจายตัวเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

ข้อดีของวิธีการนี้ก็คือถ้าปัญหาไม่มีความซับซ้อนการลู่เข้าคำตอบของปัญหาอาจจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่วนข้อเสียคือทำให้ไม่สามารถทราบระยะเวลาที่แน่นอนในการค้นหาของคำตอบได้เนื่องจากโดยพื้นฐานแล้วเจเนติกอัลกอริทึมส์จะใช้วิธีการค้นหาแบบสุ่มดังนั้นจึงไม่สามารถประมาณได้ว่าเจเนติกอัลกอริทึมส์จะสามารถค้นหาคำตอบได้เมื่อใด นอกจากนี้ในกรณีที่ถ้าปัญหามีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดสัมพันธ์มากอาจทำให้โครโมโซมเกือบทุกตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดการลู่เข้าคำตอบเร็วเกินไป (Premature convergence) ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าเหตุการณ์นี้จะส่งผลให้อัตราส่วนของ $MeanScore/MaxScore$ ไม่สามารถที่จะสะท้อนสภาพความเป็นจริงของแต่ละค่าคะแนนหรือค่าความเหมาะสมของโครโมโซมทั้งหมดได้

3) การพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของโครโมโซม

วิธีการพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะใช้หลักการคล้ายกับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของโครโมโซมแต่จะต่างกันตรงที่จะนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในประชากรมาพิจารณาว่าเมื่อใดที่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าค่าฐานกำหนดซึ่งเป็นการแสดงว่าในขณะนั้นค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัวมีการกระจายตัวลดลงก็จะถือเป็นการสิ้นสุดกระบวนการค้นหาคำตอบ

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Payakapo (a) and Payakapo (b), 2008) ได้นำของเสียประเภทฉลากพลาสติกมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตมวลเบาชนิดรับน้ำหนัก ฉลากพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากกระบวนการรีไซเคิลแก้ว โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการแทนที่คอนกรีตด้วยฉลากพลาสติกร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตรของคอนกรีต และใช้โฟมผสมร้อยละ 18 ถึง 57 โดยปริมาตรของส่วนผสมคอนกรีต การแปรเปลี่ยนอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30 0.35 และ 0.40 นำตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาซึ่งหล่อให้มีขนาด 5×5×5 เซนติเมตร มาทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำหลังจากทำการบ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน ผลการศึกษาพบว่า

ความเป็นไปได้ที่จะนำของเสียประเภทพลาสติกมาใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยปริมาณพลาสติกที่ใส่เข้าไปนั้นมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าค่ามาตรฐาน พบว่าเมื่อมีการแทนที่ของเสียประเภทพลาสติกลงในตัวอย่าง 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และทำการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นเท่ากับ 120 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร และ 1900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

(Nibudey et al., 2013) ได้ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์และทรงกระบอกที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยพลาสติกที่ใช้แล้ว โดยนำเส้นใยพลาสติกมาจากขวดพลาสติกชนิด Polyethelene Teraphthelne (PET) ที่ใช้แล้วมาเสริมกำลังในคอนกรีต และใช้ปริมาณของเส้นใยในอัตราร้อยละ 0 ถึง 3 โดยปริมาตร ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดและรูปทรงของคอนกรีตที่นำมาใช้ทดสอบ

บริษัท Affresol ผู้ผลิตนวัตกรรมใหม่ของประเทศอังกฤษ โดยนวัตกรรมใหม่ที่บริษัทจะผลิตขึ้นต้องมีคุณภาพดี ราคาต่ำและแยกส่วนได้ บริษัท Affresol พัฒนาวัสดุสำหรับการก่อสร้างที่เรียกว่า TPR (Thermo Poly Rock) ซึ่งใช้กระบวนการผลิตที่เป็นกระบวนการประหยัดพลังงานที่มีสิทธิบัตรรองรับโดยใช้กระบวนการเย็นเปลี่ยนขยะพลาสติกให้เป็นวัสดุกันน้ำและแผง TPR ที่หน่วยงานตีไฟ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ผลงานนวัตกรรมวัสดุก่อสร้างของขยะพลาสติกของบริษัท Affresol

(<https://www.treehugger.com/modular-design/affresol-prefab-houses-made-from-plastic-landfill.html>)

วัสดุชนิดนี้มีน้ำหนักเบาและทำให้แผง TPR มีความแข็งแรงกว่าคอนกรีต มีความเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีเยี่ยม รวมทั้งรีไซเคิลได้ 100% การตกแต่งภายในอาคารสามารถฉาบบน TPR หรือทำให้มีสมบัติเป็นฉนวนเหมือนบ้านมาตรฐานที่ใช้คอนกรีตปกติ อีกทั้งแผง TPR ยังสามารถใช้กับอิฐและหินได้อีกด้วย วัสดุรีไซเคิลนี้ยังเหมาะสำหรับการผลิตหลังคา วัสดุใหม่นี้สามารถสร้างอาคารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อาคารที่สร้างจากวัสดุนี้แต่ละยูนิตต้องใช้วัสดุ 18 ตัน ส่วนราคาของอาคารก็ไม่สูงคืออยู่ที่ประมาณ 40,000 ปอนด์ สมบัติพิเศษของอาคารแบบนี้คือถอดประกอบได้ทำให้ก่อสร้างบ้านภายใน 4 วัน การก่อสร้างที่เร็วเหมาะกับการฟื้นฟูอาคารที่อยู่ในพื้นที่ภัยพิบัติได้อย่างรวดเร็ว นวัตกรรมนี้เป็นผลผลิตจากงานวิจัยของ Cardiff และ Glamorgan Universities ซึ่งได้รับการสนับสนุนด้านการเงินจาก BRE (Building Research Establishment) และบริษัท Carbon Trust

(SaiKia and Brito, 2012) ได้นำเสนอบทความการเตรียมเพื่อนำขยะพลาสติกมาใช้ในมอร์ตาร์และคอนกรีต พบว่าสามารถนำขยะพลาสติกมาใช้ทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติบางส่วนในงานคอนกรีตได้ โดยผลการทดสอบความสามารถในการไหลมีค่าลดลงเนื่องจากรูปร่างของพลาสติกที่มีความเป็นแผ่นบาง และขยะพลาสติกยังช่วยลดค่าความหนาแน่นของคอนกรีตลงด้วยซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตน้ำหนักเบา การลดลงของกำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงดัดมีความสำคัญน้อยกว่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลงเนื่องจากการรวมเข้าด้วยกันของมวลรวมพลาสติกซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงการวิบัติของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ผสมด้วยขยะพลาสติกจะมีความเหนียวมากกว่าคอนกรีตธรรมดา รวมถึงการเกิดการแตกร้าวอันเนื่องมาจากพฤติกรรมเชิงกลของคอนกรีต ถึงแม้ว่าการศึกษาสมรรถนะด้านความคงทนของคอนกรีตผสมพลาสติกยังมีอยู่ค่อนข้างน้อย ข้อมูลที่มีอยู่แสดงให้เห็นถึงการรวมกันของมวลรวมพลาสติกหลายๆ ชนิดสามารถช่วยปรับปรุงพฤติกรรมด้านการซึมผ่านของคอนกรีต และการสัมผัสกับสารเคมีได้ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการหดตัวของคอนกรีตที่ผสมพลาสติกยังมีค่าที่สูง การนำพลาสติก EPS มาใช้เป็นมวลรวมผสมในคอนกรีตช่วยเพิ่มความสามารถในการเป็นน้ำแข็งได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา ขณะที่การนำมวลรวมจากพลาสติก PET มาใช้ในคอนกรีตช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานไฟ คอนกรีตที่ผสมโพลีเมอร์ส่งผลให้สามารถในการนำความร้อนลดลงมากกว่าคอนกรีตธรรมดา

(Islam, Meherier and Islam, 2016) ได้ศึกษาอิทธิพลของขยะพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีนเทอริเนเทอเรทาเลต (PET) เพื่อใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีตทั้งในสภาวะก่อนแข็งตัวและที่แข็งตัวแล้ว โดยนำมาเป็นมวลรวมทางเลือกแทนที่มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ เช่น เศษอิฐ มวลรวม PET ที่ใช้มาจากขวด PET ที่คัดเลือกแล้วนำมาผ่านกระบวนการตัด หลอม และบด ก่อนนำมาใช้เป็นมวลรวม การศึกษามุ่งไปที่กำลังต้านทานแรงอัด หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ผสมพลาสติก PET ตลอดจนความสามารถในการในการทำงานเพื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ พบว่าการมีสัดส่วนมวลรวม PET และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักและความสามารถในการรับ

แรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง คอนกรีตที่ใส่มวลรวม PET ในสัดส่วน 20% .และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) 0.42 มีความสามารถในการต้านทานแรงอัดเท่ากับ 30.3 เมกะปาสกาล ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตปกติ 9% อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ผสมพลาสติก PET มีค่าความสามารถในการทำงานที่สูงขึ้น โดยที่ค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น 1.8 ซม. สำหรับคอนกรีตสัดส่วนดังกล่าว ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมพลาสติก PET .ที่มีสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำและความสามารถในการทำงานสูงจึงสามารถนำมาใช้ในงานโครงสร้างได้

(Safinia and Alkalbani, 2016) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขวดพลาสติกมาใช้ในคอนกรีตบล็อก โดยขวดพลาสติกถูกนำมาใช้เพื่อสร้างช่องว่างที่มีระยะห่างที่เท่ากันในก้อนอิฐก่อคอนกรีตที่เทโดยรอบขวดที่ถูกหุ้มอย่างมิดชิดในก้อนอิฐก่อ ศึกษาโดยนำขวดพลาสติกขนาดความจุ 500 มิลลิลิตรมาแทนที่คอนกรีตในก้อนอิฐก่อ และวิเคราะห์กำลังรับแรงอัด ซึ่งการทดสอบกำลังรับแรงอัดทำตามมาตรฐาน ASTM C 140 ผลการศึกษานี้ให้ข้อคิดที่มีเหตุผลเนื่องจากการทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกถูกควบคุมจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกจากตลาดโอमान ผลทดสอบนี้พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าแตกต่างกันถึง 57% เมื่อใช้ขวดพลาสติกเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกทั่วไป นี่เป็นข้อพิสูจน์ที่จำเป็นต่อการวิจัยในอนาคตโดยเฉพาะด้านการออกแบบสัดส่วนผสม ปริมาณซีเมนต์และสมบัติของคอนกรีตบล็อกท้องถิ่น เพื่อนำไปสู่ความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

(Vaillancourt and Sorelli, 2018) ได้ศึกษาคุณลักษณะของคอนกรีตที่ผสมด้วยมวลรวมพลาสติกรีไซเคิลจากการไหลเวียนวัสดุจากผู้บริโภค โดยการสืบเสาะศึกษาความเป็นไปได้ของการแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีตด้วยพลาสติกรีไซเคิลจากการไหลเวียนวัสดุจากผู้บริโภคจริง การจัดเรียงความแตกต่างในความเสถียรต่อการฟื้นฟูวัสดุ (MRF) ต่อความแตกต่างของมวลรวมพลาสติก (PAG) ที่ฤดูกาลที่ต่างกัน คอนกรีตผสมมีคุณลักษณะในรูปของกำลังรับแรงอัด กำลังอัดที่แตกเร็ว ความเหนียว การนำความร้อน ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ โดยนำตารางความสัมพันธ์มาใช้เพื่ออธิบายองค์ประกอบของวัสดุ PAG ต่อสมบัติของคอนกรีต ผลกระทบของร้อยละในการแทนที่ พบว่าชนิดของ PAG ระดับของการปนเปื้อน และเวลา สัมพันธ์กับคุณภาพของคอนกรีต ผลสรุปพบว่าคอนกรีตผสมด้วย PAG หลังจากการบริโภคแล้วเป็นแนวทางต่อทิศทางการวิจัยสำหรับการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อม พร้อมกับเป็นฉนวนความร้อนและดูดซึมน้ำด้วย

(Faraj, Sherwani, and Daraei, 2019) ได้ศึกษาพฤติกรรมเชิงกล การแตกร้าว และความทนทาน ของคอนกรีตกำลังอัดสูงที่สามารถไหลเข้าแบบได้ด้วยตัวเองผสมด้วยอนุภาคพลาสติกโพลีพร็อพไพลีนรีไซเคิลและที่ผสมและไม่ผสมด้วยซิลิกาฟูม ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.32 และใช้วัสดุประสานรวมเท่ากับ 550 กก./ลบ.ม. ในชุดทดสอบแรกของส่วนผสมใช้วัสดุประสาน 2 ชนิดคือ ใถ้ล้อย 20% และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 80% ในชุดทดสอบที่สองของส่วนผสมใช้วัสดุ

ประสาน 3 ชนิดคือ ใถ้าลอย 20% ซิลิกาฟูม 10% และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 70% เพื่อผลิตคอนกรีต โดยแทนที่มวลรวมขนาดกลางด้วยอนุภาคพลาสติกโพลีหรือไฟโพลีเอทิลีนรีไซเคิล 5 ส่วนผสมคือ 0% 10% 20% 30% และ 40% โดยปริมาตรของวัสดุประสานคอนกรีต สัดส่วนผสมรวมทั้ง 10 ส่วนผสมจะถูกนำไปทดสอบพฤติกรรมเชิงกล การแตกร้าว และความทนทาน เช่น โมดูลัสความยืดหยุ่น กำลังรับแรงอัด กำลังดึงแบบผ่าซีก กำลังรับแรงดัด การแทรกซึมของคลอไรด์ การซึมผ่านของก๊าซ และพลังงานแตกร้าว การทดสอบทำที่อายุ 28 และ 90 วันหลังจากการหล่อตัวอย่าง ผลทดสอบแสดงให้เห็นถึงการนำอนุภาคพลาสติกโพลีหรือไฟโพลีเอทิลีนรีไซเคิลมาผสมในคอนกรีต ช่วยให้คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวและความทนทานได้ดีขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามคุณสมบัติอื่นของคอนกรีตกำลังอัดสูงที่สามารถไหลเข้าแบบได้ด้วยตัวเองมีทิศทางที่แยกลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณของซิลิกาฟูมในส่วนผสมช่วยเพิ่มสมรรถนะในเชิงกลและความทนทานได้ดีขึ้น ผลพิสูจน์พบว่าคอนกรีตกำลังอัดสูงที่สามารถไหลเข้าแบบได้ด้วยตัวเองมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นมากกว่า 70 MPa ที่อายุ 90 วัน โดยใช้อนุภาคพลาสติกโพลีหรือไฟโพลีเอทิลีนรีไซเคิลในส่วนผสม 40% แทนที่วัสดุมวลรวมขนาดกลางโดยปริมาตร และใช้ซิลิกาฟูม 10%

(Mohammadinia, Wong, Arulrajah and Horpibulsuk, 2019) ได้ศึกษาเพื่อประเมินกำลังของการนำขยะพลาสติกและแก้วบดละเอียดที่นำมาใช้ใหม่ในคอนกรีตปูทางเท้า โดยนำใช้เป็นวัสดุมวลรวมในส่วนผสมของคอนกรีตในสัดส่วน 0 10 20 30 40 และ 50% จากนั้นทำการศึกษาคงสมบัติของคอนกรีตในด้านกำลังต้านทานแรงดึง และความสามารถในการดูดซึมน้ำ ผลการศึกษาพบว่า การนำขยะพลาสติกและแก้วบดละเอียดมาผสมในคอนกรีตส่งผลให้มีค่าพฤติกรรมที่ต่างกัน ถึงแม้ว่าความสามารถในการต้านทานแรงอัดและความสามารถในการต้านทานแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตทั้งสองกลุ่มมีค่าลดลงเนื่องจากการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุที่นำมาใช้ใหม่กับเจลซีเมนต์มีค่าที่ค่อนข้างต่ำอันเนื่องมาจากความสามารถในการต้านทานการบีบอัดของวัสดุที่มีค่าต่ำด้วย การนำขยะพลาสติกที่นำมาใช้ใหม่แทนที่มวลรวมหยาบในคอนกรีตที่สัดส่วน 20% โดยปริมาตร และแก้วบดละเอียดแทนที่มวลรวมหยาบในคอนกรีตที่สัดส่วน 30% โดยปริมาตร เป็นค่าที่เหมาะสมในการนำมาใช้ทำเป็นคอนกรีตสำหรับปูทางเท้า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโมเดลปัญหาและการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimization problems) เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของคอนกรีต (Optimal solutions) ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ถูกตั้งไว้ (Objective function) โดยการโมเดลการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization model) จะถูกกำหนดขอบเขตการหาคำตอบด้วยฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint function) ซึ่งส่วนใหญ่โมเดลปัญหาการหาส่วนผสมของคอนกรีตจะกำหนดขอบเขตหรือข้อจำกัดด้วยค่ากำลังของคอนกรีต (Concrete strength) เป็นหลัก และใช้การโมเดลการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธี Nonlinear programming หรือวิธี Stochastic programming ด้วยวิธีการค้นหาหาคำตอบด้วย

อัลกอริธึม (Searching algorithm methods) เช่น Artificial Neuron Network (ANN) Genetic Algorithm (GA) เป็นต้น การสร้างโมเดลปัญหาและการหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของคอนกรีตได้รับความสนใจและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยผู้วิจัยได้ทบทวนและสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อนี้

ในปี 1998 I-Cheng Yeh ได้เสนอวิธี Augment-Neuron network เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต ด้วยการจำลองกำลังของคอนกรีต (Modeling concrete strength) โดยพิจารณา 7 ปัจจัย คือ อัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีต (Water/cement ratio) น้ำ (Water) ซีเมนต์ (Cement) มวลรวมละเอียด (Fine aggregate) มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate) ขนาดคละสูงสุด (Maximum grain size) และอายุบ่ม (Age of testing) โดยใช้ข้อมูลการทดลองจำนวน 15 แห่ง รวมทั้งสิ้น 200 ตัวอย่าง และข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุดข้อมูล ชุดละ 100 ตัวอย่าง โดยชุดแรกใช้สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง (Calibration) และชุดที่เหลือใช้สำหรับการตรวจสอบแบบจำลอง (Validation) ซึ่งพบว่าวิธีดังกล่าวเพิ่มประสิทธิภาพในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่สร้างความมั่นใจสำหรับการหาค่าความเหมาะสมของส่วนผสมคอนกรีต

ต่อมาในปี 1999 ผู้วิจัย (Yeh, 1999) ได้นำวิธี Neuron network และวิธี Nonlinear programming มาใช้เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตกำลังสูง (High-performance concrete) ที่ทำให้ต้นทุนของคอนกรีตมีค่าน้อยที่สุด (Minimize concrete cost) โดยพิจารณาเถ้าลอย (Fly ash) และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Blast furnace slag) เป็นส่วนผสมที่ใช้ทดแทนซีเมนต์ตามอัตราส่วน ซึ่งพบว่าวิธีดังกล่าวเป็นแนวทางสำหรับการเลือกวัสดุและส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีต รวมถึงการทำให้จำนวนส่วนผสมสำหรับการทดลองลดลง

ในปี 2006 ผู้วิจัย (Yeh, 2006) ได้ตรวจสอบหาความเป็นไปได้ของการใช้การออกแบบการทดลอง (Design of experiments) และวิธี Neural networks เพื่อกำหนดการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (Fly ash) โดยกำหนดร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าลอยตั้งแต่ร้อยละ 0 – 50 และค่ากำลังอัดของคอนกรีต (Compressive strength) ในช่วงระยะเวลาการบ่มตั้งแต่ 3 – 56 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีต (Water/cement ratio) ในช่วง 0.3 – 0.7 การตรวจสอบพบว่า (1) การใช้การออกแบบการทดลองแบบ simplex-centroid mixture ใช้จำนวนข้อมูลการทดลองน้อยกว่ามาก (2) วิธี Neural network สามารถพัฒนาความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตและอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ดีขึ้น (3) การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลกระทบและปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต (4) อัตราส่วนค่ากำลังของคอนกรีตระหว่างการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่อัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีต (Water/cement ratio) และอายุการบ่มที่เท่ากันจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อร้อยละการแทนที่

เพิ่มขึ้น และจะมีค่าลดลงบางส่วนเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (Water-binder ratio) ลดลงด้วย แต่จะลดลงสูงมากอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออายุการบ่มลดลง (5) การเพิ่มเถ้าลอย (Fly ash) มากขึ้นในส่วนผสมคอนกรีต รวมถึงการอายุบ่มคอนกรีตและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุยึดประสาน (Water-binder ratio) ที่น้อยลงทำให้อัตราส่วนค่ากำลังของคอนกรีตลดลงโดยตลอด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุเพื่อการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Portland cement type 1) หินย่อย (Crushed limestone) ทรายแม่น้ำ (River sand) เม็ดพลาสติกกรีซเคลิซชนิด HDPE น้ำ (Water) และสารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว (Water-reducing, High range and retarding admixture) ดังรูปที่ 3.1-3.4

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Portland cement type 1) ดังรูปที่ 3.1

3.1.2 หิน ใช้หินย่อย (Crushed limestone) เป็นมวลรวมหยาบธรรมชาติ (Natural coarse aggregate) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ประเภทที่ 1



รูปที่ 3.2 มวลรวมหยาบ

3.1.3 ททราย ใช้ทรายแม่น้ำ (River sand) เป็นมวลรวมละเอียดธรรมชาติ (Natural fine aggregate) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ทรายแม่น้ำ

3.1.4 เม็ดพลาสติกกรีซเคลชนิด HDPE จากกระบวนการนำพลาสติกมาใช้งานใหม่ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เม็ดพลาสติกกรีซเคล

3.1.5 น้ำ (Water) น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตเป็นน้ำประปา

3.1.6 น้ำยาผสมคอนกรีตชนิดสารลดน้ำพิเศษและหน่วงการก่อตัว (Water-reducing, High range and retarding admixture) สำหรับคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบคุณสมบัติคอนกรีต

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยเครื่องมือวัดดังรูปที่ 3.5-3.7 และอุปกรณ์ในการผสมและผลิตขึ้นตัวอย่างเพื่อการทดสอบ ดังรูปที่ 3.8-3.11

3.2.1 เครื่องมือวัด

1) ชุด Dial gage ความละเอียด 0.01 mm ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Dial gage ความละเอียด 0.01 mm

2) ชุด Vernier caliper ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ชุด Vernier caliper

3) ชุดทดสอบหาค่าโมดูลัส (Modulus of elasticity) ของคอนกรีตและชุด Data logger ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ชุด Data logger

3.2.2 อุปกรณ์ในการผสมและผลิตชิ้นตัวอย่างคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิล

1) เครื่องผสมมอร์ต้า ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องผสมมอร์ต้า

2) เครื่องผสมคอนกรีต ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องผสมคอนกรีต

3) แบบหล่อมอร์ต้าร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $50 \times 50 \times 50$ mm ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบหล่อมอร์ต้าร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $50 \times 50 \times 50$ mm

4) แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 200 mm
 ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 200 mm

3.3 การศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมของคอนกรีต ได้แก่ ขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียด มวลรวมหยาบ และเม็ดพลาสติกกรีซเคิล โดยการร่อนผ่านชุดตะแกรงทดสอบ (Test sieves) ความชื้นเหลือปกติ ความถ่วงจำเพาะ และระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์

3.3.1 ขนาดละเอียดของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรง คือ วิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งหรือความละเอียด (Fineness) โดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักไปบนชุดตะแกรงทดสอบ (Test sieves) ซึ่งมีช่องขนาดต่าง ๆ กัน โดยใช้ตะแกรงเบอร์ 4 8 16 30 50 และ 100 สำหรับการหาขนาดละเอียดของมวลรวมละเอียดและเม็ดพลาสติกกรีซเคิล และใช้ตะแกรงเบอร์ 1" ¾" ½" 3/8" และเบอร์ 4 สำหรับการหาขนาดละเอียดของมวลรวมหยาบ

3.3.2 ความถ่วงจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่น (Density) ของวัตถุต่อความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ความถ่วงจำเพาะไม่มีหน่วย และเป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของวัสดุ

3.3.3 การดูดซึมน้ำของมวลรวมหยาบและละเอียด คือ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปจนเต็มช่องว่างที่น้ำซึมผ่านได้ ของมวลรวมแต่ไม่รวมน้ำที่เกาะอยู่ผิวนอกของมวลรวม แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักน้ำที่อยู่ในช่องว่างต่อน้ำหนักของมวลรวมที่สภาพอบแห้ง

3.4 การออกแบบอัตราส่วนผสมมอร์ต้าและคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล

อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล การออกแบบอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ใช้การควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ให้เท่ากันทุกอัตราส่วนผสม แต่จะปรับเปลี่ยนปริมาณทรายละเอียด และเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 โดยปริมาตร ดังตาราง 3.1 ความหมายของตัวย่ออัตราส่วนมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล โดยที่ S ย่อมาจากทราย (Sand) และ PE ย่อมาจากเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลประเภท High density polyethylene หรือ HDPE อัตราส่วนผสมควบคุม (Control) คือ S4.0PE0.0 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าทั้งหมด 12 อัตราส่วนผสม จะถูกหล่อขึ้นรูปเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ โดยใช้ตัวอย่างแบบลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ mm

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย เม็ดพลาสติกกรีไซเคิลและหิน โดยใช้เม็ดพลาสติกแทนทรายละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 5 10 15 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ดังตาราง 3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตทั้งหมด 19 อัตราส่วนผสม จะถูกหล่อขึ้นรูปเพื่อทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ โดยใช้ตัวอย่างแบบทรงกระบอกขนาด 100×200 mm

ตาราง 3.1 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลโดยปริมาตร

อัตราส่วนผสม	ปริมาณวัสดุโดยปริมาตร			
	เม็ดพลาสติก (m ³)	ทราย (m ³)	ซีเมนต์ (m ³)	น้ำ (m ³)
S4.0PE0.0	0.0	4.0	1	0.5
S3.5PE0.0	0.0	3.5		
S3.2PE0.8	0.8	3.2		
S2.8PE0.7	0.7	2.8		
S2.4PE1.6	1.6	2.4		
S2.1PE1.4	1.4	2.1		
S1.6PE2.4	2.4	1.6		
S1.4PE2.1	2.1	1.4		
S0.8PE3.2	3.2	0.8		
S0.7PE2.8	2.8	0.7		
S0.0PE4.0	4.0	0.0		
S0.0PE3.5	3.5	0.0		

หมายเหตุ

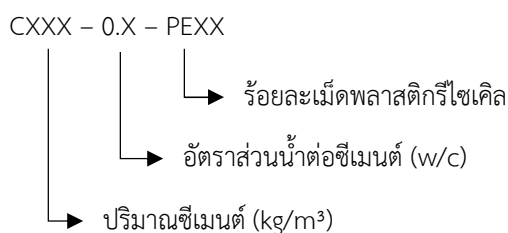
SX.X – PEX.X



ตาราง 3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลโดยปริมาตร

อัตราส่วนผสม	ซีเมนต์ (kg/m ³)	มวลรวม ละเอียด (kg/m ³)	มวลรวม หยาบ (kg/m ³)	SPPP ^a (kg/m ³)	SP ^a (kg/m ³)	น้ำ (kg/m ³)	w/c
C560-0.4-PE00	560	977	561	0	3.96	224	0.4
C560-0.4-PE05	560	928	561	49	3.96	224	
C560-0.4-PE10	560	879	561	98	3.96	224	
C560-0.4-PE15	560	830	561	147	3.96	224	
C660-0.4-PE00	660	977	561	0	3.36	264	
C660-0.4-PE05	660	928	561	49	3.36	264	
C660-0.4-PE10	660	879	561	98	3.36	264	
C660-0.4-PE15	660	830	561	147	3.36	264	
C250-0.5-PE00	250	800	1200	0	0	100	0.5
C250-0.5-PE10	250	720	1200	80	0	100	
C250-0.5-PE20	250	640	1200	160	0	100	
C320-0.5-PE00	320	800	1200	0	0	128	
C320-0.5-PE10	320	720	1200	80	0	128	
C320-0.5-PE20	320	640	1200	160	0	128	
C320-0.5-PE40	320	480	1200	320	0	128	
C320-0.5-PE60	320	320	1200	480	0	128	
C400-0.5-PE00	400	800	1200	0	0	160	
C400-0.5-PE10	400	720	1200	80	0	160	
C400-0.5-PE20	400	640	1200	160	0	160	

หมายเหตุ ^a RPPP: recycled pp plastic particles, SP: Superplasticizer



3.5 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยในแต่ละอัตราส่วนผสมจะแบ่งประเภทที่จะนำไปทดสอบ คือ

3.5.1 หล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 50 มิลลิเมตร และความสูง 50 มิลลิเมตร จำนวน 144 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แท่งตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50 × 50 × 50 mm

3.5.2 หล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm ความสูง 200 mm หล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก จำนวน 168 ตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก

3.5.3 หล่อก้อนตัวอย่างคอนกรีตทดสอบความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีขนาดก้อนตัวอย่าง $20 \times 20 \times 20$ เซนติเมตร หุ้มด้วยฉนวนหนา 5 เซนติเมตร โดยรอบ จำนวน 11 ก้อน ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตทดสอบความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

3.5.4 หล่อแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 mm ความสูง 200 mm จำนวน 6 ก้อน โดยใช้เม็ดพลาสติกกรีซเคลสแทนที่ทรายโดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 และ 20 ตามลำดับ ป่มที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอกทดสอบการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์

3.6 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์

การทดสอบคุณสมบัติของอัตราส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดมาผลิตชิ้นส่วน เภณฑการคัดเลือกอัตราส่วนผสมคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลฟิจารณา

- 3.6.1 จากกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยใช้มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547
- 3.6.2 จากหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์
- 3.6.3 จากการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C230
- 3.6.4 จากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์

3.7 การทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยพลาสติกกรีซเคลฟ

คุณสมบัติของคอนกรีตที่ต้องการได้แก่ ความสม่ำเสมอของส่วนผสม ความสามารถในการเทได้ ความสามารถในการอัดแน่นของคอนกรีต และความสะดวกในการทำงาน โดยไม่เกิดการแยกตัว เพื่อที่จะทำให้เข้าใจถึงคุณสมบัติของคอนกรีตจึงจำเป็นต้องทดสอบด้านต่าง ๆ ดังนี้

3.7.1 การทดสอบหาค่ายุบตัว (Slump test) ค่าการยุบตัวไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถเทได้ของคอนกรีตโดยตรง แต่เป็นการวัดความชันเหลวของคอนกรีต การทดสอบทำโดยตักคอนกรีตใส่ลงในโดคนที่มีลักษณะเป็นกรวยยอดตัด ต่ำด้วยเหล็กต๋าแล้วจึงค่อย ๆ ยกโคนขึ้นช้า ๆ คอนกรีตจะยุบตัวลงด้วยน้ำหนักของตัวเอง ความสูงที่ยุบตัวลงของคอนกรีตที่วัดได้ถือเป็นค่ายุบตัวของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C143

3.7.2 การสูญเสียค่าการยุบตัว (Slump loss) คือ การสูญเสียความเหลวของคอนกรีตสดเมื่อเวลาผ่านไป การสูญเสียค่าการยุบตัวจึงถือเป็นเหตุการณ์ปกติสำหรับคอนกรีตที่จะต้องแข็งตัวขึ้นเรื่อย ๆ จากผลของการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ การสูญเสียน้ำอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น จากการดูดซึมของมวลรวมและจากการระเหย โดยนำคอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้วมาหาค่าการยุบตัว และเทคอนกรีตกลับใส่โมผสม ทิ้งไว้โดยปิดฝาโมไม่ให้ น้ำระเหย และเทคอนกรีตเพื่อหาค่ายุบตัวทุก ๆ 5 นาที จนคอนกรีตไม่มีค่าการยุบตัว

3.7.3 การทดสอบการเสียรูป (Deformability test) หรือการทดสอบการไหลแผ่ (Slump flow) โดยใช้ Abram's cone ตามมาตรฐาน ASTM C1611 วางบนแผ่นเหล็กขนาด 90 x 90 cm ดังรูปที่ 3.16 เติมคอนกรีตจนเต็มโดยไม่ต้องทำการกระทุ้งให้แน่นจากนั้นทำการยกขึ้นในแนวตั้งโดยปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่โดยอิสระทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 2 ทิศทางเพื่อหาค่าเฉลี่ยระยะในการไหลแผ่สูงสุดของคอนกรีต



รูปที่ 3.16 เครื่องมือทดสอบ Slump flow

3.7.4 การทดสอบความหนืดของคอนกรีตสด (V-funnel) ดังรูปที่ 3.17 ตามมาตรฐาน EFNARC โดยทำการปิดช่องด้านล่างจากนั้นเติมคอนกรีตจนเต็มโดยไม่ต้องทำการอัดแน่น ปล่อยคอนกรีตทิ้งไว้เป็นเวลา 5 minute จากนั้นจึงทำการเปิดช่องด้านล่างเพื่อปล่อยคอนกรีตให้ไหลออกอย่างอิสระด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกพร้อมกับการจับเวลาในการไหลตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นจนคอนกรีตไหลออกจากก้นรูปร่างตัววีจนหมด

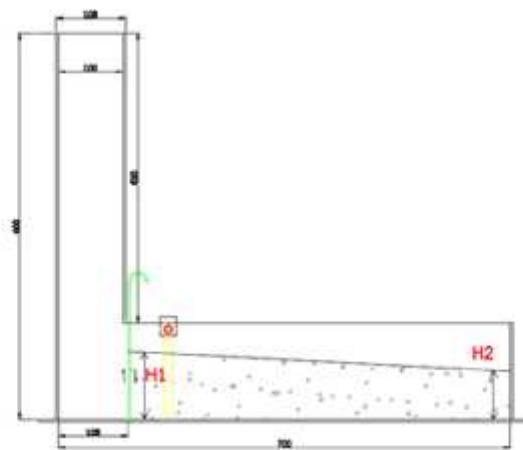


รูปที่ 3.17 เครื่องมือทดสอบ V-funnel

3.7.5 การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (L-box) ดังรูปที่ 3.18 ซึ่งแตกต่างจากวิธีการแรกโดยการไหลผ่านกล่องรูปตัว L ตามมาตรฐาน EFNARC โดยการเติมคอนกรีตในแนวตั้งจนได้ระดับจากนั้นเปิดลิ้นบังคับการเปิด - ปิดเพื่อให้คอนกรีต และวัดความสูงของ H_1 และ H_2 ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 เครื่องมือทดสอบ L-box



รูปที่ 3.19 ระยะ H_1 และ H_2 ของเครื่องมือทดสอบ L-box

H_1 คือ ความสูงจากฐานเครื่องมือทดสอบถึงผิวคอนกรีตที่บริเวณลิ้นชักปล่อยคอนกรีต

H_2 คือ ความสูงจากฐานเครื่องมือทดสอบถึงผิวคอนกรีตที่บริเวณจุดปล่อยเครื่องมือทดสอบ

3.7.6 การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ประกอบขึ้นเป็นรูปวงแหวน (J-ring) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm และซี่เหล็กกีดขวางการไหลสูง 10 cm ตามมาตรฐาน ASTM C1621 ดังรูป ทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการไหลผ่านต่างกันเพียงการทดสอบนี้เป็นการปล่อยให้คอนกรีตไหลผ่านสิ่งกีดขวางจนหยุดไหลทำการวัดระยะเส้นผ่านศูนย์กลางใน 2 ทิศทางเพื่อหาค่าเฉลี่ยระยะในการไหลผ่านของสูงสุดของคอนกรีตจากนั้นทำการประเมินเกณฑ์ความสามารถในการไหลว่ามี การติดขัด (Blocking) จนไม่สามารถไหลต่อไปได้ในระดับใดโดยนำค่าระยะการไหลผ่านสิ่งกีดขวางสูงสุดเทียบกับระยะการไหลสูงสุดโดยไม่ผ่านสิ่งกีดขวางโดยภาพรวมวิธีการทดสอบ J-ring พิจารณาเฉพาะการไหลในแนวราบ



รูปที่ 3.20 เครื่องมือทดสอบ J-ring

3.8 การทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่ผสมด้วยพลาสติกกรีซเคล

3.8.1 หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) เป็นค่า ๆ หนึ่งที่แสดงให้ทราบว่า น้ำหนักเป็นเท่าใดในหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งในวัสดุผสม ทั้งวัสดุผสมหยาบ และวัสดุผสมละเอียด จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นไว้เพื่อหาสัดส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสมต่อไป ส่วนมากจะมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) โดยการหาหน่วยน้ำหนัก คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$x_t = \frac{W}{V} \quad (3.1)$$

3.8.2 ทดสอบหาคำล้งอัด (Compressive strength test) ของมอร์ต้าร์ ด้วยเครื่องทดสอบหาคำล้งอัดของมอร์ต้าร์ดังรูปที่ 3.21 โดยการบ่มในน้ำธรรมดา ทดสอบที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109



รูปที่ 3.21 เครื่องทดสอบหาคำล้งอัดของมอร์ต้าร์

โดยทำการทดสอบขึ้นตัวอย่างมอร์ต้าร์จนเกิดการวิบัติ จึงนำค่าแรงอัดประลัยที่ทำให้เกิดการวิบัติของมอร์ต้าร์ (P) มาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดขึ้นตัวอย่างของมอร์ต้าร์ (A) เพื่อคำนวณหาคำล้งอัดของมอร์ต้าร์ (f'_m) ตามสมการที่ 3.2

$$f'_m = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

เมื่อ f'_m = คำล้งอัดของมอร์ต้าร์, ksc
 P = แรงอัดประลัย, kg
 A = พื้นที่หน้าตัดขึ้นตัวอย่างของมอร์ต้าร์, cm^2

3.8.3 ทดสอบหาค่ากำลังอัด (Compressive strength test) ของคอนกรีต ด้วยเครื่องทดสอบ Universal testing machine ขนาด 3 ตัน หาค่ากำลังอัดของคอนกรีตดังรูปที่ 3.22 โดยการบ่มในน้ำธรรมดา ทดสอบที่อายุ 7 14 21 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 และตามมาตรฐาน ASTM C617



รูปที่ 3.22 เครื่องทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต (Universal testing machine)

โดยทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างคอนกรีตจนเกิดการวิบัติ จึงนำค่าแรงอัดประลัยที่ทำให้เกิดการวิบัติ (P) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดชิ้นตัวอย่าง (A) เพื่อคำนวณหาความต้านทานกำลังอัด (f'_c) ตามสมการที่ 3.3

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

เมื่อ f'_c = กำลังอัดของคอนกรีต, ksc
 P = แรงอัดประลัย, kg
 A = พื้นที่หน้าตัดชิ้นตัวอย่างของมอร์ตาร์, cm^2

3.8.4 ทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity test) ของคอนกรีต โดยติดตั้งชุดทดสอบหาค่า Modulus of elasticity ของคอนกรีตดังรูปที่ 3.23 โดยการบ่มในน้ำธรรมดา ทดสอบที่อายุ 7 14 21 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C469-02



รูปที่ 3.23 เครื่องทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ใช้วิธี Secant modulus ซึ่งคำนวณจากความลาดเอียงของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นกับจุดใด ๆ ที่ต้องการหาซึ่งมักพิจารณาที่จุดซึ่งมีหน่วยแรงอัดเท่ากับ 45% ของหน่วยแรงอัดประลัย ($0.45 f'_c$) บนเส้นสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดโดยถือว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่หาโดยวิธีการนี้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่แท้จริงของคอนกรีตในช่วงใช้งาน เนื่องจากได้พิจารณารวมถึงความเครียดแบบพลาสติกเข้าไปด้วยมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้นำเสนอสมการสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตโดยให้ขึ้นกับหน่วยแรงอัดประลัยและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังแสดงในสมการ 3.4

สำหรับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมน้ำหนักปกติ (ไม่ใช่มวลรวมเบา) มักมีหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตระหว่าง 22.56 ถึง 23.54 kN/m³ ดังนั้นโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต หรือ E_c จึงใช้สมการที่ 3.5

$$E_c = 4,270w^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (3.4)$$

$$E_c = 1.51\sqrt{f'_c} \quad (3.5)$$

3.8.5 การทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

ทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity test, UPV) ด้วยเครื่องมือทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกดังรูปที่ 3.24 โดยการบ่มในน้ำธรรมดาที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C597



รูปที่ 3.24 เครื่องมือทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

โดยทำการทดสอบแท่งคอนกรีตด้วยเครื่องอัลตราโซนิก นำมาคำนวณค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (V) ตามสมการที่ 3.6

$$V = \sqrt{\frac{E}{\dots}} \times \frac{(1 - \hat{\nu})}{(1 + \hat{\nu})(1 - 2\hat{\nu})} \quad (3.6)$$

เมื่อ	V	=	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก, m/s
	E	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, MPa
	\dots	=	ความหนาแน่นของคอนกรีต, kg/m ³
	$\hat{\nu}$	=	อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

3.8.6 ทดสอบความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity test) ของคอนกรีต ด้วยเครื่องมือทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตดังรูปที่ 3.25 โดยการบ่มในน้ำธรรมดา ทดสอบที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C1760



รูปที่ 3.25 เครื่องมือทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต

โดยทำการทดสอบแท่งคอนกรีตด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานไฟฟ้า แล้วนำมาคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้า (...) ตามสมการที่ 3.7

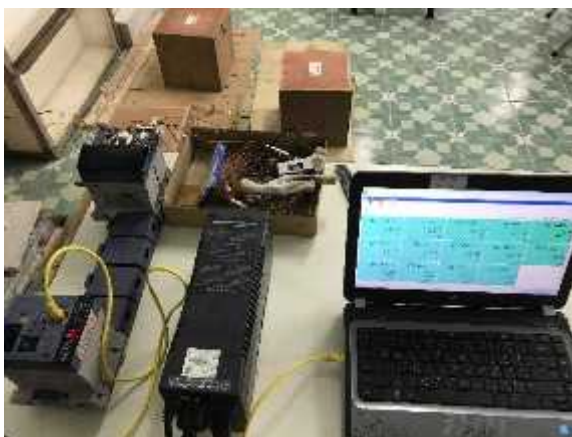
$$\dots = \frac{2fa \times V}{I} \quad (3.7)$$

เมื่อ a = ระยะห่างของหัววัด
 I = กระแสไฟฟ้าที่ป้อน
 V = ศักย์กระแสไฟฟ้าที่วัดได้

3.8.7 ทดสอบความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

1) หล่อกอนกรีตในแบบขนาด $0.30 \times 0.30 \times 0.30$ m. สำหรับวัดอุณหภูมิ (Insulate box) โดยการฝังสาย Thermocouple ไว้ที่ศูนย์กลางของแบบหล่อ สำหรับวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในคอนกรีต และปิดฝาแบบหล่อให้สนิท

2) หล่อซีเมนต์เพสต์ในแบบขนาด $0.30 \times 0.30 \times 0.30$ m. ที่ใช้น้ำที่เหมาะสมในการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยใช้เม็ดพลาสติกกรีซไคเคลแทนที่ทรายโดยน้ำหนักร้อยละ 0 10 และ 20 ตามลำดับ และวัดอุณหภูมิเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดหาอุณหภูมิความร้อนดังรูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบหาอุณหภูมิความร้อน



รูปที่ 3.26 ทดสอบหาอุณหภูมิความร้อน



รูปที่ 3.27 ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบหาอุณหภูมิความร้อน

3.8.8 ทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (Chloride penetration test) ของคอนกรีต ด้วยเครื่องมือทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดังรูปที่ 3.28 โดยการบ่มในน้ำ ธรรมดา ทดสอบที่อายุ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C1202



รูปที่ 3.28 เครื่องมือทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

โดยทำการทดสอบแท่งคอนกรีตด้วยชุดทดสอบการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ จึงนำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างทดสอบหรือ Charge passed (Coulombs) ตามสมการที่ 3.8

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + 2I_{120} + 2I_{150} + 2I_{180} + 2I_{210} + 2I_{240} + 2I_{270} + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3.8)$$

เมื่อ Q = กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นทดสอบหรือ Charge passed, Coulombs
 I_0 = กระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหลังจากให้แรงดันไฟฟ้า, Amperes
 I_t = กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาเริ่มต้น t , Amperes

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และขนาดอนุภาคของวัสดุ

จากตาราง 4.1 ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และขนาดอนุภาคของวัสดุพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ คือ อัตราส่วนของน้ำหนักปูนซีเมนต์ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับปูนซีเมนต์ ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีค่าประมาณ 3.00 ถึง 3.20 จากผลการทดสอบ ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3.15 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายและหินขึ้นอยู่กับค่าความถ่วงจำเพาะของแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของมวลรวมและปริมาณช่องว่างของมวลรวมมาตรฐานโดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วง 2.40 ถึง 3.00 โดยค่าความถ่วงจำเพาะของทรายที่ได้จากการทดสอบนั้นเท่ากับ 2.62 ตามมาตรฐาน ASTM C70 ค่าความถ่วงจำเพาะของหินเท่ากับ 2.73 ซึ่งอยู่ตามค่ามาตรฐาน ASTM C127 และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลประเภท HDPE เท่ากับ 0.496

