

การนำของเสียจมน้ำหรือคูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะเป็นวัสดุผสมในกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และคอนกรีตบล็อก



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Utilization of rock wool, water treatment sludge and nonmetallic plate from printed
circuit board in concrete roofing tile and hollow concrete block



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5970246821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ROCK WOOL / WATER TREATMENT SLUDGE / NONMETALLIC PLATE FROM PRINTED CIRCUIT BOARD / CONCRETE ROOFING TILE / HOLLOW CONCRETE BLOCK

PANISARA NAMCHAN: Utilization of rock wool, water treatment sludge and nonmetallic plate from printed circuit board in concrete roofing tile and hollow concrete block. ADVISOR: ASSOC. PROF.SUTHA KHAODHIAR, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.PHOONSAK PHEINSUSOM, Ph.D., pp.

This research investigated the utilization of rock wool, water treatment sludge and non-metallic printed circuit boards as a partial replacement for conventional fine aggregates in mortar. The sand-cement ratio was 2 and the water-cement ratio was 0.45. Each of the industrial wastes was used as a partial replacement of the fine aggregate at 1, 5, 10 and 20% by weight. The cement mortar samples were cured at 7, 14 and 28 days. The chemical compositions and particle sizes of the wastes were analyzed. The results indicated that the density, compressive and transverse strengths of the mortars decreased with increasing the wastes in the mixtures. The water absorption increased with the addition of the waste content. However, the increasing waste replacements improved thermal conductivity of the cement mortars. The cement mortar with rock wool and water treatment sludge contents could resist fire exposure over 400 °C. Thus, the suitable utilization of the industrial wastes as a partial replacement for fine aggregate in cement mortar was 10% at 28 days curing. As the mechanical properties of 10% waste substitution were in the standards of concrete roofing tile (TIS 535-2556) and hollow concrete block (TIS 58-2533). Moreover, the heat transfer and energy consumption of building reduced with the waste replacements. Therefore, these supplementary materials could be used in construction materials as environmentally-friendly and economically-feasible alternatives.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature
		Advisor's Signature
Field of Study:	Environmental Engineering	Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเอียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมรองศาสตราจารย์ ดร.พูลศักดิ์ เพียรสุขสม และ ดร.ดวงสิทธิ์ เต็นเพชรกุล ที่เอื้อเฟื้อกรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขและสนับสนุนในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับข้อคิดเห็น และคำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและทดสอบวัสดุ ภาควิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ สถานที่ และอำนวยความสะดวกในระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท วินเทอมส์ จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์เส้นใยรีดคูล และให้ความรู้เกี่ยวกับข้อมูลของเสีย ตลอดจนบริษัท ประปา ปทุมธานี จำกัด ที่อนุเคราะห์ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตน้ำประปา และการจัดการตะกอน

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนบางส่วนในการวิจัยครั้งนี้

ความดีของวิทยานิพนธ์ขอมอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่ และสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่ให้ความรัก การสนับสนุน ทางด้านกำลังใจ ทรัพย์ ค่าปรึกษา และกำลังใจ ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือ สิ่งดีๆที่มีให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ที่สุด

ท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษา และดำเนินงานวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ของเสียจากเส้นใยรีโอคิวล.....	6
2.1.1 ปริมาณและการกำจัดของเสียจากเส้นใยรีโอคิวล.....	7
2.1.2 เทคโนโลยีการนำของเสียจากเส้นใยรีโอคิวลกลับมาใช้ประโยชน์.....	9
2.1.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากเส้นใยรีโอคิวล.....	10
2.2 ของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา.....	12
2.2.1 ปริมาณและการกำจัดของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา.....	14
2.2.2 เทคโนโลยีการนำของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปากลับมาใช้ประโยชน์.....	16
2.2.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา.....	18
2.3 ของเสียจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ.....	20

2.3.1 ปริมาณและการกำจัดของเสียจากแผงวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ที่ไม่ใช่โลหะ.....	20
2.3.2 เทคโนโลยีการนำของเสียจากแผงวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ที่ไม่ใช่โลหะกลับมาใช้ประโยชน์	23
2.3.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากแผงวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ที่ไม่ใช่โลหะ	27
2.3.4 สรุปรูปของเสียทั้ง 3 ชนิด	29
2.4 คอนกรีต.....	30
2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	31
2.4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	32
2.4.3 ปฏิกริยาทางเคมี.....	33
2.5 น้ำ	35
2.6 มวลรวม.....	36
2.6.1 มวลรวมละเอียด (Fine aggregate).....	37
2.6.2 มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate).....	37
2.7 ส่วนผสมของคอนกรีต.....	37
2.8 การบ่มคอนกรีต (Curing).....	40
2.9 อิฐบล็อกปูผนัง (Hollow concrete block).....	41
2.10 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ (Concrete roofing tile).....	43
2.11 ลักษณะของอัคคีภัย.....	44
2.11.1 แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟ (Fire load concept).....	46
2.11.2 สมบัติของคอนกรีตหลังการเผาไหม้.....	48
2.12 โปรแกรมจำลองการใช้พลังงานในอาคารสำหรับประเทศไทย.....	49
2.13 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	56
บทที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย.....	69

3.1 แผนการทดลอง.....	69
3.2 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย	69
3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	69
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	70
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	72
3.3.1 การทดลองที่ 1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของของเสียที่ใช้ในการวิจัย.....	72
3.3.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของเสีย	72
3.3.1.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution) ของของเสียทั้ง 3 ชนิด	72
3.3.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ของเสีย	72
3.3.2.1 ศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์	72
3.3.2.2 ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์.....	73
3.3.2.3 การทดสอบสมบัติของตัวอย่าง	76
3.3.2.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	76
3.3.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสีย.....	77
3.3.3.1 ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในการผลิต มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสีย.....	77
3.3.3.2 ศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสีย.....	79
3.3.3.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุก่อสร้าง.....	79
3.3.3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	83

3.3.4 การทดลองที่ 4 ทดสอบการทนไฟของมอร์ตาร์ด้วยการเผา.....	86
3.3.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร และ ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้านเรือน	86
3.3.6 การทดลองที่ 6 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง	89
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	90
4.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	90
4.1.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย	90
4.1.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค	93
4.1.3 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ	96
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยรีดควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะในระดับจุลภาค.....	97
4.2 วิเคราะห์ผลการศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ของเสีย	99
4.2.1 ศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมต่อการผลิตมอร์ตาร์	99
4.2.2 ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อการผลิตมอร์ตาร์.....	100
4.3 วิเคราะห์ผลการศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมต่อการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสีย	102
4.3.1 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (Density)	102
4.3.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength)	106
4.3.3 ผลการทดสอบค่าแรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load).....	110
4.3.4 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	114
4.3.5 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity).....	118
4.3.6 ผลการทดสอบพฤติกรรมของมอร์ตาร์หลังการเผา.....	122

4.3.7 ผลการทดสอบโครงสร้างผลึก ด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)	126
4.3.8 ลักษณะสัณฐานของมอร์ตารีในระดับจุลภาค	129
4.4 ผลการศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการผสมของเสี้ยน	133
4.4.1 ผลการศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่มีการผสมของเสี้ยน	134
4.4.2 ผลการศึกษาการผลิตอิฐบล็อกปูผนังที่มีการผสมของเสี้ยน	136
4.5 ผลการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร และ ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้าน	138
4.6 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสี้ยน แต่ละชนิดเพื่อนำมาผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง.....	142
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	156
5.1 สรุปผลการวิจัย	156
5.2 ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	160
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ	161
6.1 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม	161
รายการอ้างอิง.....	162
ภาคผนวก	171
ภาคผนวก ก วิธีการทดลองโดยละเอียด.....	172
ภาคผนวก ข ภาพการทดลอง.....	179
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง.....	184
ภาคผนวก ง มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.....	197
ภาคผนวก จ ผลการคำนวณพลังงานด้วยโปรแกรม BEC	204
ภาคผนวก ฉ ตารางแสดงการคำนวณ ด้วยเครื่องมือการตัดสินใจทางเศรษฐศาสตร์	209
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	214

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2- 1 ประเภทของของเสียจากเส้นใยหรือคูล.....	8
ตารางที่ 2- 2 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากเส้นใยหรือคูล	11
ตารางที่ 2- 3 ผลการวิเคราะห์สารอันตรายของเศษหรือคูลจากโรงงานด้วยวิธี Total threshold limits concentration (TTLC)	11
ตารางที่ 2- 4 ประเภทของของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา.....	14
ตารางที่ 2- 5 การประมาณกำลังการผลิตน้ำประปา และปริมาณการเกิดตะกอน.....	15
ตารางที่ 2- 6 เทคโนโลยีการรีไซเคิลตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา.....	16
ตารางที่ 2- 7 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา.....	18
ตารางที่ 2- 8 ปริมาณสารอันตรายของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา.....	19
ตารางที่ 2- 9 ประเภทของของเสียจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	22
ตารางที่ 2- 10 การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นทั่วโลกในปี พ.ศ. 2553 (หน่วย: ล้านตัน/ต่อปี).....	23
ตารางที่ 2- 11 องค์ประกอบทางเคมีของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ.....	25
ตารางที่ 2- 12 เทคโนโลยีการนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมารีไซเคิลด้วยวิธีทางกายภาพ.....	26
ตารางที่ 2- 13 การนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมารีไซเคิลด้วยวิธีทางเคมี.....	27
ตารางที่ 2- 14 ผลการตรวจวัดโลหะหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ.....	28
ตารางที่ 2- 15 องค์ประกอบทางเคมีของของเสีย วัสดุพอลิโซลัน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	30
ตารางที่ 2- 16 องค์ประกอบทางเคมีหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	31
ตารางที่ 2- 17 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	32
ตารางที่ 2- 18 สมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	33

ตารางที่ 2- 19 องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิโพรพิลีน ตามมาตรฐาน ASTM C 618	35
ตารางที่ 2- 20 คุณภาพของน้ำที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีต	36
ตารางที่ 2- 21 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อน้ำซีเมนต์ ที่ใช้ในงานคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมต่างๆ.....	38
ตารางที่ 2- 22 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อน้ำซีเมนต์ ที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่ออายุการบ่มครบ 28วัน	39
ตารางที่ 2- 23 อัตราส่วนผสมระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ.....	39
ตารางที่ 2- 24 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นิยมใช้กับงานแต่ละประเภท.....	40
ตารางที่ 2- 25 ระยะเวลาในการบ่ม.....	41
ตารางที่ 2- 26 เกณฑ์ขนาดมิติของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก	42
ตารางที่ 2- 27 ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก.....	43
ตารางที่ 2- 28 การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร	50
ตารางที่ 2- 29 การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร.....	51
ตารางที่ 2- 30 การใช้ไฟฟ้าส่องสว่างภายในอาคาร.....	51
ตารางที่ 2- 31 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ และ ค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็น	52
ตารางที่ 2- 32 ค่าพลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศ.....	53
ตารางที่ 2- 33 ภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบควบแน่น.....	53
ตารางที่ 2- 34 ภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิน้ำระบายความร้อนเข้าและออกจากเครื่องควบควบแน่น	54
ตารางที่ 2- 35 ค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำของหม้อไอน้ำ และ หม้อต้มน้ำร้อน	54
ตารางที่ 2- 36 เครื่องทำน้ำร้อนชนิดฮีตปั๊มแบบใช้อากาศ.....	55
ตารางที่ 2- 37 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเส้นใยรีโพลีเอสเตอร์มาใช้เป็นวัสดุทดแทน.....	64
ตารางที่ 2- 38 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามาใช้เป็นวัสดุทดแทน.....	65

ตารางที่ 2- 39	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช้โลหะใช้เป็นวัสดุทดแทน.....	67
ตารางที่ 2- 40	งานวิจัยที่ทำการศึกษา	68
ตารางที่ 3- 1	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสม.....	73
ตารางที่ 3- 2	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม.....	74
ตารางที่ 3- 3	จำนวนตัวอย่างของการศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มี การแทนที่ของเสี้ยน.....	77
ตารางที่ 3- 4	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองการผลิตมอร์ตาร์ที่ผสมของเสี้ยน แต่ละชนิด	78
ตารางที่ 3- 5	วิธีการทดสอบสมบัติของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์และอิฐบล็อกปูผนัง.....	79
ตารางที่ 3- 6	จำนวนตัวอย่างของการศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสม ในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสี้ยน	84
ตารางที่ 3- 7	จำนวนตัวอย่างของการศึกษาการทนไฟของมอร์ตาร์ด้วยการเผา.....	86
ตารางที่ 3- 8	รายละเอียดบ้านเดี่ยว	87
ตารางที่ 4- 1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโอคิวูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ทราย และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	92
ตารางที่ 4- 2	องค์ประกอบของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช้โลหะ	92
ตารางที่ 4- 3	องค์ประกอบทางเคมีของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช้โลหะ	93
ตารางที่ 4- 4	ค่าการกระจายขนาดอนุภาคของของเสี้ยนทั้ง 3 ชนิด และมวลรวมละเอียด	95
ตารางที่ 4- 5	ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย เส้นใยรีโอคิวูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช้โลหะ	97
ตารางที่ 4- 6	ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล และการนำความร้อนของมอร์ตาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน	121
ตารางที่ 4- 7	ค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของวัสดุก่อสร้างที่ไม่รับโครงสร้าง หรือ น้ำหนัก	121

ตารางที่ 4- 8	ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	124
ตารางที่ 4- 9	สมบัติกระเบื้องหลังคาซีเมนต์.....	135
ตารางที่ 4- 10	สมบัติอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก.....	138
ตารางที่ 4- 11	ค่าการนำความร้อนของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง.....	139
ตารางที่ 4- 12	ค่าการถ่ายเทความร้อนของกรอบอาคาร.....	140
ตารางที่ 4- 13	ค่าการใช้พลังงานของอาคาร	141
ตารางที่ 4- 14	ตารางสรุปต้นทุนคงที่ในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิด	143
ตารางที่ 4- 15	สรุปต้นทุนดำเนินการในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิด	145
ตารางที่ 4- 16	สรุปด้านประโยชน์ที่เกิดจากผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิด	146
ตารางที่ 4- 17	เปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์มาตรฐานกับกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสีย	147
ตารางที่ 4- 18	สรุปผลประโยชน์ต้นทุนด้วยเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์	148
ตารางที่ 4- 19	ตารางสรุปต้นทุนคงที่ในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด.....	150
ตารางที่ 4- 20	สรุปต้นทุนดำเนินการในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด.....	151
ตารางที่ 4- 21	สรุปด้านประโยชน์ที่เกิดจากผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด.....	152
ตารางที่ 4- 22	เปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักมาตรฐานกับอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสีย.....	153
ตารางที่ 4- 23	สรุปผลประโยชน์ต้นทุนด้วยเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์	154
ตารางที่ ค.1. 1	ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยรีดิวซ์ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	185

ตารางที่ ค.1. 2 ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	185
ตารางที่ ค.1. 3 ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	186
ตารางที่ ค.2. 1 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	187
ตารางที่ ค.2. 2 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	187
ตารางที่ ค.2. 3 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	188
ตารางที่ ค.3. 1 ค่ารับแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ที่เวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	189
ตารางที่ ค.3. 2 ค่ารับแรงกดแตกตามขวางของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	189
ตารางที่ ค.3. 3 ค่ารับแรงกดแตกตามขวางของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	190
ตารางที่ ค.4. 1 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	191
ตารางที่ ค.4. 2 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน.....	191
ตารางที่ ค.4. 3 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน	192
ตารางที่ ค.5. 1 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	193
ตารางที่ ค.5. 2 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	194
ตารางที่ ค.6. 1 ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด.....	195

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2- 1 ปริมาณ และประเภทโรงงานที่เป็นแหล่งกำเนิดของเสียเส้นใยหรือคูล 8	8
ภาพที่ 2- 2 การนำฉนวนเส้นใยหรือคูลมาใช้เป็นวัสดุในการปลูกพืช 9	9
ภาพที่ 2- 3 แผนผังกระบวนการผลิตน้ำประปา..... 13	13
ภาพที่ 2- 4 ปริมาณซากโทรศัพท์มือถือ และคอมพิวเตอร์ พ.ศ. 2556 - พ.ศ. 2559ในประเทศไทย 21	21
ภาพที่ 2- 5 ขั้นตอนการตัดแยก และรีไซเคิลซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์..... 24	24
ภาพที่ 2- 6 การศึกษาพฤติกรรมของไฟเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา..... 44	44
ภาพที่ 2- 7 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ ISO/TR 834-3..... 47	47
ภาพที่ 2- 8 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ มอก. 1334 เล่ม3..... 47	47
ภาพที่ 3- 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย..... 71	71
ภาพที่ 3- 2 ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ของเสีย 75	75
ภาพที่ 3- 3 อัตราส่วนผสมและระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสีย..... 80	80
ภาพที่ 3- 4 แบบบ้านเดี่ยว 1 ชั้น..... 88	88
ภาพที่ 4- 1 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยน้ำหนักของของเสียทั้ง 3 ชนิด..... 95	95
ภาพที่ 4- 2 ลักษณะรูปร่างระดับจุลภาคของ (ก) เส้นใยหรือคูล (ข) ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และ(ค) ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ 98	98
ภาพที่ 4- 3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ศึกษาค่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายต่างๆ ในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วน น้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50)..... 100	100
ภาพที่ 4- 4 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ศึกษาค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆ ในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 1 : 2)..... 101	101

ภาพที่ 4- 5 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ก) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ 103

ภาพที่ 4- 6 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ในระยะเวลาบ่ม 28 วัน 105

ภาพที่ 4- 7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ก) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ 107

ภาพที่ 4- 8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ในระยะเวลาบ่ม 28 วัน 109

ภาพที่ 4- 9 ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ก) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ 111

ภาพที่ 4- 10 ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด 114

ภาพที่ 4- 11 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ก) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ 116

ภาพที่ 4- 12 ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดในระยะเวลาบ่ม 28 วัน 118

ภาพที่ 4- 13 ลักษณะของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด หลังการเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส 122

ภาพที่ 4- 14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ของเสียร้อยละ 10 โดยมวล ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส 123

ภาพที่ 4- 15 โครงร่างผลึกในมอร์ตาร์ ที่บ่ม 28 วัน ด้วยวิธีXRD (ก) มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ง) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก..... 127

ภาพที่ 4- 16 ลักษณะสัณฐานของมอร์ตาร์ในระดับจุลภาค ที่บ่ม 28 วัน ด้วยวิธีSEM (ก) มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ยว (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคิวล (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจาก โรงผลิตน้ำประปา (ง) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	130
ภาพที่ 4- 17 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ (ก) ที่แทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคิวล (ข) ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ	135
ภาพที่ 4- 18 อิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก (ก) ที่แทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคิวล (ข) ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ	137
ภาพที่ 4- 19 บ้านตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาโปรแกรม BEC	139
ภาพที่ ข- 1 เส้นใยรีโอคิวล.....	180
ภาพที่ ข- 2 ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา.....	180
ภาพที่ ข- 3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ	180
ภาพที่ ข- 4 แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร	181
ภาพที่ ข- 5 แบบหล่อทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 13 x 26 x 2 เซนติเมตร.....	181
ภาพที่ ข- 6 เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด น้ำหนักกดสูงสุด 30 ตัน (Amsler 30 ton).....	181
ภาพที่ ข- 7 เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด.....	182
ภาพที่ ข- 8 ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร.....	182
ภาพที่ ข- 9 ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 13x26x2 เซนติเมตร.....	182
ภาพที่ ข- 10 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์	183
ภาพที่ ข- 11 อิฐบล็อกปูผนัง.....	183

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การประเมินปริมาณกากอุตสาหกรรม โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าประเทศไทยควรมีกากอุตสาหกรรมที่อันตรายและไม่อันตรายปีละ 3.35 และ 50.30 ล้านตัน ตามลำดับ แต่ปัจจุบันพบว่าปริมาณกากอุตสาหกรรมจริงที่โรงงานได้ขออนุญาตไปบำบัด กำจัด รีไซเคิล และแข่งขันส่งแล้วสำหรับกากอันตรายจำนวน 1.03 ล้านตัน และกากไม่อันตรายจำนวน 12.24 ล้านตัน ซึ่งมีกากของเสียอีกจำนวนมากที่ตกค้างในพื้นที่ และนำไปกำจัดแบบไม่ถูกวิธี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2558) ส่งผลให้สถานการณ์ขยะจึงเป็นวิกฤตและจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขจากทุกๆ ฝ่ายด้วยการสนับสนุนการใช้มาตรการต่างๆ เช่น การใช้หลัก 3Rs คือ Reduce, Reuse และ Recycle ปัญหาการจัดการขยะที่ไม่มีประสิทธิภาพนี้ ก่อให้เกิดผลกระทบทั้งทางด้านสุขภาพของประชาชน ด้านเศรษฐกิจของประเทศ และด้านสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันและอนาคต ดังนั้นการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ หรือการรีไซเคิล เป็นการลดปริมาณของเสียที่ต้องนำไปเผาหรือฝังกลบ และนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด

งานวิจัยนี้สนใจวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรม ได้แก่ เส้นใยร็อควูล (Rock wool) ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (Water supply sludge) และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ (Nonmetallic plate from printed circuit board) ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้นอกจากไร้มูลค่าแล้วยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด และมีปริมาณของเสียเพิ่มขึ้นทุกปี เมื่อศึกษาสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้แล้วพบว่ามีความสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนส่วนผสมในการผลิตวัสดุก่อสร้างได้ เช่น คอนกรีตบล็อก และ กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ทั้งทางด้านการลดต้นทุนการผลิตวัสดุก่อสร้าง การเพิ่มสมบัติบางประการให้กับวัสดุก่อสร้าง การส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน และเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ เนื่องจากเส้นใยร็อควูล และ ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา มีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณที่สูง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) แต่ขนาดของวัสดุนั้นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว ขนาดของวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานต้องมีขนาดที่เล็กถึงไมโครเมตร ซึ่งถ้าต้องนำของเสียไปผ่านกระบวนการลดขนาดจะก่อให้เกิดความยุ่งยาก ซับซ้อน และเป็นการเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการนำของ

เสียดกลับมาใช้ประโยชน์ จากเหตุผลที่กล่าวมานั้น เพื่อสามารถนำของเสียไปประยุกต์ใช้ได้สะดวก ไม่เสียดค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม จึงนำของเสียเหล่านี้มาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุผสมเพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้าง (Cheng และคณะ, 2011; Kongsansathian และคณะ, 2016) ส่วนวัสดุเหลือทิ้งจากผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่มีขนาดเล็กสามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตได้นั้น เหมาะแก่การนำมาใช้ทดแทนมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียด (Aggregate) เช่นกัน เพื่อเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตวัสดุก่อสร้างได้ (Iniyan, 2016) นอกจากนี้ด้วยสมบัติของของเสียอาจส่งผลให้วัสดุก่อสร้างมีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งวัสดุก่อสร้างที่กันความร้อนได้นี้เหมาะกับประเทศที่อยู่ในเขตร้อนอย่างประเทศไทยอย่างยิ่ง เพื่อเป็นการช่วยลดการนำความร้อนเข้าภายในอาคาร ควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารให้คงที่ ช่วยลดการสูญเสียพลังงาน และประหยัดค่าไฟฟ้าตามนโยบายยุทธศาสตร์พลังงาน 4.0 ของประเทศที่ตั้งเป้าจะลดการใช้พลังงานเพื่อประหยัดทรัพยากร

ปัจจุบันวัสดุก่อสร้างที่มีการผสมวัสดุเหลือทิ้งเริ่มมีการถูกพัฒนา และได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นทั้งในประเทศ และต่างประเทศ เช่น การนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร แอ้วชานอ้อย แอ้วกลบ มาทดแทนปูนซีเมนต์เพื่อผลิตอิฐบล็อก การผลิตกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยธรรมชาติ และการทำบล็อกประสานปูพื้นผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำ เป็นต้น (Isaia และคณะ, 2003; สติติย์ ถิ่นแก้ว, 2550; Sales และคณะ 2010) แต่สำหรับประเทศไทยการนำของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ ของเสียจากเส้นใยรีดควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มาใช้เป็นวัสดุทดแทนการผลิตวัสดุก่อสร้างนั้น ยังไม่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์และอิฐบล็อกปูผนัง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย และ สัดส่วนของของเสียแต่ละชนิดที่เหมาะสมที่ใช้เป็นส่วนผสมทดแทนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุก่อสร้างที่ผสมของเสียแต่ละชนิด ที่ส่งผลต่อสมบัติในด้านต่างๆของวัสดุ เช่น ความหนาแน่น (Density) กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) แรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load) การดูดซึมน้ำ (Water absorbtion) และสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน เทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังศึกษาการถ่ายเทความร้อน และการใช้พลังงานไฟฟ้าของบ้านเรือนด้วยโปรแกรม (Building Energy Code; BEC) และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เบื้องต้น เพื่อลดต้นทุนในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง เป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ และเพื่อพัฒนาให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี อัตราส่วนผสม และระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมของของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ใช้เป็นส่วนผสมทดแทนการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังได้

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของของเสียแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุก่อสร้าง ในด้านความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด แรงกดแตกตามขวาง การดูดซึมน้ำ และ สมบัติการนำความร้อนได้

1.2.3 เพื่อศึกษาการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง ที่ใช้ของเสียดังกล่าวเป็นวัสดุทดแทนได้

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย

ปริมาณของของเสียแต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัสดุทดแทน และระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุก่อสร้าง ในด้านความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด แรงกดแตกตามขวาง การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อนได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ของเสียจากเส้นใยหรือควูลมาจากฉนวนหรือควูลที่หมดอายุการใช้งานแล้ว โดยนำฉนวนมาตัดและบั่นให้มีขนาดเล็กเป็นเส้นใย ของเสียเส้นใยหรือควูลนี้มาจาก บริษัท วินเทอมส์ จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทประกอบกิจการผลิต และจำหน่ายผลิตภัณฑ์ฉนวน เพื่อจำหน่ายต่อให้กับกลุ่มอุตสาหกรรม

ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ตะกอนสารส้ม, $Al(OH)_3$) เป็นของเสียที่เก็บมาจากโรงผลิตน้ำของ บริษัท ประปาปทุมธานี จำกัด ทำการเตรียมตัวอย่างตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ด้วยการนำไปอบในตู้อบ (อุณหภูมิ 103 – 104 องศาเซลเซียส) หลังจากนั้นนำตะกอนที่แห้งแล้วมาบดเพื่อลดขนาด

ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ เป็นของเสียที่มาจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ใช่แล้วจากโรงงานรีไซเคิล ที่ต้องผ่านกระบวนการบด และคัดแยกเหลือเพียงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีสารเคมีอันตรายหรือโลหะหนักปะปนอยู่แล้ว

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในอุณหภูมิห้อง โดยศึกษาหาอัตราส่วนการแทนที่ของเสียแต่ละชนิด และ ระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ เพื่อนำอัตราส่วนที่เหมาะสมมาใช้ในการผลิตกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา และ คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 535-2556 และ มอก. 58-2533 ตามลำดับ และศึกษาสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนโดยการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุก่อสร้างที่มีการผสมกับไม่ผสมของเสียดังกล่าว

ทำการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง ที่ใช้ของเสียดังกล่าวเป็นวัสดุทดแทน และเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียอุตสาหกรรม กับการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงแนวทางและวิธีการนำของเสีย ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังได้

1.5.2 ผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นข้อมูลที่ช่วยในการสนับสนุนให้มีการนำของเหลือทิ้งเหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่แทนที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการ เป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสีย และช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากของเสียได้

1.5.3 ทราบถึงอิทธิพลของของเสียที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุก่อสร้างในด้านความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด แรงกดแตกตามขวาง การดูดซึมน้ำ และสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างพื้นฐานที่นิยมใช้ในปัจจุบันอย่างแพร่หลาย โดยคอนกรีตเกิดจากการผสมกันของปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวม เช่น หิน กรวด ทราย ปฏิกริยาที่สำคัญที่จะส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงสมบูรณ์ คือ ปฏิกริยาไฮเดรชันที่เกิดจากปูนซีเมนต์และน้ำ ก่อให้คอนกรีตเกิดการเชื่อมประสานตัว และปฏิกริยาปอซโซลานเกิดจากวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เป็นส่วนประกอบหลักในการเสริมความแข็งแรงให้กับคอนกรีต ปัจจุบันนอกจากหิน กรวด และทรายแล้วยังมีวัสดุชนิดอื่น ๆ อีกจำนวนมากที่ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต เช่น แก้วลอย แก้วเคลือบ หรือซิลิกาฟุ่ม ซึ่งวัสดุบางชนิดเป็นของเสียที่ไม่มีประโยชน์แล้ว โดยวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในงานคอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และขนาดของวัสดุ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ คือวัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือวัสดุปอซโซลาน ที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) สูง และวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียด คือมีลักษณะขนาดเล็ก คล้ายทรายเพื่อเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างคอนกรีตได้ จากการศึกษาที่ผ่านมาของเสียที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดได้นั้นจะมีสมบัติประการใดประการหนึ่ง คือ ของเสียที่ประกอบด้วยซิลิกา และอะลูมินา หรือของเสียที่มีขนาดเล็กสามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างช่วยเพิ่มความแข็งแรง ซึ่งพบว่าของเสียที่สนใจในงานวิจัยนี้มีสมบัติที่จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในงานคอนกรีตได้ เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม ในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และสร้างความยั่งยืนทางวัตถุดิบในอนาคตให้แก่ภาคอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยของเสียที่นำมาศึกษามี 3 ชนิด ดังนี้

2.1 ของเสียจากเส้นใยรีโอคิวล

รีโอคิวล คือ หินอัคนี ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้หินบะซอลต์ (Basalt) หรือ หินอะนอร์โทไซต์ (Anorthosite) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ถูกนำมาหลอมเหลวและปั่นเป็นเส้นใย โดยจะผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบ หรือ หินบะซอลต์ให้มีลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นเส้นใย หลังจากนั้นทำการลดขนาด และปรับคุณภาพของวัตถุดิบให้เหมาะสม ก่อนที่จะไปผ่านกระบวนการหลอมเหลววัตถุดิบเพื่อนำมาเข้าเครื่องปั่นทำเป็นเส้นใย เส้นใยรีโอคิวลที่ผลิต

ขึ้นมาจะถูกเก็บไว้ในเครื่องเก็บเส้นใย จากนั้นจึงนำมาอัดเป็นแผ่นฉนวนได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นฉนวนหรือควูลที่นำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อนอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตก่อให้เกิดความร้อนสูง เช่น โรงไฟฟ้า โรงกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาใช้ประโยชน์เป็นฉนวนกันความร้อนภายในบ้านเรือน และเป็นวัสดุเก็บเสียงภายในห้อง สาเหตุหลักของการเกิดของเสียจากเส้นใยหรือควูลคือ ฉนวนหรือควูลเป็นวัสดุที่มีอายุการใช้งานเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งจะก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ เนื่องมาจากภาวะประสานในฉนวนเสื่อมสภาพ ฉนวนมีความชื้นดูน้ำทำให้เกิดสนิม และมีการถอดฉนวนเข้าออกเกิน 2 ครั้ง โรงงานอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องถอดฉนวนหรือควูลทิ้งก่อให้เกิดของเสียจากฉนวนหรือควูลจำนวนมาก

2.1.1 ปริมาณและการกำจัดของเสียจากเส้นใยหรือควูล

ประเภทของเสียจากเส้นใยหรือควูลที่ไม่ใช้งานแล้วจะอยู่ในรูปของเสียจากฉนวนหรือควูลตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ปริมาณของเสียจากฉนวนเส้นใยหรือควูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี พบว่าใน พ.ศ. 2558 มีเส้นใยหรือควูลเกิดขึ้นในประเทศไทยปริมาณ 19,994 ตันต่อปี โดยจะถูกจัดอยู่ในรหัสของเสีย 2 รหัส คือ 17 06 03 HM ปริมาณ 7,575 ตัน และ 17 06 04 ปริมาณ 12,419 ตัน ดังแสดงในตารางที่ 2-1 (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560) โดยแหล่งกำเนิดของของเสียประเภทนี้ส่วนใหญ่มาจากอุตสาหกรรมที่มีการผลิตความร้อนเป็นหลัก (โรงงานประเภทที่ 88) และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการผลิตหรือจำหน่ายไอน้ำ (โรงงานประเภทที่ 102) รองลงมา ดังกราฟที่แสดงในภาพที่ 2-1 ซึ่งในระหว่างปี พ.ศ. 2552 ถึง พ.ศ. 2556 มีการขออนุญาตนำของเสียชนิดนี้ออกนอกบริเวณเขตอุตสาหกรรมเพิ่มสูงขึ้น (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559) โดยเส้นใยหรือควูลที่นำมาศึกษามาจากบริษัท วินเทอมส์ จำกัด ที่ทำการติดตั้งฉนวน และรับฉนวนที่เสื่อมสภาพจากโรงงานอุตสาหกรรมคืน พบว่ามีของเสียจากเส้นใยหรือควูลประมาณ 100 ตันต่อปี โดยของเสียดังกล่าวของบริษัทถูกจัดอยู่ในรหัสของเสีย 17 06 04 คือฉนวนหรือควูลที่ไม่มีแร่ใยหินหรือสารอันตรายเป็นองค์ประกอบ

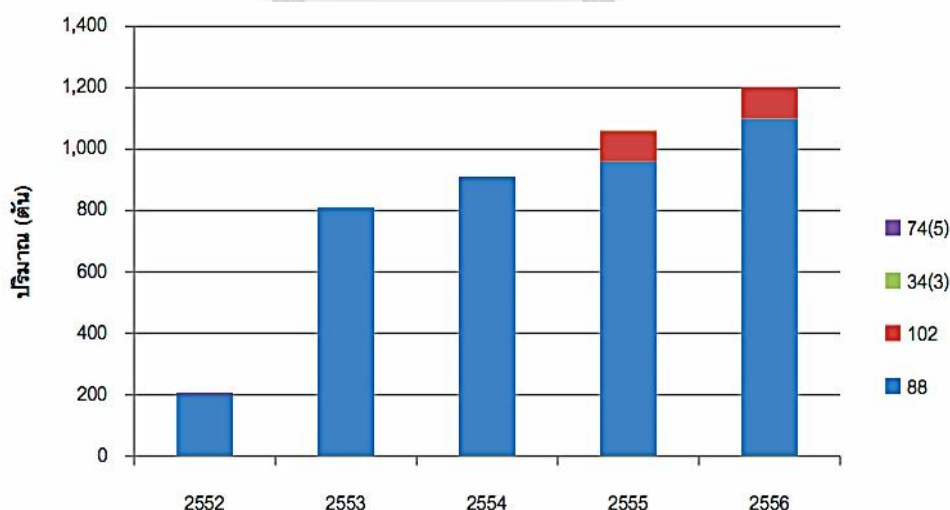
การจัดการหรือการกำจัดของเสียจากฉนวนหรือควูลจะต้องปฏิบัติตามคำแนะนำของกรมโรงงานอุตสาหกรรม คือ ฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล (รหัสวิธีกำจัด 071) ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ (รหัสวิธีกำจัด 044) และ เผาทำลายในเตาเผาเฉพาะสำหรับของเสียอันตราย (รหัส

วิธีกำจัด 075) จากการศึกษาพบว่าเศษฉนวนจากรีโอดิวลส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบตามหลักรัฐบาล ซึ่งจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการกำจัดของเสียดังกล่าว 3,000 – 5,000 บาทต่อตัน หรือประมาณ 50 ล้านบาทต่อปีไม่รวมค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ปัจจุบันของเสียที่กำจัดโดยวิธีการฝังกลบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของประชากรและการเติบโตทางเศรษฐกิจ ทำให้ให้พื้นที่ฝังกลบเหลือน้อยลงขึ้นทุกที นอกจากนี้ยังมีของเสียจำนวนมากที่ยังไม่ได้รับการจัดการหรือนำไปกำจัดอย่างไม่ถูกวิธี ส่งผลให้ประเทศไทยเกิดปัญหาในด้านการจัดการของเสีย และยังไม่ได้รับการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงพื้นที่ฝังกลบบางแห่งเกิดการปนเปื้อนของของเสียลงสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงควรหาแนวทางอื่นในการกำจัดของเสียจากเส้นใยรีโอดิวลเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงผลกระทบดังกล่าว เพราะด้วยสมบัติของเส้นใยรีโอดิวลเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการย่อยสลายตามธรรมชาติวิธีการกำจัดของเสียชนิดนี้ด้วยการฝังกลบจึงไม่เหมาะสมนัก

ตารางที่ 2- 1 ประเภทของของเสียจากเส้นใยรีโอดิวล

รหัสของเสีย	ของเสียประเภทฉนวนรีโอดิวล (Rock wool)	ปริมาณ (ตัน)
17 06 03 HM	ฉนวนที่มีหรือประกอบด้วยสารอันตราย	7,575
17 06 04	ฉนวนที่ไม่ใช่แร่ใยหิน และฉนวนไม่มีหรือประกอบด้วยสารอันตราย	12,419

(ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560)



ภาพที่ 2- 1 ปริมาณ และประเภทโรงงานที่เป็นแหล่งกำเนิดของเสียเส้นใยรีโอดิวล

(ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559)

2.1.2 เทคโนโลยีการนำของเสียจากเส้นใยรีโอคูลกลับมาใช้ประโยชน์

เนื่องจากปริมาณของเสียเส้นใยรีโอคูลที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นปัจจุบันจึงมีการนำของเสียจากเส้นใยรีโอคูลกลับมาใช้ประโยชน์ หรือการรีไซเคิล (Recycle) จากการศึกษาในอดีตที่ผ่านมาพบว่าการนำเส้นใยรีโอคูลกลับมาใช้ประโยชน์ไม่มากนัก โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาการนำเส้นใยรีโอคูลมาใช้ในการเป็นวัสดุปลูกพืช ดังภาพที่ 2-2 เนื่องจากมีสมบัติในการอุ้มน้ำเก็บสำรองธาตุอาหาร มีความพรุนสามารถระบายน้ำและอากาศได้ดี น้ำหนักเบาเหมาะแก่การเคลื่อนย้าย และเป็นวัสดุที่ปลอดโรคและแมลง จึงมีความเหมาะสมอย่างมากที่นำรีโอคูลมาใช้แทน หรือนำมาผสมในดิน เช่น การศึกษาปลูกต้นสตอเบอร์รี่ (Awang และ Atherton, 1995) และการศึกษาการปลูกต้นมะเขือเทศโดยใช้ฉนวนรีโอคูล (Carmassi และคณะ, 2007) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยรีโอคูลจัดเป็นวัสดุปลูกประเภทอินทรีย์ซึ่งมีข้อเสียเปรียบกว่าวัสดุปลูกประเภทอินทรีย์ ในด้านต้นทุนที่สูงกว่า เนื่องจากต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้เหมาะสมกับการใช้งาน และพบว่าวัสดุปลูกประเภทอินทรีย์จะมีเชื้อจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพื่อป้องกันรากและเชื้อโรคทางดิน



ภาพที่ 2- 2 การนำฉนวนเส้นใยรีโอคูลมาใช้เป็นวัสดุในการปลูกพืช

(ที่มา: Grodan, 2016)

ยิ่งไปกว่านั้นเส้นใยรีโอคูลเป็นฉนวนเส้นใยที่มีสมบัติการดูดซับที่ดี จึงมีการศึกษาการใช้ฉนวนรีโอคูลมาเป็นวัสดุดูดซับก๊าซแอมโมเนียในพื้นที่ที่มีการทำปุ๋ยหรือในพื้นที่ฟาร์มปศุสัตว์ โดยนำฉนวนรีโอคูลมารวมกับไบโอฟิลเตอร์ (biofilter) เพื่อช่วยในการกำจัดกลิ่นหรือก๊าซไม่ให้ออกมา (Yasuda และคณะ, 2009)

นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีการนำของเสียจากรีโควูลมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ จากการศึกษาพบว่าสามารถใส่รีโควูลเข้าไปในส่วนผสมได้ถึงร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างและความแข็งแรงที่เพียงพอ (Kinnunen และคณะ, 2017) ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าของเสียจากเส้นใยรีโควูลมีศักยภาพในการนำกลับมารีไซเคิลเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสีย และเป็นการลดการนำของเสียเข้าสู่พื้นที่ฝังกลบ

2.1.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากเส้นใยรีโควูล

เส้นใยรีโควูลถูกผลิตขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ดังนั้นเมื่อฉนวนรีโควูลเสื่อมสภาพการใช้งานแล้ว เส้นใยรีโควูลจะมีสมบัติทางกลที่ดี ในด้านการไม่นำความร้อน และทนต่อความร้อนได้ดี นอกจากนี้เส้นใยรีโควูลยังมีสมบัติอีกหลายประการ คือ เป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีลักษณะสีน้ำตาลคล้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 – 20 ไมโครเมตร น้ำหนักเบา ทำปฏิกิริยาในสภาวะเป็นกรด และต่างได้ยาก ไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นวัสดุเสริมแรงที่ดี มีสมบัติเป็นพอลิไซลัน และที่สำคัญรีโควูลไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยสถาบันวิจัยมะเร็งนานาชาติ (The International Agency for Research on Cancer; IARC) ทำการศึกษาความแตกต่างกันของรีโควูลกับแร่ใยหิน (Asbestos) และจัดประเภทของความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ โดยได้จัดให้เส้นใยรีโควูล อยู่ในกลุ่มที่ 3 คือ สารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (Group 3: not classifiable as to its carcinogenicity to humans) ส่วนแร่ใยหินอยู่ในกลุ่มที่ 1 คือ สารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ (Group 1 : carcinogenic to humans) (IARC, 2002)

นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโควูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา จะพบซิลิกอนไดออกไซด์ (Silica; SiO_2) และมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น เหล็กออกไซด์ (Ferric oxide; Fe_2O_3) อะลูมินาออกไซด์ (Aluminum oxide; Al_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide; CaO) ดังแสดงในตารางที่ 2-2 นอกจากนี้เส้นใยรีโควูลที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการทดสอบหาปริมาณสารอันตรายในรูปของปริมาณสารทั้งหมด (Total threshold limit concentration; TTLC) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 ดังตารางที่ 2-3 พบว่ามีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด จึงถูกจัดให้เป็นของเสียชนิดที่ไม่เป็นอันตราย

ตารางที่ 2- 2 องค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากเส้นใยรีดควูล

องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
SiO ₂	38.7 - 52.8
Al ₂ O ₃	17.5 - 18.6
Fe ₂ O ₃	5.3 - 11.3
MgO	4.63 - 12.2
CaO	8.59 - 20.9
Na ₂ O	1.6 - 3.34
K ₂ O	0.5 - 1.46
TiO ₂	0.9 - 1.38
P ₂ O ₅	0.1 - 0.28

(ที่มา: Singha, 2012; Lin และคณะ, 2013; Kinnunen และคณะ, 2017)

ตารางที่ 2- 3 ผลการวิเคราะห์สารอันตรายของเศษรีดควูลจากโรงงานด้วยวิธี Total threshold limits concentration (TTLC)

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์ (มก./กก.)	ค่ามาตรฐานTTLC (มก./กก.)
Arsenic (As)	<20	<500
Zinc (Zn)	67	<5,000
Lead (Pb)	<20	<1,000
Cadmium (Cd)	<20	<100
Nickel (Ni)	52	<2,000
Manganese (Mn)	9,415	-
Chromium (Cr)	1,324	<2,500
Vanadium (V)	211	<2,400
Copper (Cu)	34	<2,500

(ที่มา: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560)

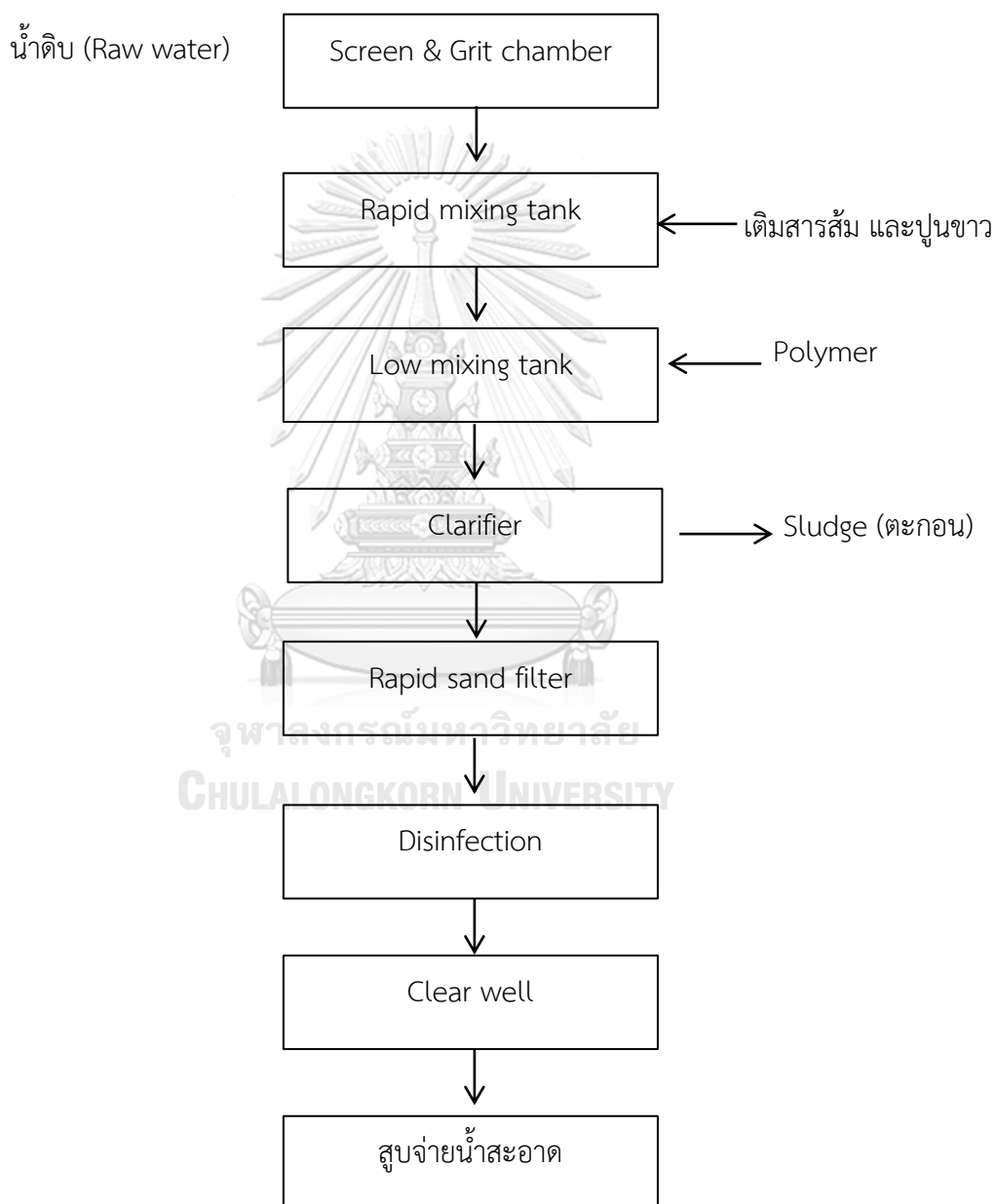
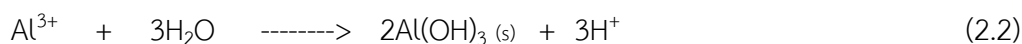
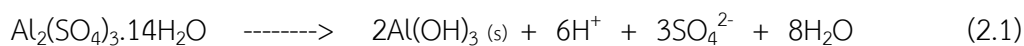
จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโอคิวลแล้วพบว่า มีซิลิกา (Silica; SiO_2) เหล็กออกไซด์ (Ferric oxide; Fe_2O_3) และอะลูมินา (Aluminum oxide; Al_2O_3) ในปริมาณที่สูง ซึ่งมีสมบัติที่คล้ายกับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ ได้แก่ เถ้าลอย (Fly ash) ตะกรันเหล็ก (Ground Granular Blast Furnace Slag ; GGBS) และ ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) อีกทั้งยังเป็นของเสียที่ไม่อันตราย จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำของเสียดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์ และมวลรวมละเอียดได้ เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติด้านการยึดประสาน และเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้าง จากการศึกษที่ผ่านมาของ Lin และคณะ (2013) พบว่าเมื่อผสมรีโอคิวลขนาดเล็กลงกว่า 75 ไมโครเมตร ลงในคอนกรีตสามารถเพิ่มสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 30 เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และการเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างของคอนกรีต ดังนั้นจากสมบัติทั้งทางกายภาพ และ องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโอคิวล จึงสามารถนำของเสียจากเส้นใยรีโอคิวลมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้หลายด้าน เช่น ด้านงานก่อสร้าง การใช้เป็นฉนวนลดการนำความร้อน การประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับ และเป็นวัสดุปลูกพืชในด้านการเกษตร เป็นต้น

2.2 ของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา

ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (Water supply sludge) คือตะกอนที่มีลักษณะคล้ายดิน จัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากการตกตะกอนโดยใช้สารเคมีเพื่อกำจัดความขุ่นในกระบวนการผลิตน้ำประปา ดังแสดงในรูปที่ 2-3 โดยจะนำน้ำไปผ่านกระบวนการอีกหลายขั้นตอนเพื่อได้น้ำที่สะอาด และมีคุณภาพให้ประชาชนใช้ประโยชน์ในการดำรงชีวิต อุปโภคและบริโภค น้ำจึงเป็นปัจจัยหลักในการดำเนินชีวิตของมนุษย์บนโลก แต่ปัจจุบันแหล่งน้ำในการผลิตน้ำประปามีความสกปรก และความต้องการใช้น้ำของประชาชนมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ส่งผลให้ต้องผลิตน้ำประปามากขึ้นให้เพียงพอต่อความต้องการในประเทศ ดังนั้นตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตจึงมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตาม (คณิตภูมิ ดุลยเกษม และคณะ, 2548)

ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา เกิดจากการเติมสารเคมี ซึ่งสารเคมีที่โรงประปาในประเทศไทยนิยมใช้ คือสารส้ม ($\text{Al}(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) ก่อให้เกิดปฏิกิริยาและตกตะกอนดังสมการที่ 2.1 หรือสมการที่ 2.2 เนื่องจากสารส้มมีประจุบวกมาก ทำให้ประจุบวกของสารส้ม (Al^{3+}) ไปจับสารแขวนลอยที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำ เกิดเป็นตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum hydroxide;

$\text{Al}(\text{OH})_3$ ตกลงมาเพื่อทำให้น้ำมีความใสมากขึ้น (Matilainen และคณะ, 2010) นอกจากนี้สารส้มยัง
เป็นสารที่มีราคาถูก ทำให้ส่วนใหญ่มีการใช้สารส้มเกินความจำเป็นส่งผลให้เกิดตะกอนจากโรงผลิต
น้ำประปา ในปริมาณที่สูงมากกว่าเดิม



ภาพที่ 2- 3 แผนผังกระบวนการผลิตน้ำประปา

(ที่มา:ดวงกมล สุริยฉัตร และคณะ, 2547)

2.2.1 ปริมาณและการกำจัดของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา

ในกระบวนการผลิตน้ำประปา พบว่าในการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร มีน้ำ 1,000 ลิตร มีน้ำหนัก 1,000 กิโลกรัม หรือ 1 ตัน ถ้าประมาณให้น้ำดิบมีค่าความขุ่น 30 - 40 หน่วยเอ็นทียู จะมีปริมาณตะกอนเกิดขึ้น 25 - 35 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร จะมีปริมาณตะกอน 25,000 - 35,000 มิลลิกรัม หรือ 0.025 - 0.035 กิโลกรัม ซึ่งในปัจจุบันประชาชนมีแนวโน้มความต้องการในการใช้น้ำประปามากขึ้น และน้ำดิบที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปามีค่าความขุ่นที่เพิ่มขึ้นจากเดิม ส่งผลให้มีเพิ่มการใช้สารเคมีในการกำจัดความขุ่น ส่งผลให้เกิดตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาเพิ่มมากขึ้นตาม (ดวงกมล สุริยฉัตร และคณะ, 2547)

ประเภทของของเสียตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ได้จัดของเสียประเภทนี้ให้เป็นของเสียที่ไม่มีอันตราย และมีรหัสของเสีย ดังตารางที่ 2-4 โดยพบว่าโรงผลิตน้ำประปาแหล่งสำคัญภายใน กรุงเทพมหานคร มีปริมาณการผลิตน้ำประปาต่อวัน รวม 6.72 ล้านลูกบาศก์เมตร และมีปริมาณตะกอนเกิดขึ้นประมาณ 235.2 ตันต่อวัน ดังแสดง ในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2- 4 ประเภทของของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา

ของเสียประเภทตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา	
รหัสของเสีย	
19 09 01	ของเสียในรูปของแข็งจากการกรอง และตะแกรงกรอง
19 09 02	กากตะกอนจากการทำน้ำให้ใส
19 09 03	กากตะกอนจากการกำจัดคาร์บอน
19 09 04	ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้ว
19 09 05	เรซินแลกเปลี่ยนประจุที่อิ่มตัว หรือใช้งานแล้ว
19 09 06	กากตะกอนหรือน้ำล้างจากการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนประจุ
19 09 07	ของเสียอื่นๆที่ไม่ได้ระบุข้างต้น

(ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

ตารางที่ 2- 5 การประมาณกำลังการผลิตน้ำประปา และปริมาณการเกิดตะกอน

โรงผลิตน้ำ	ปริมาณน้ำที่ผลิตต่อวัน* (ล้าน ลบ.ม.)	ปริมาณตะกอนต่อวัน (ตัน)
มหาสวัสดิ์	1.60	56,000
บางเขน	4.40	154,000
ธนบุรี	0.17	5,950
สามเสน	0.55	19,250
รวม	6.72	235.2

* ที่มา: การประปานครหลวง

การกำจัดตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ในปัจจุบันโดยทั่วไปนิยมนำไปผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อตากตะกอนให้แห้งแล้วจึงขนออกนอกโรงประปา ซึ่งการกำจัดโดยทั่วไปนิยมนำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาไปใช้ในการถมที่ และกำจัดโดยการนำไปทำปุ๋ย (คณิตภูมิ ดุลยเกษม และคณะ, 2548) ในงานวิจัยนี้โรงผลิตน้ำประปาที่สนใจเป็นของบริษัท ประปาปทุมธานี จำกัด ที่ทำการผลิตและจำหน่ายน้ำประปาให้กับการประปาส่วนภูมิภาคในพื้นที่ปทุมธานีถึงรังสิต นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 เป็นต้นมา มีจุดเริ่มต้นของการรับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาเข้าสู่คลองประปาตะวันออก ที่ตำบลลำแล จังหวัดปทุมธานี ห่างจากกรุงเทพ 41 กิโลเมตร ไกลจากปากอ่าวไทย 90 กิโลเมตร ปัจจุบันมีกำลังการผลิตสูงสุด 488,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยในปี พ.ศ. 2559 มียอดในการจ่ายน้ำประปาให้กับการประปาส่วนภูมิภาคทั้งสิ้น 131.4 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และมียอดจ่ายน้ำประปาสะสมตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงปี พ.ศ. 2559 รวมทั้งสิ้น 1,857 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยจะทำการสูบน้ำขึ้นมาไว้ในบ่อ และมีการเติมสารเคมี คือสารส้ม เพื่อทำการตกตะกอนเบื้องต้น หลังจากนั้นจึงเติมคลอรีน เพื่อฆ่าเชื้อโรคระหว่างส่งน้ำไปตามท่อส่งให้กับโรงผลิตน้ำประปาต่อไป แต่ปัจจุบันยอดจ่ายน้ำประปามีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ก่อให้เกิดของเสียหรือตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปาเพิ่มสูงขึ้นตามเช่นกัน โดยจากการศึกษาพบว่าในปี พ.ศ.2559 มีปริมาณตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา เกิดขึ้น 23,492 ตันต่อปี เป็นภาระค่าใช้จ่ายในการนำของเสียไปกำจัดในหลุมฝังกลบเป็นจำนวนเงินมากกว่า 90 ล้านบาทต่อปี

2.2.2 เทคโนโลยีการนำของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปากลับมาใช้ประโยชน์

เนื่องจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีปริมาณมากขึ้นในแต่ละปี และวิธีการกำจัดตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่ คือ การนำของเสียดังกล่าวมาใช้ในการถมที่ (รหัสวิธีกำจัด 082) และการฝังกลบ (รหัสวิธีกำจัด 071) การกำจัดตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาด้วยวิธีนี้ก่อให้เกิดปัญหาในด้านการจัดการหลายด้าน เช่น ด้านพื้นที่ที่ใช้ในการกำจัด ด้านการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และเกิดค่าใช้จ่ายในการจัดการ ดังนั้นควรหาแนวทางอื่นในการกำจัดของเสียเพื่อลดการนำของเสียเข้าสู่พื้นที่ฝังกลบ และสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียดังกล่าวได้ ปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาการรีไซเคิลตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามากขึ้น เพราะด้วยสมบัติของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาทำให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น การนำมาใช้เป็นวัสดุอุดซบเพื่อใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย การใช้แทนดินเหนียวในการผลิตภาชนะ และการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น โดยเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียนี้จะแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2- 6 เทคโนโลยีการรีไซเคิลตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา