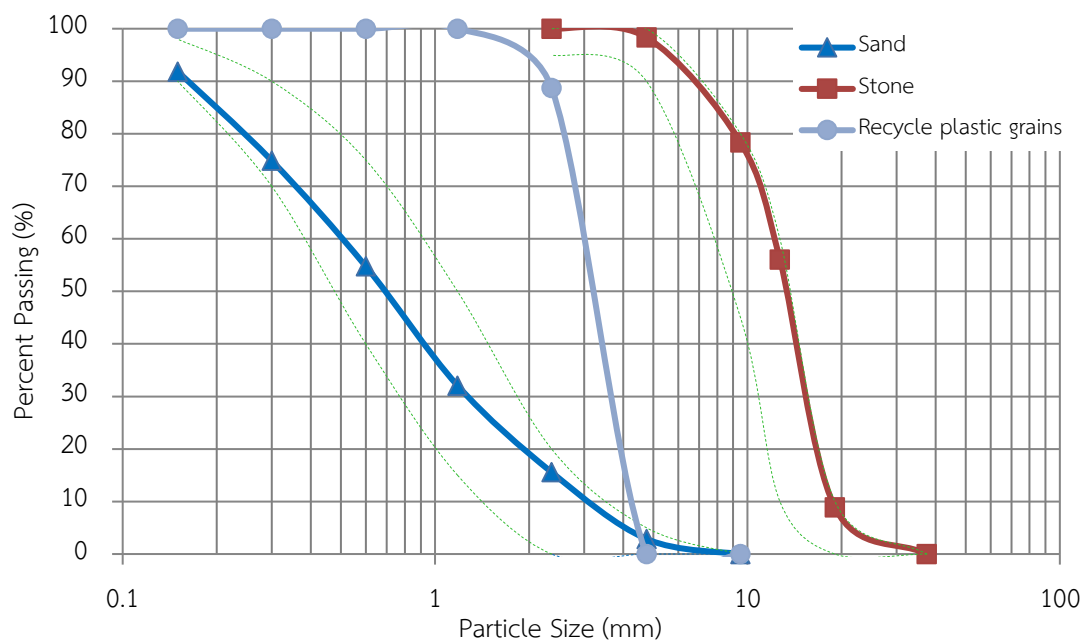
มวลรวมจะสามารถดูดซึมน้ำได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและมวลรวมโครงสร้างภายในก้อนวัสดุผสม ประกอบด้วยเนื้อของแข็งและช่องว่าง ช่องว่างเหล่านั้นจะดูดความชื้นเข้าไปเก็บไว้ได้ การผสมคอนกรีตจึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติข้อนี้ด้วย เพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมด้วย จากผลการทดสอบทรายมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.79 และหินมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.55 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตาราง 4.1 ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และขนาดอนุภาคของวัสดุ

วัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (%)	ขนาดอนุภาค D50 (mm)
ซีเมนต์	3.15	-	-
ทราย	2.62	0.79	0.70
หิน	2.73	0.55	10.40
เม็ดพลาสติกกรีไฮเซล	0.496	-	3.20

4.1.2 ผลการทดสอบหาค่าการกระจายขนาดส่วนคละของมวลรวม

การกระจายขนาดส่วนคละของทราย หิน และเม็ดพลาสติกรีไซเคิล ดังรูปที่ 4.1 พบว่าทรายมีขนาดระหว่าง 0.15 – 9.5 mm โดยมีร้อยละค้ำบนตะแกรงมาตรฐานขนาด 0.60 mm (เบอร์ 30) มากที่สุดโดยมีร้อยละเท่ากับ 22.70 หินมีขนาดระหว่าง 4.75-25.4 mm โดยมีร้อยละค้ำบนตะแกรงมาตรฐานขนาด 12.7 mm (1/2") มากที่สุดโดยมีร้อยละเท่ากับ 47.19 และเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีขนาดระหว่าง 2.36 – 4.75 mm โดยมีร้อยละค้ำบนตะแกรงมาตรฐานขนาด 2.36 mm (เบอร์ 8) มากที่สุดโดยมีร้อยละเท่ากับ 88.72 สรุปได้ว่าเม็ดพลาสติกรีไซเคิล HDPE เป็นมวลรวมละเอียดสามารถนำมาใช้แทนที่ทรายได้



รูปที่ 4.1 ค่าการกระจายขนาดส่วนคละของมวลรวม

4.2 คุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

1) การไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

จากการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ซึ่งแสดงดังตาราง 4.2 พบว่าอัตราส่วนผสม S0.0PE4.0 มีการไหลแผ่สูงสุด เท่ากับ 51.60 mm เมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลแผ่ของอัตราส่วนควบคุม (S4.0PE0.0) มีการไหลแผ่สูงกว่าประมาณ 2 เท่า และอัตราส่วนผสมที่มีการไหลแผ่ต่ำสุด คือ S3.2PE0.8 เท่ากับ 30.80 mm สรุปได้ว่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ด้วยเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

ตาราง 4.2 การไหลแผ่ของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

อัตราส่วนผสม	การไหลแผ่ (mm)
S4.0PE0.0	23.10
S3.2PE0.8	30.80
S2.4PE1.6	32.10
S1.6PE2.4	50.20
S0.8PE3.2	50.90
S0.0PE4.0	51.60

2) หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

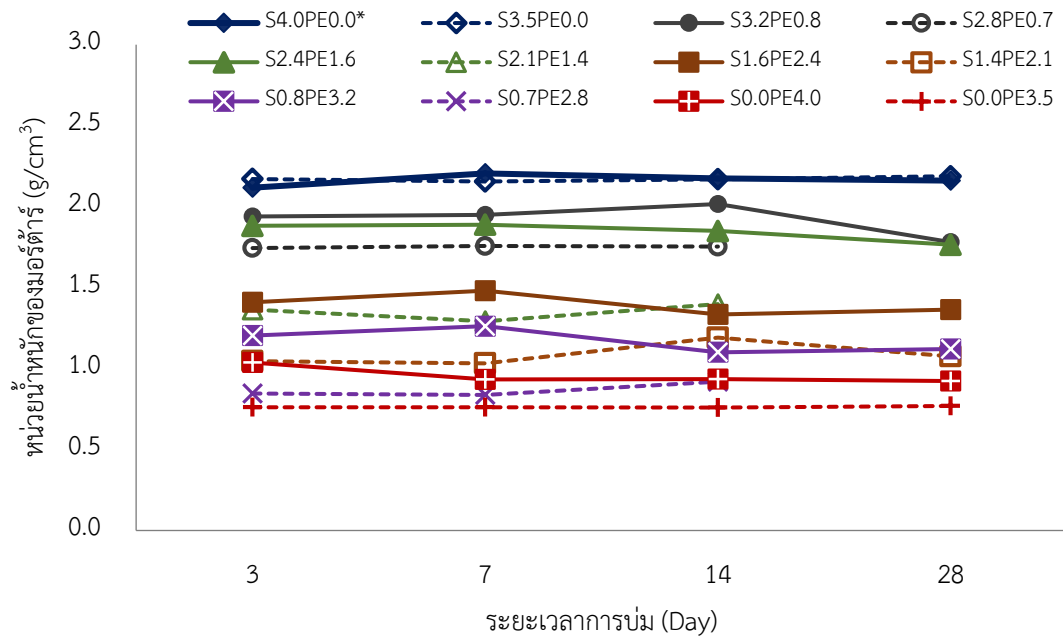
จากการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลซึ่งเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตรที่ระยะเวลาการบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน แสดงดังตาราง 4.3 และรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 พบว่าแนวโน้มของการหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลมี 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 มีแนวโน้มคงที่ รูปแบบที่ 2 มีการลดลงแบบค่อยเป็นค่อยไปในระหว่างวันที่ 3 ถึงวันที่ 7 หลังจากนั้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และรูปแบบที่ 3 มีการเพิ่มขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไปในระหว่างวันที่ 3 ถึงวันที่ 7 หลังจากนั้นค่อย ๆ ลดลงขึ้นเล็กน้อย โดยภาพรวมพบว่าหน่วยน้ำหนักของแต่ละอัตราส่วนผสมมีค่าไม่แตกต่างกันทุกระยะเวลาการบ่ม เมื่อพิจารณาที่อายุ 28 อัตราส่วนที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลที่มีหน่วยน้ำหนักสูงสุด คือ S2.8PE0.7 เท่ากับ 1.874 g/cm^3 อัตราส่วนที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลที่มีหน่วยน้ำหนักต่ำสุด คือ S0.0PE3.5 เท่ากับ 0.769 g/cm^3 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยน้ำหนักของอัตราส่วนควบคุม (S4.0PE0.0) ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 2.161 g/cm^3 อัตราส่วนผสม S2.8PE0.7 มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าประมาณร้อยละ 15 สรุปได้ว่าหน่วย

น้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคลดลงตามการปริมาณการแทนที่ด้วยเม็ดพลาสติกกรีซไคที่เพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการบ่มไม่มีนัยสำคัญ

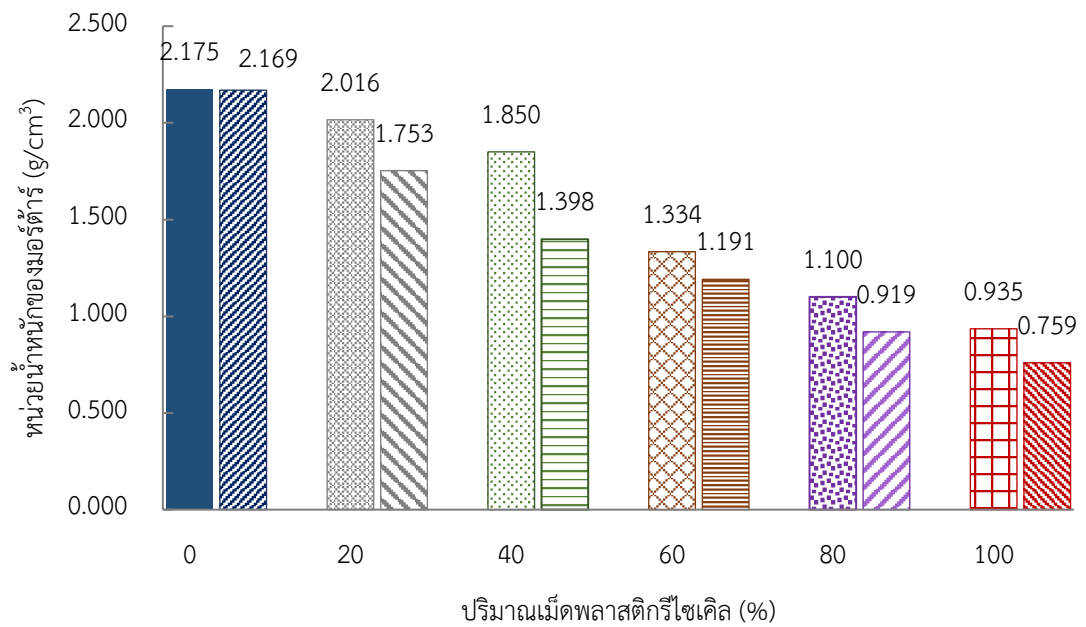
ตาราง 4.3 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วนผสม	หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ (g/cm ³)			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
S4.0PE0.0*	2.117	2.205	2.175	2.161
S3.5PE0.0	2.171	2.155	2.169	2.188
S3.2PE0.8	1.939	1.949	2.016	1.781
S2.8PE0.7	1.744	1.757	1.753	1.874
S2.4PE1.6	1.881	1.888	1.850	1.765
S2.1PE1.4	1.363	1.292	1.398	1.802
S1.6PE2.4	1.409	1.481	1.334	1.363
S1.4PE2.1	1.046	1.032	1.191	1.076
S0.8PE3.2	1.204	1.262	1.100	1.120
S0.7PE2.8	0.846	0.837	0.919	1.229
S0.0PE4.0	1.037	0.932	0.935	0.923
S0.0PE3.5	0.761	0.761	0.759	0.769

หมายเหตุ *อัตราส่วนผสมควบคุม (Control)



รูปที่ 4.2 หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ทผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ทกับปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ที่อายุบ่ม 14 วัน

4.2.2 คุณสมบัติเชิงกลของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

1) กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

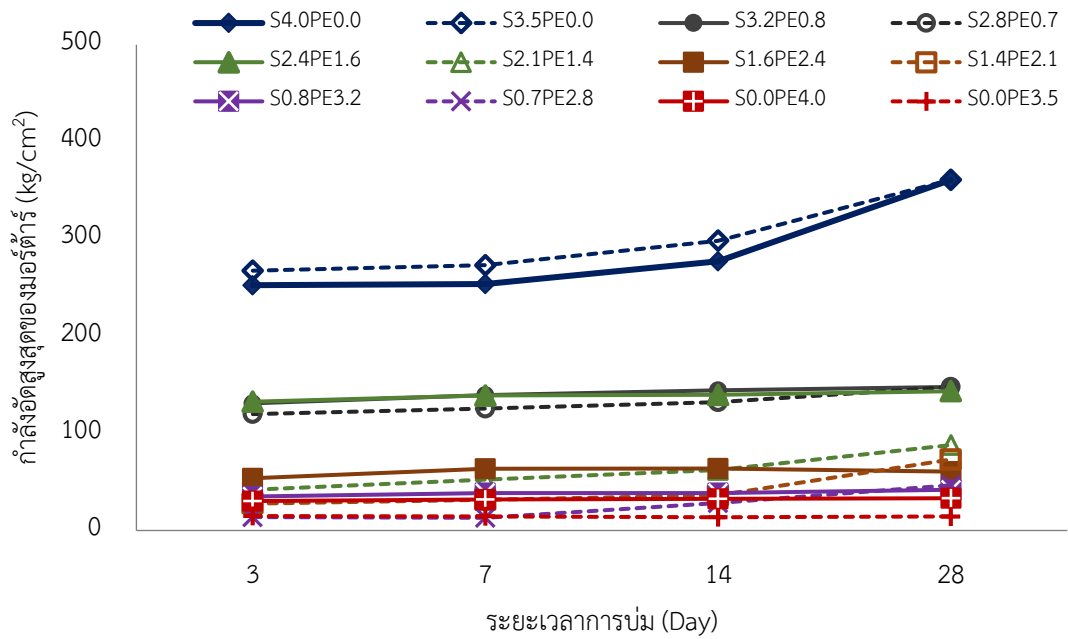
ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลที่ระยะเวลาการบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน แสดงดังตาราง 4.4 รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 พบว่าอัตราส่วนผสมที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติก S4.0PE0.0 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมควบคุมมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงระยะเวลาการบ่มที่ 14 วัน ถึง 28 วัน เพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 277.012 kg/cm^2 เป็น 360.857 kg/cm^2 เช่นเดียวกับอัตราส่วนผสม S3.5PE0.0 มีการพัฒนากำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่มที่ 14 วัน ถึง 28 วัน เพิ่มขึ้นจาก 123.31 kg/cm^2 เป็น 176.364 kg/cm^2 จะได้เห็นว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีปริมาณทรายน้อยกว่าส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัดอย่างเห็นได้ชัด

โดยภาพรวมการพัฒนาการกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการบ่ม อัตราส่วน S3.2PE0.8 และอัตราส่วน S2.4PE1.6 มีกำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 147.730 kg/cm^2 และ 143.304 kg/cm^2 ตามลำดับ กำลังอัดสูงสุดของอัตราส่วนผสมที่มีเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลร้อยละ 20-100 มีการพัฒนาการกำลังอัดสูงสุดในแต่ละระยะเวลาการบ่มไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่มแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกมีกำลังอัดสูงสุดสูงกว่า 100 kg/cm^2 และกลุ่มที่สองมีกำลังอัดสูงสุดต่ำกว่า 100 kg/cm^2 โดยกลุ่มแรกประกอบด้วยอัตราส่วนผสม S3.2PE0.8 และอัตราส่วนผสม S2.4PE1.6 มีกำลังอัดสูงสุด 147.730 kg/cm^2 ต่ำกว่าอัตราส่วนควบคุมประมาณ 2 เท่า สำหรับกลุ่มที่สองประกอบด้วยอัตราส่วนผสม S1.6PE2.4 S0.8PE3.2 และ S0.0PE4.0 มีกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 60.514 kg/cm^2 49.929 kg/cm^2 และ 33.187 kg/cm^2 ตามลำดับ อัตราส่วนผสมที่มีกำลังอัดสูงสุดต่ำที่สุดคือ S0.0PE4.0 มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนผสมควบคุมประมาณ 10 เท่า สรุปได้ว่ากำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ด้วยเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล แต่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการบ่ม

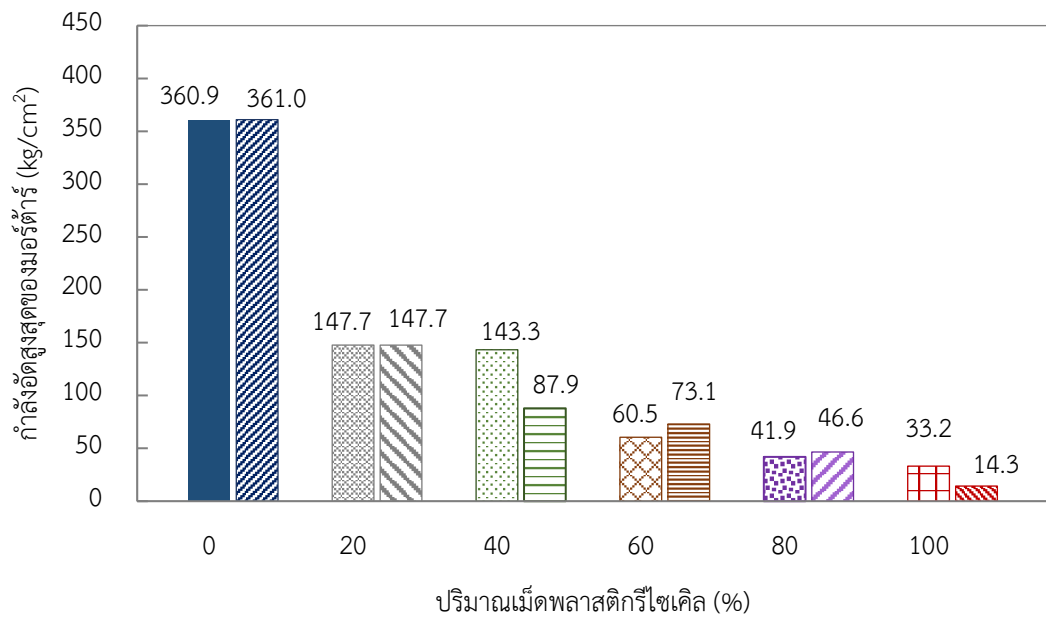
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลเท่ากันที่ร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 คืออัตราส่วนผสม S4.0PE0.0 S3.2PE0.8 S2.4PE1.6 S1.6PE2.4 S0.8PE3.2 และ S0.0PE4.0 ซึ่งใช้ทรายที่มีขนาด 0.15-9.5 mm กับอัตราส่วนผสม S3.5PE0.0 S2.8PE0.7 S2.1PE1.4 S1.4PE2.1 S0.7PE2.8 และ S0.0PE3.5 ซึ่งใช้ทรายขนาด 0.3-1.18 mm ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายขนาดเม็ดใหญ่กว่าส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายขนาดเล็กกว่าเล็กน้อย

ตาราง 4.4 กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ

อัตราส่วนผสม	กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ (kg/cm ²)			
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
S4.0PE0.0	252.475	253.532	277.012	360.857
S3.5PE0.0	267.387	272.954	298.233	361.032
S3.2PE0.8	130.865	139.239	144.151	147.730
S2.8PE0.7	119.778	125.336	132.051	147.687
S2.4PE1.6	132.565	138.979	139.617	143.304
S2.1PE1.4	41.937	52.448	62.146	87.902
S1.6PE2.4	53.784	63.526	63.764	60.514
S1.4PE2.1	27.653	31.453	36.113	73.068
S0.8PE3.2	35.000	38.674	38.643	41.929
S0.7PE2.8	13.740	13.050	28.212	46.566
S0.0PE4.0	30.308	32.005	32.642	33.184
S0.0PE3.5	14.870	14.544	13.626	14.334



รูปที่ 4.4 กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคิลที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคิลกับปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซเคิลที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

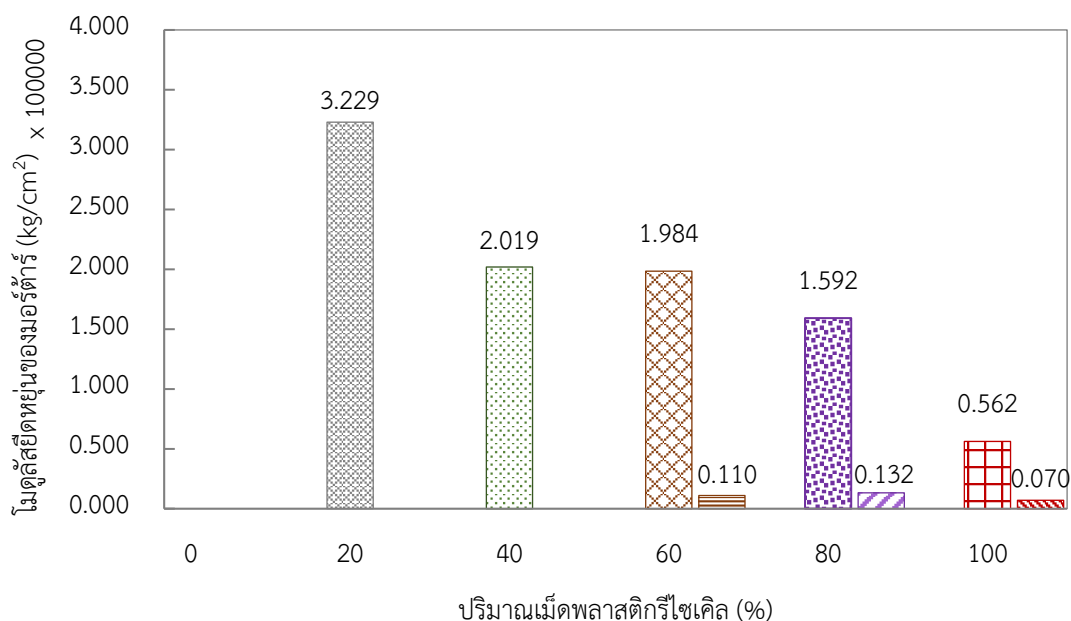
2) โมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคล

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นอัตราส่วนของกำลังตัด (ความเค้น) ต่อความเครียดหรือความชันของเส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ในช่วงพฤติกรรมอีลาสติก โดยกราฟความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับความเครียดของทุกอัตราส่วนผสมแสดงในภาคผนวก ก

จากตาราง 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่า โดยภาพรวมโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ต้าร์ที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเม็ดพลาสติก โดยอัตราส่วนที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดคือ S3.2PE0.8 รองลงมาคืออัตราส่วน S2.4PE1.6 และ S1.6PE2.4 มีค่าเท่ากับ 322,940 kg/cm² 201,917 kg/cm² และ 198,422 kg/cm² ตามลำดับ อัตราส่วนผสมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำสุดคือ S0.0PE4.0 มีค่าเท่ากับ 56,172 kg/cm² สรุปได้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ด้วยเม็ดพลาสติกกรีซเคล

ตาราง 4.5 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน

อัตราส่วนผสม	โมดูลัสยืดหยุ่น (kg/cm ²)
S4.0PE0.0	-
S3.5PE0.0	-
S3.2PE0.8	322,940
S2.8PE0.7	-
S2.4PE1.6	201,917
S2.1PE1.4	-
S1.6PE2.4	198,422
S1.4PE2.1	10,976
S0.8PE3.2	159,225
S0.7PE2.8	13,224
S0.0PE4.0	56,172
S0.0PE3.5	7,002



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์กับปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน

สรุปได้ว่าคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547 ประเภทที่ 4 ที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน ในอากาศชื้น และ 27 วัน ในน้ำ ดังตาราง 4.6 มีด้วยกัน 2 อัตราส่วนผสม ได้แก่ S3.2PE0.8 และ S2.4PE1.6 โดยผ่านเกณฑ์ที่กำลังมากกว่า 140 kg/cm^2

การพิจารณาการไหลแฉะของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล จะเลือกอัตราส่วนผสมที่มีการไหลแฉะมากที่สุด เพราะการไหลแฉะมากจะทำให้คอนกรีตไหลเข้าแบบได้เป็นอย่างดี ลดการเกิดช่องว่างหรือรูพรุนในเนื้อคอนกรีต อัตราส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์กำลังอัดและหน่วยน้ำหนักมีการไหลแฉะไม่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนผสม S2.4PE1.6 มีการไหลแฉะ 32.10 mm ไหลเข้าแบบได้ดีกว่าอัตราส่วนผสม S3.2PE2.4 ซึ่งมีการไหลแฉะ 30.80 mm

การพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของมอร์ตาร์จะเลือกอัตราส่วนผสมที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากที่สุด เพราะค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากจะทำให้ชิ้นส่วนห้องน้ำสำเร็จรูปมีการยึดหดตัวสูง ทำให้มีความทนทานสูงตามไปด้วย อัตราส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์กำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และการไหลแฉะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่แตกต่างกัน โดยอัตราส่วนผสม S3.2PE0.8 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น $207,148 \text{ kg/cm}^2$ สูงกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของอัตราส่วนผสม S2.4PE1.6 ซึ่งมีค่าเท่ากับ $149,317 \text{ kg/cm}^2$

สรุปได้ว่าการพิจารณาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดสำหรับการสร้างต้นแบบห้องน้ำที่ใช้ระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูปของการศึกษานี้เลือกอัตราส่วนผสม S2.4PE1.6 เนื่องจากมีกำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547 มีหน่วยน้ำหนักและการไหลแผ่ดีกว่าอัตราส่วนผสม S3.2PE0.8 ที่มีกำลังอัดผ่านเกณฑ์เช่นเดียวกัน แม้ว่าอัตราส่วนผสม S2.4PE1.6 จะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยกว่าอัตราส่วนผสม S3.2PE0.8

ตาราง 4.6 เกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547

อายุการบ่ม	กำลังอัด (kg/cm ²)				
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5
1 วันในอากาศชื้น	-	-	120	-	-
1 วันในอากาศชื้น และ 2 วันในน้ำ	85	70	210	-	-
1 วันในอากาศชื้น และ 6 วันในน้ำ	150	130	-	55	105
1 วันในอากาศชื้น และ 27 วันในน้ำ	245	245	-	140	210

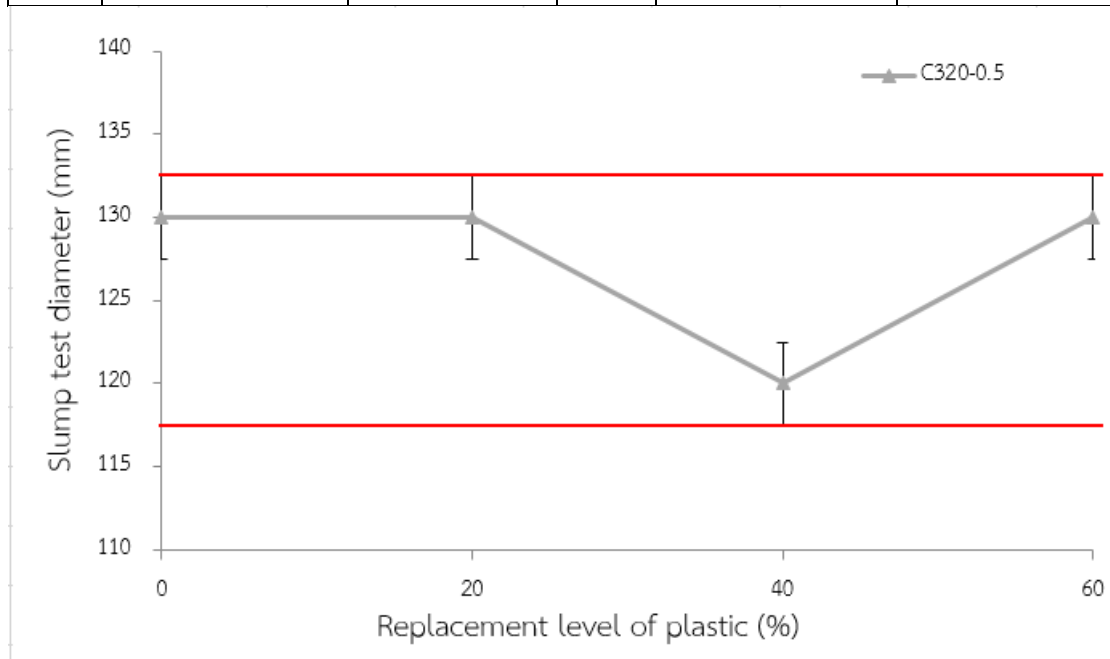
4.3 คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก

4.3.1 การทดสอบหาค่ายุบตัว (slump test)

จากตาราง 4.7 ได้ทำการทดสอบคอนกรีตที่ C560 และ C660 ที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 0 5 10 และ 15 พบว่าคอนกรีตไม่สามารถวัดค่าการยุบตัวได้เนื่องจากคอนกรีตมีการยุบตัวแบบไหลแผ่ ในขณะที่คอนกรีต C320 ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 0 20 40 และ 60 มีค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 117 – 137 cm ดังรูปที่ 4.7

ตาราง 4.7 ผลการทดสอบหาค่าการทรุดตัว

ลำดับ ที่	ตัวอย่าง	การทดสอบหา ค่ายุบตัว	ลำดับ ที่	ตัวอย่าง	การทดสอบหา ค่ายุบตัว (cm)
1	C560-0.4-PE0	N.A.*	7	C660-0.4-PE10	N.A.
2	C560-0.4-PE5	N.A.	8	C660-0.4-PE15	N.A.
3	C560-0.4-PE10	N.A.	9	C320-0.5-PE0	13
4	C560-0.4-PE15	N.A.	10	C320-0.5-PE20	13
5	C660-0.4-PE0	N.A.	11	C320-0.5-PE40	12
6	C660-0.4-PE5	N.A.	12	C320-0.5-PE60	13



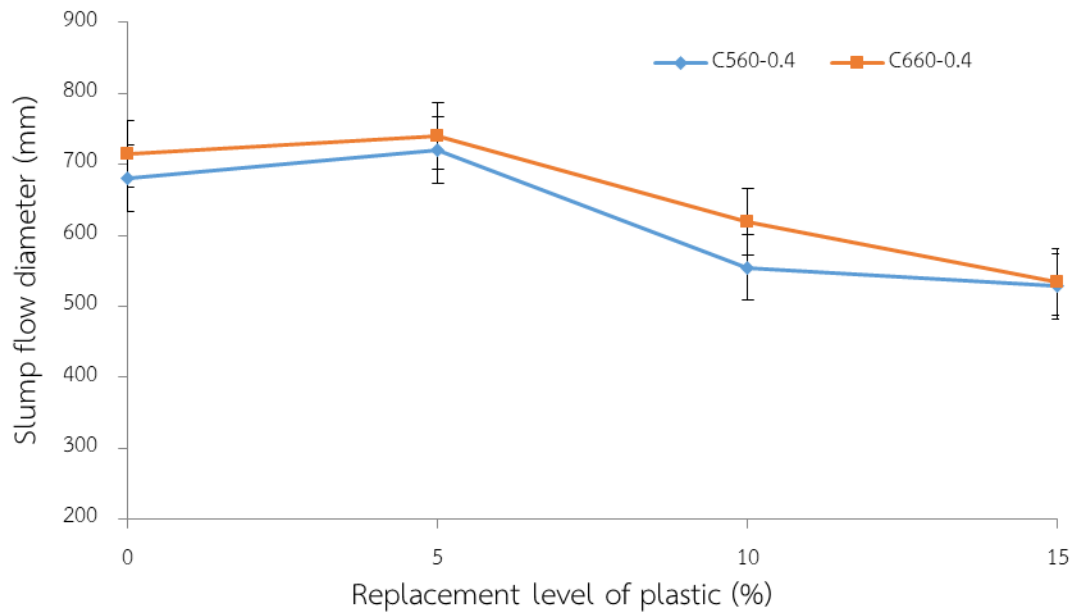
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด

4.3.2 การไหลแผ่ของคอนกรีตสด

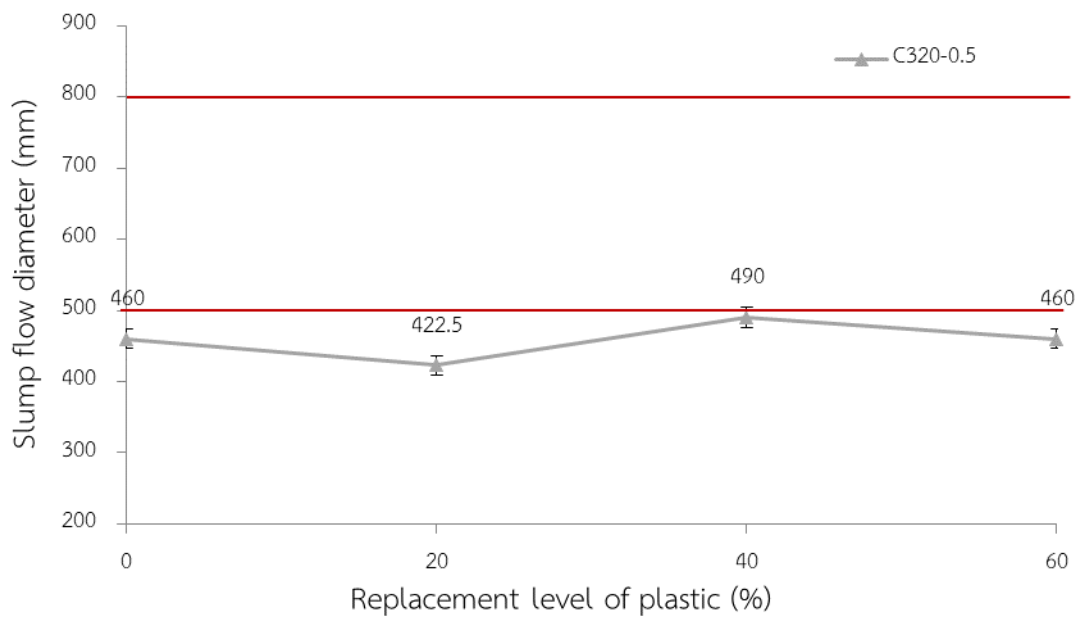
วิธีการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตสดของ Self-compacting concrete จะแตกต่างโดยสิ้นเชิงจากการทดสอบของคอนกรีตธรรมดาโดยในการทดสอบความสามารถในการไหลแผ่ดังรูปที่ 4.8 ASTM C1611 (Deformability test) จะใช้กรวยทดสอบขนาดมาตรฐานเช่นเดียวกับการทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีตธรรมดาแต่วิธีการวัดค่าจะแตกต่างออกไป การวัดค่าการเสียรูปนั้นจะวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตหลังจากที่ยกรวยทดสอบขึ้นแล้วปล่อยให้คอนกรีตไหลจนหยุดนิ่ง ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง 500 ถึง 800 mm คอนกรีตที่มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่านี้ถือว่ามีค่าการไหลแผ่ไม่เพียงพอซึ่งมีโอกาสสูงที่คอนกรีตจะไม่สามารถไหลเข้าสู่แบบและอัดแน่นได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.8 การไหลแผ่ของคอนกรีตสด



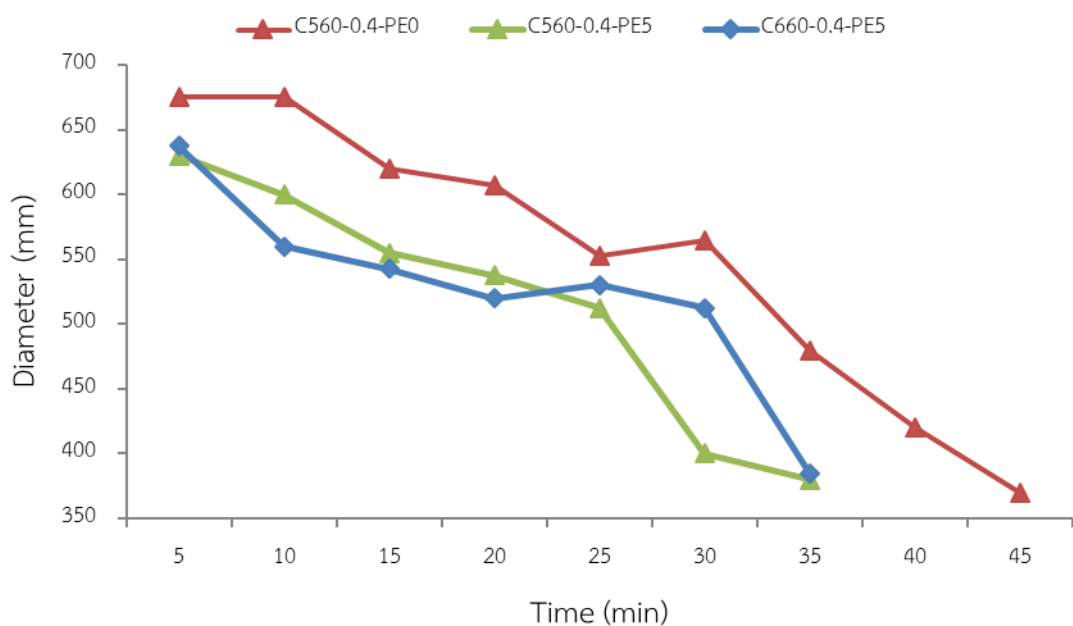
รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการเสีรูปของคอนกรีตสดที่ C560 และ C660



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบการเสีรูปของคอนกรีตสดที่ C320

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบการเสียรูปของคอนกรีตสด พบว่าคอนกรีตที่ C560 และ C660 เป็นคอนกรีตที่ผสมน้ำยาสำหรับ Self-compacting concrete ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 5 มีความสามารถในการไหลแผ่เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ซึ่งค่าการไหลแผ่สูงที่สุดในทุก ๆ อัตราส่วนเท่ากับ 740 mm และคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 10 และ 15 จะมีความสามารถในการไหลแผ่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 5 แต่ในขณะที่คอนกรีตที่ C320 ที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 20 40 60 และที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล มีค่าความสามารถไหลแผ่สูงสุดเท่ากับ 490 mm ซึ่งมีการไหลแผ่ไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนด หมายความว่าคอนกรีตที่ C320 ไม่มีความสามารถในการไหลแผ่ดังรูปที่ 4.10

4.3.3 การสูญเสียค่าการยุบตัว (slump loss)



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด

จากรูปที่ 4.11 ผลการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด พบว่าคอนกรีตของ C560 และ C660 ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 0 5 มีค่าการสูญเสียการยุบตัวลดลงอย่างต่อเนื่องในความชื้นที่ใกล้เคียงกัน จนถึง 25 นาที ในขณะที่คอนกรีตที่ C560 และ C660 ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลร้อยละ 5 มีค่าการสูญเสียการยุบตัวลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไป 35 นาที คอนกรีตมีค่าสูญเสียการยุบตัวเท่ากับ 380 และ 385 mm ตามลำดับ แต่คอนกรีตที่ C560

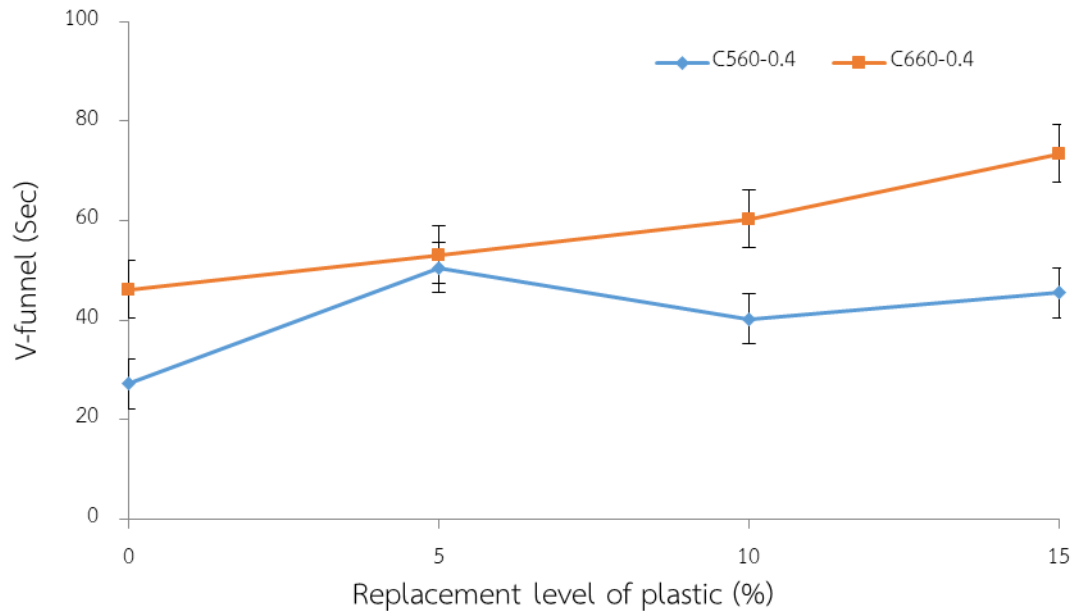
ที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล มีค่าการสูญเสียการยุบตัวลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งเวลาผ่านไปถึง 45 นาที คอนกรีตจึงจะมีค่าการสูญเสียการยุบตัวเท่ากับ 370 mm ดังนั้นสรุปได้ว่าคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลมีผลต่อการสูญเสียค่าการยุบตัว ทำให้เกิดการยุบตัวเร็วขึ้น

4.3.4 การทดสอบความหนืดของคอนกรีตสด(V-funnel)

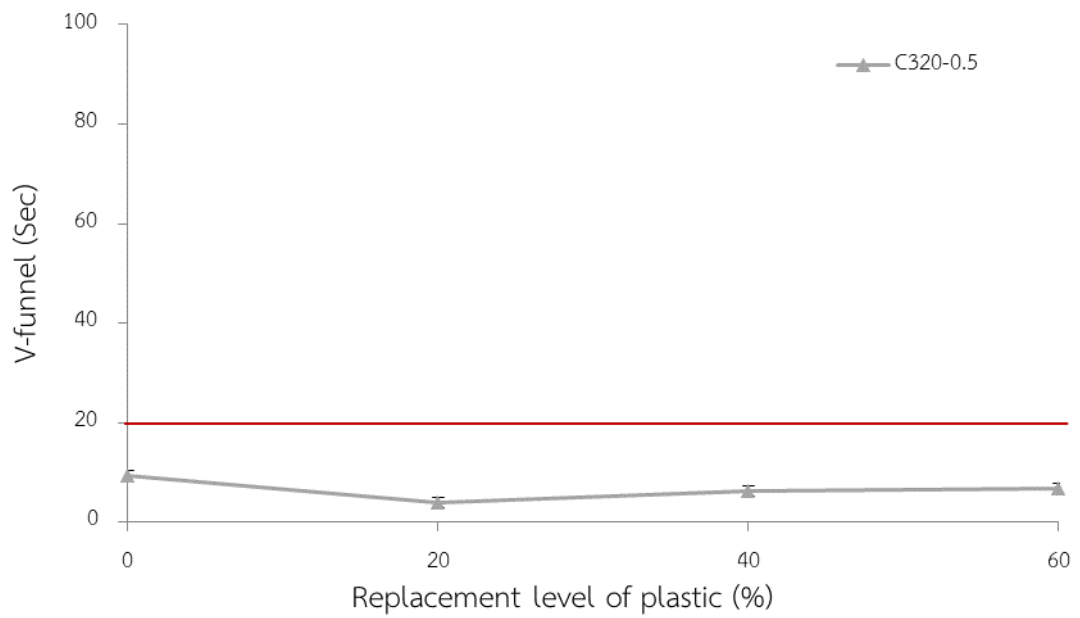
การทดสอบการต้านทานการแยกตัวด้วยการไหลผ่านเครื่องมือทดสอบรูปตัววี (V-funnel flow test) ดังรูปที่ 4.12 ตามมาตรฐาน EFNARC การทดสอบการไหลผ่านเครื่องมือทดสอบรูปตัววี เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานการแยกตัวของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้ เป็นการทดสอบมิติของการไหลในแนวตั้งซึ่งแตกต่างจากการทดสอบการไหลแผ่ ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปล่อยคอนกรีตจนกระทั่งเห็นแสงลอดผ่านจุดปล่อยเมื่อมองจากด้านบนในหน่วยวินาทีคือดัชนีชี้วัดความหนืด (Viscosity) ของ Self-compacting concrete ระยะเวลาสำหรับความหนืดที่เหมาะสมยังไม่มีกำหนดเป็นตัวเลขที่ชัดเจน ระยะเวลานี้เป็นตัวเลขที่บอกได้คร่าวๆว่าคอนกรีตมีลักษณะเป็นอย่างไรถ้าคอนกรีตใช้เวลาในการผ่าน V-funnel น้อย แสดงว่าคอนกรีตมีลักษณะค่อนข้างเหลวซึ่งอาจจะมีโอกาสเกิดการแยกตัวขึ้นได้ หรือในทางกลับกัน ถ้าคอนกรีตใช้เวลาในการผ่าน V-funnel มากแสดงว่าคอนกรีตมีความหนืดหรือเหนียวมาก ในกรณีนี้การแยกตัวอาจไม่เกิดขึ้นแต่คอนกรีตจะไหลได้ช้า ซึ่งส่งผลให้การเทคอนกรีตในหน้างานจริงอาจทำได้ยาก โดยทั่วไป Self-compacting concrete จะใช้ระยะเวลาผ่าน V-funnel ประมาณ 10-20 s



รูปที่ 4.12 การทดสอบความหนืดของคอนกรีตสด



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบความหนืดของคอนกรีตสดที่ C560 และ C660



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบความหนืดของคอนกรีตสดที่ C320

คอนกรีตที่ C660 ที่ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลร้อยละ 0 5 10 และ 15 จะใช้เวลาในการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการไหลนานที่สุด นั้นหมายความว่าคอนกรีตมีความหนืดสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ C560 ที่ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลร้อยละ 0 5 10 และ 15 จะสังเกตได้ว่าคอนกรีตใช้เวลาในการไหลน้อยกว่าพบว่าคอนกรีตที่ C660 และเมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดพลาสติกรีไซเคิลก็จะส่งผลให้คอนกรีตมีความหนืดยิ่งขึ้นเช่นกัน และ จากรูปที่ 4.13 แต่เมื่อลดสัดส่วนปูนซีเมนต์ลงเท่ากับ 320 kg/m^3 ที่ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลร้อยละ 0 20 40 และ 60 ดัง จะเห็นว่าคอนกรีตใช้เวลาในการไหลเร็วมาก ซึ่งระยะเวลาการไหลน้อยกว่าเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด หมายความว่าคอนกรีตมีโอกาเกิดการแยกตัวสูง และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเม็ดพลาสติกรีไซเคิลร้อยละต่าง ๆ พบว่าระยะเวลาการไหลนั้นมีค่าใกล้เคียงกันทั้งหมด

4.3.5 การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (L-box)

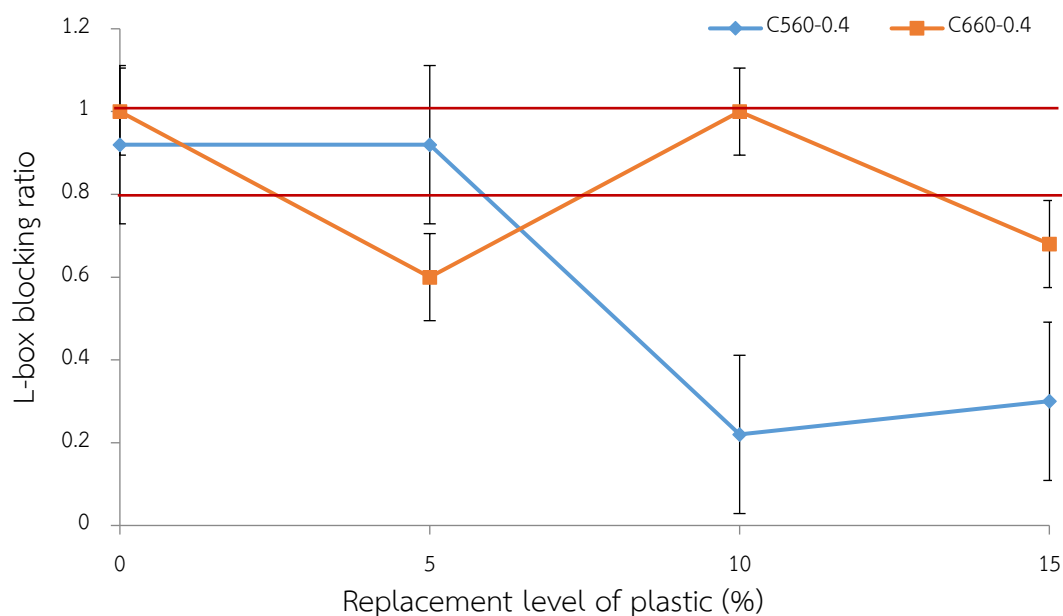
การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวดิ่งด้วย L-box ดังรูปที่ 4.15 ตามมาตรฐาน EFNARC, 2002 การทดสอบทำได้โดยนำวัสดุเติมในส่วนตั้งของอุปกรณ์ให้เต็มแล้วปล่อยให้วัสดุไหลลงสู่ด้านล่างจนกระทั่งหยุดไหล จากนั้นจึงวัดระยะเพื่อหาอัตราส่วนในแนวตั้งระหว่างระยะสุดท้ายกับระยะเริ่มต้น



รูปที่ 4.15 การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน

ตาราง 4.8 ผลการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน

ลำดับ ที่	ตัวอย่าง	การทดสอบการไหลผ่าน สิ่งกีดขวางในแนวนอน (H2/H1)	ลำดับ ที่	ตัวอย่าง	การทดสอบการไหลผ่าน สิ่งกีดขวางในแนวนอน (H2/H1)
1	C560-0.4-PE0	0.92	1	C660-0.4-PE10	1.00
2	C560-0.4-PE5	0.92	2	C660-0.4-PE15	0.68
3	C560-0.4-PE10	0.22	3	C320-0.5-PE0	N.A.
4	C560-0.4-PE15	0.30	4	C320-0.5-PE20	N.A.
5	C660-0.4-PE0	1.00	5	C320-0.5-PE40	N.A.
6	C660-0.4-PE5	0.60	6	C320-0.5-PE60	N.A.