เทคโนโลยี	ประสิทธิภาพ	ข้อดี	ข้อเสีย
เป็นตัวดูดซับเพื่อบำบัดน้ำเสีย (Adsorption) (รหัสวิธีกำจัด 049)	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถบำบัดโลหะหนัก เช่น พรอท ตะกั่ว และทองแดงได้ พบว่าการนำตะกอนไปใช้ในการดูดซับสามารถกำจัดตะกั่วออกจากน้ำได้ 79% ถึง 96% - ตะกอนสามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ ซึ่งพบว่าการใช้ตะกอน 1 กรัม สามารถกำจัดฟอสฟอรัสในรูปสารอินทรีย์ได้ถึง 4.8 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส - สามารถใช้ตะกอนในการกำจัดสีย้อม (Hydrophobic dye) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดถึง 88% 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาถูก - ใช้งานง่าย - ไม่มีพิษหรืออันตราย - สามารถดูดซับสารโลหะหนักได้ เช่น แคดเมียม (Cd), สารหนู (As) และโครเมียม(Cr) ได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - สารที่กำจัดได้นั้นจะติดอยู่ในตะกอน จึงจำเป็นต้องนำตะกอนไปบำบัดต่อไป - อาจคายสารที่ดูดซับออกมา - ส่งผลให้น้ำเกิดความขุ่นเพิ่มขึ้น - ใช้เวลาบำบัดนาน

ตารางที่ 2-6 เทคโนโลยีการรีไซเคิลตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ต่อ)

เทคโนโลยี	ประสิทธิภาพ	ข้อดี	ข้อเสีย
เป็นสารช่วยให้เกิดการตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสีย (รหัสวิธีกำจัด 049)	มีการนำตะกอนมาใช้เป็นสารช่วยให้เกิดการตกตะกอนแล้วพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด ซีโอดี, บีโอดี และ สารแขวนลอยได้ถึง 73.3% ,82.9% และ 77.6% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมี ความสามารถในการบำบัดน้ำมัน ไขมัน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ได้	- ราคาถูก - ไม่มีพิษหรืออันตราย - ช่วยลดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น	- กระบวนการซับซ้อนต้องใช้เวลา - สารที่กำจัดได้นั้นจะติดอยู่ในตะกอนจึงจำเป็นต้องนำตะกอนไปบำบัดต่อไป - อาจส่งผลให้น้ำเกิดความขุ่นเพิ่มขึ้น
เป็นวัสดุปรับปรุงดิน และเป็นปุ๋ย (รหัสวิธีกำจัด 083)	- สามารถนำตะกอนมาใช้ปรับปรุงดินที่มีสมบัติเป็นกรดเพื่อใช้ในการปลูกพืชได้ - สามารถเข้าไปเพิ่มช่องว่างในการเก็บกักน้ำ ลดการชะละลายของธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช และเพิ่มปริมาณbiomassในดิน - สามารถปรับปรุงค่าพีเอช และลักษณะทางกายภาพในดินให้เหมาะสม	- ราคาถูก - ไม่มีพิษหรืออันตราย - เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ	- ปริมาณของฟอสฟอรัสในดินจะลดลง ทำให้ไม่เพียงพอต่อการปลูกพืชเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอน - มีการปนเปื้อนของพิษลงสู่ดินหรือพืชผลทางการเกษตร
ผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง (รหัสวิธีกำจัด 049)	- ตะกอนมีซิลิกาในปริมาณที่สูงจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น อิฐ คอนกรีต และกระเบื้องดินเผา - มีการศึกษานำตะกอนมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเซรามิก	- ราคาถูก - ไม่เป็นอันตราย - ใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมได้	- ค่าความแข็งแรงของวัสดุก่อสร้างลดลงเมื่อปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้น - เปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

(ที่มา: Dassanayake และคณะ, 2015)

2.2.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา

ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีสมบัติหลายประการ ได้แก่ ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีสารอนินทรีย์อุดมอยู่มาก มีปริมาณสารอะลูมิเนียมอยู่ในตะกอนสูงซึ่งมาจากการใช้สารส้มในการตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา เป็นสารที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ตะกอนมีลักษณะเป็นเนื้อดินที่มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการอุ้มน้ำ และจะพองตัวเมื่อชุ่มน้ำ นอกจากนี้ ตะกอนยังมีปริมาณที่มากพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุดิบในเชิงอุตสาหกรรม และจากตารางที่ 2-7 และ ตารางที่ 2-8 เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และปริมาณสารอันตรายแล้วพบว่าปริมาณของซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ในปริมาณที่สูง อีกทั้งยังมีสารอันตรายอยู่ในค่ามาตรฐาน จึงเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนในการก่อสร้าง

ตารางที่ 2- 7 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนที่เกิดจากการผลิตน้ำประปา

องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
SiO_2	41.78 - 52.62
Al_2O_3	24.40 - 37.45
Fe_2O_3	6.11 - 7.38
MgO	0.52 - 1.16
CaO	0.44 - 1.23
Na_2O	0.14 - 0.24
K_2O	0.14 - 1.61
TiO_2	0.74 - 0.81
P_2O_5	0 - 0.12
MnO	0 - 0.10

(ที่มา: ดวงกมล สุริยฉัตร และคณะ, 2547)

ตารางที่ 2- 8 ปริมาณสารอันตรายของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์ (มก./กก.)	มาตรฐานการวิเคราะห์ (USEPA) (มก./กก.)
Total Al	27000 - 153000	No defined
Total Fe	4870 - 37000	No defined
Total Ca	2200 - 11700	No defined
Total Mg	2400 - 7900	No defined
Total Mn	800 - 2990	No defined
Total Zn	53.3 - 160	2800
Total Cu	35 - 624	1500
Total Ni	10.9 - 60	420
Total Pb	2.5 - 69	300
Total Cr	19.1 - 81	1200
Total Cd	0.12	39
Total Hg	0.02- 0.46	17
Cl ⁻¹	15.89 - 16.41	No defined
SO ₄ ²⁻	8.57 - 9.73	No defined

(ที่มา: Dassanayake และคณะ, 2015)

เนื่องจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามืองค์ประกอบคล้ายกับวัสดุพอลิไซคลาน มีสมบัติในการเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี สามารถทำให้วัสดุเชื่อมประสานกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มสมบัติบางประการให้กับวัสดุก่อสร้างได้ เช่น ช่วยลดการนำความร้อน และเป็นวัสดุมวลเบา (ดวงกมล สุริยฉัตร และคณะ, 2547) ดังนั้นด้วยสมบัติของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ด้านการบำบัดน้ำเสีย การใช้เป็นสารปรับปรุงดิน เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตวัสดุก่อสร้าง และผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสีย และช่วยลดต้นทุนในการกำจัดของเสียดังกล่าว

2.3 ของเสียจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Print Circuit Boards: PCBs) คือ ส่วนประกอบพื้นฐานในอุตสาหกรรมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีลายทองแดงเพื่อให้นำไฟฟ้าเป็นทางเดินสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพื่อประกอบเป็นวงจรแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟ ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ เชื่อมต่อกันได้สะดวก อุตสาหกรรมประเภทอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญของโลก จึงจำเป็นต้องใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นวัสดุพื้นฐานของการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี และนวัตกรรมมีแนวโน้มเติบโตสูงขึ้น ทำให้อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ ถูกคิดค้นและพัฒนา เมื่อเกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ดี และอำนวยความสะดวกได้มากกว่า จึงส่งผลให้ผู้บริโภคเริ่มเปลี่ยนอุปกรณ์ และทิ้งอุปกรณ์ที่ล้าสมัยในเวลาอันรวดเร็ว เป็นปัจจัยที่ทำให้อายุการใช้งานเฉลี่ยของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สั้นลง ส่งผลให้เกิดขยะของเสียอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (สุจิตรา วาสนาดำรงดี, 2558) ซึ่งนิยมเรียกของเสียที่เกิดจากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ว่า “ขยะอิเล็กทรอนิกส์” (Electronic waste; e-waste) หรือคำที่ใช้อย่างเป็นทางการในทางกฎหมาย คือ “ซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์” (Waste electrical and electronic equipment; WEEE) ซึ่งปรากฏในกฎระเบียบของสหภาพยุโรป WEEE Directive ย่อมาจาก Directive 2002/96/EC on Waste Electrical and Electronic Equipment (European commission, 2003)

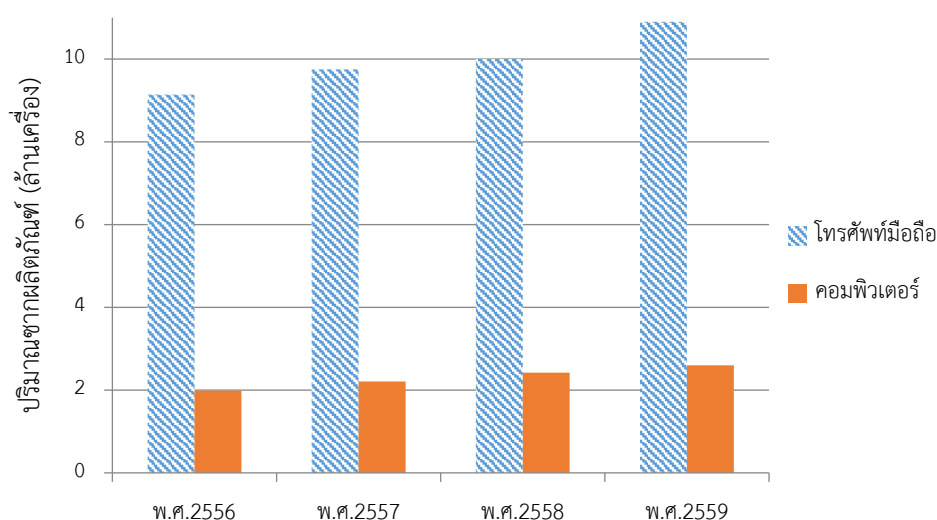
จากปัญหาดังกล่าวจึงเกิดสถานการณ์ที่น่าเป็นห่วงโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศที่กำลังพัฒนา เนื่องจากยังไม่มีกฎหมายและระบบจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์อย่างถูกต้อง และประเด็นที่น่าเป็นห่วงอีกประเด็นหนึ่งคือ สารอันตราย และโลหะหนักหลากหลายชนิดที่อยู่ในชิ้นส่วนของขยะอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเมื่อมีการจัดการอย่างไม่ถูกต้องจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต และเพิ่มปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.3.1 ปริมาณและการกำจัดของเสียจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

การพัฒนาในด้านเทคโนโลยี และพฤติกรรมของผู้บริโภคที่มีค่านิยมในการเปลี่ยนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก่อนเสื่อมสภาพการใช้งาน ซึ่งมีการคาดการณ์ว่าปริมาณขยะจากอิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจนมีปริมาณมากถึง 40 ล้านตันต่อปี และมีอัตราการเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 5 ถึงร้อยละ

ละ 10 ต่อปี (Ravi, 2012) พบว่าปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลกใน ปี พ.ศ. 2555 มีประมาณ 45 ล้านตัน ซึ่งมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นกว่าปี พ.ศ. 2551 ที่มีประมาณ 20-25 ล้านตัน (Robinson, 2009) ซึ่งส่วนใหญ่ประเทศที่กำลังพัฒนายังไม่มีระบบการจัดการอิเล็กทรอนิกส์อย่างถูกต้อง และยังไม่มีความหมายที่ชัดเจน จึงคาดการณ์ว่าภายใน พ.ศ. 2561 ถึง พ.ศ. 2573 ประเทศกำลังพัฒนาจะทิ้งขยะประเภทเครื่องคอมพิวเตอร์มากกว่าสองเท่าของประเทศที่พัฒนาแล้ว โดยการประมาณขั้นต่ำอยู่ที่ 600 ล้านเครื่อง เมื่อเทียบกับประเทศที่พัฒนาแล้วประมาณ 300 ล้านเครื่อง (สุจิตรา วาสนาดำรงดี, 2558; Yu และคณะ, 2010)

ส่วนสถานการณ์ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ภายในประเทศไทยมีการรายงานปริมาณของขยะอิเล็กทรอนิกส์ในปี พ.ศ. 2556 โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม ว่ามีการเพิ่มขึ้นของขยะอิเล็กทรอนิกส์สูงกว่า 20 ล้านเครื่อง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 10 ต่อปี และจากการศึกษาปริมาณของเสียที่เป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ ประเภทซากโทรศัพท์มือถือ และคอมพิวเตอร์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 ถึง พ.ศ. 2559 ดังแสดงในภาพที่ 3-4 พบว่าปี พ.ศ. 2559 ยังคงมีปริมาณของซากโทรศัพท์มือถือ และคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็น 10.9 ล้านเครื่อง และ 2.6 ล้านเครื่อง ตามลำดับ (ณิชชา บุรณสิงห์, 2559) นอกจากนี้ประเภทของเสียจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ได้จัดของเสียดังกล่าวให้เป็นของเสียที่มีความอันตราย และไม่มีความอันตราย โดยมีรหัสของเสียดังตารางที่ 2-9



ภาพที่ 2- 4 ปริมาณซากโทรศัพท์มือถือ และคอมพิวเตอร์ พ.ศ. 2556 - พ.ศ. 2559 ในประเทศไทย
(ที่มา: ณิชชา บุรณสิงห์, 2559)

ตารางที่ 2- 9 ประเภทของของเสียจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ของเสียจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	
รหัสของเสีย	
16 02 15 HA	ชิ้นส่วนที่เป็นอันตราย ที่ถอดแยกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้ว
16 02 16	ชิ้นส่วนที่ถอดแยกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ใช้งานแล้วที่ไม่ใช่ 16 02 15 HA

(ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

โดยพบว่าในปี พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีปริมาณของเสียจำพวกชิ้นส่วนที่ถอดแยกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นจากประมาณ 19,600 ตันต่อปี เป็น 27,300 ตันต่อปี ซึ่งของเสียเหล่านี้อาจมาจากภายในประเทศ หรือมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศบางส่วน การจัดการของเสียจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก ซึ่งต้องได้รับความร่วมมือจากหลายหน่วยงาน เริ่มจากการศึกษาหาข้อมูลในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพเกี่ยวกับการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อนำไปสู่การวางแผนนโยบาย ออกกฎหมายการจัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ และจัดระบบการจัดการซากผลิตภัณฑ์ของประเทศต่อไป จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2553 ในเรื่องของการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศสหรัฐอเมริกา จีน อินเดีย และแอฟริกาตะวันตก พบว่าส่วนใหญ่ขยะอิเล็กทรอนิกส์จะถูกจัดการโดยวิธีการฝังกลบ กักเก็บไว้ และเผา ส่วนประเทศสหภาพยุโรป (25 ประเทศ) และประเทศญี่ปุ่นจะจัดการกับขยะอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการรีไซเคิลเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีการส่งออกและนำเข้าขยะอิเล็กทรอนิกส์ข้ามประเทศอีกด้วย (Zoeteman และคณะ, 2010) ดังแสดงในตารางที่ 2-10

การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการฝังกลบควรเป็นทางเลือกสุดท้าย เพราะขยะอิเล็กทรอนิกส์นี้มีความเป็นพิษ และอาจเกิดการปนเปื้อนสูงต่อสุขภาพของประชาชน คุณภาพสิ่งแวดล้อม และระบบนิเวศน์ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว แต่อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนภายในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์บางอย่างยังมีมูลค่า เช่น ทองแดง และเงิน จึงควรนำซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์นี้กลับมารีไซเคิล เพื่อลดการเกิดของเสีย และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียอีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 2- 10 การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นทั่วโลกในปี พ.ศ. 2553 (หน่วย: ล้านตัน/ต่อปี)

ประเทศ	ปริมาณขยะ ที่เกิดขึ้น	นำไปฝังกลบ,			
		เผา และ เก็บ ไว้	นำไปรีไซเคิล	ส่งออก	นำเข้า
สหรัฐอเมริกา	8.4	5.7	0.42	2.3	-
สหภาพยุโรป (25 ประเทศ)	8.9	1.4	5.9	1.6	-
ญี่ปุ่น	4.0	0.6	2.8	0.59	-
จีน	5.7	4.1	0.68	-	2.6
อินเดีย	0.66	0.95	0.21	-	0.97
แอฟริกาตะวันตก	0.07	0.47	-	-	0.61

(ที่มา: Zoeteman และคณะ, 2010)

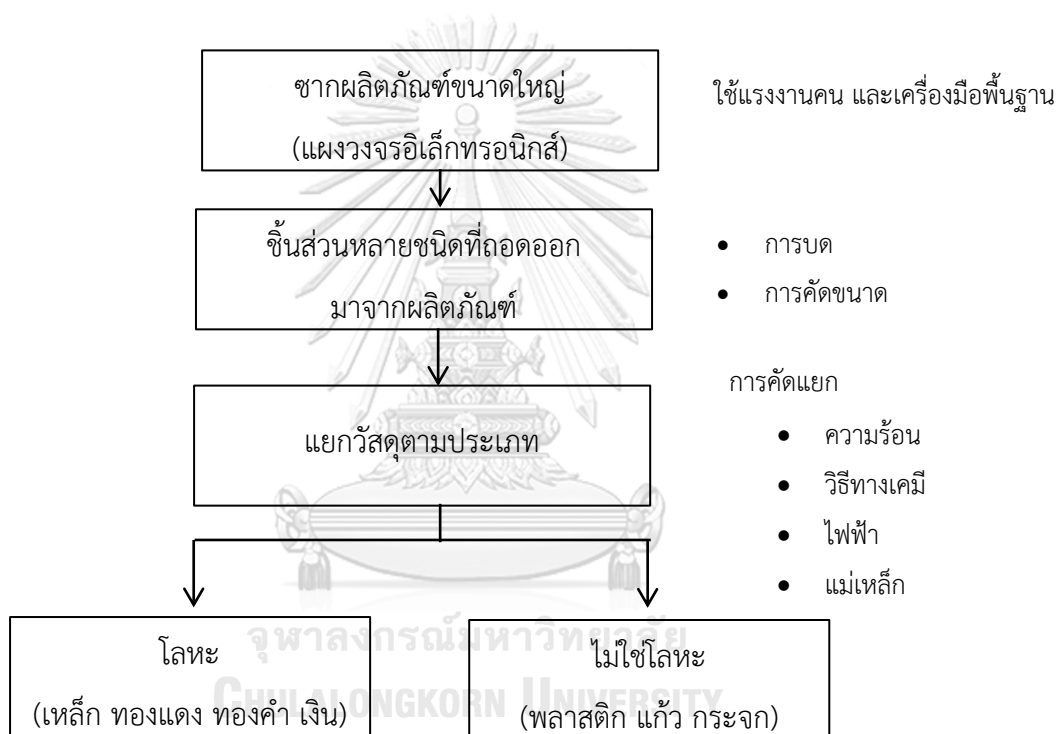
2.3.2 เทคโนโลยีการนำของเสียจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะกลับมาใช้ประโยชน์

ปัจจุบันในประเทศไทยโรงงานที่รีไซเคิลซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกระบวนการบดย่อย คัดแยก และการสกัดชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์อย่างถูกวิธียังมีจำนวนไม่มาก ทำให้ไม่เพียงพอต่อปริมาณของขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีปริมาณมาก และเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ปัญหาของประเทศไทยยังพบว่าการลักลอบถอดแยกชิ้นส่วนภายในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ และนำโลหะไปขายโดยไม่มีการจัดการ และป้องกันที่ถูกต้องวิธี เช่น การคัดแยกโลหะหนักออกจากผลิตภัณฑ์โดยไม่มีอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล และการนำเศษที่เหลือของขยะอิเล็กทรอนิกส์ไปทำลายด้วยการเผาหรือฝังกลบ ทั้งนี้การจัดการที่ไม่ถูกวิธีย่อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ชุมชน และสุขภาพ รวมทั้งความปลอดภัยในการประกอบอาชีพของผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรง (สุจิตรา วาสนาดำรงดี, 2558)

วิธีการจัดการผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ชิ้นแรกคือการถอดชิ้นส่วน และคัดแยกประเภทของชิ้นส่วน โดยจะสนใจเฉพาะชิ้นส่วนของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Boards: PCBs) ที่

มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโลหะทองคำ เงิน ทองแดง และส่วนที่ไม่ใช่โลหะ วิธีการตัดแยกมีดังนี้ แสดงในภาพที่ 2-5

1. นำซากผลิตภัณฑ์ที่มีโครงร่างใหญ่มาถอดแยกชิ้นส่วนจะทำการตัดแยกโดยใช้แรงงานคน หรือเครื่องมือพื้นฐาน เช่น ไขควง คีม และค้อน เป็นต้น
2. ทำการบด อัด เพื่อลดขนาด และแยกวัสดุต่างๆ ได้แก่ พลาสติก แก้ว และโลหะ โดยวิธีที่ใช้มีหลายวิธี เช่น การหลอม การถลุง การละลายด้วยสารเคมี การแยกด้วยไฟฟ้า การแยกตามความหนาแน่น และการแยกด้วยแม่เหล็ก เป็นต้น



ภาพที่ 2- 5 ขั้นตอนการตัดแยก และรีไซเคิลซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์
(ที่มา: นภาพร อรุณเกียรติกิจ และ ปราโมทย์ ภูพานทอง, 2556)

เมื่อทำการตัดแยกแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แล้วจะได้วัสดุที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ วัสดุที่เป็นโลหะร้อยละ 30 ได้แก่ เหล็ก ทองแดง ทองคำ และเงิน และวัสดุประเภทไม่ใช่โลหะ ซึ่งมีมากถึงร้อยละ 70 ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ พลาสติกเทอร์โมเซตเรซิน (Thermoset resin), ไฟเบอร์กลาส (Fiber glass), เซรามิก และสารเติมแต่งอื่นๆ จากการศึกษา

การรีไซเคิลซากคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์พบว่ามีสัดส่วนขององค์ประกอบที่ไม่ใช่โลหะประมาณ 40% และ 65% ตามลำดับ (Guo และคณะ, 2009)

ปัจจุบันโรงงานส่วนใหญ่ต้องการวัสดุส่วนที่เป็นโลหะเพื่อนำไปสกัดและแยกด้วยกระบวนการต่างๆ เพื่อให้โลหะมีความบริสุทธิ์แล้วจึงนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ส่วนวัสดุที่ไม่ใช่โลหะโดยทั่วไปพบว่ามียังมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพวกเรซินหรือไฟเบอร์กลาส นอกจากนี้ยังมีทองแดงผสมอยู่เล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 2-11 ซึ่งจะถูกนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย (รหัสวิธีกำจัด 072) แต่การฝังกลบอาจไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสมนักเพราะอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมได้ถ้ามีการจัดการที่ไม่มีประสิทธิภาพ เป็นการเพิ่มพื้นที่ฝังกลบ และควรเป็นทางเลือกสุดท้ายของการจัดการของเสีย ดังนั้นจึงควรรหาแนวทางที่จะนำของเสียชนิดนี้มารีไซเคิล แต่แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนี้มีองค์ประกอบของพลาสติกเทอร์โมเซตเรซินเป็นหลัก ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่สามารถหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ และการเผาสารกลุ่มนี้ไม่ใช่ทางเลือกในการบำบัดที่ดีเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้เชื้อเพลิงลดลง และก่อให้เกิดสารที่เป็นพิษสูงจำพวกสารกลุ่มไดออกซิน

การนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนที่ไม่ใช่โลหะ (Nonmetallic plate from printed circuit board) มารีไซเคิลสามารถทำได้ 2 วิธีหลักๆ คือวิธีทางกายภาพ เช่น การผสมในงานก่อสร้างหรือการขึ้นรูปเป็นแผ่นพลาสติก ดังตารางที่ 2-12 และวิธีทางเคมีโดยนำไปทำปฏิกิริยาเคมี ด้วยกระบวนการดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) หรือการประยุกต์ใช้ซูเปอร์คริติคอลลูอิด (Supercritical fluid) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันและแก๊สซึ่งต้องนำมากลั่นใหม่มีความบริสุทธิ์ก่อนการใช้งาน (Conventional approaches) ดังแสดงในตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2- 11 องค์ประกอบทางเคมีของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ส่วนผสม	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
Glass fiber cloth	30 - 45
Epoxy resin	35 - 40
Fillers	5
PCB nonmetals	15 - 30

(ที่มา: Mou และคณะ ,2007)

ตารางที่ 2- 12 เทคโนโลยีการนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้เคลือบด้วยวิธีทาง

กายภาพ

เทคโนโลยีการรีไซเคิล	ประสิทธิภาพ
การผลิต Phenolic Molding Compound (PMC) (รหัสวิธีกำจัด 049)	นำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้ทดแทนผงซีลี้อยู่ ใน การผลิตPMC ส่งผลให้เพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรง ช่วยลดต้นทุนของ วัสดุดิบ และนำไปขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ตะแกรงท่อระบายน้ำ จาก การศึกษาของ Guo และคณะ (2008) เมื่อผสมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทดแทนผงซีลี้อยู่ พบว่ามีค่าการทนแรงกระแทก และ ค่าการทนต่อแรงดัด อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
การผลิตวัสดุเทอร์โมพลาสติก (รหัสวิธีกำจัด 049)	นำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้เป็นสารเติมแต่งในวัสดุ ก่อสร้างประเภทเรซิน ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดัดงอให้กับ ผลิตภัณฑ์ สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และ ราคาถูก จากการศึกษาเมื่อนำ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาผสมกับเทอร์โมพลาสติกแล้วพบว่าเมื่อขึ้นรูป เป็นผลิตภัณฑ์จะเห็นถึงการดึงดูดกันเป็นอย่างดีระหว่างสารเติมแต่ง กับเรซินทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แข็งแรง (Mou และคณะ, 2007)
การผลิตแผ่นไม้เทียม (รหัสวิธีกำจัด 049)	นำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้ทดแทนซีลี้อยู่ในการ ผลิตไม้เทียมโดยมีการผสมเทอร์โมพลาสติก ผงซีลี้อยู่ และแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์และนำไปขึ้นผลิตภัณฑ์เป็นแผ่นไม้เทียม (WPC wood) (Guo และคณะ, 2010)
การนำมาใช้ในงาน ก่อสร้าง (รหัสวิธีกำจัด 049)	นำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้เป็นวัสดุทดแทน บูนซีเมนต์ หรือมวลรวม ในการผลิตวัสดุก่อสร้างได้ มีงานวิจัยในอดีตนำ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการ ผลิตอิฐมวลเบา โดยมีส่วนผสมของซีเมนต์ ทราย ใก้าลอย และพลาสติก เทอร์โมเซตจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ผลการศึกษาพบว่าสามารถเพิ่ม สมบัติด้านกำลังแรงอัด และผ่านเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตมวลเบา ASTM C129 Type II (Panyakapo, 2008)

(ที่มา: ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2560)

ตารางที่ 2- 13 การนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมารีไซเคิลด้วยวิธีทางเคมี

เทคโนโลยีการรีไซเคิล	ประสิทธิภาพ
กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) (รหัสวิธีกำจัด 043)	การนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาเข้ากระบวนการไพโรไลซิส เพื่อได้สารอินทรีย์ในรูปแบบของเหลวส่วนประกอบหลักประกอบไปด้วยสารประกอบพวกฟีนอล ฟูแรน และก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จากการศึกษาของ Zhou และ Qiu (2010) ได้ใช้กระบวนการไพโรไลซิสในการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และพบว่าเกิดส่วนที่เป็นของเหลวย้อยละ 20-30 และส่วนที่เป็นก๊าซร้อยละ 4-6 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงานได้
กระบวนการ ก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) (รหัสวิธีกำจัด 043)	จากการใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่มีส่วนผสมของสารทนไฟที่ผสมโบรมีน เผาด้วยอุณหภูมิสูงจนเกิดการย่อยสลาย เพื่อสังเคราะห์ก๊าซและเอาไปใช้ประโยชน์ และพบว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนประกอบที่ไม่ใช่โลหะสามารถยับยั้งการเกิดสารพิษประเภทโบรมีนไดออกซิน อันเนื่องมาจากสารทนไฟผสมโบรมีนที่พบในส่วนประกอบ (Yamawaki, 2003)

(ที่มา: ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2560)

2.3.3 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของของเสียจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

สมบัติของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนที่ไม่ใช่โลหะ จะมีลักษณะเบา เป็นผง เป็นพลาสติก เทอร์โมเซต ซึ่งองค์ประกอบภายในของวัสดุชนิดนี้ยังมีโลหะหนักปะปนอยู่ในปริมาณที่น้อย โดยส่วนมากจะประกอบด้วยพลาสติกไฟเบอร์กลาสเป็นหลัก รองลงมาคืออีพอกซี เรซิน ดังแสดงในตารางที่ 2-14

อุณหภูมิที่ทำให้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนที่ไม่ใช่โลหะหลอมเหลว หรืออ่อนตัว จะขึ้นอยู่กับสารประกอบที่เป็นส่วนผสมในวัสดุ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นไฟเบอร์กลาสที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 800 - 1,050 องศาเซลเซียส และอีพอกซี เรซิน ที่มีจุดเดือดที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนที่ไม่ใช่โลหะจากอุตสาหกรรม จำเป็นต้องผ่านการทดสอบหาปริมาณสารอันตรายในรูปแบบของปริมาณสารทั้งหมด ซึ่งพบว่ามีปริมาณน้อยกว่าค่า TTLC

(Total threshold limit concentration) ดังนั้นจึงต้องนำไปทดสอบค่าการชะโลหะหนักเพิ่มเติม โดยใช้วิธี Waste extraction test ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548 พบว่าแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มีค่าโลหะหนักที่ชะออกมาไม่เกินมาตรฐาน STLC (Soluble threshold limit concentration) ดังตารางที่ 2-14 ซึ่งพบว่ามีทองแดงในปริมาณ 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดสอบนี้สามารถนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ และไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นแนวทางในการกำจัดของเสีย โดยการนำของเสียกลับไปรีไซเคิล

ตารางที่ 2- 14 ผลการตรวจวัดโลหะหนักของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์ (มก./กก.)	มาตรฐานTTL (มก./กก.)	ผลการวิเคราะห์ (มก./ล.)	มาตรฐานSTLC (มก./ล.)
สารหนู (As)	20.1	500	<0.001	5
แบเรียม (Ba)	1,936	10,000	<0.20	100
แคดเมียม (Cd)	0.07	100	<0.02	1
โครเมียม (Cr)	34.2	2,500	0.02	5
โคบอลต์ (Co)	-	8,000	<0.02	80
ทองแดง (Cu)	480	2,500	0.11	25
ตะกั่ว (Pb)	25.3	1,000	<0.10	10
ปรอท (Hg)	-	20	<0.001	0.2
นิกเกิล (Ni)	7.92	2,000	-	20
เงิน (Ag)	-	500	-	5
สังกะสี (Zn)	296	5,000	-	5

หมายเหตุ: “-“ คือ ไม่พบองค์ประกอบทางเคมีชนิดนี้

(ที่มา: ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2560)

2.3.4 สรุปของเสียทั้ง 3 ชนิด

จากการศึกษาลักษณะของของเสียทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยรีอ็อควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ พบว่าของเสียเหล่านี้มีศักยภาพที่จะนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ใหม่ทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำของเสียมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตอิฐบล็อกหรือวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลที่ดีให้กับผลิตภัณฑ์ได้ มีราคาถูก และโอกาสที่จะเกิดการชะละลายของของเสียลงสู่สิ่งแวดล้อมมีน้อย โดยวัสดุที่จะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมในการผลิตคอนกรีตได้นั้นต้องมีสมบัติคล้ายทราย หรือมีขนาดเล็กที่สามารถเข้าไปเสริมความแข็งแรงให้กับอิฐบล็อกได้นอกจากนี้ของเสียที่สนใจยังมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เส้นใยรีอ็อควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา เนื่องจากมีปริมาณซิลิกา และอะลูมินาสูงดังแสดงในตารางที่ 2-15 จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวนั้นต้องอาศัยปัจจัยทางด้านขนาดของวัสดุเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานต้องมีขนาดเล็กถึงไมโครเมตรถึงจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ และขั้นตอนหรือกระบวนการในการเตรียมวัสดุให้มีขนาดเล็กนั้นมีความยุ่งยาก ซับซ้อน และสิ้นเปลืองการใช้พลังงาน โดยเฉพาะเส้นใยรีอ็อควูลที่สามารถลดขนาดให้มีความยาวของเส้นใยเหลือเพียงเล็กกว่า 1 เซนติเมตร เท่านั้น ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำของเสียดังกล่าวมาใช้แทนที่ มวลรวมละเอียดเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน และไม่เป็นการเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ส่วนของเสียจากผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ก็สามารถที่จะนำมาใช้ทดแทนมวลรวมละเอียด ในการผลิตอิฐบล็อกได้ เพราะด้วยสมบัติที่เป็นผงขนาดเล็ก มีความเหนียว และแข็งแรงจึงมีความสามารถที่จะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างอิฐบล็อกได้ ในการศึกษาที่ผลิตภัณ์ที่สนใจ ได้แก่ กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง เนื่องจากเป็นผลิตภัณ์ที่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำของเสียมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมากนัก

ยิ่งไปกว่านั้นของเสียทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำไปผสมในวัสดุก่อสร้างแล้วจะส่งผลทำให้วัสดุก่อสร้างนั้นมีสมบัติการนำความร้อนที่ลดลง สามารถทำให้ภายในอาคารหรือบ้านเรือนเย็นลงนำไปสู่การลดการใช้ไฟฟ้าภายในได้ และเป็นการประหยัดพลังงานตามนโยบายยุทธศาสตร์พลังงาน 4.0 ของประเทศ ที่ตั้งเป้าจะลดการใช้พลังงานเพื่อประหยัดทรัพยากรในประเทศ หนึ่งในนั้นคือการรณรงค์ลดการใช้ไฟให้น้อยลงกว่าเดิม โดยหันมาใช้เทคโนโลยีนวัตกรรมรูปแบบใหม่ที่จะทำให้ใช้ไฟฟ้าน้อยลง

ตารางที่ 2- 15 องค์ประกอบทางเคมีของของเสีย วัสดุปอซโซลาน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

พารามิเตอร์	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	เส้นใย รือควูล	ตะกอนประปา	Fly ash	GGBS	Silica fume	Portland cement
SiO ₂	38.7 - 52.8	41 - 52	54.0	33.5	91.5	17-25
Al ₂ O ₃	17.5 - 18.6	24.40 - 37.45	24.0	9.0	0.2	3-8
Fe ₂ O ₃	5.3 - 11.3	6.11 - 7.38	8.0	3.6	0.7	0.5-6
MgO	4.63 - 12.2	0.52 - 1.16	1.3	2.7	1.5	0.1-3
CaO	8.59 - 20.9	0.44 - 1.23	2.0	43.8	0.4	60-67

(ที่มา: Singha, 2012; Lin และคณะ, 2013; Kinnunen และคณะ, 2017; ดวงกมล สุริยฉัตร และคณะ, 2547; ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2560)

2.4 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุพื้นฐานที่สำคัญในงานก่อสร้าง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสิ่งก่อสร้างต่างๆ ได้แก่ บ้านเรือน อาคาร ถนน และสะพาน เป็นต้น โดยคอนกรีตเกิดจากการผสมวัสดุประสานในนี้คือ ปูนซีเมนต์ กับน้ำ เกิดปฏิกิริยากันทำให้เกิดการเกาะแน่นกับวัสดุหรือการประสาน และผสมกับมวลรวม คือ ทราย หิน หรือหินกรวด การกำหนดอัตราส่วนผสมให้เหมาะสมกับการใช้งาน จะทำให้คอนกรีตที่ได้มีสมบัติและความแข็งแรงตามวัตถุประสงค์ของงานที่ต้องการ ส่วนผสมทั้งหมดจะแข็ง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม สมบัติของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อน้ำต่อมวลรวมที่พอเหมาะ และความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในส่วนผสม ซึ่งปูนซีเมนต์กับน้ำจะทำหน้าที่เพิ่มกำลังรับแรงอัดให้กับคอนกรีต และป้องกันการซึมผ่านของน้ำ ส่วนมวลรวมจะเป็นตัวแทรกเกาะประสานตัวอยู่ภายในซีเมนต์ช่วยเพิ่มความคงทน และมีราคาถูก ข้อดีของคอนกรีต คือ สามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่ายตามต้องการ ทำให้ผิวสวยงามได้ มีราคาถูก มีความทนทานสูง และมีความทนไฟ แต่มีข้อเสียเปรียบคือ มีความสามารถในการรับแรงดึง และมีความยืดตัวต่ำ นอกจากนี้ส่วนผสมที่สำคัญคือ ปูนซีเมนต์ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นมาใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมพื้นฐานหลักในการผลิตคอนกรีต เป็นวัสดุที่ได้จากการเผาส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ หินปูน หรือดินเหนียว ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส และนำปูนเม็ดมาบด สารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงดังตารางที่ 2-16 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถจำแนกได้หลายประเภท ตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM) 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ รหัส C-150 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กักอากาศ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เตาถลุง และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (ประณต กุลประสูตร, 2541)

ตารางที่ 2- 16 องค์ประกอบทางเคมีหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	60 – 67
SiO ₂	17 – 25
Al ₂ O ₃	3 – 8
Fe ₂ O ₃	0.5 – 6.0

(ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ รหัส C-150 เป็นปูนซีเมนต์ที่นิยมใช้กันทั่วไปในประเทศไทยมากที่สุด ในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 5 ประเภทย่อย ดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (type I – normal Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐาน เหมาะกับการใช้งานก่อสร้างทั่วไป ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก เช่น สร้างถนน อาคาร สะพาน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตจากน้ำหรือดิน หรือที่ที่มีความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำจะไม่ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงจนถึงขีดอันตราย

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (type II modified Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลง เพื่อให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตได้ปานกลาง ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์และน้ำจะต่ำกว่า และเพิ่มได้ช้ากว่าประเภทแรก ช่วยลดอุณหภูมิของคอนกรีตในอาคารร้อนได้ดี เหมาะกับการใช้งานโครงสร้างใหญ่ ได้แก่ ตอม่อขนาดใหญ่ สะพานเทียบเรือ หรือเขื่อน เป็นต้น

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบบแข็งตัวเร็ว (type III high-early strength Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่กำลังเร็วกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 ประเภท มีเนื้อปูนเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์แบบธรรมดา เป็นผลทำให้แข็งตัวและรับแรงได้เร็วกว่าแบบธรรมดา

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดความร้อนต่ำ (type IV low-heat Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดพิเศษที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการคุมให้อัตราความร้อนเกิดขึ้นต่ำที่สุด การเกิดกำลังของคอนกรีตจะเป็นไปอย่างช้าๆ จึงนิยมใช้กับงานขนาดใหญ่ เช่น การสร้างเขื่อน เป็นต้น

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้านซัลเฟตสูง (type V sulfate-resistance Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีสมบัติในการต้านทานต่อซัลเฟตได้สูง เหมาะที่จะใช้กับงานก่อสร้างในบริเวณที่มีซัลเฟตกระทำรุนแรง การแข็งตัวของปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะช้ากว่าประเภทอื่น นิยมใช้ในการสร้างอาคารที่อยู่ชายทะเล หรือในทะเล

2.4.2 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบที่สำคัญดังตารางที่ 2-17 สารประกอบที่ผสมอยู่ในปูนซีเมนต์จะส่งผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำหรือปฏิกิริยาไฮเดรชัน และสมบัติอื่นๆของวัสดุก่อสร้างที่ผลิตขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2-18

ตารางที่ 2- 17 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	30-50
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	20-45
ไตรแคลเซียม อะลูมินาต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8-12
เตตราแคลเซียม อะลูโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	6-10

(ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุต, 2539)

ตารางที่ 2- 18 สมบัติของสารประกอบในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

สมบัติ	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (หนึ่งวัน)	เร็วมาก (หนึ่งวัน)
กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
สมบัติอื่นๆ	สมบัติเหมือนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

(ที่มา: ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร์, 2539)

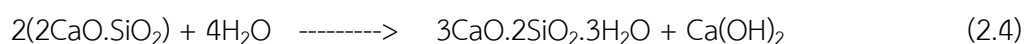
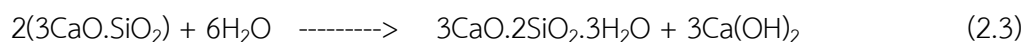
2.4.3 ปฏิกิริยาทางเคมี

โครงสร้างคอนกรีตเป็นการผสมระหว่างซีเมนต์และน้ำเพื่อทำปฏิกิริยาเป็นวัสดุประสานช่วยเสริมช่องว่างระหว่างวัสดุผสม เพิ่มกำลังแก่คอนกรีตและป้องกันการซึมผ่านของน้ำ และผสมกับวัสดุผสมหรือมวลรวม ซึ่งได้แก่หิน กรวด ทราย เพื่อช่วยเสริมความคงทน โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) เพื่อให้เกิดการแข็งตัว การยึดเกาะกับวัสดุผสม และเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีต สมบัติของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต (CaO.SiO₂), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂), ซิลิกา (SiO₂), อะลูมินา (Al₂O₃) และน้ำ (H₂O) การผสมคอนกรีตจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี 2 ปฏิกิริยาหลัก ดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction)

โดยมีสารตั้งต้นคือ แคลเซียมซิลิเกต (Calcium silicate) ซึ่งเป็นสารประกอบในปูนซีเมนต์และน้ำ (H₂O) ได้ผลิตพันธะเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate

hydrate ; C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) (สมการที่ 2.3 และ 2.4) เป็นตัวเชื่อมประสานทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้มากขึ้นถ้าเพิ่มระยะเวลาในการบ่มมากขึ้น



2. ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan reaction)

วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่ไม่มีความสามารถเป็นวัสดุประสาน แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเป็นวัสดุประสานเสริมความแข็งแรง ซึ่งส่วนประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน คือ ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 โดยมีสารตั้งต้นคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เข้าทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ได้ผลิตภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มเสริมความแข็งแรงให้แก่คอนกรีต (2.5 และ 2.6)



วัสดุปอซโซลานในระยะแรกนั้นถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติภายในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีตให้ดีขึ้น เนื่องจากวัสดุปอซโซลานนั้นสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาว หรือสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกลดลง แต่ในช่วงปลายอาจมีค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกจะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบในซีเมนต์ไม่ใช่วัสดุปอซโซลาน ดังนั้นคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอซโซลานจึงต้องการระยะเวลาในการบ่มที่ยาวนานกว่าคอนกรีตทั่วไป วัสดุปอซโซลานนั้นเองไม่มีสมบัติเป็นตัวประสาน แต่จะแสดงสมบัติดังกล่าวกับปูนขาว หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การทดสอบความเป็นวัสดุปอซโซลานนั้นมีความซับซ้อนจึงได้มีเกณฑ์กำหนดสมบัติของวัสดุปอซโซลานจากองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2-19 โดยวัสดุปอซโซลานต้อง

มีส่วนโดยรวมของสารประกอบออกไซด์ของซิลิกอน อะลูมิเนียม และเหล็ก ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 และต้องมีปริมาณของซัลเฟตไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 2- 19 องค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618

องค์ประกอบทางเคมี	วัสดุปอซโซลาน		
	N	F	C
ซิลิกอนไดออกไซด์ + อะลูมิเนียมออกไซด์ + เพอร์ริกออกไซด์ ต่ำสุดร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ สูงสุดร้อยละ	4.0	5.0	5.0
อัลคาไลด์ สูงสุดร้อยละ	1.5	1.5	1.5
ปริมาณความชื้นสูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	6.0
สมบัติทางกายภาพ	N	F	C
ความละเอียด : ปริมาณค้ำตะแกรงเบอร์ 325 สูงสุดร้อยละ	34	34	34
ความอยู่ตัว : การขยายตัว หรือหดตัว สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8

(ที่มา : American Society for Testing and Materials, 2005)

การจำแนกประเภทของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

หมวด N คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟ หินชั้น ภูเขาไฟ เป็นต้น

หมวด F คือ ภูเขาไฟที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัส และแอนทราไซต์ซึ่งหมวด F จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ

หมวด C คือ ภูเขาไฟทั่วไปที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส หมวด C จะมีแคลเซียมออกไซด์สูง แต่มีซิลิกา และอะลูมินาต่ำ

2.5 น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมที่สำคัญตัวหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยน้ำจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชัน เพื่อให้เกิดการเกาะตัวกันแน่นของวัสดุผสม เพิ่มความแข็งแรงให้กับงาน และยังช่วยให้ส่วนผสมมีความชื้นเหลวสามารถหล่อขึ้นรูปได้สะดวก

มากขึ้น น้ำที่นำมาใช้ในการผสมคอนกรีตต้องมีความสะอาด ไม่มีสิ่งปนเปื้อนสารต่างๆ เช่น กรด ต่าง หรือน้ำมัน เป็นต้น ถ้าน้ำที่นำมาใช้ไม่สะอาดพอ จะส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีตที่ได้ แสดงดังตาราง ที่ 2-20 เช่น กำลังรับแรงอัด ทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้า หรือเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง เป็นต้น นอกจากนี้ น้ำที่นำมาใช้สำหรับการบ่มจะต้องเป็นน้ำที่สะอาด เพื่อป้องกันการปนเปื้อนที่ผิวของ คอนกรีต และป้องกันผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต

ตารางที่ 2- 20 คุณภาพของน้ำที่ส่งผลต่อสมบัติของคอนกรีต

คุณภาพของน้ำ	ผลกระทบต่อคุณภาพคอนกรีต
ความขุ่นมากกว่า 1000 พีพีเอ็ม	ระยะเวลาในการแข็งตัว ค่ากำลังรับแรงอัด คอนกรีตมีสีผิวไม่สม่ำเสมอ
น้ำตาลกรดแทนนิก ไนเตรต และสารอินทรีย์	คอนกรีตแข็งตัวช้า เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง
คาร์บอนเนต และไบคาร์บอนเนต	คอนกรีตแข็งตัวเร็วเกินไป ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง
ซัลเฟตในน้ำมากกว่า 10 เปอร์เซนต์	ไม่ควรใช้ในการผสมคอนกรีตทำให้กำลังลดลง มาก

(ที่มา: ประณต กุลประสูตร, 2541)

2.6 มวลรวม

มวลรวม ที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ หิน ทราย กรวด และทรายหยาบ เป็นต้น จัดเป็นวัสดุที่สำคัญ ในการใช้เป็นส่วนผสมของงานคอนกรีต ช่วยทำให้คอนกรีตมีขนาด รูปร่าง และความแข็งแรงตาม ที่ ต้องการ และช่วยลดต้นทุนในงานคอนกรีตด้วย มวลรวมโดยทั่วไปจะจำแนกออกเป็น 2 ชนิด คือ มวล รวมละเอียด และมวลรวมหยาบ ดังนี้ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

2.6.1 มวลรวมละเอียด (Fine aggregate)

มวลรวมละเอียด คือมวลรวมที่ส่วนใหญ่สามารถผ่านรูตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (รูขนาด 4.76 มิลลิเมตร) ได้ และอาจมีบางส่วนที่หยาบกว่าผสมอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามมวลรวมประเภทนี้จะต้องไม่มีขนาดเล็กเกินไปจนกลายเป็นฝุ่นซึ่งไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทรายจากธรรมชาติ หรือทรายเทียมที่ทำขึ้นมา เป็นต้น ทรายที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างควรเป็นทรายที่สะอาดไม่มีดิน เศษพืช หรือสิ่งใดเจือปน เป็นทรายที่แข็ง และมีขนาดของเม็ดทรายที่สม่ำเสมอ เพราะจะส่งผลต่อสมบัติของงานคอนกรีต หรือวัสดุก่อสร้างได้

2.6.2 มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate)

มวลรวมหยาบ เป็นมวลรวมที่ส่วนใหญ่จะตกค้างอยู่บนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งอาจมีบางส่วนที่ละเอียดปะปนอยู่บ้างแต่ต้องไม่เกินมาตรฐานกำหนด มวลรวมประเภทนี้ ได้แก่ หินย่อยหรือกรวด หรือมวลรวมชนิดอื่นที่เหมาะสมจะแทนที่ได้ โดยลักษณะของมวลรวมที่นำมาใช้ผสมในงานคอนกรีต ต้องคม แข็ง มีผิวขรุขระ ยึดหดตัวต่ำ และทนทานต่อการสึกหรอได้ดี หินที่นำมาใช้ต้องสะอาด และมีขนาดคละกัน คือมีขนาดก้อนหินที่คละกัน ขนาดของหินที่ใช้กันทั่วไป มีขนาดตั้งแต่ 4.75 ถึง 76 มิลลิเมตร หินย่อยเบอร์ 1 มีขนาดตั้งแต่ 4.75 ถึง 19 มิลลิเมตร หินย่อยเบอร์ 2 มีขนาดตั้งแต่ 19 ถึง 38 มิลลิเมตร และหินย่อยเบอร์ 3 มีขนาดตั้งแต่ 38 ถึง 76 มิลลิเมตร ส่วนหินที่มีขนาดใหญ่กว่านี้จะไม่นิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีต ซึ่งชนิดของงานและลักษณะของคอนกรีตที่ต้องการจะเป็นตัวกำหนดขนาดของหินที่ต้องใช้

2.7 ส่วนผสมของคอนกรีต

การกำหนดส่วนผสมในการทำคอนกรีตให้เหมาะสมจะส่งผลให้เกิดความสะดวกในการทำคอนกรีต และจะได้งานคอนกรีตที่มีสมบัติตามที่ต้องการ คอนกรีตที่ดีมาจากมวลรวมที่คละกัน และนำไปผสมรวมกับปูนซีเมนต์และน้ำหรือซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก่อให้เกิดการเกาะตัวแน่นกับมวลรวม ซึ่งส่วนผสมส่วนใหญ่จะเป็นมวลรวม แต่ปฏิกิริยาหลักที่ทำให้เกิดการเกาะประสานกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของงานคอนกรีตจะมาจากส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ

อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ (Water cement ratio) เป็นสิ่งที่สำคัญ จากการทดลองพบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อย จะทำให้งานคอนกรีตนั้นมีความแข็งแรงมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์มาก แต่อย่างไรก็ตามส่วนผสมของคอนกรีตก็ควรมีความเหลวชั้นพอเหมาะ เพื่อให้สะดวกต่อการหล่อลงแบบที่ต้องการ ดังนั้นการกำหนดอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ต้องพิจารณาหลายปัจจัย ได้แก่ ความแข็งแรงของคอนกรีต ลักษณะการใช้งานของคอนกรีต และความเหมาะสมกับงานก่อสร้าง เป็นต้น โดยค่าอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ จะจัดแบ่งตามประเภทของงานก่อสร้างในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2-21 และจะจัดแบ่งตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่ออายุการบ่มครบ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 2-22 (ประณต กุลประสูตร, 2541)

ตารางที่ 2- 21 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่ใช้ในงานคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมต่างๆ

ประเภทของงานคอนกรีต	สภาวะแวดล้อมปกติ			สภาวะแวดล้อมที่รุนแรง		
	แดดฝน			ที่รุนแรง		
	ชั้นส่วน บาง	ชั้นส่วน หนา ปานกลาง	ชั้นส่วน หนา	ชั้นส่วน บาง	ชั้นส่วน หนา ปานกลาง	ชั้นส่วน หนา
สัมผัสน้ำแต่ไม่ได้อยู่ใต้น้ำตลอด	0.45	0.50	0.55	0.45	0.50	0.55
ใกล้น้ำแห้งบ้างเปียกบ้าง	0.50	0.55	0.55	0.55	0.60	0.65
งานทั่วไป อาคาร สะพาน	0.55	0.60	0.65	0.55	0.65	0.70
งานคอนกรีตที่จมอยู่ใต้น้ำ	0.55	0.60	0.65	0.55	0.60	0.65
งานคอนกรีตสำหรับถนน	0.50	0.55	0.60	0.55	0.60	0.65

(ที่มา: ประณต กุลประสูตร, 2541)

ตารางที่ 2- 22 อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำตอปูนซีเมนต์ ที่ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่ออายุการบ่มครบ 28 วัน

อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำตอปูนซีเมนต์ (กก./ล.)	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่ออายุการบ่มครบ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
0.35	500	420
0.40	450	380
0.45	410	340
0.50	350	280
0.55	320	250
0.60	280	210
0.65	250	190
0.70	210	170

(ที่มา: ประณต กุลประสูตร, 2541)

ส่วนคละของมวลรวม คือส่วนผสมของหินย่อยกับทราย ถ้าผสมกันอย่างเหมาะสมจะส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นสม่ำเสมอ และส่งผลต่อคุณภาพของคอนกรีต โดยทั่วไปส่วนผสมระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ มักจะกำหนดให้ปริมาตรของมวลรวมละเอียดให้เท่ากับปริมาณครึ่งหนึ่งของปริมาตรของมวลรวมหยาบที่แห้ง เพื่อให้การผสมคอนกรีตมีความสะดวก อัตราส่วนผสมระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ ได้แสดงดังตารางที่ 2-23 และอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นิยมใช้กับงานแต่ละประเภท ได้แสดงดังตารางที่ 2-24

ตารางที่ 2- 23 อัตราส่วนผสมระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ

ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมหยาบ	อัตราส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
10 มิลลิเมตร หินเกล็ด	0.55	0.70
20 มิลลิเมตร หิน 1	0.40	0.60
25 มิลลิเมตร หิน 2	0.30	0.50

(ที่มา: ประณต กุลประสูตร, 2541)

ตารางที่ 2- 24 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่นิยมใช้กับงานแต่ละประเภท

อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน โดยปริมาตร	ประเภทของงาน
1 : 1.5 : 3	เสาและส่วนของโครงสร้างอาคารที่ต้องการความทึบน้ำ
1 : 2 : 4	งานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป
1: 2.5 : 4	งานถนน ทางเท้า ฐานรากอาคาร เชื้อนก้นดิน
1 : 3 : 5	งานคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น ฐานรากขนาดใหญ่ หรือผนัง ที่หนา

(ที่มา: ประณต กุลประสูตร, 2541)

2.8 การบ่มคอนกรีต (Curing)

การบ่ม คือวิธีที่จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างต่อเนื่อง หน้าที่ของการบ่มมี 2 ประการหลัก คือป้องกันการสูญเสียน้ำ ความชื้นจากเนื้อคอนกรีต และรักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังและความคงทน และเพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำ หลักการบ่มคอนกรีตที่ดีจะต้องป้องกันไม่ให้คอนกรีตสูญเสียน้ำความชื้น ไม่ให้สัมผัสกับสารเคมีที่เป็นอันตราย และไม่ถูกชะล้างโดยน้ำฝน คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควรมีการบ่มติดต่อกันอย่างน้อย 7 วัน ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ควรบ่มอย่างน้อย 3 วัน และส่วนคอนกรีตที่มีวัสดุปอซโซลานผสมควรบ่มมากกว่า 7 วัน

การบ่มนั้นมักถูกใช้เพื่ออธิบายกระบวนการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต เพื่อพัฒนาสมบัติในด้านความแข็งแรงที่อายุการบ่มต่างๆ เป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างต่อเนื่อง ซึ่งควรบ่มคอนกรีตอย่างน้อยที่อายุ 7 วัน หรือมีกำลังที่ได้อ้อยละ 70 ของกำลังอัดที่ 28 วัน (ACI committee 308, 2001) โดยแสดงระยะเวลาที่ใช้บ่มสำหรับปูนซีเมนต์แต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2-25

ตารางที่ 2- 25 ระยะเวลาในการบ่ม

ประเภท	ระยะเวลาที่ใช้บ่ม (วัน)
ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	7
ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 2	10
ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3	3
ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 4 หรือ 5	14

(ที่มา : ACI Committee 308, 2001)

2.9 อิฐบล็อกปูผนัง (Hollow concrete block)

อิฐบล็อกปูผนัง (Hollow concrete block) หมายถึง ก้อนอิฐที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และมวลรวมที่เหมาะสมชนิดต่างๆ นอกจากนี้จะมีสารอื่นผสมอยู่ด้วยหรือไม่ก็ได้ ใช้สำหรับก่อผนังหรือกำแพง ลักษณะมีโพรงหรือรูขนาดใหญ่ทะลุตลอดก้อน และมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิที่ระนาบขนานกับผิวธาตุน้อยกว่าร้อยละ 75 ของพื้นที่หน้าตัดรวมที่ระนาบเดียวกัน

อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก (Hollow non-load-bearing concrete masonry unit) หมายถึง อิฐบล็อกที่ใช้สำหรับผนังที่ออกแบบไว้สำหรับไม่รับน้ำหนักบรรทุกใดๆ นอกจากน้ำหนักตัวเอง อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐานสามารถแบ่งประเภทออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทควบคุมความชื้น และประเภทไม่ควบคุมความชื้น มีเกณฑ์มาตรฐานอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักจะเป็นไปตามกระทรวงอุตสาหกรรม มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เลขที่มอก.58-2533 มีเกณฑ์ดังนี้

- ก. ขนาดของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักจะแสดงในตารางที่ 2-26 โดยจะคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 2 และกำหนดให้ความหนาของเปลือกต้องไม่น้อยกว่า 12 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2- 26 เกณฑ์ขนาดมิติของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก

มิติพิกัด หนา x สูง x ยาว พ	ขนาดที่ทำ หนา x สูง x ยาว มิลลิเมตร x มิลลิเมตร x มิลลิเมตร
0.8 x 2 x 1.5	70 x 190 x 140
1 x 2 x 1.5	90 x 190 x 140
1.5 x 2 x 1.5	140 x 190 140
2 x 2 x 1.5	190 x 190 x 140
0.8 x 2 x 2	70 x 190 x 190
1 x 2 x 2	90 x 190 x 190
1.5 x 2 x 2	140 x 190 x 190
2 x 2 x 2	190 x 190 x 190
0.8 x 2 x 3	70 x 190 x 290
1 x 2 x 3	90 x 190 x 290
1.5 x 2 x 3	140 x 190 x 290
2 x 2 x 3	190 x 190 x 290
0.8 x 2 x 4	70 x 190 x 390
1 x 2 x 4	90 x 190 x 390
1.5 x 2 x 4	140 x 190 x 390
2 x 2 x 4	190 x 190 x 390

(ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2544)

หมายเหตุ ขนาดของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักที่กำหนดนี้ เป็นขนาดที่ออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามระบบการประสานทางพิกัดในการก่อสร้างอาคาร ซึ่งได้กำหนดหน่วยพิกัดมาตรฐาน พ ให้เท่ากับ 100 มิลลิเมตร และกำหนดความหนาของปูนก่อในรอยต่อมาตรฐานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร

- ข. อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักทุกก้อนต้องแข็งแรงปราศจากรอยแตกร้าว หรือส่วนเสียดินใดที่เป็นอุปสรรคต่อการก่ออิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักอย่างถูกต้องหรือทำให้สิ่งก่อสร้างเสียดำล้างหรือความคงทนถาวร
- ค. อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก ซึ่งต้องการฉาบปูนหรือแต่งปูนต้องมีผิวหน้าหยาบพอควรแก่การจับยึดของปูนฉาบหรือปูนแต่งได้อย่างดี
- ง. อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก ซึ่งต้องการก่อแบบผิวเผย ด้านผิวเผยจะต้องไม่มีรอยป็น รอยร้าว หรือตำหนิอื่นๆ ถ้ามีก้อนซึ่งมีรอยป็นเล็กน้อยที่ยาวมากกว่า 25 มิลลิเมตร เป็นจำนวนไม่มากกว่าร้อยละ 5 จะต้องไม่ถือเป็นสาเหตุในการไม่ยอมรับ
- จ. กำลัรับแรงอัดของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก ต้องเป็นไปตามตารางที่ 2-27 โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ตารางที่ 2- 27 ค่ากำลัรับแรงอัดของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก

ความกำลัรับแรงอัดต่ำสุด เมกะพลาสต์ล (เฉลี่ยจากพื้นที่รวม)	
เฉลี่ยจากคอิฐบล็อกปูผนัง 5 ก้อน	อิฐบล็อกปูผนังแต่ละก้อน
2.5	2.0

(ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2544)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.10 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ (Concrete roofing tile)

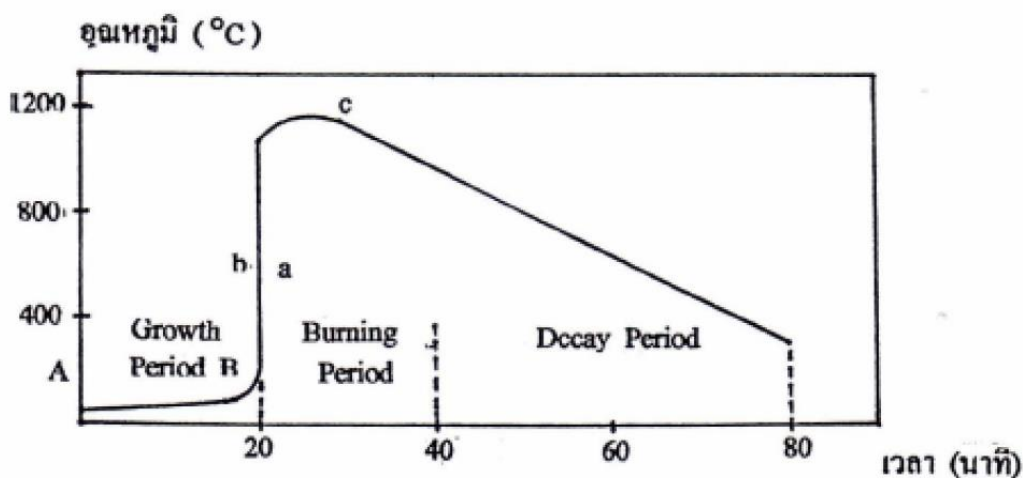
หลังคาเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญในการโครงสร้างอาคาร หลังคาจะทำหน้าที่ในการป้องกันแดด กันฝน พายุ แสงสว่าง หรือภัยธรรมชาติ ดังนั้นหลังคาจึงควรมีสมบัติที่สามารถป้องกันสิ่งต่างๆได้ หลังคามีหลายประเภทขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทำหลังคา การเลือกใช้หลังคาพิจารณาจากราคา และความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน หลังคาที่สนใจได้แก่ กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ เนื่องจากกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ได้รับความนิยมในการใช้เป็นวัสดุคุมหลังคามากที่สุด กระเบื้องหลังคาซีเมนต์เป็นวัสดุแผ่นแบบเกาะเกยสำหรับใช้คุมหลังคา ส่วนผสมมาจากปูนซีเมนต์ มวลรวม และน้ำ มีลักษณะเป็นแผ่นลอน และแผ่นเรียบ มีส่วนเกาะระแนงที่ส่วนบนด้านหลังของแผ่นกระเบื้อง โดยใช้เกล็ดหิน

การพิจารณาตามกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐาน เลขที่มอก.535-2556 กระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา ขนาดความกว้างและความยาวเฉลี่ยของกระเบื้องต้องไม่แตกต่างจากขนาดที่ผู้ทำกำหนดไว้ ± 2 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะทั่วไปของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ มีดังนี้

- ก. ผิวของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ผิวของกระเบื้องจะเรียบหรือหยาบก็ได้ แต่ต้องไม่แตก ไม่นูน ไม่เว้า หรือมีตำหนิอื่นๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน
- ข. แรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load) แรงกดแตกตามขวางแต่ละแผ่น ต้องไม่น้อยกว่า 3.325 N ต่อความกว้างการใช้งานของกระเบื้อง 1 มิลลิเมตร
- ค. การดูดซึมน้ำ (Water absorption) กระเบื้องทุกแผ่นต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10
- ง. สภาพการซึมผ่านได้ (Permeability) กระเบื้องทุกแผ่นต้องไม่ปรากฏหยดน้ำได้แผ่นกระเบื้อง

2.11 ลักษณะของอัคคีภัย

จากการศึกษาพฤติกรรมของไฟเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาภายในห้องที่มีวัสดุติดไฟได้ และมีการถ่ายเทอากาศแบบหนึ่งโดย Lie (1972) ซึ่งจะศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของไฟแต่ละช่วงดังภาพที่ 2-6 ดังนี้



ภาพที่ 2- 6 การศึกษาพฤติกรรมของไฟเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา
(ที่มา: Lie, 1972)

จะพบว่าช่วงแรกจะเป็นช่วงที่จะเกิดเพลิงไหม้หมดทั้งห้อง จะเรียกว่าช่วงการก่อตัวของไฟ (Growth period) โดยอุณหภูมิในช่วงนี้จะยังค่อนข้างต่ำยังไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างมากนัก ถ้าเวลาในช่วงนี้นานจะยังพอมีเวลาหลบหนีออกมาจากห้องหรืออาคารได้อย่างปลอดภัย เวลาในช่วงนี้จะช้าหรือนานนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิด และจำนวนของเชื้อเพลิง พื้นที่ผิวของกำแพง เพดานก็เป็นปัจจัยหนึ่งเช่นกัน ถ้าพื้นที่ผิวกว้างมากก็จะทำให้ช่วงการก่อตัวของไฟเกิดได้เร็ว เพราะสามารถส่งผ่านความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อผ่านไปเวลาหนึ่งจะเข้าสู่ช่วงการเผาไหม้ (Burning period) ช่วงที่อุณหภูมิในห้องจะขึ้นไปสูงสุดอย่างรวดเร็ว (ช่วงB-C) จะเป็นช่วงที่การพัฒนาตัวของไฟเกิดขึ้นเต็มที่ เวลาต่อมาวัสดุจะติดไฟและเผาไหม้จนหมด อุณหภูมิที่ผ่านจุด C นั้นจะมีอัตราการเผาไหม้ และอุณหภูมิที่ลดลง เข้าสู่ช่วงการสลายตัว (Decay period) แต่ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะลดลง แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สูงมากจนอาจเกิดการพังทลายของโครงสร้างได้ หากได้รับการเผาไหม้เป็นระยะเวลาที่ติดต่อกันหลายชั่วโมง

ดังนั้นกระบวนการพัฒนาตัวเองของไฟ การกระจายตัวของไฟ ช่วงเวลาที่เกิดไฟไหม้ และความรุนแรงของไฟ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ถ้าพิจารณาเฉพาะกรณีการเกิดเพลิงไหม้ในอาคารจะมีปัจจัย ดังนี้ ปริมาณของไฟ ชนิด และขนาดของเชื้อเพลิงหรือวัสดุที่ติดไฟ อุณหภูมิ ความดันและความชื้นสัมพัทธ์ ตำแหน่งที่อยู่ของไฟ พื้นที่ช่องเปิดภายในอาคารที่อากาศสามารถถ่ายเทได้ และการนำความร้อนของโครงสร้าง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดที่ทำให้เกิดลักษณะไฟที่แตกต่างกัน คือ ปริมาณของไฟ และพื้นที่ของช่องเปิด

ปริมาณไฟ (Fire load) คือปริมาณความร้อนที่วัดได้จากวัสดุที่ติดไฟในห้อง หรือปริมาณความร้อนของวัสดุที่ติดไฟต่อพื้นที่หนึ่งตารางหน่วย โดยในต่างประเทศได้มีการศึกษาและเก็บข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณของไฟไหม้ภายในอาคารกันอย่างกว้างขวาง ปริมาณไฟสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากปัจจัยหลายปัจจัย เช่น การกระจายตัวของวัสดุที่ติดไฟ ตำแหน่งของวัสดุ ลักษณะ และชนิดของห้องภายในอาคาร จากการเก็บข้อมูลจากหลายแหล่งได้ให้ค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นของปริมาณไฟในอาคารควรมีค่าไม่น้อยกว่า 10 ปอนด์ต่อพื้นที่หนึ่งตารางฟุตต่อหนึ่งชั่วโมง ซึ่งได้นำค่านี้ไปใช้กำหนดค่ามาตรฐานเพื่อใช้ในการทดสอบดังกล่าว

พื้นที่ของช่องเปิด (Opening area) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการลุกลามของไฟ ถ้ามีพื้นที่ช่องเปิดมากจะทำให้มีอากาศเย็นจากภายนอกเข้ามาแทนที่อากาศร้อนภายในที่ลอยตัว ส่งผลให้เกิดไฟลุกอย่างสมบูรณ์ และแพร่กระจายไปในพื้นที่โดยรอบได้ง่าย

2.11.1 แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟ (Fire load concept)

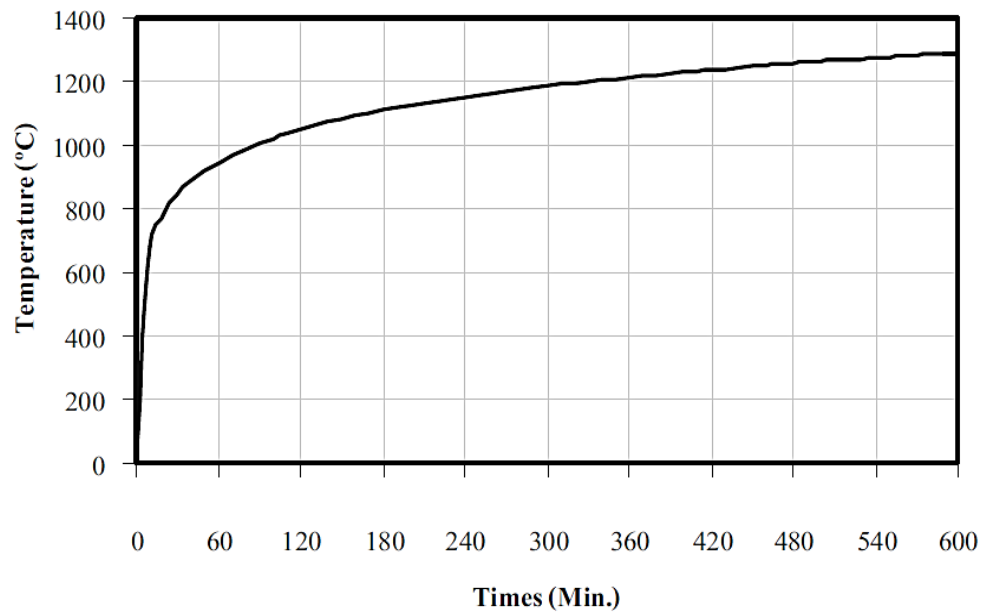
การศึกษาว่าอาคารที่ถูกไฟไหม้ไปแล้วนั้นจะสามารถต้านทานไฟได้มากน้อยเพียงใด จะต้องมาจากการเลียนแบบพฤติกรรมหรือการทดสอบจากข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงในอาคาร เพื่อหาเกณฑ์มาตรฐานขึ้นมา จึงได้มีการศึกษาจากหลายๆ ประเทศ และสถาบันต่างๆ ได้แก่ ISO, ASTM , มอก. และอื่นๆ โดยได้มีการนำมาตรฐานไฟขึ้นมาใช้ทดสอบโดยอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (Temperature–Time Relation) เพื่อเลียนแบบพฤติกรรมเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นจริงในอาคาร งานวิจัยของ Ingberg และคณะ (1957) ได้เสนอความคิดในการสร้างเส้นโค้งมาตรฐานไฟโดยเรียกว่า แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟ (Fire Load Concept)

แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟมีข้อสมมติฐานที่สำคัญดังนี้คือ

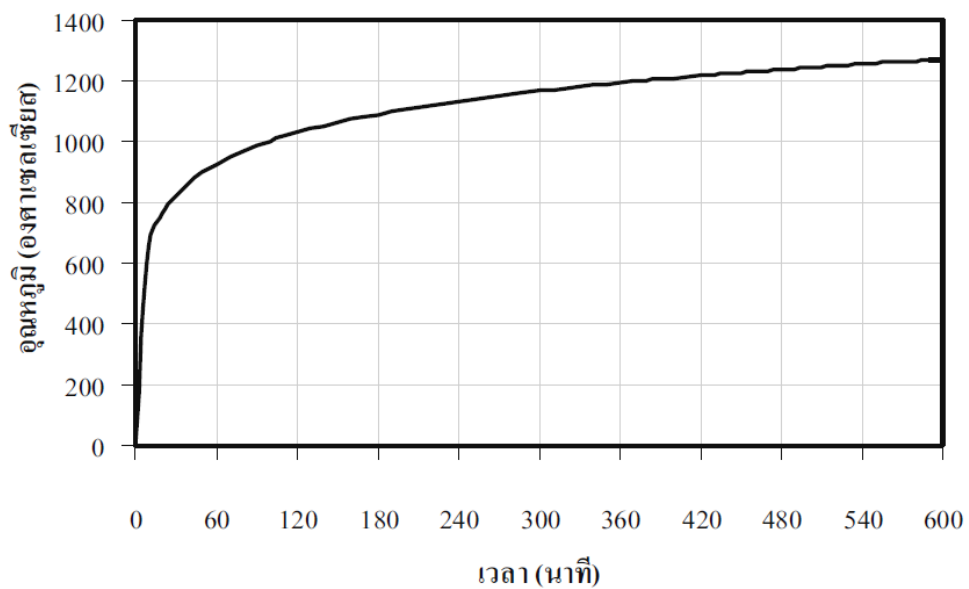
1. ความทนทานไฟขององค์อาคาร ขึ้นอยู่กับ “ความรุนแรงของไฟ” เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ความรุนแรงของไฟสำหรับอาคารหรือเตาไฟที่ใช้ในการทดสอบเพื่อลอกเลียนแบบไฟจริง ๆ นั้นคือพื้นที่ได้กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา
2. ความรุนแรงของไฟ ขึ้นอยู่กับความเข้มของปริมาณไฟอย่างเดียวเท่านั้น

ถึงแม้ว่าข้อสมมติฐานดังกล่าวนั้นจะไม่ถูกต้องเท่าไรนัก เพราะความรุนแรงของไฟไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มของปริมาณไฟเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับพื้นที่ของช่องเปิด ชนิดและน้ำหนักของเชื้อเพลิง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ก็เชื่อได้ว่าปัจจัยเหล่านั้นมีผลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเข้มของปริมาณไฟ และจนถึงบัดนี้ก็ยังไม่มียุทธวิธีที่สามารถเลียนแบบพฤติกรรมของไฟได้ใกล้เคียงเท่านี้ จึงยังคงใช้แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟนี้อยู่ และยังเป็นพื้นฐานในการสร้างเส้นโค้งมาตรฐานระหว่างอุณหภูมิกับเวลาด้วย

เส้นโค้งมาตรฐานระหว่างอุณหภูมิกับเวลา (Standard Temperature-Time Curve) ของ International Organization of Standardization ที่ได้สร้างเป็นมาตรฐานของการทนไฟสำหรับชิ้นส่วนวัสดุก่อสร้าง (ISO/TR 834-3, 1994) ได้เสนอเส้นโค้งมาตรฐานระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่มีความเข้มของปริมาณไฟใกล้เคียงกับไฟที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งใกล้เคียงกับของประเทศไทยที่มีมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ในด้านการทดสอบความทนไฟชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างอาคาร เลขที่ มอก. 1334 เล่ม 3, 2550 ก็ได้เสนอเส้นโค้งมาตรฐานเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังภาพที่ 2-7 และภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2- 7 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ ISO/TR 834-3
(ที่มา: ISO/TR 834-3, 1994)



ภาพที่ 2- 8 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ มอก. 1334 เล่ม 3
(ที่มา: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2550)

ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับความรุนแรงของไฟ (Basic Theory of Fire Severity) ถึงแม้ว่าปัจจัยที่สำคัญที่จะส่งผลให้ความรุนแรงของไฟที่เกิดขึ้นในอาคารจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับ เชื้อเพลิงหรือวัสดุที่ติดไฟได้ในอาคาร และพื้นที่ของช่องเปิดภายในอาคาร แต่ปัจจัยทั้งสองนี้สามารถแปรเปลี่ยนได้ และไม่สามารถที่จะกำหนดค่าตายตัวได้ว่าในอาคารนั้นๆ จะมีค่าเท่าไร ดังนั้นการที่จะกำหนดความรุนแรงของไฟจึงจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิของไฟที่เวลาต่างๆ ก็คือความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลานั้นเอง ความรุนแรงของไฟจริงๆ ก็คือพลังงานความร้อนที่สามารถทำลายสมบัติในการต้านทานไฟ และความทนทานไฟของวัสดุ พลังงานความร้อนในที่นี้ก็คือพื้นที่ใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ซึ่งสอดคล้องกับแนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟที่ว่า ความรุนแรงของไฟก็คือพื้นที่ใต้เส้นโค้งระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

2.11.2 สมบัติของคอนกรีตหลังการเผาไหม้

ในด้านการป้องกันอัคคีภัยนั้นเป็นข้อกำหนดส่วนที่สำคัญที่สุดในการออกแบบอาคาร ข้อกำหนดบทยแรกๆ ใน Architectural Building Codes ก็คือ Fire Safety Codes and Regulation เพราะการออกแบบอาคาร หากเริ่มออกแบบด้วยหลักการที่ถูกต้อง ก็จะทำให้อาคารปลอดภัย แต่หากเริ่มต้นไม่ถูกต้อง ก็จะทำให้อาคารนั้นเสี่ยงต่อการเกิดอัคคีภัย และเกิดการสูญเสียมากกว่าที่ควร ทำให้เกิดการพิจารณาปรับปรุงกฎกระทรวง และข้อกำหนดใหม่ๆ โดยเฉพาะกฎกระทรวงฉบับที่ 47 (2540) และกฎกระทรวงฉบับที่ 48 (2540) ที่เน้นเรื่องอัตราการทนไฟ และเป็นกฎหมายฉบับแรกที่ใช้บังคับกับอาคารเก่า นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดให้มีการประกันภัยให้กับผู้ใช้อาคาร และข้อบังคับให้มีการตรวจสอบอาคารและการต่ออายุการใช้อาคาร ซึ่งจะเป็นข้อกำหนดที่จะทำให้อาคารต้องมีมาตรฐานความปลอดภัยที่สูงขึ้น และจะต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดในกฎหมาย ซึ่งจะอ้างอิงมาตรฐานสากล จึงควรทราบกฎหมายและมาตรฐานที่สำคัญมีดังนี้คือ

พรบ.ควบคุมอาคาร พรบ.ฉบับนี้ได้ประกาศใช้เป็นฉบับแรกในปี พ.ศ. 2522 และฉบับที่ 2 ในปี พ.ศ. 2535 เพื่อใช้ควบคุมการก่อสร้างอาคาร โดยมีกรมโยธาธิการ สังกัดกระทรวงมหาดไทย เป็นผู้รับผิดชอบในการร่างกฎกระทรวง และกฎกระทรวงฉบับที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันอัคคีภัยที่สำคัญได้แก่

กฎกระทรวง ฉบับที่ 47 (2540) ข้อกำหนดสำหรับอาคารสูง อาคารขนาดใหญ่ อาคารขนาดใหญ่พิเศษ อาคารสาธารณะ อาคารอยู่อาศัยรวม โรงงาน ภัตตาคาร สำนักงาน (อาคารเก่า)

กฎกระทรวง ฉบับที่ 48 (2540) ข้อกำหนดอัตราการทนไฟของโครงสร้างอาคาร การทนไฟของอาคารทำให้มีเวลาการอพยพหนีไฟจำกัด การขยายตัวของเพลิง และทำให้อาคารปลอดภัยต่อการเข้าผจญเพลิงของเจ้าหน้าที่ดับเพลิง โดยอัตราการทนไฟนั้นสามารถสรุปจากกฎกระทรวงฉบับที่ 48 (2540) ได้ดังนี้ การกำหนดอัตราการทนไฟจะเน้นที่อาคารสูง อาคารขนาดใหญ่พิเศษ และ อาคารขนาดใหญ่ โดยกำหนดให้

โครงสร้าง เสา และ คาน มีอัตราทนไฟ ไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง

พื้น ไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง

บันไดที่ไม่ใช่บันไดหนีไฟ ไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง

บันไดหนีไฟ ไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง

เทียบเท่าคอนกรีตหนาอย่างน้อย 10 ซม. และวัสดุทนไฟมีหลายชนิด ผนังคอนกรีตหรือผนังก่ออิฐ ก็เป็นวัสดุที่ทนไฟได้ดีและมีอัตราทนไฟมากกว่า 1 ชั่วโมง ส่วนแผ่นยิปซัมก็เป็นวัสดุที่ทนไฟได้ดี และ สะดวก เบา ราคาก็ไม่แพง จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

Omer Arioiz (2007) ได้ศึกษาผลกระทบของระดับอุณหภูมิต่อสมบัติของคอนกรีต โดยวิเคราะห์ความแตกต่างของความร้อน จากการศึกษาพบว่าคอนกรีตที่เผาอุณหภูมิถึง 400 องศาเซลเซียส มีสีผิวที่เริ่มเปลี่ยนไปเนื่องจากปริมาณน้ำในคอนกรีตระเหยออกส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในคอนกรีต และกำลังในด้านต่างๆจะลดลง เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิถึง 600 องศาเซลเซียส จะสังเกตเห็นรอยร้าวเล็กๆ จนเพิ่มอุณหภูมิถึง 800 องศาเซลเซียส พบรอยแตกชัดเจน และรอยร้าวจะยิ่งชัดเจนมากขึ้นอีกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น จนไม่สามารถยึดเหนี่ยวกันได้

2.12 โปรแกรมจำลองการใช้พลังงานในอาคารสำหรับประเทศไทย

ภายใต้ พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมโดย พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2550 ให้อำนาจรัฐมนตรีว่าการกระทรวงพลังงานออกกฎกระทรวง กำหนดเกณฑ์มาตรฐานการอนุรักษ์พลังงานในอาคารขึ้นมา ซึ่งมีผลบังคับใช้กับอาคารที่จะขออนุญาตก่อสร้างใหม่หรือดัดแปลงอาคาร โดยตรวจสอบการใช้พลังงาน

ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบว่าเป็นไปตามกฎหมายแล้วจึงอนุญาตให้ก่อสร้างหรือดัดแปลงได้ โดยใช้โปรแกรม Building Energy Code (BEC) ของกระทรวงพลังงาน อาคารที่ก่อสร้างใหม่หรือดัดแปลงอาคารที่มีขนาดพื้นที่รวมกันทุกชั้นในหลังเดียวกันตั้งแต่ 2,000 ตารางเมตรขึ้นไป ต้องมีการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงานตามกฎหมายกระทรวงพลังงานกำหนด เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่างๆ ของอาคาร พ.ศ.2552 (ศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

อาคารอ้างอิง หมายความว่า อาคารที่มีการออกแบบให้มีพื้นที่การใช้งาน ที่ตั้ง ทิศทาง พื้นที่กรอบอาคารแต่ละด้าน และลักษณะการใช้งานเช่นเดียวกับอาคารที่จะก่อสร้าง หรือดัดแปลง โดยอาคารดังกล่าวนี้ต้องมีค่าของระบบกรอบอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบปรับอากาศเป็นไปตามข้อกำหนดแต่ละระบบ

กฎกระทรวงนี้ ครอบคลุมอาคาร 9 ประเภท ดังนี้

1. สถานพยาบาล
2. สถานศึกษา
3. สำนักงาน
4. อาคารชุดตามกฎหมายว่าด้วยอาคารชุด
5. อาคารชุมนุมคน
6. อาคารโรงแรม
7. อาคารโรงแรม
8. อาคารสถานบริการ/สถานบริการ
9. อาคารห้างสรรพสินค้า/ศูนย์การค้า

กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานและหลักเกณฑ์ในการออกแบบอาคารไว้ดังนี้

1. ระบบกรอบอาคาร

1.1 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารในส่วนที่มีการปรับอากาศในแต่ละประเภทของอาคารต้องมีค่าไม่เกินดังต่อไปนี้ ดังตารางที่ 2-28

ตารางที่ 2- 28 การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร

ประเภทอาคาร	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (วัตต์ต่อตารางเมตร)
ก) สถานศึกษา สำนักงาน	50
ข) โรงแรมหรู ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	40
ค) โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	30

1.2 ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารในส่วนที่มีการปรับอากาศในแต่ละประเภทของอาคารต้องมีค่าไม่เกินดังต่อไปนี้ ดังตารางที่ 2-29

ตารางที่ 2- 29 การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร

ประเภทอาคาร	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (วัตต์ต่อตารางเมตร)
ก) สถานศึกษา สำนักงาน	15
ข) โรงแรมสรรพ ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	12
ค) โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	10

2. ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

การใช้ไฟฟ้าส่องสว่างภายในอาคาร โดยไม่รวมพื้นที่จอดรถให้เป็นดังนี้

2.1 การใช้ไฟฟ้าส่องสว่างภายในอาคาร ต้องให้ได้ระดับความส่องสว่างสำหรับงานแต่ละประเภทอย่างเพียงพอ และเป็นไปตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร หรือกฎหมายเฉพาะว่าด้วยการนั้นกำหนด

2.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับใช้ส่องสว่างภายในอาคารต้องใช้กำลังไฟฟ้าในแต่ละประเภทอาคารมีค่าไม่เกิน ดังต่อไปนี้ ดังตารางที่ 2-30

ตารางที่ 2- 30 การใช้ไฟฟ้าส่องสว่างภายในอาคาร

ประเภทอาคาร	ค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุด (วัตต์ต่อตารางเมตรของพื้นที่ใช้งาน)
ก) สถานศึกษา สำนักงาน	14
ข) โรงแรมสรรพ ศูนย์การค้า สถานบริการ ห้างสรรพสินค้า อาคารชุมนุมคน	18
ค) โรงแรม สถานพยาบาล อาคารชุด	12

3. ระบบปรับอากาศ

ระบบปรับอากาศประเภทและขนาดต่างๆ ที่ติดตั้งใช้งานในอาคาร ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็นในรูปของอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานและค่าพลังไฟฟ้าต่อต้านความเย็นของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ ดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องปรับอากาศขนาดเล็กต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะหรืออัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำ ดังต่อไปนี้ ดังตารางที่ 2-31

ตารางที่ 2- 31 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ และ ค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็น

ขนาดของเครื่องปรับอากาศ (วัตต์)	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (วัตต์ต่อวัตต์)	อัตราส่วนประสิทธิภาพ พลังงาน (บีทียูต่อชั่วโมงต่อวัตต์)
ไม่เกิน 12,000	3.22	11

3.2 ระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ต้องมีค่าพลังไฟฟ้าต่อต้านความเย็นของเครื่องทำน้ำเย็นและส่วนประกอบอื่นๆ ของระบบปรับอากาศดังต่อไปนี้

ก) เครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศต้องมีค่าพลังไฟฟ้าต่อต้านความเย็นไม่เกินกว่าที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้ ดังตารางที่ 2-32

ข) ส่วนประกอบอื่นของระบบปรับอากาศที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ประกอบด้วย ระบบระบายความร้อน ระบบจ่ายน้ำเย็น และระบบส่งลมเย็น ต้องมีค่าพลังไฟฟ้าต่อต้านความเย็นรวมกันไม่เกิน 0.5 กิโลวัตต์ต่อต้านความเย็น

3.3 เครื่องทำน้ำเย็นแบบดูดกลืนต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำแล้วแต่กรณีดังต่อไปนี้ ทั้งนี้ การคิดค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะให้คิดเฉพาะค่าความร้อนเท่านั้น โดยไม่รวมกำลังไฟฟ้าในระบบ

ก) กำหนดภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบควบแน่นดังต่อไปนี้ ตามตารางที่ 2-33

ตารางที่ 2- 32 ค่าพลังไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศ

ประเภทของเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับระบบปรับอากาศ		ขนาด ความสามารถ ใน การทำความเย็นที่ ภาระพิกัดของ เครื่อง ทำน้ำเย็น (ตันความ เย็น)	ค่าพลังไฟฟ้าต่อตัน ความเย็น (กิโลวัตต์ ต่อตัน ความเย็น)
ชนิดการระบายความ ร้อน	แบบของเครื่องอัด		
ระบบระบายความร้อน ด้วยอากาศ	ทุกชนิด	น้อยกว่า 300	1.33
		น้อยกว่า 300	1.31
ระบายความร้อนด้วย น้ำ	แบบลูกสูบ	ทุกขนาด	1.24
	แบบโรตารี แบบสกูรู หรือแบบสโรลล์	น้อยกว่า 150	0.89
		น้อยกว่า 150	0.78
	แบบแรงเหวี่ยง	น้อยกว่า 500	0.76
		น้อยกว่า 500	0.62

ตารางที่ 2- 33 ภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำระบายความร้อนเข้าเครื่องควบ
ควบแน่น

ชนิดของ เครื่องทำน้ำ เย็นแบบ ดูดกลืน	ภาวะพิกัด				ค่า สัมประสิทธิ์ สมรรถนะ
	ด้านน้ำเย็น		ด้านน้ำระบายความร้อน		
	อุณหภูมิน้ำ เย็นเข้า	อุณหภูมิน้ำ เย็นออก	อุณหภูมิน้ำ เข้าเครื่อง ควบแน่น	อัตราการไหล	
				ของน้ำเข้า เครื่อง ควบแน่น	
	(องศาเซลเซียส)			(ลิตรต่อ วินาทีต่อ กิโลวัตต์)	
ก. ชั้นเดียว	12.0	7.0	32.0	0.105	0.65
ข. สองชั้น	12.0	7.0	32.0	0.079	1.10

ข) กำหนดภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิระบายความร้อนเข้าและออกจากเครื่องควบแน่น
ดังต่อไปนี้ ตามตารางที่ 2-34

ตารางที่ 2- 34 ภาวะพิกัดโดยระบุอุณหภูมิระบายความร้อนเข้าและออกจากเครื่องควบแน่น

ชนิดของ เครื่องทำน้ำ เย็นแบบ ดูดกลืน	ภาวะพิกัด				ค่า สัมประสิทธิ์ สมรรถนะ
	ด้านน้ำเย็น		ด้านน้ำระบายความร้อน		
	อุณหภูมิ เย็นเข้า	อุณหภูมิ เย็นออก	อุณหภูมิ เข้าเครื่อง ควบแน่น	อัตราการไหล ของน้ำเข้า เครื่อง ควบแน่น	
ก. ชั้นเดียว	12.0	7.0	32.0	37.5	0.65
ข. สองชั้น	12.0	7.0	32.0	37.5	1.10

4. อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน

อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อนที่ติดตั้งภายในอาคาร ต้องมีค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำ และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ ดังต่อไปนี้

- 1) หม้อไอน้ำ และ หม้อต้มน้ำร้อน ดังตารางที่ 2-35

ตารางที่ 2- 35 ค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำของหม้อไอน้ำ และ หม้อต้มน้ำร้อน

ประเภท	ค่าประสิทธิภาพขั้นต่ำ (ร้อยละ)
(ก) หม้อไอน้ำที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง (oil fired steam boiler)	85
(ข) หม้อน้ำร้อนที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง (oil fired hot water boiler)	80
(ค) หม้อไอน้ำที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง (gas fired steam boiler)	80
(ง) หม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง (gas fired hot water boiler)	80

2) เครื่องทำน้ำร้อนชนิดฮีตปั๊มแบบใช้อากาศเป็นแหล่งพลังงาน (air-source heat pump water heater) ตามตารางที่ 2-36

ตารางที่ 2- 36 เครื่องทำน้ำร้อนชนิดฮีตปั๊มแบบใช้อากาศ

ภาวะพิกัด				ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะขั้นต่ำ
ลักษณะการออกแบบ	อุณหภูมิน้ำเข้า	อุณหภูมิน้ำออก	อุณหภูมิอากาศ	
	(องศาเซลเซียส)			
ก) แบบที่ 1	30.0	50.0	30.0	3.5
ข) แบบที่ 2	30.0	60.0	30.0	3.0

5. การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร

ในกรณีที่มีการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อก่อสร้าง หรือ ดัดแปลงอาคารไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในข้อ 1 - 4 สำหรับแต่ละระบบอาคารสามารถพิจารณาการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารเป็นทางเลือกได้ ทั้งนี้ เกณฑ์การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารกำหนดให้อาคารที่ขออนุญาตต้องมีค่าการใช้พลังงานโดยรวมต่ำกว่า การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารอ้างอิงที่มีพื้นที่การใช้งาน ทิศทาง และพื้นที่ของกรอบอาคารแต่ละด้านเป็นเช่นเดียวกับอาคารที่จะก่อสร้างหรือดัดแปลง และมีค่าของระบบกรอบอาคาร ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบปรับอากาศ เป็นไปตามข้อกำหนดของแต่ละระบบ

6. การใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่าง ๆ ของอาคาร

การใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่างๆ ของอาคาร สามารถนำมาลดการใช้พลังงานของอาคารได้ดังต่อไปนี้

6.1) เมื่อมีการใช้พลังงานหมุนเวียนในอาคาร ให้ยกเว้นการนับรวมการใช้ไฟฟ้าบางส่วนในอาคารในกรณีที่ ระบบไฟฟ้าแสงสว่างของอาคารที่มีการออกแบบเพื่อใช้แสงธรรมชาติเพื่อการส่องสว่างภายในอาคารในพื้นที่ตามแนวกรอบอาคาร ให้ถือเสมือนว่าไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างในพื้นที่ตามแนวกรอบอาคารนั้น โดยการออกแบบดังกล่าวต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1) ต้องแสดงอย่างชัดเจนว่ามีการออกแบบสวิตช์ที่สามารถเปิดและปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างที่ใช้กับพื้นที่ตามแนวกรอบอาคาร โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างต้องมีระยะห่างจากกรอบอาคารไม่เกิน 1.5 เท่า ของความสูงของหน้าต่างในพื้นที่นั้น

2) กระจกหน้าต่างตามแนวกรอบอาคารตาม 1) ต้องมีค่าประสิทธิผลของสัมประสิทธิ์การบังแดด (effective shading coefficient) ไม่น้อยกว่า 0.3 และอัตราส่วนการส่งผ่านแสงต่อความร้อน (light to solar gain) มากกว่า 1.0 และพื้นที่กระจกหน้าต่างตามแนวกรอบอาคารตาม 1) ต้องไม่น้อยกว่าพื้นที่ผนังที่ขลิบ

6.2) อาคารที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในอาคาร สามารถนำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปหักออกจากค่าการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร

2.13 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ (2542) ศึกษาการนำซิลิกาอะลูมินามาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุก่อสร้างปูพื้น ได้แก่ บล็อกซีเมนต์เพสต์ประสาน และกระเบื้องดินเผา ซึ่งจะทำให้การศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และการทดสอบการชะละลายสารแอนทราควิโนน โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองพบว่า ค่าที่เหมาะสมของอัตราส่วนของซิลิกา-อะลูมินาเท่ากับ 0.25 มีอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และมีระยะเวลาในการบ่ม 28 วันส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 37.47 เมกะปาสคาล มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.03 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายแอนทราควิโนนร้อยละ 72 ส่วนสัดส่วนซิลิกาอะลูมินา เท่ากับ 0.50 มีอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และมีระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกประสานปูพื้นมีค่ากำลังรับแรงอัด 30.55 เมกะปาสคาล มีค่าความหนาแน่น 2.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายแอนทราควิโนนร้อยละ 54 การจัดการของเสียด้วยวิธีการทำก้อนแข็งสามารถลดการชะละลายของของเสียได้

มุสตี แพทย์นุเคราะห์ (2546) งานวิจัยที่ศึกษาการนำซิลิกาอะลูมินา และควอร์เทอร์ไนซ์-โครอสส์ลิงค์ชานอ้อยที่ผ่านการดูดซับสีมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกปูผนัง โดยศึกษาผลของค่ากำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด เท่ากับ 1 : 2 : 3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ คือ 0.5 และอัตราส่วนของซิลิกาอะลูมินาต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.25 ซึ่งกำหนดตัวแปรค่าอัตราส่วนชานอ้อยต่อวัสดุประสานที่ 0.05 0.10 0.15 และ 0.20 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนชานอ้อยต่อวัสดุประสานที่เหมาะสมคือที่ 0.15 และใช้ระยะเวลาในการบ่ม 21 วัน ทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 7.24 เมกะปาสคาล ค่าความหนาแน่น 1.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 4.45 ซึ่งมีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กำหนด

สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์ (2546) ทำการศึกษาการนำเถ้าลอยชานอ้อยมาใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อบำบัดน้ำเสียสีย้อม จากนั้นได้นำเถ้าชานอ้อยที่ใช้บำบัดสีย้อมแล้วมาจัดการ โดยการนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตอิฐบล็อกประสานปูพื้น เนื่องจากเถ้าลอยชานอ้อยนี้มีปริมาณซิลิกา และอะลูมินาออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลัก การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อมวลรวม อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ อัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าชานอ้อยกับปูนซีเมนต์ และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสม ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดในการผลิตอิฐบล็อกที่ดีที่สุดคือ 1 : 1.1 : 1.9 อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยชานอ้อยที่เหมาะสม คือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 โดยใช้ระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมคือ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 48.09 เมกะปาสคาล ส่งผลให้อิฐบล็อกประสานปูพื้นมีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และมีราคาต้นทุนการผลิตที่ลดลง

Isaia และคณะ (2003) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ ศึกษาโครงสร้างของคอนกรีตด้านสมบัติรับน้ำหนักเชิงกล (Mechanical strength) และความคงทน (Durability) เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น โดยใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป จากการทดลองคอนกรีตจะถูกแทนที่ด้วยวัสดุประสานต่างๆ ได้แก่ เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าแกลบจากโรงสี และปูนขาวที่บดละเอียด ในสัดส่วนการแทนที่ร้อยละ 12.5, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก และยังทำการศึกษาการแทนที่ด้วยการใช้วัสดุประสาน 2 ชนิด ในสัดส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบเท่ากับ ร้อยละ 12.5 และ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35, 0.5 และ 0.65 จากผลการทดลองสามารถ

สรุปได้ว่าผลของปอซโซลาน (Pozzolan effect) จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเพิ่มวัสดุปอซโซลานเข้าไปในส่วนผสม และการแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานจะส่งผลให้คอนกรีตเกิดความแข็งแรงช้า โดยพบว่ามีค่ากำลังรับแรงอัดจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจาก 28 วัน เป็น 91 วัน

กรณีชัย โสภณพละกุล และคณะ (2548) ศึกษาการนำตะกอนน้ำประปามาใช้เป็นสารปอซโซลานในการผลิตคอนกรีตบล็อกปูพื้น โดยจะศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตที่มีการผสมตะกอนประปา เปรียบเทียบกับก้อนคอนกรีตมาตรฐานที่ไม่มีการผสมตะกอนประปา ในการทดลองจะนำตะกอนประปามาใช้ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก เทียบกับหินเกล็ด ผสมในคอนกรีตบล็อกปูพื้น บ่มที่เวลา 7, 14 และ 28 วัน เพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ นำไปเทียบสมบัติกับก้อนคอนกรีตปูพื้นธรรมดา ผลการทดลองพบว่าคอนกรีตบล็อกปูพื้นที่เหมาะสมที่สุด คือ คอนกรีตบล็อกที่มีตะกอนประปาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีค่าน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 ใช้ระยะเวลาในการบ่มที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 407.52 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2540 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 4.03 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าคอนกรีตบล็อกที่ผสมตะกอนน้ำประปามีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตบล็อกทั่วไปถึง 22.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าตะกอนน้ำประปาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการเป็นมวลรวมในการผลิตคอนกรีตบล็อกปูพื้นได้ แต่อาจส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของวัสดุลดลงเมื่อมีการแทนที่ด้วยตะกอน

คณิตภูมิ ดุลยเกษม (2548) ทำการศึกษาการนำตะกอนประปาจากการผลิตน้ำในโรงประปามาใช้เป็นวัสดุเติมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำตะกอนจากโรงประปามาใช้แทนที่วัสดุเติมตั้งต้นในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยทำการสังเคราะห์ปูนเม็ดในเตาไฟฟ้าที่ให้ความร้อนสูง ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส และทำการศึกษาสมบัติของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ ด้วยการใช้เครื่องมือประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) และตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของปูนเม็ด ด้วยเทคนิค X-ray diffractometer (XRD) นอกจากนี้ยังทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของปูนเม็ดโดยใช้เทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปูนเม็ดที่สังเคราะห์ได้มีองค์ประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ เกิดขึ้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Mou และคณะ (2007) ศึกษาการรีไซเคิลแผ่นวงจรส่วนที่ไม่มีโลหะ (Nonmetallic Printed Circuit Board) เนื่องจากปัญหาการเพิ่มปริมาณของซากอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน จึงศึกษาหาแนวทางในการจัดการของเสียดังกล่าวด้วยการนำแผงวงจรมารีไซเคิลซึ่งส่วนที่เป็นโลหะสามารถสกัดนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่วนแผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจการนำของเสียจากแผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้ประโยชน์ โดยลักษณะของแผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะนี้เป็นผงเนื่องจากการนำไปบัด และนำของเสียนี้มาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวม เพื่อช่วยเติมเต็มช่องว่างภายในคอนกรีต แผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะจะมีน้ำหนักเบากว่าปูนซีเมนต์ และทราย โดยจะเข้าไปเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านค่ากำลังรับแรงอัด จากการศึกษาแผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์และทรายร้อยละ 3 ถึง ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1: 2.5 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.44 ในการผลิตก้อนมอร์ต้า จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของแผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะลงในส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ก้อนมอร์ต้ามีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ยุทธนา อินต๊ะทอง และคณะ (2551) ได้ศึกษาการนำตะกอนน้ำประปาที่เป็นกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการในการผลิตน้ำประปามาใช้ประโยชน์ จากการทดลองนำตะกอนมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนในการผลิตคอนกรีต โดยการศึกษาลักษณะของตะกอนน้ำประปา ความชื้น และความหนาแน่นของตะกอนน้ำประปา และอัตราส่วนผสมของตะกอนน้ำประปาต่อปูนซีเมนต์ ส่วนผสมที่ใช้ประกอบด้วยตะกอนน้ำประปา ปูนซีเมนต์ และน้ำ พบว่าอัตราส่วนผสมของตะกอนน้ำประปาต่อปูนซีเมนต์ที่ 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50 และ 70:30 ส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 179.89, 156.50, 148.49, 108.58, 49.12, 24.09 และ 5.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนน้ำประปาจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง

Thaniya Kaosol (2009) ศึกษาการนำของเสียตะกอนน้ำประปามาใช้ประโยชน์ในการผลิตอิฐมอดูเพื่อใช้ในการปูผนัง ในการทดลองได้ใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินปูนต่อน้ำเท่ากับ 1 : 4 : 4 : 1 และมีการศึกษานำตะกอนน้ำประปามาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวม ได้แก่ ทรายและหินปูน ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ตะกอนน้ำประปาแทนที่วัสดุผสมมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัด

ลดลง และถ้าเพิ่มระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตาม โดยการแทนที่ตะกอนน้ำประปาร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุดตามค่ามาตรฐานการผลิตอิฐมอญในประเทศไทย (TIS 109)

Sales และคณะ (2010) มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีการผสมตะกอนที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำประปาและซีลี้อยลงไปเป็นวัสดุทดแทนมวลรวม เพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีต โดยจะทำการทดลองการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่ผสมตะกอนน้ำประปาโดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อของเสียดน้ำ เท่ากับ $1 : 2.5 : 0.67 : 0.6$ และจะทำการผลิตคอนกรีตทั่วไปโดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดต่อน้ำ เท่ากับ $1 : 4.8 : 5.8 : 0.8$ เพื่อนำมาศึกษาสมบัติการนำความร้อน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมตะกอนน้ำประปาจะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ได้มีการผสมตะกอนน้ำประปาถึงร้อยละ 23 เนื่องจากปริมาณของอะลูมินาในตะกอนน้ำประปาส่งผลต่อสมบัติการลดการนำความร้อน นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมตะกอนน้ำประปาและคอนกรีตทั่วไปมีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 11.1 และ 20.9 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ตะกอนน้ำประปาในการผลิตวัสดุก่อสร้างจะส่งผลทำให้วัสดุก่อสร้างนั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง แต่มีความสามารถในการต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น

Cheng และคณะ (2011) ทำการศึกษาการนำเส้นใยรีโอคิวลมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมในการผลิตคอนกรีต เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุก่อสร้างเมื่อผสมเส้นใยรีโอคิวล โดยเส้นใยรีโอคิวลมีขนาดอยู่ในช่วง 17 ถึง 250 ไมโครเมตร และมีขนาดเล็กกว่า 150 ไมโครเมตร อยู่ถึงร้อยละ 30 นำเส้นใยรีโอคิวลมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด เนื่องจากเส้นใยรีโอคิวลมีองค์ประกอบที่มีความคล้ายกับวัสดุพอลิโพรพิลีน เช่น แก้วลอย หรือแก้วกลม เป็นต้น ในการทดลองได้นำเส้นใยรีโอคิวลมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมธรรมชาติ เพื่อทำการศึกษาสมบัติทางด้านค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ค่าแรงดึงแยก (Splitting tensile strength) ค่าความทนทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion resistance) และ ค่าการดูดซึมน้ำ (Absorption) การทดลองใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 และ 0.65 มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ เท่ากับ $1 : 2 : 3$ โดยใช้เส้นใยรีโอคิวลแทนที่มวลรวมร้อยละ 2, 5, 7 และ 10 โดยปริมาตร และใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14, 28 และ 56 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่เส้นใยรีโอคิวลเข้าไปผสมในคอนกรีตมากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตาม คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมน้ำต่อ

ปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.55 และมีการแทนที่เส้นใยหรือควูลต่อมวลรวมที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการผสมเส้นใยหรือควูลถึงร้อยละ 15 และ 18 ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 และ 56 วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยหรือควูลที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร สามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างของโครงสร้างภายใน และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือปฏิกิริยาปอซโซ-ลานได้ เป็นสาเหตุให้โครงสร้างคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น และส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง ส่วนเส้นใยหรือควูลที่มีขนาดใหญ่จะมีศักยภาพเข้าไปช่วยยับยั้งการแตกหักภายในโครงสร้างของคอนกรีตได้

Wang และคณะ (2012) ทำการศึกษาการนำแผ่นวงจรงใน ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุในด้านต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ เป็นต้น ในการทดลองตัวอย่างของแผ่นวงจรงในส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีองค์ประกอบของ เทอร์โมเซตเรซินร้อยละ 60 และเส้นใยแก้วร้อยละ 38 โดยน้ำหนัก ขนาดของของเสียที่นำมาผสมจะมีขนาด 0.16 ถึง 0.63 มิลลิเมตร อัตราส่วนของแผ่นวงจรงที่ไม่มีโลหะที่ใช้ทดแทนปูนซีเมนต์มีค่าร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า องค์ประกอบของแผ่นวงจรงในส่วนที่ไม่ใช่โลหะจะมีปริมาณของซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 20.8 เมื่อเพิ่มปริมาณของของเสียแผ่นวงจรงลงในส่วนผสม จะส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่น และค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลง โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมของแผ่นวงจรงที่แทนที่ปูนซีเมนต์คือ ร้อยละ 5 และ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ค่าแรงดัดโค้งงอมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อเพิ่มปริมาณของแผ่นวงจรง

จพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วรวรรณชัย สายวาริน (2556) ทำการศึกษาการนำเถ้าชานอ้อย และเถ้าแกลบที่เป็นวัสดุปอซโซลานมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งทำการศึกษ้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อย และเถ้าแกลบร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังมีการผสมกากตะกอนจากโรงงานชุบนิเกิลร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุยึดประสาน ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุ โดยการทดสอบด้วย เครื่อง X-ray fluorescence (XRF) ศึกษาสมบัติของก้อนหล่อแข็ง โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัด และการรั่วไหลของโลหะหนักโดยวิธี Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากตะกอนโลหะหนักจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งลดลง เมื่อเทียบกับก้อนคอนกรีตที่ไม่มีการผสมกากตะกอนของโลหะหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และก้อนหล่อแข็งที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 โดย

น้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าค่าอื่น ส่วนการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี TCLP ของก้อนหล่อ แข็งพบว่า เมื่อผสมกากตะกอนโลหะหนักในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การชะละลายของโลหะหนัก เพิ่มขึ้น ส่วนก้อนหล่อแข็งที่มีอายุการบ่มนานขึ้นจะมีการชะละลายของโลหะหนักน้อยลง และความเข้มข้นของโลหะหนักในสารชะละลายของก้อนตัวอย่างมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่ US.EPA กำหนด

Lin และคณะ (2013) การศึกษาการผลิตคอนกรีตที่มีการนำเส้นใยรีโอคิวลมาใช้เป็นวัสดุ แทนการใช้ปูนซีเมนต์ เพื่อช่วยลดการนำเส้นใยรีโอคิวลเข้าสู่พื้นที่หลุมฝังกลบ ในการทดลองได้มีการนำเส้นใยรีโอคิวลที่มีองค์ประกอบของซิลิกาสูงถึงร้อยละ 38.7 และมีอะลูมินาร้อยละ 18.6 เข้าไป แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.35 และ 0.55 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียด เท่ากับ 1 : 3 และมีระยะเวลาในการบ่ม 7, 28 และ 91 วัน ในการผลิตก้อนมอร์ตาร์ (Mortar) เพื่อทำการทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ ค่ากำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการดูโครงสร้างด้วยการใช้เทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ระยะเวลาการบ่ม 91 วัน เมื่อเพิ่มปริมาณ เส้นใยรีโอคิวลขึ้นจนถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตาม ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.35 แต่มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.55 พบว่าการแทนที่เส้น ใยรีโอคิวลร้อยละ 10 จะส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดที่ เพิ่มขึ้นนั้นมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน เนื่องจากเส้นใยรีโอคิวลมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม นอกจากนี้ขนาดของเส้นใยรีโอคิวลที่นำมาใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ซึ่งเป็น ขนาดที่คล้ายกับวัสดุปอซโซลาน จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ เมื่อศึกษาโครงสร้างภายในของ มอร์ตาร์ พบว่าเส้นใยรีโอคิวลจะเข้าไปเติมเต็มช่องว่างจึงส่งผลให้ขนาดของรูภายในโครงสร้างคอนกรีต ลดลง และช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้างได้

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2559) มีการศึกษานำฉนวนกันความร้อนที่ทำจากเส้นใยรีโอคิวลที่หมดสภาพการใช้งานแล้ว นำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เนื่องจากของเสีย จากเส้นใยรีโอคิวลมีปริมาณเพิ่มขึ้น จึงมีความต้องการที่จะลดของเสียเข้าสู่พื้นที่ฝังกลบ ด้วยการ นำมาใช้ประโยชน์ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือต้องการนำเส้นใยรีโอคิวลมาใช้เป็นเส้นใยในการ เสริมแรงคอนกรีต เพื่อศึกษาสมบัติการไหล ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าการทนต่อแรงดัด และการทดสอบ รอยร้าว โดยทำการผสมเส้นใยรีโอคิวลในคอนกรีตด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0 โดย

ปริมาณ และนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมเส้นใยหรือควูล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ การผสมเส้นใยหรือควูลร้อยละ 0.1 ถึง 0.5 โดยปริมาตร จะมีค่าการไหลตัวของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ มาตรฐาน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยหรือควูลมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการไหลตัวลดลงหรือมีความหนืด มากขึ้น ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเส้นใยหรือควูลที่ใส่ลงไป เนื่องจากเส้น ใยหรือควูลจะเข้าไปเติมช่องว่างขนาดเล็กๆภายในโครงสร้างคอนกรีตได้ ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าความ หนาแน่นเพิ่มมากขึ้น โดยเติมเส้นใยหรือควูลร้อยละ 0.5 และ 1.0 จะส่งผลให้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูง กว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเส้นใยหรือควูล และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยหรือควูลที่ผสมลงไปในคอนกรีต พบว่าค่าเฉลี่ยรอยร้าวที่ขึ้นงานจะมีค่าลดลง หรือไม่พบรอยร้าวเลย

Iniyon (2016) มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการนำเอาแผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาใช้เป็น วัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดในการผลิตคอนกรีต เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุก่อสร้างในด้านกำลังรับ แรงอัด โดยการทดลองได้ศึกษาอัตราส่วนของแผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่ใช้แทนที่มวลรวมร้อยละ 10, 20, 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคของแผ่นวงจรในส่วนที่ไม่ใช่โลหะเท่ากับ 4.75 ถึง 2 มิลลิเมตร อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และมีอัตราปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ด เท่ากับประมาณ 1 : 2 : 3 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของแผ่นวงจร ในส่วนที่ไม่ใช่โลหะมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลง และที่ปริมาณการแทนที่ ของของเสียเท่ากัน พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะส่งผลให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Kongsansathian และคณะ (2016) มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาการนำตะกอนจาก กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตสีน้ำไปใช้ประโยชน์ใหม่ โดยตะกอนที่นำมาทดลองมีปริมาณ ของอะลูมิเนียมมากที่สุดถึงร้อยละ 18.99 ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 25.63 ซึ่งในการทดลอง จะนำตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียนี้นี้มาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนทรายในการผลิตอิฐบล็อก ประสาน ขนาดอนุภาคของตะกอนอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1.18 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนของซีเมนต์ต่อ ทรายต่อหินปูนเท่ากับ 1 : 2 : 4 อัตราส่วนของตะกอนต่อทรายเท่ากับร้อยละ 12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75, 87.5 และ 100 โดยน้ำหนัก เพื่อนำมาวิเคราะห์ ค่ากำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ ความ หนาแน่น และการทดสอบการรั่วไหลของโลหะหนักด้วยวิธี WET และวิธี TCLP โดยการวัดค่าโลหะ หนักด้วยเครื่อง AAS เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของบล็อกประสานที่ผลิตได้กับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

มผช.602/2547 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกประสานผ่านค่ามาตรฐานทุกอัตราส่วน และความหนาแน่นของบล็อกประสานลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนน้ำเสีย ส่วนการทดสอบความเป็นอันตรายจากก้อนตัวอย่างด้วยวิธีตามข้อกำหนดของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมด้วยวิธี WET และตามข้อกำหนดของประเทศสหรัฐอเมริกาด้วยวิธี TCLP พบว่ามีปริมาณโลหะหนัก Pb, Cu, Cd, Zn และ Fe ไม่เกินตามมาตรฐานที่กำหนด

ตารางที่ 2- 37 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเส้นใยรีโอคิวลมาใช้เป็นวัสดุทดแทน

ชื่อผู้วิจัย	ใช้เป็นวัสดุทดแทน	ส่วนผสมพื้นฐาน	อัตราส่วนการแทนที่	ผลการวิจัย
Cheng และคณะ (2011)	มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด	- ปูน:มวลรวมละเอียด:มวลรวมหยาบ = 1:2:3 - w/c = 0.55	- 2, 5, 7 และ 10% โดยปริมาตร - เส้นใยรีโอคิวลที่มีขนาดอยู่ในช่วง 17 ถึง 250 ไมโครเมตร	- สามารถแทนที่เส้นใยรีโอคิวลได้ 10% - ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น
Lin และคณะ (2013)	ปูนซีเมนต์	- ปูน:ทราย = 1:3 - w/c = 0.35 และ 0.55	- 10, 20, 30 และ 40% โดยน้ำหนัก - เส้นใยรีโอคิวลที่นำมาใช้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร	- ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เส้นใยรีโอคิวล
ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2559)	ผสมเพิ่มไปในคอนกรีต	- ปูน:ทราย:หิน = 1:3.5:4 - w/c = 0.48	- ผสมเส้นใยรีโอคิวลในคอนกรีตด้วยอัตราส่วน 0.1, 0.3, 0.5 และ 1.0% โดยปริมาตร	- ส่วนผสมมีความหนืดมากขึ้น - สามารถแทนที่เส้นใยรีโอคิวลได้ไม่เกิน 0.5% - ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น - รอยแตกร้าวลดลง

ตารางที่ 2- 38 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามาใช้เป็นวัสดุทดแทน

ชื่อผู้วิจัย	ใช้เป็นวัสดุทดแทน	ส่วนผสมพื้นฐาน	อัตราส่วนการแทนที่	ผลการวิจัย
กรณีชัย โสภณพละกุล และคณะ (2548)	มวลรวม หยาบ	- ผสมปูน ทราย หินเกล็ด และน้ำ - w/c = 0.6	- นำตะกอนจากโรง ผลิตน้ำประปามา แทนที่หินเกล็ด 10 และ 20% โดย น้ำหนัก	- การแทนที่ ตะกอนจากโรง ผลิตน้ำประปาที่ 10% เหมาะสม ที่สุด - นำมาใช้เป็นวัสดุ ทดแทนในการ ผลิตคอนกรีต บล็อกปูพื้นได้
คณิตภูมิ ดุยเกษม (2548)	ใช้เป็น วัสดุดิบใน กระบวนการ ผลิต ปูนซีเมนต์	-	- นำตะกอนจากโรง ผลิตน้ำประปามา เป็นวัสดุดิบในการ ผลิตปูนซีเมนต์	- พบว่าปูนที่ สังเคราะห์มี องค์ประกอบ สำคัญคล้ายของ ปูนซีเมนต์พอร์ต แลนด์
ยุทธนา อินต๊ะทอง และคณะ (2551)	ปูนซีเมนต์	- ผสมปูนซีเมนต์ ตะกอนจากโรง ผลิตน้ำประปา และน้ำ	- อัตราส่วนผสมของ ตะกอนจากโรงผลิต น้ำประปา ต่อ ซีเมนต์ 10, 20, 30, 40, 50 และ 70% โดยน้ำหนัก	- เมื่อเพิ่มตะกอน จากโรงผลิต น้ำประปา ส่งผล ให้ค่ารับแรงอัด ลดลง

ตารางที่ 2- 38 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามาใช้เป็นวัสดุทดแทน (ต่อ)

ชื่อผู้วิจัย	ใช้เป็นวัสดุทดแทน	ส่วนผสมพื้นฐาน	อัตราส่วนการแทนที่	ผลการวิจัย
Thaniya Kaosol (2009)	มวลรวมได้แก่ทรายและหินฝุ่น	- ปูน:ทราย:หิน ฝุ่น:น้ำ = 1:4:4:1	- แทนที่มวลรวมด้วยตะกอนน้ำประปา 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก	- ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง - การแทนที่ตะกอนน้ำประปาที่ 10% และ 20% มีค่ารับแรงอัดต่ำสุด ผ่านมาตรฐานการผลิตอิฐมอญ
Sales และคณะ (2010)	มวลรวม	- ปูน:ทราย:หิน: น้ำ = 1:4.8:5.8:0.8 - ซีเมนต์: ตะกอน น้ำประปา:น้ำ = 1:6:4.5	- ปูน:ทราย:ของ เสีย:น้ำ = 1:2.5:0.67:0.6	- คอนกรีตที่ผสมตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีค่าการนำความร้อนลดลง - ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง
Kongsansathian และคณะ (2016)	มวลรวมได้แก่ทราย	- ปูน:ทราย: หิน = 1:2:4	- อัตราส่วนการแทนที่ของตะกอนน้ำเสียเท่ากับ 12.5, 25, 37.5, 50, 62.5, 75, 87.5 และ 100% โดยน้ำหนัก	- ค่าแรงอัดลดลงเมื่อเพิ่มการแทนที่ของเสีย - ทดสอบความเป็นอันตรายด้วยวิธี WET และ TCLP ผ่านค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 2- 39 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะใช้เป็นวัสดุทดแทน

ชื่อผู้วิจัย	ใช้เป็นวัสดุทดแทน	ส่วนผสมพื้นฐาน	อัตราส่วนการแทนที่	ผลการวิจัย
Mou และคณะ (2007)	มวลรวม (ทราย)	- ปูน:ทราย = 1:2.5 - w/c = 0.45	- อัตราส่วนการแทนที่ของผงวงจรีเท่ากับ 3 ถึง 10% โดยน้ำหนัก	- ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ
Wang และคณะ (2012)	ปูนซีเมนต์	- ปูน:ทราย = 1:3 - w/c = 0.50	- อัตราส่วนการแทนที่ของผงวงจรีเท่ากับ 5, 10, 15, 20 และ 25% โดยน้ำหนัก	- อัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมคือ 5 และ 10% - ค่ารับแรงอัดลดลง เมื่อเพิ่มผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ
Iniyan (2016)	มวลรวมได้แก่ทราย	- ปูน:ทราย:หินเกล็ด = 1:2:3 - w/c = 0.45	- อัตราส่วนการแทนที่ของผงวงจรีเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก	- ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อเพิ่มผงวงจรีอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ตารางที่ 2- 40 งานวิจัยที่ทำการศึกษา

ชื่อผู้วิจัย	ใช้เป็นวัสดุทดแทน	ส่วนผสมพื้นฐาน	อัตราส่วนการแทนที่	วิเคราะห์ผลการวิจัย
ปาณิสรา นามจันทร์ (2560)	- น้ำของ เสียดแต่ละ ชนิด แทนที่ มวลรวม ละเอียด ได้แก่ ทราย	- ปูน:ทราย: น้ำ - w/c - ขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ กระเบื้อง หลังคา ซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปู ผนัง	- อัตราส่วนการแทนที่ เส้นใยหรือควูล์ต่อ ทราย เท่ากับ 1, 5, 10 และ 20% โดย น้ำหนัก	- องค์ประกอบทางเคมี ของของเสียด (XRF) - การกระจายขนาดและ อนุภาคของของเสียด - Scanning electron microscope (SEM)
			- อัตราส่วนการแทนที่ ตะกอนจากโรงผลิต น้ำประปาต่อทราย เท่ากับ 1, 5, 10 และ 20% โดย น้ำหนัก	- ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength test) - ค่าแรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load)
			- อัตราส่วนการแทนที่ ผงที่บดจาก แผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ ไม่ใช่โลหะต่อทราย เท่ากับ 1, 5, 10 และ 20% โดย น้ำหนัก	- ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorbtion) - ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) - วิเคราะห์โครงสร้างผลึก (XRD) - การทดสอบการทนไฟ ด้วยการเผา

บทที่ 3

แผนการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอควูล ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากฉนวนที่ใช้ในอุตสาหกรรม ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มาใช้เป็นวัสดุทดแทนเพื่อการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 6 การทดลอง การทดลองแรกเป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ของเสีย การทดลองที่ 3 ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสีย และเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง การทดลองที่ 4 ทดสอบการทนไฟของมอร์ตาร์ด้วยการเผา การทดลองที่ 5 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร และ ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้านเรือน และการทดลองสุดท้ายเป็นการประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังที่ผสมของเสียดังกล่าว ตามแผนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพที่ 3-1 โดยจะทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและห้องปฏิบัติการทดสอบ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ของเสีย 3 ชนิด

- ก. เส้นใยรีโอควูล นำฉนวนเส้นใยรีโอควูลที่ไม่ใช้งานแล้ว จากบริษัท วินเทอมส์ จำกัด ทำการตัดเพื่อลดขนาดให้มีลักษณะเป็นเส้นใยที่มีความยาวของเส้นใยประมาณ 0.5 - 1 เซนติเมตร

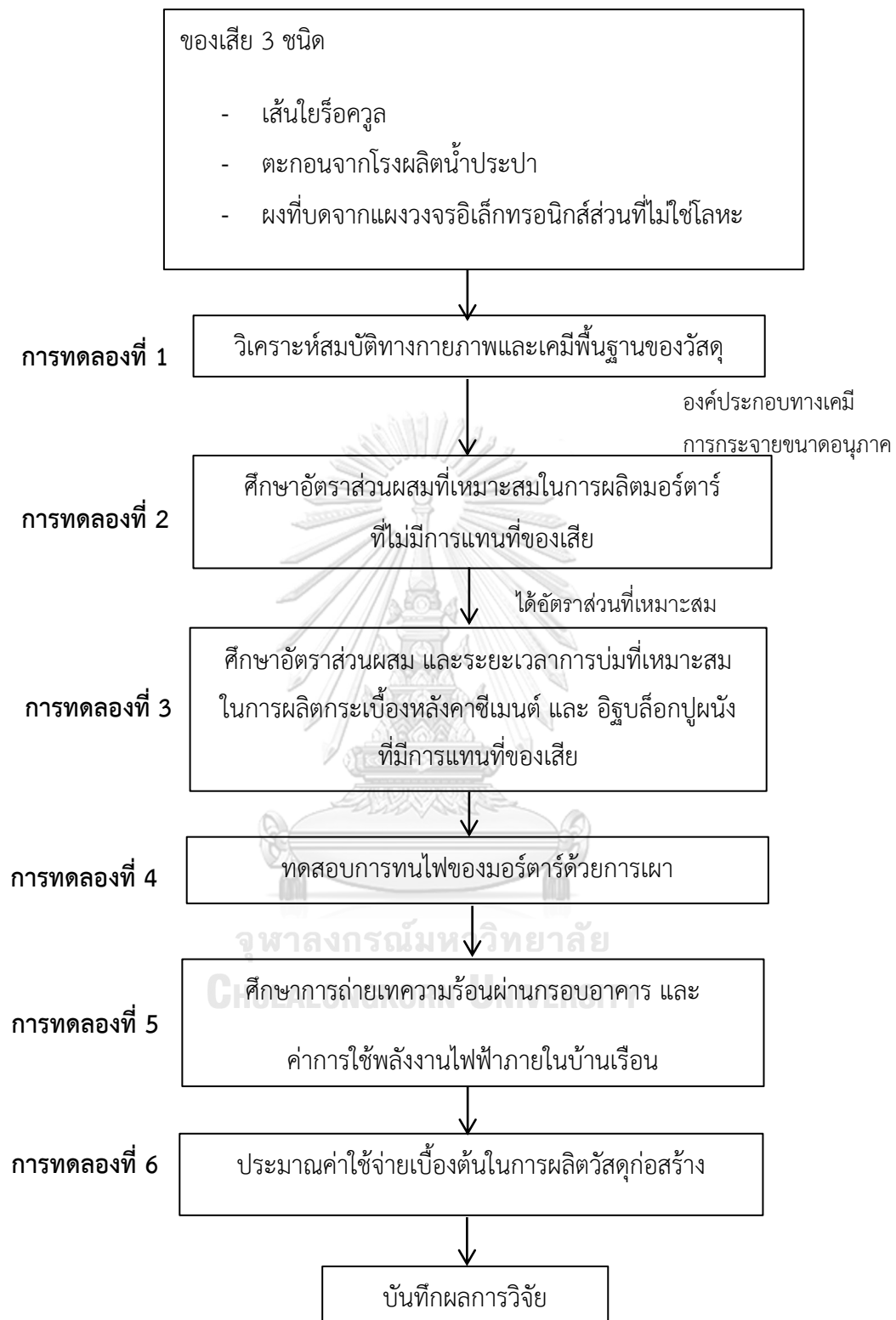
ข. ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา นำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ได้จากการตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปาของบริษัท ประปาปทุมธานี จำกัด มาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีน้ำหนักคงที่ เพื่อให้สามารถควบคุมความชื้นในการทำวิจัยได้ หลังจากนั้นนำตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาให้มีขนาดเล็กและนำไปผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 22

ค. ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มาจากโรงงานรีไซเคิล ซึ่งเป็นผงขนาดเล็ก และผ่านการคัดแยกโลหะออกแล้วเหลือเพียงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่มีโลหะ

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (มอก.15เล่ม1-2547)
3. ทราฮายาบ ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ขนาดอนุภาคไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร
4. น้ำประปา ที่มีความขุ่นไม่เกิน 2000 ppm ปราศจากกรด ต่าง น้ำมัน และสารอื่นๆ ในปริมาณที่จะส่งผลกระทบต่อคอนกรีต

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง ขนาด 3,000 กรัม อ่านค่าละเอียด 0.01 กรัม
2. กระจกบอทวง ขนาด 500 มิลลิเมตร อ่านค่าได้ละเอียด 10 มิลลิเมตร
3. แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ ขนาด 5 เซนติเมตร
4. แบบหล่อตัวอย่างแผ่นกระเบื้องสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 13 x 26 x 2 เซนติเมตร
5. แบบหล่อตัวอย่างอิฐบล็อกปูผนังขนาด 7 x 39 x 19 เซนติเมตร
6. แบบหล่อตัวอย่างกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ขนาด 33 x 42 เซนติเมตร
7. เครื่องผสม (Mixer)
8. แท่งกระทิ้ง (Tamper)
9. เครื่องทำด้วยเหล็กแบน ขอบสันเกรียงเป็นเส้นตรงยาว 100 ถึง 150 มิลลิเมตร
10. เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด น้ำหนักกดสูงสุด 30 ตัน
11. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer)



ภาพที่ 3- 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การทดลองที่ 1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของของเสียที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1.1 การวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย

ใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-ray fluorescence ซึ่งสารประกอบที่วิเคราะห์จะแสดงผลในรูปของสารประกอบออกไซด์ของธาตุ โดยทำการวิเคราะห์สารประกอบ Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O , SiO_2 และ SO_3 เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการอธิบายผลของสมบัติต่างๆของวัสดุก่อสร้าง หรือใช้ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งกำเนิดของเสียทั้ง 3 ชนิด

3.3.1.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution) ของของเสียทั้ง 3 ชนิด

วิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เศษเส้นใยจากฉนวนหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค โดยการคัดแยกด้วยตะแกรงเครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C33-93 และ ASTM C136-95a

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มีแกรนิตของเสีย

3.3.2.1 ศึกษาอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์

ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมในการผลิตมอร์ตาร์ ทำการหล่อมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร โดยตัวแปรที่ศึกษาจะแสดงในตารางที่ 3-1 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ต่อทราย เท่ากับ 1:2, 1:2.5 และ 1:3 โดยปริมาตร ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.50 และระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน แล้วจึงนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด เพื่อหาอัตราส่วนผสมพื้นฐานที่เหมาะสม โดยมีแผนงานแสดงในภาพที่ 3-2

ตารางที่ 3- 1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสม

ลำดับ	พารามิเตอร์
- ตัวแปรอิสระ 1. อัตราส่วนผสม	ปูนซีเมนต์: ทราย เท่ากับ 1 : 2 ปูนซีเมนต์: ทราย เท่ากับ 1 : 2.5 ปูนซีเมนต์: ทราย เท่ากับ 1 : 3
- ตัวแปรตาม 1. สมบัติของมอร์ตาร์	- ค่ากำลังรับแรงอัด
- ตัวแปรควบคุม 1. ชนิดของวัสดุผสม 2. อัตราส่วนน้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์ 3. ระยะเวลาในการบ่ม	- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 - อัตราส่วนน้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50 - 7 วัน

3.3.2.2 ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์

ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ ทำการหล่อมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร โดยตัวแปรที่ศึกษาจะแสดง ในตารางที่ 3-2 อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.45, 0.50 และ 0.60 ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2.1 และระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน แล้วไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด หาอัตราส่วนผสมพื้นฐานที่เหมาะสม โดยมีแผนงานแสดงในภาพที่ 3-2 เพื่อนำค่าอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อ น้ำที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองศึกษาการผลิตมอร์ตาร์มีการใช้ของเสียเป็นวัสดุผสมทดแทนต่อไป

ตารางที่ 3- 2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม

ลำดับ	พารามิเตอร์
- ตัวแปรอิสระ 1. อัตราส่วนผสม	น้ำ : ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.45 น้ำ : ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50 น้ำ : ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.60
- ตัวแปรตาม 1. สมบัติของมอร์ตาร์	ค่ากำลังรับแรงอัด
- ตัวแปรควบคุม 1. ชนิดของวัสดุผสม 2. อัตราส่วนปูนซีเมนต์ ต่อ ทราย 3. ระยะเวลาในการบ่ม	- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 - อัตราส่วนปูนซีเมนต์ ต่อ ทรายที่เหมาะสม - 7 วัน



ภาพที่ 3- 2 ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มีกรแทนที่ของเสี้ยว

3.3.2.3 การทดสอบสมบัติของตัวอย่าง

1. วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength test)

นำมอร์ตาร์ตัวอย่างขนาดทรงลูกบาศก์ $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร มาวัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกด และในการให้แรงกดกับมอร์ตาร์ตัวอย่างจะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง จนกระทั่งมอร์ตาร์ตัวอย่างแตก บันทึกค่ากำลังรับแรงอัดแต่ละตัวอย่างแล้วหาค่าเฉลี่ย

การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด

บันทึกค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องกดและคำนวณในหน่วยของกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยให้คำนวณความละเอียดถึง 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กก./ตร.ซม.)

$$P = \frac{F}{A}$$

P คือ กำลังรับแรงอัดโดยพื้นที่หน้าตัดตามขวาง หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ หน่วย ตารางเซนติเมตร

F คือ แรงอัดประลัย หน่วย กิโลกรัม

3.3.2.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลของการทดลองศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย และการทดลองศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม โดยในการศึกษาแต่ละอัตราส่วนจะใช้มอร์ตาร์ตัวอย่างอัตราส่วนละ 5 ก้อนตัวอย่าง เพื่อนำมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและนำค่าการทดสอบที่ได้ในแต่ละอัตราส่วนมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย โดยจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้จะแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3- 3 จำนวนตัวอย่างของการศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ของเสียว

ศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์		
ชุดทดสอบ	ปูนซีเมนต์ : ทราย	จำนวนตัวอย่าง
1	1 : 2	5
2	1 : 2.5	5
3	1 : 3	5
รวม		15
ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์		
ชุดทดสอบ	น้ำ : ปูนซีเมนต์	จำนวนตัวอย่าง
4	0.45	5
5	0.50	5
6	0.60	5
รวม		15

3.3.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสียว

3.3.3.1 ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสียว

ทำการหล่อมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร และหล่อมอร์ตาร์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $13 \times 26 \times 2$ เซนติเมตร โดยตัวแปรที่ศึกษาจะแสดง ในตารางที่ 3-4 ศึกษาการแทนที่ของของเสียวแต่ละชนิดที่ผสมในมอร์ตาร์ โดยมีค่าอัตราส่วนการแทนที่ของของเสียวแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีดคูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ต่อ มวลรวมละเอียด (ทราย) เท่ากับ ร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วน

ผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.2 นอกจากนี้ทำการเติมน้ำเพิ่ม โดยเติมน้ำให้เท่ากับค่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด คือร้อยละ 0.817 เพื่อให้ทรายอยู่ในสถานะ อิ่มตัว ทำการผสมส่วนผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นเทลงในแบบหล่อ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แกะมอร์ตาร์ออกจากแบบหล่อ แล้วจึงนำไปบ่มด้วยวิธีการนำพลาสติกมาคลุมเพื่อป้องกันการเสียน้ำ และทำการศึกษาระยะเวลาในการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบค่าความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด แรงกดแตกตามขวาง การดูดซึมน้ำ และค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสียน้ำแต่ละชนิด เพื่อหาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสม เพื่อนำผลที่ได้มาใช้ในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังต่อไป โดยแผนการศึกษาจะแสดงดังรูปที่ 3-3

ตารางที่ 3- 4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองการผลิตมอร์ตาร์ที่ผสมของเสียน้ำแต่ละชนิด

ลำดับ	พารามิเตอร์
- ตัวแปรอิสระ 1. ชนิดของเสียน้ำ 2. อัตราส่วนของเสียน้ำแต่ละชนิดต่อมวลรวมละเอียด (ทราย) 3. ระยะเวลาในการบ่ม	- เส้นใยรีดควูล - ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา - ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก 7, 14 และ 28 วัน
- ตัวแปรตาม 1. สมบัติของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียน้ำแต่ละชนิด	- ค่าความหนาแน่น (Density) - ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength test) - ค่าแรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load) - ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) - ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)
- ตัวแปรควบคุม 1. ส่วนผสมในการผลิต	- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 - อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำที่เหมาะสม

3.3.3.2 ศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสีย

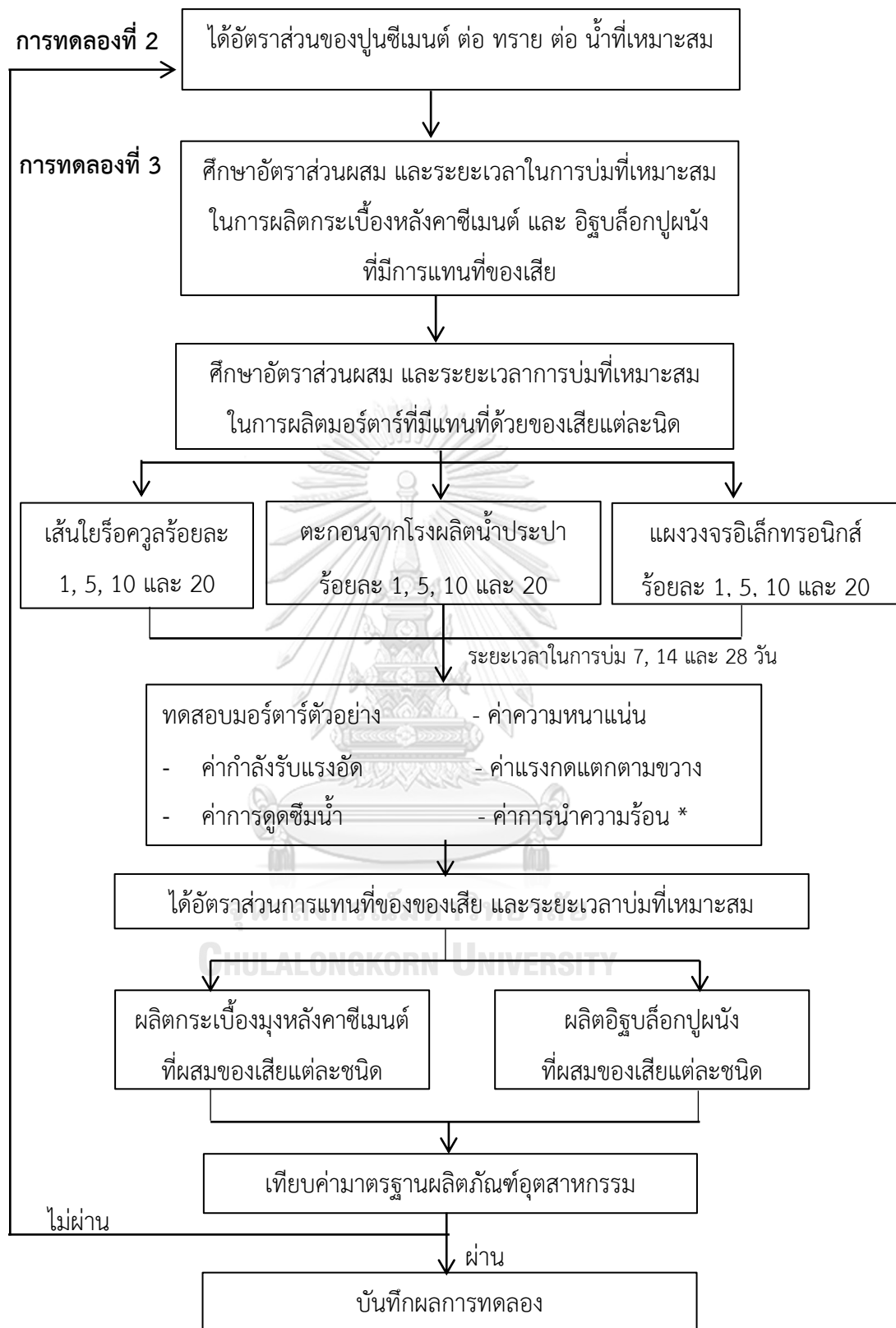
ในการศึกษานี้จะนำอัตราส่วนการแทนที่ของของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวลตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะต่อมวลรวมละเอียด (ทราย) ที่เหมาะสมมาใช้ในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบค่าแรงกดแตกตามขวาง และการดูดซึมน้ำของกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคาเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 535-2556 นอกจากนี้ นำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของของเสียแต่ละชนิดมาผลิตอิฐบล็อก ปูผนัง และนำตัวอย่างไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 58-2533 โดยแผนการศึกษาจะแสดงดังรูปที่ 3-3

3.3.3.3 การทดสอบสมบัติของวัสดุก่อสร้าง

นำตัวอย่างกระเบื้องมุงหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังไปทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยใช้วิธีวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3- 5 วิธีการทดสอบสมบัติของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์และอิฐบล็อกปูผนัง

ทดสอบ	เครื่องมือ	มาตรฐาน	หมายเหตุ
ค่าแรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load)	- เครื่อง AMSLER 30 ton	มอก.535-2556	
ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength test)	- เครื่อง AMSLER 30 ton	มอก.58-2533	
การดูดซึมน้ำ (Water absorption)	- เครื่องชั่งน้ำหนัก - ตู้อบ	มอก.535-2556 และ มอก.58-2533	
ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)	- เทคนิค TCA (Thermal constant analysis)	JIS R 2618	ส่งวิเคราะห์



ภาพที่ 3- 3 อัตราส่วนผสมและระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสี้ยว
หมายเหตุ: ทำการทดลอง 5 ซ้ำ/ตัวอย่าง ยกเว้นการทดสอบการนำความร้อนใช้ 2 ซ้ำ/ตัวอย่าง

ก) การทดสอบสมบัติของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์

การทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา เลขที่ มอก.535-2556 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2556)

1. การทดสอบค่าแรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load)

นำแผ่นกระเบื้องหลังคาซีเมนต์แช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกออก เพื่อนำกระเบื้องไปทดสอบในสภาวะอิมมัวด้วยน้ำหนักที่ โดยนำแผ่นกระเบื้องวางในแนวราบใช้ไม้ ระแนงวางหนุนไว้ใต้แผ่นกระเบื้อง แล้วจึงใช้น้ำหนักกดที่กึ่งกลางเป็นแนวตลอดความกว้างของแผ่น กระเบื้อง เพิ่มแรงกดด้วยอัตราสม่ำเสมอไม่เกิน 100 นิวตันต่อวินาที จนกระทั่งแผ่นกระเบื้องแตก บันทึกค่าเป็นแรงกดแตกตามขวางแต่ละแผ่นแล้วหาค่าเฉลี่ย

คำนวณ

แรงกดแตกตามขวางต่ำสุดแต่ละแผ่นที่ต้องการ หน่วยนิวตัน = $3.325 \times$ ความกว้างของ กระเบื้องแต่ละแผ่น หน่วย มิลลิเมตร

2. การดูดซึมน้ำ

นำชิ้นตัวอย่าง น้ำหนักไม่น้อยกว่า 1000 กรัม แช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และยกออกเพื่อนำตัวอย่างที่อิมมัวด้วยน้ำมาชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกไว้ เป็นน้ำหนักที่อิมมัว หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกมา วางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และชั่งตัวอย่างอีกครั้งหนึ่ง แล้วบันทึกเป็นน้ำหนักเมื่อแห้ง

คำนวณการดูดซึมน้ำ

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100$$

A คือ การดูดซึมน้ำ หน่วย ร้อยละ

M1 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่อแห้ง หน่วย กรัม

M2 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่ออิมมัว หน่วย กรัม

ข) การทดสอบสมบัติของอิฐบล็อกปูผนัง

การทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เลขที่ มอก. 58-2533 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2533)

1. การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength test)

นำตัวอย่างอิฐบล็อกปูผนังมาวัดความกว้างและความยาวของพื้นที่หน้าตัด แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบที่เครื่องทดสอบโดยให้รูดอยู่ในแนวตั้งกับศูนย์แรงกดจากแท่นฐาน และในการให้แรงกดกับก้อน ตัวอย่างจะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง จนกระทั่งก้อนตัวอย่างแตก บันทึกค่ากำลังรับแรงอัด แต่ละตัวอย่างแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยวิธีทดสอบตามมาตรฐาน มอก.109

การคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด

บันทึกค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องกดและคำนวณในหน่วยของ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยให้คำนวณความละเอียดถึง 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กก./ตร.ซม.)

$$P = \frac{F}{A}$$

P คือ กำลังรับแรงอัดโดยพื้นที่หน้าตัดตามขวาง หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดรวมในแนวตั้งฉากกับทิศทางของน้ำหนักบรรทุก โดยรวมพื้นที่ภายในช่องว่างทั้งหมด รวมทั้งส่วนเว้าออกนอกจากพื้นที่ หน่วย ตารางเซนติเมตร

F คือ แรงอัดประลัย หน่วย กิโลกรัม

2. การดูดซึมน้ำ

นำอิฐบล็อกตัวอย่างแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วยกออกเพื่อนำตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำมาชั่ง แล้วบันทึกค่าไว้เป็นน้ำหนักที่อิ่มตัว หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 - 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกมาวางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และ ชั่งตัวอย่างอีกครั้งหนึ่ง แล้วบันทึกค่าเป็นน้ำหนักเมื่อแห้ง

คำนวณการดูดซึมน้ำ

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100$$

A คือ การดูดซึมน้ำ หน่วย ร้อยละ

M_1 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่อแห้ง หน่วย กิโลกรัม

M_2 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่ออิ่มตัว หน่วย กิโลกรัม

ค) การทดสอบสมบัติการนำความร้อน

เป็นไปตามมาตรฐาน JIS R 2618 (JIS, 1992) ซึ่งใช้ตัวอย่าง มาพิจารณาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของตัวอย่างแต่ละส่วนผสม ทำการทดสอบ โดยเทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA)

3.3.3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ในการศึกษาแต่ละอัตราส่วนจะใช้มอร์ตาร์ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร และมอร์ตาร์ตัวอย่างทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 13x26x2 เซนติเมตร อย่างละ 15 ก้อนตัวอย่าง โดยจะแบ่งอย่างละ 5 ก้อนตัวอย่าง เป็นตัวอย่างที่มีระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน เพื่อใช้ในการทดสอบค่าความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และค่าแรงกดแตกตามขวาง นอกจากนี้จะใช้ก้อนตัวอย่างขนาด 5x5x2 เซนติเมตร 2 ก้อนตัวอย่าง ทดสอบค่าการนำความร้อน เพื่อแสดงค่าการทดสอบทั้งหมดเป็นค่าเฉลี่ย และจะนำอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำต่อของเสียแต่ละชนิดที่เหมาะสม มาผลิตเป็นกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง โดยแต่ละอัตราส่วนจะผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังทั้งหมด 5 ตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างไปทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และแสดงผลการศึกษาเป็นค่าเฉลี่ย โดยจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้จะแสดงในตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3- 6 จำนวนตัวอย่างของการศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสีย

ศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาการบ่มในการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสีย					
ชุดทดสอบ	รหัสตัวอย่าง	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	จำนวนตัวอย่าง		
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน
7	RW 1	1	5	5	5
8	RW 5	5	5	5	5
9	RW 10	10	5	5	5
10	RW 20	20	5	5	5
11	WSS 1	1	5	5	5
12	WSS 5	5	5	5	5
13	WSS 10	10	5	5	5
14	WSS 20	20	5	5	5
15	PCB 1	1	5	5	5
16	PCB 5	5	5	5	5
17	PCB 10	10	5	5	5
18	PCB 20	20	5	5	5
19	Blank	0	5	5	5
รวม					195
ศึกษาอัตราส่วนผสมในการผลิตมอร์ตาร์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทนที่ของเสีย					
ชุดทดสอบ	รหัสตัวอย่าง	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	จำนวนตัวอย่าง		
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน
20	RW 1	1	5	5	5
21	RW 5	5	5	5	5
22	RW 10	10	5	5	5
23	RW 20	20	5	5	5
24	WSS 1	1	5	5	5

ตารางที่ 3-6 จำนวนตัวอย่างของการศึกษาอัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสีย (ต่อ)

ศึกษาอัตราส่วนผสมในการผลิตมอร์ตาร์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแทนที่ของเสีย					
ชุดทดสอบ	รหัสตัวอย่าง	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	จำนวนตัวอย่าง		
			บ่ม 7 วัน	บ่ม 14 วัน	บ่ม 28 วัน
25	WSS 5	5	5	5	5
26	WSS 10	10	5	5	5
27	WSS 20	20	5	5	5
28	PCB 1	1	5	5	5
29	PCB 5	5	5	5	5
30	PCB 10	10	5	5	5
31	PCB 20	20	5	5	5
32	Blank	0	5	5	5
รวม					195
ศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสีย					
ชุดทดสอบ	ตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง			
19	กระเบื้องหลังคาซีเมนต์+RW	5			
20	กระเบื้องหลังคาซีเมนต์+WSS	5			
21	กระเบื้องหลังคาซีเมนต์+PCB	5			
22	อิฐบล็อกปูผนัง+RW	5			
23	อิฐบล็อกปูผนัง+WSS	5			
24	อิฐบล็อกปูผนัง+PCB	5			
รวม		30			

หมายเหตุ RW คือ มอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยหรือควูล

WSS คือ มอร์ตาร์ที่ผสมตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา

PCB คือ มอร์ตาร์ที่ผสมผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

3.3.4 การทดลองที่ 4 ทดสอบการทนไฟของมอร์ตาร์ด้วยการเผา

การศึกษาการทนไฟของมอร์ตาร์ โดยมีสภาวะการเผาไหม้ตามมาตรฐาน ISO/TR 834 ด้วยการนำอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำต่อการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดที่เหมาะสม มาผลิตก้อนมอร์ตาร์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ทำการบ่ม 28 วัน เพื่อนำก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่างไปทดสอบการเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก.109 ซึ่งมีจำนวนตัวอย่างการทดสอบดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3- 7 จำนวนตัวอย่างของการศึกษาการทนไฟของมอร์ตาร์ด้วยการเผา

ตัวอย่าง	อุณหภูมิของการเผา (องศาเซลเซียส)				รวม
	จำนวนตัวอย่าง				
	ไม่มีการเผา	200	300	400	
Blank	5	5	5	5	20
RW	5	5	5	5	20
WSS	5	5	5	5	20
PCB	5	5	5	5	20
รวม					80

หมายเหตุ RW คือ มอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยหรือควูล
 WSS คือ มอร์ตาร์ที่ผสมตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา
 PCB คือ มอร์ตาร์ที่ผสมผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

3.3.5 การทดลองที่ 5 ศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร และ ค่าการใช้

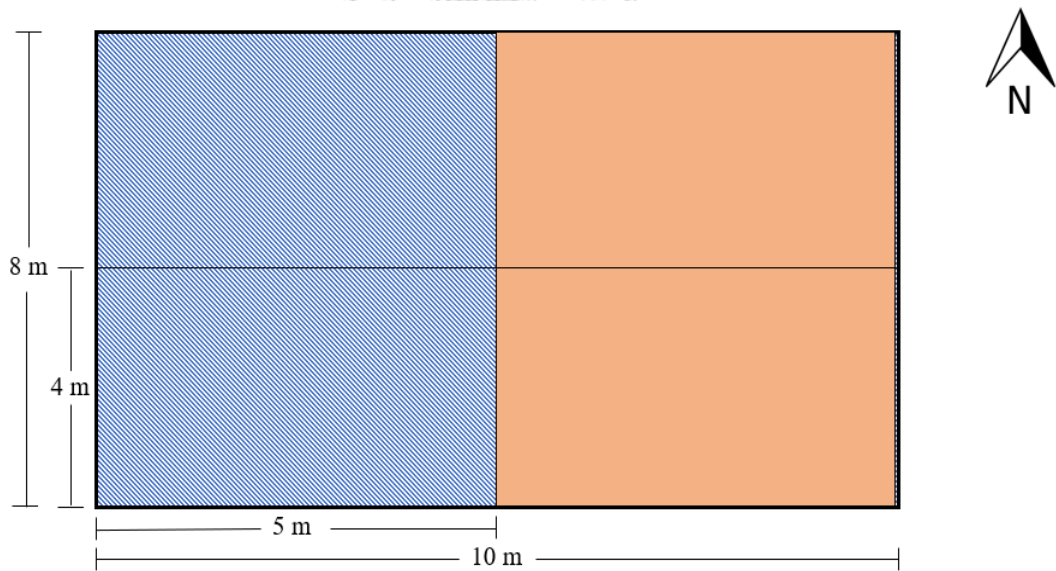
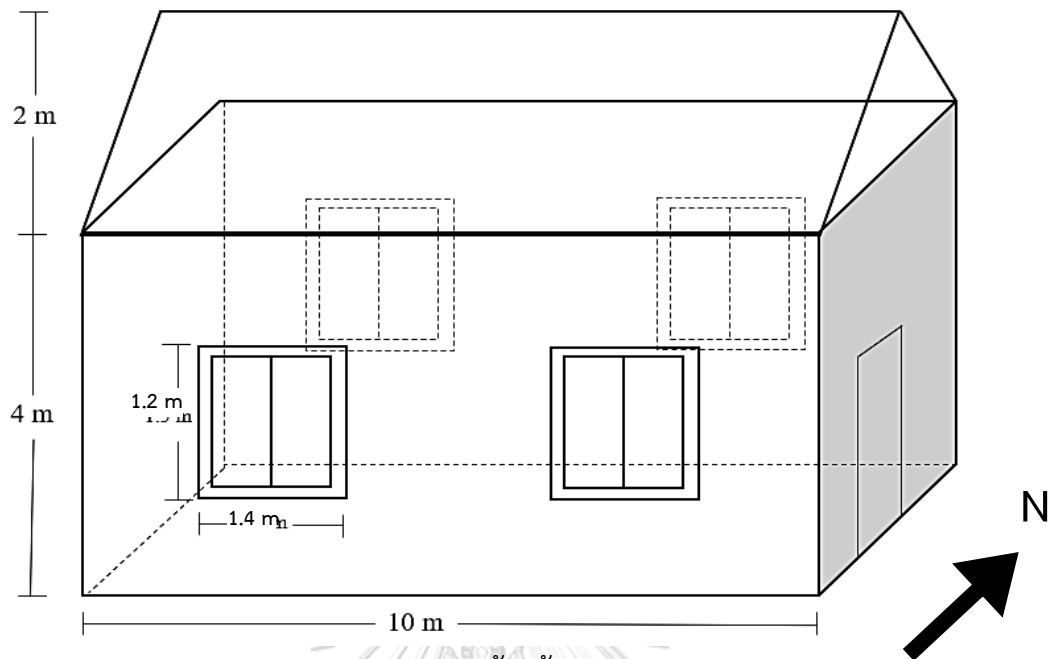
พลังงานไฟฟ้าในบ้านเรือน

ศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร และค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร ด้วยโปรแกรม (Building Energy Code; BEC) เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และ การใช้พลังงานไฟฟ้า ระหว่างอาคารที่ใช้วัสดุก่อสร้างทั่วไป กับ อาคารที่ใช้วัสดุก่อสร้างอิฐบล็อกปูผนัง และกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ที่ทรายด้วยของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งอาคารที่นำมาใช้ในการศึกษานี้จะเป็นแบบบ้านเดี่ยว 1 ชั้น พื้นฐาน โดยมีรายละเอียดแสดงในตาราง

ที่ 3-8 และแบบบ้านแสดงในภาพที่ 3-4 โดยข้อมูลของค่าการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด และข้อมูลรายละเอียดของอาคาร จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณโปรแกรมดังกล่าว เพื่อวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (RTTV) เทียบกับอาคารที่ใช้วัสดุก่อสร้างทั่วไป

ตารางที่ 3- 8 รายละเอียดบ้านเดี่ยว

รายการ	ข้อมูล
ลักษณะอาคาร	บ้านเดี่ยว 1 ชั้น
พื้นที่ใช้สอย	80 ตารางเมตร
พื้นที่ปรับอากาศ	40 ตารางเมตร
พื้นที่ไม่ปรับอากาศ	40 ตารางเมตร
วัสดุหลักของผนัง	อิฐบล็อกปูผนัง
	ปูนฉาบ
วัสดุหลักของหลังคา	กระเบื้องหลังคาซีเมนต์
	ช่องว่างอากาศ
	ฉนวนใยแก้ว
	แผ่นยิปซัม
ระบบไฟ	หลอดฟลูออโรไลต์ กลม 16 วัตต์ จำนวน 5 หลอด
	หลอดLED 9 วัตต์ จำนวน 5 หลอด
	หลอดLED 6 วัตต์ จำนวน 5 หลอด
ระบบเครื่องทำความเย็น	เครื่องปรับอากาศแบบ Split type 12.624 KBtu/h จำนวน 2 เครื่อง



ด้านบน

-  พื้นที่รับอากาศ
-  พื้นที่ไม่รับอากาศ

ภาพที่ 3- 4 แบบบ้านเดี่ยว 1 ชั้น

3.3.6 การทดลองที่ 6 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง

ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำของเสีย ได้แก่ เส้นใยรีโอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มาใช้ประโยชน์ในการผลิตทำเป็น กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง เพื่อการก่อสร้าง และเปรียบเทียบกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังประเภทเดียวกันที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ตลอดจนคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัด และกำจัดของเสียเหล่านี้ในหน่วยราคาบาทต่อตันและ เปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสียที่ไม่ใช้แล้วของโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน กับนำของเสียมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของการใช้เทคโนโลยีการรีไซเคิลนี้ ในการจัดการของเสียแต่ละชนิด และแสดงค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value ;NPV) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน อัตราผลตอบแทนของโครงการ (Internal Rate of Return ;IRR) และ ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Return) เพื่อศึกษาความคุ้มค่าของการลงทุน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดในการผลิตวัสดุก่อสร้าง โดยทำการเตรียมของเสียด้วยการลดขนาด และนำไปอบให้แห้งเพื่อควบคุมปริมาณของน้ำในส่วนผสม ซึ่งลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผสมที่ต่างชนิดกันจะส่งผลต่อสมบัติของวัสดุก่อสร้างในด้านกำลังรับแรงอัด แรงกดแตก ตามขวาง การดูดซึมน้ำ ค่าการนำความร้อน และการทนไฟด้วยการเผาในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยจะนำข้อมูลพื้นฐานมาใช้อธิบายกลไกปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นตลอดจนลักษณะ และสมบัติของวัสดุก่อสร้าง โดยสมบัติของวัสดุก่อสร้างที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าแรงกดแตกตามขวาง ค่าการดูดซึมน้ำ และสมบัติการนำความร้อน เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ นอกจากนี้จะมีการพิจารณาแบบจำลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานระหว่างอาคารพักอาศัย และศึกษาการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการใช้ของเสียดังกล่าวเป็นวัสดุทดแทนการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง

4.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

4.1.1 การวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของของเสียด้วยวิธี X-ray fluorescence (XRF) แสดงในตารางที่ 4-1 โดยแสดงส่วนประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ในรูปสารประกอบออกไซด์ โดยจะนำส่วนประกอบทางเคมีของทราย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาแสดงด้วยเพื่อเปรียบเทียบกัน จากผลการศึกษาเปรียบเทียบขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ทราย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากตารางที่ 4-1 พบว่าเส้นใยรีโอควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่เพียงร้อยละ 21.09 และ 1.76 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ถึงร้อยละ 63.82 โดยน้ำหนัก ซึ่งแคลเซียมออกไซด์เป็นสารตั้งต้นหนึ่งที่สำคัญในปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration

reaction) โดยแคลเซียมออกไซด์และน้ำจะทำปฏิกิริยากันเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานทำให้เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับส่วนผสม ดังนั้นเส้นใยหรือควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาจึงมีสมบัติในการเป็นตัวเชื่อมประสานเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากนี้องค์ประกอบหลักทางเคมีของเส้นใยหรือควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา คือซิลิกา (SiO_2) โดยมีอยู่ร้อยละ 40.76 และ 49.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และอะลูมินา (Al_2O_3) อยู่ร้อยละ 11.48 และ 35.53 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งซิลิกา และอะลูมินานั้นสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งคือปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้าง ตามมาตรฐานสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน ASTM C 618 นั้นระบุว่าวัสดุปอซโซลานควรมีสัดส่วนโดยรวมของ ซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าเส้นใยหรือควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีองค์ประกอบโดยรวมของซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์อยู่ร้อยละ 63.44 และ 92.29 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จึงเห็นได้ว่าเส้นใยหรือควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ แต่ปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้นั้นนอกจากองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมแล้ว วัสดุนั้นจำเป็นต้องมีขนาดของอนุภาคที่เหมาะสมด้วย จากการศึกษาที่ผ่านมาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานโดยการนำวัสดุ เหลือทิ้งมาใช้เป็นวัสดุทดแทน พบว่าวัสดุที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้นั้นจะต้องมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร จึงจะเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ ถึงแม้จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมก็ตาม (Cheng และคณะ, 2011; Lin และคณะ, 2013) และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีกับทราย พบว่าเส้นใยหรือควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปายังมีปริมาณ ซิลิกา น้อยกว่า ทราย

ส่วนองค์ประกอบของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะในตารางที่ 4-2 จะพบพลาสติกชนิดอีพอกซี เรซิน และไฟเบอร์กลาสเป็นองค์ประกอบหลัก และมีโลหะหนักปะปนอยู่ในปริมาณที่น้อย นอกจากนี้ยังศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในรูปของธาตุตั้งตารางที่ 4-3 พบว่ามีซิลิกา (Si) และโบรมีน (Br) สูง ซึ่งโดยทั่วไปธาตุเหล่านี้อยู่ในใยแก้วหรือสารหน่วงไฟ จากผลการศึกษา องค์ประกอบทางเคมีของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะแสดงให้เห็นว่าไม่พบ สารประกอบหลักที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นจึงมีความ

เป็นไปได้มากกว่าที่จะนำผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนี้มาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดหรือทราย เพื่อทำหน้าที่เข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างของวัสดุก่อสร้าง

ตารางที่ 4- 1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโอคิวล ต่อก่อนจากโรงผลิตน้ำประปา ทราย และปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)			
	เส้นใยรีโอคิวล	ต่อก่อนจากโรงผลิตน้ำประปา	ทราย (ธีรานี โซติกไกร, 2537)	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดา ประเสริฐ, 2528)
SiO ₂	40.76	49.05	98.00 - 99.00	20.20
Al ₂ O ₃	11.48	35.53	0.00 - 0.05	5.42
Fe ₂ O ₃	11.20	7.71	0.00 - 0.02	2.92
CaO	21.09	1.76	0.00 - 0.02	63.82
MgO	7.13	0.84	0.10	1.50
Na ₂ O	2.52	0.20	-	0.26
K ₂ O	1.50	2.00	-	0.46
TiO ₂	2.32	0.79	-	-
P ₂ O ₅	0.57	0.82	-	-
SO ₃	0.07	0.57	-	2.55
V ₂ O ₅	0.13	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0.15	-	-	-
MnO	1.08	0.36	-	-
Cl	-	0.16	-	-
รวม	100.00	99.79	-	97.13

หมายเหตุ: “-“ คือ ไม่พบองค์ประกอบนี้ในวัสดุ

ตารางที่ 4- 2 องค์ประกอบของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
ทองแดง (Cu)	1.64
ไฟเบอร์กลาส	71.51
อีพอกซีเรซิน	26.86

(ที่มา: ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2560)

ตารางที่ 4- 3 องค์ประกอบทางเคมีของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

องค์ประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
ซิลิกา (Si)	19.178
แคลเซียม (Ca)	15.797
อะลูมิเนียม (Al)	10.007
โบรมีน (Br)	6.7533
แบเรียม (Ba)	2.1544
ทองแดง (Cu)	1.279
ฟอสฟอรัส (P)	1.506
แมกนีเซียม (Mg)	0.8228
ซัลเฟอร์ (S)	0.3938
ไทเทเนียม (Ti)	0.3272
เหล็ก (Fe)	0.2354
สตรอนเซียม (Sr)	0.1468
คลอรีน (Cl)	0.1283
โซเดียม (Na)	0.1043
โพแทสเซียม (K)	0.0587
สังกะสี (Zn)	0.0055

(ที่มา: ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย, 2560)

4.1.2 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

การศึกษาการกระจายขนาดอนุภาคของเส้นใยรีดิวคูล (RW) ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (WSS) และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ (PCB) โดยใช้ในการคัดแยกด้วยตะแกรงเครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C33-93 และ ASTM C136-95a จากตารางที่ 4-4 แสดงผลการกระจายขนาดอนุภาคของของเสียทั้ง 3 ชนิด และผลการวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมของของเสียทั้ง 3 ชนิด เปรียบเทียบกับมวลรวมละเอียด (ทราย) ด้วยกราฟแบบ Semi-log scale ในภาพที่ 4-1 พบว่าขนาดอนุภาคของของเสียทั้ง 3 ชนิด

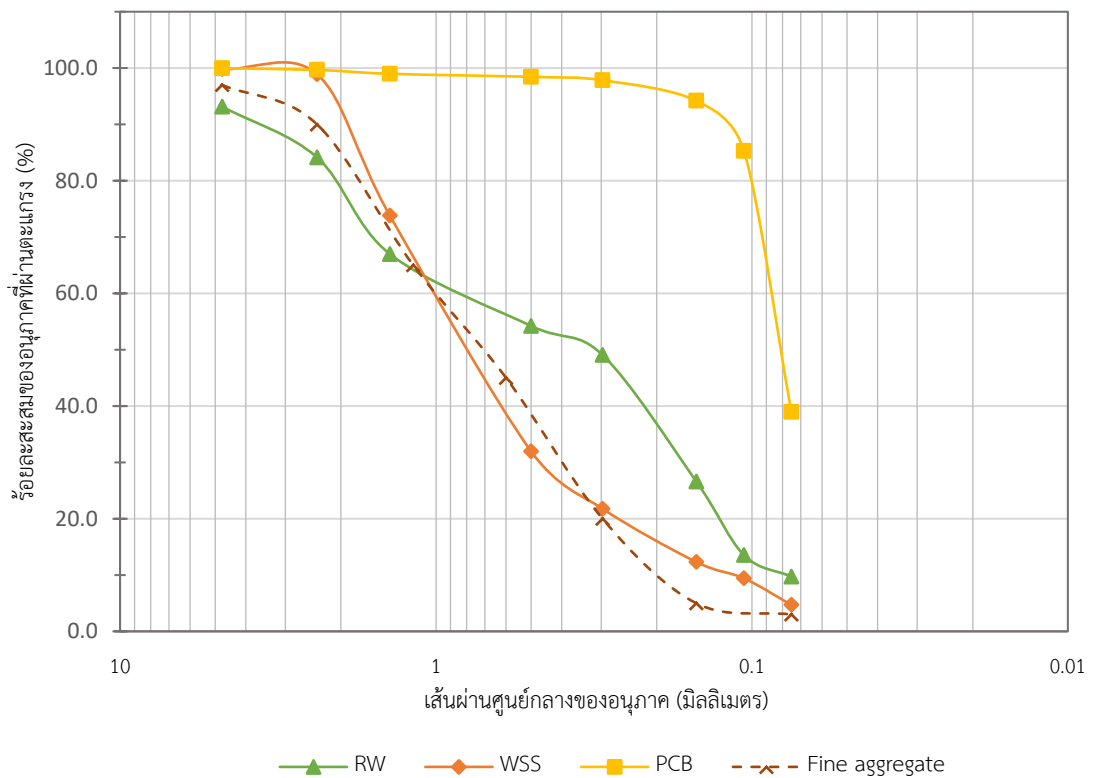
สามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หรือมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร เกือบร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เส้นใยรีดคูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่มีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับทรายดังแสดงในภาพที่ 4-1 โดยวิเคราะห์ได้ว่าขนาดอนุภาคที่ร้อยละโดยมวลสะสมของเส้นใยรีดคูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาเท่ากับ 50 มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.3 ถึง 0.8 มิลลิเมตร ส่วนขนาดอนุภาคของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนั้นมีขนาดเล็กมาก ซึ่งมีปริมาณอนุภาคที่สามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือ มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรอยู่ถึงร้อยละ 38.95 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาพบว่าของเสียที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียด หรือทราย เนื่องจากเส้นใยรีดคูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีปริมาณอนุภาคสะสมที่มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรอยู่เพียงร้อยละ 9.72 และ 4.71 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จึงมีขนาดไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ และวัสดุปอซโซลานได้ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าวัสดุที่เหมาะสมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานได้นั้นจำเป็นต้องมีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ที่เล็กกว่า 75 ไมโครเมตร (Cheng และคณะ, 2011; Lin และคณะ, 2013) ซึ่งวิธีการในการลดขนาดของเสียให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตรนั้น จะมีกระบวนการที่ซับซ้อน สิ้นเปลืองการใช้พลังงาน และใช้เวลาในการเตรียมวัสดุนาน ดังนั้นการนำของเสียมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่า เนื่องจากมีกระบวนการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน เป็นการลดการใช้พลังงาน และประหยัดเวลาในกระบวนการผลิต ยิ่งไปกว่านั้นเส้นใยรีดคูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีช่วงการกระจายขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกับทราย ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 566) กำหนด

ส่วนผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะถึงแม้ว่าจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กใกล้เคียงกับขนาดของปูนซีเมนต์ และวัสดุปอซโซลานแต่องค์ประกอบทางเคมีของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนั้นไม่มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา และอะลูมินา จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานเพื่อช่วยเพิ่มการเชื่อมประสาน และสร้างความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้างได้ จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และการกระจายขนาดของอนุภาค จึงสรุปได้ว่าของเสียทั้ง 3 ชนิดเหมาะสมที่จะนำมาใช้แทนที่วัสดุมวลรวมละเอียด หรือทราย เพื่อทำหน้าที่เข้าไปยึดเกาะ และเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างภายในให้กับวัสดุก่อสร้างได้

ตารางที่ 4- 4 ค่าการกระจายขนาดอนุภาคของของเสียทั้ง 3 ชนิด และมวลรวมละเอียด

ตะแกรงเบอร์	ขนาดช่องเปิด (มม.)	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง (%)				มวลรวมละเอียด (มอก. 566)
		เส้นใย ร้อยคูล	ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา	ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ		
4	4.75	93.15	99.82	99.95	95-100	
8	2.38	84.14	98.91	99.67	80-100	
14	1.40	66.99	73.82	98.98	50-85	
35	0.50	54.23	31.96	98.43	25-60	
50	0.297	49.06	21.77	97.83	5-30	
100	0.15	26.61	12.32	94.19	0-10	
140	0.106	13.55	9.42	85.28	-	
200	0.075	9.72	4.71	38.95	0-3	



ภาพที่ 4- 1 เส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยน้ำหนักของของเสียทั้ง 3 ชนิด

4.1.3 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) จะแสดงถึงวัสดุนั้นมีน้ำหนักเป็นกี่เท่าของน้ำในขณะที่มีปริมาตรเท่ากัน วิเคราะห์จากการคำนวณสัดส่วนมวลต่อปริมาตร โดยหาน้ำหนักจากการชั่งน้ำหนัก และหาปริมาตรจากการแทนที่น้ำ ค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ องค์ประกอบและความพรุนของอนุภาค จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4-5 ซึ่งแสดงค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราาย เส้นใยหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ พบว่าชนิดของวัสดุ และองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างชนิดกัน ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกัน วัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ จะเป็นพวกที่มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากในเส้นใยหรือควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ส่วนพวกที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงจะมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีค่าเท่ากับ 0.760, 1.00 และ 1.56 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าของเสียทั้ง 3 ชนิดนี้มีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ และทราายที่มีค่าเท่ากับ 3.12 และ 2.62 ตามลำดับ โดยค่าความถ่วงจำเพาะนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการบอกแนวโน้มของสมบัติของวัสดุก่อสร้างที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียดังกล่าวได้ โดยสามารถคาดการณ์ได้ว่าวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์หรือทราาย เมื่อถูกนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์หรือทราายแล้วนั้น จะส่งผลให้วัสดุก่อสร้างมีความหนาแน่นลดลง หรือมีน้ำหนักที่เบา จากการศึกษาในอดีตของ Herrero และคณะ (2016) ศึกษาสมบัติของ มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE) จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่พลาสติกถึงร้อยละ 20 จะส่งผลให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นลดลงถึงร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ของพลาสติก เนื่องจากพลาสติกมีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ และทราาย

ส่วนอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญมากคือค่าการดูดซึมน้ำ เนื่องจากน้ำที่เติมลงไปในส่วนผสมจะมีหน้าที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ช่วยให้คอนกรีตสดทำงานได้ ในงานวิจัยนี้จะควบคุมสภาวะในส่วนผสมโดยการทำให้ทราายอิ่มตัวด้วยน้ำ จึงทำการวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำของทราายพบว่ามีความเท่ากับร้อยละ 0.817 หมายความว่า การใช้ทราายในส่วนผสมทุกๆ 100 กรัม จะเติมน้ำเข้าไปในส่วนผสมเพิ่มขึ้น 0.817 มิลลิลิตร ส่วนของเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ทั้ง 3 ชนิด จะ

ถูกนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เพื่อทำการควบคุมความชื้น ผลการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใยรีอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 2.46, 2.95 และ 1.12 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าทราย จึงอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของมอร์ตาร์ในด้านการดูดซึมน้ำได้

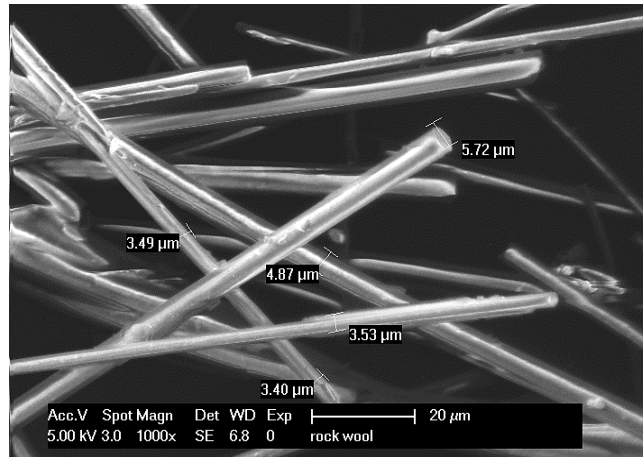
ตารางที่ 4- 5 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย เส้นใยรีอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ชนิดของวัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	การดูดซึมน้ำ (%)
เส้นใยรีอควูล	0.760	2.46
ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา	1.00	2.95
ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ	1.56	1.12
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์*	3.12	-
ทราย	2.62	0.817