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนของคอนกรีตสด

จากตาราง 4.8 ผลการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนได้ทำการทดสอบคอนกรีตที่ C560 C660 ที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลร้อยละ 0 5 10 และ 15 และทดสอบคอนกรีตที่ C320 ที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลร้อยละ 0 20 40 และ 60 พบว่าคอนกรีตที่มี C320 ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากคอนกรีตไม่มีความสามารถในการไหล ในขณะที่คอนกรีตที่ C660 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลร้อยละ 10 และไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล และคอนกรีตที่มี C560

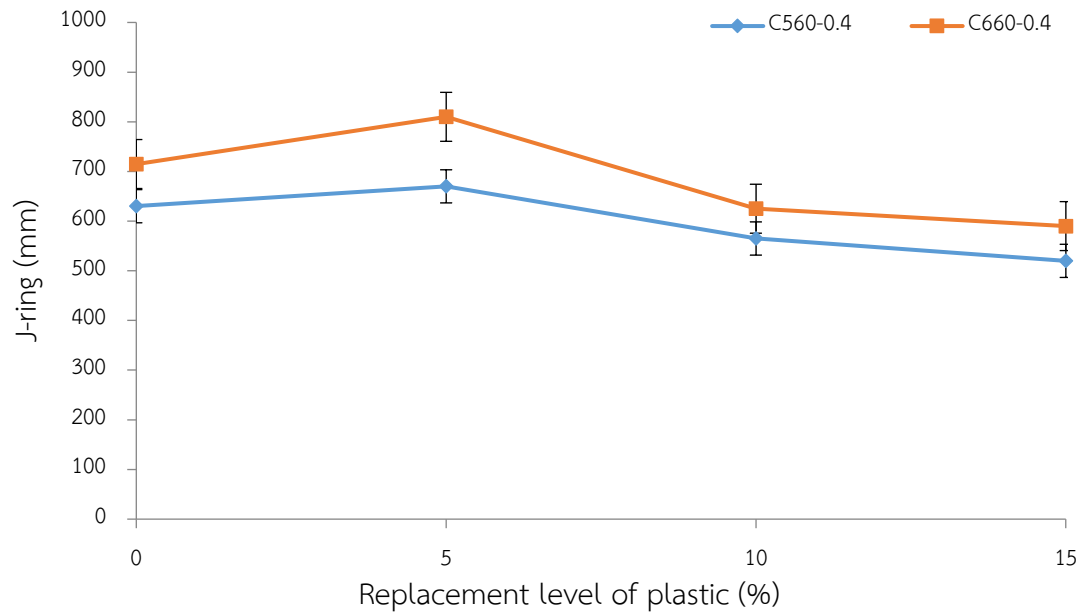
ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลร้อยละ 5 และไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล อยู่ในเกณฑ์ความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนที่กำหนดดังรูปที่ 4.16

4.3.6 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางซี่เหล็ก

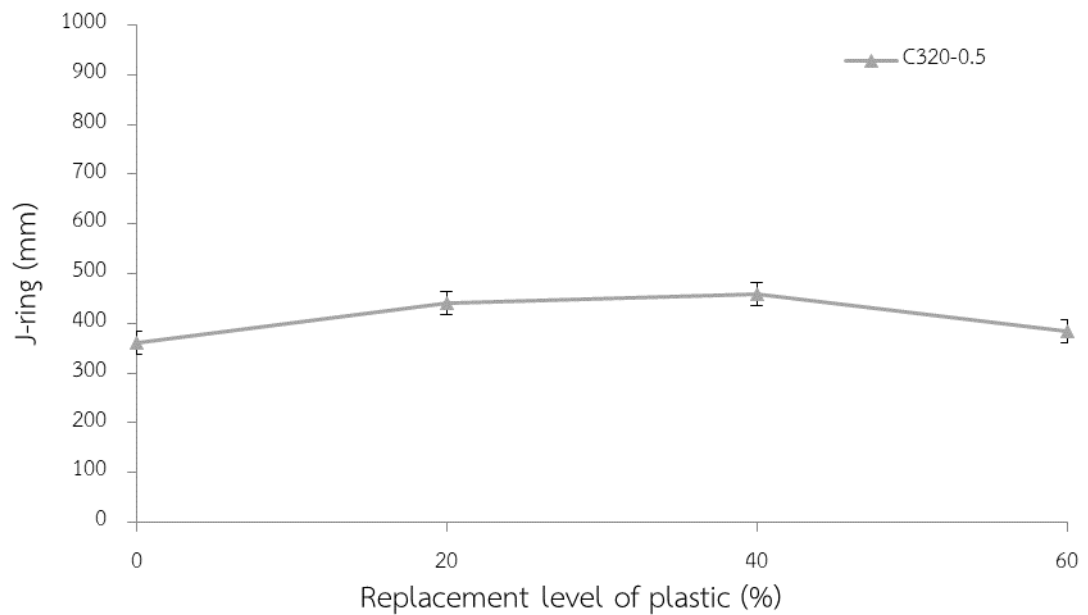
การคำนวณผลต่างของการไหลสองรูปแบบถูกนำมาใช้เพื่อประเมินการติดขัดเนื่องจากการไหล การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซี่เหล็ก (J-Ring) ของคอนกรีตชนิดอัดแน่นตัวได้เป็นการทดสอบลักษณะเดียวกับการทดสอบแบบไหลผ่าน ต่างกันแต่เพียงเป็นการไหลผ่านแบบอิสระ กับการไหลแบบมีวงซี่เหล็กมาปิดขวางการไหล โดยแนวทางการประเมินความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1621 โดยกำหนดส่วนต่างระยะของการไหลทั้ง 2 แบบอยู่ในช่วง 0 ถึง 2.5 cm ถือได้ว่าไม่เกิดการกีดขวางในระหว่างการไหล (No visible blocking) ผลต่างในช่วง 2.6 ถึง 5.0 cm ถือได้ว่าเกิดการกีดขวางในระหว่างการไหลเพียงเล็กน้อย (Minimal to noticeable blocking) ในขณะที่ส่วนผลต่างมากกว่า 5.0 cm ถือได้ว่าเกิดการกีดขวางในระหว่างการไหลในระดับสูงมาก (Noticeable to extreme blocking)



รูปที่ 4.1 การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซี่เหล็ก



รูปที่ 4.18 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางซีเหล็กของคอนกรีตสดที่มี C560 และ C660



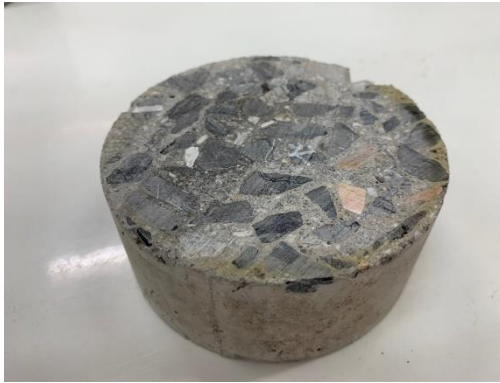
รูปที่ 4.19 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางซีเหล็กของคอนกรีตสดที่ C320

จากรูปที่ 4.18 พบว่า คอนกรีตที่ C560 และ C660 ที่ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลร้อยละ 0 5 10 และ 15 มีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในทิศทางเดียวกันคือ ที่ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลร้อยละ 5 จะมีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีที่สุด และความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางจะลดลงเมื่อผสมเม็ดพลาสติกร้อยละ 10 และ 15 แต่คอนกรีตที่ C660 จะมีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าคอนกรีตที่ C560 และคอนกรีตที่มี C320 ที่ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลร้อยละ 0 20 40 และ 60 ตามลำดับ มีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางใกล้เคียงกันทั้งหมด ซึ่งมีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางน้อยกว่าคอนกรีตที่ C560 และ C660 ดังรูปที่ 4.19

4.4 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วผสมเม็ดพลาสติก

4.4.1 รูปร่างและลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกรีไซเคิล

รูปร่างและลักษณะทางกายภาพของคอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลและที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกรีไซเคิล แสดงในรูปที่ 4.20 (ก) และ รูปที่ 4.21 (ก) โดยจะเห็นการกระจายตัวของเม็ดพลาสติกอยู่ที่หัวหน้าตัดคอนกรีต ซึ่งในภาพขยายขนาด 800 เท่าของคอนกรีตทั้งสองกลุ่ม ดังรูปที่ 4.20 (ข) และ รูปที่ 4.21 (ข) จะสังเกตเห็นความแตกต่างของผิวหน้าตัดคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกจะมีการยึดระหว่างมวลรวมหยาบและซีเมนต์เพสต์อย่างดี ส่วนคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกรีไซเคิลจะพบว่ามีรอยแตกร้าวพาดผ่านแนวขอบเม็ดพลาสติก ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติในการถ่ายแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดพลาสติกกับซีเมนต์เพสต์ให้มึค่าลดลงได้ โดยผลจากแรงยึดเกาะจะนำไปสู่สมบัติในการรับกำลังอัดให้มึค่าลดลงตามไปด้วย และรูปที่ 4.22 แสดงภาพขยายขนาด 800 เท่า ของคอนกรีตทั้งสองกลุ่ม เป็นการยืนยันถึงพฤติกรรมการยึดเกาะระหว่างเม็ดพลาสติกและมวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีต โดยเกิดรอยร้าวขึ้นในคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติก ขณะที่คอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกโดยมีเฉพาะมวลรวมปกติจะไม่เห็นรอยร้าวในเนื้อของคอนกรีต



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 หน้าตัดของคอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติก (ก) ภาพขนาดปกติ (ข) ภาพขยาย 800 เท่า



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.21 หน้าตัดของคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติก (ก) ภาพขนาดปกติ (ข) ภาพขยาย 800 เท่า



(ก)



(ข)

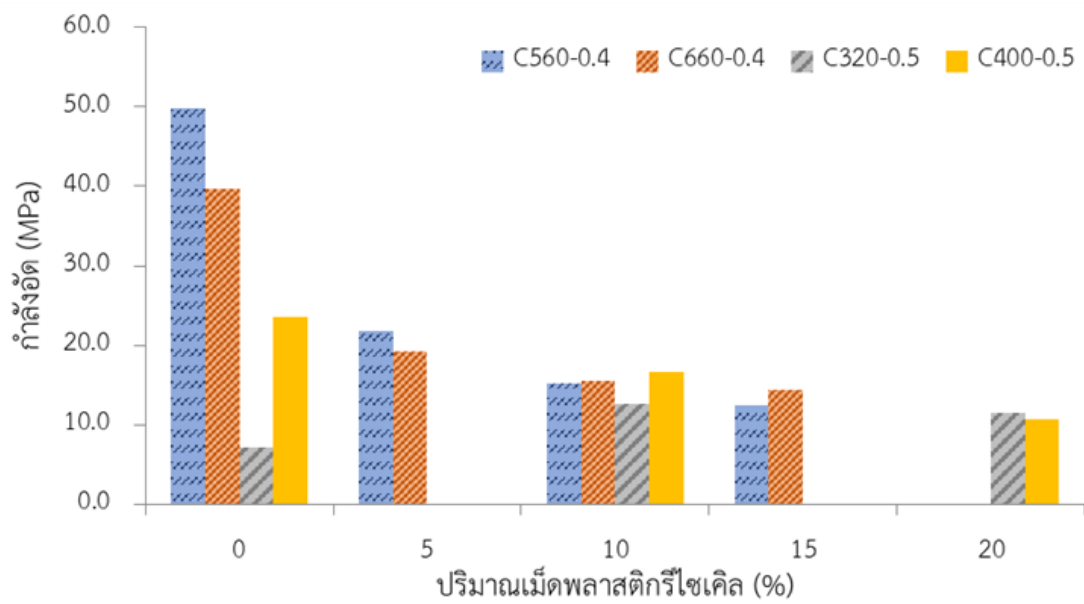
รูปที่ 4.22 ภาพขยายขนาด 800 เท่าของคอนกรีต (ก) ผสมเม็ดพลาสติก (ข) ไม่ผสมเม็ดพลาสติก

4.4.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิล

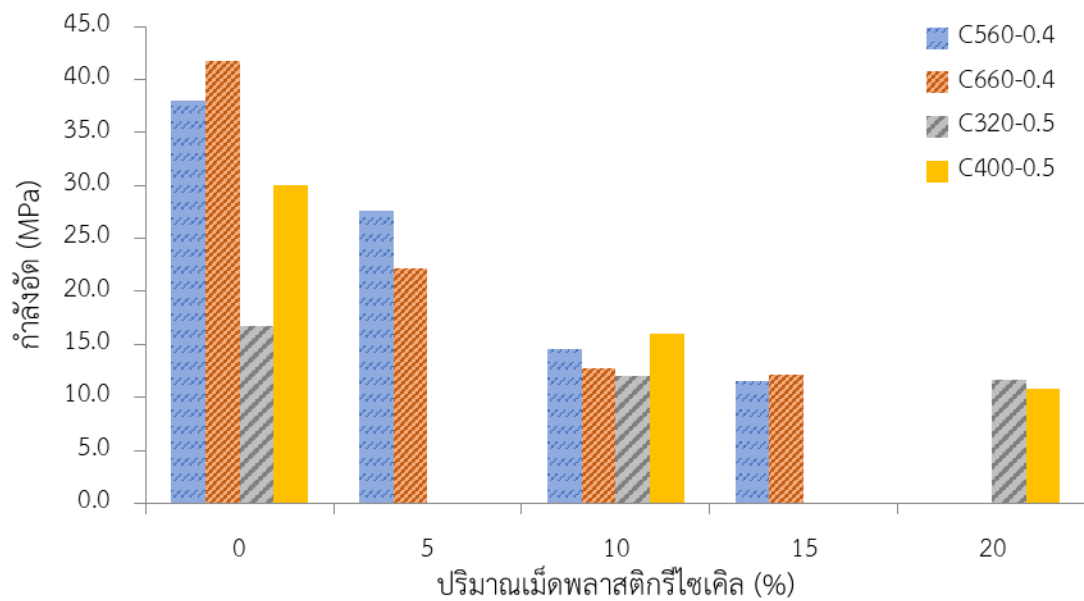
การทดสอบความสามารถในการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตแสดงรายละเอียดในตาราง 4.9 พบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดมีแนวโน้มไปในทิศทางลดลงเมื่อใช้ปริมาณเม็ดพลาสติกในส่วนผสมของคอนกรีตที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับการพัฒนากำลังรับแรงอัดตามระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต ตั้งแต่อายุ 7 14 21 และ 28 วัน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงกำลังไม่ค่อยชัดเจนมากนัก เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.23 ถึง รูปที่ 4.26 ซึ่งแสดงกราฟการพัฒนากำลังรับแรงอัด ที่อายุการบ่มที่ 7 14 21 และ 28 วัน จากทุกรูปจะ พบว่า กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมีเม็ดพลาสติกในส่วนผสมของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกมีรอยร้าวดังรายละเอียดในข้างต้น หากแยกการพิจารณาในส่วนของคอนกรีตควบคุมหรือคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเม็ดพลาสติก พบว่าที่อายุการบ่มเดียวกัน (ตั้งแต่ 7 วันขึ้นไป) กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์มากขึ้น สอดคล้องกับหลักการของ Abram และเมื่อใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจนสำหรับการแทนที่เม็ดพลาสติกในส่วนผสมของคอนกรีตตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 20 ความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมาก และการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาบ่มที่อายุต่าง ๆ ก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตอย่างชัดเจนมากนัก

ตาราง 4.9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิล

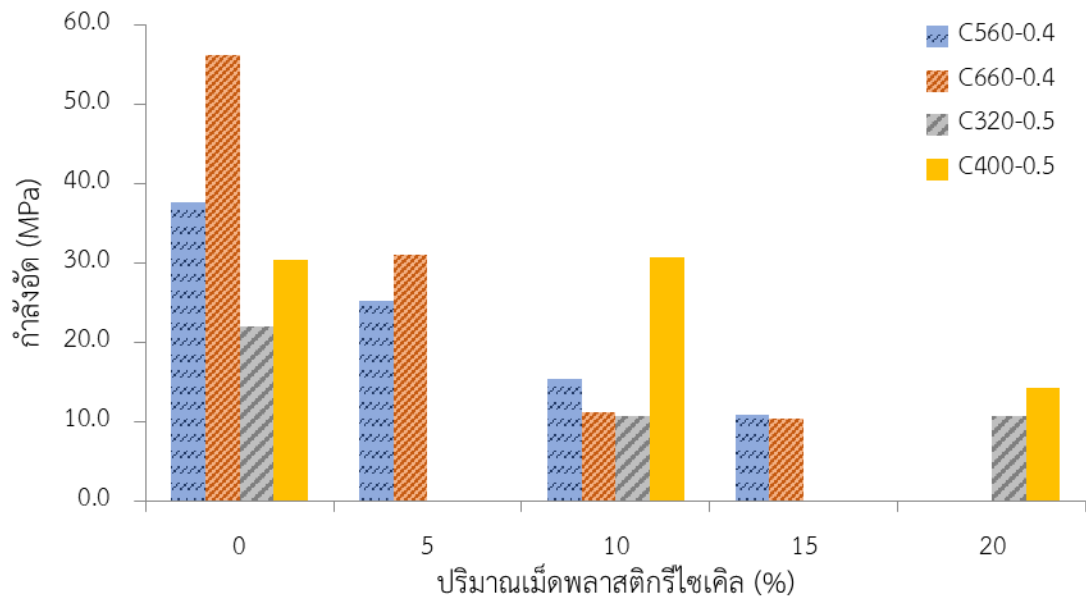
ตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ที่อายุบ่มต่าง ๆ			
	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
ปริมาณปูนซีเมนต์ ระดับสูง (560 – 660 kg/m ³)				
C560-0.4-PE0	49.776	37.954	37.691	37.428
C560-0.4-PE5	21.772	27.584	25.305	23.025
C560-0.4-PE10	15.187	14.526	15.456	16.386
C560-0.4-PE15	12.419	11.583	10.959	10.334
C660-0.4-PE0	39.748	41.737	48.948	56.159
C660-0.4-PE5	19.255	22.119	26.589	31.058
C660-0.4-PE10	15.421	12.702	11.981	11.260
C660-0.4-PE15	14.324	12.107	11.278	10.448
ปริมาณปูนซีเมนต์ ระดับสูง (320 – 400 kg/m ³)				
C320-0.5-PE0	7.091	16.776	22.004	22.776
C320-0.5-PE10	12.634	11.984	10.759	10.522
C320-0.5-PE20	11.549	11.696	10.797	11.418
C400-0.5-PE0	23.618	30.019	30.380	30.518
C400-0.5-PE10	16.689	15.993	30.768	15.010
C400-0.5-PE20	10.734	10.864	14.222	11.979



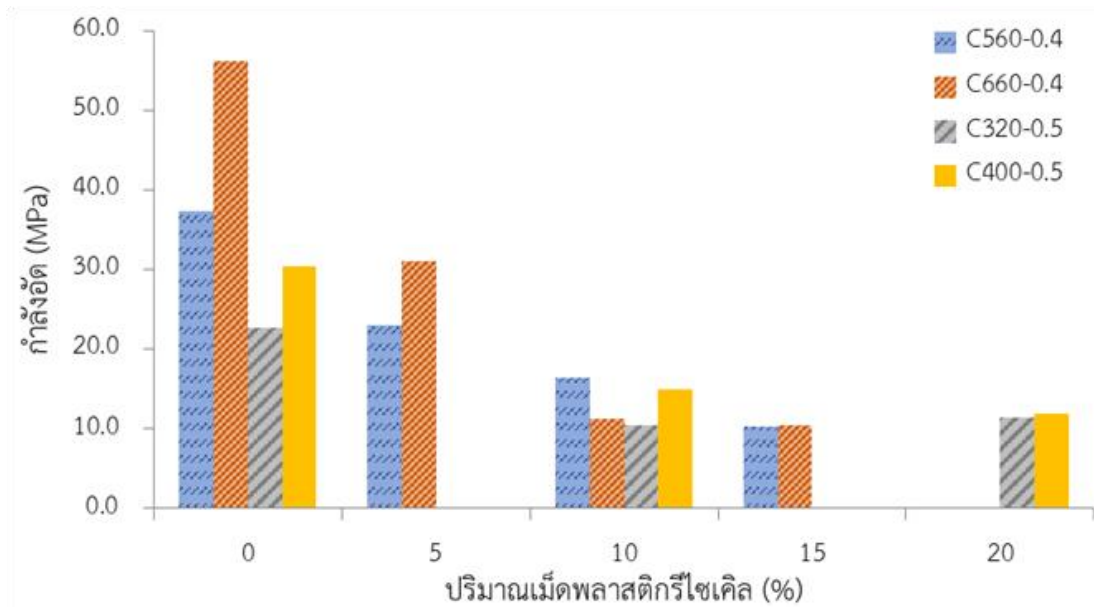
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการต้านทานก้ำลั้งอัดของคอนกรีตบ่มที่ 7 วัน



รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบการต้านทานก้ำลั้งอัดของคอนกรีตบ่มที่ 14 วัน



รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 21 วัน



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 28 วัน

4.4.3 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล

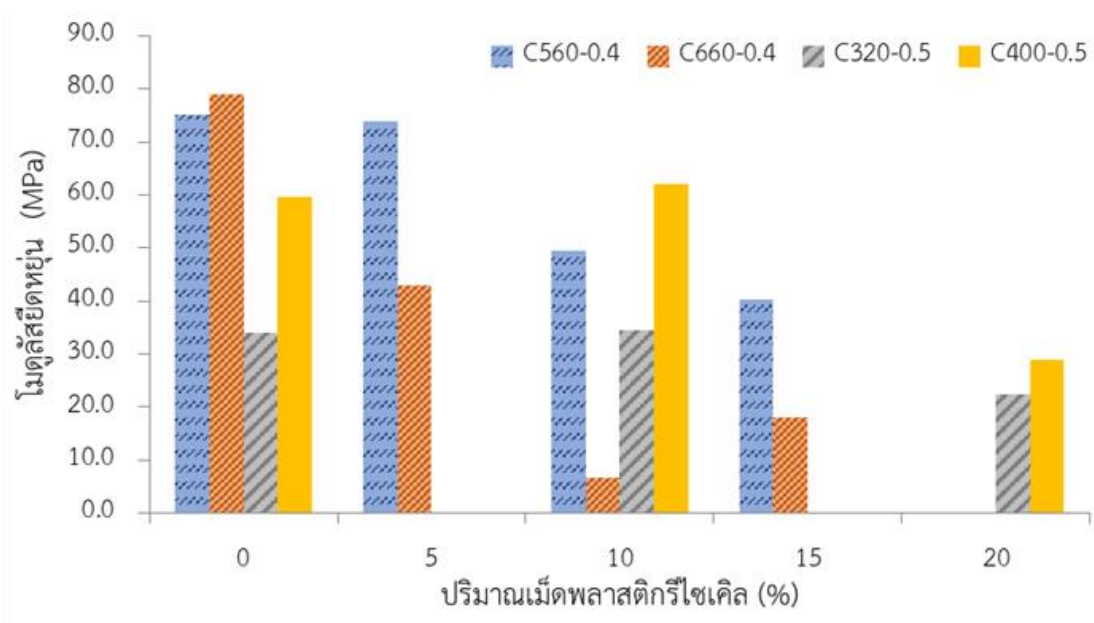
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลและคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลแสดงในตาราง 4.10 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของคอนกรีตมีมากขึ้น แต่จะมากำน้อยลงเมื่อมีปริมาณของเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลในส่วนผสมของคอนกรีตที่มากขึ้น โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมาค่าตั้งแต่ 104.13 GPa จนถึง 18.06 GPa สำหรับคอนกรีตไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล และคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ตามลำดับ

ตาราง 4.10 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ระยะบ่มต่าง ๆ

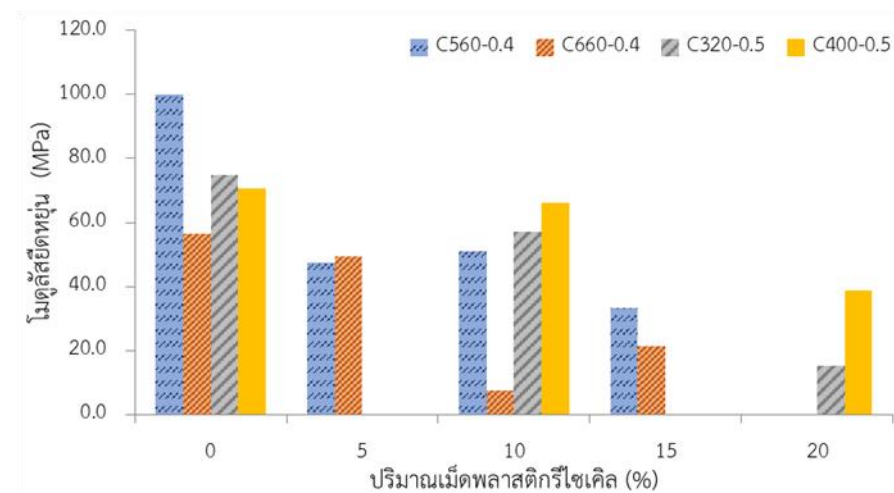
ตัวอย่าง	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุบ่มต่างๆ (GPa)			
	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
ปริมาณปูนซีเมนต์ ระดับสูง (560 – 660 kg/m ³)				
C560-0.4-PE0	74.98	99.95	102.04	104.13
C560-0.4-PE5	74.01	47.37	48.53	49.69
C560-0.4-PE10	49.52	51.08	39.59	28.10
C560-0.4-PE15	40.31	33.33	29.55	25.77
C660-0.4-PE0	78.96	56.59	67.86	79.12
C660-0.4-PE5	43.06	49.31	55.99	62.67
C660-0.4-PE10	26.75	27.57	28.67	29.77
C660-0.4-PE15	18.06	21.32	21.7	22.08
ปริมาณปูนซีเมนต์ ระดับปานกลาง (320 –400 kg/m ³)				
C320-0.5-PE0	34.06	74.79	46.04	86.60
C320-0.5-PE10	34.52	57.01	38.16	18.40
C320-0.5-PE20	22.43	15.33	58.33	65.61
C400-0.5-PE0	59.70	70.77	61.75	65.63
C400-0.5-PE10	62.14	66.19	78.22	51.17
C400-0.5-PE20	28.92	38.67	29.56	37.16

ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตที่มีเม็ดพลาสติกผสมร้อยละ 10 ถึง 20 พบว่าค่าโมดูลัสมีความไม่แน่นอนสูงมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากเม็ดพลาสติกที่ผสมในก้อนตัวอย่างคอนกรีตทดสอบมีความอ่อนแอกว่ามวลรวมธรรมดา ประกอบกับการที่คอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลจะมีรอยร้าวขนาด

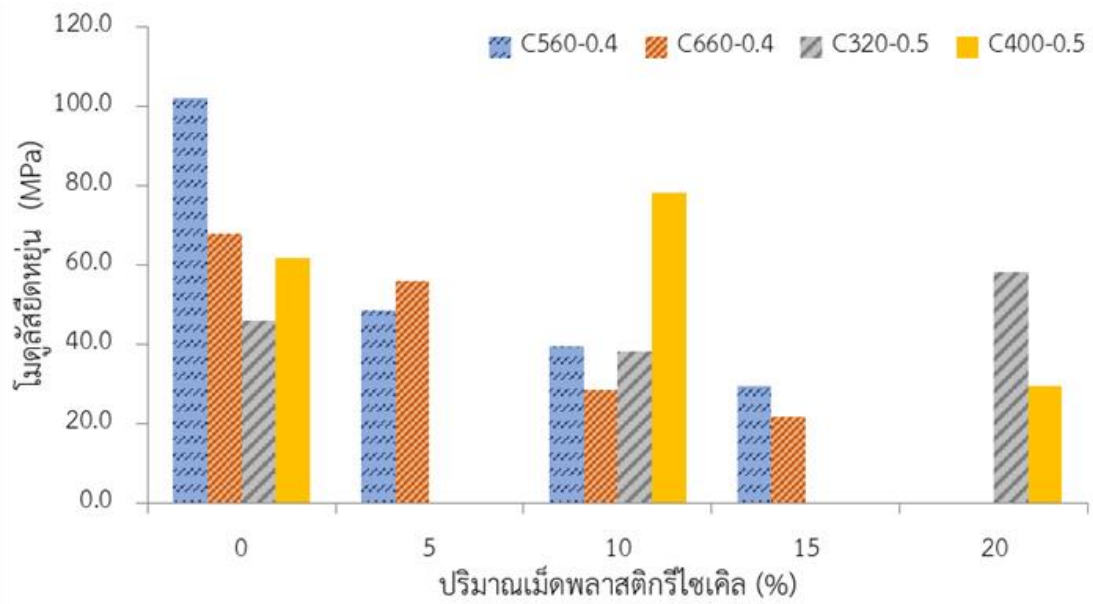
เล็กน้อยกระจายอยู่ในเนื้อจึงส่งผลให้ค่าโมดูลัสของคอนกรีตมีค่าที่น้อยลงด้วย การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลตามอายุการบ่มที่ 7 14 21 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 4.27 ถึง รูปที่ 4.30



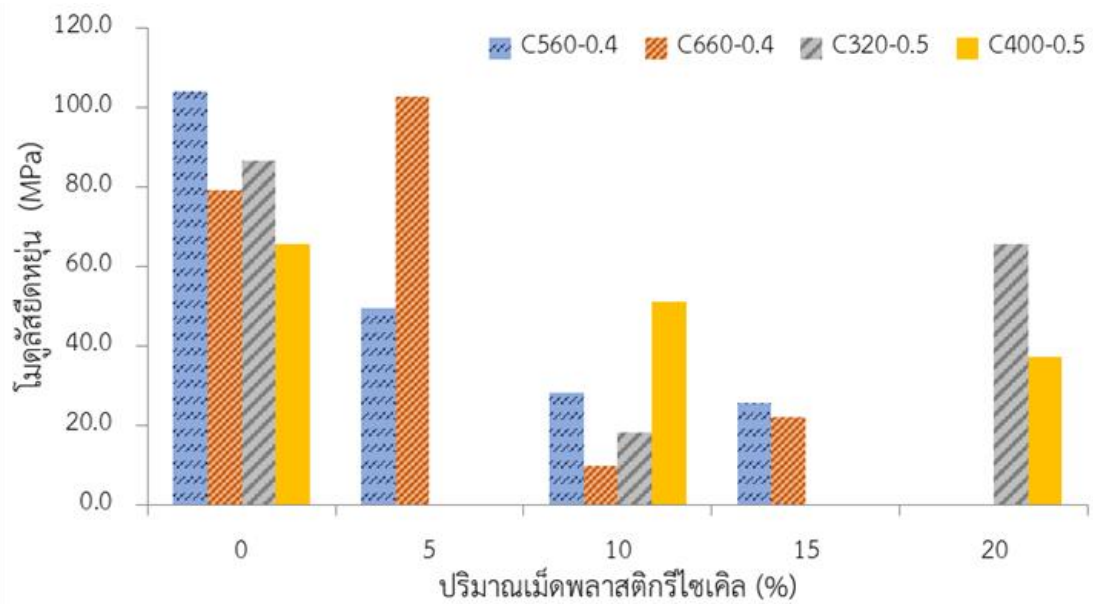
รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 7 วัน



รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 14 วัน

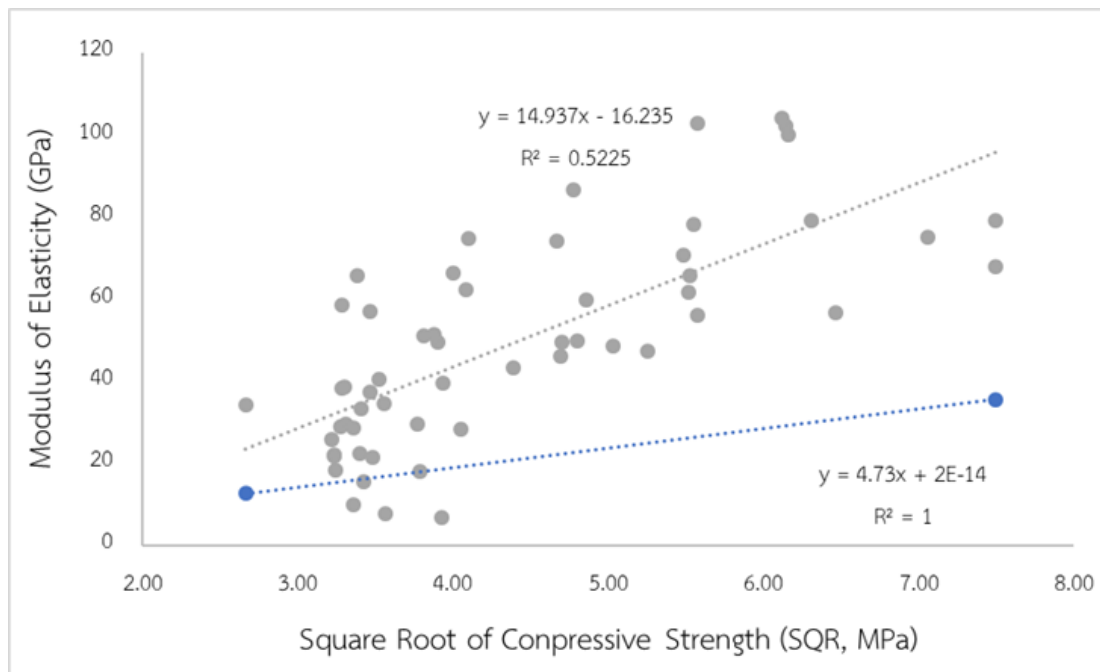


รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 21 วัน



รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ 28 วัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น จากมาตรฐาน ACI 318 แนะนำไว้ที่ $E = 4.73\sqrt{f'_c}$ เมื่อ f'_c เป็นค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต (MPa) จากรูปที่ 4.31 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกไร้ซีเมนต์ พบว่าผลการทดสอบให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสำหรับคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกไร้ซีเมนต์สูงกว่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตธรรมดา ที่แนะนำโดย ACI 318 อย่างไรก็ดีตามสำหรับคอนกรีตผสมด้วยเม็ดพลาสติกไร้ซีเมนต์ที่มีกำลังรับแรงอัดที่ค่อนข้างต่ำจะยังคงมีค่าโมดูลัสที่ต่ำกว่าสมการที่แนะนำโดย ACI 318 แต่เมื่อคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกไร้ซีเมนต์ที่มีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้นจะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่าสมการที่แนะนำโดย ACI 318

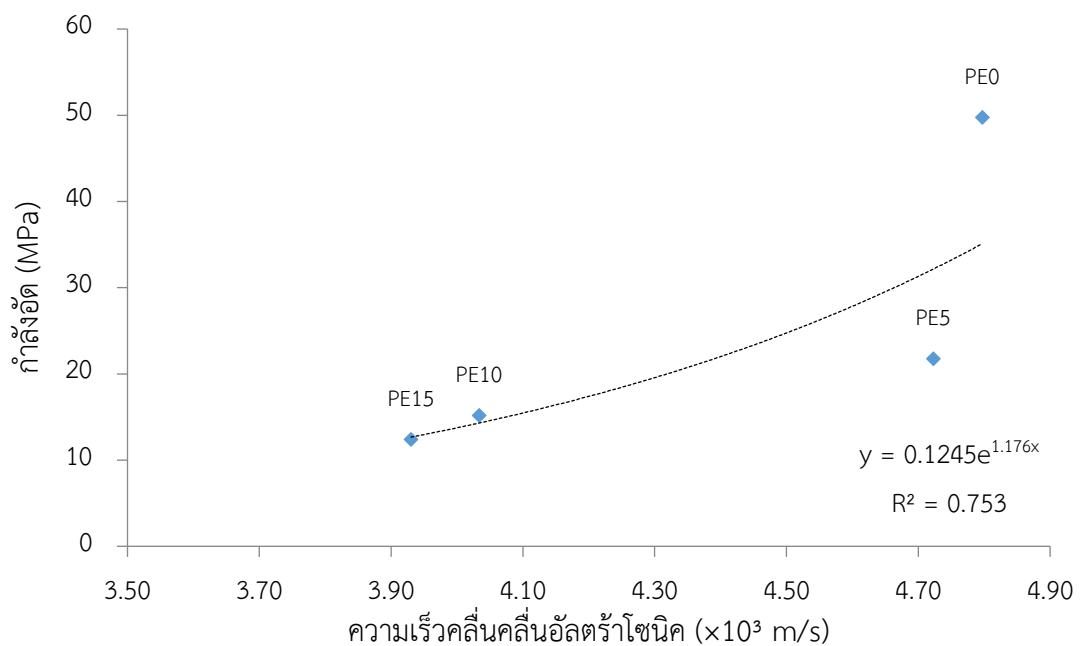


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกไร้ซีเมนต์

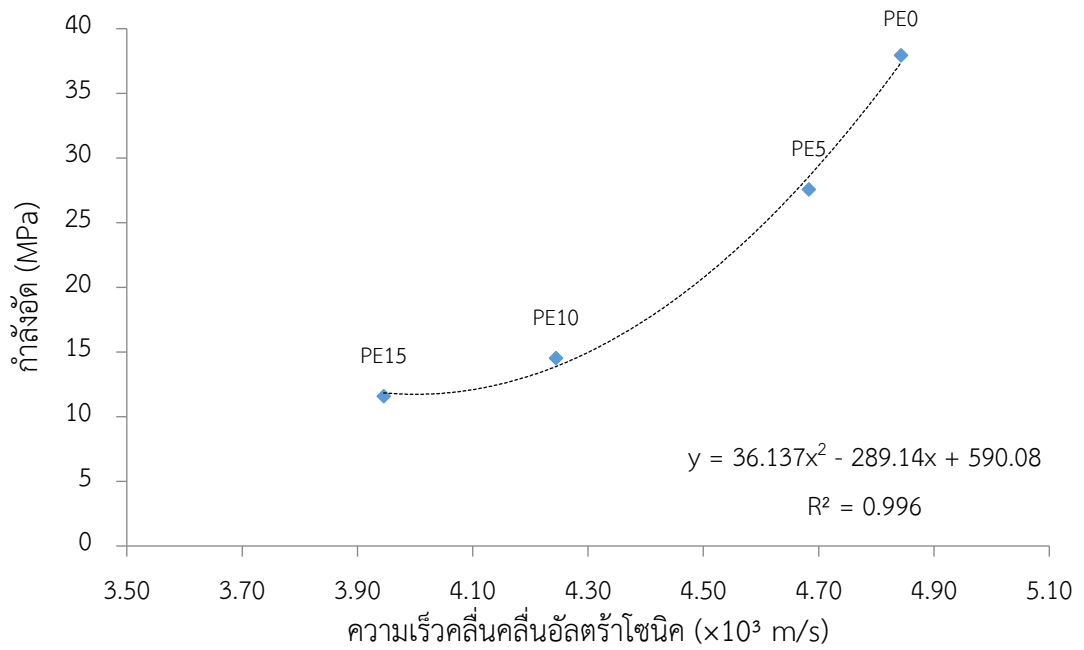
4.4.4 การทดสอบความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (UPV)

การทดสอบความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกไร้ซีเมนต์ด้วยวิธีการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Pulse Velocity: UPV) เป็นการทดสอบที่ไม่ต้องทำลายเนื้อคอนกรีต (Non-destructive Test: NDT) โดยนำคลื่นอัลตราโซนิกหรือคลื่นความถี่สูงวิ่งผ่านตัวกลางคือก้อนคอนกรีตทดสอบ ซึ่งหากก้อนคอนกรีตมีความสมบูรณ์ ผลการวิ่งจะเร็วเนื่องจากไม่มีตำหนิ

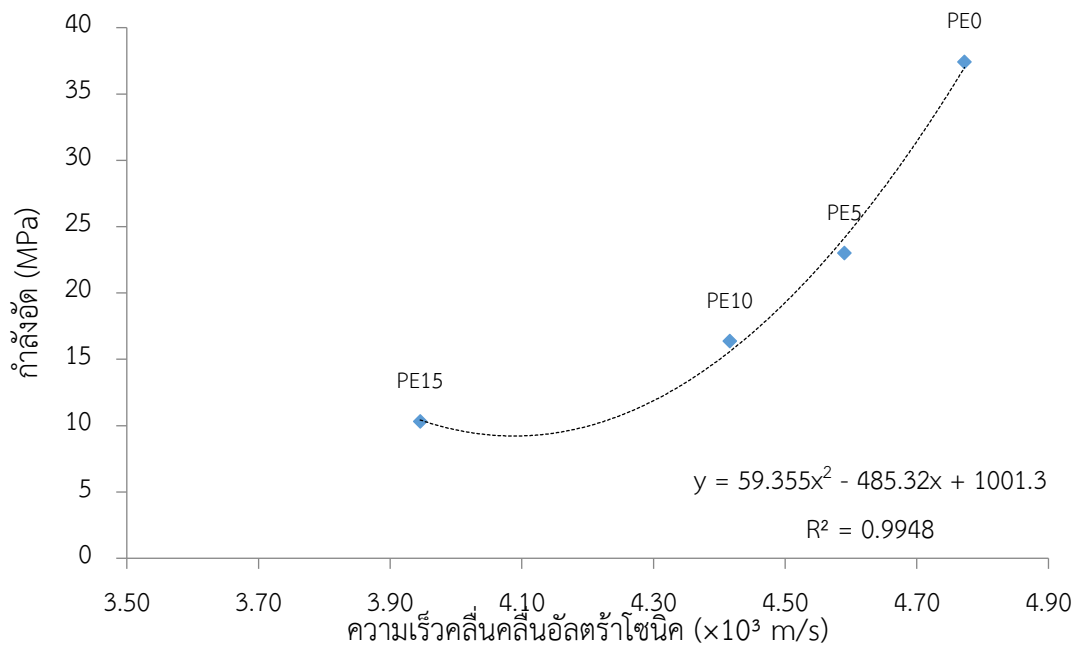
หรือช่องว่างในเนื้อของคอนกรีต ในทางกลับกัน หากคอนกรีตมีช่องว่าง ความเร็วของคลื่นจะวงได้ช้าลงเนื่องจากต้องวิ่งอ้อมช่องว่างส่งผลทำให้มีระยะทางวิ่งมากขึ้น ความเร็วที่วิ่งจำกัดได้ช้าลง รูปที่ 4.32 ถึง รูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับความต้านทานกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติก ที่อายุบ่มต่าง ๆ พบว่า กำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อความเร็วคลื่นสูงขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดก็มีค่าที่สูงขึ้นด้วย และพบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามปริมาณร้อยละของเม็ดพลาสติกในส่วนผสมของคอนกรีตด้วย