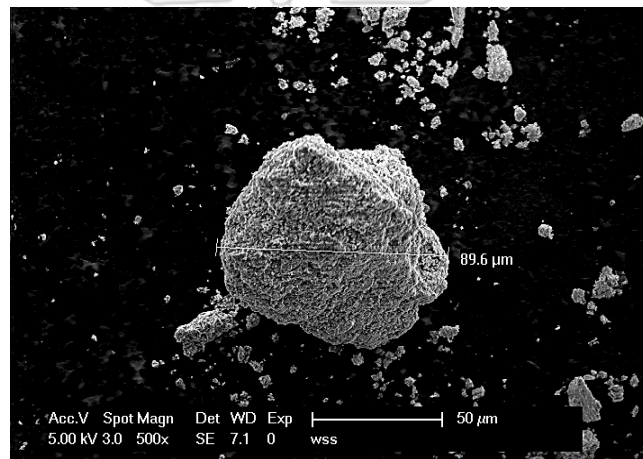
* ที่มา: สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์, 2546

4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของเส้นใยรีอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะในระดับจุลภาค

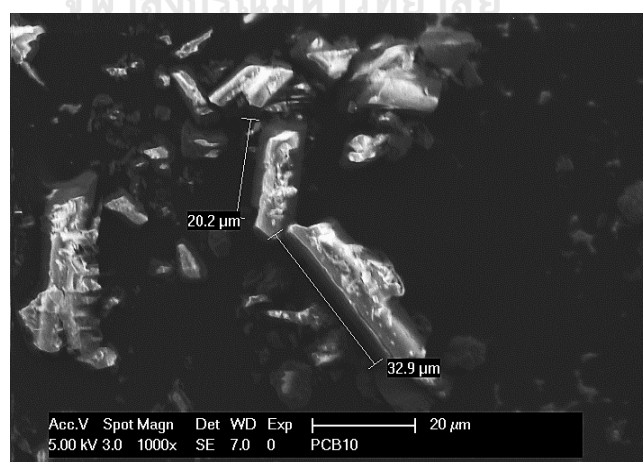
การศึกษาลักษณะพื้นฐานของของเสียทั้ง 3 ชนิดในระดับจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) จากผลการศึกษาพบว่าของเสียทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะรูปร่าง โครงสร้างที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4-2 พบว่าเส้นใยรีอควูลที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงในภาพ 4-2 (ก) ซึ่งเป็นเส้นใยรีอควูลจากฉนวนกันความร้อนที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยนำเส้นใยรีอควูลมาเข้าเครื่องลดขนาดให้มีความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร มีลักษณะรูปร่างเป็นเส้นใยทรงกระบอก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3 - 5 ไมโครเมตร ลักษณะของเส้นใยอาจมีความสามารถในการเข้าไปช่วยยึดโครงสร้างภายในส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านการยึดเกาะ และการรับแรงของวัสดุก่อสร้างได้



ก) เส้นใยรีโอควูล



ข) ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา



ค) ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ภาพที่ 4- 2 ลักษณะรูปร่างระดับจุลภาคของ (ก) เส้นใยรีโอควูล (ข) ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และ (ค) ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ลักษณะสำคัญของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่ขนาดกำลังขยาย 500 เท่า แสดงในภาพที่ 4-2 (ข) พบว่าตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีลักษณะคล้ายเม็ดดิน มีขนาดใหญ่กว่า 75 ไมโครเมตร รูปร่างไม่แน่นอน ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม นอกจากนี้ยังพบว่าตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีพื้นผิวที่ขรุขระ มีปริมาณรูพรุนสูงสามารถรับน้ำที่ซึมผ่านเข้ามาได้มาก จึงส่งผลให้ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดี

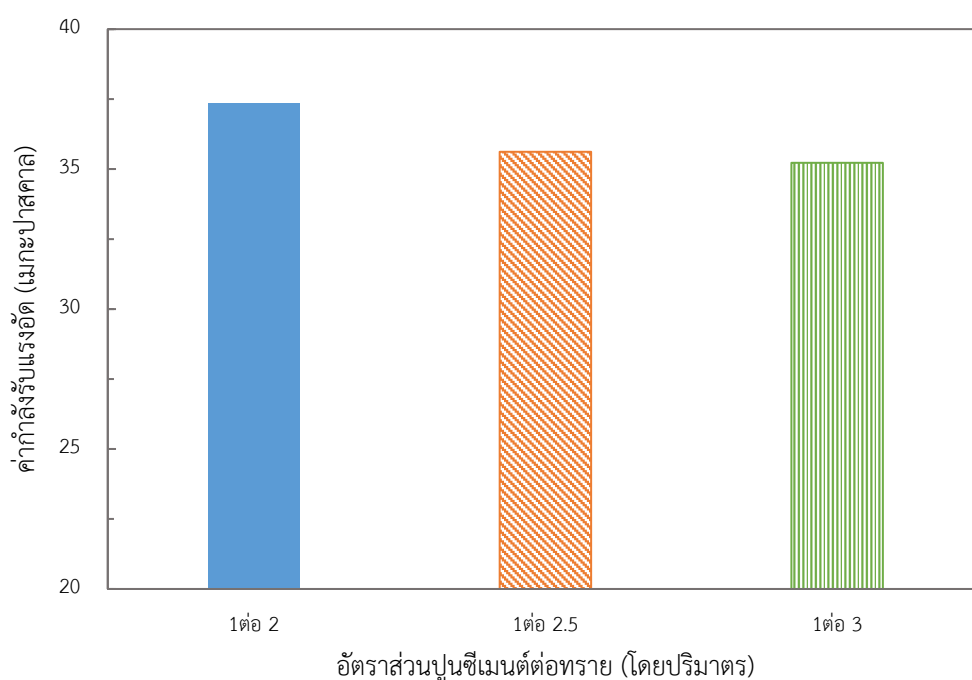
และจากภาพที่ 4-2 (ค) แสดงลักษณะโครงสร้างของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่มีกำลังขยาย 1000 เท่า พบว่ามีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีลักษณะส่วนใหญ่เป็นทรงกระบอกยาว เนื่องจากของเสียจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนั้นมาจากแผ่นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการตัดและบดลดขนาดเพื่อแยกแหว่งส่วนที่เป็นโลหะกับส่วนที่ไม่ใช่โลหะออกแล้ว ซึ่งมีความด้านยาวสุดประมาณ 20 - 30 ไมโครเมตร ดังนั้นลักษณะรูปร่างพื้นฐานจึงเป็นปัจจัยพื้นฐานหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใยจะสามารถช่วยในการยึดเกาะ และการรับแรง ส่วนวัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกลมจะสามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุทดแทน และเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างได้ดี โดยโครงสร้างของเสียทั้ง 3 ชนิดที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลทำให้วัสดุก่อสร้างที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียเหล่านั้นมีสมบัติที่แตกต่างกัน (ปิติศานต์ กร้ามาตร, 2553)

4.2 วิเคราะห์ผลการศึกษาค้นคว้าส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ที่ไม่มีสารแทนที่ของเสีย

4.2.1 ศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสมต่อการผลิตมอร์ตาร์

ผลการศึกษาค้นคว้าส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ โดยหล่อก้อนตัวอย่างเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร ทำการศึกษาค้นคว้าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสม ซึ่งเลือกช่วงอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายจากค่าที่เหมาะสมของงานวิจัยที่ผ่านมาในการแทนที่ของเสียที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1ต่อ2, 1ต่อ2.5 และ 1ต่อ3 (Mou และคณะ, 2007; Cheng และคณะ, 2011; Lin และคณะ, 2013; Kongsansathian และคณะ, 2016) ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50 ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน และนำมอร์ตาร์ตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) จากกราฟค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยในภาพที่ 4-3 แสดงผลการศึกษาค้นคว้าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสม พบว่าสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อ

ทรายที่ 1ต่อ2, 1ต่อ2.5 และ 1ต่อ3 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 37.34, 35.62 และ 35.23 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งพบว่าสัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่ทำให้มอร์ตาร์ตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ 1ต่อ2 และพบว่าเมื่อสัดส่วนของทรายเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เนื่องจากสัดส่วนของทรายที่มากจะส่งผลให้ลักษณะเนื้อผสมของมอร์ตาร์แห้งจนเกินไป จึงยากต่อการผสมให้เข้ากัน และการเทลงในแบบหล่อมีความยากลำบาก จึงทำให้มอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนผสมมากมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำ หลังจากนั้นจะนำอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสม คือ 1ต่อ2 ไปใช้ศึกษาหาค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อไป

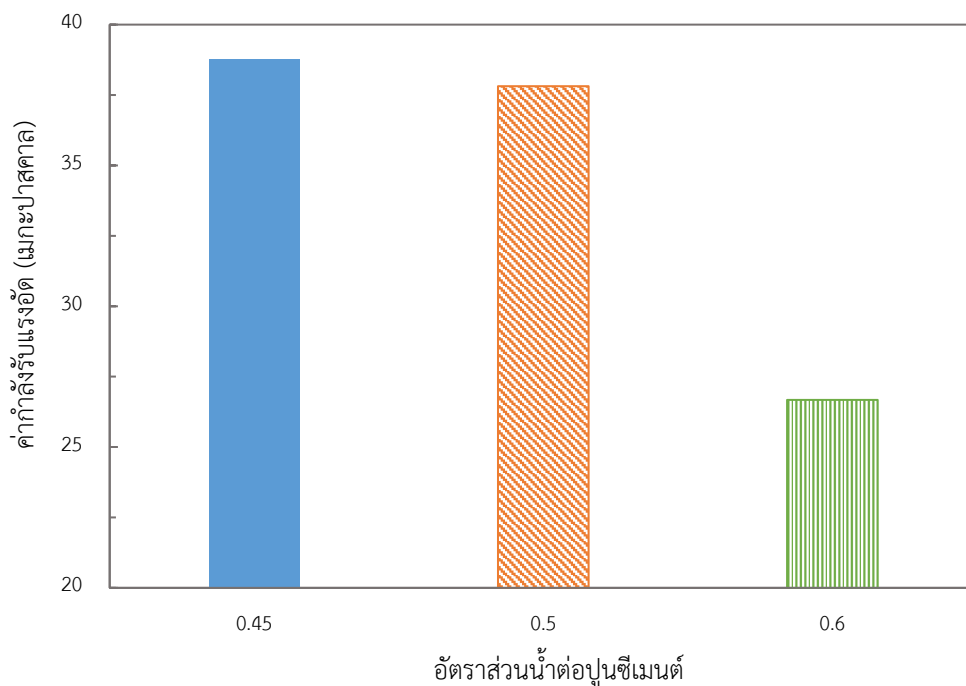


ภาพที่ 4- 3 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ศึกษาค่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายต่างๆ ในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วน น้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.50)

4.2.2 ศึกษาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อการผลิตมอร์ตาร์

ทำการหล่อมอร์ตาร์ตัวอย่างเป็นทรงลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตมอร์ตาร์ตัวอย่าง ซึ่งเลือกช่วงอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จากค่าที่เหมาะสมของงานวิจัยที่ผ่านมาที่ศึกษาการแทนที่ของเสียที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45, 0.50 และ 0.60 (ประณต กุลประสูตร, 2541; Wang และคณะ, 2012; Iniyon, 2016) ใช้สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายที่เหมาะสม คือ เท่ากับ 1ต่อ2 และใช้ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน ก่อนนำมอร์ตาร์ตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive

strength) ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4-4 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45, 0.50 และ 0.60 มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 38.76, 37.81 และ 26.67 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



ภาพที่ 4- 4 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ศึกษาต่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆ ในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน (อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย เท่ากับ 1 : 2)

จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ โดยทั่วไปอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อย จะทำให้งานคอนกรีตนั้นมีความแข็งแรงมากกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มาก (ประณต กุลประสูตร, 2541) ดังนั้นสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เท่ากับ 0.45 ส่งผลให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และมีเนื้อผสมที่ไม่แห้งจนเกินไป เหมาะที่จะสามารถนำไปเทลงในแบบหล่อ หรือขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างได้

ดังนั้นในขั้นตอนการศึกษาหาอัตราส่วนผสมพื้นฐานที่เหมาะสมในการผลิตอิฐบล็อกที่ไม่มีแกรแทนที่ด้วยของเสียนั้น สามารถสรุปได้ว่าสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1 ต่อ 2 ต่อ 0.45 เพื่อนำสัดส่วนผสมพื้นฐานนี้ไปใช้ในการทดลองศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ตัวอย่างที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดต่อไป

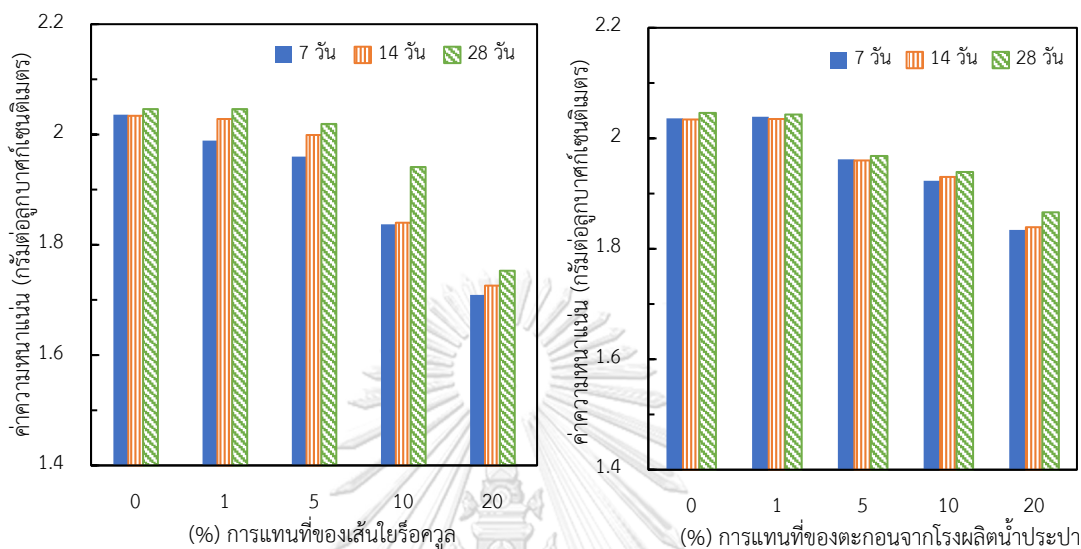
4.3 วิเคราะห์ผลการศึกษ้อัตราส่วนผสม และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมต่อการผลิตมอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ของเสี้ยนใยรีโอคิวูล

ศึกษาหาอัตราส่วนการแทนที่ของมวลรวมละเอียด หรือทราย ด้วยของเสี้ยนแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ซึ่งใช้อัตราส่วนผสมพื้นฐานจากผลการทดลองที่ 4.2 ที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำ เท่ากับ 1:2:0.45 โดยศึกษาสัดส่วนการแทนที่ของของเสี้ยนแต่ละชนิดต่อทรายเท่ากับร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และศึกษาปัจจัยด้านระยะเวลาในการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน เพื่อศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ตัวอย่างในด้านค่าความหนาแน่น (Density) กำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ค่าแรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load) ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption) และค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) เพื่อนำสัดส่วนการแทนที่ของของเสี้ยนแต่ละชนิดที่เหมาะสมไปใช้ในการผลิตเป็นวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง ต่อไป

4.3.1 ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น (Density)

การศึกษาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยของเสี้ยนแต่ละชนิด และใช้ระยะเวลาในการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่าค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มการแทนที่ทรายด้วยของเสี้ยนแต่ละชนิดดังแสดงในภาพที่ 4-5 โดยมีมอร์ตาร์ที่ไม่มีการแทนที่ของเสี้ยนแต่ละชนิดจะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.036, 2.034 และ 2.046 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ จากภาพที่ 4-5 (ก) แสดงถึงค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคิวูลร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ในระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.989, 1.960, 1.837 และ 1.709 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ในระยะเวลาบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.028, 1.999, 1.840 และ 1.726 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และในระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.046, 2.019, 1.941 และ 1.753 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มการแทนที่ของเส้นใยรีโอคิวูลถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ก้อนมอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นลดลงถึงร้อยละ 15 นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Pineiro และคณะ (2015) ที่ศึกษาปูนฉาบผนังที่มีการผสมยิปซั่ม และของเสี้ยนจากเส้นใย โดยเส้นใยที่นำมาศึกษา ได้แก่ เส้น

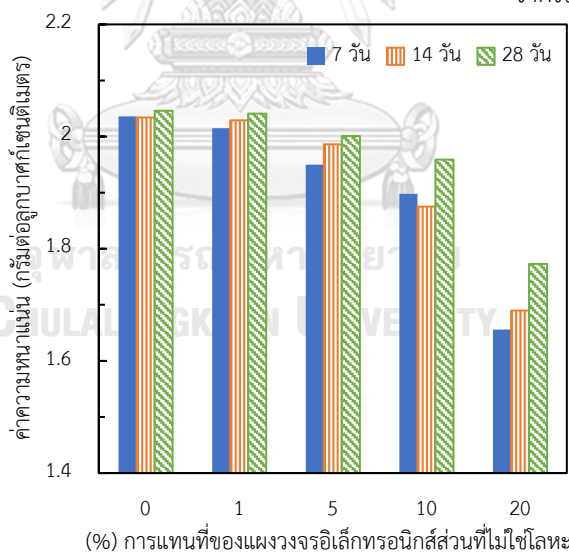
ใยรีดकुวล และเส้นใยแก้ว จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเติมเส้นใยแต่ละชนิดลงในส่วนผสมร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลงถึง 0.013 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับเส้นใยรีดकुवल และ 0.026 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับเส้นใยแก้ว



ก) มอเตอร์น้ำมันที่เติมด้วยเส้นใยรีดकुवल

ข) มอเตอร์น้ำมันที่เติมด้วยตะกอน

จากโรงผลิตน้ำประปา

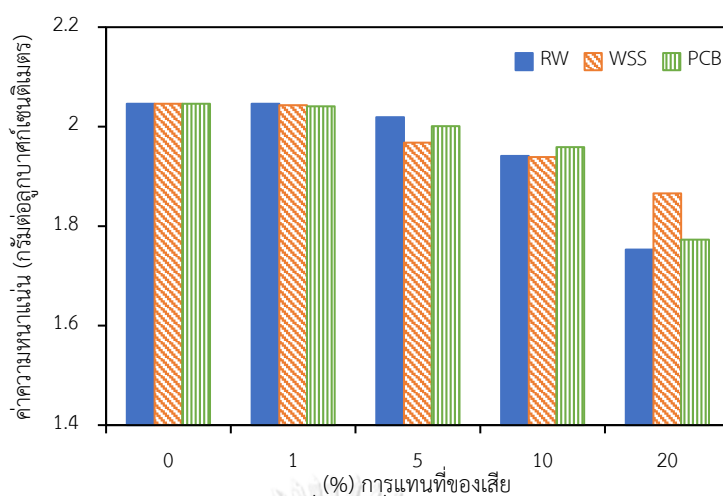


ค) มอเตอร์น้ำมันที่เติมด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ภาพที่ 4- 5 ค่าความหนาแน่นของมอเตอร์น้ำมันที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ก) มอเตอร์น้ำมันที่เติมด้วยเส้นใยรีดकुवल (ข) มอเตอร์น้ำมันที่เติมด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) มอเตอร์น้ำมันที่เติมด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

เมื่อศึกษาค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ตั้งแต่ร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4-5 (ข) ผลการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลา บ่ม 7 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.039, 1.962, 1.923 และ 1.834 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.035, 1.960, 1.930 และ 1.839 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ และที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.043, 1.968, 1.939 และ 1.866 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นลดลงถึงร้อยละ 8.80 เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ถูกแทนที่ด้วยของเสีย ซึ่งผลการศึกษาที่มีทิศทางเดียวกับผลการศึกษาในอดีตที่ศึกษาสมบัติของคอนกรีตที่มีการเติมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียเข้าไปในส่วนผสมตั้งแต่ร้อยละ 2.5 ถึง ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียมากขึ้นจะส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลดลงจากประมาณ 2.60 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เหลือประมาณ 2.40 ลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อใส่ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งการศึกษานี้ได้ให้เหตุผลการลดลงของค่าความหนาแน่นว่า เนื่องจากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ และทราย จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตลดลงเมื่อแทนที่ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียลงในส่วนผสม (Valls และคณะ, 2004)

นอกจากนี้จากภาพที่ 4-5 (ค) ศึกษาความหนาแน่นของมอร์ตาร์ตัวอย่างที่แทนที่ทรายด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะในสัดส่วนร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่า ภายหลังระยะเวลาบ่ม 7 วัน ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ตัวอย่างเท่ากับ 2.015, 1.950, 1.898 และ 1.656 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน มีค่าความหนาแน่นของตัวอย่างเท่ากับ 2.029, 1.986, 1.875 และ 1.690 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.041, 2.001, 1.959 และ 1.773 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่ามีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับการศึกษาในอดีตที่ศึกษาการผลิตมอร์ตาร์ที่ใช้แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ลดลงจาก 2.28 ถึง 2.14 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเพิ่มการแทนที่แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 20 โดยน้ำหนัก (Wang และคณะ, 2012)

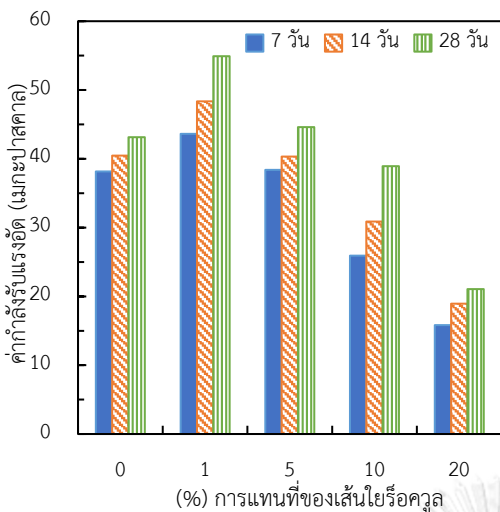


ภาพที่ 4- 6 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ในระยะเวลาบ่ม 28 วัน

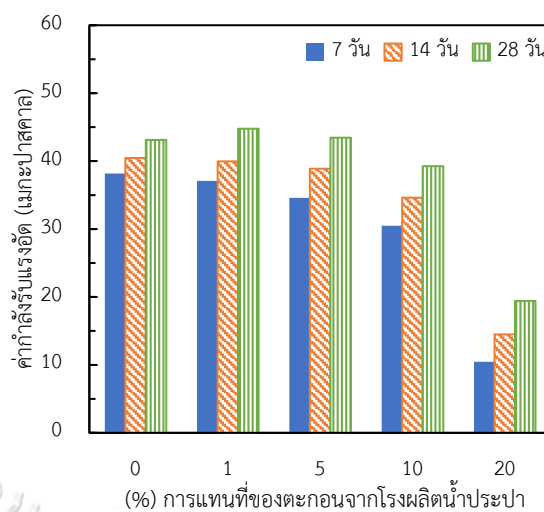
จากภาพที่ 4-6 เป็นการศึกษาเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ถูกแทนที่ทรายด้วยของเสียแต่ละชนิด ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อเพิ่มการแทนที่ของของเสียแต่ละชนิดจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีค่าลดลง โดยการแทนที่ของของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ก้อนมอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียถึงร้อยละ 14.32 สำหรับการแทนที่ด้วยเส้นใยหรือคูล ลดลงถึงร้อยละ 8.80 สำหรับการแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และลดลงถึงร้อยละ 13.34 สำหรับการแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ เนื่องจากของเสียทั้ง 3 ชนิดมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าทรายที่มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ซึ่งการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 1, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบแล้วพบว่า มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละเท่ากันมีค่าความหนาแน่นที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่การแทนที่ของของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือคูลมีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุด รองลงมาคือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ส่วนมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีค่าความหนาแน่นมากที่สุด เนื่องจากของเสียแต่ละชนิดมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่างกัน จึงส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์แตกต่างกัน โดยของเสียที่มีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยจะทำให้มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นน้อย ส่วนของเสียที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากจะส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นมากตาม (Mo และคณะ, 2016)

4.3.2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength)

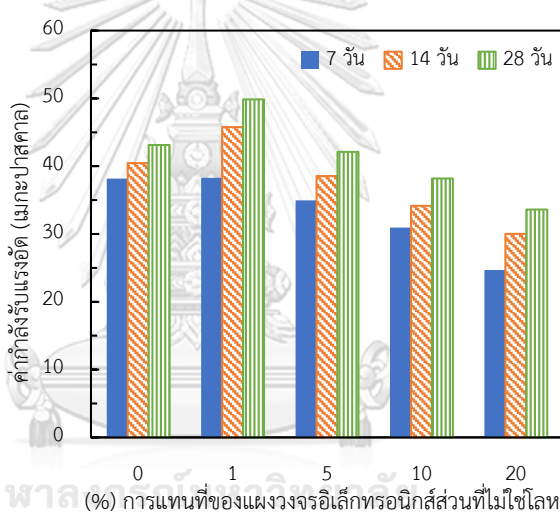
ผลการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตัวอย่างขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่แทนที่ทรายด้วยของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ และบ่มที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน จากภาพที่ 4-7 แสดงผลการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด โดยมีอัตราส่วนของเสียแต่ละชนิดต่อทรายเท่ากับร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ของเสียแต่ละชนิด นอกจากนี้ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียนั้นพบว่ามีค่าเท่ากับ 38.17, 40.46 และ 43.13 เมกะปาสคาล ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคิวูลจะแสดงในภาพที่ 4-7 (ก) พบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคิวูลร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ภายหลังจากบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 43.63, 38.39, 25.93 และ 15.83 เมกะปาสคาล ตามลำดับ หลังการบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 48.34, 40.33, 30.88 และ 18.95 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และการบ่มที่ 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 54.91, 44.60, 38.92 และ 21.06 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อแทนที่เส้นใยรีโอคิวูลที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากเส้นใยรีโอคิวูลมีขนาดเล็ก และมีลักษณะเป็นเส้นใยสามารถช่วยยึดเกาะ และรับแรงกดได้ดีจึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้าง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเส้นใยรีโอคิวูลมากเกินไปเกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ก้อนมอร์ตาร์มีแนวโน้มของค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลงเนื่องจากเส้นใยรีโอคิวูลเป็นเส้นใยที่อ่อน มีความแข็งแรงน้อยกว่าทราย ดังนั้นค่ากำลังรับแรงอัดจึงลดลง เมื่อทรายถูกแทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคิวูลในสัดส่วนที่มากเกินไป ยิ่งไปกว่านั้นถึงแม้เส้นใยรีโอคิวูลจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกับวัสดุพอลิโพรพิลีน คือมีซิลิกา และอะลูมินาในปริมาณที่สูง แต่ขนาดอนุภาคของเส้นใยรีโอคิวูลนี้ใหญ่เกินกว่า 75 ไมโครเมตร จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิโพรพิลีนที่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้างได้



ก) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยคาร์บอน



ข) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา



ค) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ภาพที่ 4- 7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ก) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยคาร์บอน (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

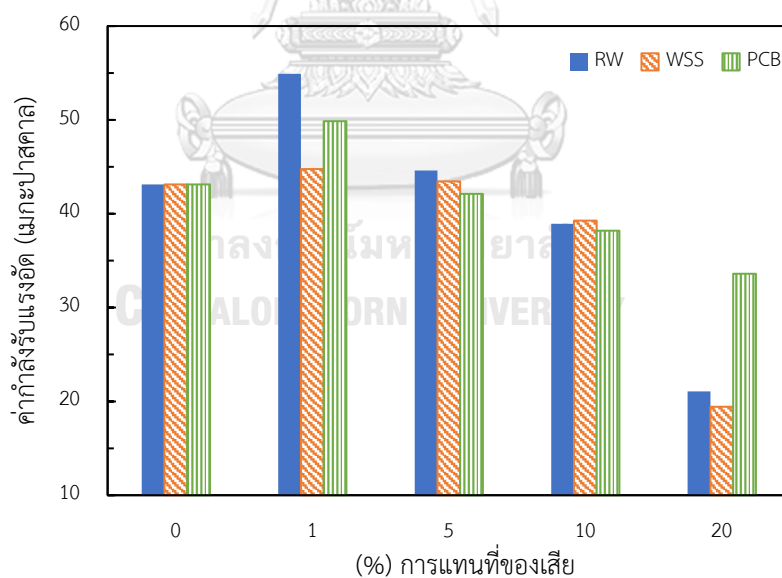
จากผลการศึกษา มีค่ากำลังรับแรงอัดไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาในอดีตของ Cheng และคณะ (2011) ที่ศึกษาคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเส้นใยคาร์บอน โดยมีการแทนที่เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 2, 5, 7 และ 10 โดยปริมาตร ผลการศึกษาพบว่าภายหลังการบ่ม 28 วัน เมื่อแทนที่เส้นใยคาร์บอนร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 15 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ใน

การศึกษามีสมบัติในการเป็นวัสดุพอซโซลาน คือมีทั้งองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม และมีขนาด เล็กกว่า 75 ไมโครเมตร พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาพอซโซลานได้ นอกจากนี้อนุภาคที่มีขนาดเล็กจน สามารถเกิดผลึกจากปฏิกิริยาพอซโซลานได้นั้น จะสามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างให้กับโครงสร้าง ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลให้เส้นใยรีอูล สามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุพอซโซลานได้นั้นนอกจากองค์ประกอบทางเคมีแล้วจำเป็นต้องมีขนาดของ อนุภาคที่เหมาะสมด้วย โดยขนาดของอนุภาคที่เหมาะสมควรมีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร

ส่วนการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ถูกแทนที่ทรายด้วยตะกอนจากโรง ผลิตน้ำประปาในอัตราส่วนร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4-7 (ข) ที่ ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 37.08, 34.59, 30.48 และ 10.45 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน ก้อนมอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 39.96, 38.87, 34.60 และ 14.50 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับ แรงอัดเท่ากับ 44.76, 43.45, 39.26 และ 19.42 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามากขึ้น จะส่งผลให้ค่ากำลังรับ แรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าที่ลดลง เนื่องจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีลักษณะเป็นเม็ดดิน จึงมี ความแข็งแรงไม่เท่ากับทราย นอกจากนี้ถึงแม้ว่าตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีองค์ประกอบทาง เคมีของซิลิกา และอะลูมินาสูง แต่ขนาดของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปายังมีขนาดใหญ่กว่าขนาด ของวัสดุพอซโซลาน จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอซโซลานภายในมอร์ตาร์ได้ ผลการศึกษาค่ากำลังรับ แรงอัดของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีความใกล้เคียงกับการศึกษาที่ผ่าน มาที่ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย โดยใส่ ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียตั้งแต่ร้อยละ 2.5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก ลงในส่วนผสม ภายหลังจากบ่ม 28 วัน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มี ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตปกติร้อยละ 70 โดยผู้ศึกษาได้ให้เหตุผลที่ทำให้ค่าความแข็งแรงของ ตัวอย่างลดลง เป็นเพราะตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียมีสมบัติที่จะเป็นวัสดุพอซโซลานต่ำ ถึงแม้จะมี ซิลิกาสูง แต่ขนาดอนุภาคยังไม่เหมาะสม และแรงที่ซีเมนต์ยึดเกาะกับตะกอนนั้นมีความแข็งแรงไม่ เท่ากับแรงที่ยึดเกาะกับทราย (Valls และคณะ, 2004)

และการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจร อิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ จากภาพที่ 4-7 (ค) พบว่ามอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจร

อิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะในอัตราส่วนร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ในระยะเวลาการบ่ม 7 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 38.29, 34.96, 30.95 และ 24.69 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 45.77, 38.53, 34.15 และ 30.03 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 49.86, 42.12, 38.19 และ 33.60 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งผลการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของผงที่บดจากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ จะส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากแรงยึดเกาะกันระหว่างปูนซีเมนต์กับผงที่บดจากผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มีความแข็งแรงน้อยกว่าแรงที่ยึดเกาะกันระหว่างปูนซีเมนต์กับทราย นอกจากนี้ผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีขนาดอนุภาคที่เล็กทำหน้าที่เพียงเข้าไปเติมเต็มภายในช่องว่างให้กับโครงสร้างได้เท่านั้น ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่ศึกษาการแทนที่ผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะในการผลิตคอนกรีตที่ร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตลดลงมากกว่าร้อยละ 40 เมื่อแทนที่ผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (Iniyan, 2016)



ภาพที่ 4- 8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ในระยะเวลาบ่ม 28 วัน

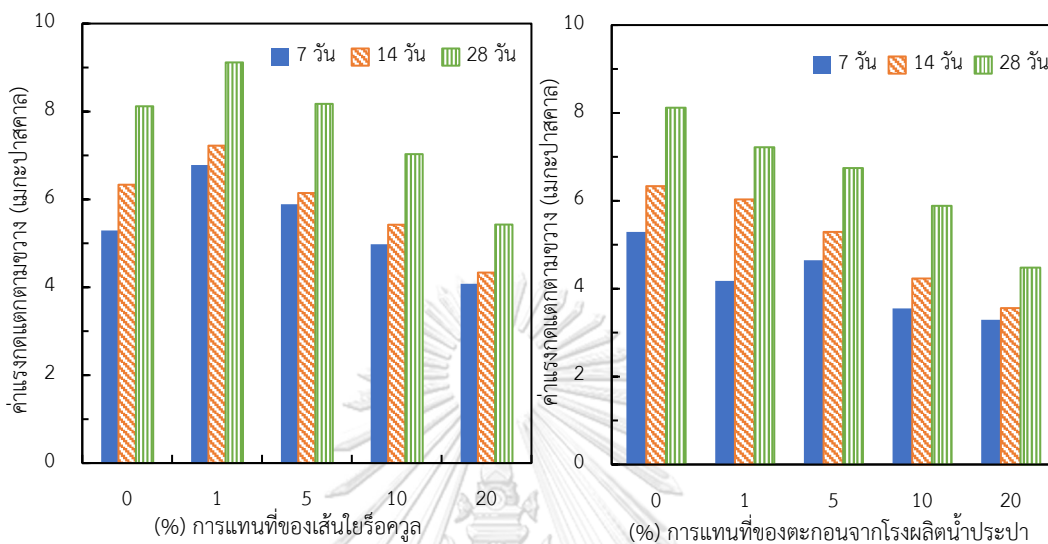
จากภาพที่ 4-8 เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียต่างชนิดกัน ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน ก้อนมอร์ตาร์มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเสียแต่ละชนิด โดยเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียจะ

พบว่าก่อนมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงถึงร้อยละ 51.17 สำหรับการแทนที่ด้วยเส้นใยหรือคูล ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงถึงร้อยละ 54.96 สำหรับการแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และค่ากำลังรับแรงอัดลดลงถึงร้อยละ 22.08 สำหรับการแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ โดยพบว่าที่การแทนที่ของของเสียที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือคูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา เนื่องจากขนาดของของเสียเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด (Lin และคณะ, 2013) ของเสียที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะสามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างระหว่างทรายกับซีเมนต์ภายในโครงสร้างได้มากกว่า ดังนั้นผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากกว่าเส้นใยหรือคูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา จึงเป็นไปได้ว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะจะมีปริมาณรูหรือช่องว่างภายในโครงสร้างน้อยกว่าส่งผลให้มอร์ตาร์นั้นมีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียชนิดอื่น

4.3.3 ผลการทดสอบค่าแรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load)

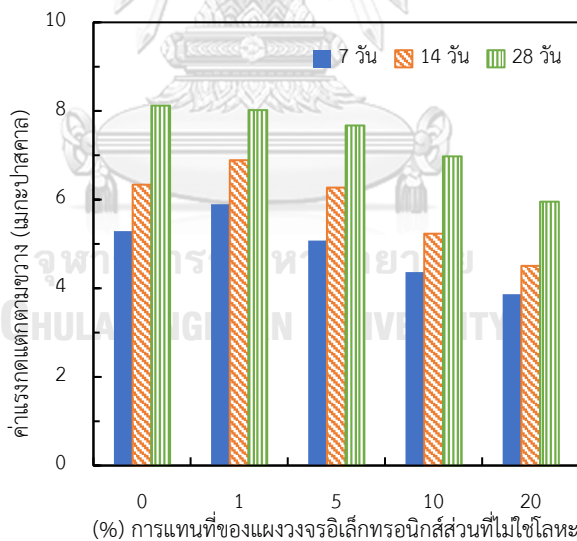
จากการศึกษาการแทนที่ของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยหรือคูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ด้วยทรายในการผลิตมอร์ตาร์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $13 \times 26 \times 2$ เซนติเมตร หลังจากการบ่มที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน นำไปทดสอบค่าแรงกดแตกตามขวาง ผลจากการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4-9 พบว่าค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ทรายด้วยของเสียแต่ละชนิด จะส่งผลให้ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ลดลง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจาก 7 วัน เป็น 14 และ 28 วัน จะส่งผลให้ค่าแรงกดแตกตามขวางเพิ่มขึ้น ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่ไม่ได้แทนที่ด้วยของเสียมีค่าเท่ากับ 5.29, 6.34 และ 8.12 เมกะปาสคาล ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ส่วนผลการศึกษาค่าแรงกดแตกตามขวางของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือคูลแสดงในภาพที่ 4-9 (ก) โดยมอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยเส้นใยหรือคูลปริมาณร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าแรงกดแตกตามขวางที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วันเท่ากับ 6.78, 5.89, 4.98 และ 4.08 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนที่

ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มีค่าแรงกดแตกตามขวางเท่ากับ 7.22, 6.14, 5.42 และ 4.34 เมกะ-
 ปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 28 วัน มีค่าแรงกดแตกตามขวางเท่ากับ 9.12,
 8.17, 7.03 และ 5.43 เมกะปาสคาล ตามลำดับ



ก) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยโพรพิลีน

ข) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอน
 จากโรงผลิตน้ำประปา



ค) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

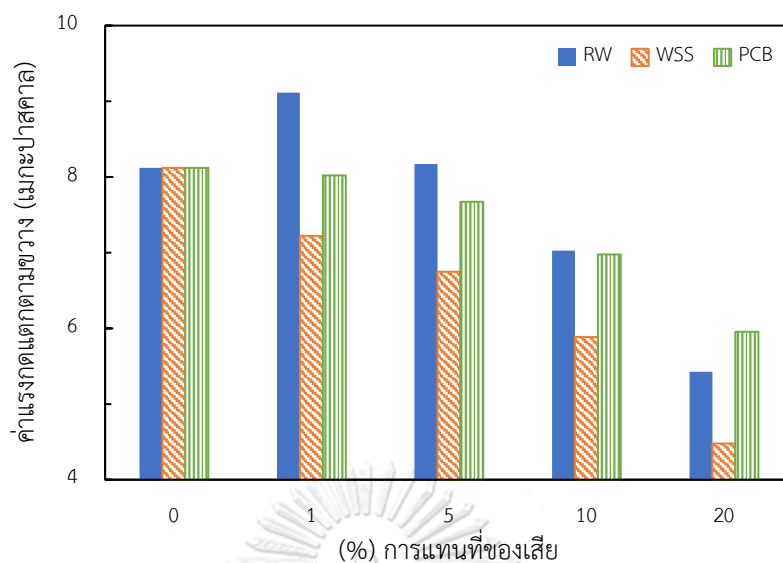
ภาพที่ 4- 9 ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ก) มอร์ตาร์ที่
 แทนที่ด้วยเส้นใยโพรพิลีน (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่
 ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

จากผลการศึกษาพบว่าค่าแรงกดแตกตามขวางมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่ากำลังรับแรงอัด เนื่องจากเส้นใยรีอควูลถึงแม้จะมีองค์ประกอบทางเคมีเหมาะสมที่จะเป็นวัสดุพอลิโซลันแต่ขนาดอนุภาคของเส้นใยรีอควูลใหญ่เกินกว่า 75 ไมครอน จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ ดังนั้นเมื่อลดปริมาณของทรายแล้วเพิ่มปริมาณของเส้นใยรีอควูลจะส่งผลให้วัสดุก่อสร้างมีความแข็งแรงลดลงเพราะเส้นใยรีอควูลมีสมบัติไม่เพียงพอที่จะสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิโซลันซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของมอร์ตาร์ นอกจากนี้เส้นใยรีอควูลเป็นเส้นใยมีความแข็งแรงไม่เท่ากับทรายจึงส่งผลทำให้มีค่าความแข็งแรงลดลง ซึ่งที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยรีอควูลที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าน้อยกว่าค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่ไม่แทนที่ด้วยของเสียเท่ากับร้อยละ 5.86 และ 22.87 ตามลำดับ แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Cheng และคณะ (2011) ศึกษาการใช้เส้นใยรีอควูลแทนที่มวลรวมละเอียด โดยเส้นใยรีอควูลที่นำมาใช้มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน พบว่าการแทนที่เส้นใยรีอควูลที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะส่งผลให้ค่าแรงกดแตกตามขวางของคอนกรีตเพิ่มขึ้นร้อยละ 26 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม เนื่องจากเส้นใยรีอควูลมีขนาดเล็ก สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิโซลันและมีลักษณะเป็นเส้นใยจึงสามารถเข้าไปยังการแตกภายในโครงสร้างคอนกรีตได้

ในการศึกษาค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่ร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4-9 (ข) พบว่าในระยะเวลาบ่ม 7 วัน มอร์ตาร์มีค่าแรงกดแตกตามขวางเท่ากับ 4.18, 4.65, 3.55 และ 3.29 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 14 วัน มีค่าแรงกดแตกตามขวางเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.03, 5.29, 4.23 และ 3.56 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน มอร์ตาร์มีค่าแรงกดแตกตามขวางเป็นเท่ากับ 7.22, 6.75, 5.88 และ 4.48 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์จะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ทรายด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา โดยสาเหตุการลดลงของค่าแรงกดแตกตามขวางนั้น เนื่องจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีความแข็งแรงไม่เท่ากับทราย และยังขาดสมบัติทางด้านขนาดของอนุภาคที่ใหญ่เกินไปจึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิโซลันได้ถึงแม้จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมก็ตาม นอกจากนี้รูปร่างของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีลักษณะกลม ไม่สามารถทนต่อแรงดัด และแรงดึงได้ดีเท่ากับวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย หรือเป็นทรงกระบอกยาว จึงทำให้มีค่าแรงกดแตกตามขวางต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่

แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ อีกทั้งที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าแรงกดแตกตามขวางน้อยกว่าร้อยละ 27.59 และ 44.83 เมื่อเทียบกับของมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย ผลจากการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษาคาร์บอนผสมตะกอนที่ได้จากโรงผสมซีเมนต์ในสัดส่วนร้อยละ 0 ถึง 100 ในการผลิตคอนกรีต พบว่ามีค่าแรงกดแตกตามขวางลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเสีย (Chatveera และคณะ, 2006) เนื่องจากพันธะที่เชื่อมประสานกันระหว่างซีเมนต์เพสต์กับตะกอนมีความแข็งแรงน้อยกว่าการเชื่อมประสานกันของซีเมนต์เพสต์กับทราย จึงเป็นสาเหตุให้เมื่อเพิ่มการแทนที่ด้วยตะกอนจะส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงที่ลดลง

จากภาพที่ 4-9 (ค) พบว่าการแทนที่ของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ส่งผลทำให้ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์มีค่าลดลง โดยก่อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน จะมีค่าแรงกดแตกตามขวางเท่ากับ 5.90, 5.08, 4.36 และ 3.86 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มอร์ตาร์จะมีค่าแรงกดแตกตามขวางเท่ากับ 6.89, 6.27, 5.23 และ 4.50 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 28 วัน จะส่งผลให้มีค่าแรงกดแตกตามขวางเพิ่มขึ้นเท่ากับ 8.02, 7.67, 6.98 และ 5.95 เมกะปาสคาล ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าแรงกดแตกตามขวางน้อยกว่าร้อยละ 14.04 และ 26.72 เมื่อเทียบกับของมอร์ตาร์ที่ไม่แทนที่ด้วยของเสีย การลดลงของค่าความแข็งแรงนั้นมีสาเหตุมาจากการลดลงของทรายที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ซึ่งผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะถึงแม้จะมีขนาดที่เล็กมากเท่ากับขนาดของวัสดุปอซโซลาน หรือปูนซีเมนต์ แต่องค์ประกอบทางเคมีของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนั้นไม่มีแคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา หรืออะลูมินา จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือปฏิกิริยาปอซโซลานได้ ซึ่งผลของการลดลงของค่ารับแรงกดแตกตามขวางนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Wang และคณะ (2012) ซึ่งศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะในการผลิตมอร์ตาร์ พบว่าเมื่อแทนที่แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่าแรงกดแตกตามขวางลดลงอย่างมากถึงประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย



ภาพที่ 4- 10 ค่าแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด
ในระยะเวลาบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 4-10 เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติด้านการแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ พบว่าเมื่อเพิ่มการแทนที่ของของเสียแต่ละชนิดจะส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าแรงกดแตกตามขวางลดลง และมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีค่าแรงกดแตกตามขวางต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียชนิดอื่นในทุกอัตราส่วนการแทนที่ เนื่องจากปัจจัยทางด้านลักษณะของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่มีรูปร่างเป็นทรงกลม มีความสามารถในการยึดเกาะ รับแรงดึงหรือแรงดัด ไม่ดีเท่ากับวัสดุที่มีรูปร่างเป็นเส้นใยหรือทรงกระบอกยาว ส่งผลให้แตกง่ายกว่าเมื่อมีแรงมาก นอกจากนี้สาเหตุที่ทำให้มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดมีค่าความแข็งแรงลดลง เพราะสมบัติของของเสียที่มีพื้นผิวที่เรียบ ไม่แข็งแรง มีขนาดอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีไม่เหมาะสม จึงส่งผลให้แรงหรือพันธะที่ยึดเกาะระหว่างของเสียกับปูนซีเมนต์มีความแข็งแรงไม่เท่ากับพันธะที่ยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์กับทราย

4.3.4 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

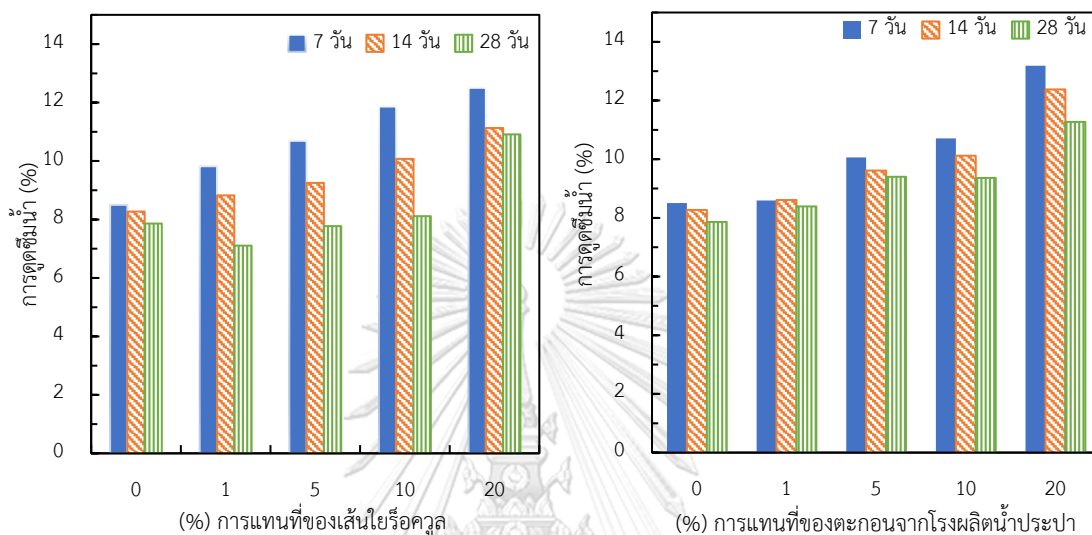
การศึกษาค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ตัวอย่างที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มการแทนที่ของเสียแต่ละชนิด จะส่งผลให้มอร์ตาร์มีความสามารถในการ

การดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มจะส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำที่ลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4-11 โดยที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียมี่ค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 8.50, 8.27 และ 7.86 ตามลำดับ จากภาพที่ 4-11 (ก) ศึกษาการแทนที่ของเส้นใยหรือควูล์ร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วัน

ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 9.82, 10.69, 11.86 และ 12.51 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเป็น 14 วัน มอร์ตาร์จะมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 8.82, 9.25, 10.08 และ 11.13 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์จะมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 7.10, 7.77, 8.11 และ 10.91 ตามลำดับ สาเหตุของการเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมเส้นใยหรือควูล์ เนื่องจากเส้นใยหรือควูล์มีลักษณะเป็นเส้นใย มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้มากกว่าทราย และมีปริมาณรูพรุน และช่องว่างภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์ที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าตัวอย่างควบคุมเท่ากับร้อยละ 3.18 และ 38.80 ตามลำดับ จากงานวิจัยที่ผ่านมาการศึกษาสมบัติของแผ่นใยไม้อัดซีเมนต์จากกากมะพร้าว และเส้นใยต้นข้าวโพด พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของกากมะพร้าว และเส้นใยต้นข้าวโพด จะส่งผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นใยไม้อัดซีเมนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีสมบัติในการดูดซึมน้ำได้ดีเช่นเดียวกับเส้นใยหรือควูล์ (ผกา มาศ ชูสิทธิ์ และ ภาณุเดช ขัดเงางาม, 2556)

จากการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา แสดงในภาพที่ 4-11 (ข) พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาในส่วนผสม โดยการแทนที่ตะกอนน้ำประปาร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน ก่อนมอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 8.59, 10.06, 10.71 และ 13.19 ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน มอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 8.61, 9.61, 10.12 และ 12.38 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน มอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 8.39, 9.40, 9.36 และ 11.27 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเพิ่มการแทนที่ของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาตั้งแต่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ขึ้นไปจะส่งผลให้มีค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นมาก เนื่องจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีสมบัติในการอุ้มน้ำ และมอร์ตาร์ที่ผสมตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาจะมีช่องว่างภายในโครงสร้างที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีลักษณะเป็นรูพรุน

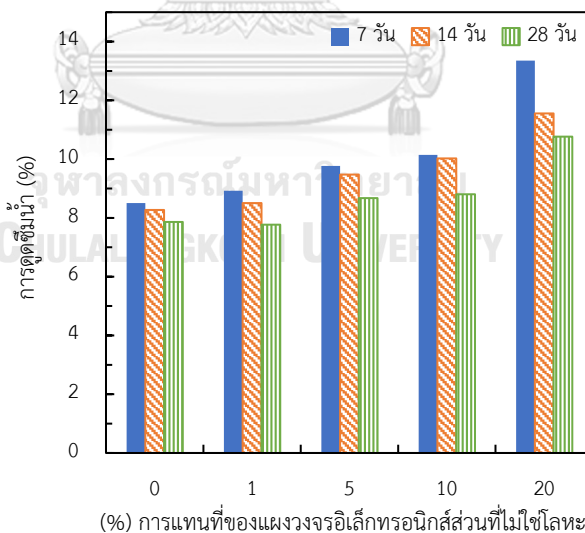
ขนาดเล็ก ส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถของการดูดซึมน้ำได้ ซึ่งมีงานวิจัยของ Valls และคณะ (2004) สนับสนุนว่าตัวอย่างที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียมีค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยงานวิจัยนี้ได้ให้สาเหตุว่าก้อนคอนกรีตมีปริมาณรูภายในโครงสร้างมากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนการแทนที่ของตะกอนดังกล่าว



ก) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคูล

ข) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอน

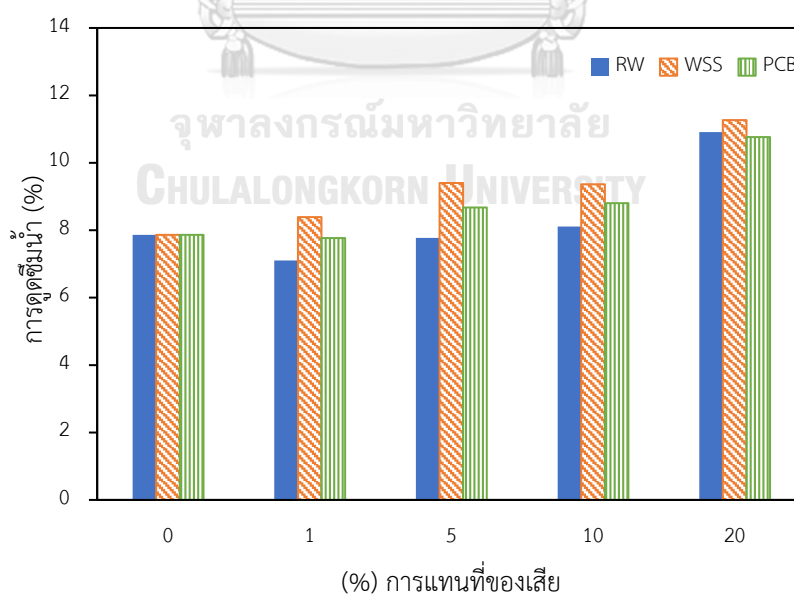
จากโรงผลิตน้ำประปา



ค) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ภาพที่ 4- 11 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน (ก) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคูล (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

และการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ผสมผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ แสดงดังภาพที่ 4-11(ค) พบว่าเมื่อแทนที่ทรายด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ในการผลิตมอร์ตาร์ส่งผลให้ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 8.92, 9.80, 10.14 และ 13.35 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มค่าการดูดซึมน้ำที่ผ่านการบ่ม 14 วัน มีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 8.50, 9.48, 10.03 และ 11.56 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 7.77, 8.67, 8.80 และ 10.77 ตามลำดับ เนื่องจากการแทนที่ทรายด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะทำให้เกิดการเชื่อมประสานภายในโครงสร้างลดลงส่งผลให้มอร์ตาร์มีปริมาณรูพรุนภายในช่องว่างเพิ่มมากขึ้น และเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุก่อสร้างลดลง จากผลการศึกษาที่ใกล้เคียงกับงานของ Wang และคณะ (2012) ที่ศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่ร้อยละ 5 ถึง 25 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมากกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก จะส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้น และมีค่าความแข็งแรงที่ลดลงอย่างมาก ซึ่งผลของค่าการดูดซึมน้ำจะแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์

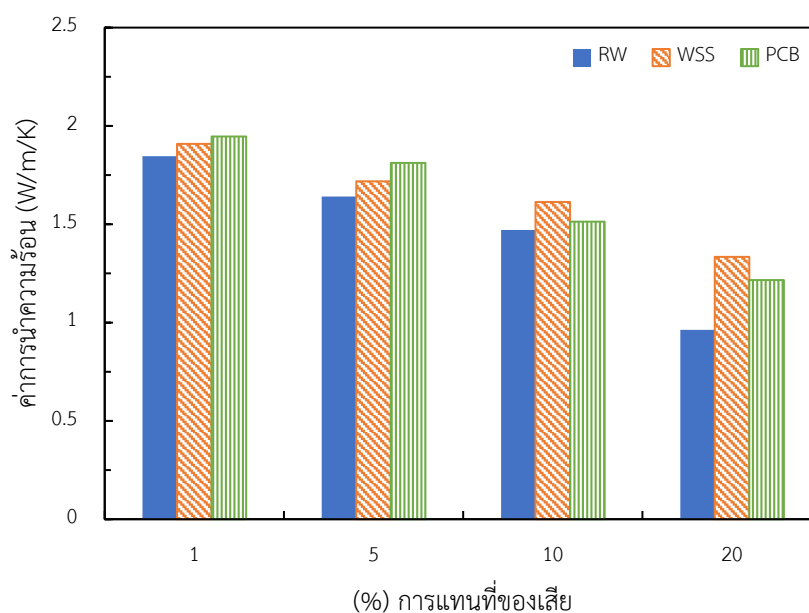


ภาพที่ 4-12 ค่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด
ในระยะเวลาบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 4-12 เป็นการศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ยแต่ละชนิด ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสี้ยแต่ละชนิดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเสี้ย จะส่งผลให้มอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ที่ทรายด้วยของเสี้ยแต่ละชนิดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด เพราะตะกอนน้ำประปามีลักษณะเป็นรูพรุนรอบพื้นผิว และมีสมบัติในการอุ้มน้ำที่ดี รองลงมาคือมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการดูดซึมน้ำจะแปรผกผันกันกับค่าความแข็งแรง คือมอร์ตาร์ที่มีค่าความแข็งแรงต่ำจะมีค่าการดูดซึมน้ำสูง

4.3.5 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่แทนที่ทรายด้วยของเสี้ยแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน แสดงในภาพที่ 4-13



ภาพที่ 4- 12 ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสี้ยแต่ละชนิดในระยะเวลาบ่ม 28 วัน