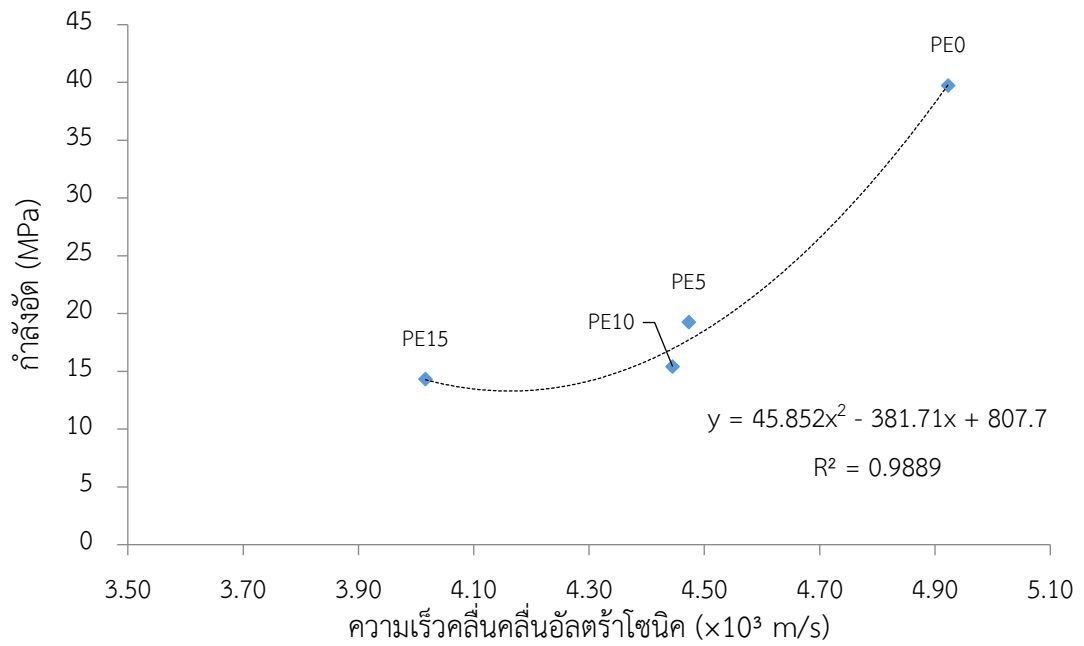
รูปที่ 4.32 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C560 - 0.4 ปมที่ 7 วัน



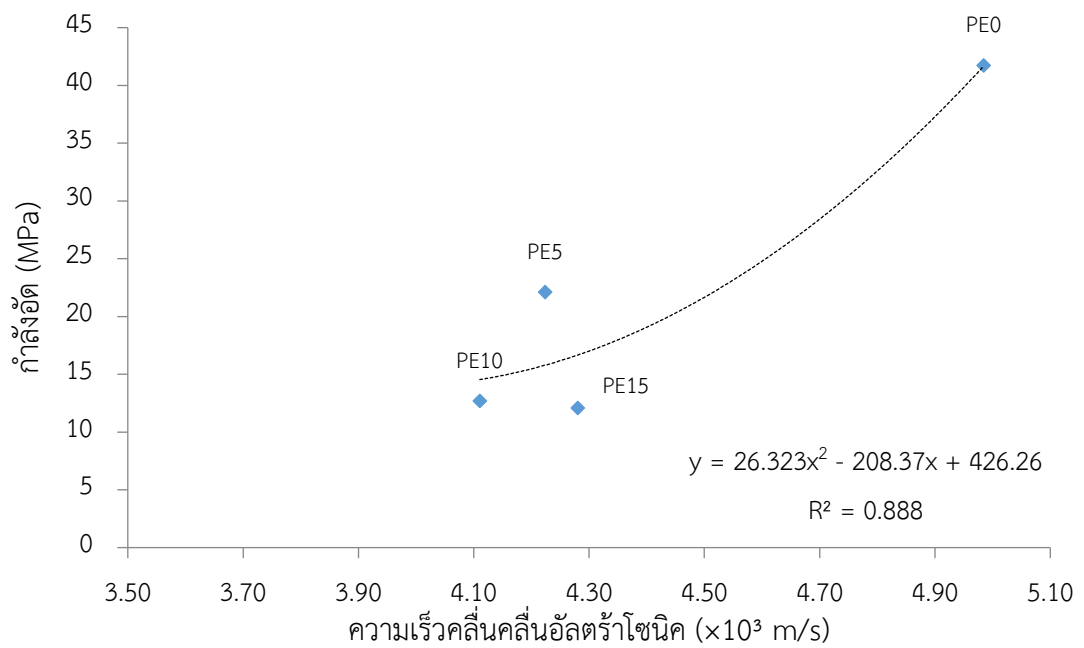
รูปที่ 4.33 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C560 - 0.4 บ่มที่ 14 วัน



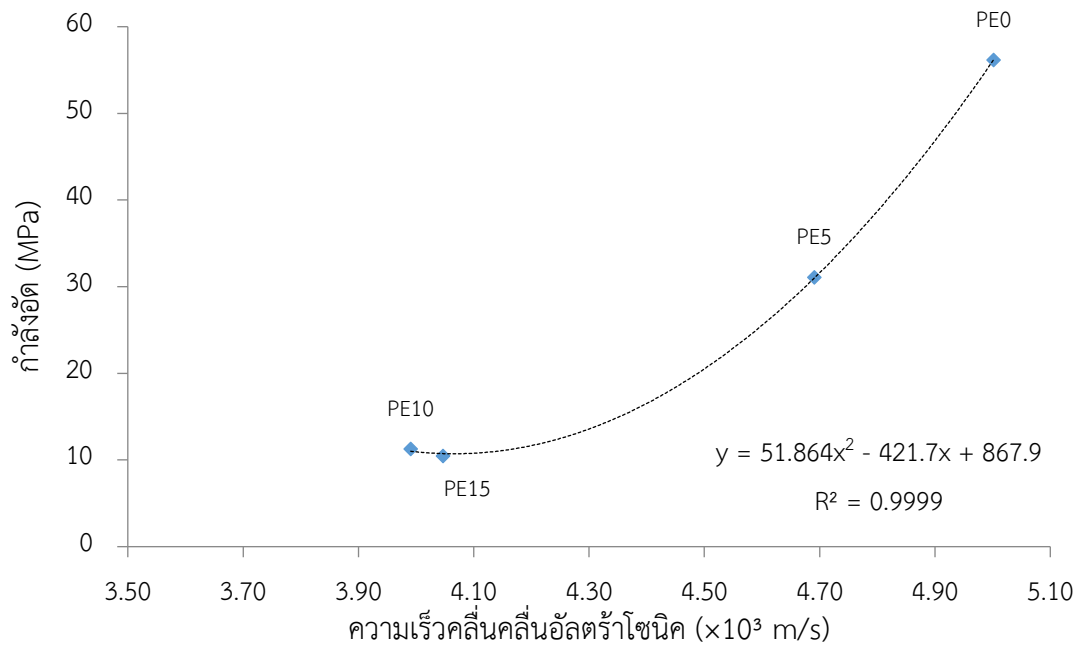
รูปที่ 4.34 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิคกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C560 - 0.4 บ่มที่ 28 วัน



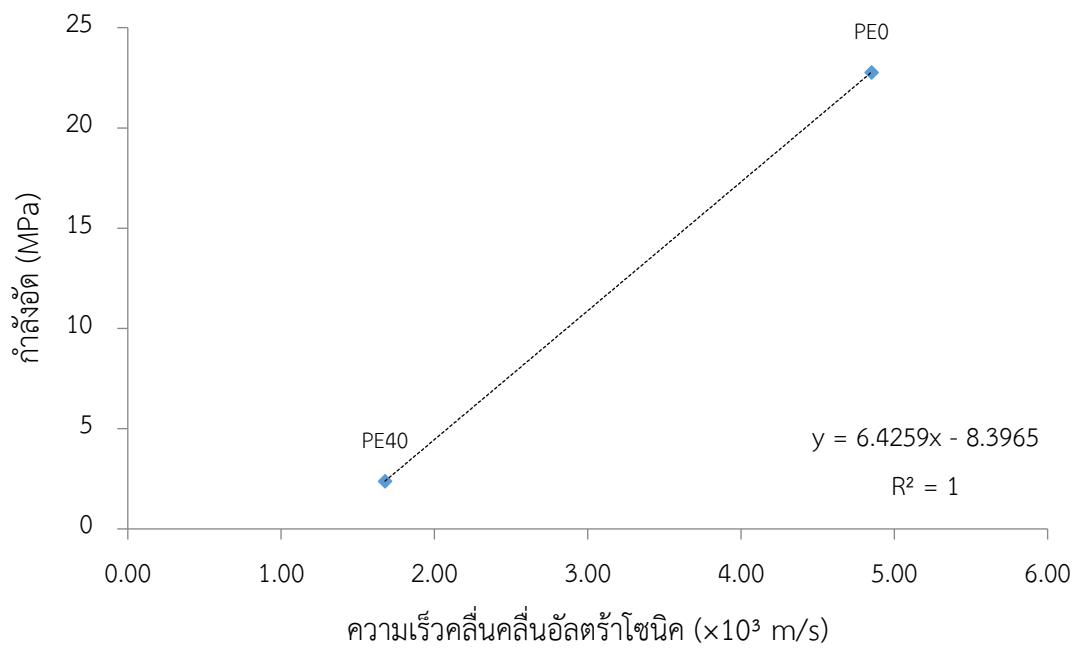
รูปที่ 4.35 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C660 - 0.4 บ่มที่ 7 วัน



รูปที่ 4.36 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C660 - 0.4 บ่มที่ 14 วัน



รูปที่ 4.37 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C660 - 0.4 บ่มที่ 28 วัน



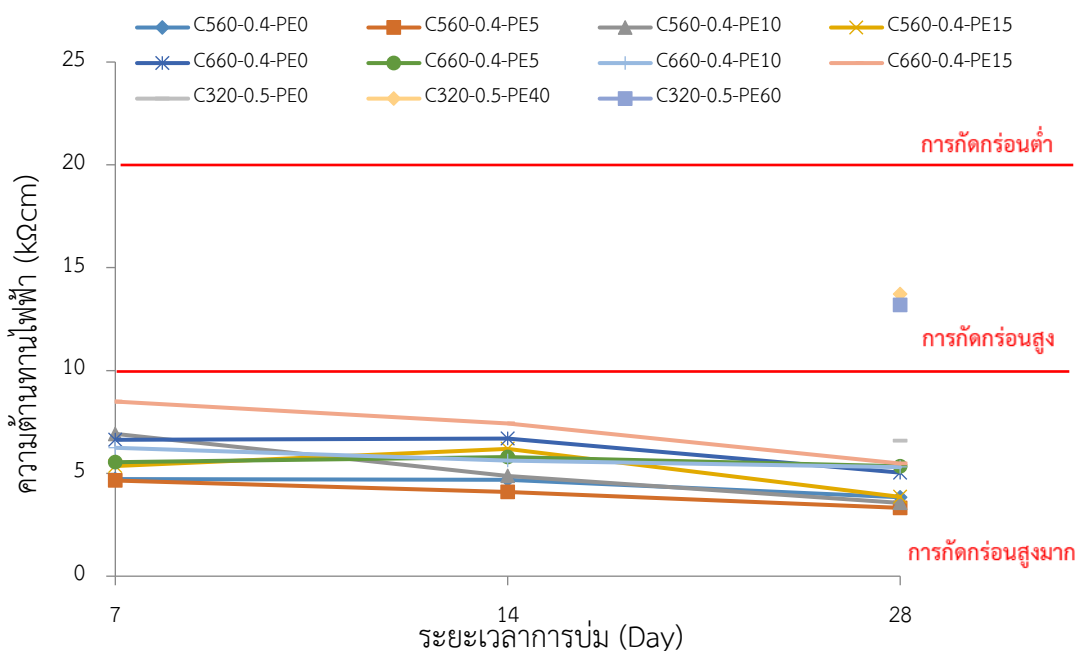
รูปที่ 4.38 ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกกับกำลังอัดคอนกรีต อัตราส่วนผสม C320 - 0.5 บ่มที่ 28 วัน

4.4.5 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล

การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ทำตามมาตรฐาน ASTM C1760 ซึ่งเป็นการตรวจวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต โดยผลจากการวัดความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตสามารถแสดงเป็นอัตราการกัดกร่อนของคอนกรีตได้ ดังนี้

- เมื่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตที่วัดได้มีค่ามากกว่า 20 kΩcm แสดงว่า มีอัตราการกัดกร่อนต่ำ
- 10 – 20 kΩcm แสดงว่า มีอัตราการกัดกร่อนต่ำ ถึง ปานกลาง
- 5 – 10 kΩcm แสดงว่า มีอัตราการกัดกร่อนสูง
- น้อยกว่า 5 kΩcm แสดงว่า มีอัตราการกัดกร่อนสูงมาก

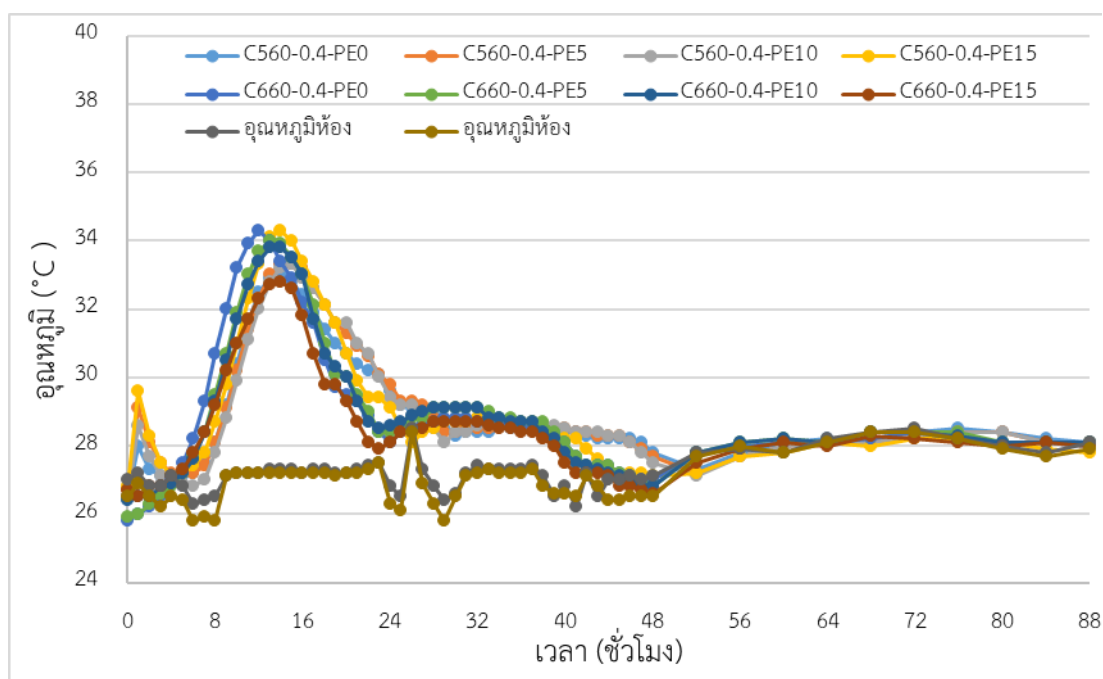
จากผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีต ดังรูปที่ 4.39 พบว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลในทุกส่วนผสมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ ซึ่งแสดงว่าคอนกรีตมีอัตราการกัดกร่อนอยู่ในเกณฑ์ที่สูงมาก เนื่องจากความพรุนที่สูงและรอยร้าวขนาดเล็กโดยรอบของเม็ดพลาสติกในส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งมีกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ความชื้นสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างเหล่านั้นได้ง่าย จึงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำนั่นเอง



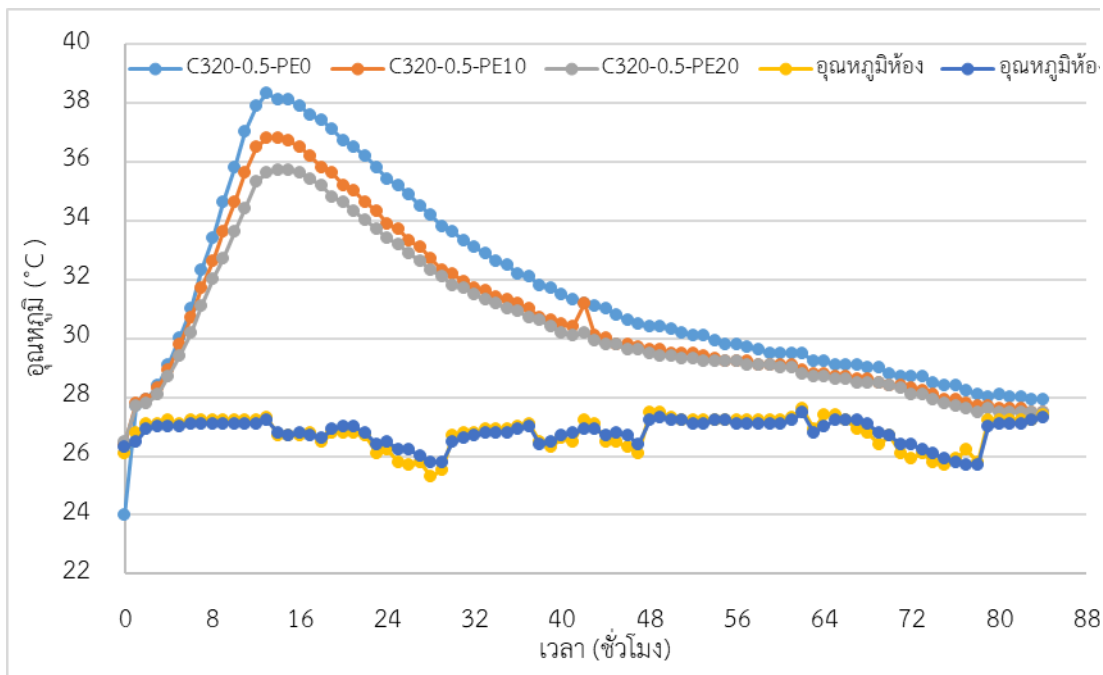
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มกับการต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก

4.4.6 ผลการทดสอบความร้อนที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิล

การทดสอบเพื่อวัดค่าความร้อนที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิล ในสภาวะกึ่งอะเดียบาติกโดยใช้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตลูกบาศก์ขนาด 20 x 20 x 20 ซม. หล่อในแบบหล่อไม้อัดหนา 10 มม. โดยภายในบุด้วยโฟมหนา 50 มม. โดยรอบ ใช้สายเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) จุ่มปลายไว้ที่จุดกึ่งกลางของก้อนคอนกรีตทดสอบ และใช้อุปกรณ์บันทึกค่าอัตโนมัติ (Data Logger) อ่านและบันทึกค่าของอุณหภูมิตั้งแต่ภายหลังการเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อแล้ว ทำการวัดค่าจนกระทั่งอุณหภูมิของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีค่าลดลงเท่ากับอุณหภูมิของห้องทดสอบ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.40 และ 4.41 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดของคอนกรีต มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิห้องประมาณ 6 ถึง 12 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาเกิดค่าสูงสุดที่เวลา 10 ถึง 14 ชั่วโมงภายหลังจากการเทคอนกรีตลงแบบหล่อ และพบว่าการใช้เม็ดพลาสติกเป็นส่วนผสมในคอนกรีต ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าที่ลดลงด้วย แสดงให้เห็นว่าการใช้เม็ดพลาสติกช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้เนื่องจากเม็ดพลาสติกเป็นวัสดุโพลีเมอร์ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำนั่นเอง



รูปที่ 4.40 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคอนกรีตของ C560 และ C660 ที่ใช้ W/C = 0.40



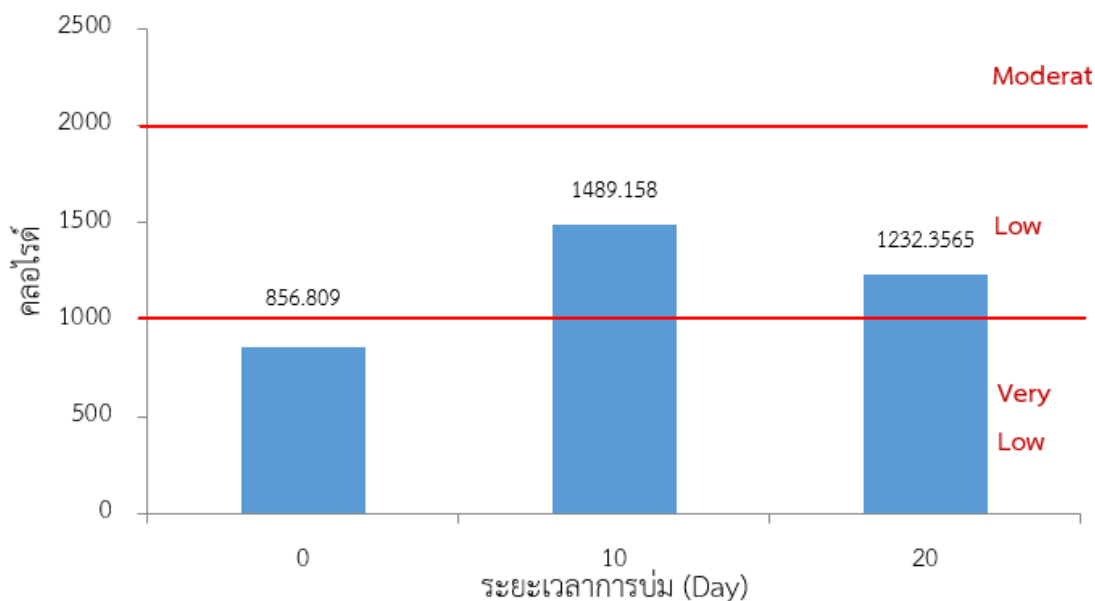
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคอนกรีตของ C320 ที่ใช้ W/C = 0.50

4.4.7 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์

การทดสอบความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ดำเนินโดยใช้การกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM. C1202 ซึ่งได้กำหนดช่วงเกณฑ์การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตในพื้นฐานการคำนวณคลออมป์ คือ

> 4,000	คลออมป์ หมายถึง การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตสูง
2,000 – 4,000	คลออมป์ หมายถึง การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตปานกลาง
1,000 – 2,000	คลออมป์ หมายถึง การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำ
100 – 1,000	คลออมป์ หมายถึง การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำมาก
< 100	คลออมป์ หมายถึง การซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตน้อยมาก

จากผลการทดสอบ ดังรูปที่ 4.4.2 พบว่า คอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลและคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล มีค่าการซึมผ่านคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ โดยอยู่ในช่วงค่าต่ำกว่า 2000 คลออมป์ แม้ว่ามีเม็ดพลาสติกผสมอยู่ถึงร้อยละ 10 และ 20 ในส่วนผสมของคอนกรีต ส่วนคอนกรีตที่ไม่ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลจัดอยู่ในช่วงการซึมผ่านของคลอไรด์ที่ต่ำมาก เนื่องจากมีค่าที่ต่ำกว่า 100 คลออมป์ อย่างไรก็ตาม ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถนำเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตเพื่อต้านทานคลอไรด์



รูปที่ 4.42 ค่าความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล

4.5 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลใช้วิธีเชิงพันธุกรรม

หน่วยน้ำหนักที่อายุป่ม 28 วันของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่ทุกอัตราส่วนผสม แสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าหน่วยน้ำหนักที่อายุป่ม 28 วันของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลเพิ่มขึ้น เนื่องจากหน่วยน้ำหนักของเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลมีค่าต่ำที่สุด เมื่อนำผลทดสอบทั้งหมดมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่ทุกอัตราส่วนผสม และอายุป่มเท่ากับ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.43 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลและหน่วยน้ำหนักมีลักษณะสมการเชิงเส้น ค่าหน่วยน้ำหนักอายุป่ม 28 วัน ของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่ทุกอัตราส่วนผสม และปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการที่ 4.1

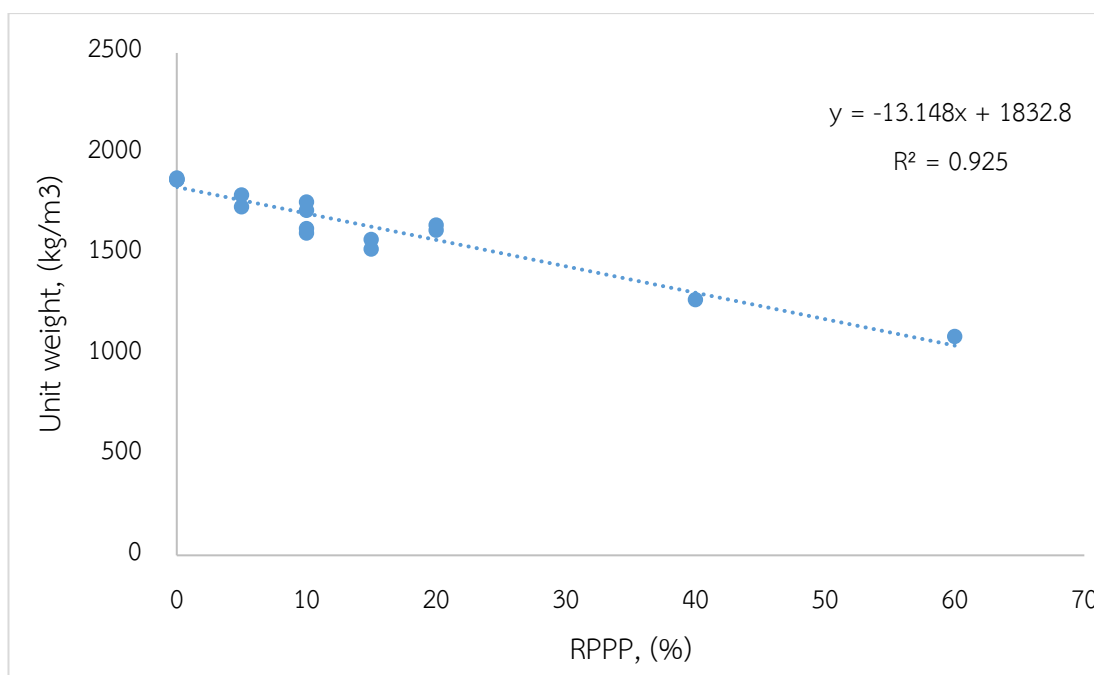
$$\gamma_{28day} = -13.148RPPP + 1832.8 \quad (4.1)$$

เมื่อ γ_{28day} คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่อายุป่มเท่ากับ 28 วัน
 $RPPP$ คือ ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล (ร้อยละ)

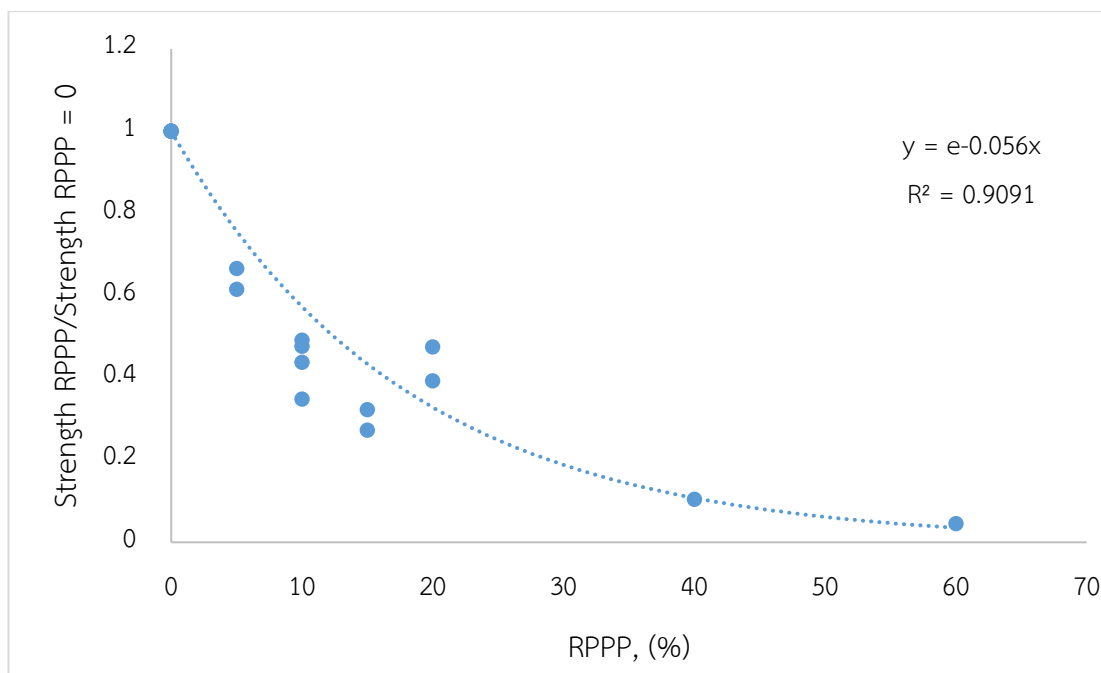
รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลและกำลังอัดที่ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลต่าง ๆ ต่อกำลังอัดที่ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลเท่ากับร้อยละ 0 ($Strength_{RPPP}/Strength_{RPPP=0}$) ของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลที่ทุกอัตราส่วนผสม และอายุบ่มเท่ากับ 28 วัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลและค่า $Strength_{RPPP}/Strength_{RPPP=0}$ มีลักษณะไม่เชิงเส้นที่ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลระหว่างร้อยละ 0 5 10 15 20 40 และ 60 จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ค่า $Strength_{RPPP}/Strength_{RPPP=0}$ ของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลสามารถคำนวณได้จากสมการเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential equation) ดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$\frac{Strength_{RPPP}}{Strength_{RPPP=0}} = e^{(-0.056RPPP)} \quad (4.2)$$

เมื่อ $Strength_{RPPP}$ คือ ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ที่ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลต่าง ๆ
 $Strength_{RPPP=0}$ คือ กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ที่ปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลร้อยละ 0



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลที่ทุกอัตราส่วนผสม และอายุบ่มเท่ากับ 28 วัน



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลและ $\text{Strength}_{\text{RPPP}}/\text{Strength}_{\text{RPPP}=0}$ ของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลที่ทุกอัตราส่วนผสม และอายุบ่มเท่ากับ 28 วัน

การหาคำตอบ (Solving Algorithms) โมเดลปัญหาที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ได้ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และได้เลือกใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithm (GA) โดยโปรแกรมสำเร็จรูปคือ Evolver™ ของบริษัท Palisade Corp. ขั้นตอนการใช้งาน Evolver คล้ายคลึงกับโปรแกรม Solver ซึ่งเริ่มจากการกำหนด ส่วนประกอบหลักของโมเดลดังนี้

ส่วนข้อมูลคือหน่วยน้ำหนักจากสมการที่ 4.1 กำลังอัดจากสมการที่ 4.2 ต้นทุน และอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ฟังก์ชันข้อจำกัดกำหนดขอบเขตบนและล่าง ซึ่งจะกำหนดให้น้อยกว่าหรือเท่ากับขอบเขตบนล่างของปริมาณเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะกำหนดให้เป็นแบบ Minimization เพื่อหาคำตอบผลรวมของต้นทุนรวมน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับ GA เพื่อนำไปใช้ในการหาคำตอบของแบบจำลอง เงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime) ที่เหมาะสมกำหนดให้ใช้เป็นร้อยละการปรับปรุงที่ดีขึ้นของคำตอบ เท่ากับ ร้อยละ 0.1 ภายในการลองผิดลองถูก เท่ากับ 2,500 รอบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ การลองผิดลองถูกเท่ากับ 20,000 รอบต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด

ตาราง 4.11 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ GA

Item	Parameter
Optimization Goal	Minimum
Constraints	Hard
Population Size	50
Random Number	Automatic
Crossover rate	0.5
Mutation rate	0.1
Trials	2,500

เมื่อประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลที่หน่วยน้ำหนักต่าง ๆ พบว่าต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลมีค่าเพิ่มขึ้นตามหน่วยน้ำหนักที่ลดลง จากหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1793 ถึง 1097 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลมีค่าเพิ่มประมาณร้อยละ 73.87 ต้นทุนการผลิตคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2567.53 บาท ที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 320 kg, มวลรวมละเอียดเท่ากับ 352 kg, มวลรวมหยาบเท่ากับ 1200 kg, และปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซเคลเท่ากับ 448 kg ซึ่งมีค่าหน่วยน้ำหนัก และกำลังอัดเท่ากับ 1097 kg/m^3 และ 1.02 MPa ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.12

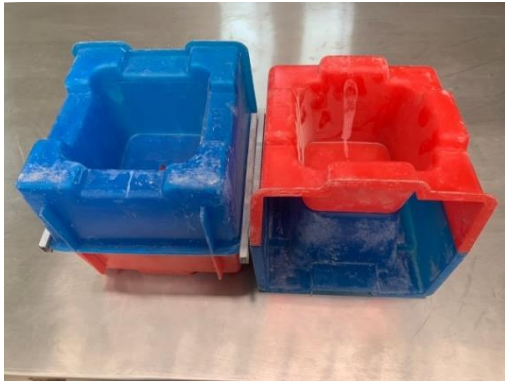
ตาราง 4.12 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลใช้วิธีเชิงพันธุกรรมที่หน่วยน้ำหนักต่าง ๆ

GA		Cement	Fine aggregate	RPPP	Coarse aggregate	SP	w/c	Total cost
Unit weight	strength							
1793	19.92	320	776	24	1200	0	0.5	1476.73
1688	12.73	320	712.00	88	1200	0	0.5	1641.38
1596	8.6	320	656	144	1200	0	0.5	1785.45
1491	5.49	320	592	208	1200	0	0.5	1950.1
1399	3.71	320	536	264	1200	0	0.5	2094.16
1294	2.37	320	472	328	1200	0	0.5	2258.81
1189	1.52	320	408	392	1200	0	0.5	2423.46
1097	1.02	320	352	448	1200	0	0.5	2567.53

4.6 การใช้ประโยชน์จากคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก

4.6.1 อิฐบล็อก นาโน

อิฐบล็อก นาโน เป็นบล็อกสำเร็จรูปที่มีขายอยู่ในท้องตลาด เป็นบล็อกที่ถูกออกแบบเป็นระบบการก่อสร้างแบบโมดูลาร์ ตัวบล็อก นาโน จะมี 2 แบบ คือ แบบที่ถูกออกแบบให้มีช่องว่างภายในบล็อก 1 ช่อง และ 2 ช่อง ดังแสดงในรูป 4.45 และสามารถติดตั้งได้หลากหลายรูปแบบดังรูปที่ 4.46 เพื่อให้เหมาะกับงานก่อสร้าง ซึ่งทางผู้วิจัยได้นำอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมาผลิตเป็นชิ้นส่วนอิฐบล็อก นาโน เพื่อให้อิฐบล็อก นาโน มีน้ำหนักที่เบาขึ้น เพื่อเป็นการพัฒนาอิฐบล็อกนาโนให้ตรงตามความต้องการของตลาดในปัจจุบันที่มีปัญหา เรื่องการขาดแคลนแรงงาน ขาดฝีมือในการก่อสร้าง และจากที่ได้นำอัตราส่วนผสมของมอร์ต้าผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมาผลิตอิฐบล็อก พบว่า อิฐบล็อกนาโนมีพื้นผิวเรียบ ผิวมันวาวสวย และอิฐบล็อกนาโนมีช่องภายใน 1 ช่อง มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 5.927 kg อิฐบล็อกนาโนมีช่องภายใน 2 ช่อง มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 12.621 kg ซึ่งเมื่อนำน้ำหนักมาเปรียบเทียบกับปริมาตร สรุปได้ว่า ตัวบล็อก นาโน ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีน้ำหนักเบาขึ้น



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.45 ลักษณะอิฐบล็อก นาโน



(ก)



(ข)



(ค)

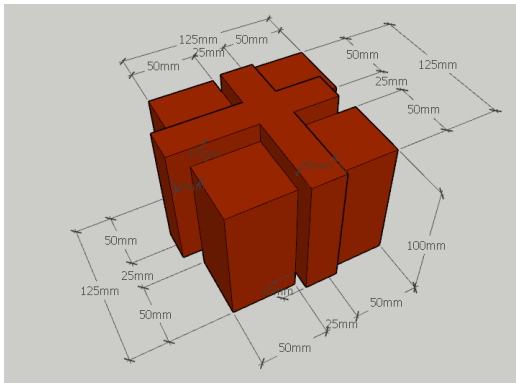


(ง)

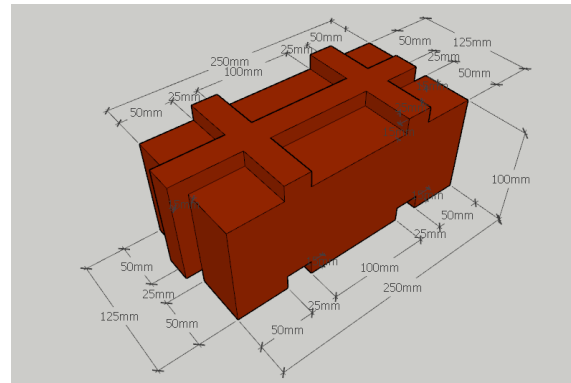
รูปที่ 4.46 ตัวอย่างการติดตั้งบล็อกนาโนในลักษณะต่าง ๆ

4.6.2 อิฐบล็อก STUR

อิฐบล็อก STUR เป็นอิฐบล็อกที่ผู้วิจัยได้ออกแบบขึ้นมาเอง โดยมีต้นแบบของบล็อก ดังรูปที่ 4.47 และมีลักษณะการติดตั้งบล็อก STUR ในรูปแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.48 ซึ่งตอนนี้กำลังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา จากรูปที่ 4.49 พบว่า พิมพ์อิฐบล็อก STUR มีช่องเพื่อเทคอนกรีตค่อนข้างเล็กมาก ทำให้ยากต่อการทำงาน และแกะพิมพ์แม่แบบไม่ออกเมื่อคอนกรีตเกิดการแข็งตัว จึงพัฒนาเป็นครั้งที่ 2 ได้ทำการเปิดช่องเทคอนกรีตให้กว้างกว่าเดิมเพื่อง่ายต่อการเท แต่เมื่อถอดแบบแม่พิมพ์อิฐบล็อก STUR ออก พบว่า ถอดออกค่อนข้างยาก เนื่องจากอิฐบล็อก STUR ที่ออกแบบมามีเหลี่ยมทำมุม 90 องศา ทำให้เกิดการยึดของคอนกรีตกับแบบ และเมื่อนำอิฐบล็อก STUR มาวางซ้อนกันพบว่าไม่สามารถวางให้ลงล็อก ดังรูปที่ 4.50 และอิฐบล็อก STUR มีน้ำหนักถึง 7.274 kg เนื่องจากอิฐบล็อก STUR ไม่มีช่องว่างภายในเลย จึงได้พัฒนาต่อเป็นครั้งที่ 3 ซึ่งได้แก้ไขอิฐบล็อก STUR ให้สามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น โดยทำมุมให้มีเป็นมุมป้านมากขึ้น ผลที่ได้คืออิฐบล็อก STUR สามารถซ้อนกันได้ดีขึ้น และได้พัฒนาโดยทำให้เกิดช่องว่างภายในอิฐบล็อก STUR เป็น 2 รูป ทำให้น้ำหนักลดลงเหลือ 7.205 ซึ่งน้ำหนักที่ได้ไม่ต่างจากการพัฒนาในครั้งที่สองเท่าใด จึงทำให้อิฐบล็อก STUR มีช่องว่างภายในที่กว้างขึ้น ดังรูปที่ 4.51 พบว่าน้ำหนักลดลงเหลือ 4.288 kg และเมื่อนำอิฐบล็อก STUR มาผสมรวมกันเพื่อติดตั้งได้ดังรูปที่ 4.52 และทางผู้วิจัยจะพัฒนาอิฐบล็อก STUR ต่อไปจนกว่าจะบรรลุเป้าหมาย เพื่อให้อิฐบล็อก STUR ตรงตามความต้องการในท้องตลาดอย่างสูงสุด

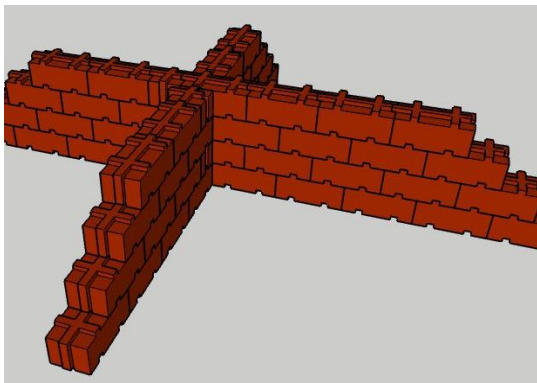


(ก)

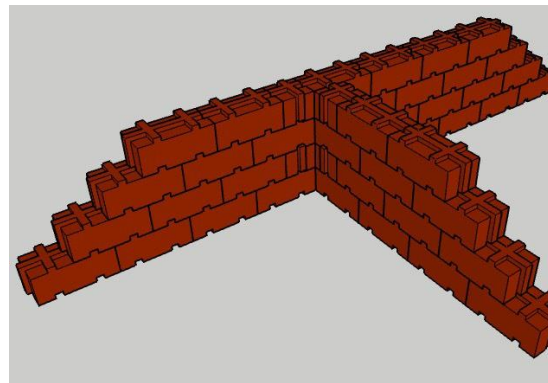


(ข)

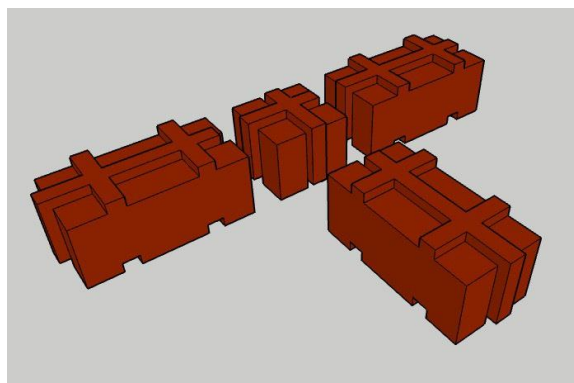
รูปที่ 4.47 ต้นแบบอิฐบล็อก STUR



(ก)

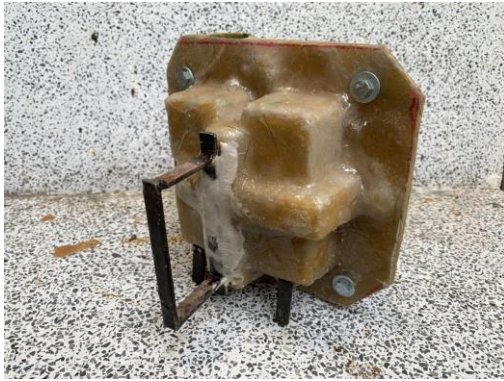


(ข)



(ค)

รูปที่ 4.48 แบบจำลองลักษณะการติดตั้งอิฐบล็อก STUR ในรูปแบบต่าง ๆ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.49 ออกแบบอิฐบล็อก STUR ครั้งที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.50 ออกแบบอิฐบล็อก STUR ครั้งที่ 2



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.51 ออกแบบอิฐบล็อก STUR ครั้งที่ 3



(ก)



(ข)



(ค)



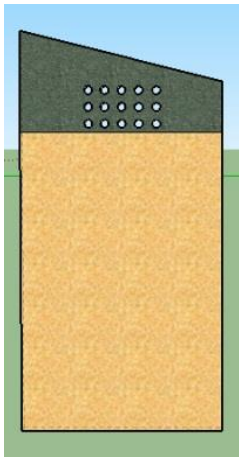
(ง)

รูปที่ 4.52 ลักษณะการติดตั้งอิฐบล็อก STUR ในรูปแบบต่าง ๆ

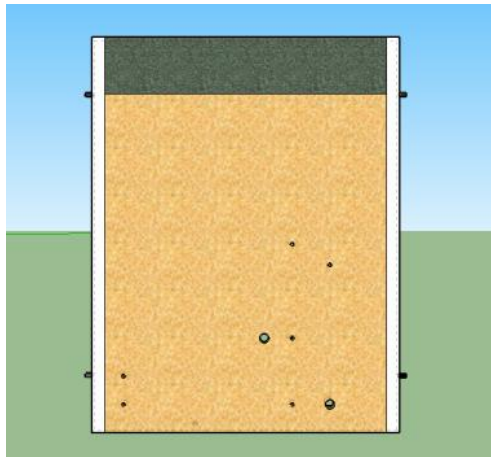
4.6.3 ชั้นส่วนสำเร็จรูป

1) การออกแบบชั้นส่วนของห้องน้ำสำเร็จรูป

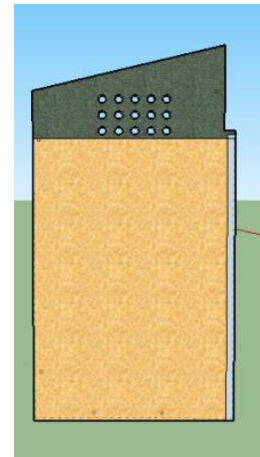
การศึกษารูปแบบและมาตรฐานต่าง ๆ ของห้องน้ำจากที่มีอยู่ในท้องตลาดและทำการปรับปรุงยุคตีให้เหมาะสมกับงานวิจัย มีรายละเอียดดังนี้ รูปแบบทางสถาปัตยกรรมของห้องน้ำขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ใช้ระบบโมดูลาร์ในการออกแบบ จึงมีขนาดกว้าง 1.50 m ยาว 1.20 m พื้นที่ห้องน้ำมีขนาด 1.80 m² ระยะจากพื้นถึงเพดานสูง 2.40 m หลังคาเพิงหมาแหงนเอียง 15 องศา มีระยะยื่นโดยรอบด้านละ 0.30 m ผนังด้านข้างออกแบบให้มีช่องระบายอากาศเพื่อให้อากาศถ่ายเทได้สะดวกและมีแสงเข้าถึงช่วยให้ห้องน้ำไม่อับชื้นและไม่เป็นที่สะสมของแบคทีเรีย ระบบประตูเลือกใช้การเปิดออกจากตัวห้องน้ำเพื่อเพิ่มพื้นที่ใช้สอยภายในและช่วยให้ผู้ใช้ห้องน้ำสามารถผลักประตูออกมาได้อย่างรวดเร็วและปลอดภัยหากเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้ตกใจอย่างเหตุแผ่นดินไหว ทั้งนี้เพื่อให้ผู้อ่านงานวิจัยมีความเข้าใจเรื่องแบบมากขึ้น จึงได้จัดทำแบบ 3 มิติ แสดงแบบจำลองชั้นส่วนของห้องน้ำสำเร็จรูปทุกชั้นส่วนดังรูปที่ 4.53 (ก-จ) และแสดงการประกอบติดตั้งห้องน้ำสำเร็จรูปที่เสร็จสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.54 (ก-ข) โดยพิจารณาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดของการศึกษานี้เลือกอัตราส่วนผสม S2.4PE1.6 เนื่องจากมีกำลังอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2547 มาผสมกับมวลรวมหยาบ จึงได้ชั้นส่วนที่เสร็จสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.55



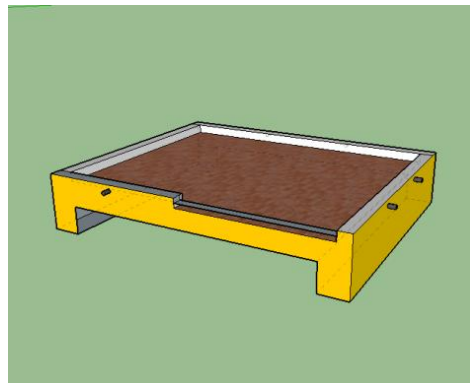
(ก)



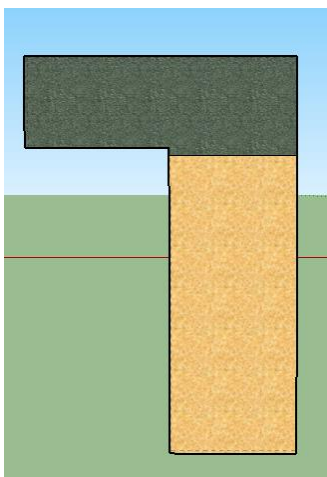
(ข)



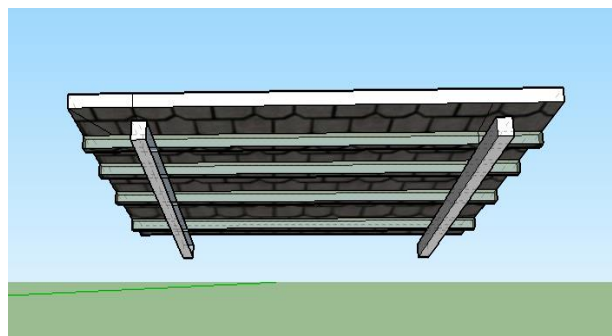
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.53 แบบจำลองชิ้นส่วนทั้งหมดของห้องน้ำสำเร็จรูป



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.54 แบบจำลองการประกอบและติดตั้งห้องน้ำสำเร็จรูป



(ก) ห้องน้ำสำเร็จรูปด้านที่ 1



(ข) ห้องน้ำสำเร็จรูปด้านที่ 2



(ค) ห้องน้ำสำเร็จรูปด้านที่ 3



(ง) ห้องน้ำสำเร็จรูปด้านที่ 4

(จ) ภายในของห้องน้ำสำเร็จรูป
รูปที่ 4.55 การประกอบและติดตั้งห้องน้ำสำเร็จรูป

2) การเปรียบเทียบต้นทุนและจุดเด่นจุดด้อยของห้องน้ำสำเร็จรูป

- การเปรียบเทียบต้นทุนของห้องน้ำสำเร็จรูป

การเปรียบเทียบต้นทุนของห้องน้ำสำเร็จรูปจะทำการเปรียบเทียบค่าวัสดุ ค่าแรง และจำนวนวันในการผลิตห้องน้ำต่อหนึ่งหลัง ซึ่งแสดงรายละเอียดดังตาราง 4.13 โดยจะเปรียบเทียบ

ห้องน้ำของงานวิจัยนี้กับห้องน้ำที่มีอยู่ในท้องตลาด พบว่า ห้องน้ำก่อกอิฐทั่วไป (อิฐมอญ) มีต้นทุนการผลิตห้องน้ำสูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าห้องน้ำสำเร็จรูปของงานวิจัยนี้ประมาณ 20,000 บาท และห้องน้ำพลาสติกมีต้นทุนการผลิตห้องน้ำต่อหนึ่งหลังน้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่าห้องน้ำสำเร็จรูปของงานวิจัยนี้ประมาณ 30,000 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับห้องน้ำก่อกอิฐทั่วไป ห้องน้ำของงานวิจัยนี้มีราคาต่ำกว่าถึง 31 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 4.13 การเปรียบเทียบต้นทุนของห้องน้ำสำเร็จรูป

ชนิดของห้องน้ำสำเร็จรูป	ต้นทุนการผลิตห้องน้ำต่อหนึ่งหลัง			เวลาในการผลิต ห้องน้ำ (Days/Unit)	หมายเหตุ
	ค่าวัสดุ (Bath)	ค่าแรง (Bath)	รวม (Bath)		
1. ห้องน้ำสำเร็จรูป (งานวิจัย)	27,000	18,000	45,000	10	-
2. ห้องน้ำก่อกอิฐทั่วไป (อิฐมอญ)	47,000	18,000	65,000	20	ได้จากการประมาณราคา ตามแบบก่อสร้างของ งานวิจัยนี้
3. ห้องน้ำสำเร็จรูป คอนกรีตเสริมเหล็ก	50,000		50,000	ไม่มีข้อมูล	ได้จากการสอบถาม บริษัท เพอร์โรกรีต พี จำกัด (081-8823729)
4. ห้องน้ำพลาสติก	15,000		15,000	ไม่มีข้อมูล	ได้จากการสอบถาม (บริษัท อีทริช จำกัด)
5. ห้องน้ำไฟเบอร์กลาส	17,500		17,500	ไม่มีข้อมูล	ได้จากการสอบถาม (บริษัท ยูนิฟายอินดัส จำกัด)
6. ห้องน้ำเหล็ก	20,000		20,000	ไม่มีข้อมูล	ได้จากการสอบถาม (บริษัท อีทริช จำกัด)
7. ห้องน้ำอะลูมิเนียม	31,500		31,500	ไม่มีข้อมูล	ได้จากการสืบค้น(บริษัท อีทริช จำกัด)

- การเปรียบเทียบจุดเด่นจุดด้อยของห้องน้ำสำเร็จรูป

การเปรียบเทียบจุดเด่นจุดด้อยของห้องน้ำสำเร็จรูปจะทำการเปรียบเทียบจุดเด่นจุดด้อย และอายุการใช้งานของห้องน้ำแต่ละชนิด ซึ่งแสดงรายละเอียดดังตาราง 4.14 โดยจะเปรียบเทียบห้องน้ำของงานวิจัยนี้กับห้องน้ำที่มีอยู่ในท้องตลาด พบว่า ห้องน้ำก่อกอิฐทั่วไป (อิฐมอญ) และห้องน้ำสำเร็จรูปของงานวิจัยนี้มีอายุการใช้งานมากที่สุด มีอายุการใช้งานประมาณ 50 ปี ส่วนห้องน้ำพลาสติกมีอายุการใช้งานน้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่าห้องน้ำสำเร็จรูปของงานวิจัยนี้ประมาณ

45 ปี และห้องน้ำสำเร็จรูปงานวิจัยนี้ มีน้ำหนักรวมสุขภัณฑ์น้อยกว่าห้องน้ำสำเร็จรูปคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปประมาณ 26.40 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 4.14 การเปรียบเทียบจุดเด่นจุดด้อยของห้องน้ำสำเร็จรูป

ชนิดของห้องน้ำสำเร็จรูป	จุดเด่น	จุดด้อย	อายุการใช้งาน (ปี)
1. ห้องน้ำสำเร็จรูป (งานวิจัย)	1. ลดเวลาในการก่อสร้าง 2. มีน้ำหนักที่เบา โดยมีน้ำหนักรวมสุขภัณฑ์ประมาณ 1,457 กิโลกรัม 3. เป็นหนึ่งแนวทางในการช่วยแก้ไขปัญหาพลาสติก	1. จุดต่อของห้องน้ำเป็นเหล็ก ซึ่งอาจเกิดสนิมได้ง่าย	50
2. ห้องน้ำก่ออิฐทั่วไป (อิฐมอญ)	1. มีความแข็งแรงและอายุการใช้งานมาก 2. สามารถทาสีในท้องถิ่นได้	1. ใช้เวลาในการก่อสร้างนาน 2. ใช้ช่างชำนาญเฉพาะทางในการก่อสร้าง 3. เหมาะแก่การติดตั้งถาวร 4. มีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนานกว่าห้องน้ำชนิดอื่น	50
3. ห้องน้ำสำเร็จรูปคอนกรีตเสริมเหล็ก	1. ลดระยะเวลาในการก่อสร้าง 2. มีความแข็งแรงสูง	1. มีน้ำหนักที่หนักพอสมควร โดยมีน้ำหนักรวมสุขภัณฑ์ประมาณ 1,842 กิโลกรัม	25
4. ห้องน้ำพลาสติก	1. สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายเนื่องจากน้ำหนักเบา	1. มีอายุการใช้งานต่ำ 2. มีความแข็งแรงน้อย	5
5. ห้องน้ำไฟเบอร์กลาส	1. สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายเนื่องจากน้ำหนักเบา	1. มีอายุการใช้งานต่ำ 2. มีความแข็งแรงน้อย	10
6. ห้องน้ำเหล็ก	1. สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายเนื่องจากน้ำหนักเบา 2. มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง	1. เกิดสนิมได้ง่าย 2. เหมาะแก่การติดตั้งถาวร	15
7. ห้องน้ำอะลูมิเนียม	1. สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายเนื่องจากน้ำหนักเบา	1. มีความแข็งแรงน้อย 2. เหมาะแก่การติดตั้งถาวร	10

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ และคอนกรีตที่ผสมเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลในร้อยละต่าง ๆ โดยผลสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เพื่อศึกษาคุณสมบัติในสภาวะที่เป็นของเหลวและที่เป็นของแข็งของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดพลาสติกกรีไฮเซล แต่ละอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ผสมกับเม็ดพลาสติกชนิดโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) ที่ผ่านการใช้งานแล้วและนำมาหลอมเป็นเม็ดพลาสติกกรีไฮเซล เมื่อนำมาทดสอบหาค่าการกระจายขนาดส่วนคละของมวลรวม พบว่า เม็ดพลาสติกกรีไฮเซล มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D50) 3.20 mm มาแทนที่มวลรวมละเอียดในอัตราส่วนร้อยละ 0 20 40 60 80 และ 100 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด สำหรับอัตราส่วนผสมของคอนกรีตใช้มวลรวมหยาบที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D50) 10.40 mm ผสมกับมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วยเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลร้อยละ 0 5 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด ก่อนนำมาทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ทุกอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตใช้ระยะเวลาการบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน

5.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีไฮเซล

ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีไฮเซล เมื่อนำมาพิจารณา พบว่าการเพิ่มขึ้นของร้อยละของเม็ดพลาสติกส่งผลให้มอร์ตาร์มีการไหลแผ่ได้ดีขึ้นแต่ในทางกลับกัน หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และโมดูลัสยืดหยุ่น มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลในทุกอัตราส่วนผสม และขนาดของทรายส่งผลต่อกำลังของทราย

5.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก

5.3.1 จากผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดหาค่าการยุบตัวพิจารณาได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของเม็ดพลาสติกไม่มีผลต่อค่าการยุบตัว และการทดสอบการสูญเสียค่าการยุบตัว พิจารณาได้ว่าคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีไฮเซลมีการสูญเสียค่าการยุบตัวที่เร็วกว่า คอนกรีตที่ไม่มีส่วนผสมของ

เม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล แต่การสูญเสียค่าการยุบตัวเกิดเร็วขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล

5.3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหล พิจารณาได้ว่าเมื่อปริมาณเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลเพิ่มขึ้นการไหลแผ่ของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณซีเมนต์มากกว่า 500 kg/m^3 ลดลงแต่ในทางกลับกันค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนผสมที่มีปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า 500 kg/m^3 การไหลแผ่และความหนืดไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนควบคุม

5.3.3 ผลการทดสอบการไหลผ่านอุปสรรคที่ทดสอบโดยวิธี L-box ไม่พบรูปแบบที่ชัดเจน แต่ผลการวัดค่าการไหลผ่านอุปสรรคโดยวิธี J-ring พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเม็ดพลาสติก

5.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วผสมเม็ดพลาสติก

5.4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล พบว่ากำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงตามการเพิ่มขึ้นของร้อยละของเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ทั้งนี้พบรอยร้าวขนาดเล็กรอบเม็ดพลาสติกกระจายอยู่ทั่วหน้าตัดคอนกรีต รอยร้าวนี้เกิดจากการที่เม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลมีผิวลื่นทำให้การยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เฟลทกับเม็ดพลาสติกลดลง

5.4.2 สำหรับผลการทดสอบความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงพบว่าเมื่อปริมาณเม็ดพลาสติกมากขึ้นความสมบูรณ์ของเนื้อคอนกรีตลดลง ทำให้ความเร็วคลื่นเสียงความถี่สูงลดลงสัมพันธ์กับกำลังอัดที่มีค่าลดลงตามไปด้วย สำหรับผลทดสอบการต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลพบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $5-10 \text{ k}\Omega\text{cm}$ ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C1760 จัดว่าเป็นคอนกรีตที่มีอัตราการกักความร้อนสูง ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่ สำหรับความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เวลา 10-14 ชั่วโมง หลังจากผสมคอนกรีตแล้วเสร็จเช่นเดียวกับอัตราส่วนควบคุม แต่ค่าอุณหภูมิสูงสุดจะลดลงเมื่อปริมาณเม็ดพลาสติกมากขึ้นเนื่องจากเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ สำหรับคุณสมบัติการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ พบว่าค่าความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของทุกอัตราส่วนผสมมีค่าอยู่ระหว่าง 1,000-2,000 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C1202 จัดว่าเป็นคอนกรีตที่มีการซึมผ่านของคลอไรด์ต่ำ ในขณะที่อัตราส่วนควบคุมมีค่าต่ำกว่า 1,000 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก

5.5 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลใช้วิธีเชิงพันธุกรรม

จากการทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลโดยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithms) ที่ทำให้ผลรวมต้นทุนรวมน้อยที่สุด โดยทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับ 320 kg/m^3 เพื่อหาค่าตอบที่เหมาะสมของร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเม็ดพลาสติกกรีซเคลในช่วง 0–20 โดยใช้ค่าหน่วยน้ำหนักเป็นขอบเขตในการค้นหา ค่าตอบ พบว่าอัตราส่วนผสมเหมาะสมที่สุดของร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเม็ดพลาสติกกรีซเคลที่หน่วยน้ำหนัก 1800 kg/m^3 1700 kg/m^3 และ 1600 kg/m^3 เท่ากับร้อยละ 3 11 และ 18 ตามลำดับ และให้ค่าผลรวมต้นทุนเท่ากับ 1,476.73 1,641.38 และ 1,785 บาท ตามลำดับ และจากคำตอบดังกล่าวพบว่าการเพิ่มการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเม็ดพลาสติกกรีซเคลร้อยละ 1 จะทำให้ต้นทุนรวมเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.3 และทำให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 4.5 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มการแทนที่ที่ทำให้คอนกรีตน้ำหนักเบาลงเฉลี่ยร้อยละ 0.77

5.6 การใช้ประโยชน์จากคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติก

จากการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนของห้องน้ำสำเร็จรูปขนาดเล็กและบล็อกคอนกรีตประสานโดยใช้คอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลที่ทางผู้วิจัยได้จัดทำขึ้น สามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลเหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็กและโครงสร้างชนิดไม่รับแรงเพราะมีข้อจำกัดด้านแรงยึดเหนี่ยว การใช้ประโยชน์จากคอนกรีตผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลไม่เพียงแต่เป็นการนำพลาสติกซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ยังเป็นทางเลือกสำหรับงานก่อสร้างต้นทุนต่ำอีกด้วย

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตาราง ก.1 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์และเถ้าขยะเทศบาล

Material	Number	Material weight (g)	Volume of material (m ³)	Specific gravity of material	Average
Cement	1	64.2	20.2	3.18	3.15
	2	62.3	19.8	3.15	
	3	65.8	21.0	3.13	

ตาราง ก.2 การทดสอบหาค่าการกระจายขนาดส่วนคละของทราย

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน (mm)	น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง (g)	ร้อยละที่ค้างบนตะแกรง (%)	ร้อยละสะสมที่ค้างบนตะแกรง (%)	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)
9.5 (3/8")	0.00	0.00	0.00	100.00
4.75 (เบอร์ 4)	29.25	2.87	2.87	97.13
2.36 (เบอร์ 8)	129.29	12.70	15.57	84.43
1.18 (เบอร์ 16)	168.08	16.50	32.07	67.93
0.60 (เบอร์ 30)	164.23	22.70	54.77	45.23
0.30 (เบอร์ 50)	204.80	20.11	74.88	25.12
0.15 (เบอร์ 100)	172.72	16.96	91.84	8.16
< 0.15 (ถาดรอง)	83.08	8.16	100.00	0
น้ำหนักรวม	1018.39	100	-	-

ตาราง ก.3 การทดสอบหาค่ากระจายขนาดส่วนคละของหิน

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน (mm)	น้ำหนักที่ค้าง บนตะแกรง (g)	ร้อยละที่ค้าง บนตะแกรง (%)	ร้อยละสะสมที่ค้าง บนตะแกรง (%)	ร้อยละสะสมที่ผ่าน ตะแกรง (%)
25.4 (1")	0.00	0.00	0.00	100.00
19.0 (3/4")	173.65	8.88	8.88	91.12
12.7 (1/2")	922.72	47.19	56.07	43.93
9.5 (3/8")	435.64	22.27	78.34	21.66
4.75 (เบอร์ 4) (ถาดรอง)	391.22 32.21	20.01 1.65	98.35 100.00	1.65 0.00
น้ำหนักรวม	1955.44	100	-	-

ตาราง ก.4 การทดสอบหาค่ากระจายขนาดส่วนคละของเม็ดพลาสติกรีไซเคิล

ขนาดตะแกรงมาตรฐาน (mm)	น้ำหนักที่ค้าง บนตะแกรง (g)	ร้อยละที่ค้าง บนตะแกรง (%)	ร้อยละสะสมที่ค้าง บนตะแกรง (%)	ร้อยละสะสมที่ผ่าน ตะแกรง (%)
9.5 (3/8")	0.00	0.00	0.00	100.00
4.75 (เบอร์ 4)	0.00	0.00	0.00	100.00
2.36 (เบอร์ 8)	448.04	88.72	88.72	11.28
1.18 (เบอร์ 16)	56.95	11.28	100.00	0.00
0.60 (เบอร์ 30)	0.00	0.00	100.00	0.00
0.30 (เบอร์ 50)	0.00	0.00	100.00	0.00
0.15 (เบอร์ 100) ถาดรอง	0.00 0.00	0.00 0.00	100.00 100.00	0.00 0.00
น้ำหนักรวม	504.99	100	-	-

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงคุณสมบัติของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิล

ตาราง ข.1 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลือบของอัตราส่วนผสมS4.0PE0.0

อายุ การ บ่ม (Day)	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ต้าร์			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก ของ มอร์ต้าร์ (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	กำลังอัด สูงสุดของ มอร์ต้าร์ (ksc)	กำลังอัด สูงสุด เฉลี่ย (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (g/m ³)
		(cm)	(cm)	(cm)						
3	1	5.30	5.20	5.00	137.8	293.24	291.89	257.479	252.475	2.128
	2	5.30	5.20	5.20	143.3	299.48		240.571		2.090
	3	5.20	5.10	5.00	132.6	282.94		219.375		2.134
7	1	5.00	5.10	5.20	132.6	298.62	296.22	247.231	253.532	2.252
	2	5.00	5.10	5.10	130.1	287.42		252.612		2.292
	3	5.20	5.30	5.30	146.1	302.62		260.753		2.071
14	1	5.00	5.00	5.30	132.5	304.57	305.33	291.532	277.012	2.299
	2	5.20	5.30	5.30	146.1	305.83		263.264		2.093
	3	5.20	5.20	5.30	143.3	305.58		276.241		2.132
28	1	5.10	5.18	5.20	137.4	295.42	294.01	385.813	360.857	2.150
	2	5.20	5.10	5.10	134.0	297.45		388.010		2.220
	3	5.20	5.20	5.10	136.8	289.16		308.747		2.114

ตาราง ข.2 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิลของอัตราส่วนผสม S3.5PE0.0

อายุการ บ่ม (Day)	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ต้าร์			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	กำลังอัด สูงสุดของ ของมอร์ต้าร์ (ksc)	กำลังอัด สูงสุด เฉลี่ย (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (g/m ³)
		(cm)	(cm)	(cm)						
3	1	5.14	5.11	5.29	138.944	109.44	105.603	17.620	14.870	0.788
	2	5.12	5.11	5.32	139.188	107.39		14.221		0.772
	3	5.12	5.13	5.25	137.894	99.98		12.768		0.725
7	1	5.27	5.09	5.1	136.804	100.58	105.537	15.885	14.544	0.735
	2	5.14	5.09	5.16	134.999	110.17		14.923		0.816
	3	5.12	5.34	5.08	138.891	105.86		12.826		0.762
14	1	5.23	5.33	5.13	143.003	108.35	107.767	13.603	13.626	0.758
	2	5.15	5.33	5.15	141.365	104.83		13.740		0.742
	3	5.11	5.38	5.15	141.583	110.12		13.534		0.778
28	1	5.11	5.29	5.15	139.214	106.87	108.010	14.443	14.334	0.768
	2	5.16	5.29	5.28	144.125	112.72		15.162		0.782
	3	5.12	5.29	5.1	138.132	104.44		13.398		0.756

ตาราง ข.3 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลือบของอัตราส่วนผสม S3.2PE0.8

อายุ การ บ่ม (Day)	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ตาร์			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก ของ มอร์ตาร์ (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	กำลังอัด สูงสุดของ มอร์ตาร์ (ksc)	กำลังอัด สูงสุด เฉลี่ย (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (g/m ³)
		5.10	5.00	5.10						
3	1	5.10	5.00	5.10	130.1	247.51	254.03	117.386	130.865	1.903
	2	5.20	5.10	5.10	135.3	267.00		126.022		1.973
	3	5.10	5.00	5.00	127.5	247.57		149.187		1.942
7	1	5.10	5.00	5.00	127.5	240.13	258.69	146.829	139.239	1.883
	2	5.20	5.10	5.10	135.3	271.63		169.594		2.008
	3	5.20	5.20	5.00	135.2	264.30		101.289		1.955
14	1	5.10	5.00	5.20	132.6	266.25	258.76	141.182	144.151	2.008
	2	5.00	5.10	5.00	127.5	251.99		138.946		1.976
	3	5.00	5.00	5.00	125.0	258.04		152.326		2.064
28	1	5.18	5.24	5.22	141.7	255.71	249.36	141.040	147.730	1.805
	2	5.22	5.24	5.13	140.3	247.65		147.813		1.765
	3	5.13	5.13	5.17	136.1	244.71		154.337		1.772

ตาราง ข.4 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลของอัตราส่วนผสม S2.8PE0.7

อายุ การ บ่ม (Day)	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ต้าร์			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	กำลังอัดสูงสุด ของ มอร์ต้าร์ (ksc)	กำลังอัด สูงสุด เฉลี่ย (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (g/m ³)
		(cm)	(cm)	(cm)						
3	1	5.14	5.17	5.16	137.121	238.00	239.000	119.6828515	119.778	1.736
	2	5.15	5.17	5.14	136.855	240.00		122.3984337		1.754
	3	5.13	5.14	5.2	137.115	239.00		117.252719		1.743
7	1	5.1	5.09	5.22	135.506	237.00	237.333	122.8707759	125.336	1.749
	2	5.11	5.09	5.11	132.911	236.00		129.449652		1.776
	3	5.12	5.13	5.21	136.844	239.00		123.6874778		1.747
14	1	5.05	5.11	5.18	133.672	233.34	234.227	129.6968071	132.051	1.746
	2	5.14	5.05	5.15	133.679	235.14		133.8526752		1.759
	3	5.14	5.04	5.15	133.414	234.20		132.6033067		1.755

ตาราง ข.5 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลือบของอัตราส่วนผสม S2.4PE1.6

อายุการบ่ม (Day)	ชั้นที่	ขนาดของมอร์ตาร์ (cm)			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนักของมอร์ตาร์ (g)	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	กำลังอัดสูงสุดของมอร์ตาร์ (ksc)	กำลังอัดสูงสุดเฉลี่ย (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (g/m ³)
3	1	5.00	5.20	5.10	132.6	247.27	246.23	100.897	132.565	1.865
	2	5.20	5.0	5.10	132.6	253.33		145.651		1.911
	3	5.10	5.0	5.00	127.5	238.10		151.148		1.867
7	1	5.10	5.1	5.10	132.7	244.61	248.83	121.313	138.979	1.843
	2	5.00	5.1	5.10	130.1	249.51		150.365		1.918
	3	5.00	5.1	5.20	132.6	252.37		145.260		1.903
14	1	5.14	5.22	5.12	137.4	255.94	247.54	161.385	139.617	1.863
	2	5.14	5.10	5.08	133.2	244.23		120.665		1.834
	3	5.05	5.08	5.10	130.8	242.44		136.800		1.853
28	1	5.20	5.13	5.30	141.4	241.24	243.31	135.727	143.304	1.706
	2	5.25	5.12	5.14	138.2	245.12		146.676		1.774
	3	5.10	5.06	5.20	134.2	243.56		147.510		1.815

ตาราง ข.6 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิลของอัตราส่วนผสม S2.1PE1.4

อายุการ บ่ม (Day)	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ต้าร์			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	กำลังอัด สูงสุดของ ของมอร์ต้าร์ (ksc)	กำลังอัด สูงสุด เฉลี่ย (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (g/m ³)
		(cm)	(cm)	(cm)						
3	1	5.04	5.28	5.1	135.717	174.00	184.667	36.161	41.937	1.282
	2	5.1	5.28	5.07	136.525	185.00		39.370		1.355
	3	5.01	5.22	5.14	134.422	195.00		50.282		1.451
7	1	5.09	5.3	5.07	136.773	177.00	177.333	50.785	52.448	1.294
	2	5.13	5.3	5.12	139.208	173.00		47.052		1.243
	3	5.11	5.28	5.04	135.983	182.00		59.505		1.338
14	1	5.06	5.24	5.13	136.019	202.00	191.987	82.805	62.146	1.485
	2	5.11	5.21	5.11	136.044	180.67		46.686		1.328
	3	5.2	5.3	5.08	140.005	193.29		56.949		1.381

ตาราง ข.7 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิลของอัตราส่วนผสมS1.6PE2.4

อายุการบ่ม (Day)	ชั้นที่	ขนาดของมอร์ต้าร์ (cm)			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนักของมอร์ต้าร์ (g)	น้ำหนักเฉลี่ย (g)	กำลังอัดสูงสุดของมอร์ต้าร์ (ksc)	กำลังอัดสูงสุดเฉลี่ย (ksc)	หน่วยน้ำหนัก (g/m ³)
3	1	5.10	5.10	5.00	130.1	182.87	184.45	43.576	53.784	1.406
	2	5.00	5.10	5.10	130.1	185.95		49.072		1429
	3	5.10	5.10	5.10	132.7	184.52		68.705		1.391
7	1	5.10	5.00	5.10	130.1	185.09	194.11	63.600	63.526	1.423
	2	5.20	5.10	5.10	135.3	213.50		60.238		1.578
	3	5.00	5.00	5.10	127.5	183.74		66.740		1.441
14	1	5.07	5.25	5.30	141.1	184.98	188.41	64.043	63.764	1.311
	2	5.10	5.12	5.30	138.4	182.09		60.552		1.316
	3	5.14	5.22	5.37	144.1	198.17		66.696		1.375
28	1	5.20	5.14	5.18	138.5	189.21	187.14	60.748	60.514	1.366
	2	5.20	5.14	5.27	140.9	181.87		57.512		1.291
	3	5.17	5.10	5.04	132.9	190.35		63.283		1.432

ตาราง ข.8 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิลของอัตราส่วนผสม S1.4PE2.1

อายุการ บ่ม (Day)	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ต้าร์			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	กำลังอัด สูงสุดของ ของมอร์ต้าร์ (ksc)	กำลังอัด สูงสุด เฉลี่ย (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (g/m ³)
		(cm)	(cm)	(cm)						
3	1	5.16	5.24	5.1	137.896	147.21	145.470	28.539	27.653	1.068
	2	5.17	5.24	5.15	139.518	145.87		28.597		1.046
	3	5.15	5.32	5.1	139.730	143.33		25.821		1.026
7	1	5.15	5.32	5.18	141.922	145.35	145.297	29.802	31.453	1.024
	2	5.14	5.32	5.13	140.279	146.46		33.178		1.044
	3	5.13	5.3	5.15	140.023	144.08		31.381		1.029
14	1	5.1	5.31	5.17	140.009	162.72	164.533	34.841	36.113	1.162
	2	5.15	5.18	5.07	135.252	161.86		36.049		1.197
	3	5.1	5.32	5.13	139.187	169.02		37.450		1.214
28	1	5.22	5.39	5.12	144.055	151.83	154.010	38.042	73.068	1.054
	2	5.17	5.39	5.13	142.954	157.81		146.542		1.104
	3	5.19	5.35	5.123	142.248	152.39		34.620		1.071

ตาราง ข.9 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิลของอัตราส่วนผสมS0.8PE3.2

อายุ การ บ่ม (Day)	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ต้าร์ (cm)			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก ของ มอร์ต้าร์ (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	กำลังอัด สูงสุดของ มอร์ต้าร์ (ksc)	กำลังอัด สูงสุด เฉลี่ย (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (g/m ³)
3	1	5.10	5.00	5.00	127.5	150.81	156.49	35.474	35.000	1.183
	2	5.20	5.00	5.00	130	156.54		41.614		1.204
	3	5.20	5.10	5.10	132.3	162.12		54.177		1.225
7	1	5.20	5.10	5.10	132.3	176.63	163.38	35.937	38.674	1.350
	2	5.00	5.00	5.20	130	158.75		43.872		1.221
	3	5.10	5.00	5.00	127.5	154.76		36.214		1.214
14	1	5.20	5.20	5.23	141.4	152.16	152.50	34.645	38.643	1.076
	2	5.17	5.30	5.10	139.7	156.42		36.179		1.120
	3	5.17	5.12	5.10	135.0	148.91		45.105		1.103
28	1	5.23	5.30	5.32	147.5	155.13	154.52	42.687	41.929	1.052
	2	5.08	5.08	5.16	133.2	153.18		44.748		1.150
	3	5.10	5.15	5.11	134.2	155.25		38.352		1.157

ตาราง ข.10 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลือบของอัตราส่วนผสม S1.4PE2.1

อายุการ บ่ม	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ตาร์			ปริมาตร	น้ำหนัก	น้ำหนัก เฉลี่ย	กำลังอัด สูงสุดของ มอร์ตาร์	กำลังอัด สูงสุด	หน่วย น้ำหนัก
		(cm)	(cm)	(cm)						
3	1	5.17	5.3	5.07	138.923	117.00	115.333	13.169	13.740	0.842
	2	5.1	5.3	5.13	138.664	118.00		13.690		0.851
	3	5.1	5.08	5.08	131.613	111.00		14.361		0.843
7	1	5.12	5.14	5.09	133.953	109.14	112.210	13.092	13.050	0.815
	2	5.14	5.14	5.06	133.683	116.28		12.694		0.870
	3	5.08	5.21	5.08	134.451	111.21		13.365		0.827
14	1	5.19	5.22	5.16	139.794	129.93	125.993	28.145	28.212	0.929
	2	5.07	5.22	5.12	135.503	124.92		29.812		0.922
	3	5.07	5.23	5.13	136.028	123.13		26.680		0.905

ตาราง ข.11 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิลของอัตราส่วนผสม S0.0PE4.0

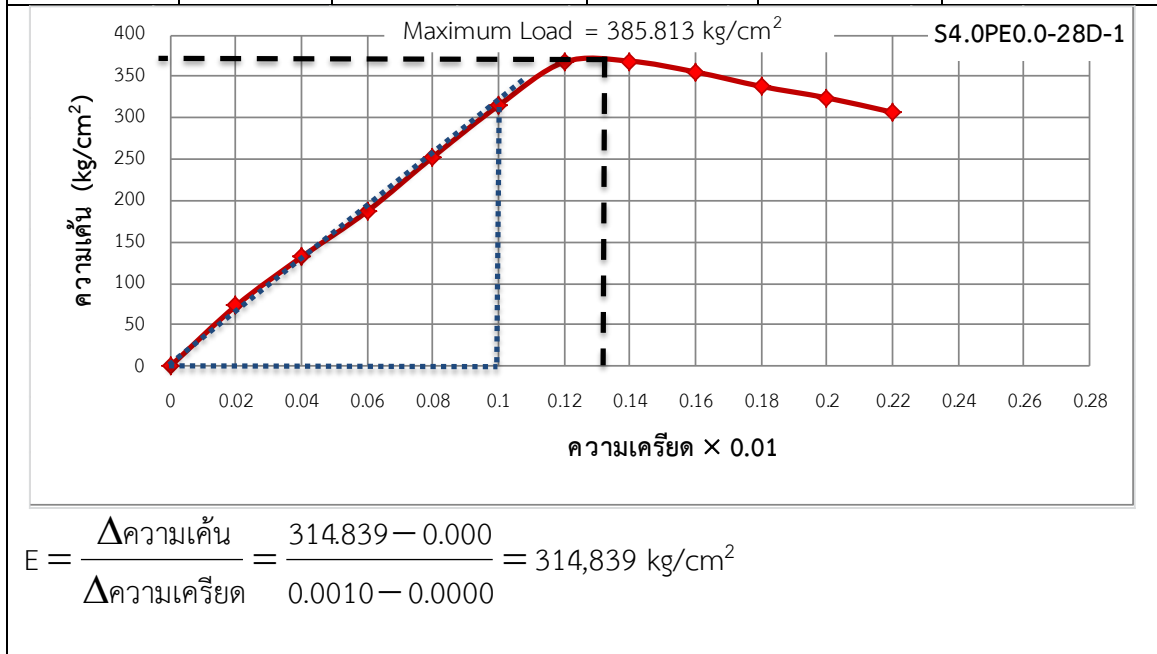
อายุ การ บ่ม (Day)	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ต้าร์			ปริมาตร (cm ³)	น้ำหนัก ของ มอร์ต้าร์ (g)	น้ำหนัก เฉลี่ย (g)	กำลังอัด สูงสุดของ มอร์ต้าร์ (ksc)	กำลังอัด สูงสุด เฉลี่ย (ksc)	หน่วย น้ำหนัก (g/m ³)
		(cm)								
3	1	5.10	5.10	5.00	130.1	146.75	132.35	31.512	30.308	1.128
	2	5.10	5.00	5.00	127.5	124.37		30.123		0.976
	3	5.00	5.00	5.00	125.0	125.92		29.290		1.007
7	1	5.10	5.14	5.20	136.3	125.75	124.02	30.225	32.005	0.923
	2	5.12	5.05	5.20	134.5	121.77		31.576		0.905
	3	5.04	5.01	5.10	128.8	124.55		34.215		0.967
14	1	5.33	5.20	5.21	144.4	134.77	133.31	35.315	32.642	0.933
	2	5.10	5.21	5.12	136.0	123.84		32.516		0.911
	3	5.29	5.30	5.24	146.9	141.33		30.096		0.962
28	1	5.09	5.11	5.10	132.7	132.36	127.61	31.041	33.184	0.997
	2	5.12	5.18	5.16	136.9	120.94		33.916		0.883
	3	5.24	5.30	5.25	145.8	129.54		34.596		0.889

ตาราง ข.12 ค่าการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลือบของอัตราส่วนผสม S0.7PE2.8

อายุ การ บ่ม	ชั้น ที่	ขนาดของมอร์ต้าร์			ปริมาตร	น้ำหนัก	น้ำหนัก เฉลี่ย	กำลังอัด สูงสุดของ	กำลังอัด สูงสุด	หน่วย น้ำหนัก
		(cm)	(cm)	(cm)						
3	1	5.14	5.11	5.29	138.944	109.44	105.603	17.620	14.870	0.788
	2	5.12	5.11	5.32	139.188	107.39		14.221		0.772
	3	5.12	5.13	5.25	137.894	99.98		12.768		0.725
7	1	5.27	5.09	5.1	136.804	100.58	105.537	15.885	14.544	0.735
	2	5.14	5.09	5.16	134.999	110.17		14.923		0.816
	3	5.12	5.34	5.08	138.891	105.86		12.826		0.762
14	1	5.23	5.33	5.13	143.003	108.35	107.767	13.603	13.626	0.758
	2	5.15	5.33	5.15	141.365	104.83		13.740		0.742
	3	5.11	5.38	5.15	141.583	110.12		13.534		0.778
28	1	5.11	5.29	5.15	139.214	106.87	108.010	14.443	14.334	0.768
	2	5.16	5.29	5.28	144.125	112.72		15.162		0.782
	3	5.12	5.29	5.1	138.132	104.44		13.398		0.756

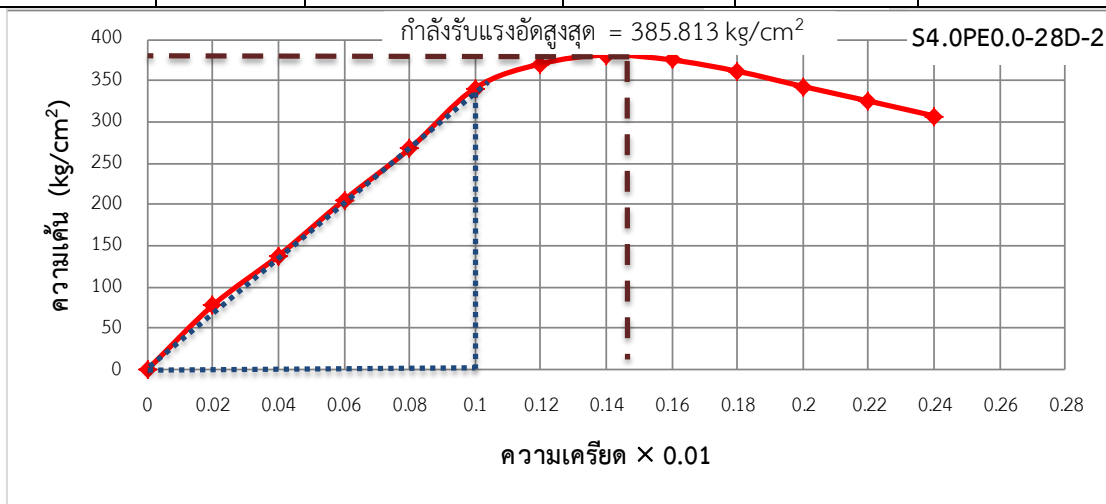
ตาราง ข.13 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วนผสม S4.0PE0.0 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 28 วัน

ระยะยวบตัว × 0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด × 0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	26.42	0.000
10	18.9	5.2	0.02	26.42	72.922
20	34.2	5.2	0.04	26.42	131.955
30	48.5	5.2	0.06	26.42	187.128
40	65.5	5.2	0.08	26.42	252.720
50	81.6	5.2	0.1	26.42	314.839
60	95.2	5.2	0.12	26.42	367.312
70	95.5	5.2	0.14	26.42	368.470
80	92.1	5.2	0.16	26.42	355.351
90	87.6	5.2	0.18	26.42	337.989
100	84	5.2	0.2	26.42	324.099
110	79.5	5.2	0.22	26.42	306.736



ตาราง ข.14 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S4.0PE0.0 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน

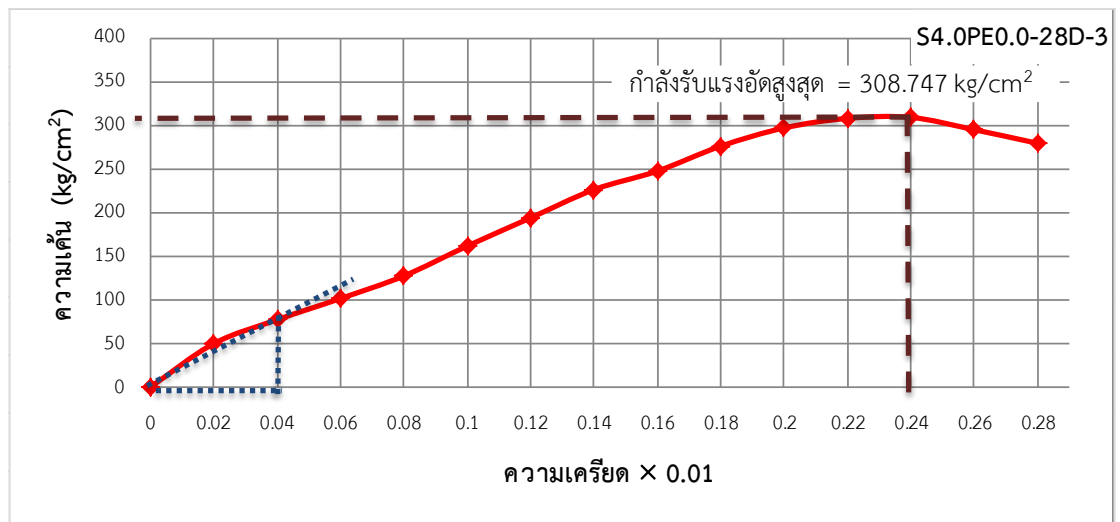
ระยะยวบตัว × 0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด × 0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.15	0	26.01	0.000
10	19.9	5.15	0.02	26.01	77.991
20	35.2	5.15	0.04	26.01	137.954
30	52.4	5.15	0.06	26.01	205.363
40	68.3	5.15	0.08	26.01	267.677
50	87	5.15	0.1	26.01	340.965
60	94.5	5.15	0.12	26.01	370.359
70	97.2	5.15	0.14	26.01	380.940
80	95.7	5.15	0.16	26.01	375.062
90	92.2	5.15	0.18	26.01	361.345
100	87.5	5.15	0.2	26.01	342.925
110	83	5.15	0.22	26.01	325.289
120	78.4	5.15	0.24	26.01	307.260



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{340.965 - 0.000}{0.0010 - 0.0000} = 340,965 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.15 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S4.0PE0.0 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 28 วัน