ผลจากการศึกษาพบว่าค่าการนำความร้อนของก้อนมอร์ตาร์จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มการแทนที่ของของเสียแต่ละชนิด โดยการแทนที่ของของเสียที่ร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูลมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 1.846, 1.641, 1.471 และ 0.963 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 1.909, 1.718, 1.613 และ 1.334 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 1.946, 1.812, 1.513 และ 1.216 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ตามลำดับ ซึ่งมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 2.50 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (Sikora และคณะ, 2017) ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนจะพบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการนำความร้อนน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียเท่ากับร้อยละ 41.16 และ 61.48 ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ร้อยละ 35.48 และ 46.64 ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และร้อยละ 39.48 และ 51.36 ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ สาเหตุการลดลงของค่าการนำความร้อนเมื่อมีการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดในมอร์ตาร์ เนื่องมาจากของเสียแต่ละชนิดมีค่าการนำความร้อนที่น้อยกว่าทราย โดยพบว่าทรายมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 2.00 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (Hannawi และคณะ, 2010) เส้นใยหรือควูลมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.035 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (Rockwool, 2018) ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.356 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (Vesilind และ Martel, 1989) และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะส่วนใหญ่ประกอบด้วยอีพอกซี เรซิน (Epoxy resin) มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.21 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (Akatsuka และ Takezawa, 2003) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้การแทนที่ของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีค่าการนำความร้อนมากที่สุด รองลงมาคือ มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ และมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูลจะมีค่าการนำความร้อนน้อยที่สุด จากศึกษาที่ผ่านมาพบว่าถ้าวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตวัสดุก่อสร้าง มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ หรือทราย จะส่งผลให้วัสดุก่อสร้างนั้นมีค่าการนำความร้อนที่ลดลง หรือมีสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนเพิ่มมากขึ้น (Herrero และคณะ, 2016; Akcaozoglu และคณะ, 2013; Sikora และคณะ, 2017) ซึ่งวัสดุก่อสร้างที่มีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อน จะช่วยลดการนำความร้อนเข้า

สู่อาคาร ควบคุมอุณหภูมิของอาคารไม่ให้สูงขึ้น เป็นการช่วยลดการใช้พลังงาน และลดการใช้ไฟฟ้าในการเปิดเครื่องปรับอากาศ หรือพัดลม ซึ่งเป็นการส่งเสริมการประหยัดค่าไฟฟ้าตามนโยบายยุทธศาสตร์พลังงาน 4.0 ของประเทศที่ตั้งเป้าจะลดการใช้พลังงานเพื่อประหยัดไฟฟ้า

จากตารางที่ 4-6 แสดงผลการศึกษาสมบัติทางด้านค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าแรงกดแตกตามขวาง ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าการนำความร้อน ของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน ก่อนมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดมากขึ้นจะส่งผลให้มอร์ตาร์มีแนวโน้มค่าความแข็งแรงที่ลดลง คือมีค่ากำลังรับแรงอัด และค่าแรงกดแตกตามขวางที่ลดลง แต่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณการแทนที่ของของเสียจะช่วยปรับปรุงให้มอร์ตาร์มีสมบัติการนำความร้อนลดลง ซึ่งสมบัติของมอร์ตาร์นั้นเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุก่อสร้างชนิดที่ไม่รับน้ำหนัก หรือไม่รับโครงสร้าง โดยตารางที่ 4-7 แสดงค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ได้แก่ กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น (มอก. 378-2531) กระเบื้องซีเมนต์ปูพื้น (มอก. 826-2531) กระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา (มอก. 535-2556) และ คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533) ซึ่งพบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดร้อยละ 1 ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัด และค่าแรงกดแตกตามขวางอยู่ในมาตรฐาน แต่มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซึมน้ำเกินกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนด คือค่ามาตรฐานกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ควรมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณของเสียแต่ละชนิดที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุทดแทนทรายในการผลิตมอร์ตาร์ คือเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก ซึ่งหลังจากนี้จะศึกษาการทนไฟของวัสดุด้วยการนำไปเผา และศึกษาการเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของมอร์ตาร์ตัวอย่างระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย กับมอร์ตาร์ที่แทนที่ของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยศึกษาสารประกอบ และโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) และศึกษาลักษณะสัญญาณของวัสดุในระดับจุลภาค ด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM) ต่อไป

ตารางที่ 4- 6 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล และการนำความร้อนของมอร์ตาร์ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

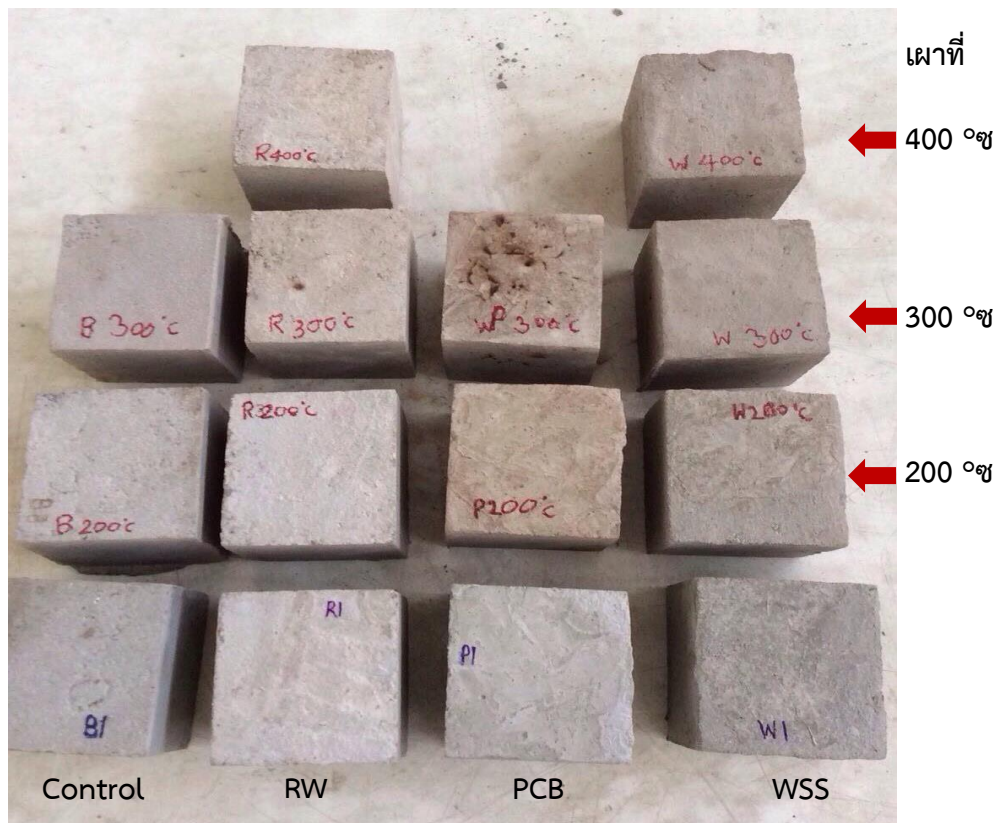
ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	แรงกดแตก ตามขวาง (เมกะปาสคาล)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	การนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตร- เคลวิน)
Control	2.046	43.13	8.12	7.86	>2.50
RW1	2.046	54.91	9.12	7.10	1.846
RW5	2.019	44.60	8.17	7.77	1.641
RW10	1.941	38.92	7.03	8.11	1.471
RW20	1.735	21.06	5.43	10.91	0.963
WSS1	2.043	44.76	7.22	8.39	1.909
WSS5	1.968	43.45	6.75	9.40	1.718
WSS10	1.939	39.26	5.88	9.36	1.613
WSS20	1.866	19.42	4.48	11.27	1.334
PCB1	2.041	49.86	8.02	7.77	1.946
PCB5	2.001	42.12	7.67	8.67	1.812
PCB10	1.959	38.19	6.98	8.80	1.513
PCB20	1.773	33.60	5.95	10.77	1.216

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4- 7 ค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของวัสดุก่อสร้างที่ไม่รับโครงสร้าง หรือน้ำหนัก

สมบัติ	กระเบื้อง คอนกรีตปูพื้น (มอก.378-2531)	กระเบื้องซีเมนต์ ปูพื้น (มอก. 826-2531)	กระเบื้อง คอนกรีตมุงหลังคา (มอก. 535-2556)	คอนกรีตบล็อก ไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533)
ค่ากำลังรับแรงอัด	-	-	-	≥ 2.5 MPa
ค่าแรงกดแตกตาม ขวาง	≥ 3 MPa	≥ 5 MPa	≥ 3.325 N/mm	-
ค่าการดูดซึมน้ำ	≤ 10%	≤ 10%	≤ 10%	≤ 25%

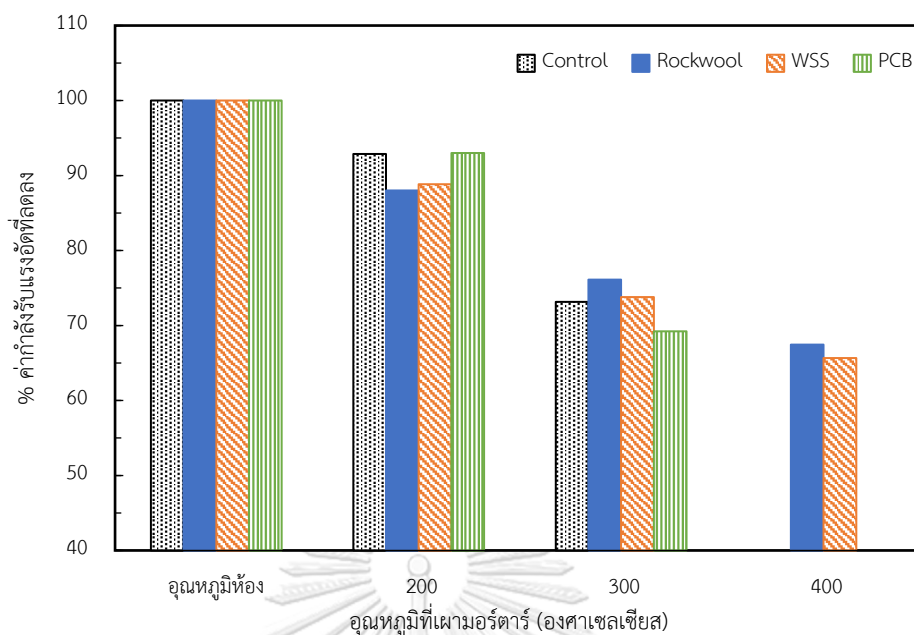
4.3.6 ผลการทดสอบพฤติกรรมของมอร์ตาร์หลังการเผา



ภาพที่ 4- 13 ลักษณะของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด หลังการเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลการศึกษาการทนไฟของมอร์ตาร์ด้วยการเผา โดยการนำมอร์ตาร์ที่แทนที่ของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และ ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มาแทนที่ทรายที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หล่อให้มีขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร ทำการบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน แล้วจึงนำมอร์ตาร์ไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Professional Furnaces) ยี่ห้อ Nabertherm ที่อุณหภูมิ 200, 400 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งเป็นไปตาม พรบ. ควบคุมอาคาร เกี่ยวกับการป้องกันอัคคีภัย ที่กำหนดให้วัสดุทนไฟต้องมีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง หลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆแล้วจึงนำมอร์ตาร์ไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ซึ่งจากภาพที่ 4-13 แสดงลักษณะของมอร์ตาร์ และจากภาพที่ 4-14 แสดงผลการลดลงของค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผ่านการเผาแล้ว



ภาพที่ 4- 14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอเตอร์ที่ถูกแทนที่ของเสียร้อยละ 10 โดยมวล ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส

จากผลการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดของมอเตอร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากการเผาที่อุณหภูมิต่างๆเพื่อศึกษาการทนไฟของมอเตอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาจะส่งผลทำให้มอเตอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลง โดยมอเตอร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียและไม่ผ่านการเผา มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 26.83 เมกะปาสคาล และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส จะส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงไปร้อยละ 7.13 และ 26.85 ตามลำดับ แต่ที่การเผามอเตอร์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้ก่อนมอเตอร์เกิดการแตกร้าอย่างรุนแรง ส่วนมอเตอร์ที่แทนที่ทรายด้วยเส้นใยหรือควูล มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 28.99 เมกะปาสคาล สำหรับมอเตอร์ที่ไม่ผ่านการเผา และเมื่อนำมอเตอร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูลไปเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส จะส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเท่ากับร้อยละ 12, 23.88 และ 32.56 ตามลำดับ มอเตอร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ไม่ผ่านการเผา มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 28.03 เมกะปาสคาล และมอเตอร์จะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเท่ากับร้อยละ 11.17, 26.22 และ 34.35 เมื่อนำมอเตอร์นี้ไปเผาที่อุณหภูมิ 200, 300 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่ากำลังรับแรงอัดของมอเตอร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีค่าเท่ากับ 28.43 เมกะปาสคาล สำหรับมอเตอร์ที่ไม่ได้นำไปเผา เมื่อ

นำมอร์ตาร์ไปเผาที่อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส จะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงร้อยละ 6.99 และ 30.78 ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 400 องศาเซลเซียส จะส่งผลทำให้มอร์ตาร์นี้เกิดการแตกร้าว และไม่สามารถนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดได้

ตารางที่ 4- 8 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)			
	อุณหภูมิห้อง	200 °ซ	300 °ซ	400 °ซ
control	2.055	1.997	1.779	-
RW 10	1.936	1.802	1.760	1.651
WSS 10	1.945	1.766	1.719	1.676
PCB 10	1.978	1.805	1.725	-

สาเหตุของค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อนำก้อนตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำภายในซีเมนต์เฟส และภายในโครงสร้างมอร์ตาร์ได้ระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว โดยผลของค่าความหนาแน่นที่ลดลงแสดงถึงน้ำหนักภายในมอร์ตาร์ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ได้ผ่านการเผา ดังแสดงในตารางที่ 4-8 ซึ่งลักษณะของมอร์ตาร์ที่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นบางส่วนจะมีรอยไหม้ มีรูพรุนรอบพื้นผิว และบริเวณริมขอบของมอร์ตาร์มีรอยร้าวเล็กน้อย ส่งผลต่อการลดลงของความแข็งแรง โดยการเผาที่อุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ปริมาณน้ำระเหยออกไปเกิดช่องว่างภายในโครงสร้าง แล้วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาที่ 300 องศาเซลเซียส ความร้อนจะทำให้มวลรวมละเอียด หรือทรายเกิดการแตก พันธะที่ยึดเกาะกันภายในโครงสร้างอ่อนลง และเกิดการขยายตัวเพิ่มปริมาตรภายในโครงสร้างได้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 400 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อการสลายตัวของผลึก Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งทำลายการเชื่อมประสานกันระหว่างซีเมนต์ กับมวลรวม ก่อให้เกิดช่องว่าง และการขยายตัวเพิ่มแรงดันภายในโครงสร้าง จนเกิดรอยร้าว และแตกได้จากผลการศึกษาพบว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูลีมีการทนความร้อนได้ดี สามารถทนการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสได้ โดยค่ากำลังรับแรงอัดลดลงไปประมาณร้อยละ 30 เพราะ เส้นใยหรือควูลีมีสมบัติในการทนทานต่อความร้อนสูง จึงนิยมนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน และเมื่อนำมาผสมในมอร์ตาร์จึงทำให้มอร์ตาร์มีสมบัติในการลดการนำความร้อน และเพิ่มความสามารถในการทนไฟได้ ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาก็สามารถทนต่ออุณหภูมิการเผาที่ 400

องศาเซลเซียสได้เช่นกัน ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงไปประมาณร้อยละ 46 เนื่องจากตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีลักษณะคล้ายดินเหนียว และมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) สูง คล้ายกับวัสดุที่สามารถนำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์เซรามิก หรือเครื่องปั้นดินเผาได้จึงมีความทนต่อความร้อนได้ดี แต่มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะไม่สามารถทนอุณหภูมิการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส ได้ และที่การเผา มอร์ตาร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสนั้น มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะจะมีลักษณะพื้นผิวที่มีรอยตำหนิอย่างชัดเจน เหตุเป็นเพราะส่วนใหญ่ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะจะประกอบด้วยอีพอกซี เรซิน (Epoxy resins) ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตติง (Thermosetting plastic) ซึ่งมีสมบัติคือ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการแตกและไหม้เป็นซีเมนต์ดำตั้งรอยที่ปรากฏบนผิวของมอร์ตาร์ โดยเรซินชนิดนี้สามารถทนความร้อนได้ถึง 250 องศาเซลเซียส (Gibson, 2017) การสลายตัวของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะจนเป็นซีเมนต์ดำ อาจส่งผลให้ภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์มีปริมาณรูพรุน และเกิดซีเมนต์เข้ามาแทนที่ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะซึ่งความแข็งแรงของซีเมนต์นั้นน้อยกว่าแผงวงจรมากจึงทำให้ทำลายการเชื่อมประสาน ความแข็งแรงลดลง เกิดรอยร้าว และแตกในที่สุด ยิ่งไปกว่านั้นจะสังเกตเห็นว่าลักษณะผิวของมอร์ตาร์จะเปลี่ยนเป็นสีแตงน้ำตาลเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาของเหล็กออกไซด์เมื่อเผาไหม้

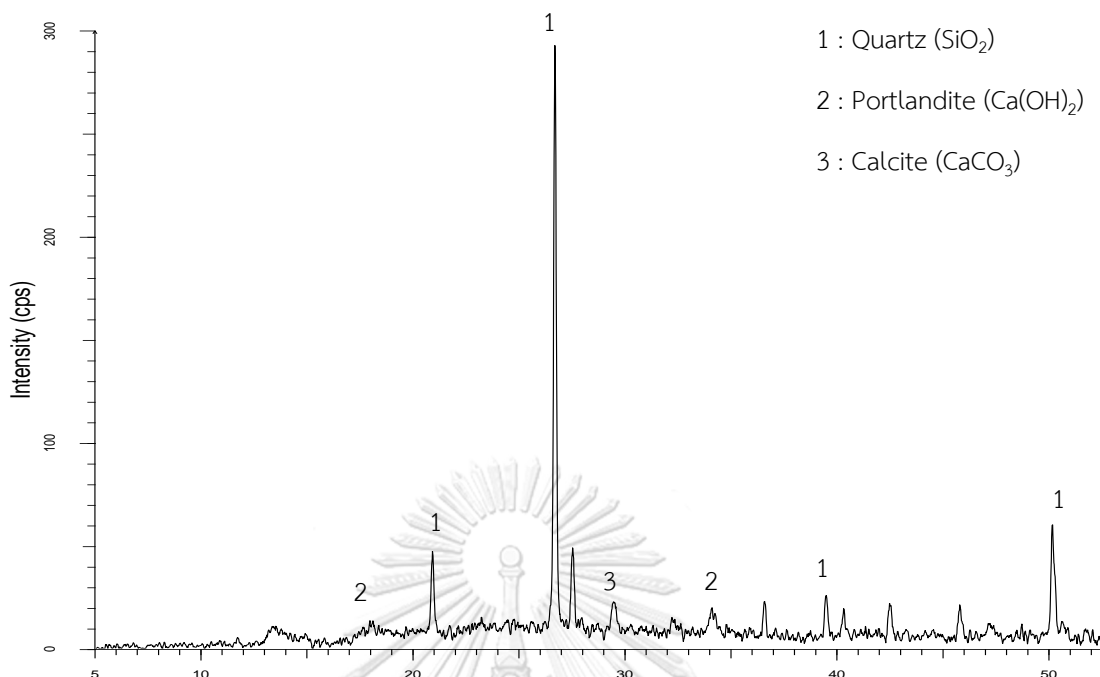
จากการศึกษานี้มีทิศทางคล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Sudarshan และ Vyas (2017) ที่ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ผสมเศษหินอ่อนหลังจากการนำไปเผาที่ช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา น้ำหนักของคอนกรีตจะลดลง และมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงไปเกือบร้อยละ 50 เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส นอกจากนี้คอนกรีตที่แทนที่มวลรวมหยาบด้วยเศษหินอ่อนจะมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยผู้วิจัยได้ให้เหตุผลว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 350 องศาเซลเซียส จะก่อให้เกิดการแตกของทราย และที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 ถึง 540 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ผลึก Portlandite (Ca(OH)_2) เริ่มถูกทำลาย มวลรวมละเอียดเกิดการขยายตัว จะส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ส่งผลให้พันธะการยึดเกาะระหว่างซีเมนต์เฟลสกับมวลรวมผสมอ่อนลง เกิดการแตกร้าวภายในและนอกโครงสร้าง จึงทำให้มีความแข็งแรงลดลงอย่างรุนแรง

ดังนั้นจากผลการทดลองจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการทนไฟของมอร์ตาร์ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งปกติมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียจะไม่สามารถทนไฟที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้ เช่นเดียวกับมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ แต่การแทนที่มอร์ตาร์ด้วยเส้นใยหรือควูล กับตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทำให้มอร์ตาร์ทนไฟที่อุณหภูมิสูงได้ แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตอิฐทนไฟจะต้องเผาขึ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐทนไฟ ได้แก่ ดินทนไฟ ดินเชื้อ แร่อะลูมินา และซิลิกา เป็นต้น ซึ่งในการทดลองนี้ผลการทดสอบการทนไฟต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทนไฟของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียต่างชนิดกันเท่านั้น ซึ่งความสามารถการทนไฟของวัสดุที่ทดลองนั้นยังไม่ผ่านมาตรฐานอิฐทนไฟ แต่พบว่าสมบัติของเส้นใยหรือควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา เหมาะสมที่จะเป็นวัสดุทางเลือกหนึ่งที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นมวลรวมผสมในการผลิตอิฐทนไฟได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบของซิลิกา และอะลูมินาสูง ซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งของอิฐทนไฟ

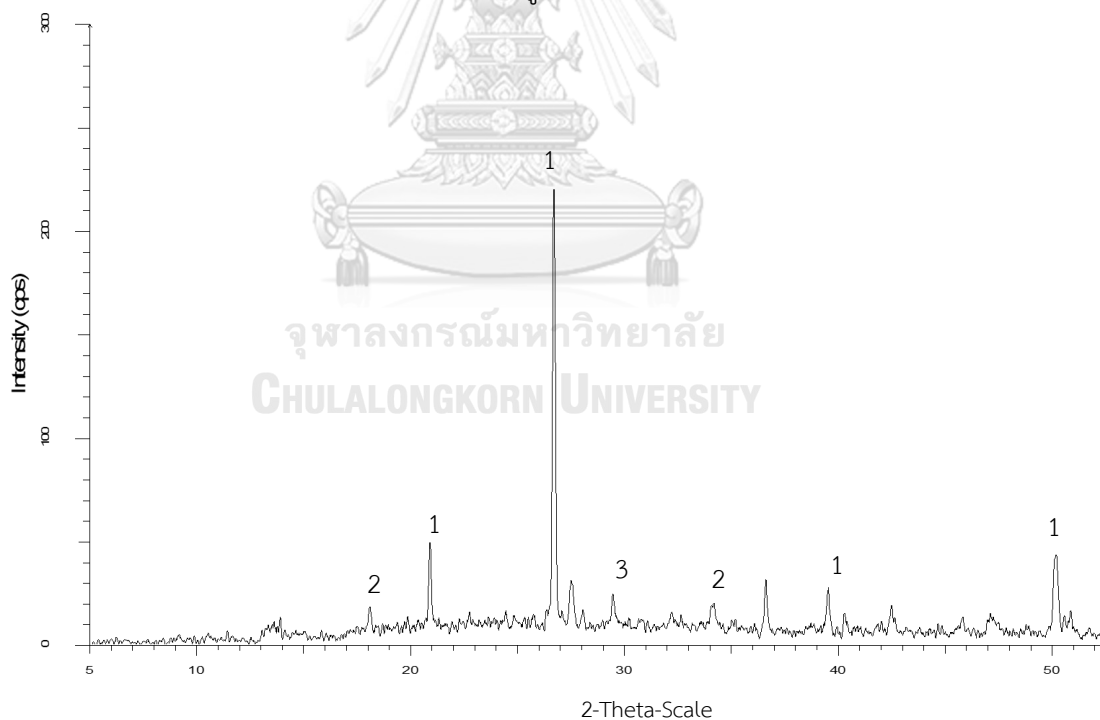
4.3.7 ผลการทดสอบโครงสร้างผลึก ด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)

จากการศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรงของมอร์ตาร์ทั้งค่ากำลังรับแรงอัด และค่าแรงกดแตกตามขวาง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของของเสียแต่ละชนิดในมอร์ตาร์จะส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์ลดลง ซึ่งสาเหตุนี้อาจมาจากการลดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงส่งผลทำให้การเกิดผลึกที่จะช่วยเชื่อมประสานกันระหว่างซีเมนต์และมวลรวมลดลงได้ โดยได้มีการศึกษาผลึกภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) เพื่อเป็นการยืนยันข้อสันนิษฐานดังกล่าว

จากภาพที่ 4-15 แสดงถึงโครงสร้างผลึกที่อยู่ในมอร์ตาร์ โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) Model D8 Advance ในช่วง 10° ถึง 50° ซึ่งผลึกจะปรากฏค่าพีค (Peak) แสดงจำนวนอิเล็กตรอน (Count) ถ้ามีจำนวนอิเล็กตรอนมาก โครงสร้างจะมีความเป็นผลึกมากตามซึ่งรูปแบบผลึกควอร์ตซ์ (silicon dioxide, SiO_2) จะแสดงใน 2Theta ที่ 20.9° , 26.68° และ 50.2° ส่วนผลึกพอร์ตแลนด์ไต์ (portlandite, $\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$) ปรากฏใน 2Theta ที่ 18.0° และ 34.8° และผลึกแคลไซต์ (Calcite, CaCO_3) แสดงใน 2Theta ที่ 29.4°

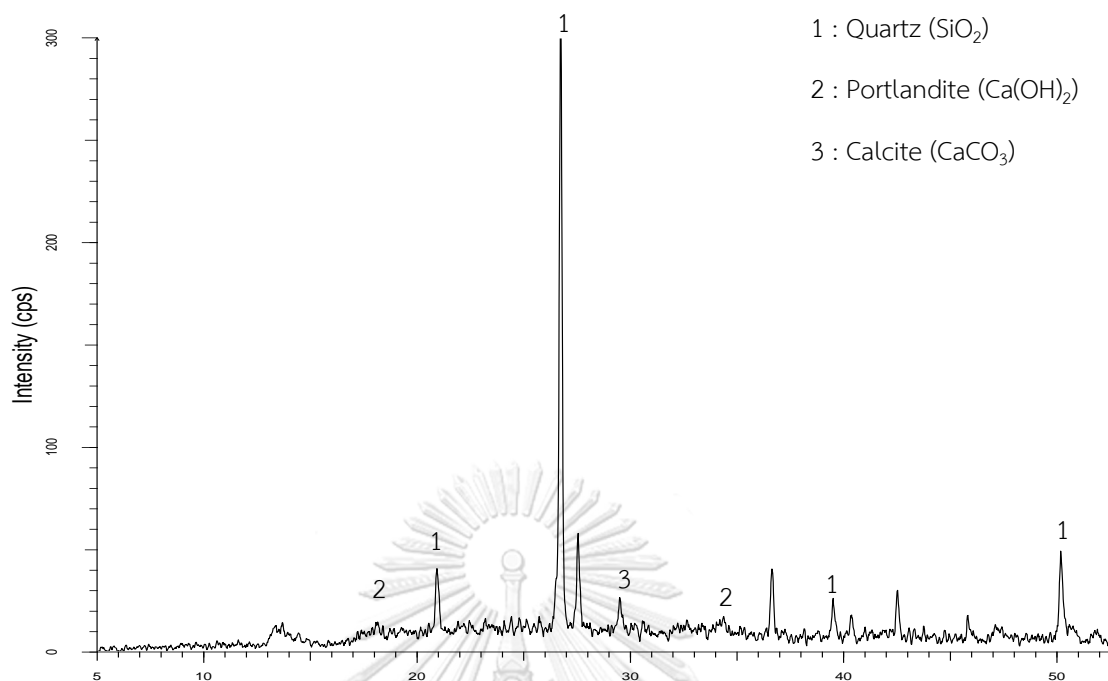


ก) มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ยว

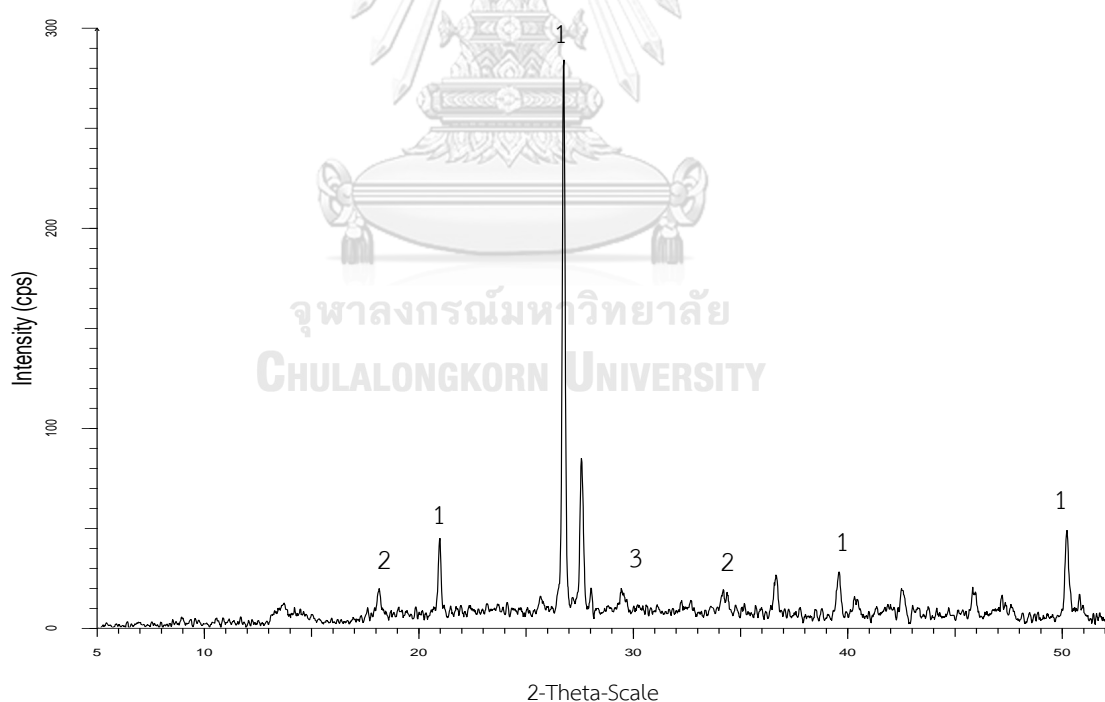


ข) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล

ภาพที่ 4- 15 โครงร่างผลึกในมอร์ตาร์ ที่บ่ม 28 วัน ด้วยวิธีXRD (ก) มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ยว (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ง) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



ค) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา



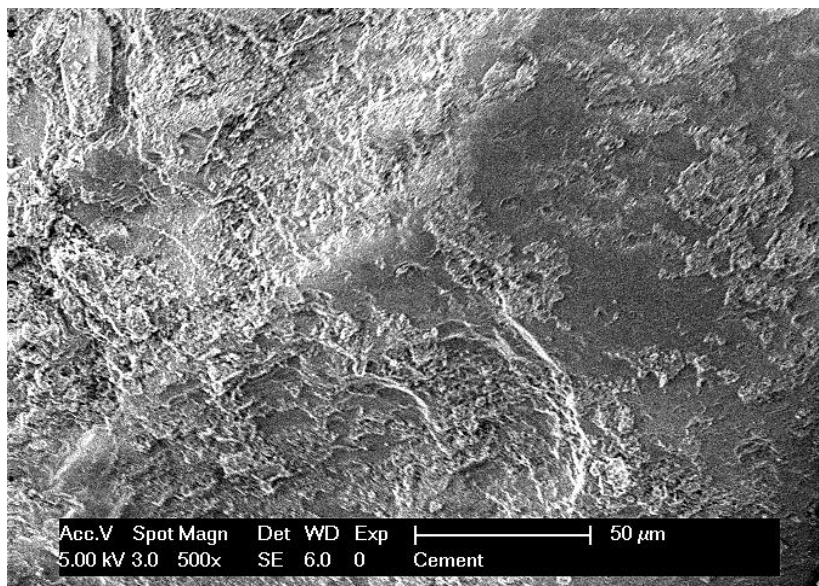
ง) มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ภาพที่4-15 โครงร่างผลึกในมอร์ตาร์ ที่บ่ม 28 วัน ด้วยวิธีXRD (ก) มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ง) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (ต่อ)

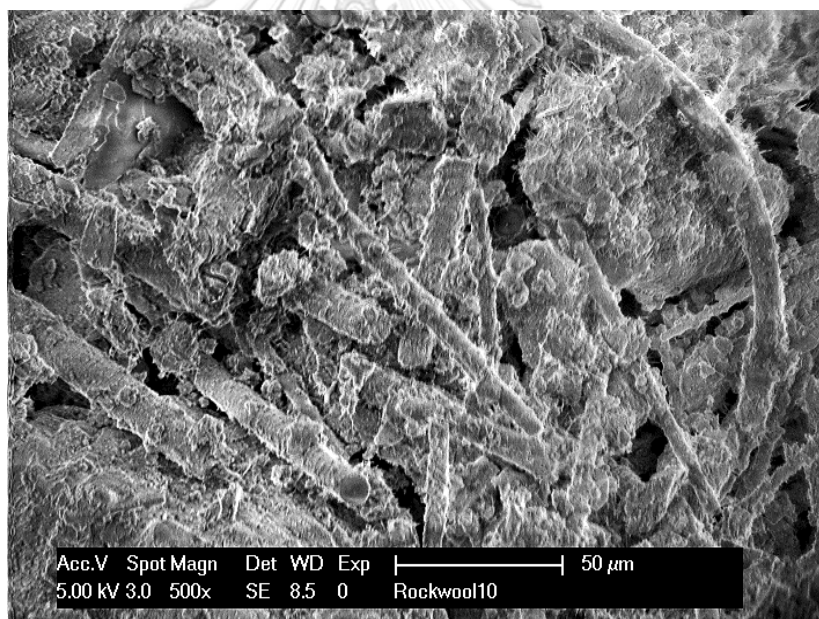
พบว่าที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ต่อก่อนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบผลึกและแร่ ภายในโครงสร้างเพียงเล็กน้อย มีการเกิดผลึกพอร์ตแลนด์ไดต์ และผลึกแคลไซต์ขึ้น ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียจะเห็นว่าผลึกและแร่ เหล่านี้ไม่ได้เพิ่มขึ้นหรือลดลงมากเมื่อมีการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดในมอร์ตาร์ จึงสามารถสรุปได้ว่า แทบจะไม่มีผลิตภัณฑ์ใหม่จากปฏิกิริยาไฮเดรชันหรือปอซโซลานที่เกิดขึ้นจากของเสียทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากสมบัติทางด้านองค์ประกอบทางเคมี และขนาดอนุภาคของของเสียนี้ยังไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตามการนำของเสียมาแทนมวลรวมละเอียดก็ไม่ส่งผลยับยั้งการสร้างผลึก เนื่องจากปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อสร้างผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ไม่ได้ถูกลดปริมาณไป โดยของเสียจะทำหน้าที่เข้าไปเติมเต็มรูพรุนภายในช่องว่างของโครงสร้างมอร์ตาร์ แต่ถ้านำของเสียมาทดแทนมวลรวมละเอียดมากเกินไปก็อาจจะเป็นการลดความแข็งแรง และเพิ่มช่องว่างภายในโครงสร้างแทนได้เช่นกัน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นใยรีโอคิวลที่ผ่านการคัดขนาดที่ตะแกรงเบอร์ 200 (75 ไมโครเมตร) โดยแทนที่เส้นใยรีโอคิวลที่ร้อยละ 10 ถึง 40 เมื่อศึกษาผลของผลึกที่วัดด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) แล้วพบว่าเมื่อแทนที่เส้นใยรีโอคิวลมากขึ้นจะส่งผลทำให้ปริมาณของพอร์ตแลนด์ไดต์ลดลง โดยผู้วิจัยให้เหตุผลว่าพอร์ตแลนด์ไดต์เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นแสดงว่าพอร์ตแลนด์ไดต์ถูกใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโอคิวลมีซิลิกา และอะลูมินาสูง จะเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เพิ่มความแข็งแรงให้กับมอร์ตาร์ ซึ่งมีการสนับสนุนจากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยรีโอคิวล มอร์ตาร์จะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น (Lin และคณะ, 2013)

4.3.8 ลักษณะสัณฐานของมอร์ตาร์ในระดับจุลภาค

การศึกษาลักษณะสัณฐานของโครงสร้างภายในมอร์ตาร์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของมอร์ตาร์ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย กับมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งรูปภาพโครงสร้างภายในของมอร์ตาร์ที่กำลังขยาย 500 เท่า จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะถูกแสดงในภาพที่ 4-16

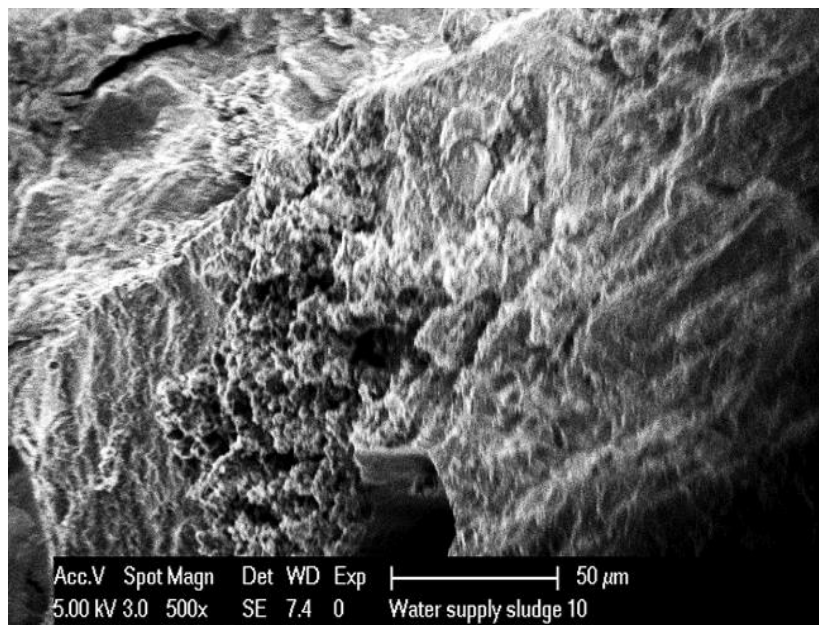


ก) มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ย

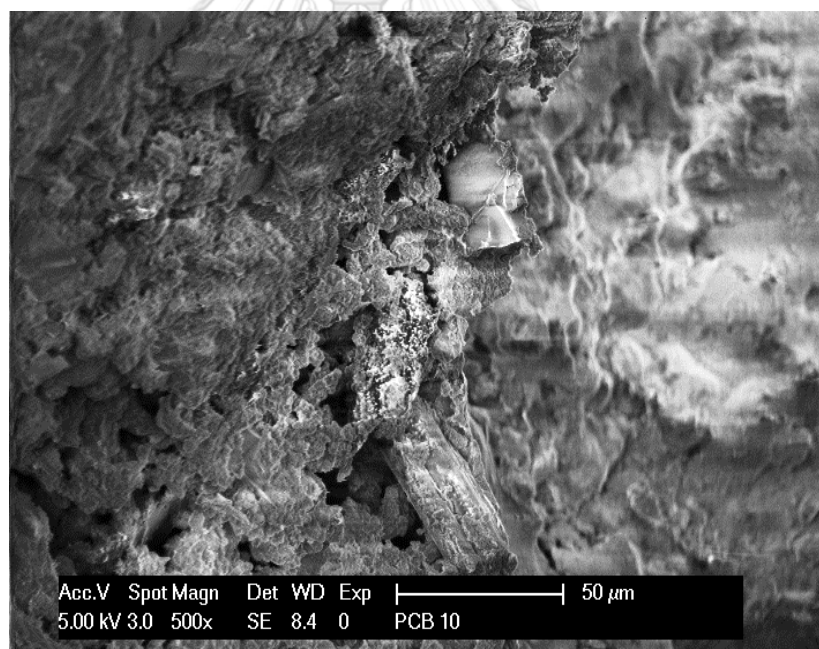


ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยร็อควูล

ภาพที่ 4- 16 ลักษณะสัณฐานของมอร์ตาร์ในระดับจุลภาค ที่ป่ม 28 วัน ด้วยวิธีSEM (ก) มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ย (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยร็อควูล (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ง) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา



ง) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ภาพที่4-16 ลักษณะสีฐานของมอร์ตาร์ในระดับจุลภาค ที่บ่ม 28 วัน ด้วยวิธีSEM (ก) มอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย (ข) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ค) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ง) มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (ต่อ)

ผลจากการศึกษาในภาพที่ 4-16 (ก) พบว่าลักษณะสัญญาณของโครงสร้างภายในมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสียมมีพื้นผิวเรียบ และแทบจะไม่พบรูพรุนหรือช่องว่างภายในโครงสร้าง นอกจากนี้ที่ผิวของมอร์ตาร์ยังพบผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งโครงสร้างผลึกนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่จะเข้าไปทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรง และเชื่อมประสานกันของวัสดุภายในมอร์ตาร์ แต่เมื่อมีการแทนที่ของเสียมแต่ละชนิดผสม ในมอร์ตาร์ ได้แก่ เส้นใยหรือคูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะส่งผลทำให้ลักษณะโครงสร้างภายในมอร์ตาร์เปลี่ยนแปลง โดยภาพโครงสร้างภายในของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือคูลแสดงในภาพที่ 4-16 (ข) เห็นได้ชัดว่ามีปริมาณช่องว่างเกิดขึ้นตรงบริเวณที่มีการแทนที่ของเส้นใยหรือคูล นอกจากนี้พบว่าการเกิดผลึกมาเกาะตรงบริเวณผิวของเส้นใยหรือคูล เนื่องจากองค์ประกอบของเส้นใยหรือคูลมีปริมาณซิลิกา และอะลูมินาสูง จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานผลิตผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ได้ แต่ขนาดของเส้นใยหรือคูลนั้นมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า 75 ไมโครเมตร และมีลักษณะเป็นเส้นใยที่เกาะกันเป็นก้อน ส่งผลให้มีผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เกิดขึ้นบางจุด โดยผลึกนั้นไม่สามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในรูพรุนเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้างได้ ดังนั้นมอร์ตาร์ที่มีปริมาณช่องว่างหรือรูพรุนสูงเป็นสาเหตุทำให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงที่ลดลง และมีค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น

ส่วนภาพที่ 4-16 (ค) แสดงถึงลักษณะสัญญาณของโครงสร้างภายในมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา เนื่องจากลักษณะสัญญาณของโครงสร้างตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปานั้นมีลักษณะคล้ายดิน พื้นผิวมีความขรุขระ และมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่รอบ จากภาพจะเห็นว่าโครงสร้างภายในของมอร์ตาร์มีตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาแทรกตัวอยู่ อย่างไรก็ตามตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีความแข็งแรงน้อยกว่าทราย เมื่อตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาเข้าไปเติมเต็มในช่องว่าง หรือรูพรุนภายในมอร์ตาร์แล้ว จะทำให้ลักษณะพื้นผิวของมอร์ตาร์บริเวณที่มีตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาแทรกอยู่นั้นมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูงมากขึ้น

และผลการศึกษาลักษณะสัญญาณของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 4-16 (ง) จะพบช่องว่างเกิดขึ้นตรงบริเวณที่มีผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะแทรกตัวอยู่ในมอร์ตาร์ เนื่องจาก

ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนั้นจะทำหน้าที่เพียงเข้าไปเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์เท่านั้น แต่จะไม่มีปฏิกิริยาปอซโซลานเพื่อสร้างผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-H-S) เกิดขึ้น ซึ่งจากภาพจะไม่พบผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-H-S) เกาะบริเวณพื้นผิวของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

จากการศึกษาการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) และศึกษาลักษณะสัญญาณของวัสดุในระดับจุลภาค ด้วยวิธี (Scanning electron microscope; SEM) ระหว่างมอร์ตาร์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย กับมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด สามารถสรุปได้ว่าการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยของเสียแต่ละชนิด ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครงสร้างผลึกของแร่ภายในมอร์ตาร์เล็กน้อย และไม่มีเกิดการเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้น เมื่อศึกษาลักษณะสัญญาณของมอร์ตาร์ในระดับจุลภาค พบว่ามอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยรีอควูล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีการเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกาะที่ผิวของของเสียเล็กน้อย เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกา และอะลูมินา แต่อย่างไรก็ตามของเสียที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ยังมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินกว่าที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน เพื่อสร้างผลึกไปเชื่อมประสานปูนซีเมนต์ ช่วยลดช่องว่าง และเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างได้ ยิ่งไปกว่านั้นมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะก็ไม่พบการเกิดผลึกดังกล่าว เพราะผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะนั้นไม่มีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกับวัสดุปอซโซลาน ทั้งนี้ของเสียแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในการศึกษาจึงเหมาะสมที่จะทำหน้าที่ทดแทนมวลรวมละเอียด หรือทรายเพื่อเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างมอร์ตาร์ จากการศึกษาโครงสร้างภายในมอร์ตาร์จึงพบว่า เมื่อแทนที่ของเสียแต่ละชนิดจะส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีปริมาณรูพรุน และช่องว่างภายในโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น เป็นปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้มอร์ตาร์และวัสดุก่อสร้างมีความแข็งแรงที่ลดลง และมีการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่ากำลังรับแรงอัด และค่าแรงกดแตกตามขวางที่ลดลง และค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มการแทนที่ของของเสียแต่ละชนิดในมอร์ตาร์

4.4 ผลการศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการผสมของเสีย

จากการศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่มวลรวมละเอียดหรือทรายด้วยของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วน

ที่ไม่ใช่โลหะ โดยศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ในด้านความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด แรงกดแตกตามขวาง การดูดซึมน้ำ และสมบัติการนำความร้อน นอกจากนี้ยังศึกษาโครงสร้างผลึกขององค์ประกอบและลักษณะสัณฐานภายในของมอร์ตาร์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของของเสียแต่ละชนิดจะส่งผลต่อสมบัติของมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงอัด และค่าแรงกดแตกตามขวางที่ลดลง แต่ขณะที่มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นพบว่ามอร์ตาร์มีประสิทธิภาพในการลดการนำความร้อนที่ดีขึ้น ซึ่งสมบัติของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย นั้น เมื่อนำผลการศึกษามาวิเคราะห์ พบว่าสามารถนำมอร์ตาร์ไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ โดยวัสดุก่อสร้างที่เหมาะสมจะนำมาประยุกต์ใช้จะอยู่ในกลุ่มของวัสดุก่อสร้างที่ไม่รับน้ำหนักหรือไม่รับโครงสร้าง เมื่อศึกษามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ของวัสดุก่อสร้างชนิดไม่รับน้ำหนัก ได้แก่ กระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา (มอก. 535-2556) และ คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533) พบว่ามอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังรับแรงอัด และค่าแรงกดแตกตามขวาง อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่ของเสียแต่ละชนิดที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำเกินมาตรฐานกำหนด ดังนั้นการศึกษาในลำดับต่อไปจึงเลือกใช้สัดส่วนการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดต่อทรายเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในการศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังที่มีการผสมของเสีย

4.4.1 ผลการศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่มีการผสมของเสีย

การศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ โดยการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ไม่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย กับการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่มีการแทนที่ของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีดควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ซึ่งเลือกใช้สัดส่วนการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดต่อมวลรวมละเอียดที่เหมาะสม เท่ากับ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำการหล่อกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ขนาด 33 x 42 เซนติเมตร และบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผลิตได้จะแสดงในภาพที่ 4-17 หลังจากนั้นจึงนำกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ไปทำสอบค่าแรงกดแตกตามขวาง และค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา เลขที่ มอก. 535-2556 กำหนด ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 4-9



ภาพที่ 4- 17 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ (ก) ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล (ข) ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ตารางที่ 4- 9 สมบัติกระเบื้องหลังคาซีเมนต์

สมบัติ	ค่าแรงกดแตกตามขวาง (นิวตันต่อมิลลิเมตร)	ค่าการดูดซึมน้ำ (%)
มาตรฐานกระเบื้องคอนกรีตมุง หลังคา (มอก. 535-2556)	≥ 3.325	≤ 10
กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ + RW 10	5.054	8.49
กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ + WSS 10	4.330	9.28
กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ + PCB 10	6.243	8.74

จากผลการทดสอบสมบัติของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ พบว่ากระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มีค่าแรงกดแตกตามขวางเฉลี่ย เท่ากับ 5.054, 4.330 และ 6.243 นิวตันต่อมิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่แทนที่ของเสียแต่ละชนิดมีค่าแรงกดแตกตามขวางที่ผ่าน

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม นอกจากนี้ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำพบว่ากระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสม เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 8.49, 9.28 และ 8.74 ตามลำดับ โดยค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์แต่ละชนิดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 10

ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำของเสียทั้ง 3 ชนิดมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ เนื่องจากมีสมบัติทางด้านแรงกดแตกตามขวาง และการดูดซึมน้ำที่ผ่านมาตรฐานกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา (มอก. 535-2556) กำหนด เพื่อเป็นการส่งเสริมการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ และเป็นวัสดุทางเลือกหนึ่งที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง นอกจากนี้กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียยังมีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนสูงกว่ากระเบื้องหลังคาซีเมนต์ทั่วไป ซึ่งเป็นการช่วยลดการนำความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร และนำไปสู่การประหยัดการใช้ไฟฟ้าของอาคารต่อไป

4.4.2 ผลการศึกษาการผลิตอิฐบล็อกปูผนังที่มีการผสมของเสีย

ศึกษาการนำของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มาใช้เป็นวัสดุทดแทนทราย ในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก โดยเลือกใช้สัดส่วนการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดต่อทรายที่เหมาะสม คือ เท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก ขนาด 39 x 19 x 7 เซนติเมตร บ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดจะแสดงในภาพที่ 4-18 จากนั้นนำอิฐบล็อกไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และค่าการดูดซึมน้ำ เทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เลขที่ มอก. 58-2533 ซึ่งผลการศึกษาสมบัติของอิฐบล็อกจะแสดงในตารางที่ 4-10

จากผลการศึกษาสมบัติของอิฐบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักพบว่า อิฐบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 2.98, 2.58 และ 2.59 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มอก. 58-2533 ที่กำหนดให้อิฐบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักควรมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยมากกว่า 2.50 เมกะปาสคาล และควรมีค่ากำลังรับแรงอัดแต่ละก้อนมากกว่า 2.00 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ผลการทดสอบค่าการดูด

ซึมน้ำพบว่าอิฐบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมเส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่
 บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 10.01, 11.42
 และ 8.93 ตามลำดับ โดยค่าการดูดซึมน้ำของอิฐบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิดนั้น
 ควรมีค่าไม่เกินร้อยละ 25 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มาตราฐานกำหนด



ภาพที่ 4- 18 อิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก (ก) ที่แทนที่ด้วยเส้นใยรีโอคิวล (ข) ที่แทนที่ด้วย
 ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา (ค) ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ดังนั้นการแทนที่มวลรวมละเอียดหรือทรายด้วยของเสียแต่ละชนิด เพื่อใช้ในการผลิตอิฐ
 บล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักนั้นจะส่งผลทำให้อิฐบล็อกที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดมีค่ากำลังรับ
 แรงอัด และค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในมาตรฐานอิฐบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533) ซึ่งเป็นแนวทาง
 หนึ่งใน การนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ นอกจากนี้อิฐบล็อกที่ผสมของเสียยังมีความสามารถในการ
 ลดการนำความร้อนได้ดีกว่าอิฐบล็อกทั่วไป จึงสามารถช่วยลดความร้อน และประหยัดการใช้
 พลังงานภายในอาคารได้มากขึ้น

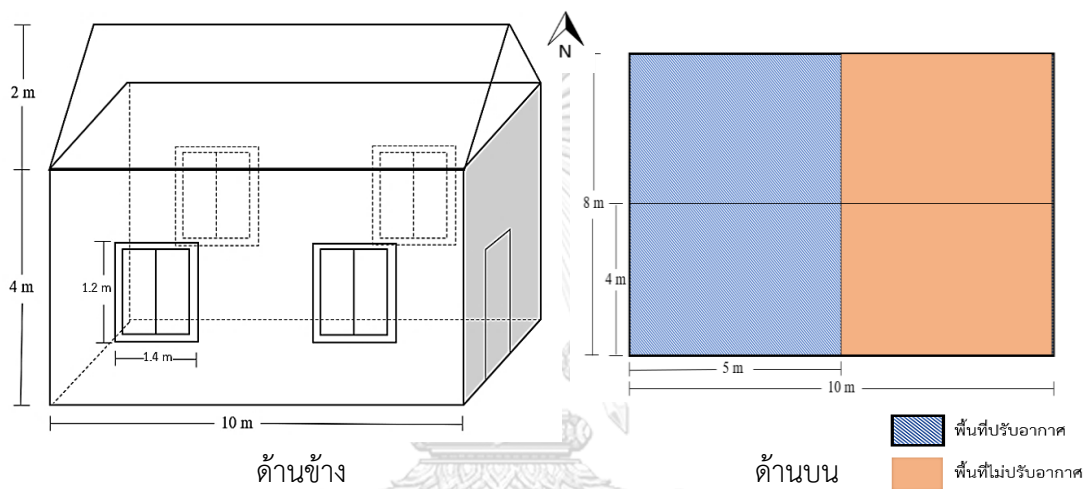
ตารางที่ 4- 10 สมบัติอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก

สมบัติกำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก						
ตัวอย่าง	ค่ากำลังรับแรงอัดแต่ละก้อน (MPa)					ค่าเฉลี่ย (MPa)
	1	2	3	4	5	
อิฐบล็อก	≥ 2.00	≥ 2.00	≥ 2.00	≥ 2.00	≥ 2.00	≥ 2.50
อิฐบล็อก+ RW 10	3.36	2.75	2.81	2.98	3.01	2.98
อิฐบล็อก+WWS 10	2.42	2.59	2.51	2.79	2.58	2.58
อิฐบล็อก+PCB 10	3.39	3.70	3.39	3.55	3.95	3.59
สมบัติการดูดซึมน้ำของอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก						
ตัวอย่าง	การดูดซึมน้ำ (%)					
อิฐบล็อก	≤ 25.00					
อิฐบล็อก+ RW 10	10.01					
อิฐบล็อก+WWS 10	11.42					
อิฐบล็อก+PCB 10	8.93					

4.5 ผลการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร และ ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้าน

การศึกษา และเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และการใช้พลังงานไฟฟ้า ระหว่างอาคารหรือบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างทั่วไป กับ อาคารหรือบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้าง ได้แก่ อิฐบล็อกปูผนัง และ กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ที่ผสมของเสียแต่ละชนิดของงานวิจัยนี้ ด้วยโปรแกรม Building Energy Code (BEC) ของกระทรวงพลังงาน สำหรับอาคารที่มีขนาดพื้นที่รวมกันทุกชั้นตั้งแต่ 2,000 ตารางเมตรขึ้นไป ต้องมีการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงานตามกฎหมายกระทรวงพลังงานกำหนด ในศึกษานี้ นำโปรแกรมมาใช้เพื่อศึกษาการปรับปรุงค่าการถ่ายเทความร้อน และการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของบ้านขนาดเล็ก และข้อมูลที่น่าเสนอจะเป็นเพียงค่าประมาณการเท่านั้น โดยรูปแบบบ้านที่นำมาใช้ในการศึกษา แสดงดังภาพที่ 4-19 มีลักษณะเป็นบ้านเดี่ยว 1 ชั้น พื้นที่ภายในบ้านเท่ากับ 80 ตารางเมตร ภายในบ้านจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ปรับอากาศ 40 ตารางเมตร และพื้นที่ไม่ปรับอากาศ 40 ตารางเมตร โดยบ้านจะหันหน้าไปทางทิศตะวันออก และเลือกพื้นที่ที่ทำให้ระบบปรับอากาศ หรือเครื่องทำความเย็นใช้พลังงานมากที่สุด คือทิศตะวันตกเฉียงใต้ เนื่องจากทิศ

ตะวันตกเป็นผลมาจากการที่โลกหมุนรอบตัวเองในแต่ละวัน ทิศนี้จะได้รับแดดช่วงบ่าย ความร้อนจากแดดในช่วงบ่ายจะสะสม ยิ่งไปกว่านั้นประเทศไทยตั้งอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร จึงได้รับแสงแดดที่ส่องมาทางทิศใต้มากกว่าทิศเหนือ เป็นผลมาจากการที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ใน แต่ละปี ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร และการใช้พลังงานไฟฟ้า จะใช้ข้อมูลค่าการนำความร้อนของวัสดุ ก่อสร้างที่แตกต่างกัน ระหว่างวัสดุก่อสร้างทั่วไปกับวัสดุก่อสร้างที่ผสมของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยหรือควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่อัตราส่วนการแทนที่ทรายเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4-11



ภาพที่ 4- 19 บ้านตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาโปรแกรม BEC

ตารางที่ 4- 11 ค่าการนำความร้อนของกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง

ชนิดของวัสดุ	ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) (W/m-K)
กระเบื้องหลังคาซีเมนต์	0.993
กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ผสม RW	0.584
กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ผสม WSS	0.641
กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ผสม PCB	0.601
อิฐบล็อกปูผนัง	0.546
อิฐบล็อกปูผนัง ผสม RW	0.321
อิฐบล็อกปูผนัง ผสม WSS	0.352
อิฐบล็อกปูผนัง ผสม PCB	0.330

นำข้อมูลโครงสร้าง และรายละเอียดภายในบ้านมาประมวลผล ด้วยโปรแกรม Building Energy Code (BEC) โดยเลือกลักษณะโครงสร้างของบ้านในหมวดของ Component of section, Section of wall และ Wall ใส่ข้อมูลชนิดของหลอดไฟในหมวดของ Lighting system ใส่ข้อมูลระบบทำความเย็นในหมวดของ A/C system และข้อมูลเพิ่มเติมในหมวดของ PV system, Hot water system และ อื่นๆ ทำการนำข้อมูลส่วนต่างๆของอาคาร หรือ บ้าน มารวมกันใน Building model หลังจากนั้นให้โปรแกรมคำนวณผล ซึ่งจะรายงานผลค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (RTTV) ตามตารางที่ 4-12 ในการศึกษาจะมีบ้านทั้งหมด 4 หลัง บ้านทุกหลังจะมีลักษณะ และขนาดที่เหมือนกัน แต่จะใช้วัสดุก่อสร้างในส่วนของผนัง และหลังคาที่แตกต่างกัน ดังนี้