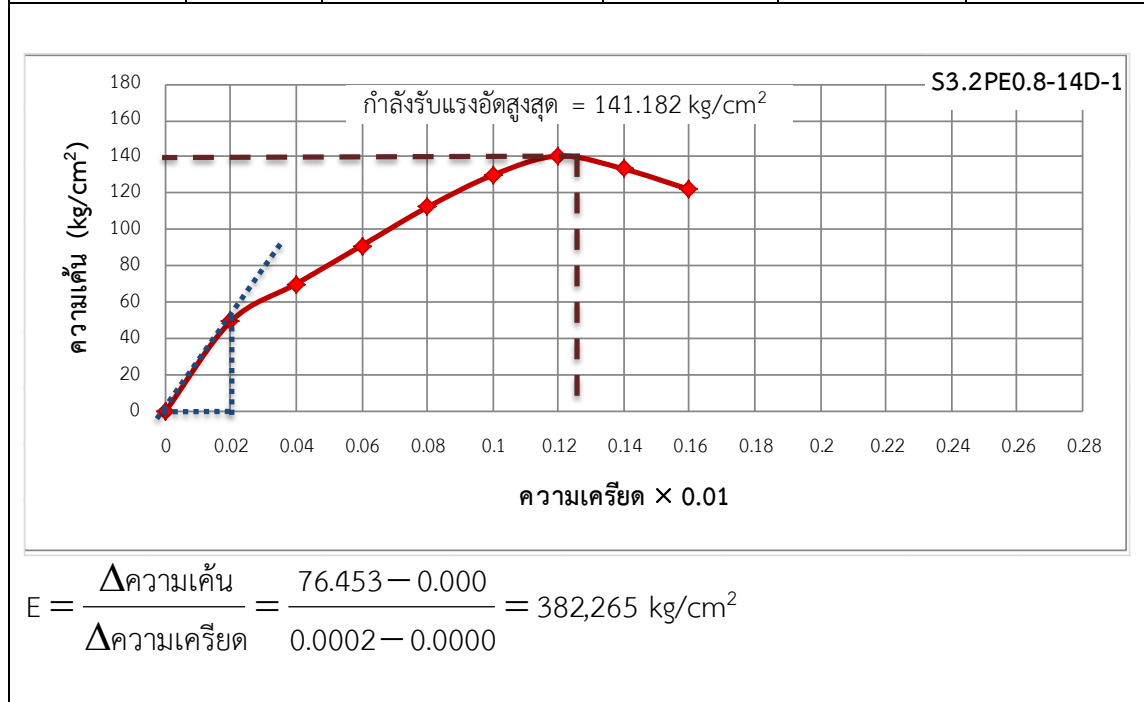
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	26.83	0.000
10	13.1	5.1	0.02	26.83	49.772
20	20.3	5.1	0.04	26.83	77.127
30	26.7	5.1	0.06	26.83	101.443
40	33.5	5.1	0.08	26.83	127.279
50	42.5	5.1	0.1	26.83	161.473
60	51	5.1	0.12	26.83	193.767
70	59.5	5.1	0.14	26.83	226.062
80	65.1	5.1	0.16	26.83	247.338
90	72.6	5.1	0.18	26.83	275.833
100	78.1	5.1	0.2	26.83	296.730
110	81	5.1	0.22	26.83	307.748



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{77.127 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 192,818 \text{ kg/cm}^2$$

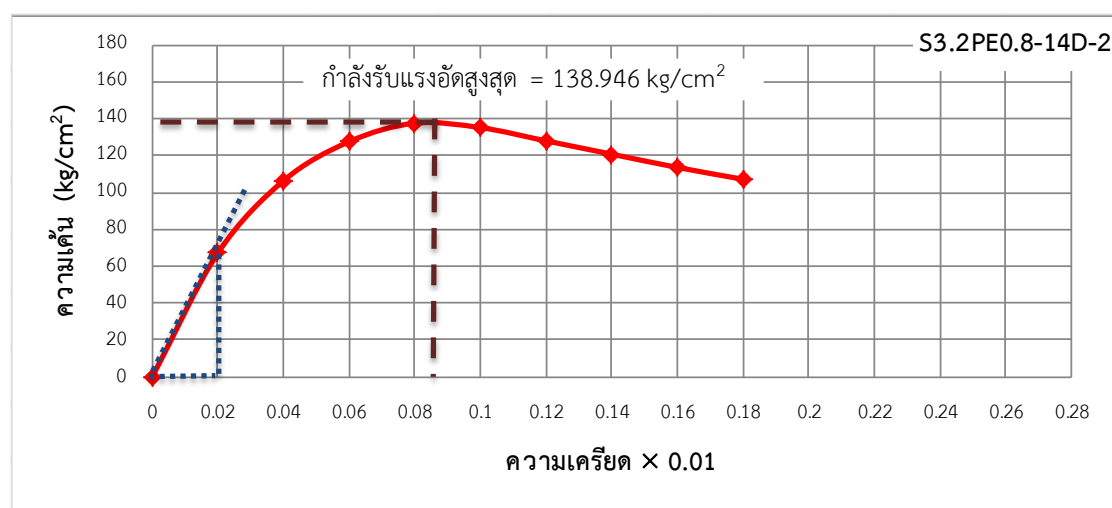
ตาราง ข.16 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S3.2PE0.8 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	26	0.000
10	19.5	5.1	0.02	26	76.453
20	29	5.1	0.04	26	113.699
30	33.7	5.1	0.06	26	132.126
40	35	5.1	0.08	26	137.223
50	35.3	5.1	0.1	26	138.399
60	33.9	5.1	0.12	26	132.910
70	32.2	5.1	0.14	26	126.245
80	30.5	5.1	0.16	26	119.580
90	28.7	5.1	0.18	26	112.523
100	27	5.1	0.2	26	105.857



ตาราง ข.17 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S3.2PE0.8 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 14 วัน

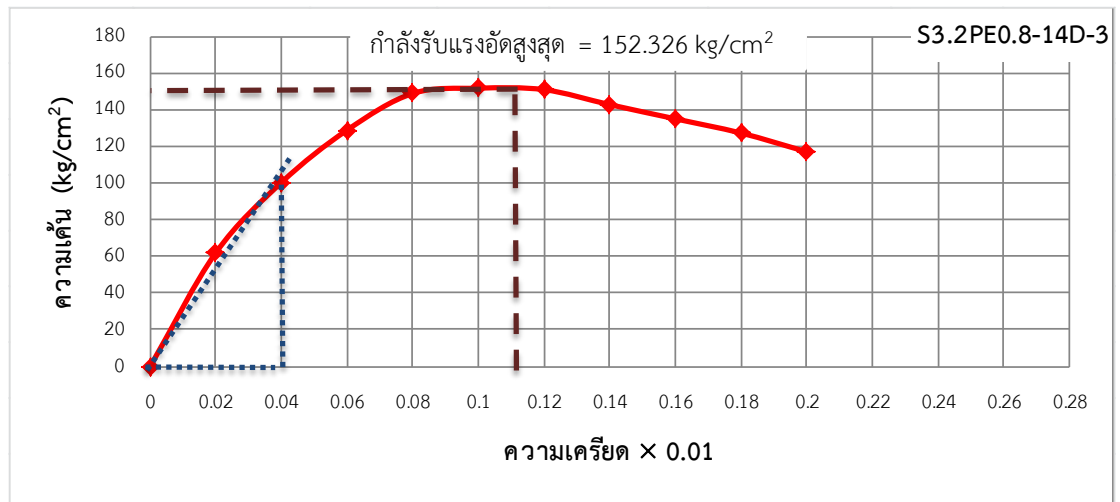
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5	0	25.5	0.000
10	16.8	5	0.02	25.5	67.158
20	26.6	5	0.04	25.5	106.334
30	31.9	5	0.06	25.5	127.521
40	34.4	5	0.08	25.5	137.515
50	33.8	5	0.1	25.5	135.116
60	32	5	0.12	25.5	127.921
70	30.2	5	0.14	25.5	120.725
80	28.4	5	0.16	25.5	113.530
90	26.8	5	0.18	25.5	107.134



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{67.158 - 0.000}{0.0002 - 0.0000} = 335,790 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.18 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S3.2PE0.8 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 14 วัน

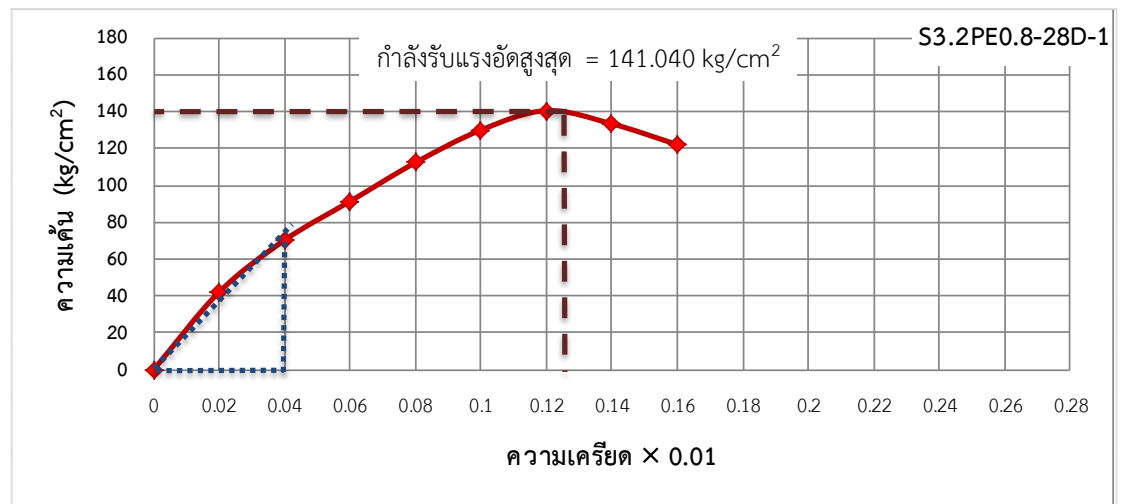
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5	0	25	0.000
0	0	5	0	25	0.000
10	15.2	5	0.02	25	61.978
20	24.6	5	0.04	25	100.306
30	31.6	5	0.06	25	128.848
40	36.5	5	0.08	25	148.828
50	37.2	5	0.1	25	151.682
60	37	5	0.12	25	150.866
70	35	5	0.14	25	142.712
80	33.1	5	0.16	25	134.964
90	31.2	5	0.18	25	127.217
100	28.7	5	0.2	25	117.023



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{100.306 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 250,765 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.19 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S3.2PE0.8 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 28 วัน

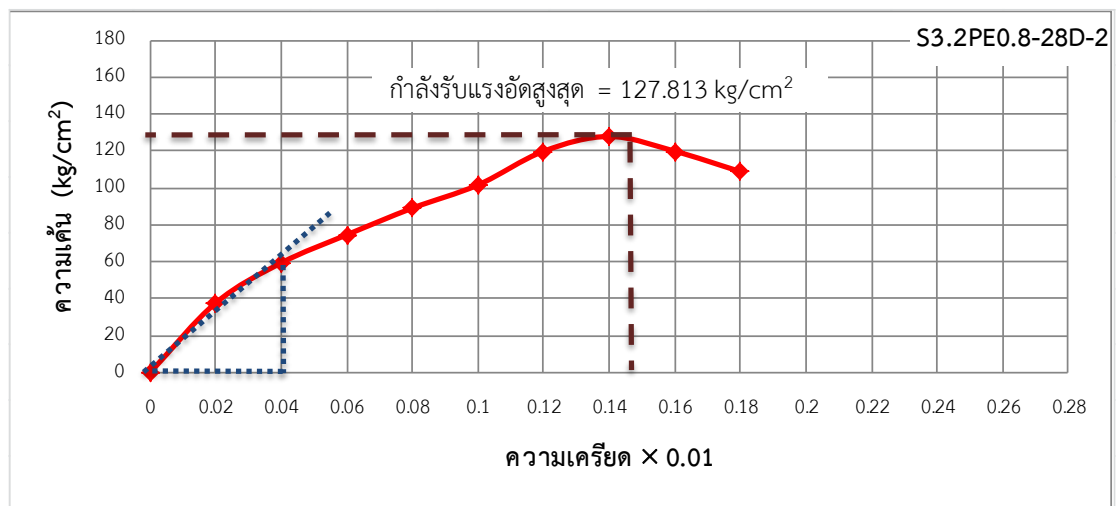
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.22	0	27.14	0.000
10	11.2	5.22	0.02	27.14	42.067
20	18.7	5.22	0.04	27.14	70.236
30	24.3	5.22	0.06	27.14	91.270
40	29.9	5.22	0.08	27.14	112.303
50	34.6	5.22	0.1	27.14	129.956
60	37.4	5.22	0.12	27.14	140.473
70	35.5	5.22	0.14	27.14	133.337
80	32.5	5.22	0.16	27.14	122.069



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{70.236 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 175,590 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.20 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้าร์อัตราส่วน S3.2PE0.8 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน

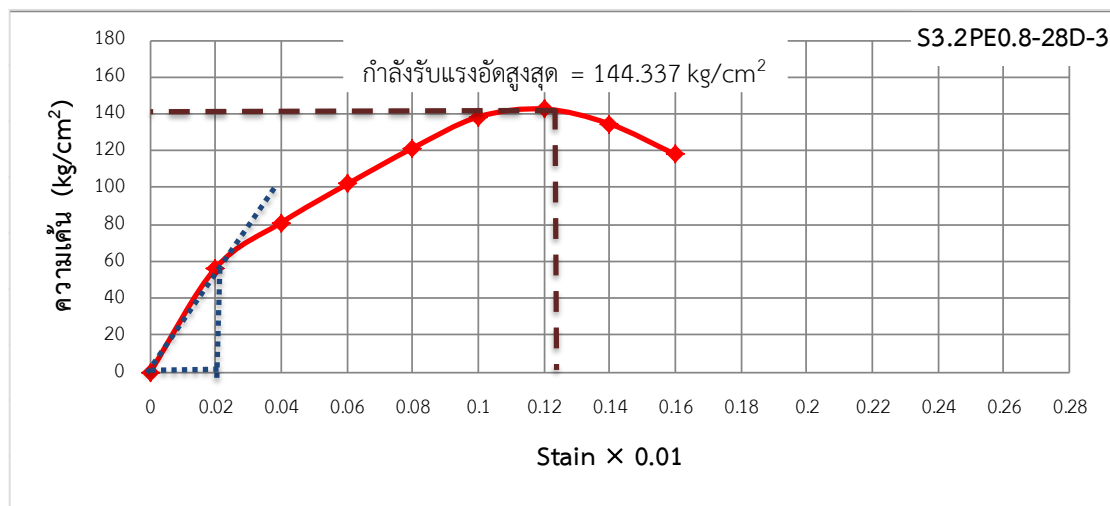
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	26.8	0.000
10	9.9	5.2	0.02	26.8	37.656
20	15.6	5.2	0.04	26.8	59.336
30	19.6	5.2	0.06	26.8	74.551
40	23.4	5.2	0.08	26.8	89.005
50	26.7	5.2	0.1	26.8	101.556
60	31.5	5.2	0.12	26.8	119.814
70	33.6	5.2	0.14	26.8	127.801
80	31.5	5.2	0.16	26.8	119.814
90	28.6	5.2	0.18	26.8	108.783



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{59.336 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 148,340 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.21 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S3.2PE0.8 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 28 วัน

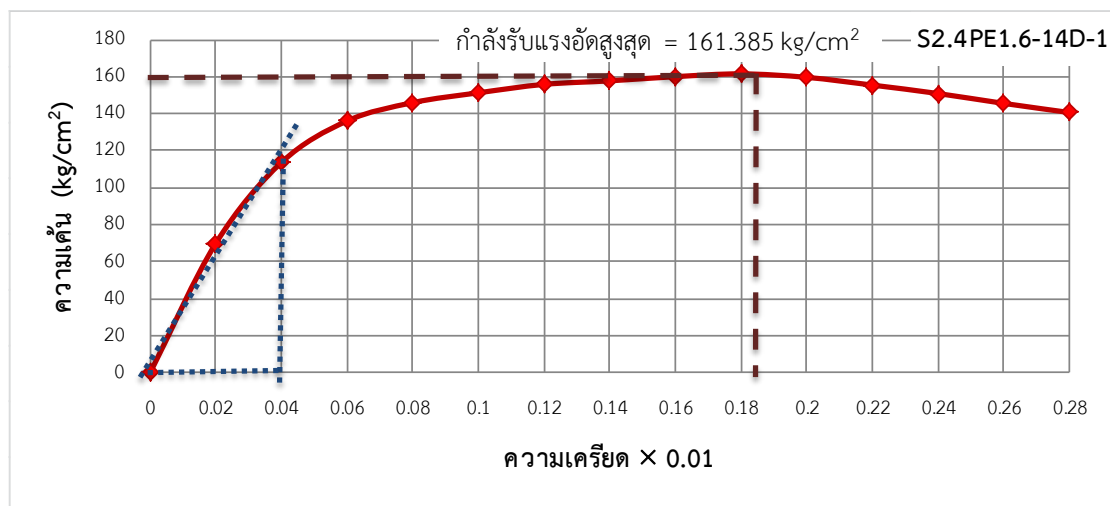
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.13	0	26.52	0.000
10	14.7	5.13	0.02	26.52	56.503
20	21.1	5.13	0.04	26.52	81.104
30	26.5	5.13	0.06	26.52	101.860
40	31.6	5.13	0.08	26.52	121.463
50	36	5.13	0.1	26.52	138.376
60	37.1	5.13	0.12	26.52	142.604
70	35	5.13	0.14	26.52	134.532
80	30.7	5.13	0.16	26.52	118.004
90	87.6	5.2	0.18	26.42	337.989



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{56.503 - 0.000}{0.0002 - 0.0000} = 297,515 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.22 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S2.4PE1.6 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 14 วัน

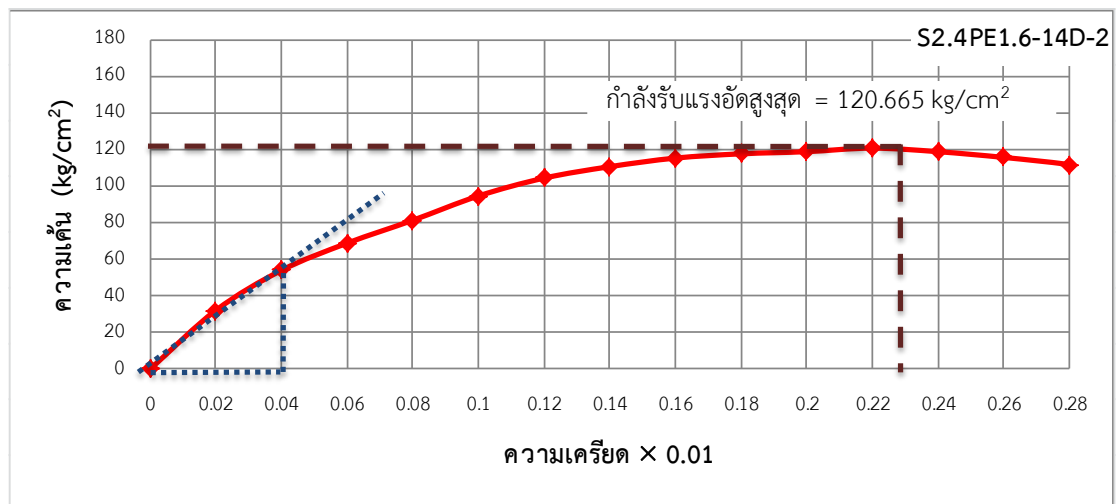
ระยะยวบตัว × 0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด × 0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	26.82	0.000
10	18.4	5.1	0.02	26.82	69.934
20	29.9	5.1	0.04	26.82	113.643
30	35.8	5.1	0.06	26.82	136.068
40	38.4	5.1	0.08	26.82	145.950
50	39.8	5.1	0.1	26.82	151.271
60	41	5.1	0.12	26.82	155.832
70	41.5	5.1	0.14	26.82	157.732
80	42.1	5.1	0.16	26.82	160.013
90	42.5	5.1	0.18	26.82	161.533
100	42	5.1	0.2	26.82	159.633
110	40.9	5.1	0.22	26.82	155.452



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{113.643 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 284,108 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.23 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S2.4PE1.6 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 14 วัน

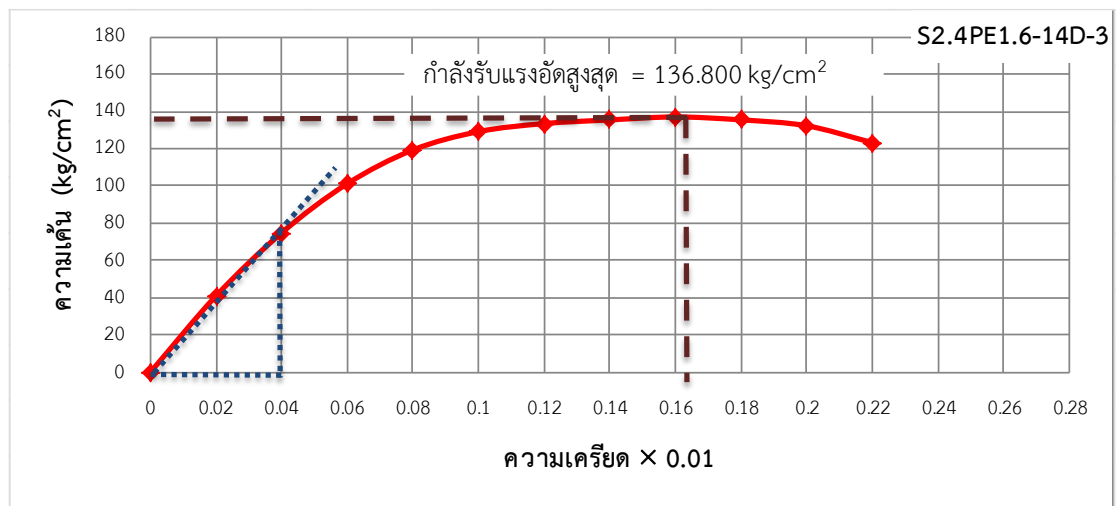
ระยะยวบตัว × 0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด × 0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	26.11	0.000
10	8.2	5.1	0.02	26.11	32.014
20	13.8	5.1	0.04	26.11	53.877
30	17.6	5.1	0.06	26.11	68.713
40	20.8	5.1	0.08	26.11	81.206
50	24.2	5.1	0.1	26.11	94.480
60	26.7	5.1	0.12	26.11	104.240
70	28.3	5.1	0.14	26.11	110.487
80	29.5	5.1	0.16	26.11	115.172
90	30.1	5.1	0.18	26.11	117.514
100	30.4	5.1	0.2	26.11	118.686
110	30.9	5.1	0.22	26.11	120.638



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{53.877 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 134,693 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.24 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S2.4PE1.6 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 14 วัน

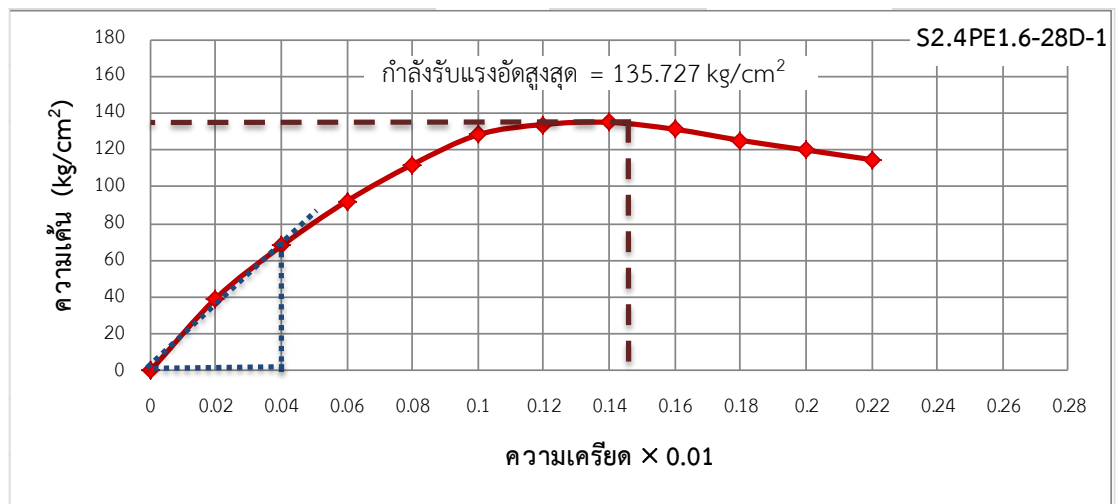
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5	0	25.9	0.000
10	10.4	5	0.02	25.9	40.932
20	19	5	0.04	25.9	74.780
30	25.7	5	0.06	25.9	101.150
40	30.3	5	0.08	25.9	119.254
50	32.8	5	0.1	25.9	129.094
60	33.9	5	0.12	25.9	133.423
70	34.4	5	0.14	25.9	135.391
80	34.8	5	0.16	25.9	136.965
90	34.4	5	0.18	25.9	135.391
100	33.6	5	0.2	25.9	132.242



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{74.780 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 186,950 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.25 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S2.4PE1.6 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 28 วัน

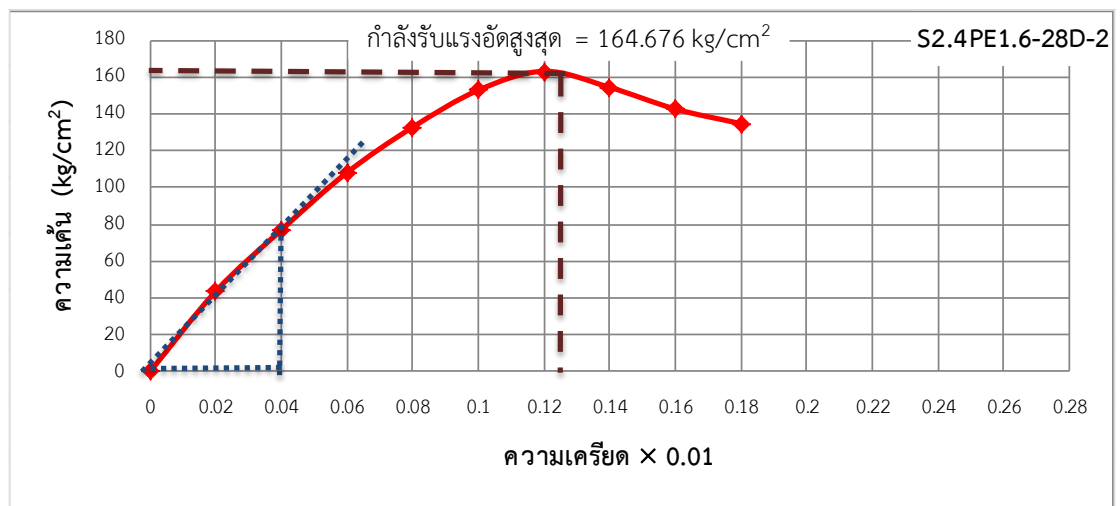
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	27.19	0.000
10	10.5	5.2	0.02	27.19	39.365
20	18.1	5.2	0.04	27.19	67.858
30	24.6	5.2	0.06	27.19	92.227
40	29.9	5.2	0.08	27.19	112.097
50	34.2	5.2	0.1	27.19	128.218
60	35.7	5.2	0.12	27.19	133.841
70	36	5.2	0.14	27.19	134.966
80	35	5.2	0.16	27.19	131.217
90	33.4	5.2	0.18	27.19	125.218
100	32	5.2	0.2	27.19	119.970
110	30.6	5.2	0.22	27.19	114.721



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{67.858 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 169,645 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.26 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S2.4PE1.6 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน

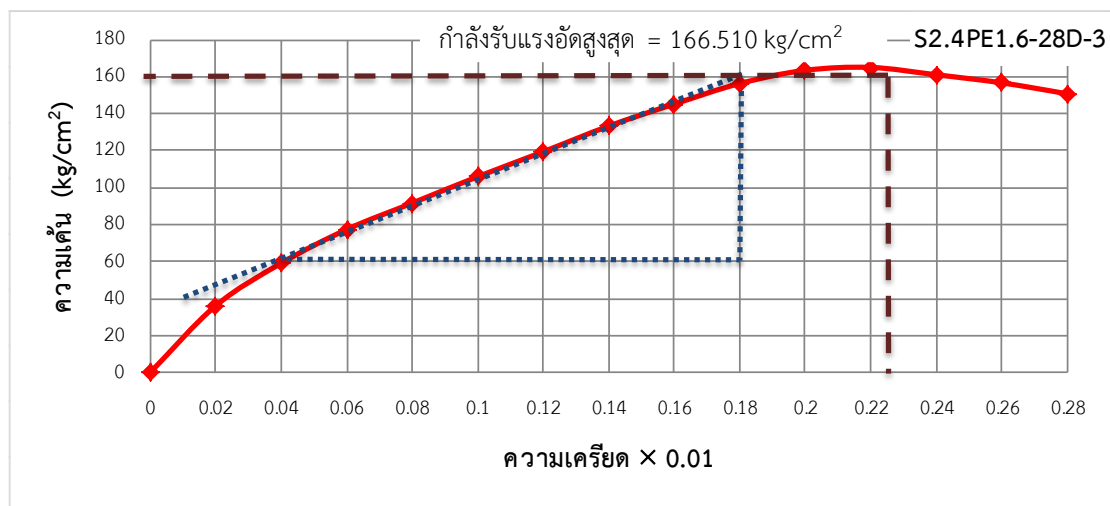
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.14	0	26.88	0.000
10	11.5	5.14	0.02	26.88	43.611
20	20.3	5.14	0.04	26.88	76.984
30	28.5	5.14	0.06	26.88	108.080
40	35	5.14	0.08	26.88	132.730
50	40.3	5.14	0.1	26.88	152.829
60	43	5.14	0.12	26.88	163.069
70	40.7	5.14	0.14	26.88	154.346
80	37.6	5.14	0.16	26.88	142.590
90	35.5	5.14	0.18	26.88	134.626



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{76.984 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 192,460 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.27 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S2.4PE1.6 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 28 วัน

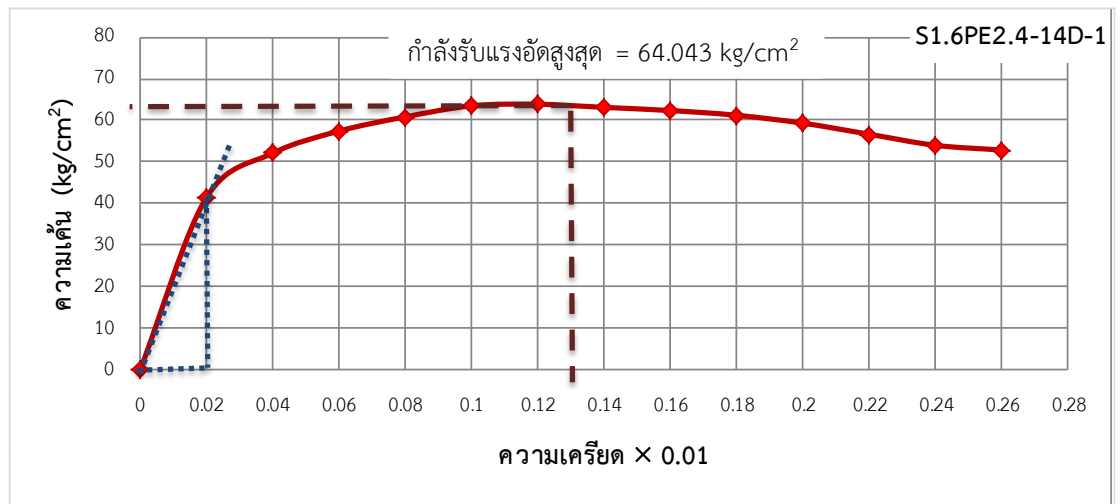
ระยะยวบตัว × 0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด × 0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	25.7	0.000
10	9.1	5.2	0.02	25.7	36.094
20	14.9	5.2	0.04	25.7	59.100
30	19.5	5.2	0.06	25.7	77.345
40	23.1	5.2	0.08	25.7	91.624
50	26.7	5.2	0.1	25.7	105.903
60	30.1	5.2	0.12	25.7	119.389
70	33.6	5.2	0.14	25.7	133.271
80	36.6	5.2	0.16	25.7	145.171
90	39.4	5.2	0.18	25.7	156.277
100	41.2	5.2	0.2	25.7	163.416
110	41.6	5.2	0.22	25.7	165.003



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{156.277 - 36.094}{0.0018 - 0.0004} = 85,845 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.28 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้าร์อัตราส่วน S1.6PE2.4 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 14 วัน

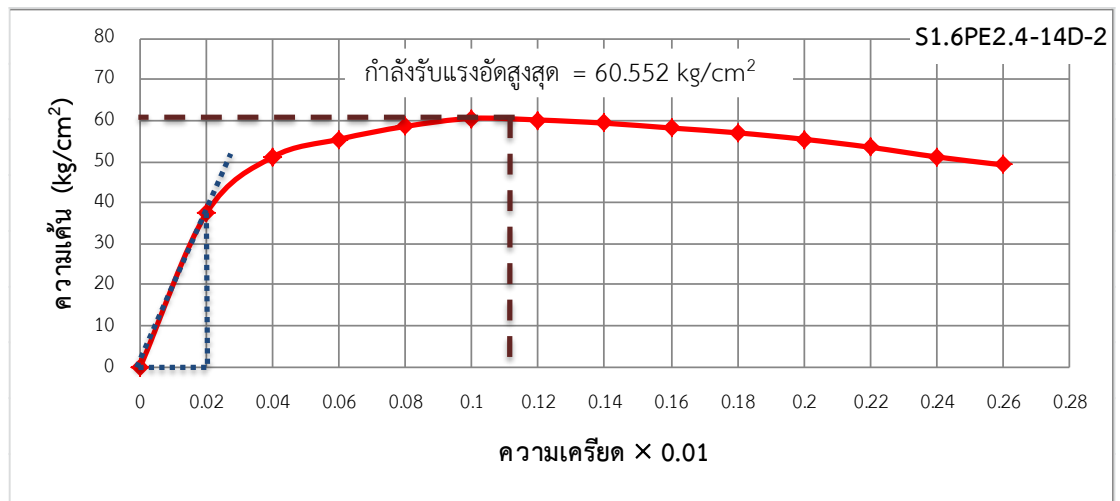
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	26.82	0.000
10	10.9	5.1	0.02	26.82	41.428
20	13.7	5.1	0.04	26.82	52.071
30	15.1	5.1	0.06	26.82	57.392
40	16	5.1	0.08	26.82	60.812
50	16.7	5.1	0.1	26.82	63.473
60	16.8	5.1	0.12	26.82	63.853
70	16.6	5.1	0.14	26.82	63.093
80	16.4	5.1	0.16	26.82	62.333
90	16.1	5.1	0.18	26.82	61.192
100	15.6	5.1	0.2	26.82	59.292
110	14.9	5.1	0.22	26.82	56.632



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{41.428 - 0.000}{0.0002 - 0.0000} = 207,140 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.29 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S1.6PE2.4 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 14 วัน

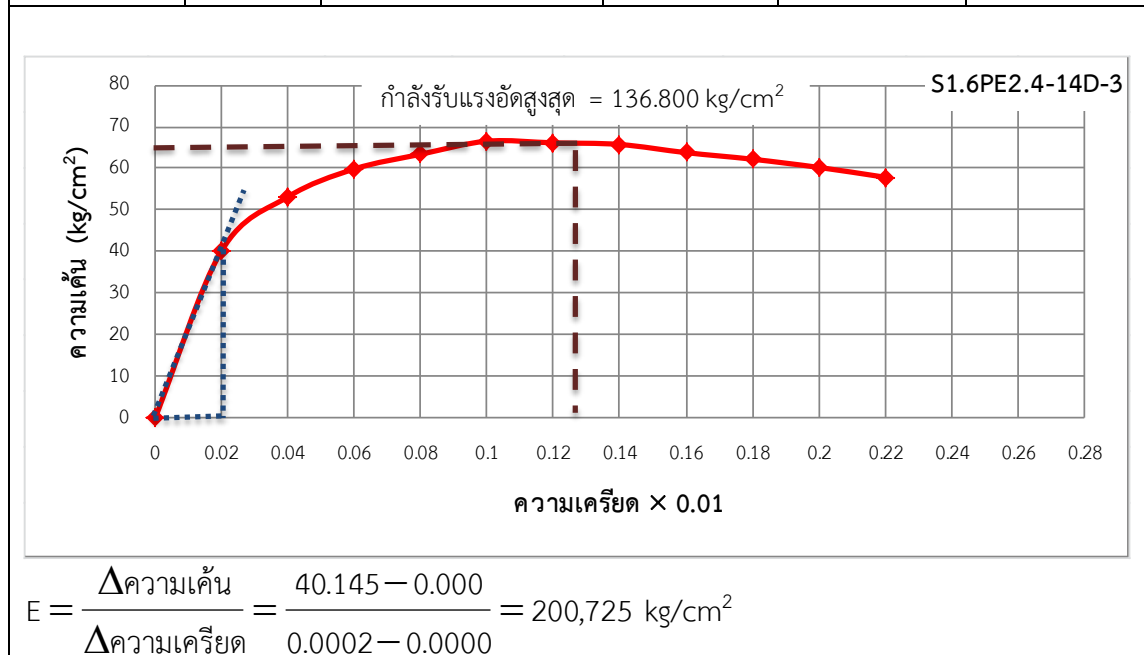
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	26.11	0.000
10	9.6	5.1	0.02	26.11	37.480
20	13.1	5.1	0.04	26.11	51.144
30	14.2	5.1	0.06	26.11	55.439
40	15	5.1	0.08	26.11	58.562
50	15.5	5.1	0.1	26.11	60.514
60	15.4	5.1	0.12	26.11	60.124
70	15.2	5.1	0.14	26.11	59.343
80	14.9	5.1	0.16	26.11	58.172
90	14.6	5.1	0.18	26.11	57.000



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{37.480 - 0.000}{0.0002 - 0.0000} = 187,400 \text{ kg/cm}^2$$

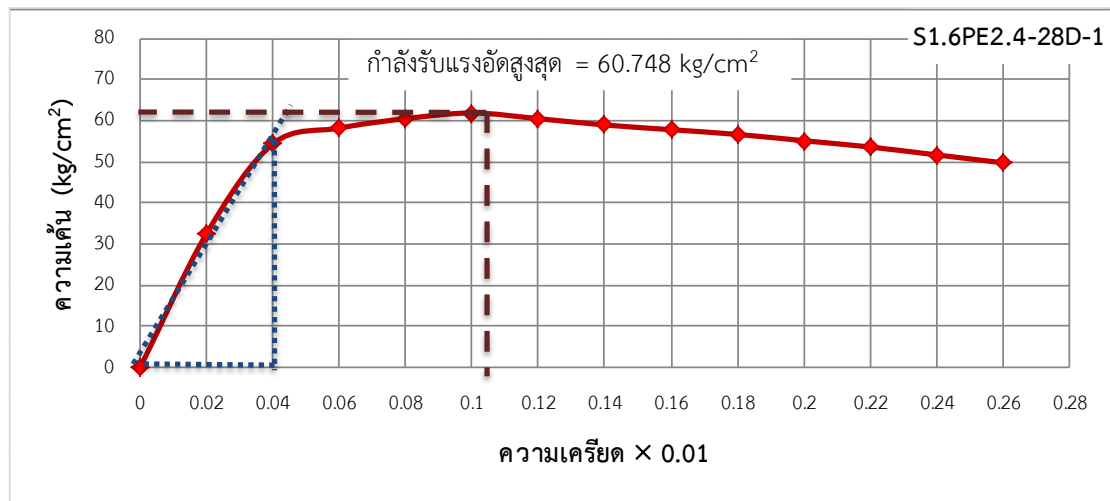
ตาราง ข.30 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S1.6PE2.4 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	25.9	0.000
10	10.2	5.2	0.02	25.9	40.145
20	13.5	5.2	0.04	25.9	53.133
30	15.2	5.2	0.06	25.9	59.824
40	16.1	5.2	0.08	25.9	63.366
50	16.9	5.2	0.1	25.9	66.515
60	16.8	5.2	0.12	25.9	66.121
70	16.7	5.2	0.14	25.9	65.728
80	16.2	5.2	0.16	25.9	63.760
90	15.8	5.2	0.18	25.9	62.185
100	15.3	5.2	0.2	25.9	60.217
110	14.7	5.2	0.22	25.9	57.856



ตาราง ข.31 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S1.6PE2.4 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 28 วัน

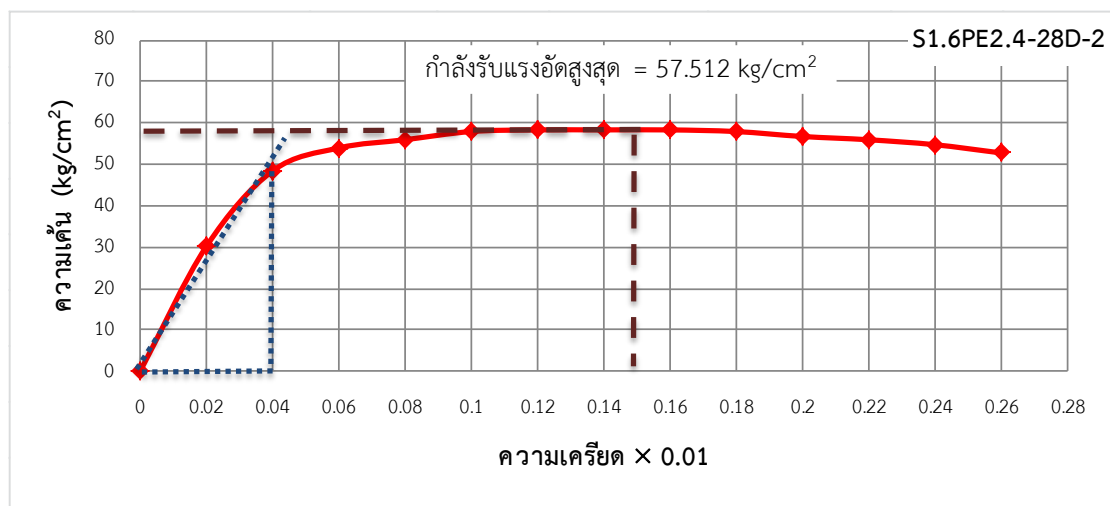
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	26.63	0.000
10	8.5	5.2	0.02	26.63	32.537
20	14.2	5.2	0.04	26.63	54.356
30	15.2	5.2	0.06	26.63	58.184
40	15.8	5.2	0.08	26.63	60.481
50	16.16	5.2	0.1	26.63	61.859
60	15.8	5.2	0.12	26.63	60.481
70	15.4	5.2	0.14	26.63	58.950
80	15.1	5.2	0.16	26.63	57.801
90	14.8	5.2	0.18	26.63	56.653



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{54.356 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 135,890 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.32 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S1.6PE2.4 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน

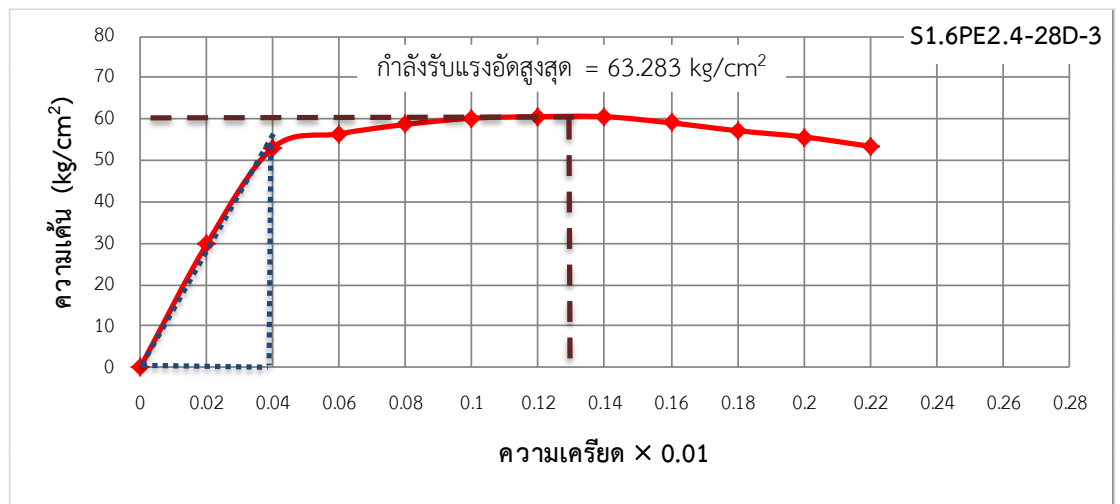
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	25.7	0.000
10	9.6	5.2	0.02	25.7	30.145
20	12.2	5.2	0.04	25.7	48.390
30	13.6	5.2	0.06	25.7	53.943
40	14.1	5.2	0.08	25.7	55.926
50	14.6	5.2	0.1	25.7	57.910
60	14.7	5.2	0.12	25.7	58.306
70	14.7	5.2	0.14	25.7	58.306
80	14.7	5.2	0.16	25.7	58.306
90	14.6	5.2	0.18	25.7	57.910
100	14.3	5.2	0.2	25.7	56.720



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{48.390 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 120,975 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.33 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S1.6PE2.4 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 28 วัน

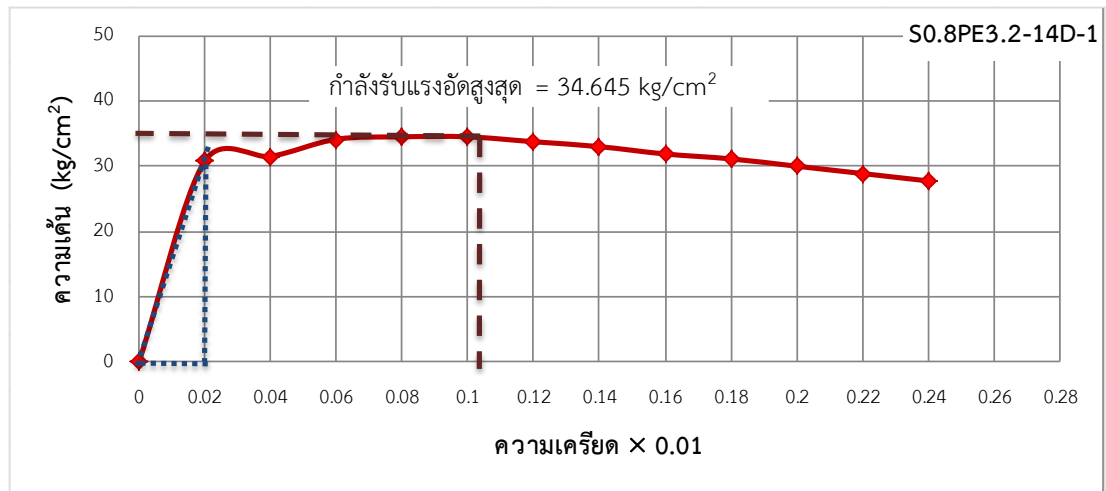
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	27.09	0.000
10	11.1	5.2	0.02	27.09	29.727
20	14.1	5.2	0.04	27.09	53.057
30	15	5.2	0.06	27.09	56.443
40	15.6	5.2	0.08	27.09	58.701
50	16	5.2	0.1	27.09	60.206
60	16.1	5.2	0.12	27.09	60.583
70	16.1	5.2	0.14	27.09	60.583
80	15.7	5.2	0.16	27.09	59.077
90	15.2	5.2	0.18	27.09	57.196
100	14.8	5.2	0.2	27.09	55.691
110	14.2	5.2	0.22	27.09	53.433