- บ้านหลังที่ 1 ใช้กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังทั่วไป
- บ้านหลังที่ 2 ใช้กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล
- บ้านหลังที่ 3 ใช้กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา
- บ้านหลังที่ 4 ใช้กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังที่แทนที่ด้วยผนังที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช้โลหะ

ตารางที่ 4- 12 ค่าการถ่ายเทความร้อนของกรอบอาคาร

ชนิดบ้าน	OTTV (W/m ²)	OTTV ที่ลดลง* (ร้อยละ)	RTTV (W/m ²)	RTTV ที่ลดลง* (ร้อยละ)
บ้านหลังที่ 1	25.243	0.00	3.578	0.00
บ้านหลังที่ 2	20.480	18.87	3.563	0.42
บ้านหลังที่ 3	21.301	15.62	3.563	0.42
บ้านหลังที่ 4	20.733	17.87	3.563	0.42

หมายเหตุ: * ค่า OTTV หรือ RTTV ที่ลดลงเมื่อเทียบกับบ้านหลังที่ 1

จากผลการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนของกรอบอาคารหรือบ้าน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ พบว่าบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด มีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาที่น้อยกว่าบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างทั่วไป โดย

บ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่ผสมของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ จะมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง ด้านนอกอาคาร (OTTV) ต่ำกว่าบ้านทั่วไปร้อยละ 18.87, 15.62 และ 17.87 ตามลำดับ และมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (RTTV) ต่ำกว่าบ้านทั่วไปเท่ากันที่ร้อยละ 0.42 เนื่องจากปัจจัยหลักของการลดค่าการถ่ายเทความร้อนของหลังคาจะมาจากฉนวนกันความร้อน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ของเสียแต่ละชนิดเป็นวัสดุทดแทนในการผลิตวัสดุก่อสร้างเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน ส่งผลให้ลดการใช้ไฟฟ้าภายในอาคาร จึงนำไปสู่การประหยัดพลังงานภายในประเทศได้ ในการศึกษาต่อมาจึงเป็นการประเมินการใช้พลังงานในบ้านแต่ละแบบ ภายในระยะเวลา 1 ปี ผลจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Building Energy Code (BEC) จะแสดงปริมาณการใช้พลังงาน (Net energy consumption) ของบ้าน และเปรียบเทียบการลดการใช้พลังงานระหว่างบ้านทั่วไป กับบ้านที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ดังตารางที่ 4-13

ตารางที่ 4- 13 ค่าการใช้พลังงานของอาคาร

ชนิดบ้าน	Energy consumption (KWh/Year)	การลดการใช้พลังงานใน 1 ปี (ร้อยละ)
บ้านหลังที่ 1	5,409.69	0.00
บ้านหลังที่ 2	4,793.55	11.39
บ้านหลังที่ 3	4,899.66	9.43
บ้านหลังที่ 4	4,826.25	10.79

ผลการศึกษาค่าการใช้พลังงานของบ้านแต่ละแบบ พบว่าบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างทั่วไปจะมีปริมาณการใช้พลังงานเท่ากับ 5,409.69 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี ส่วนบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่ถูกแทนที่ทรายด้วยของเสียแต่ละชนิดจะมีปริมาณการใช้พลังงานที่ลดลง โดยบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่ผสมของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอควูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ จะมีค่าการใช้พลังงานต่ำกว่าบ้านทั่วไป เท่ากับร้อยละ 11.39, 9.43 และ 10.79 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณเป็นค่าไฟฟ้า (ประมาณราคาค่าไฟหน่วยละ 4 บาท) โดยคิดค่าไฟฟ้าของบ้านทั้ง 4 แบบ จะพบว่าบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดจะมีค่าไฟต่ำกว่าบ้านปกติอยู่ประมาณ 2,464.56 บาทต่อปี สำหรับบ้านที่ใช้วัสดุแทนที่ด้วยเส้นใยรีโอควูล

2,040.12 บาทต่อปี สำหรับบ้านที่ใช้วัสดุแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และ 2,333.76 บาทต่อปี สำหรับบ้านที่ใช้วัสดุแทนที่ด้วยผนังที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ

ดังนั้นการนำของเสียแต่ละชนิดมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง เพื่อนำไปใช้ในการสร้างอาคารหรือบ้านเรือน จึงเป็นวัสดุทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะของเสียเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการช่วยปรับปรุงการนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างได้ โดยในปัจจุบันการเพิ่มจำนวนของประชากร และการเติบโตทางเศรษฐกิจส่งผลต่อการใช้พลังงานในส่วนของอาคารที่มากขึ้น และเนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิอากาศร้อน ดังนั้นกรอบอาคารจึงเป็นสิ่งสำคัญ การผลิตวัสดุก่อสร้างที่สามารถต้านทานความร้อนได้ดีนั้น จะสามารถป้องกันความร้อนไม่ให้เข้ามาภายในอาคารหรือบ้านเรือนได้ เพื่อควบคุมอุณหภูมิ และลดภาระการทำงานของระบบทำความเย็นหรือเครื่องปรับอากาศ นำไปสู่การลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ซึ่งเป็นไปตามนโยบายยุทธศาสตร์พลังงาน 4.0 ของประเทศ ที่ตั้งเป้าจะลดการใช้พลังงานเพื่อประหยัดทรัพยากรในประเทศ โดยหันมาใช้เทคโนโลยีนวัตกรรมรูปแบบใหม่ที่จะทำให้ใช้ไฟฟ้าน้อยลง

4.6 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียแต่ละชนิดเพื่อนำมาผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนัง

จากการศึกษาเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผนังที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง ซึ่งของเสียเหล่านี้ถือเป็นวัสดุทางเลือกในการนำไปทดแทนมวลรวมละเอียดหรือทรายในการผลิตวัสดุก่อสร้างในอนาคต นอกจากนี้การนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จะช่วยลดปริมาณของเสียที่ต้องกำจัดสู่หลุมฝังกลบ ส่งผลทำให้ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในส่วนของการศึกษาทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความคุ้มค่าในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังที่ผสมของเสียแต่ละชนิด ที่มีสมบัติความแข็งแรงผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา (มอก. 535-2556) และ คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533) กำหนด ยิ่งไปกว่านั้นวัสดุก่อสร้างที่ผสมของเสียยังมีความสามารถในการป้องกันความร้อน และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียที่เป็นต้นทุนการจัดการของผู้ประกอบการ สำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จะศึกษาผลิตภัณฑ์ทางเลือก 2 ชนิด ได้แก่

- 1) กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด
- 2) อิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการลงทุนนำของเสียไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือก โดยจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำของเสียไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย อีกทั้งบริษัทสามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ผสมของเสียนี้ไปใช้หรือขายได้ในเชิงพาณิชย์ โดยข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น มีรายละเอียดดังนี้

1. กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด

1. ด้านต้นทุน (Cost) ในการลงทุนเทคโนโลยีฯ

ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการลงทุนเทคโนโลยีฯ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

- 1) ต้นทุนคงที่ (Fix cost) เป็นต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการลงทุนในปีแรก ได้แก่ ค่าพื้นที่สำหรับโรงงานหรือกิจกรรม เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ติดตั้งระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ระบบและอุปกรณ์ป้องกันผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยมีรายละเอียดดังในตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4- 14 ตารางสรุปต้นทุนคงที่ในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิด

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด	บาท
1	ค่าปรับพื้นที่	พื้นที่ 300 ตร.ม. สถานที่ผลิต ระบบสาธารณูปโภค อาคารเก็บวัตถุดิบ เก็บผลิตภัณฑ์ ฯลฯ	300,000
2	ค่าเครื่องจักรอุปกรณ์	- เครื่องกวนผสมวัตถุดิบ - เครื่องกดกระเบื้องจากแป้นพิมพ์	350,000
3	ค่าชุดอุปกรณ์และการติดตั้งระบบรักษาความปลอดภัย	อุปกรณ์ป้องกันอัคคีภัย	65,000
	รวม		715,000

หมายเหตุ ราคาประมาณการ

1.1 ค่าปรับพื้นที่ ค่าระบบสาธารณูปโภคในโรงงาน โดยกำหนดพื้นที่ภายในโรงงาน สำหรับการติดตั้งเครื่องจักร โกดังจัดเก็บวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีพื้นที่เท่ากับ 300 ตารางเมตร คิดเป็นเงินประมาณ 300,000 บาท (ประมาณการราคาของพื้นที่เท่ากับตารางเมตรละ 1,000 บาท)

1.2 ค่าเครื่องจักรและอุปกรณ์ ซึ่งใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ เช่น เครื่องผสมกวนผสม วัตถุดิบ เครื่องอัดไฮดรอลิคกระเบื้องหลังคาซีเมนต์จากแป้นพิมพ์ เป็นต้น เท่ากับ 350,000 บาท (ราคาประมาณการ)

1.3 ค่าระบบรักษาความปลอดภัย สำหรับกระบวนการผลิต เท่ากับ 65,000 บาท (คิดที่ร้อยละ 10 ของต้นทุนคงที่)

2) ต้นทุนดำเนินการ (Operating cost) เป็นต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการดำเนินการตลอดอายุโครงการ ได้แก่ ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า ค่าแรงงาน ค่าอุปกรณ์ ค่าบำรุงรักษาต่าง ๆ เป็นต้น โดยมีรายละเอียดดังในตารางที่ 4-15

2.1 ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากร ใช้พนักงาน 4 คน ในการดำเนินการงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน (อัตราจ้าง 9,000 บาทต่อเดือน) รวม 36,000 บาท

2.2 ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบ ได้แก่

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ราคา 2.320 บาทต่อกิโลกรัม
- 2) ทรายละเอียด 1.72 บาทต่อกิโลกรัม
- 3) น้ำ ราคา 0.01 บาทต่อกิโลกรัม
- 4) ของเสี่ย ต้นทุน - บาท (ไม่เสียค่าการจัดการของเสี่ย)
- 5) สี และสารเคมีเคลือบ 4 บาทต่อแผ่น

2.3 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน จากการประเมินกำลังไฟฟ้าของเครื่องกวนผสมและเครื่องอัดไฮดรอลิคจากแป้นพิมพ์ประมาณ 500 บาทต่อวัน (คิดค่าไฟที่ 3 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า)

2.4 ค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์อื่น เช่น แบบหล่อโลหะขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ราคา 2,000 บาทต่อพิมพ์ (2 ชิ้นต่อเดือน)

2.5 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเครื่องจักรอุปกรณ์ และอุปกรณ์ป้องกันของพนักงาน เฉลี่ยปีละ 2 ครั้ง ครั้งละ 5,000 บาท เท่ากับ 10,000 บาทต่อปี

ตารางที่ 4- 15 สรุปต้นทุนดำเนินการในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิด

ลำดับ	ต้นทุนดำเนินการ	รายละเอียด	ค่าใช้จ่าย	หน่วย
1	ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากร	4 คน (8 ชั่วโมงต่อวัน)	36,000	บาทต่อเดือน
2	ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.320	บาทต่อกก.
		ทรายละเอียด	1.72	บาทต่อกก.
		น้ำ	0.01	บาทต่อกก.
		ของเสีย	-	บาทต่อตัน
		สี และสารเคมี	4	บาทต่อแผ่น
3	ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	ค่าไฟฟ้า (หน่วยละ 3 บาท) - เครื่องกวนผสมวัตถุดิบ - เครื่องอัดไฮดรอลิก	500	บาทต่อวัน
4	ค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์ อื่นๆ	- แบบหล่อขึ้นรูป 2 ชั้น (2,000 บาทต่อชั้น)	4,000	บาทต่อเดือน
5	ค่าใช้จ่ายในการซ่อม บำรุงเครื่องจักร อุปกรณ์ และอุปกรณ์ ป้องกันของพนักงาน	5,000 บาทต่อรอบ ปีละ 2 ครั้ง	10,000	บาทต่อปี

หมายเหตุ ราคาประมาณการ

2.ด้านประโยชน์ (Benefit)

เป็นผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิด มีรายละเอียดดังในตารางที่ 4-16

1) ด้านผลประโยชน์ที่เกิดจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิดที่ผลิตได้ มีราคาเทียบเท่ากระเบื้องหลังคาซีเมนต์ชนิดทั่วไปที่มีขายอยู่ในท้องตลาดที่ขนาดและประเภทเดียวกัน เท่ากับ 12.00 บาทต่อแผ่น (ราคาวัสดุก่อสร้างกลาง เดือนมกราคม พ.ศ. 2561)

2) ด้านผลประโยชน์ที่เกิดจากการประหยัดค่าการนำของเสียแต่ละชนิด ไปส่งให้ผู้รับกำจัดของเสีย ทั้งค่าการจัดการและค่าขนส่งของเสีย คิดตามสัดส่วนที่นำไปใช้ในการผลิตแทนมวลรวมละเอียด หรือ ทราาย 8,000 บาทต่อตัน ใน 1 เดือนจะใช้ของเสียประมาณ 4 ตัน ในการผลิตวัสดุ ดังนั้นสามารถลดค่ากำจัดได้ 32,000 บาทต่อเดือน (กำหนดให้ค่าใช้จ่ายการจัดการของเสียแต่ละชนิดมีราคาเท่ากัน)

ตารางที่ 4- 16 สรุปด้านประโยชน์ที่เกิดจากผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิด

	ด้านผลประโยชน์	รายละเอียด	ราคา
1	ขายแผ่นกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสีย	แผ่นกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ขนาด 33 x 42 x 2.5 ซม. สีมาตรฐาน	12 บาทต่อแผ่น
2	การประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย	ค่าบริหารจัดการของเสียเฉลี่ย 3,000 บาทต่อตัน ค่าขนส่งไปสถานที่กำจัดเฉลี่ย 5,000 บาทต่อตัน	8,000 บาทต่อตัน

สรุปการเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์มาตรฐานกับกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสีย

เนื่องจากการผลิตแผ่นกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิดนั้น เครื่องจักรและอุปกรณ์ในการผสมและหล่อแบบขึ้นรูป ใช้แบบเดียวกันกับงานผลิตแผ่นกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ทั่วไป เพียงแต่มีการใช้ของเสียทั้ง 3 ชนิด เป็นส่วนผสมในการแทนที่การใช้มวลรวมละเอียดหรือทรายในการผลิต ดังนั้นในการเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์จะใช้ต้นทุนที่เกิดจากการดำเนินงานด้านวัตถุดิบและองค์ประกอบในการผลิตที่ขนาดเท่ากัน โดยตารางเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4-17 ดังนี้

ตารางที่ 4- 17 เปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์มาตรฐานกับกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียว

ชนิดกระเบื้อง หลังคาซีเมนต์	ปูนซีเมนต์ (กก.)	น้ำ (กก.)	ทราย (กก.)	ของเสียว (กก.)	ราคาวัตถุดิบ (บาท/แผ่น)	ราคาตาม กำลังผลิต 20,000 แผ่นต่อ เดือน (บาท)
ราคาวัตถุดิบ (บาท)	2.320	0.01	1.72	0		
กระเบื้องหลังคา ซีเมนต์ทั่วไป	1	0.45	2	0	5.76	115,290
กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ ที่ผสมของเสียว	1	0.45	1.8	0.2	5.42	108,410

หมายเหตุ ราคาต้นทุนจากการประมาณการ

จากตารางข้างต้น พบว่า ราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัตถุดิบระหว่างการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์มาตรฐานกับกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่แทนที่ทรายด้วยของเสียวแต่ละชนิดที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ราคาต้นทุนวัตถุดิบผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ทั่วไปอยู่ที่แผ่นละ 5.76 บาท ส่วนกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียวแต่ละชนิด มีต้นทุนที่คิดเฉพาะค่าวัตถุดิบอยู่ที่ 5.42 บาท ถ้ามีการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ 20,000 แผ่นต่อเดือน จะได้ว่า ราคาต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ทั่วไปอยู่ที่เดือนละ 115,290 บาท ส่วนกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียว มีต้นทุนวัตถุดิบอยู่ที่ 108,410 บาท ตามลำดับ และมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมสำหรับค่าสี และสารเคมีใช้เคลือบแผ่นกระเบื้องหลังคาประมาณ 4 บาทต่อแผ่น แม้กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียวจะมีราคาต้นทุนต่ำกว่าไม่มาก แต่มีความสามารถในการเป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่ากระเบื้องหลังคาซีเมนต์ทั่วไป นอกจากนี้ยังสามารถลดรายจ่ายการกำจัดของเสียวได้ 8,000 บาทต่อตัน ซึ่งถ้ามีการเพิ่มปริมาณในการผลิตจะทำให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนเทคโนโลยี ด้วยเครื่องมือการตัดสินใจทางเศรษฐศาสตร์

จากการศึกษาความเหมาะสมของร้อยละสัดส่วนการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์กระเบื้องหลังคาซีเมนต์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนดอยู่ที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนัก โดยจะประมาณการผลิตที่เดือนละ 20,000 แผ่น ตามกำลังการผลิตของเครื่องจักรที่ได้กำหนดไว้ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือการตัดสินใจทางเศรษฐศาสตร์ ตลอดระยะเวลาโครงการ 21 ปี ได้แก่ 1) ค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 2) ค่าผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C) 3) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และ 4) ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back) มีผลการศึกษาดังตารางที่ 4-18

ตารางที่ 4- 18 สรุปผลประโยชน์ต้นทุนด้วยเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์

เครื่องมือวิเคราะห์การตัดสินใจ	รวม
ผลตอบแทนสุทธิ (PVB)	35,704,879.57
ต้นทุนสุทธิ (PVC)	32,486,204.94
ค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	3,218,674.63
ค่าผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C)	1.10
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	44%
ระยะการคืนทุน (Pay Back)	3 ปี 1 เดือน

หมายเหตุ รายละเอียดการคำนวณตามภาคผนวก ฉ

เงื่อนไขการคำนวณวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์

- อายุของโครงการฯ คิดที่ 21 ปี เริ่มนับตั้งแต่การเริ่มก่อสร้างและตลอดการดำเนินการ โดยปีที่ 0-1 คือ ปีก่อสร้าง และเริ่มดำเนินการตั้งแต่ปีที่ 1 – ปีที่ 20

- อัตราคิดลด (Discount Rate) คิดที่อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของธนาคารพาณิชย์ MLR เท่ากับ ร้อยละ 6.5 รวมกับอัตราเงินเฟ้อมาตรา ร้อยละ 1.5 เท่ากับ ร้อยละ 8 (ข้อมูลธนาคารแห่งประเทศไทย BOT 13/2/61)

- วันทำงาน 1 เดือนทำงาน 20 วัน เวลาการทำงาน 8.00 น. - 16.00 น.

ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

- ค่าผลตอบแทนรวมปัจจุบัน (Present benefit Value ;PBV) เท่ากับ 35,704,879.57 บาท
- ค่าใช้จ่ายรวมปัจจุบัน (Present Cost Value ;PCV) เท่ากับ 32,486,204.94 บาท
 - ค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value ;NPV) เท่ากับ 3,218,674.63 บาท โดยเงื่อนไขความเป็นไปได้ในการลงทุน คือ ค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่ามากกว่าศูนย์
 - อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit : Cost ratio ;B/C) เท่ากับ 1.10 โดยเงื่อนไขความเป็นไปได้ในการลงทุน คือ ค่าอัตราส่วนผลตอบแทนต่อทุน มีค่ามากกว่าศูนย์
 - อัตราผลตอบแทนของโครงการ (Internal Rate of Return ;IRR) เท่ากับร้อยละ 44 โดยเงื่อนไข ความเป็นไปได้ในการลงทุน คือ อัตราผลตอบแทนของโครงการ มีค่ามากกว่ากับศูนย์
 - ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Return) ระยะเวลาคืนทุนภายใน 3 ปี 1 เดือน เงื่อนไข คือ ระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่าอายุโครงการ 20 ปี

2. อธิบายลักษณะชนิดไม่รับน้ำหนักที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด

1. ด้านต้นทุน (Cost) ในการลงทุนเทคโนโลยีฯ

ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายในการลงทุนเทคโนโลยีฯ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

1) ต้นทุนคงที่ (Fix cost) เป็นต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการลงทุนในปีแรก ได้แก่ ที่ดิน สิ่งปลูกสร้าง เครื่องจักร การติดตั้งระบบต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังในตารางที่ 4-19

1.1 ที่ดิน สิ่งปลูกสร้าง ระบบสาธารณูปโภคในโรงงาน โดยกำหนดพื้นที่สำหรับสิ่งปลูกสร้างหรือโรงงานสำหรับการผลิตอิฐบล็อกเท่ากับ 300 ตารางเมตร ที่ดินพร้อมสิ่งปลูกสร้างเป็นเงินประมาณ 300,000 บาท (ประมาณการราคาของพื้นที่เท่ากับตารางเมตรละ 1,000 บาท)

1.2 ค่าเครื่องจักรและการติดตั้งระบบ เช่น เครื่องอัดอิฐบล็อก เครื่องกวนผสม เป็นต้น เท่ากับ 320,000 บาท (ราคาประมาณการ)

ตารางที่ 4- 19 ตารางสรุปต้นทุนคงที่ในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่
ละชนิด

ลำดับ	รายการ	รายละเอียด	บาท
1	ที่ดิน สิ่งปลูกสร้าง	ที่ดินพื้นที่ 300 ตร.ม. โรงเรือนผลิตอิฐบล็อกซีเมนต์ โรงเรือนเก็บ วัตถุดิบ โรงเรือนเก็บผลิตภัณฑ์ ฯลฯ	300,000
2	ค่าเครื่องจักรและการ ติดตั้งระบบเครื่องจักร	- ชุดเครื่องอัดอิฐบล็อก เครื่องกวนผสม กำลัง ผลิตวันละ 1,000 ก้อน ราคาประมาณการ - เครื่องอัดอิฐบล็อก 250,000 บาท - เครื่องกวนผสมวัตถุดิบ 70,000 บาท	320,000
	รวม		620,000

หมายเหตุ ราคาประมาณการ

2) ต้นทุนดำเนินการ (Operating cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการดำเนินการตลอด
อายุโครงการ ได้แก่ ค่าวัตถุดิบ ค่าไฟฟ้า ค่าแรงงาน ค่าอุปกรณ์ ค่าบำรุงรักษาต่าง ๆ เป็นต้น มี
รายละเอียดดังในตารางที่ 4-20

2.1 ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบในการผลิต ได้แก่

- 1) ของเสีย (ไม่มีค่าใช้จ่าย)
- 2) น้ำ ราคา 0.01 บาทต่อกิโลกรัม
- 3) ปูนซีเมนต์ 2.320 บาทต่อกิโลกรัม
- 4) ทราย 1.72 บาทต่อกิโลกรัม
- 5) หินฝุ่น 0.07 บาทต่อกิโลกรัม

2.2 ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากร ใช้พนักงาน 2 คน ในการดำเนินการงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน
(อัตราจ้าง 9,000 บาทต่อเดือน) รวม 18,000 บาท

2.3 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน จากการประเมินกำลังไฟฟ้าของเครื่องกวนผสมและเครื่อง
อัดไฮดรอลิคจากแบบพิมพ์ประมาณ 500 บาทต่อวัน (คิดค่าไฟที่ 3 บาทต่อหน่วยไฟฟ้า)

2.4 ค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์เครื่องมือ ได้แก่ อุปกรณ์อื่นๆเช่น เกรียง พลั่ว รถเข็น ถังเหล็ก ถังมือ อื่นๆ 4,000 บาทต่อเดือน

2.5 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเครื่องจักร และอุปกรณ์เครื่องป้องกันของพนักงาน เฉลี่ย ปีละ 2 ครั้ง ครั้งละ 5,000 บาท เท่ากับ 10,000 บาทต่อปี

ตารางที่ 4- 20 สรุปต้นทุนดำเนินการในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด

ลำดับ	ต้นทุนดำเนินการ	รายละเอียด	ค่าใช้จ่าย	หน่วย
1	ค่าใช้จ่ายด้านบุคลากร	2 คน (8 ชั่วโมงต่อวัน)	18,000	บาทต่อเดือน
2	ค่าใช้จ่ายด้านวัตถุดิบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.320	บาทต่อกก.
		ทรายละเอียด	1.72	บาทต่อกก.
		น้ำ	0.01	บาทต่อกก.
		หินฝุ่น	0.07	บาทต่อกก.
		ของเสีย	-	บาทต่อตัน
3	ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	ค่าไฟฟ้า (หน่วยละ 3 บาท)	500	บาทต่อวัน
4	ค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์อื่นๆ	- อุปกรณ์อื่นๆ	4,000	บาทต่อเดือน
5	ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเครื่องจักรอุปกรณ์ และอุปกรณ์ป้องกันของพนักงาน	5,000 บาทต่อรอบ ปีละ 2 ครั้ง	10,000	บาทต่อปี

หมายเหตุ ราคาประมาณการ

2. ด้านประโยชน์ (Benefit)

เป็นผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด มีรายละเอียดดังในตารางที่ 4-21

3) ด้านผลประโยชน์ที่เกิดจากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ โดยอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิดที่ผลิตได้ มีราคาเทียบเท่าอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักชนิดทั่วไปที่มีขายอยู่ในท้องตลาดที่ขนาดและประเภทเดียวกัน เท่ากับประมาณ 7.0 บาทต่อก้อน)

4) ด้านผลประโยชน์ที่เกิดจากการประหยัดค่าการนำของเสียแต่ละชนิด ไปส่งให้ผู้รับกำจัดของเสีย ทั้งค่าการจัดการและค่าขนส่งของเสีย คิดตามสัดส่วนที่นำไปใช้ในการผลิตแทนมวลรวมละเอียด หรือ ทราย 8,000 บาทต่อตัน ใน 1 เดือนจะใช้ของเสียประมาณ 4 ตัน ในการผลิตวัสดุสามารถลดค่ากำจัดได้ 32,000 บาทต่อเดือน (กำหนดให้ค่าใช้จ่ายการจัดการของเสียแต่ละชนิดมีราคาเท่ากัน)

ตารางที่ 4- 21 สรุปด้านประโยชน์ที่เกิดจากการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด

	ด้านผลประโยชน์	รายละเอียด	ราคา
1	ขายก้อนอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสีย	อิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักขนาด 39 x 19 x 7 ซม.	7.0 บาทต่อก้อน
2	การประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย	ค่ารับจัดการของเสียเฉลี่ย 3,000 บาทต่อตัน ค่าขนส่งไปสถานที่กำจัดเฉลี่ย 5,000 บาทต่อตัน	8,000 บาทต่อตัน

สรุปการเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก
มาตรฐานกับอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสีย

เนื่องจากการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิดนั้น เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการผสมและหล่อแบบขึ้นรูป ใช้แบบเดียวกันกับงานผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักทั่วไป เพียงแต่มีการใช้ของเสียทั้ง 3 ชนิด เป็นส่วนผสมในการแทนที่การใช้มวลรวมละเอียด หรือ ทรายในการผลิต ดังนั้นในการเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักจะใช้ต้นทุนที่เกิดจากการดำเนินงานด้านวัตถุดิบและองค์ประกอบในการผลิตที่ขนาดเท่ากัน โดยตารางเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4-22 ดังนี้

ตารางที่ 4- 22 เปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก
มาตรฐานกับอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสีย

ชนิดอิฐบล็อก ปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนัก	ปูนซีเมนต์ (กก.)	น้ำ (กก.)	หินฝุ่น (กก.)	ทราย (กก.)	ของเสีย (กก.)	ราคา วัตถุดิบ (บาท/ ก้อน)	ราคาตาม กำลังผลิต 20,000 ก้อนต่อ เดือน (บาท)
ราคาวัตถุดิบ (บาท)	2.320	0.01	0.07	1.72	0		
อิฐบล็อกปูผนังทั่วไป	1	0.45	4	2	0	6.04	120,890
อิฐบล็อกปูผนัง ที่ผสมของเสีย	1	0.45	4	1.8	0.2	5.70	114,010

หมายเหตุ ราคาต้นทุนจากการประมาณการ

จากตารางข้างต้น พบว่า ราคาต้นทุนต่อหน่วยของวัตถุดิบระหว่างการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักทั่วไปกับผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด ซึ่งราคาต้นทุนของวัตถุดิบในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักทั่วไปอยู่ที่ก้อนละ 6.04 บาท ส่วนอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ถูกแทนที่ด้วยของเสีย มีต้นทุนอยู่ที่ก้อนละ 5.70 บาท ถ้ามีการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักทั่วไป 20,000 ก้อนต่อเดือน จะได้ว่า ราคาต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักทั่วไปอยู่ที่เดือนละ 120,890 บาท ส่วนอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับ

น้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด มีต้นทุนวัตถุดิบอยู่ที่ 114,010 บาท จะได้ว่าถ้านำของเสียมาแทนที่วัสดุในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักมากขึ้นก็จะทำให้ มีต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตที่ลดลงด้วย เนื่องจากการนำของเสียมาใช้ในการผลิตจะสามารถลดการใช้ทรายในการผลิตได้ ทำให้ประหยัดปริมาณและต้นทุนในการใช้ทรายในขณะที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยังได้ตามมาตรฐานตามที่สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนด นอกจากนี้ยังลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย และค่าขนส่งของเสียได้ 8,000 บาทต่อตัน

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนเทคโนโลยี ด้วยเครื่องมือการตัดสินใจทางเศรษฐศาสตร์

จากการศึกษาความเหมาะสมของร้อยละสัดส่วนการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานกำหนดอยู่ที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนัก โดยจะประมาณการผลิตที่เดือนละ 20,000 ก้อน ตามกำลังการผลิตของเครื่องจักรที่ได้กำหนดไว้ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือการตัดสินใจทางเศรษฐศาสตร์ ตลอดระยะเวลาโครงการ 21 ปี ได้แก่ 1) ค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 2) ค่าผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C) 3) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และ 4) ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back) มีผลการศึกษาดังตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4- 23 สรุปผลประโยชน์ต้นทุนด้วยเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์

เครื่องมือวิเคราะห์การตัดสินใจ	รวม
ผลตอบแทนสุทธิ (PVB)	22,578,085.61
ต้นทุนสุทธิ (PVC)	20,078,278.22
ค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	2,499,807.38
ค่าผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C)	1.12
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	38%
ระยะการคืนทุน (Pay Back)	3 ปี 4 เดือน

หมายเหตุ รายละเอียดการคำนวณตามภาคผนวก ฉ

เงื่อนไขการคำนวณวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์

- อายุของโครงการฯ คิดที่ 21 ปี เริ่มนับตั้งแต่การเริ่มก่อสร้างและตลอดการดำเนินการ โดยปีที่ 0-1 คือ ปีก่อสร้าง และเริ่มดำเนินการตั้งแต่ปีที่ 1 – ปีที่ 20
- อัตราคิดลด (Discount Rate) คิดที่อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของธนาคารพาณิชย์ MLR เท่ากับ ร้อยละ 6.5 รวมกับอัตราเงินเฟ้อมาตรา ร้อยละ 1.5 เท่ากับ ร้อยละ 8 (ข้อมูลธนาคารแห่งประเทศไทย BOT 13/2/61)
- วันทำงาน 1 เดือนทำงาน 20 วัน เวลาการทำงาน 8.00 น. - 16.00 น.

ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

- ค่าผลตอบแทนรวมปัจจุบัน (Present benefit Value ;PBV) เท่ากับ 22,578,085.61 บาท
- ค่าใช้จ่ายรวมปัจจุบัน (Present Cost Value ;PCV) เท่ากับ 20,078,278.22 บาท
- ค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value ;NPV) เท่ากับ 2,499,807.38 บาท โดยเงื่อนไขความเป็นไปได้ในการลงทุน คือ ค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่ามากกว่าศูนย์
- อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit : Cost ratio ;B/C) เท่ากับ 1.12 โดยเงื่อนไขความเป็นไปได้ในการลงทุน คือ ค่าอัตราส่วนผลตอบแทนต่อทุน มีค่ามากกว่าศูนย์
- อัตราผลตอบแทนของโครงการ (Internal Rate of Return ;IRR) เท่ากับร้อยละ 38 โดยเงื่อนไข ความเป็นไปได้ในการลงทุน คือ อัตราผลตอบแทนของโครงการ มีค่ามากกว่ากับศูนย์
- ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Return) ระยะเวลาคืนทุน 3 ปี 4 เดือน เงื่อนไข คือ ระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่าอายุโครงการ 20 ปี

สรุปผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการริเริ่มผลิตของเสียแต่ละชนิด เป็นผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์ โดยการผลิตเป็นกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังชนิดไม่รับน้ำหนักที่ผสมของเสียแต่ละชนิด พบว่า ปัจจุบันสุทธิ อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน อัตราผลตอบแทนของโครงการ และระยะเวลาคืนทุน มีผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมต่อการลงทุน ซึ่งในการวิเคราะห์นี้ยังไม่ได้คำนวณค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบ ได้แก่ ค่าเตาอบ และค่าลดขนาด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ด้วยการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียด หรือทราย ในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อนของวัสดุก่อสร้าง ประเมินการถ่ายเทความร้อนและการประหยัดพลังงานในอาคาร และความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของเทคโนโลยี จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. สมบัติทางกายภาพ และเคมีพื้นฐานของของเสียแต่ละชนิด

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของของเสียแต่ละชนิด พบว่าเส้นใยรีโอคิวล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกา และอะลูมินา ส่วนผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพลาสติกอีพอกซี เรซิน และ ไฟเบอร์กลาส

การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค พบว่าอนุภาคของเส้นใยรีโอคิวลกับตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด ส่วนอนุภาคของผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งมีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่เล็กกว่า 0.1 มิลลิเมตร และมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 75 ไมโครเมตร อยู่ร้อยละ 38.95 โดยน้ำหนัก

ดังนั้น ถึงแม้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรีโอคิวล และตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาจะมีองค์ประกอบคล้ายวัสดุปอซโซลาน แต่ปัจจัยที่จะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้นั้น นอกจากองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมแล้ววัสดุนั้นจำเป็นต้องมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า 75 ไมโครเมตร ซึ่งวิธีการในการลดขนาดของเสียจะมีกระบวนการที่ซับซ้อน สิ้นเปลืองการใช้พลังงาน และเพิ่มค่าใช้จ่าย การนำของเสียมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดหรือทรายจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่า

2. การศึกษาสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และความร้อนของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสีย

ในการทดลองใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำ เท่ากับ 1 ต่อ 2 ต่อ 0.45 เพื่อศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ของเสียแต่ละชนิดต่อทราย เท่ากับร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาอิทธิพลของของเสียแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุก่อสร้างมีดังต่อไปนี้

เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เส้นใยหรือควูลจะส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นที่ลดลง เนื่องจากเส้นใยมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าทราย อีกทั้งมอร์ตาร์ยังมีค่ากำลังรับแรงอัด และแรงกดแตกตามขวางที่ลดลง สาเหตุมาจากเส้นใยหรือควูลมีลักษณะเป็นเส้นใยอ่อน ความแข็งแรงน้อยกว่าทราย และถึงแม้เส้นใยหรือควูลจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายวัสดุพอลิโพรพิลีน แต่ขนาดอนุภาคของเส้นใยหรือควูลนั้นใหญ่เกินไป จึงไม่สามารถสร้างผลึกเพื่อช่วยในการเชื่อมประสานหรือยึดเกาะกันภายในโครงสร้างได้ ทำให้ภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์เกิดช่องว่าง ซึ่งส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เส้นใยหรือควูลเป็นฉนวนกันไฟและความร้อน จึงสามารถเข้าไปปรับปรุงประสิทธิภาพในการลดการนำความร้อน และเพิ่มความสามารถในการทนไฟของมอร์ตาร์ให้สูงกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียชนิดอื่นได้

ส่วนการแทนที่ทรายด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่นที่ลดลงหรือมีน้ำหนักเบา มีค่ากำลังรับแรงอัด และค่าแรงกดแตกตามขวางที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียชนิดอื่น เนื่องจากรูปร่างของตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีลักษณะเป็นทรงกลมไม่สามารถทนต่อแรงดัดและแรงดึงแยกได้ดีเท่ากับวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใยหรือเป็นทรงกระบอกยาว ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปายังมีพื้นที่ผิวเป็นรูพรุนซึ่งทำให้มีสมบัติในการดูดซึมน้ำ และยังพบว่าปริมาณรูพรุนหรือช่องว่างภายในโครงสร้างของมอร์ตาร์มากขึ้น ส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูง ยิ่งไปกว่านั้นมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีความต้านทานความร้อน และการทนไฟจากการเผาที่สูง เพราะตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปามีความสมบัติในการทนไฟได้ดี

และเมื่อเพิ่มการแทนที่ผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะจะส่งผลทำให้มอร์ตาร์มีค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงอัด และแรงกดแตกตามขวางที่ลดลง เพราะแรงที่เชื่อมประสานหรือยึดเกาะกันระหว่างปูนซีเมนต์กับของเสียมีความแข็งแรงไม่เท่ากับแรงที่ยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์กับทราย และมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะยังมีค่าความแข็งแรงสูงกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียชนิดอื่น เนื่องจากขนาดอนุภาคของผงที่บดจาก

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมีขนาดที่เล็กสามารถเข้าไปเติมเต็มช่องว่างได้มากกว่า แต่ยังคงพบช่องว่างภายในโมดูลาร์ทำให้โมดูลาร์ยังมีค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ฝั่งที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะสามารถช่วยให้โมดูลาร์มีค่าการนำความร้อนที่ลดลง แต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทนไฟจากการเผาได้ เพราะฝั่งที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทนไฟที่อุณหภูมิสูงได้

ดังนั้นจากการศึกษาสมบัติของโมดูลาร์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิดสามารถนำของเสียไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตวัสดุก่อสร้างชนิดไม่รับน้ำหนักหรือไม่รับโครงสร้างได้ โดยสัดส่วนการแทนที่ทรายด้วยของเสียแต่ละชนิดที่เหมาะสม คือร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน เนื่องจากมีค่าความแข็งแรง และค่าการดูดซึมน้ำที่เหมาะสมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง

3. การศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่แทนที่ของเสีย

การศึกษาการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และ อิฐบล็อกปูผนังที่มีการแทนที่ของเสียพบว่ กระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่มีการแทนที่ของเสียแต่ละชนิด ได้แก่ เส้นใยรีดคูล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และฝั่งที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา (มอก. 535-2556) โดยมีค่าแรงกดแตกตามขวางมากกว่า 3.325 นิวตันต่อมิลลิเมตร และมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 10

ส่วนอิฐบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด มีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (มอก. 58-2533) ที่กำหนดให้คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักควรมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยมากกว่า 2.50 เมกะปาสคาล และควรมีค่ากำลังรับแรงอัดแต่ละก้อนมากกว่า 2.00 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ยังมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

4. การถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร และ ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้าน

การศึกษาและเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน และการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างทั่วไปกับบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้าง ได้แก่ อิฐบล็อกปูผนัง และกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่ผสมของเสียแต่ละชนิดด้วยโปรแกรม Building Energy Code (BEC) พบว่าบ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่แทนที่ของเสียแต่ละชนิด มีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) และ ค่าการถ่ายเท

ความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (RTTV) ต่ำกว่าบ้านที่ใช้วัสดุทั่วไป ส่งผลทำให้บ้านที่ใช้วัสดุก่อสร้างที่ผสมของเสียแต่ละชนิดมีค่าการใช้พลังงานต่ำกว่า และนำไปสู่การประหยัดไฟฟ้าได้

5. ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของเทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียแต่ละชนิด

ศึกษาความคุ้มค่าในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ พบว่าต้นทุนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ทั่วไป ราคาเท่ากับ 5.76 บาทต่อแผ่น ในขณะที่ต้นทุนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ราคาเท่ากับ 5.42 บาทต่อแผ่น นอกจากนี้ยังสามารถลดรายจ่ายการกำจัดของเสียได้ 5,000 - 8,000 บาทต่อตัน เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน พบว่าอัตราผลตอบแทนของโครงการ (IRR) เท่ากับร้อยละ 44 และการศึกษาความคุ้มค่าในการผลิตอิฐบล็อกปูผนัง พบว่าต้นทุนในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังทั่วไป ราคาเท่ากับ 6.04 บาทต่อก้อน ส่วนต้นทุนในการผลิตอิฐบล็อกปูผนังที่แทนที่ด้วยของเสียแต่ละชนิด ราคาเท่ากับ 5.70 บาทต่อก้อน นอกจากนี้ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียได้ เมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนพบว่า อัตราผลตอบแทนของโครงการ (IRR) เท่ากับร้อยละ 38 ซึ่งมีผลลัพธ์ที่คุ้มค่าต่อการลงทุน

การนำของเสียแต่ละชนิดมาประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุก่อสร้างพบว่ามีสมบัติที่ผ่านมาตรฐานทั้งหมด แต่ถ้าวิเคราะห์ว่าของเสียที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนแล้วมีความเหมาะสมในด้านความแข็งแรง มีประสิทธิภาพในการทนไฟ ป้องกันความร้อนได้ดี และทำให้ประหยัดการใช้พลังงานภายในอาคาร การใช้เส้นใยรีไซเคิลเป็นวัสดุทดแทนจึงเหมาะสมที่สุด ดังนั้นการนำของเสียเส้นใยรีไซเคิล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะมาเป็นวัสดุทดแทนในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนังที่มีสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ช่วยลดการนำของเสียเข้าสู่พื้นที่ฝังกลบ ลดภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสีย และมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนที่จะพัฒนาให้เกิดประโยชน์ในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

5.2 ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เชิงวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

1. สามารถใช้เทคโนโลยีการรีไซเคิลของเสียอุตสาหกรรม ได้แก่ เส้นใยรีโอคิวล ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา และผงที่บดจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ โดยการนำของเสียมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดในการผลิตกระเบื้องหลังคาซีเมนต์ และอิฐบล็อกปูผนัง ซึ่งมีสมบัติผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

2. ทราบถึงสมบัติของวัสดุก่อสร้างเมื่อถูกแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยของเสียแต่ละชนิด และอัตราส่วนการแทนที่ที่แตกต่างกัน เนื่องจากสมบัติทางด้านกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเสียที่ต่างกันจะส่งผลทำให้สมบัติของวัสดุก่อสร้างเปลี่ยนแปลง

3. ทางด้านสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้จะเป็นแนวทางหนึ่งของการรีไซเคิลของเสีย เพื่อลดการนำของเสียเข้าสู่พื้นที่หลุมฝังกลบ ลดการปนเปื้อนของมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม และเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติด้วยการหันมาใช้วัสดุทดแทน

4. วัสดุก่อสร้างที่ถูกทดแทนด้วยของเสีย มีประสิทธิภาพสูงในการลดการถ่ายเทพลังงานความร้อน จึงสามารถนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดการนำความร้อนเข้าสู่อาคาร ส่งผลให้ลดการใช้พลังงานของประเทศ และประหยัดไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

1. ขนาดของเสียที่นำมาศึกษา เป็นขนาดที่มาจากโรงงานแหล่งกำเนิดของเสีย เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านการลดขนาดของอนุภาคของของเสีย เพราะการลดขนาดของของเสียให้มีขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร จำเป็นต้องใช้วิธีการที่ซับซ้อน เครื่องมือที่มีราคาแพง และสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นในการพัฒนาจึงควรมีการศึกษาขนาดของของเสียที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุก่อสร้างเพิ่มเติม

2. งานวิจัยนี้ดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งมีข้อจำกัด และมีความแตกต่างกับการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งในด้านเครื่องมือ และส่วนผสม ดังนั้นควรมีการพัฒนาเพื่อเชื่อมโยงการผลิตสู่ระดับอุตสาหกรรม เช่น เครื่องมือในการผสม เครื่องมือในการขึ้นรูป เนื่องจากในโรงงานใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ เป็นเครื่องจักรแบบไฮดรอลิกที่มีกำลังในการอัดสูง ทำให้สามารถอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้แน่น ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้น้ำมาก สามารถลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ส่งผลให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าที่ทำการทดลองได้

4. องค์ประกอบทางเคมีของเสียอาจมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ขึ้นกับแหล่งที่มาของของเสีย และการใช้งานที่ผ่านมา แต่อาจไม่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุก่อสร้างจากที่ได้ทำการศึกษา เนื่องจากในการศึกษานี้ใช้ของเสียเป็นวัสดุทดแทนทราย จึงไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาหลักในการเชื่อมประสาน และสร้างความแข็งแรงให้กับวัสดุก่อสร้าง

3. การทำวิจัยต่อไปควรมีการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมจริง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กฎกระทรวง ฉบับที่ 47. 2540. ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522.
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 48. 2540. ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522.
- กระทรวงอุตสาหกรรม, 2533. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 1619 กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มาตรฐานเลขที่ มอก. 58-2533. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 3283 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ มาตรฐานเลขที่ มอก.15 เล่ม 1. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม, 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2550. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 3790 กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมการทดสอบความทนไฟ-ชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างอาคาร เล่ม 3 คำอธิบายสำหรับวิธีทดสอบและการใช้ข้อมูลทดสอบ มาตรฐานเลขที่ มอก.1334 เล่ม 3-2550. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม, 2556. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 4591 กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา มาตรฐานเลขที่ มอก.535-2556. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2558. กระทรวงอุตสาหกรรม จัดโครงการอุตสาหกรรมทั่วไทย ร่วมใจจัดการขยะอุตสาหกรรม เฉลิมพระเกียรติในหลวง สานนโยบายรัฐบาล วางยุทธศาสตร์นำโรงงานเข้าสู่ระบบ 90 % ภายใน 5 ปี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.industry.go.th/center_mng/index.php [21 ตุลาคม 2560]

กรรมชัย โสภณพละกุล, บัณฑิต แจ้งอ่างหิน, สุदारัตน์ อุ๋นใจ .2548 .ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำตะกอนประปาเพื่อนำมาใช้เป็นสารปอซโซลาน. ภาควิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

คณิตภูมิ ดุลยเกษม, สุวิมล อัสวพิศิษฐ และ จารุรัตน์ วรรณสรากุล. 2548. การนำตะกอนจากโรงประปามาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่4. กรุงเทพมหานคร: คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค.

ดวงกมล สุริยฉัตร, ภาสันต์ วิชิตอมรพันธ์ และ วรรณะ เรืองสำเร็จ. 2547. รายงานการประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปา ฉบับที่ สอพ. 16/2547. กรุงเทพฯ: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

ธีรานี โชติกไกร. 2537. การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ของทรายแต่ละประเภท: ฝ่ายวิเคราะห์วิจัยแร่ละหิน กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม หน้า 82.

ณิชชา บุรณสิงห์, 2559. ขยะอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพฯ: สำนักวิชาการ สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร.

นภาพร อรุณเกียรติก้อง และ ปราโมทย์ ภูพานทอง. 2556. ต้นแบบการแยกสกัดโลหะทองแดงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพฯ: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

ประณต กุลประสูตร. 2541. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่5. กรุงเทพมหานคร:สำนักพิมพ์อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2553. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต พิมพ์ครั้งที่ 6: กรุงเทพฯ, สมาคมคอนกรีตไทย 1-381.

ปิติศานต์ กร้ามาตร. 2553. คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน. (โครงการเสริมความเข้มแข็งทางวิชาการ มทร. ๓บุรีรัมย์), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ผกามาศ ชูสิทธิ์ และ ภาณุเดช ชัดเงางาม. 2556. การพัฒนาแผ่นใยไม้อัดซีเมนต์จากการประยุกต์ใช้เส้นใยธรรมชาติจากกากมะพร้าวและต้นข้าวโพด. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาลัยเทคโนโลยีราชมงคพระนคร.

ผุสดี แพทย์นุเคราะห์. 2546. การนำซิลิกาอะลูมินา และควอร์เทอร์ไนซ์โครอสส์ลิงค์ชานอ้อยที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ยุทธนา อินต๊ะทอง วัลลภ เพ็งเอี่ยม และสมภพ สิงหบุตร. 2551. การศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังอัดของตะกอนประปาเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), อุตสาหกรรม-ศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล้านนา ตาก.

ไลทธิย์ อภิธรรมวิริยะ .2542. การนำซิลิกาอะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรวรรณชัย สายวาริน. 2556. การศึกษาการชะละลายสารปนเปื้อนโลหะหนักในซีเมนต์ผสมผสมเถ้าชีวมวล. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วินิต ช่อวิเชียร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่8. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สัมพันธ์ พาณิชย์.
สถิตย์ ถิ่นแก้ว. 2550. การศึกษาการใช้เศษใยมะพร้าวผสมในแผ่นหลังคา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สุจิตรา วาสนาดำรงดี. 2558. สถานการณ์ปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์. วารสารสิ่งแวดล้อม 3 (มิถุนายน): 1-18.

สุพิน แสงสุข. 2554. ดินเผานาโน. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุเมธ เตชะกุลวิโรจน์. 2546. การใช้เถ้าลอยชานอ้อยมาบำบัดน้ำเสียสีย้อมแล้วนำไปทำคอนกรีตบล็อก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. 2556. เทคโนโลยีการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. กรุงเทพมหานคร : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน.

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2559. รายงานเรื่องโครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2560. รายงานเรื่องโครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาและประยุกต์ใช้วัสดุทดแทนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย. 2560. รายงานเรื่องโครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลจากแผ่นวงจรรีเลย์ทรอนิกส์(ส่วนประกอบที่ไม่ใช่โลหะ). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

ACI Committee 308. 2001. Guide to Curing Concrete. ACI Manual of Concrete Practice Part 2. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 1-31.

Akatsuka, M., and Takezawa, Y. 2003. Study of High Thermal Conductive Epoxy Resins Containing Controlled High-Order Structures. Journal of Applied Polymer Science 89: 2464 –2467.

Akcaozoglu, S., Akcaozoglu, K., and Atis, C.D. 2013. Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA). Composites: Part B 45: 721–726.

ASTM (American Society for Testing and Materials). 1996. Standard specification for concrete aggregates. C33-93. Annual book of ASTM standard. 04.02, 4: 10-16.

- ASTM (American Society for Testing and Materials). 1996. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. C136-95a. Annual book of ASTM standard. 04.02, 4: 78-82.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. C618-05. Annual book of ASTM standard. 4.02. ASTM International, West Conshohocken, Pa.
- Awang, Y.B. and Atherton, J.G. 1995. Growth and fruiting responses of strawberry plants grown on rockwool to shading and salinity. Scientia Horticulturae 62: 25-31.
- Carmassi, G., Incrocci, L., Maggini, R., Malorgio, F., Tognoni, F., and Pardossi A. 2007. An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rockwool culture with saline water. Agricultural water management 88: 73-82.
- Chatveera, B., Lertwattanakul, P., and Makul, N. 2006. Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete. Cement and Concrete Composites 28: 441-450.
- Cheng, A., Lin, W.T., and Huang, R. 2011. Application of rock wool waste in cement-based composites. Materials and Design 32: 636-642.
- Dassanayake, K.B., Jayasinghe, G.Y., Surapaneni, A., and Hetherington, C. 2015. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. Waste Management 38: 321-335.
- European Commission. 2003. Directive 2002/96/EC on Waste Electrical and Electronic Equipment. Official Journal of the European Union, Luxembourg, 24-38
- Gibson, G. 2017. Epoxy Resins. Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition) 773-797.

- Grodan. 2016. Seed The Advanced Way [Online]. Available from: <http://grodan101.com>
[2017, April 22]
- Guo, J., Li, J., Rao, Q., and Xu, Z. 2008. Phenolic molding compound filled with nonmetals of waste PCBs. Environmental Science Technology 42: 624-628.
- Guo, J., Guo, J., and Xu, Z. 2009. Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. Journal of Hazardous Materials 168: 567-590.
- Guo, J., Tang, Y., and Xu, X. 2010. Wood Plastic Composite produced by nonmetals from pulverized waste printed circuit boards. Environmental Science and Technology 44: 463-468.
- Hannawi, K., Prince, W., and Bernard, S. K. 2010. Effect of thermoplastic aggregates incorporation on physical, mechanical and transfer behavior of cementitious materials. Waste Biomass Valorization 1: 251-259.
- Herrero, J. L. R., Nieto, D. V., López-Gil, A., Arranz, A., Fernández, A., Lorenzana, A., Merino, S., Saja, J. A. D., and Rodríguez-Pérez, M. A. 2016. Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. Construction and Building Materials. 104: 298-310.
- IARC (International Agency for Research on Cancer). 2002. Man-made vitreous fibres. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. 81: IARC Press: World Health Organization.
- Iniyar, L.NA. 2016. Reuse of waste printed circuit board as a partial replacement for fine aggregate in concrete. M.Tech (Structural Engineering), School of Mechanical and Building Sciences VIT University.
- Ingberg, S. H., Dunham, J. W., and Thompson, J. P. 1957. Combustible Content in Buildings. (BMS 149). Washington, D.C. : National Bureau of Standard.
- Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., and Moraes, R. 2003. Physical and pozzolanic action of mineral addition on the mechanical strength of high-performance concrete. Cement and Concrete Composites 25: 69-76.

- ISO. 1994. Fire-resistance tests Elements of building construction Part 3: Commentary on test method and test data application (ISO/TR 834-3:1994). the International Organization for Standardization.
- Japanese Standards Association [JSA, JIS]. 1992. JIS R 2618-1992 Testing method for thermal conductivity of insulating fire bricks by hot wire. Japan: Author.
- Kinnunen, P., Yliniemi, J., Talling, B., and Illikainen, M. 2017. Rockwool waste in fly ash geopolymer composites. Journal of Material Cycles and Waste Management 19(3): 1220-1227.
- Kongsansathian, P., Tanpaiboonkul, N., and Putkham, A. 2016. Cement Block Properties Produced from Portland Cement and Wastewater Sludge from Water-based paint Processing. E-Journal, Science and Technology Silpakorn University 3: 2408 – 1248.
- Lie, T.T. 1972. Fire and Buildings. Division of Building Research, National Research Council of Canada.
- Lin, W. T., Chenga, A., Huangc, R., and Zouc, S. Y. 2013. Improved microstructure of cement-based composites through the addition of rock wool particles. Materials characterization 84: 1-9.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M., and Sillanpää, M. 2010. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment:A review. Advances in Colloid and Interface Science 159: 189-197.
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Yap, S. P., and Lee, S. C. 2016. Green concrete partially comprised of farming waste residues: a review. Journal of Cleaner Production 117: 122-138.
- Mou, P., Dong X., and Guanghong, D. 2007. Products Made from Nonmetallic Materials Reclaimed from Waste Printed Circuit Boards. Tsinghua Science and Technology 12: 276-283.

- Omer Ario. 2007. Effects of elevated temperature on properties of concrete. Fire Safety Journal. 516-522.
- Panyakapo, P. 2008. Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. Journal of Waste Management 28: 1581–1588.
- Ravi, V. (2012). Evaluating overall quality of recycling of e-waste from end-of-life computers. Journal of Cleaner Production 20: 145–151.
- Robinson, B.H. 2009. Review E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. Science of the Total Environment 408: 183-191.
- Rockwool. ROCKWOOL Thermal Insulation Slab. [online]. 2018. Available from : <http://www.rockwool.co.uk/products/rockwool-thermal-insulation-slab/> [2018, March 3]
- Sales, A., Souza, F.R.D., Santos, W.N.D., Zimer, A.M., and Almeida, F.D.C.R. 2010. Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application. Construction and Building Materials 24: 2446-2453.
- Singha, K. 2012. A Short Review on Basalt Fiber. International Journal of Textile Science. 1: 19--28.
- Sikora, P., Horszczaruk, E., Skoczylas, K., and Rucinska, T. 2017. Thermal properties of cement mortars containing waste glass aggregate and nanosilica. Procedia Engineering 196: 159 – 166.
- Sudarshan, K., and Vyas, A.K. 2017. Impact of fire on mechanical properties of concrete containing marble waste. Journal of King Saud University – Engineering Sciences 1-10.
- Thaniya Kaosol. 2009. Reuse Water Treatment Sludge for Hollow Concrete Block Manufacture. Department of Civil Engineering Faculty of Engineering Prince of Songkla University, Songkhla.