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{53.057 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 132,643 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.34 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.8PE3.2 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 14 วัน

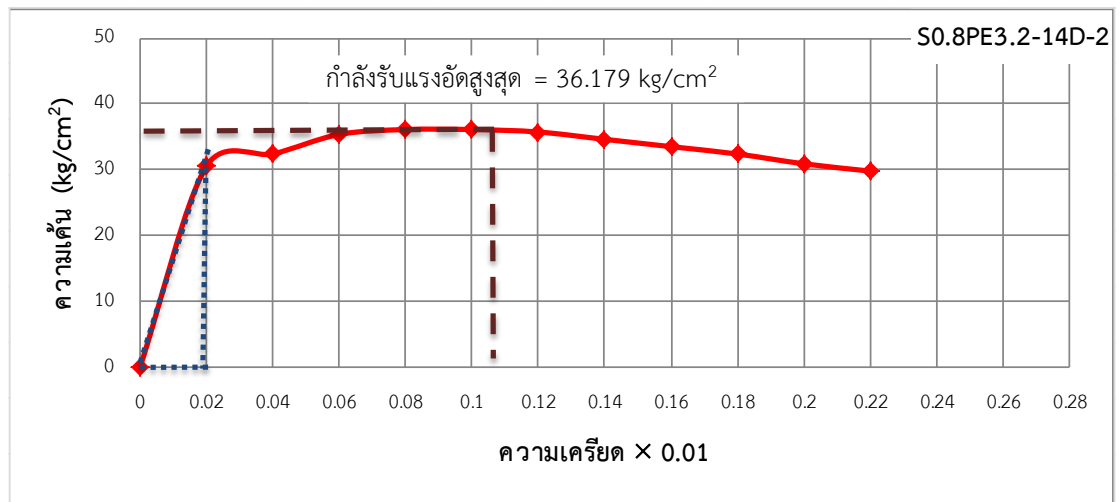
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	27.196	0.000
10	8.2	5.2	0.02	27.196	30.735
20	8.4	5.2	0.04	27.196	31.485
30	9.1	5.2	0.06	27.196	34.109
40	9.2	5.2	0.08	27.196	34.484
50	9.2	5.2	0.1	27.196	34.484
60	9	5.2	0.12	27.196	33.734
70	8.8	5.2	0.14	27.196	32.984
80	8.5	5.2	0.16	27.196	31.860
90	8.3	5.2	0.18	27.196	31.110
100	8	5.2	0.2	27.196	29.986
110	7.7	5.2	0.22	27.196	28.861



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{30.735 - 0.000}{0.0002 - 0.0000} = 153,675 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.35 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.8PE3.2 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 14 วัน

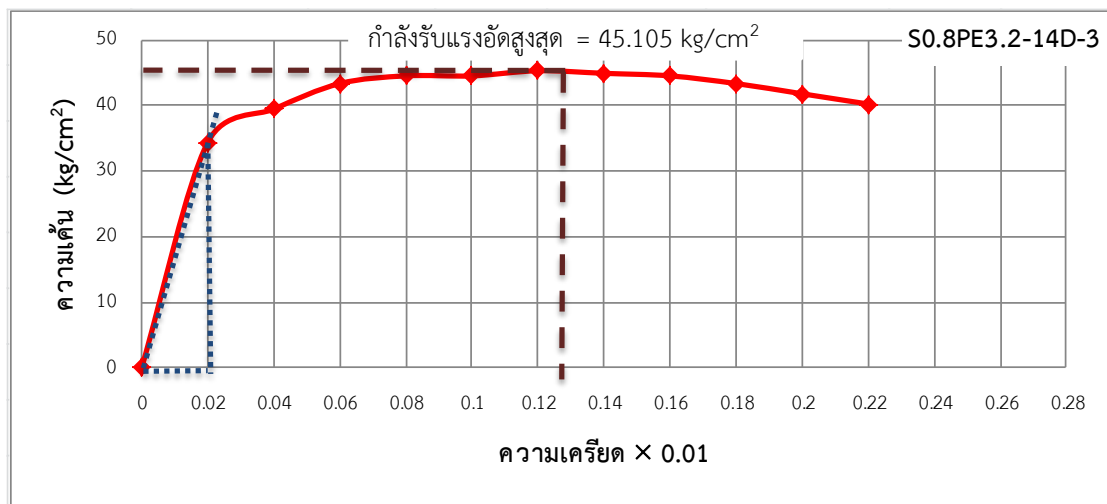
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	27.401	0.000
10	8.2	5.1	0.02	27.401	30.506
20	8.7	5.1	0.04	27.401	32.366
30	9.5	5.1	0.06	27.401	35.342
40	9.7	5.1	0.08	27.401	36.086
50	9.7	5.1	0.1	27.401	36.086
60	9.6	5.1	0.12	27.401	35.714
70	9.3	5.1	0.14	27.401	34.598
80	9	5.1	0.16	27.401	33.482
90	8.7	5.1	0.18	27.401	32.366
100	8.3	5.1	0.2	27.401	30.878
110	8	5.1	0.22	27.401	29.761



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{30.506 - 0.000}{0.0002 - 0.0000} = 152,530 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.36 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.8PE3.2 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 14 วัน

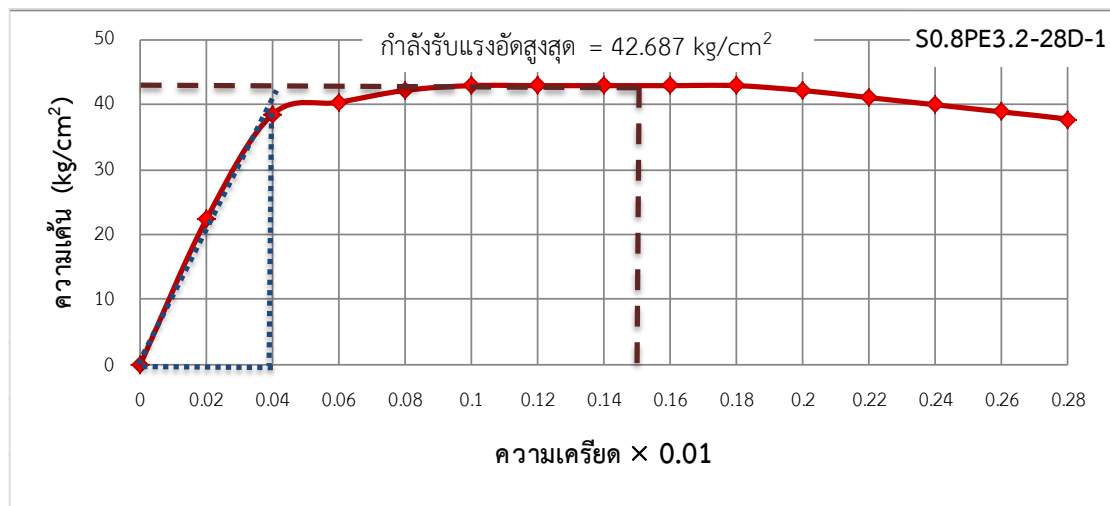
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.17	0	26.112	0.000
10	8.8	5.17	0.02	26.112	34.354
20	10.1	5.17	0.04	26.112	39.429
30	11.1	5.17	0.06	26.112	43.333
40	11.4	5.17	0.08	26.112	44.504
50	11.4	5.17	0.1	26.112	44.504
60	11.6	5.17	0.12	26.112	45.284
70	11.5	5.17	0.14	26.112	44.894
80	11.4	5.17	0.16	26.112	44.504
90	11.1	5.17	0.18	26.112	43.333
100	10.7	5.17	0.2	26.112	41.771



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{34.354 - 0.000}{0.0002 - 0.0000} = 171,770 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.37 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.8PE3.2 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 28 วัน

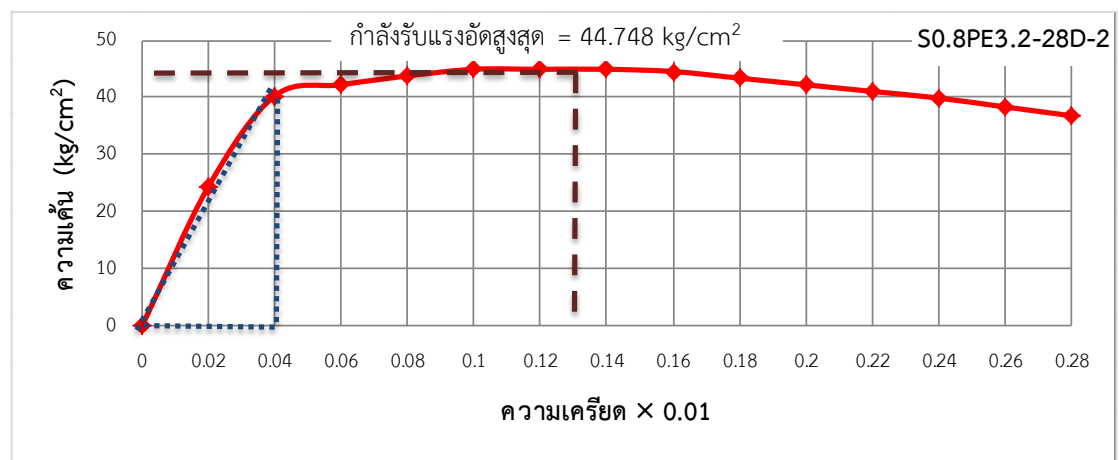
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.3	0	27.82	0.000
10	8.8	5.3	0.02	27.82	22.351
20	10.5	5.3	0.04	27.82	38.474
30	11	5.3	0.06	27.82	40.306
40	11.5	5.3	0.08	27.82	42.138
50	11.7	5.3	0.1	27.82	42.871
60	11.7	5.3	0.12	27.82	42.871
70	11.7	5.3	0.14	27.82	42.871
80	11.7	5.3	0.16	27.82	42.871
90	11.7	5.3	0.18	27.82	42.871
100	11.5	5.3	0.2	27.82	42.138



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{38.474 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 96,185 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.38 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.8PE3.2 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน

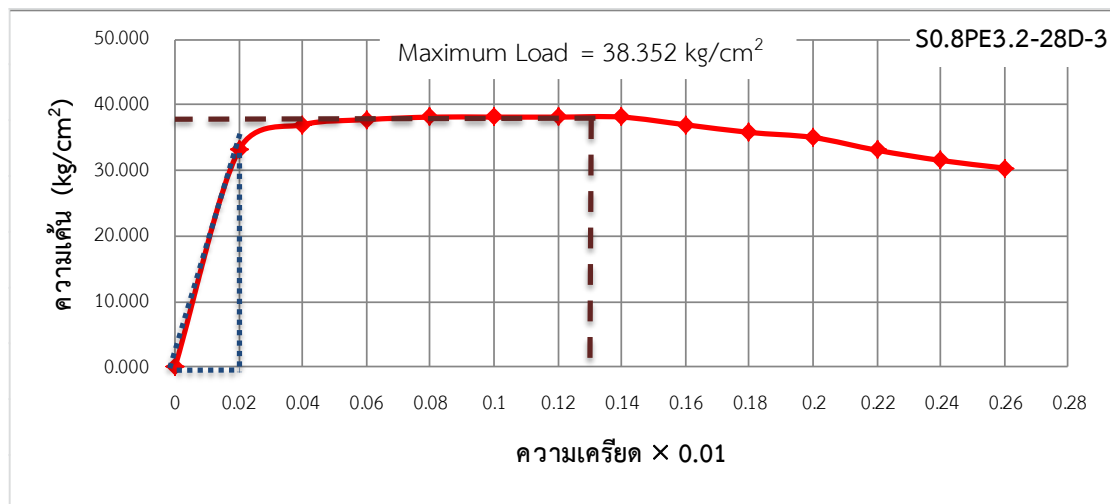
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	26.32	0.000
10	8.8	5.1	0.02	26.32	24.400
20	10.4	5.1	0.04	26.32	40.279
30	10.9	5.1	0.06	26.32	42.215
40	11.3	5.1	0.08	26.32	43.765
50	11.6	5.1	0.1	26.32	44.927
60	11.6	5.1	0.12	26.32	44.927
70	11.6	5.1	0.14	26.32	44.927
80	11.5	5.1	0.16	26.32	44.539
90	11.2	5.1	0.18	26.32	43.377
100	10.9	5.1	0.2	26.32	42.215
110	10.6	5.1	0.22	26.32	41.054



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{40.279 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 100,698 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.39 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.8PE3.2 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 28 วัน

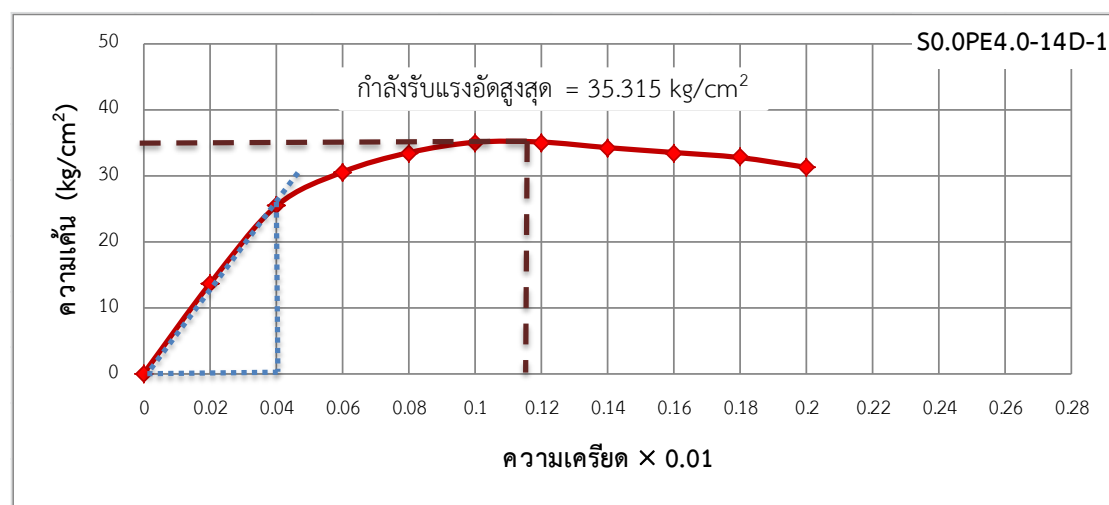
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.08	0	26.21	0.000
10	8.5	5.08	0.02	26.21	33.058
20	9.5	5.08	0.04	26.21	36.948
30	9.7	5.08	0.06	26.21	37.726
40	9.8	5.08	0.08	26.21	38.114
50	9.8	5.08	0.1	26.21	38.114
60	9.8	5.08	0.12	26.21	38.114
70	9.8	5.08	0.14	26.21	38.114
80	9.5	5.08	0.16	26.21	36.948
90	9.2	5.08	0.18	26.21	35.781
100	9	5.08	0.2	26.21	35.003



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{33.058 - 0.000}{0.0002 - 0.0000} = 165,290 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.40 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.0PE4.0 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 14 วัน

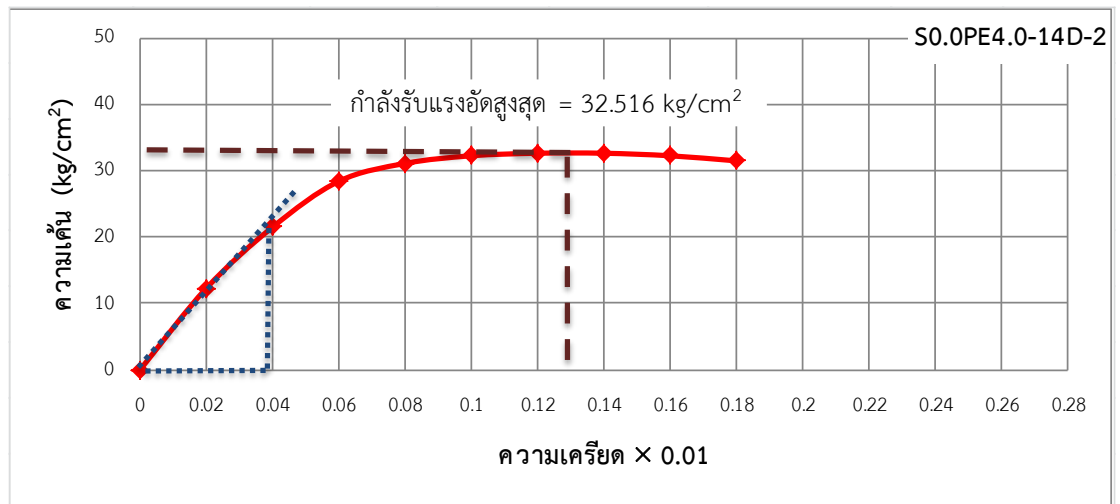
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.2	0	27.77	0.000
10	3.7	5.2	0.02	27.77	13.582
20	6.9	5.2	0.04	27.77	25.328
30	8.3	5.2	0.06	27.77	30.467
40	9.1	5.2	0.08	27.77	33.404
50	9.53	5.2	0.1	27.77	34.982
60	9.54	5.2	0.12	27.77	35.019
70	9.31	5.2	0.14	27.77	34.175
80	9.11	5.2	0.16	27.77	33.441
90	8.9	5.2	0.18	27.77	32.670
100	8.5	5.2	0.2	27.77	31.201



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{25.328 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 63,320 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.41 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.0PE4.0 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 14 วัน

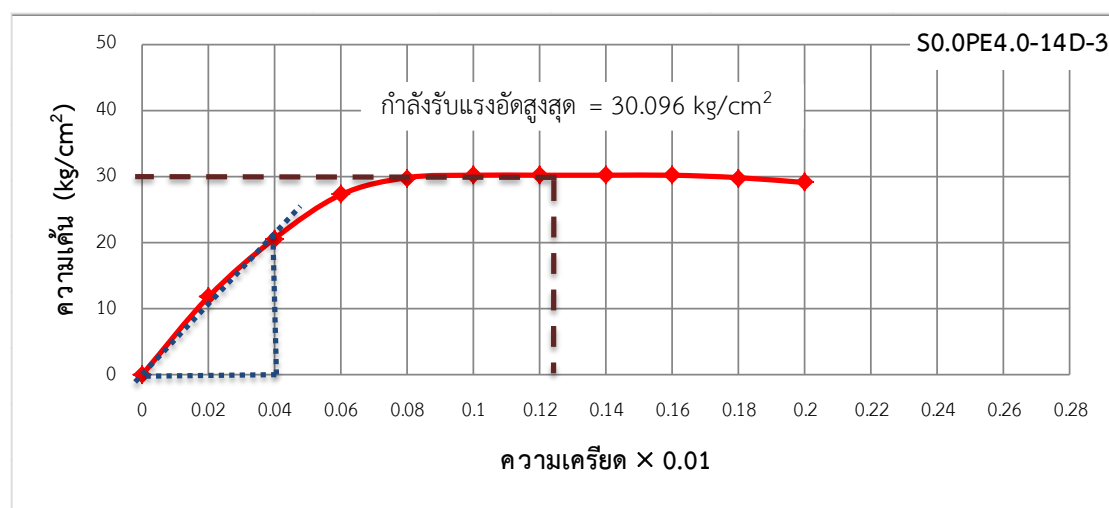
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.12	0	26.57	0.000
10	3.2	5.12	0.02	26.57	12.277
20	5.6	5.12	0.04	26.57	21.485
30	7.4	5.12	0.06	26.57	28.390
40	8.1	5.12	0.08	26.57	31.076
50	8.4	5.12	0.1	26.57	32.227
60	8.5	5.12	0.12	26.57	32.611
70	8.5	5.12	0.14	26.57	32.611
80	8.4	5.12	0.16	26.57	32.227
90	8.2	5.12	0.18	26.57	31.460
100	8	5.12	0.2	26.57	30.692
110	7.4	5.12	0.22	26.57	28.390



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{21.485 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 53,713 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.42 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.0PE4.0 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 14 วัน

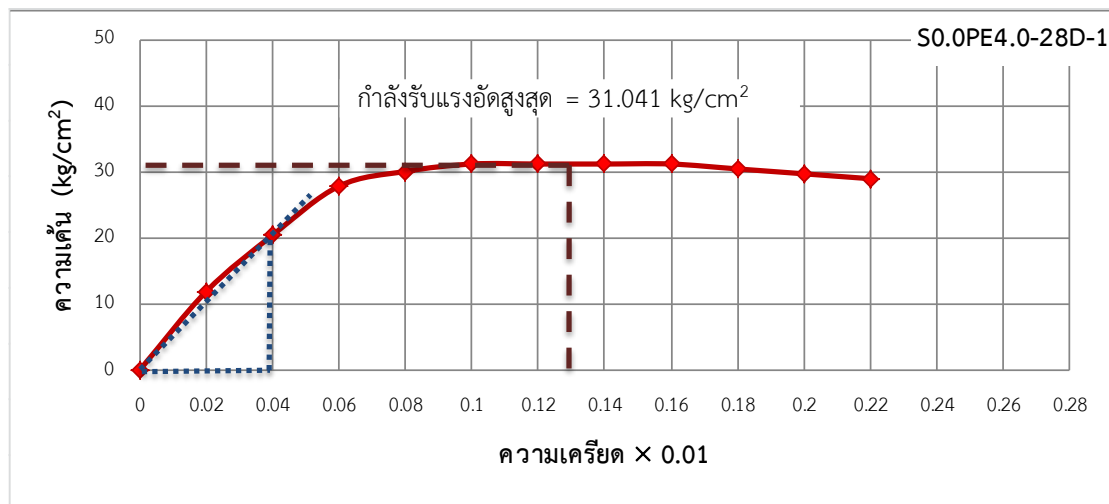
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.3	0	27.72	0.000
10	3.2	5.3	0.02	27.72	11.768
20	5.6	5.3	0.04	27.72	20.593
30	7.4	5.3	0.06	27.72	27.213
40	8.1	5.3	0.08	27.72	29.787
50	8.2	5.3	0.1	27.72	30.154
60	8.2	5.3	0.12	27.72	30.154
70	8.2	5.3	0.14	27.72	30.154
80	8.2	5.3	0.16	27.72	30.154
90	8.1	5.3	0.18	27.72	29.787
100	7.9	5.3	0.2	27.72	29.051



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{20.593 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 51,483 \text{ kg/cm}$$

ตาราง ข.43 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.0PE4.0 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 28 วัน

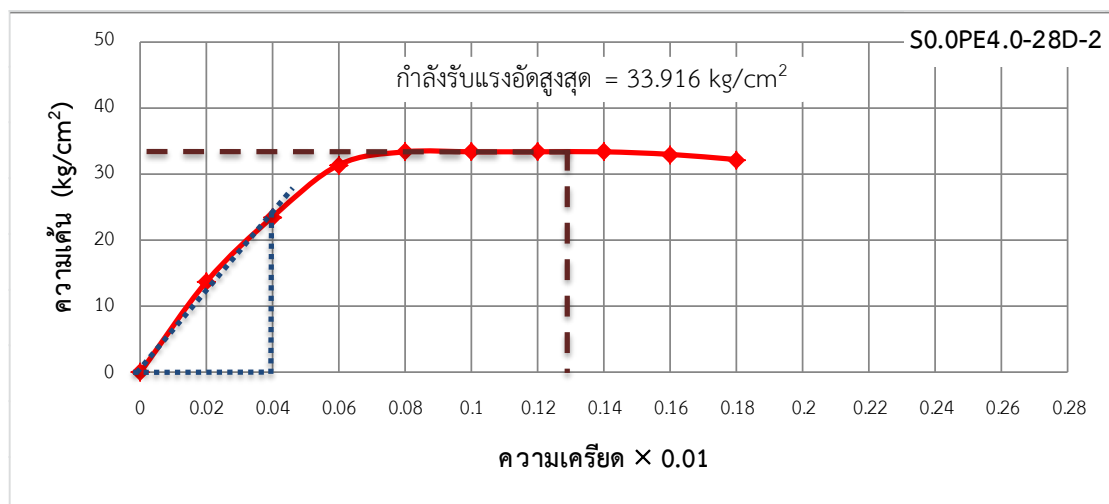
ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.3	0	27.51	0.000
10	3.2	5.3	0.02	27.51	11.857
20	5.5	5.3	0.04	27.51	20.380
30	7.5	5.3	0.06	27.51	27.791
40	8.1	5.3	0.08	27.51	30.014
50	8.4	5.3	0.1	27.51	31.126
60	8.4	5.3	0.12	27.51	31.126
70	8.4	5.3	0.14	27.51	31.126
80	8.4	5.3	0.16	27.51	31.126
90	8.2	5.3	0.18	27.51	30.385
100	8	5.3	0.2	27.51	29.644
110	7.8	5.3	0.22	27.51	28.902



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{20.380 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 50,950 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.44 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.0PE4.0 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน

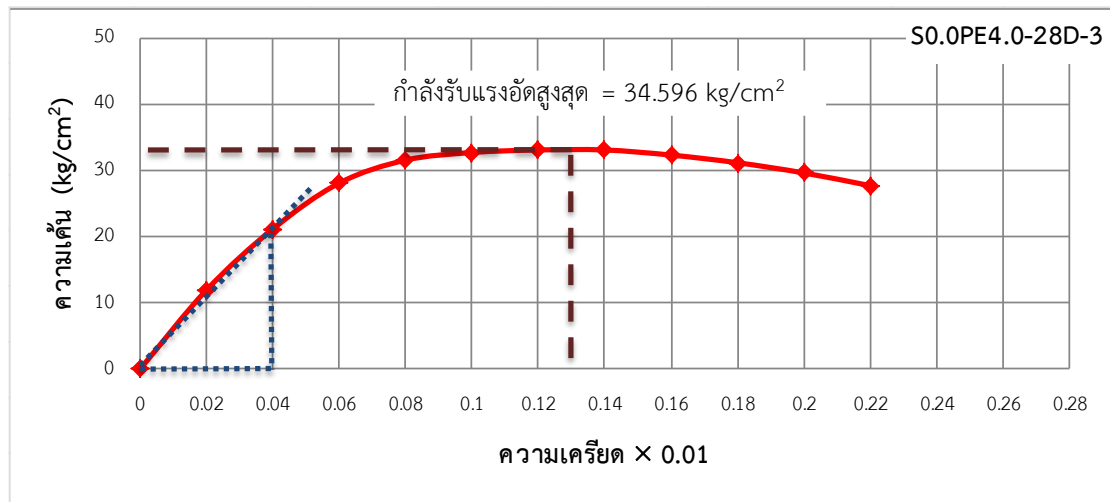
ระยะยุบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชิ้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.1	0	26	0.000
10	3.5	5.1	0.02	26	13.722
20	6	5.1	0.04	26	23.524
30	8	5.1	0.06	26	31.365
40	8.5	5.1	0.08	26	33.325
50	8.5	5.1	0.1	26	33.325
60	8.5	5.1	0.12	26	33.325
70	8.5	5.1	0.14	26	33.325
80	8.4	5.1	0.16	26	32.933
90	8.2	5.1	0.18	26	32.149
100	8	5.1	0.2	26	31.365
110	7.4	5.1	0.22	26	29.013
120	7	5.1	0.24	26	27.445



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{23.524 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 58,810 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.45 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์อัตราส่วน S0.0PE4.0 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 28 วัน

ระยะยวบตัว ×0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด ×0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (m ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.16	0	26.52	0.000
10	3.1	5.16	0.02	26.52	11.916
20	5.5	5.16	0.04	26.52	21.141
30	7.3	5.16	0.06	26.52	28.060
40	8.2	5.16	0.08	26.52	31.519
50	8.5	5.16	0.1	26.52	32.672
60	8.6	5.16	0.12	26.52	33.056
70	8.6	5.16	0.14	26.52	33.056
80	8.4	5.16	0.16	26.52	32.288
90	8.1	5.16	0.18	26.52	31.135
100	7.7	5.16	0.2	26.52	29.597
110	7.2	5.16	0.22	26.52	27.675



$$E = \frac{\Delta \text{ความเค้น}}{\Delta \text{ความเครียด}} = \frac{21.141 - 0.000}{0.0004 - 0.0000} = 52,853 \text{ kg/cm}^2$$

ตาราง ข.46 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 14 PE 2.1 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.31	0	26.316	0
20	0.267	5.31	0.037664783	26.316	1.034242489
40	0.712	5.31	0.075329567	26.316	2.75797997
60	1.246	5.31	0.11299435	26.316	4.826464947
80	1.958	5.31	0.150659134	26.316	7.584444917
100	3.026	5.31	0.188323917	26.316	11.72141487
120	4.094	5.31	0.225988701	26.316	15.85838483
140	5.34	5.31	0.263653484	26.316	20.68484977
160	6.23	5.31	0.301318267	26.316	24.13232474
180	7.12	5.31	0.338983051	26.316	27.5797997
200	8.01	5.31	0.376647834	26.316	31.02727466
220	8.544	5.31	0.414312618	26.316	33.09575964
240	8.9	5.31	0.451977401	26.316	34.47474962
260	9.078	5.31	0.489642185	26.316	35.16424462
280	9.167	5.31	0.527306968	26.316	35.50899211
300	9.256	5.31	0.564971751	26.316	35.85373961
320	8.9	5.31	0.602636535	26.316	34.47474962

ตาราง ข.47 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 14 PE 2.1 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.18	0	26.1105	0
20	0.267	5.18	0.038610039	26.1105	1.042382388
40	0.534	5.18	0.077220077	26.1105	2.084764775
60	0.89	5.18	0.115830116	26.1105	3.474607959
80	1.602	5.18	0.154440154	26.1105	6.254294326
100	1.958	5.18	0.193050193	26.1105	7.64413751
120	2.67	5.18	0.231660232	26.1105	10.42382388
140	3.382	5.18	0.27027027	26.1105	13.20351024
160	4.272	5.18	0.308880309	26.1105	16.6781182
180	4.984	5.18	0.347490347	26.1105	19.45780457
200	6.052	5.18	0.386100386	26.1105	23.62733412
220	6.764	5.18	0.424710425	26.1105	26.40702049
240	7.654	5.18	0.463320463	26.1105	29.88162845
260	8.366	5.18	0.501930502	26.1105	32.66131481
280	8.811	5.18	0.540540541	26.1105	34.39861879
300	9.078	5.18	0.579150579	26.1105	35.44100118
320	9.345	5.18	0.617760618	26.1105	36.48338357
340	9.434	5.18	0.656370656	26.1105	36.83084436
360	9.167	5.18	0.694980695	26.1105	35.78846198

ตาราง ข.48 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 14 PE 2.1 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.32	0	26.163	0
20	0.267	5.32	0.037593985	26.163	1.04029069
40	0.712	5.32	0.07518797	26.163	2.774108508
60	1.246	5.32	0.112781955	26.163	4.854689889
80	1.958	5.32	0.15037594	26.163	7.628798396
100	2.848	5.32	0.187969925	26.163	11.09643403
120	3.916	5.32	0.22556391	26.163	15.25759679
140	5.162	5.32	0.263157895	26.163	20.11228668
160	6.764	5.32	0.30075188	26.163	26.35403082
180	8.01	5.32	0.338345865	26.163	31.20872071
200	9.078	5.32	0.37593985	26.163	35.36988347
220	9.612	5.32	0.413533835	26.163	37.45046485
240	9.79	5.32	0.45112782	26.163	38.14399198
260	9.968	5.32	0.488721805	26.163	38.83751911
280	9.79	5.32	0.526315789	26.163	38.14399198
300	9.256	5.32	0.563909774	26.163	36.0634106

ตาราง ข.49 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 14 PE 2.1 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 28 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.39	0	26.74	0
20	0.356	5.39	0.037105751	26.74	1.357124175
40	0.712	5.39	0.074211503	26.74	2.71424835
60	1.246	5.39	0.111317254	26.74	4.749934613
80	1.869	5.39	0.148423006	26.74	7.12490192
100	2.67	5.39	0.185528757	26.74	10.17843131
120	3.916	5.39	0.222634508	26.74	14.92836593
140	4.895	5.39	0.25974026	26.74	18.66045741
160	6.052	5.39	0.296846011	26.74	23.07111098
180	7.476	5.39	0.333951763	26.74	28.49960768
200	8.01	5.39	0.371057514	26.74	30.53529394
220	8.633	5.39	0.408163265	26.74	32.91026125
240	8.9	5.39	0.445269017	26.74	33.92810438
260	8.9	5.39	0.482374768	26.74	33.92810438
280	10.502	5.39	0.519480519	26.74	40.03516317
300	10.146	5.39	0.556586271	26.74	38.67803899
320	9.79	5.39	0.593692022	26.74	37.32091482

ตาราง ข.50 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 14 PE 2.1 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.39	0	26.52	0
20	0.356	5.39	0.037105751	26.52	1.36838237
40	0.534	5.39	0.074211503	26.52	2.052573555
60	0.801	5.39	0.111317254	26.52	3.078860332
80	1.246	5.39	0.148423006	26.52	4.789338294
100	1.869	5.39	0.185528757	26.52	7.184007441
120	2.492	5.39	0.222634508	26.52	9.578676588
140	2.937	5.39	0.25974026	26.52	11.28915455
160	3.916	5.39	0.296846011	26.52	15.05220607
180	4.628	5.39	0.333951763	26.52	17.78897081
200	5.696	5.39	0.371057514	26.52	21.89411791
220	6.497	5.39	0.408163265	26.52	24.97297825
240	7.298	5.39	0.445269017	26.52	28.05183858
260	8.188	5.39	0.482374768	26.52	31.4727945
280	9.078	5.39	0.519480519	26.52	34.89375043
300	9.79	5.39	0.556586271	26.52	37.63051517
320	10.057	5.39	0.593692022	26.52	38.65680194
340	9.701	5.39	0.630797774	26.52	37.28841957
360	8.9	5.39	0.667903525	26.52	34.20955924

ตาราง ข.51 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 14 PE 2.1 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 28 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.35	0	26.62	0
20	0.089	5.35	0.037383178	26.62	0.340810485
40	0.178	5.35	0.074766355	26.62	0.68162097
60	0.534	5.35	0.112149533	26.62	2.04486291
80	0.801	5.35	0.14953271	26.62	3.067294365
100	1.246	5.35	0.186915888	26.62	4.77134679
120	2.136	5.35	0.224299065	26.62	8.17945164
140	3.204	5.35	0.261682243	26.62	12.26917746
160	4.45	5.35	0.299065421	26.62	17.04052425
180	5.518	5.35	0.336448598	26.62	21.13025007
200	6.764	5.35	0.373831776	26.62	25.90159686
220	7.654	5.35	0.411214953	26.62	29.30970171
240	8.366	5.35	0.448598131	26.62	32.03618559
260	8.811	5.35	0.485981308	26.62	33.74023802
280	9.078	5.35	0.523364486	26.62	34.76266947
300	9.434	5.35	0.560747664	26.62	36.12591141
320	9.345	5.35	0.598130841	26.62	35.78510093
340	9.167	5.35	0.635514019	26.62	35.10347996
360	8.722	5.35	0.672897196	26.62	33.39942753

ตาราง ข.52 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.7 PE 2.8 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.22	0	26.81	0
20	0.801	5.22	0.038314176	26.81	3.045556733
40	1.246	5.22	0.076628352	26.81	4.737532695
60	2.492	5.22	0.114942529	26.81	9.47506539
80	3.738	5.22	0.153256705	26.81	14.21259809
100	5.162	5.22	0.191570881	26.81	19.62692117
120	6.23	5.22	0.229885057	26.81	23.68766348
140	7.12	5.22	0.268199234	26.81	27.0716154
160	7.476	5.22	0.30651341	26.81	28.42519617
180	7.565	5.22	0.344827586	26.81	28.76359136
200	7.12	5.22	0.383141762	26.81	27.0716154
220	6.764	5.22	0.421455939	26.81	25.71803463
240	5.874	5.22	0.459770115	26.81	22.33408271
260	5.34	5.22	0.498084291	26.81	20.30371155

ตาราง ข.53 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.7 PE 2.8 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.22	0	25.98	0
20	0.445	5.22	0.038314176	25.98	1.746030622
40	0.979	5.22	0.076628352	25.98	3.841267368
60	1.78	5.22	0.114942529	25.98	6.984122487
80	2.848	5.22	0.153256705	25.98	11.17459598
100	4.45	5.22	0.191570881	25.98	17.46030622
120	5.696	5.22	0.229885057	25.98	22.34919196
140	6.942	5.22	0.268199234	25.98	27.2380777
160	7.743	5.22	0.30651341	25.98	30.38093282
180	7.743	5.22	0.344827586	25.98	30.38093282
200	6.408	5.22	0.383141762	25.98	25.14284095
220	6.052	5.22	0.421455939	25.98	23.74601646
240	5.162	5.22	0.459770115	25.98	20.25395521
260	4.272	5.22	0.498084291	25.98	16.76189397

ตาราง ข.54 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.7 PE 2.8 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.23	0	25.99	0
20	0.267	5.23	0.038240918	25.99	1.047215288
40	0.712	5.23	0.076481836	25.99	2.792574101
60	1.691	5.23	0.114722753	25.99	6.63236349
80	2.67	5.23	0.152963671	25.99	10.47215288
100	3.916	5.23	0.191204589	25.99	15.35915756
120	5.162	5.23	0.229445507	25.99	20.24616223
140	6.23	5.23	0.267686424	25.99	24.43502338
160	6.942	5.23	0.305927342	25.99	27.22759749
180	6.764	5.23	0.34416826	25.99	26.52945396
200	6.052	5.23	0.382409178	25.99	23.73687986
220	5.607	5.23	0.420650096	25.99	21.99152105
240	4.806	5.23	0.458891013	25.99	18.84987518
260	4.272	5.23	0.497131931	25.99	16.75544461

ตาราง ข.55 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.0 PE 3.5 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.33	0	26.81	0
20	0.356	5.33	0.037523452	26.81	1.35358077
40	0.712	5.33	0.075046904	26.81	2.70716154
60	1.0146	5.33	0.112570356	26.81	3.857705195
80	1.4774	5.33	0.150093809	26.81	5.617360196
100	2.0292	5.33	0.187617261	26.81	7.715410389
120	2.6522	5.33	0.225140713	26.81	10.08417674
140	3.204	5.33	0.262664165	26.81	12.18222693
160	3.5244	5.33	0.300187617	26.81	13.40044962
180	3.7202	5.33	0.337711069	26.81	14.14491905
200	3.6846	5.33	0.375234522	26.81	14.00956097
220	3.204	5.33	0.412757974	26.81	12.18222693
240	2.67	5.33	0.450281426	26.81	10.15185578
260	2.136	5.33	0.487804878	26.81	8.12148462
280	1.602	5.33	0.52532833	26.81	6.091113465
300	1.246	5.33	0.562851782	26.81	4.737532695

ตาราง ข.56 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.0 PE 3.5 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.33	0	26.54	0
20	0.801	5.33	0.037523452	26.54	3.076540166
40	1.513	5.33	0.075046904	26.54	5.811242535
60	2.492	5.33	0.112570356	26.54	9.571458293
80	3.293	5.33	0.150093809	26.54	12.64799846
100	3.6312	5.33	0.187617261	26.54	13.94698208
120	3.7024	5.33	0.225140713	26.54	14.22045232
140	3.471	5.33	0.262664165	26.54	13.33167405
160	3.115	5.33	0.300187617	26.54	11.96432287
180	2.848	5.33	0.337711069	26.54	10.93880948
200	2.314	5.33	0.375234522	26.54	8.887782701

ตาราง ข.57 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.0 PE 3.5 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 14 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.38	0	26.3	0
20	0.178	5.38	0.037174721	26.3	0.689914457
40	0.623	5.38	0.074349442	26.3	2.4147006
60	0.979	5.38	0.111524164	26.3	3.794529514
80	1.602	5.38	0.148698885	26.3	6.209230114
100	2.314	5.38	0.185873606	26.3	8.968887942
120	2.937	5.38	0.223048327	26.3	11.38358854
140	3.382	5.38	0.260223048	26.3	13.10837469
160	3.649	5.38	0.29739777	26.3	14.14324637
180	3.649	5.38	0.334572491	26.3	14.14324637
200	3.382	5.38	0.371747212	26.3	13.10837469
220	3.026	5.38	0.408921933	26.3	11.72854577
240	2.67	5.38	0.446096654	26.3	10.34871686
260	2.225	5.38	0.483271375	26.3	8.623930714
280	1.78	5.38	0.520446097	26.3	6.899144571
300	1.335	5.38	0.557620818	26.3	5.174358428

ตาราง ข.58 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.0 PE 3.5 ชั้นที่ 1 อายุการบ่ม 28 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.29	0	26.32	0
20	0.356	5.29	0.037807183	26.32	1.378780412
40	0.979	5.29	0.075614367	26.32	3.791646133
60	1.602	5.29	0.11342155	26.32	6.204511854
80	2.403	5.29	0.151228733	26.32	9.306767781
100	3.115	5.29	0.189035917	26.32	12.06432861
120	3.649	5.29	0.2268431	26.32	14.13249922
140	3.827	5.29	0.264650284	26.32	14.82188943
160	3.7024	5.29	0.302457467	26.32	14.33931628
180	3.382	5.29	0.34026465	26.32	13.09841391
200	3.115	5.29	0.378071834	26.32	12.06432861
220	2.759	5.29	0.415879017	26.32	10.68554819
240	2.492	5.29	0.4536862	26.32	9.651462884
260	1.9224	5.29	0.491493384	26.32	7.445414225

ตาราง ข.59 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.0 PE 3.5 ชั้นที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.29	0	27.23	0
20	0.89	5.29	0.037807183	27.23	3.331757294
40	1.602	5.29	0.075614367	27.23	5.997163129
60	2.581	5.29	0.11342155	27.23	9.662096152
80	3.382	5.29	0.151228733	27.23	12.66067772
100	3.916	5.29	0.189035917	27.23	14.65973209
120	4.0584	5.29	0.2268431	27.23	15.19281326
140	3.738	5.29	0.264650284	27.23	13.99338063
160	3.026	5.29	0.302457467	27.23	11.3279748
180	2.67	5.29	0.34026465	27.23	9.995271881
200	1.958	5.29	0.378071834	27.23	7.329866046
220	1.246	5.29	0.415879017	27.23	4.664460211

ตาราง ข.60 ค่าการทดสอบกำลังอัดมอร์ต้า อัตราส่วน S 0.0 PE 3.5 ชั้นที่ 3 อายุการบ่ม 28 วัน

ระยะยวบตัว X0.01 mm	กำลังอัด (kN)	ความสูงของ ชั้นทดสอบ (cm)	ความเครียด X0.01 mm	พื้นที่รับแรงอัด (cm ²)	ความเค้น (kg/cm ²)
0	0	5.29	0	26.11	0
20	0.4984	5.29	0.037807183	26.11	1.945817718
40	1.068	5.29	0.075614367	26.11	4.169609396
60	1.78	5.29	0.11342155	26.11	6.949348993
80	2.403	5.29	0.151228733	26.11	9.381621141
100	3.115	5.29	0.189035917	26.11	12.16136074
120	3.56	5.29	0.2268431	26.11	13.89869799
140	3.56	5.29	0.264650284	26.11	13.89869799
160	3.026	5.29	0.302457467	26.11	11.81389329
180	2.67	5.29	0.34026465	26.11	10.42402349
200	2.314	5.29	0.378071834	26.11	9.034153692

ภาคผนวก ค
ตารางการทดสอบคอนกรีตสด

ตาราง ค. 1 ผลการทดสอบของคอนกรีตสด

Mix ID	Slump test (mm)	Slump flow (mm)	V-funnel (Sec)	L-box blocking ratio (H2/H1)	J-ring (mm)
C560-0.4-PE0	N.A.	680	27.16	0.92	630
C560-0.4-PE5	N.A.	720	50.51	0.92	670
C560-0.4-PE10	N.A.	555	40.18	0.22	565
C560-0.4-PE15	N.A.	528	45.51	0.3	520
C660-0.4-PE0	N.A.	715	46.21	1	715
C660-0.4-PE5	N.A.	740	53.11	0.6	810
C660-0.4-PE10	N.A.	620	60.35	1	625
C660-0.4-PE15	N.A.	535	73.53	0.68	590
C320-0.5-PE0	130	460	9.26	N.A.	360
C320-0.5-PE20	130	422.5	4	N.A.	440
C320-0.5-PE40	120	490	6.2	N.A.	460
C320-0.5-PE60	130	460	6.82	N.A.	385
C320-0.6-PE0	140	405	7	N.A.	407.5
C320-0.6-PE20	150	405	5	N.A.	410
C320-0.6-PE40	150	460	4.15	N.A.	420
C320-0.6-PE60	140	322.5	7	N.A.	315

ตาราง ค. 2 ผลการทดสอบของค่าการสูญเสียการยุบตัว

ตัวอย่าง	เวลา	เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง (mm)		ค่าเฉลี่ย (mm)
	(min)	D1	D2	
C560-0.4-PE0	5	680	670	675
	10	680	670	675
	15	620	620	620
	20	600	615	607.5
	25	585	520	552.5
	30	560	570	565
	35	490	470	480
	40	440	400	420
	45	380	360	370
C560-0.4-PE5	5	640	620	630
	10	595	605	600
	15	540	570	555
	20	535	540	537.5
	25	510	515	512.5
	30	380	420	400
	35	380	380	380
C660-0.4-PE5	5	655	620	637.5
	10	570	550	560
	15	545	540	542.5
	20	500	540	520
	25	520	540	530
	30	510	515	512.5
	35	350	420	385

ภาคผนวก ง

ตารางการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วผสมเม็ดพลาสติก

ตาราง ง.1 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 560 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C560-0.4-PE10	7	0.101	0.200	0.00803	3.148	75.679	9.421	15.187
C560-0.4-PE10	7	0.101	0.200	0.00802	3.385	148.084	18.466	
C560-0.4-PE10	7	0.101	0.198	0.00801	3.313	141.537	17.673	
C560-0.4-PE10	14	0.100	0.199	0.00787	3.138	123.532	15.689	14.526
C560-0.4-PE10	14	0.101	0.199	0.00808	3.209	111.304	13.774	
C560-0.4-PE10	14	0.100	0.199	0.00785	3.118	110.822	14.114	
C560-0.4-PE10	28	0.102	0.202	0.00817	3.350	137.300	16.798	16.386
C560-0.4-PE10	28	0.102	0.200	0.00818	3.385	159.300	19.472	
C560-0.4-PE10	28	0.102	0.198	0.00811	3.210	104.500	12.888	

ตาราง ง.2 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 560 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิล ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุการบ่ม (days)	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (m)	ความยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kN)	หน่วยแรงอัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรงอัดประลัยเฉลี่ย (Mpa)
C560-0.4-PE0	7	0.100	0.198	0.00783	3.694	347.092	44.353	49.776
C560-0.4-PE0	7	0.101	0.200	0.00801	3.785	472.711	59.029	
C560-0.4-PE0	7	0.101	0.200	0.00795	3.738	365.447	45.946	
C560-0.4-PE0	14	0.101	0.201	0.00802	3.728	330.355	41.206	37.954
C560-0.4-PE0	14	0.101	0.198	0.00804	3.737	290.132	36.070	
C560-0.4-PE0	14	0.100	0.199	0.00787	3.665	287.756	36.585	
C560-0.4-PE0	28	0.101	0.201	0.00808	3.844	345.800	42.816	37.428
C560-0.4-PE0	28	0.100	0.198	0.00791	3.729	255.151	32.250	
SCC2-P0-SP	28	0.101	0.184	0.00795	3.712	295.838	37.219	

ตาราง ง.2 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 660 ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิล ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุการบ่ม (days)	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (m)	ความยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัดประลัย (kN)	หน่วยแรงอัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรงอัดประลัยเฉลี่ย (Mpa)
C660-0.4-PE15	7	0.101	0.200	0.00805	3.043	107.741	13.391	14.324
C660-0.4-PE15	7	0.101	0.197	0.00802	3.138	110.341	13.754	
C660-0.4-PE15	7	0.101	0.198	0.00805	3.124	127.400	15.826	
C660-0.4-PE15	14	0.100	0.198	0.00792	3.183	109.763	13.853	12.107
C660-0.4-PE15	14	0.101	0.201	0.00802	3.234	76.160	9.493	
C660-0.4-PE15	14	0.101	0.197	0.00795	3.129	103.216	12.975	
C660-0.4-PE15	28	0.102	0.198	0.00822	3.050	56.230	6.840	10.448
C660-0.4-PE15	28	0.101	0.197	0.00807	3.087	102.638	12.723	
C660-0.4-PE15	28	0.102	0.199	0.00816	3.285	96.187	11.781	

ตาราง ง.3 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 660 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C660-0.4-PE10	7	0.101	0.185	0.00799	3.234	134.989	16.893	15.421
C660-0.4-PE10	7	0.102	0.199	0.00813	3.265	80.012	9.838	
C660-0.4-PE10	7	0.100	0.198	0.00792	3.292	154.631	19.530	
C660-0.4-PE10	14	0.101	0.199	0.00794	3.447	60.177	7.579	12.702
C660-0.4-PE10	14	0.101	0.197	0.00794	2.987	31.003	3.904	
C660-0.4-PE10	14	0.101	0.196	0.00803	3.503	143.174	17.826	
C660-0.4-PE10	28	0.101	0.185	0.00798	3.203	50.000	6.267	11.260
C660-0.4-PE10	28	0.101	0.200	0.00799	3.381	129.886	16.252	
C660-0.4-PE10	28	0.101	0.193	0.00807	2.534	19.700	2.442	

ตาราง ง.4 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 660 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C660-0.4-PE5	7	0.101	0.198	0.00801	3.462	188.812	23.585	19.255
C660-0.4-PE5	7	0.100	0.195	0.00787	3.306	85.885	10.908	
C660-0.4-PE5	7	0.102	0.201	0.00811	3.620	188.812	23.271	
C660-0.4-PE5	14	0.100	0.097	0.00784	3.059	37.743	4.816	22.119
C660-0.4-PE5	14	0.103	0.198	0.00829	3.457	143.655	17.321	
C660-0.4-PE5	14	0.100	0.194	0.00786	3.467	211.438	26.918	
C660-0.4-PE5	28	0.101	0.197	0.00795	3.592	215.964	27.167	31.058
C660-0.4-PE5	28	0.100	0.200	0.00791	3.637	296.123	37.453	
C660-0.4-PE5	28	0.101	0.198	0.00796	3.610	227.300	28.555	

ตาราง ง.5 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 660 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C660-0.4-PE0	7	0.102	0.199	0.00821	3.797	330.352	40.239	39.748
C660-0.4-PE0	7	0.100	0.199	0.00789	3.776	236.280	29.960	
C660-0.4-PE0	7	0.100	0.201	0.00779	3.756	382.173	49.045	
C660-0.4-PE0	14	0.102	0.202	0.00819	3.866	333.871	40.752	41.737
C660-0.4-PE0	14	0.100	0.199	0.00790	3.703	240.61	29.369	
C660-0.4-PE0	14	0.100	0.198	0.00787	3.631	433.816	55.088	
C660-0.4-PE0	28	0.100	0.197	0.00786	3.710	430.867	54.852	56.159
C660-0.4-PE0	28	0.102	0.197	0.00813	3.787	312.484	38.427	
C660-0.4-PE0	28	0.101	0.200	0.00795	3.761	597.853	75.196	

ตาราง ง.6 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 320 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิล ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C320-0.5-PE0	14	0.101	0.201	0.00806	3.923	140.243	17.389	16.776
C320-0.5-PE0	14	0.102	0.203	0.00814	3.867	134.680	16.547	
C320-0.5-PE0	14	0.101	0.201	0.00796	3.765	130.464	16.392	
C320-0.5-PE0	21	0.101	0.203	0.00800	3.751	200.462	25.054	22.004
C320-0.5-PE0	21	0.101	0.201	0.00796	3.711	174.369	21.894	
C320-0.5-PE0	21	0.100	0.200	0.00792	3.748	151.028	19.064	
C320-0.5-PE0	28	0.101	0.203	0.00797	3.719	167.038	20.946	22.776
C320-0.5-PE0	28	0.100	0.200	0.00791	3.629	180.308	22.790	
C320-0.5-PE0	28	0.102	0.203	0.00814	3.542	200.170	24.593	

ตาราง ง.7 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 320 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C320-0.5-PE10	14	0.101	0.201	0.00799	0.102	84.922	10.635	11.984
C320-0.5-PE10	14	0.101	0.201	0.00802	0.102	98.498	12.286	
C320-0.5-PE10	14	0.102	0.201	0.00811	0.101	105.719	13.031	
C320-0.5-PE10	21	0.101	0.204	0.00804	0.104	118.910	14.793	10.759
C320-0.5-PE10	21	0.100	0.203	0.00785	0.102	55.363	7.049	
C320-0.5-PE10	21	0.102	0.202	0.00809	0.102	84.441	10.436	
C320-0.5-PE10	28	0.100	0.203	0.00791	0.103	81.937	10.363	10.522
C320-0.5-PE10	28	0.101	0.206	0.00794	0.103	86.174	10.856	
C320-0.5-PE10	28	0.101	0.204	0.00796	0.103	82.354	10.347	

ตาราง ง.8 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 320 ผสมเม็ดพลาสติกรีไซเคิล ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C320-0.5-PE20	14	0.101	0.203	0.00806	3.304	61.044	7.574	11.696
C320-0.5-PE20	14	0.102	0.205	0.00823	3.202	78.182	9.499	
C320-0.5-PE20	14	0.101	0.204	0.00799	3.190	143.944	18.014	
C320-0.5-PE20	21	0.100	0.202	0.00792	3.168	88.773	11.213	10.797
C320-0.5-PE20	21	0.099	0.203	0.00775	3.181	84.826	10.946	
C320-0.5-PE20	21	0.100	0.201	0.00778	3.200	79.625	10.233	
C320-0.5-PE20	28	0.101	0.203	0.00794	3.150	85.981	10.832	11.418
C320-0.5-PE20	28	0.102	0.205	0.00823	3.283	99.653	12.108	
C320-0.5-PE20	28	0.101	0.203	0.00799	3.441	90.412	11.315	

ตาราง ง.9 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 400 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C400-0.5-PE0	7	0.100	0.202	0.00787	3.768	181.275	23.035	23.618
C400-0.5-PE0	7	0.102	0.202	0.00810	3.727	189.967	23.447	
C400-0.5-PE0	7	0.101	0.202	0.00798	3.787	194.508	24.374	
C400-0.5-PE0	14	0.100	0.202	0.00781	3.621	252.359	32.325	30.019
C400-0.5-PE0	14	0.100	0.203	0.00792	3.787	237.916	30.032	
C400-0.5-PE0	14	0.101	0.203	0.00806	3.771	223.241	27.699	
C400-0.5-PE0	21	0.101	0.204	0.00795	3.764	252.359	31.749	30.380
C400-0.5-PE0	21	0.101	0.202	0.00794	3.666	237.916	29.972	
C400-0.5-PE0	21	0.102	0.205	0.00817	3.818	240.241	29.420	
C400-0.5-PE0	28	0.101	0.205	0.00806	3.738	242.842	30.111	30.518
C400-0.5-PE0	28	0.101	0.204	0.00795	3.736	233.655	29.377	
C400-0.5-PE0	28	0.100	0.203	0.00791	3.734	253.529	32.066	

ตาราง ง.10 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 400 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซไคเคิล ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C400-0.5-PE10	7	0.100	0.202	0.00789	3.514	173.118	21.940	16.689
C400-0.5-PE10	7	0.101	0.204	0.00794	3.573	115.444	14.543	
C400-0.5-PE10	7	0.103	0.202	0.00832	3.420	113.037	13.584	
C400-0.5-PE10	14	0.101	0.204	0.00803	3.531	134.797	16.780	15.993
C400-0.5-PE10	14	0.100	0.203	0.00783	3.482	131.812	16.839	
C400-0.5-PE10	14	0.100	0.204	0.00789	3.501	113.229	14.359	
C400-0.5-PE10	21	0.101	0.204	0.00796	3.480	131.619	31.686	30.768
C400-0.5-PE10	21	0.100	0.203	0.00781	3.481	100.039	30.455	
C400-0.5-PE10	21	0.101	0.205	0.00796	3.564	110.533	30.165	
C400-0.5-PE10	28	0.101	0.200	0.00801	3.511	135.952	16.980	15.010
C400-0.5-PE10	28	0.100	0.200	0.00788	3.599	110.533	14.027	
C400-0.5-PE10	28	0.101	0.200	0.00794	3.523	111.400	14.024	

ตาราง ง.11 ผลการทดสอบการต้านทานกำลังอัดของคอนกรีต C 400 ผสมเม็ดพลาสติกกรีซเคลิล ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	แรงอัด ประลัย (kN)	หน่วยแรง อัดประลัย (Mpa)	หน่วยแรง อัดประลัย เฉลี่ย (Mpa)
C400-0.5-PE20	7	0.101	0.206	0.00797	3.246	96.283	12.073	10.734
C400-0.5-PE20	7	0.100	0.202	0.00793	3.284	80.782	10.190	
C400-0.5-PE20	7	0.099	0.203	0.00775	3.278	77.027	9.939	
C400-0.5-PE20	14	0.100	0.204	0.00787	3.324	97.054	12.324	10.864
C400-0.5-PE20	14	0.102	0.203	0.00810	3.273	87.425	10.798	
C400-0.5-PE20	14	0.100	0.204	0.00790	3.331	74.812	9.468	
C400-0.5-PE20	21	0.103	0.205	0.00827	3.327	80.204	15.909	14.222
C400-0.5-PE20	21	0.100	0.203	0.00781	3.254	96.187	12.806	
C400-0.5-PE20	21	0.100	0.205	0.00792	3.282	76.353	13.952	
C400-0.5-PE20	28	0.102	0.204	0.00818	3.305	81.745	9.997	11.979
C400-0.5-PE20	28	0.100	0.205	0.00779	3.230	102.638	13.173	
C400-0.5-PE20	28	0.101	0.206	0.00796	3.288	101.675	12.766	

ตาราง ง.12 ผลการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ตัวอย่าง	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต ที่อายุบ่มต่างๆ (GPa)			
	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
C560-0.4-PE0	74.98	99.95	102.04	104.13
C560-0.4-PE5	74.01	47.37	48.53	49.69
C560-0.4-PE10	49.52	51.08	39.59	28.10
C560-0.4-PE15	40.31	33.33	29.55	25.77
C660-0.4-PE0	78.96	56.59	67.86	79.12
C660-0.4-PE5	43.06	49.31	55.99	62.67
C660-0.4-PE10	26.75	27.57	28.67	29.77
C660-0.4-PE15	18.06	21.32	21.7	22.08
C320-0.5-PE0	34.06	74.79	46.04	86.60
C320-0.5-PE10	34.52	57.01	38.16	18.40
C320-0.5-PE20	22.43	15.33	58.33	65.61
C400-0.5-PE0	59.70	70.77	61.75	65.63
C400-0.5-PE10	62.14	66.19	78.22	51.17
C400-0.5-PE20	28.92	38.67	29.56	37.16

ตาราง ง.13 ผลการทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต C 560 ผสมเม็ดรีไซเคิล ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง	ความ ยาว	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	กระแสวิ่ง Ultrasonic (μ s)	ความเร็ว คลื่น (m/s)	ความเร็ว คลื่น เฉลี่ย (m/s)
C560-0.4-PE0	7	0.100	0.198	0.00783	3.694	42.000	4726	4797
C560-0.4-PE0	7	0.101	0.200	0.00801	3.785	41.700	4792	
C560-0.4-PE0	7	0.101	0.200	0.00795	3.738	41.067	4872	
C560-0.4-PE0	14	0.101	0.201	0.00802	3.728	40.900	4915	4843
C560-0.4-PE0	14	0.101	0.198	0.00804	3.737	40.400	4901	
C560-0.4-PE0	14	0.100	0.199	0.00787	3.665	42.233	4712	
C560-0.4-PE0	28	0.101	0.201	0.00808	3.844	41.733	4816	4772
C560-0.4-PE0	28	0.100	0.198	0.00791	3.729	39.733	4984	
SCC2-P0-SP	28	0.101	0.184	0.00795	3.712	40.733	4517	

ตาราง ง.14 ผลการทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต C 560 ผสมเม็ดรีไซเคิล ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง	ความ ยาว	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	กระแสคลื่น Ultrasonic (μ s)	ความเร็ว คลื่น (m/s)	ความเร็ว คลื่น เฉลี่ย (m/s)
C560-0.4-PE5	7	0.101	0.201	0.00809	3.586	43.400	4633	4723
C560-0.4-PE5	7	0.102	0.199	0.00815	3.675	42.067	4733	
C560-0.4-PE5	7	0.103	0.198	0.00826	3.630	41.233	4802	
C560-0.4-PE5	14	0.102	0.197	0.00810	3.605	41.067	4797	4683
C560-0.4-PE5	14	0.100	0.195	0.00785	3.531	41.400	4712	
C560-0.4-PE5	14	0.101	0.197	0.00796	3.584	43.400	4540	
C560-0.4-PE5	28	0.100	0.199	0.00779	3.518	43.400	4568	4590
C560-0.4-PE5	28	0.100	0.198	0.00793	3.643	42.733	4657	
C560-0.4-PE5	28	0.101	0.198	0.00794	3.502	43.567	4545	

ตาราง ง.15 ผลการทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต C 560 ผสมเม็ดรีไซเคิล ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง	ความ ยาว	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	กระแสวิ่ง Ultrasonic (μs)	ความเร็ว คลื่น (m/s)	ความเร็ว คลื่น เฉลี่ย (m/s)
C560-0.4-PE10	7	0.101	0.200	0.00803	3.148	51.567	3879	4034
C560-0.4-PE10	7	0.101	0.200	0.00802	3.385	47.233	4234	
C560-0.4-PE10	7	0.101	0.198	0.00801	3.313	49.900	3988	
C560-0.4-PE10	14	0.100	0.199	0.00787	3.138	46.567	4274	4244
C560-0.4-PE10	14	0.101	0.199	0.00808	3.209	46.067	4305	
C560-0.4-PE10	14	0.100	0.199	0.00785	3.118	47.900	4154	
C560-0.4-PE10	28	0.102	0.202	0.00817	3.350	46.400	4686	4416
C560-0.4-PE10	28	0.102	0.200	0.00818	3.385	46.567	4295	
C560-0.4-PE10	28	0.102	0.198	0.00811	3.210	46.400	4267	

ตาราง ง.16 ผลการทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต C 560 ผสมเม็ดรีไซเคิล ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ	ขนาดเส้น	ความ	พื้นที่	น้ำหนัก	กระแสคลื่น	ความเร็ว	ความเร็ว
	การ	ผ่า	ยาว	(m ²)	(kg)	Ultrasonic	คลื่น	คลื่น
	บ่ม	ศูนย์กลาง				(μs)	(m/s)	เฉลี่ย
	(days)							(m/s)
C560-0.4-PE15	7	0.100	0.199	0.00786	2.975	52.567	3786	3930
C560-0.4-PE15	7	0.102	0.201	0.00814	3.069	50.733	3942	
C560-0.4-PE15	7	0.101	0.200	0.00804	3.148	49.233	4063	
C560-0.4-PE15	14	0.101	0.199	0.00804	3.133	49.567	3975	3946
C560-0.4-PE15	14	0.101	0.201	0.00797	3.028	51.067	3860	
C560-0.4-PE15	14	0.102	0.198	0.00813	3.042	49.233	4002	
C560-0.4-PE15	28	0.101	0.197	0.00793	3.018	48.733	4043	3959
C560-0.4-PE15	28	0.100	0.199	0.00788	2.939	50.900	3910	
C560-0.4-PE15	28	0.102	0.201	0.00815	3.076	51.233	3924	

ตาราง ง.17 ผลการทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต C 660 ผสมเม็ดรีไซเคิล ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	กระแสวิก Ultrasonic (μ s)	ความเร็ว คลื่น (m/s)	ความเร็ว คลื่น เฉลี่ย (m/s)
C660-0.4-PE0	7	0.102	0.199	0.00821	3.797	40.567	4906	4923
C660-0.4-PE0	7	0.100	0.199	0.00789	3.776	40.067	4967	
C660-0.4-PE0	7	0.100	0.201	0.00779	3.756	41.067	4895	
C660-0.4-PE0	14	0.102	0.202	0.00819	3.866	40.400	5000	4984
C660-0.4-PE0	14	0.100	0.199	0.00790	3.703	40.567	4906	
C660-0.4-PE0	14	0.100	0.198	0.00787	3.631	39.233	5047	
C660-0.4-PE0	28	0.100	0.197	0.00786	3.710	39.233	5031	5002
C660-0.4-PE0	28	0.102	0.197	0.00813	3.787	38.900	5064	
C660-0.4-PE0	28	0.101	0.200	0.00795	3.761	40.733	4910	

ตาราง ง.18 ผลการทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต C 660 ผสมเม็ดรีไซเคิล ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	กระแสวิก Ultrasonic (μs)	ความเร็ว คลื่น (m/s)	ความเร็ว คลื่น เฉลี่ย (m/s)
C660-0.4-PE5	7	0.101	0.198	0.00801	3.462	43.567	4545	4473
C660-0.4-PE5	7	0.100	0.195	0.00787	3.306	47.400	4115	
C660-0.4-PE5	7	0.102	0.201	0.00811	3.620	42.233	4760	
C660-0.4-PE5	14	0.100	0.097	0.00784	3.059	53.733	3610	4224
C660-0.4-PE5	14	0.103	0.198	0.00829	3.457	45.067	4394	
C660-0.4-PE5	14	0.100	0.194	0.00786	3.467	41.567	4667	
C660-0.4-PE5	28	0.101	0.197	0.00795	3.592	41.567	4739	4691
C660-0.4-PE5	28	0.100	0.200	0.00791	3.637	42.900	4662	
C660-0.4-PE5	28	0.101	0.198	0.00796	3.610	42.400	4670	

ตาราง ง.19 ผลการทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต C 660 ผสมเม็ดรีไซเคิล ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	กระแสวิก Ultrasonic (μ s)	ความเร็ว คลื่น (m/s)	ความเร็ว คลื่น เฉลี่ย (m/s)
C660-0.4-PE10	7	0.101	0.185	0.00799	3.234	40.400	4579	4445
C660-0.4-PE10	7	0.102	0.199	0.00813	3.265	47.067	4228	
C660-0.4-PE10	7	0.100	0.198	0.00792	3.292	43.733	4528	
C660-0.4-PE10	14	0.101	0.199	0.00794	3.447	42.067	4731	4111
C660-0.4-PE10	14	0.101	0.197	0.00794	2.987	63.900	3083	
C660-0.4-PE10	14	0.101	0.196	0.00803	3.503	43.400	4518	
C660-0.4-PE10	28	0.101	0.185	0.00798	3.203	39.233	4716	3991
C660-0.4-PE10	28	0.101	0.200	0.00799	3.381	43.400	4609	
C660-0.4-PE10	28	0.101	0.193	0.00807	2.534	72.900	2647	

ตาราง ง.20 ผลการทดสอบคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตราโซนิกของคอนกรีต C 660 ผสมเม็ดรีไซเคิล ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การ บ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่า ศูนย์กลาง (m)	ความ ยาว (m)	พื้นที่ (m ²)	น้ำหนัก (kg)	กระแสวิ่ง Ultrasonic (μ s)	ความเร็ว คลื่น (m/s)	ความเร็ว คลื่น เฉลี่ย (m/s)
C660-0.4-PE15	7	0.101	0.200	0.00805	3.043	51.567	3879	4016
C660-0.4-PE15	7	0.101	0.197	0.00802	3.138	46.900	4201	
C660-0.4-PE15	7	0.101	0.198	0.00805	3.124	49.900	3969	
C660-0.4-PE15	14	0.100	0.198	0.00792	3.183	47.733	4148	4280
C660-0.4-PE15	14	0.101	0.201	0.00802	3.234	47.233	4256	
C660-0.4-PE15	14	0.101	0.197	0.00795	3.129	44.400	4437	
C660-0.4-PE15	28	0.102	0.198	0.00822	3.050	50.033	3968	4047
C660-0.4-PE15	28	0.101	0.197	0.00807	3.087	50.733	3883	
C660-0.4-PE15	28	0.102	0.199	0.00816	3.285	46.400	4289	

ตาราง ง.21 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 560 ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C560-0.4-PE0	7	9.982	19.848	78.3	3.694	4.398	4.723
	7	10.098	20.035	80.1	3.785	5.262	
	7	10.063	19.996	79.5	3.738	4.509	
	14	10.103	20.091	80.2	3.728	4.797	4.685
	14	10.120	19.847	80.4	3.737	4.510	
	14	10.007	19.935	78.7	3.665	4.748	
	28	10.141	20.063	80.8	3.844	3.659	3.836
	28	10.037	19.816	79.1	3.729	3.980	
	28	10.060	18.376	79.5	3.712	3.871	

ตาราง ง.22 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 560 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C560-0.4-PE5	7	10.148	20.130	80.9	3.586	4.948	4.651
	7	10.189	19.915	81.5	3.675	4.413	
	7	10.254	19.830	82.6	3.63	4.593	
	14	10.157	19.715	81.0	3.605	3.649	4.094
	14	10.000	19.472	78.5	3.531	4.392	
	14	10.067	19.700	79.6	3.584	4.242	
	28	9.961	19.925	77.9	3.518	3.030	3.322
	28	10.047	19.835	79.3	3.643	3.487	
	28	10.053	19.805	79.4	3.502	3.447	

ตาราง ง.23 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 560 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C560-0.4-PE10	7	10.113	19.950	80.3	3.148	10.765	6.920
	7	10.105	19.975	80.2	3.385	5.078	
	7	10.098	19.831	80.1	3.313	4.916	
	14	10.013	19.870	78.7	3.138	4.747	4.876
	14	10.143	19.947	80.8	3.209	5.282	
	14	9.999	19.856	78.5	3.118	4.599	
	28	10.201	20.235	81.7	3.35	3.468	3.563
	28	10.206	20.025	81.8	3.385	3.548	
	28	10.161	19.820	81.1	3.21	3.672	

ตาราง ง.24 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 560 ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C560-0.4-PE15	7	10.005	19.926	78.6	2.975	5.619	5.352
	7	10.179	20.077	81.4	3.069	5.472	
	7	10.120	19.970	80.4	3.148	4.965	
	14	10.117	19.935	80.4	3.133	6.019	6.189
	14	10.076	20.131	79.7	3.028	5.928	
	14	10.172	19.772	81.3	3.042	6.622	
	28	10.050	19.700	79.3	3.018	3.840	3.857
	28	10.017	19.946	78.8	2.939	4.010	
	28	10.189	20.100	81.5	3.076	3.721	

ตาราง ง.25 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 660 ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C660-0.4-PE0	7	10.224	19.862	82.1	3.797	6.711	6.637
	7	10.021	19.927	78.9	3.776	7.028	
	7	9.961	20.131	77.9	3.756	6.171	
	14	10.213	20.175	81.9	3.866	5.919	6.692
	14	10.030	19.875	79.0	3.703	6.588	
	14	10.013	19.830	78.7	3.631	7.568	
	28	10.001	19.696	78.6	3.71	5.156	5.036
	28	10.175	19.670	81.3	3.787	5.281	
	28	10.061	20.010	79.5	3.761	4.671	

ตาราง ง.26 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 660 ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C660-0.4-PE5	7	10.096	19.775	80.1	3.462	6.059	5.544
	7	10.013	19.530	78.7	3.306	4.205	
	7	10.164	20.120	81.1	3.62	6.368	
	14	9.989	9.700	78.4	3.059	4.828	5.793
	14	10.276	19.807	82.9	3.457	7.342	
	14	10.001	19.367	78.6	3.467	5.210	
	28	10.061	19.690	79.5	3.592	5.670	5.347
	28	10.033	19.960	79.1	3.637	5.303	
	28	10.067	19.783	79.6	3.61	5.067	

ตาราง ง.27 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 660 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C660-0.4-PE10	7	10.087	18.520	79.9	3.234	6.228	6.243
	7	10.176	19.940	81.3	3.265	6.457	
	7	10.040	19.805	79.2	3.292	6.044	
	14	10.055	19.870	79.4	3.447	6.722	5.620
	14	10.056	19.654	79.4	2.987	4.649	
	14	10.113	19.634	80.3	3.503	5.489	
	28	10.079	18.492	79.8	3.203	5.921	5.303
	28	10.087	19.982	79.9	3.381	6.170	
	28	10.135	19.320	80.7	2.534	3.819	

ตาราง ง.28 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 660 ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C660-0.4-PE15	7	10.121	20.002	80.5	3.043	8.867	8.491
	7	10.107	19.715	80.2	3.138	7.919	
	7	10.124	19.831	80.5	3.124	8.688	
	14	10.044	19.830	79.2	3.183	7.910	7.427
	14	10.107	20.116	80.2	3.234	7.555	
	14	10.064	19.715	79.5	3.129	6.816	
	28	10.231	19.826	82.2	3.05	4.648	5.477
	28	10.135	19.725	80.7	3.087	6.292	
	28	10.196	19.867	81.6	3.285	5.491	

ตาราง ง.29 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตของ C 320 ร้อยละ 0 40 และ 60 โดย
น้ำหนัก

ตัวอย่าง	อายุ การบ่ม (days)	ขนาดเส้น ผ่าศูนย์กลาง (cm)	ความ ยาว (cm)	พื้นที่ หน้าตัด (m ²)	น้ำหนัก (kg)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า (k Ω cm)	สภาพต้าน ทานไฟฟ้า เฉลี่ย (k Ω cm)
C320-0.5-PE0	28	10	20.4	78.53981634	3.765	6.40	6.586
	28	10	20	78.53981634	3.796	7.11	
	28	10	20.4	78.53981634	3.685	6.26	
C320-0.5-PE40	28	10.1	20.1	80.11846665	2.544	21.50	13.708
	28	10	19.9	78.53981634	2.579	8.09	
	28	10	19.9	78.53981634	2.51	11.53	
C320-0.5-PE60	28	10.1	20.17	80.11846665	2.192	13.56	13.178
	28	10.1	19.56	80.11846665	2.137	12.52	
	28	10.2	19.8	81.71282492	2.203	13.45	

ตาราง ง.30 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C560-0.4-PEO

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	11.21	26.50	27.0
1	12.21	28.00	27.2
2	13.21	27.30	26.8
3	14.21	27.10	26.8
4	15.21	27.00	27.1
5	16.21	27.10	26.8
6	17.21	27.20	26.3
7	18.21	27.50	26.4
8	19.21	28.10	26.5
9	20.21	29.20	27.1
10	21.21	30.40	27.2
11	22.21	31.60	27.2
12	23.21	32.50	27.2
13	24.21	32.90	27.3
14	1.21	33.00	27.3
15	2.21	32.80	27.3
16	3.21	32.40	27.2
17	4.21	31.90	27.3
18	5.21	31.40	27.3
19	6.21	31.00	27.2
20	7.21	30.70	27.2
21	8.21	30.40	27.3
22	9.21	30.20	27.4
23	10.21	30.10	27.5
24	11.21	29.60	26.8

ตาราง ง.31 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C560-0.4-PE0 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
25	12.21	29.20	26.5
26	13.21	29.10	28.5
27	14.21	29.10	27.3
28	15.21	28.90	26.8
29	16.21	28.50	26.4
30	17.21	28.30	26.6
31	18.21	28.40	27.2
32	19.21	28.40	27.4

ตาราง ง.32 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C560-0.4-PE5

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	11.53	26.70	27.0
1	12.53	29.10	27.2
2	13.53	28.10	26.8
3	14.53	27.50	26.8
4	15.53	27.20	27.1
5	16.53	27.20	26.8
6	17.53	27.20	26.3
7	18.53	27.40	26.4
8	19.53	28.10	26.5
9	20.53	29.10	27.1
10	21.53	30.20	27.2
11	22.53	31.40	27.2
12	23.53	32.30	27.2
13	24.53	33.00	27.3
14	1.53	33.30	27.3
15	2.53	33.30	27.3
16	3.53	33.20	27.2
17	4.53	32.60	27.3
18	5.53	32.10	27.3
19	6.53	31.60	27.2
20	7.53	31.30	27.2
21	8.53	30.90	27.3
22	9.53	30.60	27.4
23	10.53	30.10	27.5

ตาราง ง.33 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C560-0.4-PE5 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
24	11.53	29.80	26.8
25	12.53	29.30	26.5
26	13.53	29.30	28.5
27	14.53	29.20	27.3
28	15.53	28.80	26.8
29	16.53	28.40	26.4
30	17.53	28.40	26.6
31	18.53	28.50	27.2
32	19.53	28.50	27.4

ตาราง ง.34 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C560-0.4-PE10

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	12.22	26.50	27.0
1	13.22	28.60	27.2
2	14.22	27.70	26.8
3	15.22	27.10	26.8
4	16.22	27.10	27.1
5	17.22	26.90	26.8
6	18.22	26.80	26.3
7	19.22	27.00	26.4
8	20.22	27.80	26.5
9	21.22	28.80	27.1
10	22.22	29.90	27.2
11	23.22	31.10	27.2
12	24.22	32.00	27.2
13	1.22	32.80	27.3
14	2.22	33.20	27.3
15	3.22	33.30	27.3
16	4.22	32.90	27.2
17	5.22	32.60	27.3
18	6.22	32.10	27.3
19	7.22	31.60	27.2
20	8.22	31.60	27.2
21	9.22	31.00	27.3
22	10.22	30.70	27.4
23	11.22	30.00	27.5

ตาราง ง.35 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C560-0.4-PE10 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
24	12.22	29.40	26.8
25	13.22	29.20	26.5
26	14.22	29.20	28.5
27	15.22	28.90	27.3
28	16.22	28.50	26.8
29	17.22	28.10	26.4
30	18.22	28.40	26.6
31	19.22	28.40	27.2
32	20.22	28.60	27.4

ตาราง ง.36 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C560-0.4-PE15

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	15.25	26.80	27.0
1	16.25	29.60	27.2
2	17.25	28.30	26.8
3	18.25	27.50	26.8
4	19.25	27.10	27.1
5	20.25	27.20	26.8
6	21.25	27.40	26.3
7	22.25	27.80	26.4
8	23.25	28.70	26.5
9	24.25	29.80	27.1
10	1.25	31.00	27.2
11	2.25	32.30	27.2
12	3.25	33.30	27.2
13	4.25	34.10	27.3
14	5.25	34.30	27.3
15	6.25	34.00	27.3
16	7.25	33.40	27.2
17	8.25	32.80	27.3
18	9.25	32.10	27.3
19	10.25	31.60	27.2
20	11.25	30.70	27.2
21	12.25	29.90	27.3
22	13.25	29.40	27.4
23	14.25	29.40	27.5

ตาราง ง.37 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C560-0.4-PE15 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
24	15.25	29.10	26.8
25	16.25	28.50	26.5
26	17.25	28.10	28.5
27	18.25	28.40	27.3
28	19.25	28.50	26.8
29	20.25	28.70	26.4
30	21.25	28.70	26.6
31	22.25	28.70	27.2
32	23.25	28.80	27.4

ตาราง ง.38 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C660-0.4-PE0

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	17.05	25.80	27.0
1	18.05	26.00	27.2
2	19.05	26.20	26.8
3	20.05	26.50	26.8
4	21.05	27.00	27.1
5	22.05	27.50	26.8
6	23.05	28.20	26.3
7	24.05	29.30	26.4
8	1.05	30.70	26.5
9	2.05	32.00	27.1
10	3.05	33.20	27.2
11	4.05	33.90	27.2
12	5.05	34.30	27.2
13	6.05	34.00	27.3
14	7.05	33.40	27.3
15	8.05	32.90	27.3
16	9.05	32.20	27.2
17	10.05	31.60	27.3
18	11.05	30.50	27.3
19	12.05	29.70	27.2
20	13.05	29.50	27.2
21	14.05	29.30	27.3
22	15.05	28.90	27.4
23	16.05	28.40	27.5

ตาราง ง.39 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C660-0.4-PE0 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
24	17.05	28.10	26.8
25	18.05	28.40	26.5
26	19.05	28.50	28.5
27	20.05	28.60	27.3
28	21.05	28.70	26.8
29	22.05	28.80	26.4
30	23.05	28.80	26.6
31	24.05	28.80	27.2
32	1.05	28.70	27.4

ตาราง ง.36 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C660-0.4-PE5

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	17.25	25.90	27.0
1	18.25	26.00	27.2
2	19.25	26.30	26.8
3	20.25	26.60	26.8
4	21.25	26.80	27.1
5	22.25	27.20	26.8
6	23.25	27.70	26.3
7	24.25	28.40	26.4
8	1.25	29.50	26.5
9	2.25	30.70	27.1
10	3.25	31.90	27.2
11	4.25	33.00	27.2
12	5.25	33.70	27.2
13	6.25	34.00	27.3
14	7.25	33.90	27.3
15	8.25	33.50	27.3
16	9.25	33.00	27.2
17	10.25	32.10	27.3
18	11.25	31.00	27.3
19	12.25	30.10	27.2
20	13.25	30.00	27.2
21	14.25	29.50	27.3
22	15.25	29.00	27.4
23	16.25	28.40	27.5
24	17.25	28.40	26.8

ตาราง ง.36 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C660-0.4-PE5 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
25	18.25	28.60	26.5
26	19.25	28.80	28.5
27	20.25	28.80	27.3
28	21.25	29.10	26.8
29	22.25	29.10	26.4
30	23.25	29.10	26.6
31	24.25	29.10	27.2
32	1.25	29.10	27.4

ตาราง ง.37 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C660-0.4-PE10

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	18.04	26.40	27.0
1	19.04	26.50	27.2
2	20.04	26.50	26.8
3	21.04	26.80	26.8
4	22.04	26.90	27.1
5	23.04	27.20	26.8
6	24.04	27.60	26.3
7	1.04	28.40	26.4
8	2.04	29.30	26.5
9	3.04	30.50	27.1
10	4.04	31.70	27.2
11	5.04	32.70	27.2
12	6.04	33.40	27.2
13	7.04	33.80	27.3
14	8.04	33.80	27.3
15	9.04	33.50	27.3
16	10.04	33.00	27.2
17	11.04	31.70	27.3
18	12.04	30.70	27.3
19	13.04	30.30	27.2
20	14.04	30.00	27.2
21	15.04	29.30	27.3
22	16.04	28.70	27.4
23	17.04	28.50	27.5
24	18.04	28.60	26.8
25	19.04	28.70	26.5

ตาราง ง.37 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C660-0.4-PE10 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
26	20.04	28.90	28.5
27	21.04	29.00	27.3
28	22.04	29.10	26.8
29	23.04	29.10	26.4
30	24.04	29.10	26.6
31	1.04	29.10	27.2
32	2.04	29.10	27.4

ตาราง ง.38 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C660-0.4-PE15

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	18.24	26.70	27.0
1	19.24	26.50	27.2
2	20.24	26.80	26.8
3	21.24	26.80	26.8
4	22.24	27.10	27.1
5	23.24	27.30	26.8
6	24.24	27.80	26.3
7	1.24	28.40	26.4
8	2.24	29.20	26.5
9	3.24	30.20	27.1
10	4.24	31.00	27.2
11	5.24	31.70	27.2
12	6.24	32.30	27.2
13	7.24	32.70	27.3
14	8.24	32.80	27.3
15	9.24	32.60	27.3
16	10.24	31.80	27.2
17	11.24	30.70	27.3
18	12.24	29.80	27.3
19	13.24	29.80	27.2
20	14.24	29.30	27.2
21	15.24	28.70	27.3
22	16.24	28.10	27.4
23	17.24	27.90	27.5
24	18.24	28.10	26.8

ตาราง ง.38 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C660-0.4-PE15 (ต่อ)

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
25	19.24	28.40	26.5
26	20.24	28.40	28.5
27	21.24	28.50	27.3
28	22.24	28.70	26.8
29	23.24	28.70	26.4
30	24.24	28.70	26.6
31	1.24	28.70	27.2
32	2.24	28.70	27.4

ตาราง ง.39 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C240-P0

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	19.58	24.0	26.1
4	23.58	29.1	27.2
8	3.58	33.4	27.2
12	7.58	37.9	27.2
16	11.58	37.9	26.7
20	15.58	36.7	26.8
24	19.58	35.4	26.2
28	23.58	34.2	25.3
32	3.58	33.1	26.8
36	7.58	32.2	27.0
40	11.58	31.5	26.6
44	15.58	31.0	26.5
48	19.58	30.4	27.5
52	23.58	30.1	27.2
56	3.58	29.8	27.2
60	7.58	29.5	27.2
64	11.58	29.2	27.4
68	15.58	29.0	26.8
72	19.58	28.7	25.9
76	23.58	28.4	25.9
80	3.58	28.1	27.2
84	7.58	27.9	27.4

ตาราง ง.40 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C240-P10

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	20.20	26.4	26.1
4	24.20	28.9	27.2
8	4.20	32.6	27.2
12	8.20	36.5	27.2
16	12.20	36.5	26.7
20	16.20	35.2	26.8
24	20.20	33.9	26.2
28	24.20	32.7	25.3
32	4.20	31.7	26.8
36	8.20	31.2	27.0
40	12.20	30.5	26.6
44	16.20	30.0	26.5
48	20.20	29.6	27.5
52	24.20	29.5	27.2
56	4.20	29.2	27.2
60	8.20	29.1	27.2
64	12.20	28.8	27.4
68	16.20	28.6	26.8
72	20.20	28.3	25.9
76	24.20	27.9	25.9
80	4.20	27.6	27.2
84	8.20	27.5	27.4

ตาราง ง.41 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีต C240-P20

ชั่วโมงที่	เวลาเริ่มทดสอบ Time (hr)	อุณหภูมิตรงกลาง Center,C(°C)	อุณหภูมิห้อง Ambient,A(°C)
0	20.42	26.5	26.1
4	24.42	28.7	27.2
8	4.42	32.0	27.2
12	8.42	35.3	27.2
16	12.42	35.6	26.7
20	16.42	34.6	26.8
24	20.42	33.4	26.2
28	24.42	32.3	25.3
32	4.42	31.5	26.8
36	8.42	30.9	27.0
40	12.42	30.2	26.6
44	16.42	29.8	26.5
48	20.42	29.5	27.5
52	24.42	29.3	27.2
56	4.42	29.2	27.2
60	8.42	29.0	27.2
64	12.42	28.7	27.4
68	16.42	28.5	26.8
72	20.42	28.1	25.9
76	24.42	27.7	25.9
80	4.42	27.5	27.2
84	8.42	27.5	27.4

ตาราง ง.42 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ C240-P0

Time (min)	Mix ID					
	Ampere (Amp)					
	Sample no.1	Temp NaOH (°C)	Temp NaCl (°C)	Sample no.2	Temp NaOH (°C)	Temp NaCl (°C)
0 I_0	0.02914	29.10	27.10	0.02368	28.60	27.20
30 I_{30}	0.03405	29.20	28.60	0.02860	30.00	29.50
60 I_{60}	0.03662	29.70	29.30	0.03028	30.40	30.10
90 I_{90}	0.03922	30.10	29.80	0.03180	31.00	30.70
120 I_{120}	0.0412	30.10	30.40	0.03289	31.40	31.30
150 I_{150}	0.0427	31.00	30.80	0.03389	31.80	31.70
180 I_{180}	0.0443	31.30	31.20	0.03474	32.30	32.00
210 I_{210}	0.0462	31.70	31.60	0.03572	32.50	32.40
240 I_{240}	0.0476	32.10	32.00	0.03635	32.70	32.50
270 I_{270}	0.0493	32.30	32.30	0.03718	33.00	32.80
300 I_{300}	0.05	32.70	32.70	0.03800	33.20	32.90
330 I_{330}	0.0513	33.10	33.10	0.03868	33.30	33.10
360 I_{360}	0.0522	33.30	33.30	0.03888	33.50	33.40
Charge passed (Coulomb),Q	941.688			771.93		

ตาราง ง.43 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ C240-P10

Time (min)	Mix ID					
	Ampere (Amp)					
	Sample no.1	Temp NaOH (°C)	Temp NaCl (°C)	Sample no.2	Temp NaOH (°C)	Temp NaCl (°C)
0 I_0	0.0547	29.10	28.30	0.02998	28.40	27.20
30 I_{30}	0.0604	30.40	30.00	0.03358	28.80	28.20
60 I_{60}	0.0655	31.70	31.40	0.0378	29.20	28.90
90 I_{90}	0.0696	32.90	32.70	0.0421	29.90	29.50
120 I_{120}	0.074	33.90	33.80	0.0452	30.50	30.10
150 I_{150}	0.0786	34.90	34.80	0.0474	31.00	30.70
180 I_{180}	0.0837	35.80	35.60	0.05	31.50	31.20
210 I_{210}	0.0886	36.60	36.50	0.0523	32.00	31.60
240 I_{240}	0.0929	37.40	37.40	0.0548	32.50	32.10
270 I_{270}	0.0949	38.00	38.00	0.056	33.10	32.60
300 I_{300}	0.0961	38.50	38.60	0.056	33.50	33.20
330 I_{330}	0.1023	39.00	39.10	0.0612	34.00	33.60
360 I_{360}	0.1061	39.40	39.60	0.0632	34.50	34.00
Charge passed (Coulomb),Q	1872.09			1106.226		

ตาราง ง.44 ผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ C240-P20

Time (min)	Mix ID					
	Ampere (Amp)					
	Sample no.1	Temp NaOH (°C)	Temp NaCl (°C)	Sample no.2	Temp NaOH (°C)	Temp NaCl (°C)
0 I_0	0.03867	26.2	26.00	0.0477	27.50	27.40
30 I_{30}	0.0405	27.4	27.20	0.0547	29.10	28.90
60 I_{60}	0.0421	28.4	28.20	0.0569	30.20	30.10
90 I_{90}	0.0437	29.3	29.10	0.057	31.30	31.30
120 I_{120}	0.0456	30.1	30.00	0.0574	32.10	32.10
150 I_{150}	0.047	30.8	30.80	0.058	32.70	32.70
180 I_{180}	0.0492	31.5	31.60	0.0591	33.50	33.40
210 I_{210}	0.0513	32.4	32.30	0.0604	33.90	33.90
240 I_{240}	0.0533	33.1	33.00	0.0618	34.30	34.30
270 I_{270}	0.0552	33.6	33.60	0.063	34.70	34.60
300 I_{300}	0.0567	34.0	34.00	0.0641	35.00	35.00
330 I_{330}	0.0579	34.5	34.30	0.0653	35.30	35.30
360 I_{360}	0.0593	34.9	34.80	0.0666	35.50	35.60
Charge passed (Coulomb),Q	1118.043			1346.67		