- The International Agency for Research on Cancer (IARC). 2017. Agents classified by the IARC monographs, volumes 1-118 [Online]. Available from: [http://monographs.iarc.fr/ENG/ Classification/](http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/) [2017, April 22]
- Valls, S., Yague, A., Vazquez, E., and Mariscal, C. 2004. Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from a sewage treatment plan. Cement and Concrete Research 34(12):2203-2208.
- Vesilind, A.P., and Martel, C.J. 1989. Thermal conductivity of sludge. Journal of Water Research 23: 241-245.
- Wang, R., Zhang, T., and Wang, P. 2012. Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar. Materials and Structures 45: 1439-1445.
- Yamawaki, T. 2003. The gasification recycling technology of plastics WEEE containing brominated flame retardants. Journal of Fire and Materials 27: 315-319.
- Yasuda, T., Kuroda, K., Fukumoto, Y., Hanajima, D., and Suzuki, K. 2009. Evaluation of full-scale biofilter with rockwool mixture treating ammonia gas from livestock manure composting. Bioresource Technology 100: 1568-1572.
- Yu, J., Williams, E., Ju, M., and Yang, Y. 2010. Forecasting global generation of obsolete personal computers. Environmental Science & Technology 44: 3232-3237.
- Zhou, Y., and Qiu, K. 2010. A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards. Journal of Hazardous Materials 175(1): 823-828.
- Zoeteman, B.C.J., Krikke, H.R., and Venselaar, J. 2010. Handling WEEE waste flows: on the effectiveness of producer responsibility in a globalizing world. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 47: 415-436.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก.1 การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109-86

ขั้นตอนการทดลอง

เตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

1. ทาน้ำมันบางๆ ที่ผิวด้านในของแบบหล่อกับฐาน
2. ทาน้ำมันเข้มข้นหรือจารบีระหว่างตัวแบบหล่อกับฐาน
3. เช็ดน้ำมันส่วนเกินออกจากแบบหล่อ
4. ใช้จารบีทารอยต่อระหว่างแบบหล่อกับฐานที่ด้านบน

การหล่อก้อนตัวอย่าง

1. หล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้อัตราส่วนตามที่ต้องการ
2. การผสมใช้วิธีผสมด้วยการใช้เครื่องผสม ผสมให้ส่วนผสมเข้าด้วยกัน
3. เอาส่วนผสมเทลงในแบบหล่อ เมื่อเสร็จแล้วใช้เกรียงปาดส่วนเกินออก
4. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อไปบ่ม และถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

หาค่ากำลังรับแรงอัด

นำก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบ วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสกับแบบหล่อ เช็ดผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน ให้สะอาดปราศจากเม็ดทราย ในการกดทับตัวอย่างต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง กดตัวอย่างจนกระทั่งก้อนตัวอย่างแตก บันทึกค่าน้ำหนักกด

การคำนวณ

กำลังต้านแรงอัดของก้อนวัสดุก่อคอนกรีต คำนวณได้จากแรงสูงสุดเป็นกิโลกรัมหารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวางรวมของก้อน วัดเป็นตารางเซนติเมตร

$$P = \frac{F}{A}$$

P คือ กำลังอัดโดยพื้นที่หน้าตัดตามขวาง หน่วย กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ หน่วย ตารางเซนติเมตร

F คือ แรงอัดประลัย หน่วย กิโลกรัม

ภาคผนวก ก.2 การทดสอบการดูดกลืนน้ำ

อ้างอิงตามมาตรฐาน มอก. 109-2517

ขั้นตอนการทดลอง

1. การอิมตัว ก่อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะต้องแช่จมอยู่ในน้ำ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ยกก่อนตัวอย่างขึ้นจากน้ำ ทิ้งไว้ให้น้ำระบายออกเป็นเวลา 1 นาที หยดน้ำที่มองเห็นด้วยตาเปล่าให้ซับออกด้วยผ้าซับ แล้วนำก่อนตัวอย่างขึ้นชั่งน้ำหนักทันที
2. การทำให้แห้ง หลังจากการอิมน้ำ ทำก่อนตัวอย่างให้แห้งในตู้อบระบายอากาศที่มีอุณหภูมิ 110 ถึง 115 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างออกมาวางทิ้งไว้ให้เย็น หรือมีน้ำหนักที่คงที่

คำนวณการดูดซึมน้ำ

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100$$

A คือ การดูดซึมน้ำ หน่วย ร้อยละ

M1 คือ มวลของชิ้นตัวอย่างเมื่อแห้ง หน่วย กรัม

M2 คือ มวลของชิ้นตัวอย่างเมื่ออิมตัว หน่วย กรัม

CHULALONGKORN UNIVERSITY

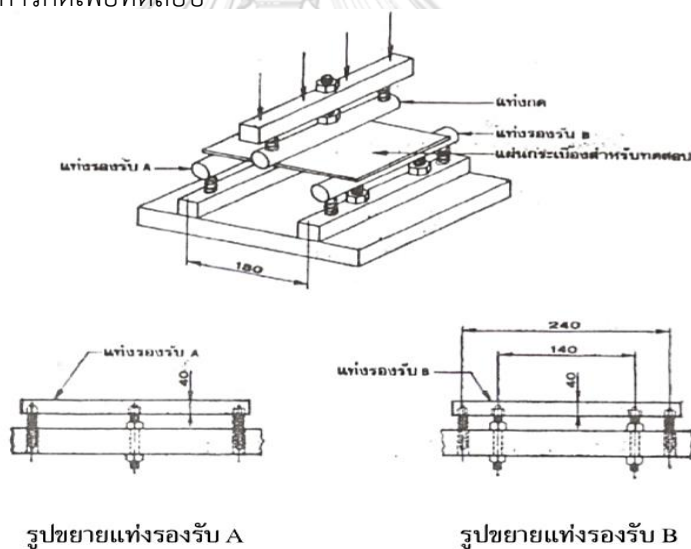
ภาคผนวก ก.3 การทดสอบแรงกดแตกตามขวาง หรือการรับแรงดัดของคอนกรีต

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C293-02

ขั้นตอนการทดลอง

วิธีการทดสอบแบบแรงกดหนึ่งจุดที่จุดกึ่งกลางคาน (Center-point loading)

1. ทำการผสมส่วนผสมตามอัตราส่วนที่ต้องการ เมื่อผสมส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว นำไปเทลงแบบหล่อ บ่มตามระยะเวลาที่กำหนด เพื่อนำตัวอย่างมาทดสอบการรับแรงกดแตกตามขวาง โดยนำตัวอย่างแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำขึ้นมาทดสอบทันที
2. วางตัวอย่างทดสอบบนเครื่องทดสอบตามรูป ก.3.1 ประกอบด้วยแท่งรองรับเหล็กสองแท่ง วางห่างกันระยะ L มิลลิเมตร และมีแท่งกดรูปร่างและขนาดเดียวกัน อยู่กึ่งกลาง ขนานกับแท่งรองรับทั้งสอง สำหรับกดลงบนผิวด้านบนของตัวอย่างที่จะทดสอบ ความยาวของเหล็กทั้งสามต้องยาวไม่น้อยกว่าความกว้างของแผ่นกระเบื้อง ทำการกดเพื่อทดสอบ



ภาพที่ ก.3.1 แสดงตัวอย่างเครื่องมือทดสอบ

คำนวณ

$$S = \frac{1.5 PL}{bd^2}$$

เมื่อ	S	คือ	การต้านแรงทางขวาง	เป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
	P	คือ	น้ำหนักกด	เป็นนิวตัน
	L	คือ	ระยะห่างของจุดรองรับ	เป็นมิลลิเมตร
	B	คือ	ความกว้างของแผ่นกระเบื้อง	เป็นมิลลิเมตร
	D	คือ	ความหนาของแผ่นกระเบื้อง	เป็นมิลลิเมตร

ภาคผนวก ก.4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียด

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 128

ทฤษฎี

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม หมายถึงอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวมต่อ น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยที่มวลรวมมีรูพรุน ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของมวลรวมจึงอาจแยกออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

1. ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity)

เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรของมวลรวม (ที่รวมทั้งรูพรุนทั้งหมดและช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน

2. ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity)

เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้มวลรวม (ที่รวมรูพรุนที่น้ำเข้าไม่ได้ (Impermeable porous) และช่องว่างภายในของมวลรวม) ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน

3. ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์ (Absolute or True Specific Gravity)

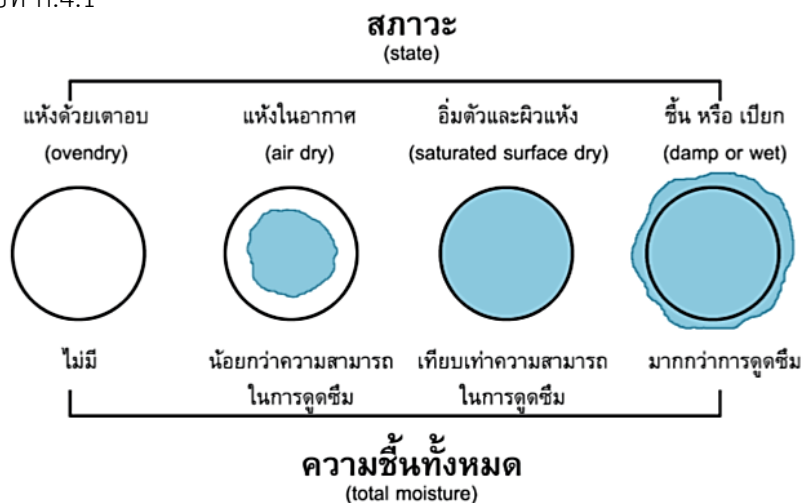
เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของปริมาตรเนื้อแท้ของมวลรวม (ที่รวมรูพรุนและ ช่องว่าง) ต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์อาจหาได้โดยทำเป็นผงละเอียดที่ไม่มีช่องว่างอยู่เลย อย่างไรก็ตามความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์มิได้ประโยชน์ในงานคอนกรีต

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมขึ้นอยู่กับสมบัติของแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสมและความพรุนของก้อนมวลรวม ความชื้นอาจทำให้ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมเปลี่ยนแปลงไปได้ ความถ่วงจำเพาะนี้ใช้ประโยชน์ในการคำนวณหา ปฏิภาคส่วนผสมของหินและทรายในคอนกรีตโดยใช้เป็นตัวเปลี่ยนน้ำหนักที่กำหนดให้ของมวลรวมเป็นปริมาตรเนื้อแท้ หรือเปลี่ยนปริมาตรเนื้อแท้ให้เป็นน้ำหนัก เพื่อหาปริมาตรมวลรวมสำหรับการผสมนั้น ๆ ตามปกติในการคำนวณปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตจะใช้ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk specific Gravity) ของมวลรวมที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry) ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมโดยทั่ว ๆ ไป จะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.40 – 2.90

การดูดซึ่มของมวลรวม

การดูดซึ่มของมวลรวม (Absorption of Aggregates) โครงสร้างภายในก้อนวัสดุผสมประกอบด้วย เนื้อของแข็งและช่องว่าง ช่องว่างเหล่านั้นจะดูดความชื้นเข้าไปเก็บไว้ได้ การผสมคอนกรีตจึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติข้อนี้ด้วย เพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมให้ได้ความชื้นเหลวคงที่

อันจะทำให้คอนกรีตมีเนื้อสม่ำเสมอ ปริมาณน้ำในมวลรวมอาจอยู่ในสภาวะใดสภาวะหนึ่งใน 4 อย่าง ดังแสดงในรูปที่ ก.4.1



ภาพที่ ก.4.1 สภาวะความชื้นของมวลรวม

1. แห้งด้วยเตาอบ (Oven Dry) ในสภาวะนี้มวลรวมสามารถดูดซึมความชื้นได้เต็มที่
2. แห้งในอากาศ (Air Dry) หรือแห้งที่ผิวแต่มีความชื้นอยู่ภายในช่องว่างข้างใน ในปริมาณที่น้อยกว่า สภาวะอิ่มตัวและผิวแห้ง ดังนั้นมวลรวมจึงอาจดูดซึมความชื้นได้บ้าง
3. อิ่มตัวและผิวแห้ง (Saturated Surface-Dry) เป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยที่มวลรวมไม่คายน้ำออกหรือดูด น้ำจากคอนกรีต
4. ชื้นหรือเปียก (Damp or Wet) เป็นสภาวะที่ปริมาณความชื้นสูงมากเกินไป โดยมีน้ำหุ้มก้อนมวลรวมอยู่ด้วย

ดังนั้น การทดสอบหาการดูดซึมของมวลรวมจึงมีประโยชน์ในการหาปริมาณของน้ำที่มวลรวมคายออกมา หรือดูดซึมเข้าไปจากส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งทำให้เราสามารถปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตให้เหมาะสม ตามสภาวะของมวลรวมที่แท้จริง

การคำนวณ

ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด

1. คำนวณหาความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) ที่สภาวะแห้งด้วยเตาอบ ได้จาก

$$\text{ความถ่วงจำเพาะทั้งหมด} = \frac{A}{B+500-C}$$

โดยที่ A = น้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่แห้งด้วยเตาอบ, กรัม

B = น้ำหนักของกระบอกตวงและน้ำที่ระดับ 500 มิลลิลิตร, กรัม

C = น้ำหนักของกระบอกตวงที่มีมวลรวมละเอียดและน้ำที่ระดับ 500 มิลลิลิตร, กรัม

2. คำนวณหาความถ่วงจำเพาะทั้งหมด (Bulk Specific Gravity) ที่สถานะอิ่มตัว ผิวแห้ง (Saturated Surface Dry Basis) ได้จาก

$$\text{ถ่วงจำเพาะทั้งหมด (อิ่มตัวผิวแห้ง)} = \frac{500}{B+500-C}$$

3. คำนวณหาร้อยละของการดูดซึม ได้จาก

$$\text{การดูดซึม, \%} = \frac{500-A}{A} \times 100$$

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของมวลรวมละเอียด

1. นำเอามวลรวมละเอียดจากที่เก็บมาประมาณ 1000 กรัม โดยใช้วิธีการของการแบ่งสี่ (Method of Quartering)
2. จากนั้นนำมวลรวมละเอียดมาทำให้แห้งโดยใช้เครื่องเป่าลมเป่ามวลรวมละเอียดให้ทั่ว จนมวลรวมละเอียดนั้นแห้งสม่ำเสมอและอยู่ในสถานะของการไหลอิสระ (Free Flowing)
3. การทดสอบว่ามวลรวมละเอียดอยู่ในสถานะของการไหลอิสระ ทำได้โดยเทมวลรวมละเอียดนั้นลงในกรวยโลหะจนเต็ม แล้วกระทุ้งเบาๆ ด้วยเหล็กกระทุ้ง เป็นจำนวน 25 ครั้ง จากนั้นยกกรวยขึ้นตรงๆ ในแนวตั้ง ถ้าหากว่ามวลรวมละเอียดยังมีความชื้นที่ผิว (Surface Moisture) อยู่ มวลรวมละเอียดนั้นจะยังคงรูปร่างเป็นรูปกรวยอยู่
4. ในกรณีที่ยังมีความชื้นที่ผิวอยู่ ให้ใช้เครื่องเป่าลมไล่ความชื้นที่ผิวต่อไปอีก แล้วนำมวลรวมละเอียดไปทดสอบในกรวยโลหะอีกเช่นเดิม ทำเช่นนี้เป็นช่วงๆ จนกระทั่งเห็นว่าเมื่อยกกรวยขึ้นแล้วมวลรวมละเอียดยุบตัวลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงว่ามวลรวมละเอียดนั้นมีการไหลตัวอิสระ ไม่มีความชื้นที่ผิว เราเรียกว่าอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry)
5. จากนั้นให้เทมวลรวมละเอียดจำนวน 500 กรัม ลงไปในกระบอกตวง แล้วเติมน้ำจนถึงขีดระดับประมาณ 450 มล.
6. เขย่ากระบอกตวงเพื่อไล่ฟองอากาศออก เติมน้ำจนถึงระดับ 500 มิลลิลิตร
7. ชั่งหาน้ำหนักของกระบอกตวง มวลรวมและน้ำทั้งหมด
8. เทมวลรวมละเอียดออกจากกระบอกตวงใส่ในภาดโลหะ แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 - 110 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ (อบประมาณ 24 ชั่วโมง) จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1 - 1 ½ ชั่วโมง แล้วชั่งหาน้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่แห้ง
9. ชั่งหาน้ำหนักของกระบอกตวงที่มีน้ำที่ระดับ 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิประมาณ 23 องศาเซลเซียส

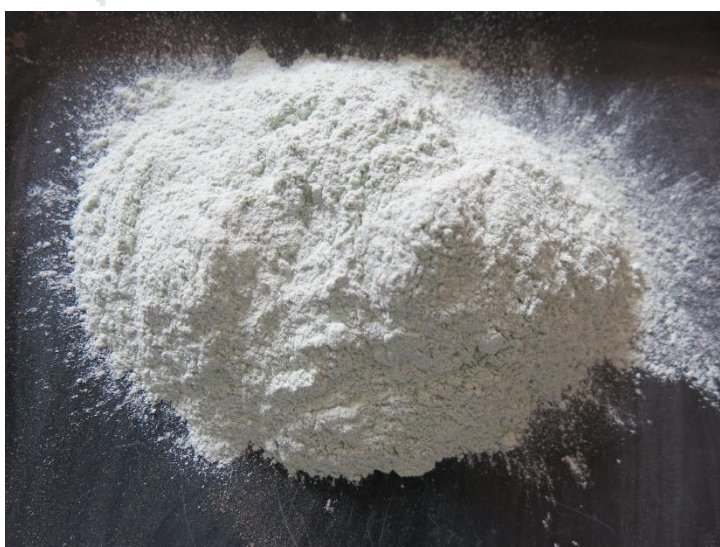




ภาพที่ ข- 1 เส้นใยรีอควูล



ภาพที่ ข- 2 ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา



ภาพที่ ข- 3 ผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ



ภาพที่ ข- 4 แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร



ภาพที่ ข- 5 แบบหล่อทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 13 x 26 x 2 เซนติเมตร



ภาพที่ ข- 6 เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด น้ำหนักกดสูงสุด 30 ตัน (Amsler 30 ton)



ภาพที่ ข- 7 เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด



ภาพที่ ข- 8 ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร



ภาพที่ ข- 9 ตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 13x26x2 เซนติเมตร



ภาพที่ ข- 10 กระเบื้องหลังคาซีเมนต์



ภาพที่ ข- 11 อิฐบล็อกปูผนัง



ภาคผนวก ค.1

ศึกษาค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียดังต่อไปนี้

ตารางที่ ค.1.1 ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียดังต่อไปนี้	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.00	7	2.054	2.054	1.976	2.043	2.050	2.036	0.033
	14	2.062	2.072	1.925	2.036	2.072	2.034	0.062
	28	2.026	1.974	2.054	2.054	2.120	2.046	0.053
RW0.01	7	1.979	1.962	1.971	2.038	1.996	1.989	0.030
	14	2.022	1.997	2.014	2.066	2.043	2.028	0.027
	28	2.052	2.000	2.062	2.085	2.029	2.046	0.033
RW0.05	7	1.954	2.011	1.987	1.932	1.917	1.960	0.039
	14	2.024	1.933	2.002	1.930	2.106	1.999	0.073
	28	1.979	2.004	2.020	2.039	2.053	2.019	0.029
RW0.10	7	1.822	1.804	1.810	1.871	1.877	1.837	0.035
	14	1.850	1.897	1.821	1.821	1.811	1.840	0.035
	28	1.958	1.968	1.904	1.942	1.934	1.941	0.025
RW0.20	7	1.705	1.768	1.674	1.683	1.715	1.709	0.037
	14	1.667	1.759	1.741	1.733	1.730	1.726	0.035
	28	1.769	1.766	1.739	1.733	1.758	1.753	0.016

หมายเหตุ : RW x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูลที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค.1.2 ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียดังต่อไปนี้	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.00	7	2.054	2.054	1.976	2.043	2.050	2.036	0.033
	14	2.062	2.072	1.925	2.036	2.072	2.034	0.062
	28	2.026	1.974	2.054	2.054	2.120	2.046	0.053
WSS0.01	7	2.050	1.947	1.998	2.038	2.164	2.039	0.081

	14	2.038	2.058	2.003	2.012	2.062	2.035	0.027
	28	2.107	1.980	2.155	2.014	1.958	2.043	0.085
WSS0.05	7	1.986	1.983	1.986	1.964	1.890	1.962	0.041
	14	1.919	2.021	1.962	1.990	1.911	1.960	0.047
	28	1.976	1.928	1.984	1.963	1.989	1.968	0.025
WSS0.10	7	1.952	1.861	1.936	1.930	1.935	1.923	0.036
	14	1.928	1.901	1.988	1.888	1.947	1.930	0.039
	28	1.914	1.906	1.973	1.948	1.954	1.939	0.028
WSS0.20	7	1.847	1.861	1.787	1.842	1.832	1.834	0.028
	14	1.793	1.907	1.833	1.811	1.852	1.839	0.044
	28	1.895	1.827	1.880	1.861	1.909	1.866	0.032

หมายเหตุ : WWS x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค.1. 3 ค่าความหนาแน่นของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ
ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วน ของเสียต่อ ทราย	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
0.00	7	2.054	2.054	1.976	2.043	2.050	2.036	0.033
	14	2.062	2.072	1.925	2.036	2.072	2.034	0.062
	28	2.026	1.974	2.054	2.054	2.120	2.046	0.053
PCB0.01	7	2.046	2.007	1.991	1.918	2.115	2.015	0.073
	14	2.044	2.059	2.049	1.981	2.013	2.029	0.032
	28	2.076	1.960	2.131	1.973	2.065	2.041	0.073
PCB0.05	7	1.927	1.920	1.987	1.957	1.962	1.950	0.027
	14	1.955	1.972	1.983	1.990	2.029	1.986	0.027
	28	1.972	2.054	2.045	2.005	1.928	2.001	0.052
PCB0.10	7	1.917	1.938	1.838	1.916	1.881	1.898	0.039
	14	1.914	1.897	1.873	1.881	1.811	1.875	0.039
	28	1.993	1.931	1.961	1.951	1.956	1.959	0.023
PCB0.20	7	1.625	1.653	1.666	1.676	1.662	1.656	0.019
	14	1.647	1.723	1.665	1.689	1.726	1.690	0.034
	28	1.750	1.787	1.777	1.775	1.775	1.773	0.014

หมายเหตุ : PCB x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยแผงวงจรีเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่อัตราส่วนต่างๆ

ภาคผนวก ค.2

ศึกษากำลักรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียดแต่ละชนิด

ตารางที่ ค.2. 1 ค่ากำลักรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียดต่อทราย	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลักรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.00	7	37.45	39.48	40.09	36.16	37.67	38.17	1.60
	14	38.84	41.31	41.86	38.99	41.29	40.46	1.43
	28	42.08	41.61	44.77	43.73	43.44	43.13	1.28
RW0.01	7	45.48	39.80	47.83	43.94	41.10	43.63	3.25
	14	46.79	46.92	50.40	49.33	48.26	48.34	1.55
	28	57.03	55.19	55.56	53.54	54.24	54.91	1.55
RW0.05	7	38.56	39.00	39.73	37.59	37.07	38.39	1.07
	14	41.00	41.47	37.61	39.60	41.97	40.33	1.76
	28	42.82	44.06	47.27	42.95	45.92	44.60	1.94
RW0.10	7	26.00	28.11	26.19	25.76	23.57	25.93	1.62
	14	32.80	28.79	32.24	29.64	30.95	30.88	1.69
	28	40.94	37.83	40.58	38.67	36.60	38.92	1.84
RW0.20	7	13.82	16.62	16.58	15.47	16.67	15.83	1.23
	14	20.06	17.87	18.85	18.68	19.30	18.95	0.81
	28	21.89	23.94	19.28	20.36	19.81	21.06	1.89

หมายเหตุ : RW x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูลที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค.2. 2 ค่ากำลักรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียดต่อทราย	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลักรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.00	7	37.45	39.48	40.09	36.16	37.67	38.17	1.60
	14	38.84	41.31	41.86	38.99	41.29	40.46	1.43
	28	42.08	41.61	44.77	43.73	43.44	43.13	1.28
WSS0.01	7	38.04	39.33	35.28	34.21	38.54	37.08	2.22

	14	41.39	39.15	40.16	39.54	39.54	39.96	0.88
	28	45.44	44.89	45.26	43.63	44.60	44.76	0.71
WSS0.05	7	34.00	35.50	34.51	35.83	33.12	34.59	1.10
	14	38.84	38.22	38.68	39.07	39.52	38.87	0.48
	28	45.96	43.01	42.15	44.27	41.84	43.45	1.69
WSS0.10	7	29.69	28.27	32.18	30.74	31.53	30.48	1.55
	14	33.94	35.55	35.70	34.13	33.71	34.60	0.94
	28	40.06	37.63	41.12	40.43	37.05	39.26	1.80
WSS0.20	7	12.17	8.54	10.43	11.59	9.54	10.45	1.48
	14	14.44	15.02	14.09	13.57	15.38	14.50	0.72
	28	17.96	18.53	20.19	21.45	18.99	19.42	1.40

หมายเหตุ : WWS x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค.2. 3 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียต่อทราย	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)						ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5			
0.00	7	37.45	39.48	40.09	36.16	37.67	38.17	1.60	
	14	38.84	41.31	41.86	38.99	41.29	40.46	1.43	
	28	42.08	41.61	44.77	43.73	43.44	43.13	1.28	
PCB0.01	7	37.96	39.89	38.01	37.49	38.10	38.29	0.93	
	14	45.95	44.22	46.57	46.44	45.69	45.77	0.94	
	28	50.05	50.47	51.11	48.60	49.07	49.86	1.02	
PCB0.05	7	35.10	35.58	33.57	35.93	34.61	34.96	0.92	
	14	39.43	38.46	39.07	36.88	38.84	38.53	0.99	
	28	41.95	41.06	41.15	43.57	42.85	42.12	1.08	
PCB0.10	7	33.65	29.65	29.73	30.14	31.60	30.95	1.70	
	14	35.66	34.38	33.20	34.07	33.43	34.15	0.97	
	28	38.52	37.58	38.63	37.30	38.91	38.19	0.70	
PCB0.20	7	24.54	24.82	24.90	25.59	23.58	24.69	0.73	
	14	29.33	29.70	30.82	29.67	30.64	30.03	0.66	
	28	33.89	31.69	33.56	34.93	33.95	33.60	1.19	

หมายเหตุ : PCB x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยแผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่อัตราส่วนต่างๆ

ภาคผนวก ค.3

ศึกษาค่ารับแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียดแต่ละชนิด

ตารางที่ ค.3. 1 ค่ารับแรงกดแตกตามขวางของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ที่เวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียดต่อทราย	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่ารับแรงกดแตกตามขวาง (เมกะปาสคาล)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.00	7	5.64	5.60	5.04	4.52	5.66	5.29	0.50
	14	7.08	6.70	5.95	5.83	6.12	6.34	0.53
	28	8.19	7.96	8.33	8.32	7.80	8.12	0.23
RW0.01	7	7.03	6.46	6.62	6.70	6.12	6.78	0.27
	14	7.03	7.77	7.35	7.14	6.83	7.22	0.36
	28	9.11	9.14	9.13	9.04	9.15	9.12	0.04
RW0.05	7	6.12	6.16	5.65	5.62	5.89	5.89	0.25
	14	6.12	6.77	6.61	5.31	5.91	6.14	0.58
	28	8.31	8.22	7.58	8.37	8.37	8.17	0.33
RW0.10	7	5.05	4.61	5.10	5.52	4.62	4.98	0.38
	14	5.26	5.38	5.35	5.58	5.56	5.42	0.14
	28	6.88	7.46	6.92	7.08	6.81	7.03	0.26
RW0.20	7	4.08	3.80	3.94	4.32	4.25	4.08	0.21
	14	4.26	4.27	4.75	4.26	4.14	4.34	0.24
	28	4.77	5.44	5.78	5.25	5.88	5.43	0.44

หมายเหตุ : RW x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูลที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค.3. 2 ค่ารับแรงกดแตกตามขวางของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียดต่อทราย	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่ารับแรงกดแตกตามขวาง (เมกะปาสคาล)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.00	7	5.64	5.60	5.04	4.52	5.66	5.29	0.50
	14	7.08	6.70	5.95	5.83	6.12	6.34	0.53
	28	8.19	7.96	8.33	8.32	7.80	8.12	0.23
WSS0.01	7	4.42	4.35	4.40	4.20	3.50	4.18	0.39

	14	5.93	6.21	5.533	6.17	6.32	6.03	0.31
	28	7.50	6.78	6.84	7.23	7.76	7.22	0.42
WSS0.05	7	4.53	5.25	4.13	4.17	5.16	4.65	0.53
	14	4.90	4.95	5.00	5.51	6.11	5.29	0.52
	28	6.98	7.10	6.78	6.65	6.23	6.75	0.34
WSS0.10	7	3.28	3.62	3.86	3.49	3.50	3.55	0.21
	14	4.01	3.99	4.49	4.22	4.46	4.23	0.24
	28	5.98	6.05	5.52	5.81	6.06	5.88	0.23
WSS0.20	7	3.38	3.31	3.17	3.13	3.46	3.29	0.14
	14	3.62	3.54	3.58	3.40	3.65	3.56	0.10
	28	4.37	4.21	4.54	4.60	4.68	4.48	0.19

หมายเหตุ : WWS x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค.3. 3 ค่ารับแรงกดแตกตามขวางของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียต่อทราย	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่ารับแรงกดแตกตามขวาง (เมกะปาสคาล)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
0.00	7	5.64	5.60	5.04	4.52	5.66	5.29	0.50
	14	7.08	6.70	5.95	5.83	6.12	6.34	0.53
	28	8.19	7.96	8.33	8.32	7.80	8.12	0.23
PCB0.01	7	5.66	6.34	6.28	5.95	5.25	5.90	0.45
	14	6.54	6.86	7.14	7.08	6.83	6.89	0.24
	28	8.21	8.08	7.83	8.06	7.93	8.02	0.15
PCB0.05	7	5.04	4.81	5.42	5.03	5.07	5.08	0.22
	14	5.88	6.17	6.30	6.62	6.39	6.27	0.27
	28	7.81	7.83	7.38	7.69	7.66	7.67	0.18
PCB0.10	7	4.28	4.55	4.24	4.93	3.82	4.36	0.41
	14	5.23	5.31	5.25	5.01	5.36	5.23	0.13
	28	6.92	7.16	6.97	7.09	6.74	6.98	0.16
PCB0.20	7	3.78	4.30	3.38	3.70	4.17	3.86	0.37
	14	4.01	4.38	4.94	4.31	4.88	4.50	0.40
	28	5.75	6.00	6.13	6.12	5.76	5.95	0.19

หมายเหตุ : PCB x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยแผงวงจรรีเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่อัตราส่วนต่างๆ

ภาคผนวก ค.4

ศึกษาการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสียดแต่ละชนิด

ตารางที่ ค.4. 1 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูล ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วน ของเสียด ต่อทราย	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
0.00	7	8.62	8.05	8.24	8.12	9.50	8.50	0.60
	14	8.14	7.68	8.73	7.76	9.04	8.27	0.60
	28	7.07	8.81	7.48	7.24	8.72	7.86	0.83
RW0.01	7	9.57	9.62	10.27	9.54	10.09	9.82	0.33
	14	8.84	8.05	8.64	8.88	9.71	8.82	0.60
	28	7.19	6.89	7.16	7.70	6.58	7.10	0.41
RW0.05	7	10.82	10.56	11.00	9.55	11.55	10.69	0.74
	14	9.59	9.92	9.68	7.62	9.44	9.25	0.93
	28	8.07	8.06	7.19	7.33	8.23	7.77	0.48
RW0.10	7	11.26	11.73	11.74	13.02	11.59	11.86	0.67
	14	10.06	9.78	10.59	9.69	10.25	10.08	0.36
	28	8.18	7.74	8.21	8.03	8.40	8.11	0.25
RW0.20	7	13.01	11.84	11.92	12.42	13.34	12.51	0.66
	14	11.08	10.62	10.84	11.74	11.36	11.13	0.44
	28	10.66	10.67	10.94	10.35	11.94	10.91	0.61

หมายเหตุ : RW x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยเส้นใยหรือควูลที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค.4. 2 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปา ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วน ของเสียดต่อ ทราย	ระยะเวลา บ่ม (วัน)	ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
0.00	7	8.62	8.05	8.24	8.12	9.50	8.50	0.60
	14	8.14	7.68	8.73	7.76	9.04	8.27	0.60
	28	7.07	8.81	7.48	7.24	8.72	7.86	0.83
WSS0.01	7	8.72	8.76	8.65	8.80	8.03	8.59	0.32

	14	8.96	8.56	8.03	8.33	9.17	8.61	0.46
	28	8.58	7.70	8.34	8.42	8.91	8.39	0.44
WSS0.05	7	10.18	9.70	10.01	9.89	10.50	10.06	0.30
	14	9.54	9.70	9.19	9.93	9.70	9.61	0.27
	28	8.45	10.84	8.61	9.71	9.38	9.40	0.96
WSS0.10	7	10.64	10.39	11.45	10.88	10.17	10.71	0.49
	14	10.25	9.99	10.26	10.20	9.89	10.12	0.17
	28	9.27	9.92	9.10	9.14	8.48	9.36	0.51
WSS0.20	7	12.75	13.57	12.70	13.74	13.18	13.19	0.47
	14	12.54	11.78	11.96	12.70	12.92	12.38	0.49
	28	11.44	11.70	11.23	11.34	10.63	11.27	0.40

หมายเหตุ : WWS x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ ค.4. 3 ค่าการดูดซึมน้ำของก้อนมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะ ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

อัตราส่วนของเสียต่อทราย	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)						ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
		1	2	3	4	5			
0.00	7	8.62	8.05	8.24	8.12	9.50	8.50	0.60	
	14	8.14	7.68	8.73	7.76	9.04	8.27	0.60	
	28	7.07	8.81	7.48	7.24	8.72	7.86	0.83	
PCB0.01	7	9.55	8.69	8.38	9.73	8.26	8.92	0.68	
	14	7.88	7.53	8.31	9.48	9.09	8.50	0.76	
	28	7.34	8.22	7.88	8.04	7.36	7.77	0.40	
PCB0.05	7	8.85	9.99	10.20	9.89	10.05	9.80	0.54	
	14	8.98	9.72	10.14	9.72	8.81	9.48	0.56	
	28	8.53	8.90	9.01	8.31	8.62	8.67	0.28	
PCB0.10	7	10.16	10.11	10.13	10.14	10.17	10.14	0.02	
	14	9.47	9.79	9.88	10.66	10.32	10.03	0.47	
	28	8.80	7.79	8.80	9.62	9.00	8.80	0.66	
PCB0.20	7	13.36	13.33	13.37	13.17	13.52	13.35	0.12	
	14	11.12	11.09	11.36	11.90	12.31	11.56	0.53	
	28	10.93	10.47	10.82	10.28	11.33	10.77	0.41	

หมายเหตุ : PCB x.xx คือมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ส่วนที่ไม่ใช่โลหะที่อัตราส่วนต่างๆ

ภาคผนวก ค.5

ศึกษาสมบัติการทนไฟของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ยแต่ละชนิด

ตารางที่ ค.5. 1 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ การเผา (°C)	ค่ากำลังรับแรงอัด (เมกпасคาล)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
Control	ไม่เผา	27.32	27.00	26.37	27.30	26.17	26.83	0.54
	200 °C	24.93	24.80	24.66	25.32	24.89	24.92	0.24
	300 °C	19.31	19.42	19.84	19.67	19.91	19.63	0.26
	400 °C	-	-	-	-	-	-	-
RW0.10	ไม่เผา	28.95	29.26	28.49	28.42	29.86	29.00	0.59
	200 °C	25.68	25.03	25.58	26.11	25.20	25.52	0.42
	300 °C	22.06	21.53	21.37	22.79	22.60	22.07	0.63
	400 °C	19.75	20.25	18.81	19.64	19.34	19.56	0.53
WSS0.10	ไม่เผา	28.86	27.48	27.14	27.32	29.33	28.03	1.00
	200 °C	24.89	25.07	25.00	24.59	24.92	24.89	0.18
	300 °C	21.26	20.77	20.34	20.63	20.39	20.68	0.37
	400 °C	18.69	18.03	17.71	18.99	18.57	18.40	0.52
PCB0.10	ไม่เผา	28.09	28.06	28.38	28.45	29.19	28.43	0.45
	200 °C	26.31	26.65	26.66	26.46	26.15	26.45	0.22
	300 °C	19.82	19.64	20.6	19.29	19.60	19.68	0.29
	400 °C	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : - หมายถึง มอร์ตาร์ที่ผ่านการเผาแล้วแตก ไม่สามารถนำไปทดสอบได้

ตารางที่ ค.5. 2 ค่าความหนาแน่นของมอร์ตาร์หลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ การเผา (°C)	ค่าความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)						
		1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน
Control	ไม่เผา	2.051	2.063	2.045	2.053	2.065	2.055	0.009
	200 °C	2.001	1.945	2.015	2.019	2.004	1.997	0.030
	300 °C	1.784	1.776	1.771	1.783	1.783	1.779	0.006
	400 °C	-	-	-	-	-	-	-
RW0.10	ไม่เผา	1.934	1.931	1.935	1.941	1.938	1.936	0.004
	200 °C	1.804	1.810	1.789	1.817	1.792	1.802	0.012
	300 °C	1.768	1.745	1.777	1.740	1.770	1.760	0.016
	400 °C	1.639	1.654	1.653	1.654	1.653	1.651	0.007
WSS0.10	ไม่เผา	1.939	1.939	1.945	1.947	1.957	1.945	0.008
	200 °C	1.786	1.772	1.757	1.754	1.760	1.766	0.013
	300 °C	1.705	1.719	1.726	1.718	1.727	1.719	0.009
	400 °C	1.683	1.671	1.675	1.673	1.678	1.676	0.005
PCB0.10	ไม่เผา	2.001	1.998	1.895	1.993	2.002	1.978	0.047
	200 °C	1.809	1.802	1.801	1.808	1.805	1.805	0.003
	300 °C	1.729	1.717	1.723	1.727	1.729	1.725	0.005
	400 °C	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : - หมายถึง มอร์ตาร์ที่ผ่านการเผาแล้วแตก ไม่สามารถนำไปทดสอบได้

ภาคผนวก ค.6

ศึกษาสมบัติการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ยแต่ละชนิด

ตารางที่ ค.6. 1 ค่าการนำความร้อนของมอร์ตาร์ที่ถูกแทนที่ด้วยของเสี้ยแต่ละชนิด

Samples	Thermal conductivity (W/ m K)		
	Results	Average	S.D.
R1	1.853 1.843 1.841	1.846	0.006
R5	1.703 1.610 1.610	1.641	0.054
R10	1.472 1.469 1.473	1.471	0.062
R20	0.965 0.959 0.964	0.963	0.003
W1	1.983 1.885 1.859	1.909	0.065
W5	1.723 1.717 1.713	1.718	0.005
W10	1.670 1.581 1.589	1.613	0.049
W20	1.342 1.340 1.320	1.334	0.012
P1	1.955 1.951 1.933	1.946	0.012
P5	1.847 1.807 1.782	1.812	0.033
P10	1.515 1.508 1.517	1.513	0.005
P20	1.230 1.211 1.208	1.216	0.012

ภาคผนวก ค.7

การวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมละเอียด และการดูดซึมน้ำ

Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate		
Determination	No.1	No.2
Type and source of fine aggregate	River Sand	River Sand
Weight of glass graduate, G (g)	146.4	168.7
Weight of glass graduate + Water, B (g)	643.6	664.7
Weight of saturated surface-dry sand, S (g)	500.0	500.0
Weight of water + sand + glass graduate, C (g)	949.8	972.2
Weight of oven-dry sand, A (g)	497.3	494.6
Bulk specific gravity ($A/(B+S-C)$)	2.566	2.569
Bulk specific gravity (SSD Basis ($S/(B+S-C)$))	2.580	2.597
Apparent specific gravity ($A/(B+A-C)$)	2.602	2.644
Absorption (%) ($(S-A)/A*100$)	0.543	1.092
Average bulk specific gravity	2.568	
Average bulk specific gravity (SSD basis)	2.589	
Average apparent specific gravity	2.623	
Absorption (%)	0.817	



ภาคผนวก ง.1

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องหลังคาซีเมนต์

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา มาตรฐานเลขที่ มอก. 535-2556

1. ขอบข่าย

- 1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ กำหนดกระเบื้องมุงหลังคาแบบแผ่นลอนและแผ่นเรียบสำหรับใช้มุงหลังคาในแนวลาดเอียงโดยไม่จำกัดสัณฐานของกระเบื้อง
- 1.2 มาตรฐานนี้ไม่ครอบคลุมกระเบื้องที่ไม่มีส่วนเกาะระแนง รางล้น หรือบัวกันน้ำ

2. บทนิยาม

กระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา (Concrete roofing tiles) หมายถึง วัสดุแผ่นแบบเกาะเกยสำหรับใช้มุงหลังคา ทำจากคอนกรีตซึ่งเป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ มวลผสมคอนกรีต และน้ำ มีลักษณะเป็นแผ่นลอนหรือแผ่นเรียบ มีส่วนเกาะระแนงที่ส่วนบนด้านหลังของแผ่นกระเบื้อง ขอบด้านข้างของแผ่นกระเบื้องมีรางล้นเพื่อเกาะเกยกันระหว่างแผ่นต่อแผ่น ส่วนล่างด้านหลังมีขอบเป็นบัวกันน้ำไหลย้อนเข้าไปใต้แผ่นกระเบื้อง และอาจมีรูยึดกระเบื้องด้วยก็ได้

3. วัสดุที่ทำกระเบื้อง

3.1 ปูนซีเมนต์ ให้ใช้ปูนซีเมนต์อย่างใดอย่างหนึ่ง

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตาม มอก.15 เล่ม 1
- 2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ตาม มอก.849
- 3) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ตาม มอก.2594

3.2 มวลผสมคอนกรีต (Aggregate)

มวลผสมคอนกรีตที่ใช้ต้องเป็นทราย กรวด หินย่อย หรือวัสดุอย่างอื่น ที่มีสมบัติเหมาะสมในการทำกระเบื้อง หรือ ตาม มอก.566

3.3 น้ำ

ต้องเป็นน้ำปราศจากสารใดที่ก่อผลเสียต่อคุณภาพของกระเบื้อง

3.4 ส่วนผสมอื่นๆ (ถ้ามี)

สี สารกันซึม หรือสารอื่นๆ ที่นำมาใช้ต้องเป็นสารที่เหมาะสมสำหรับใช้กับคอนกรีต และต้องเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง สำหรับสีนั้นต้องปราศจากตะกั่วหรือสิ่งที่เป็นพิษอันตราย

4. คุณลักษณะที่ต้องการ

4.1 ลักษณะทั่วไป

ผิวของกระเบื้องจะเรียบหรือหยาบก็ได้ แต่ต้องไม่แตก ไม่นูน ไม่เว้า หรือมีตำหนิอื่นใด ที่เป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน

4.2 แรงกดแตกตามขวาง (Transverse breaking load)

แรงกดแตกตามขวางแต่ละแผ่นต้องไม่น้อยกว่า 3.325 N ต่อความกว้างการใช้งานของกระเบื้อง 1 มิลลิเมตร

4.3 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

กระเบื้องทุกแผ่นต้องมีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกิน ร้อยละ 10

4.4 สภาพการซึมผ่านได้ (Permeability)

กระเบื้องทุกแผ่นต้องไม่ปรากฏหยดน้ำใต้แผ่นกระเบื้อง

4.5 ผลที่เกิดขึ้นกับน้ำ

ปริมาณสารพิษที่ยอมให้มีได้ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดสูงสุด ดังนี้

สารพิษ	เกณฑ์ปริมาณสารพิษที่ยอมให้มีได้สูงสุด (mg/dm ³)
ปรอท	0.001
ตะกั่ว	0.05
สารหนู	0.05
ซีลีเนียม	0.01
โครเมียม	0.05
ไซยาไนด์	0.2
แคดเมียม	0.01
แบเรียม	1.0

5. การทดสอบ

5.1 แรงกดแตกตามขวาง

5.1.1 เครื่องมือ เครื่องวัดที่อ่านได้ละเอียดถึง 1 นิวตัน

5.1.2 วิธีเตรียมตัวอย่าง

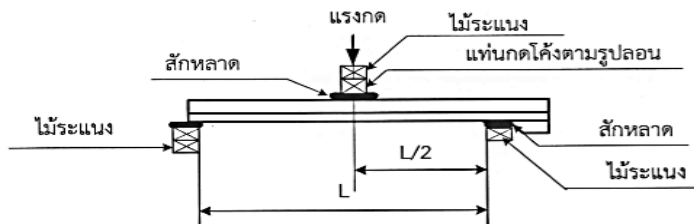
นำแผ่นกระเบื้องแช่ลงในน้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบแล้วยกออก ทดสอบกระเบื้องในภาวะที่อิ่มตัวด้วยน้ำทันที

5.1.3 วิธีทดสอบ

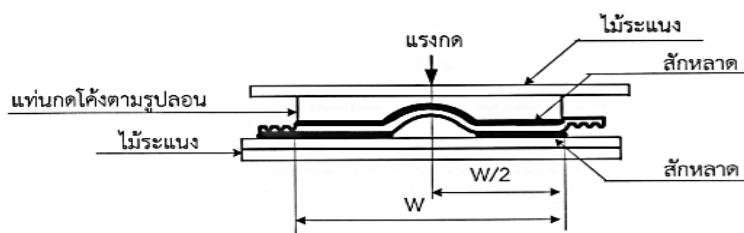
ใช้ไม้ระแนงที่เป็นชิ้นตรงและมีผิวเรียบ 2 ชั้น วางหนุนไว้ใต้แผ่นกระเบื้องวางอยู่ในลักษณะที่มุ่งหลังคาในแนวราบ ปลายของแผ่นกระเบื้องจะต้องวางให้อยู่ตรงแนวกึ่งกลางของไม้ระแนงขนาดเดียวกัน แล้วจึงใช้มวลกดเป็นแนวตลอดความกว้างของแผ่นกระเบื้อง โดยมีไม้ระแนงและแท่นกด รองรับแรงกดที่กึ่งกลาง ให้ขนาดกับไม้ระแนงที่รองรับแผ่นกระเบื้อง เพิ่มแรงกดด้วยอัตราสม่ำเสมอไม่เกิน 100 N/s จนกระทั่งแผ่นกระเบื้องแตก บันทึกค่าแรงกดแตกตามขวาง แต่ละแผ่น แล้วหาค่าเฉลี่ย

5.1.4 การคำนวณ

แรงกดแตกตามขวางต่ำสุดแต่ละแผ่นที่ต้องการ เป็นนิวตัน = $3.325 \times$ ความกว้างใช้งานของกระเบื้องแต่ละแผ่น เป็นมิลลิเมตร



(ก) รูปด้านยาว



(ข) รูปด้านขวาง

L คือ ความยาวของแผ่นกระเบื้องช่วงที่ทดสอบ
 W คือ ความกว้างของแผ่นกระเบื้องช่วงที่ทดสอบ

5.2 การดูดซึมน้ำ

5.2.1 เครื่องมือ

ตุ้บ ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส และมีที่ระบายอากาศออกสู่ภายนอก

เครื่องชั่ง ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

5.2.2 วิธีทดสอบ

ชั่งชิ้นทดสอบที่อิมตัวด้วยน้ำ แล้วบันทึกมวลไว้ เป็นมวลที่อิมตัว

อบชิ้นทดสอบในตุ้บที่อุณหภูมิ 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

นำออกมาวางไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เป็นมวลเมื่อแห้ง

5.2.3 คำนวณ

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100$$

A คือ การดูดซึมน้ำ หน่วย ร้อยละ

M₁ คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่อแห้ง หน่วย กิโลกรัม

M₂ คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างเมื่ออิมตัว หน่วย กิโลกรัม

ภาคผนวก ง.2

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก มาตรฐานเลขที่ มอก. 58-2533

1. บทนิยาม

คอนกรีตบล็อก (Hollow concrete block) หมายถึง ก้อนคอนกรีตทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และวัสดุผสมที่เหมาะสมชนิดต่างๆ และจะมีสารอื่นผสมอยู่หรือไม่ก็ได้ สำหรับก่อผนังหรือกำแพง มีรูหรือโพรงขนาดใหญ่ทะลุตลอดก้อน และมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิที่ระนาบขนานกับผิวธรรน้อยกว่าร้อยละ 75 ของพื้นที่หน้าตัดรวมที่ระนาบเดียวกัน

คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (Hollow non-load bearing concrete masonry unit) หมายถึง คอนกรีตบล็อกใช้สำหรับผนังที่ออกแบบไม่รับน้ำหนักบรรทุกใดๆ นอกจากน้ำหนักตัวเอง

2. ขนาดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

เกณฑ์ขนาดมิติของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก โดยขนาดจะคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 2

มิติที่กีด หนา x สูง x ยาว พ	ขนาดที่ทำ หนา x สูง x ยาว มิลลิเมตร x มิลลิเมตร x มิลลิเมตร
0.8 x 2 x 1.5	70 x 190 x 140
1 x 2 x 1.5	90 x 190 x 140
1.5 x 2 x 1.5	140 x 190 140
2 x 2 x 1.5	190 x 190 x 140
0.8 x 2 x 2	70 x 190 x 190
1 x 2 x 2	90 x 190 x 190
1.5 x 2 x 2	140 x 190 x 190
2 x 2 x 2	190 x 190 x 190
0.8 x 2 x 3	70 x 190 x 290
1 x 2 x 3	90 x 190 x 290
1.5 x 2 x 3	140 x 190 x 290
2 x 2 x 3	190 x 190 x 290
0.8 x 2 x 4	70 x 190 x 390
1 x 2 x 4	90 x 190 x 390
1.5 x 2 x 4	140 x 190 x 390
2 x 2 x 4	190 x 190 x 390

หมายเหตุ ขนาดของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักที่กำหนดนี้ เป็นขนาดที่ออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามระบบการประสานทางพิกัดในการก่อสร้างอาคาร ซึ่งได้กำหนดหน่วยพิกัดมูลฐาน พ ให้เท่ากับ 100 มิลลิเมตร และกำหนดความหนาของปูนก่อในรอยต่อมาตรฐานเท่ากับ 10 มิลลิเมตร

3. วัสดุ

3.1 ปูนซีเมนต์ ให้ใช้อย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้

3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ควรเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานเลขที่ มอก.15 เล่ม1

3.1.2 ปูนซีเมนต์ผสม

ควรเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ผสม มาตรฐานเลขที่ มอก.80

3.2 มวลผสมคอนกรีต

ควรเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลผสมคอนกรีต มาตรฐานเลขที่ มอก. 566 ยกเว้นเกณฑ์กำหนดการคัดขนาดมวลผสมคอนกรีต

3.3 ส่วนผสมอื่นๆ

ตัวทำฟองอากาศ สี สารกันน้ำ ที่นำมาใช้ ควรเป็นสารที่เหมาะสมสำหรับใช้กับคอนกรีต และควรเป็นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

4. คุณลักษณะที่ต้องการ

4.1 ลักษณะทั่วไป

4.1.1 อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักทุกก้อนต้องแข็งแรงปราศจากรอยแตกร้าว หรือส่วนเสียนใดที่เป็นอุปสรรคต่อการก่ออิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนักอย่างถูกต้อง หรือทำให้สิ่งก่อสร้างเสียวก้างหรือความคงทนถาวร

4.1.2 อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก ซึ่งต้องการฉาบปูนหรือแต่งปูนต้องมีผิวหน้าหยาบพอควรแก่การจับยึดของปูนฉาบหรือปูนแต่งได้อย่างดี

4.1.3 อิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก ซึ่งต้องการก่อแบบผิวเฉย ด้านผิวเฉยจะต้องไม่มีรอยป็น รอยร้าว หรือตำหนิอื่นๆ ถ้ามีก้อนซึ่งมีรอยป็นเล็กน้อยที่ยาวมากกว่า 25 มิลลิเมตร เป็นจำนวนไม่มากกว่าร้อยละ 5 จะต้องไม่ถือเป็นสาเหตุในการไม่ยอมรับ

4.2 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

กำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก เมื่อส่งถึงที่ก่อสร้าง ทั้งค่าเฉลี่ย และค่าแต่ละก้อน โดยใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มาตรฐานเลขที่ มอก.109 มีค่าดังนี้

ค่ากำลังรับแรงอัดของอิฐบล็อกปูผนังไม่รับน้ำหนัก

ความกำลังรับแรงอัดต่ำสุด เมกะพาสคัล (เฉลี่ยจากพื้นที่รวม)	
เฉลี่ยจากอิฐบล็อกปูผนัง 5 ก้อน	อิฐบล็อกปูผนังแต่ละก้อน
2.5	2.0

4.3 ปริมาณความชื้น (เฉพาะคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ประเภทควบคุมความชื้น)

การหดตัวทางยาว ¹⁾ ร้อยละ	ความชื้นสูงสุด ร้อยละของการดูดกลืนน้ำทั้งหมด		
	ความชื้นสัมพัทธ์รายปีเฉลี่ย ร้อยละ ²⁾		
	น้อยกว่า 50	50 ถึง 75	มากกว่า 75
0.03 และ น้อยกว่า	35	40	45
มากกว่า 0.03 ถึง 0.045	30	35	40
มากกว่า 0.045	25	30	35

หมายเหตุ ¹⁾ ทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีทดสอบการหดแห้งของคอนกรีตบล็อก

²⁾ อาศัยสถิติตามประกาศของกรมอุตุนิยมวิทยา สำหรับสถานีใกล้เคียงแหล่งผลิตมากที่สุด





ภาคผนวก จ.1

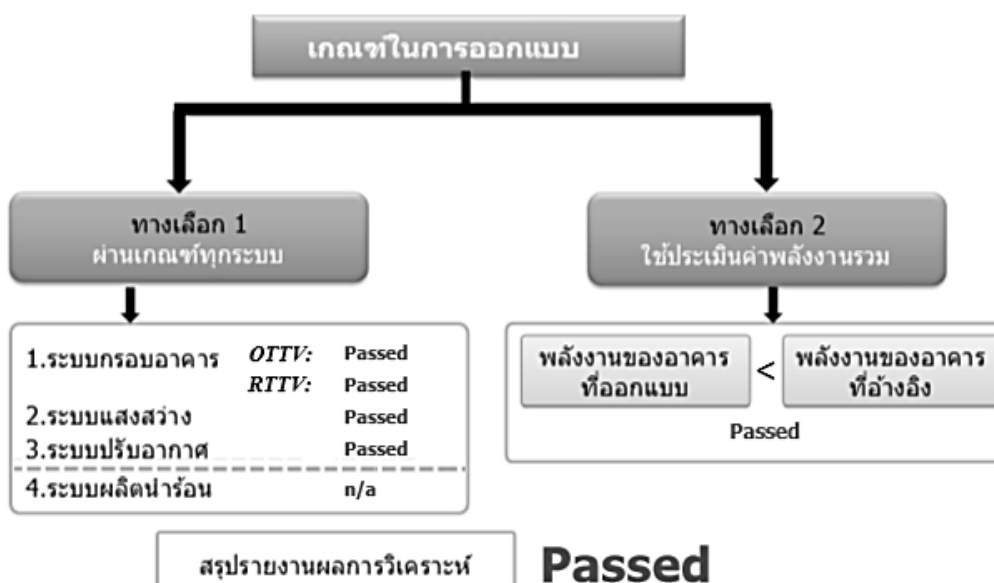
รายงานการประเมินอาคารโดยใช้โปรแกรม BEC ของบ้านแบบที่ 1



รายงานการประเมินอาคารโดยใช้โปรแกรม BEC

Building Information

Project Name : บ้าน
Building Type : Hotel & Hospital
Location : Bangkok

**Building Energy Consumption**

Building Energy Consumption :	5,409.69	kWh/Year
Energy from PV System :	0	kWh/Year
Net Energy Consumption (Evaluated Building) :	5,409.69	kWh/Year
Net Energy Consumption (Reference Building) :	13,998.59	kWh/Year
Building Energy Code Compliance :	Passed	

Building Envelope System

OTTV (All Zones) :	25.243	W/m ²
OTTV (A/C Zones) :	25.243	W/m ²
Code OTTV :	30.00	W/m ²
Building OTTV Status :	Passed	
RTTV (A/C Zones) :	3.578	W/m ²
Code RTTV :	10.00	W/m ²
Building RTTV Status :	Passed	

ภาคผนวก จ.2

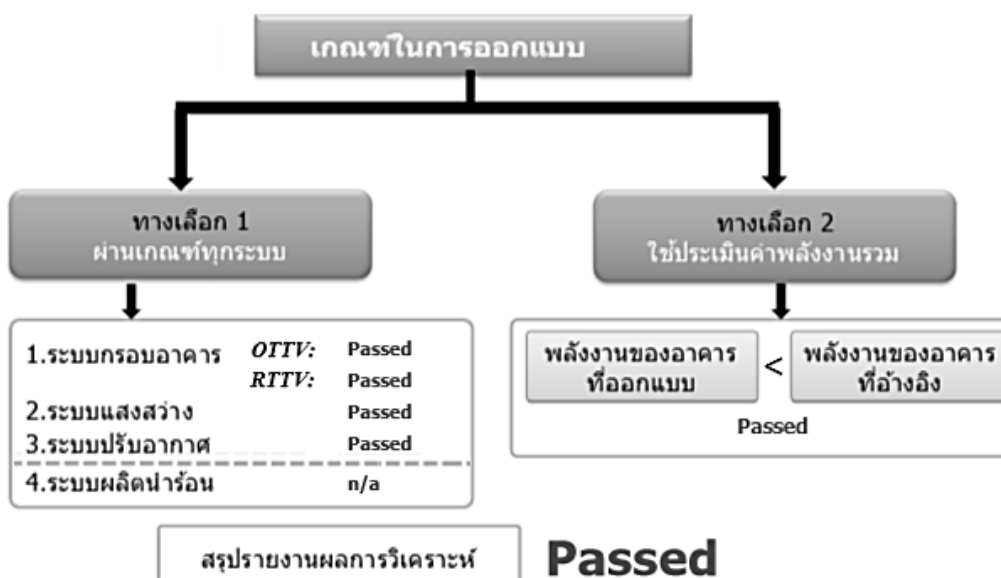
รายงานการประเมินอาคารโดยใช้โปรแกรม BEC ของบ้านแบบที่ 2



รายงานการประเมินอาคารโดยใช้โปรแกรม BEC

Building Information

Project Name : บ้าน(RW)
Building Type : Hotel & Hospital
Location : Bangkok

**Building Energy Consumption**

Building Energy Consumption :	4,793.55	kWh/Year
Energy from PV System :	0	kWh/Year
Net Energy Consumption (Evaluated Building) :	4,793.55	kWh/Year
Net Energy Consumption (Reference Building) :	13,998.59	kWh/Year
Building Energy Code Compliance :	<u>Passed</u>	

Building Envelope System

OTTV (All Zones) :	20.480	W/m ²
OTTV (A/C Zones) :	20.480	W/m ²
Code OTTV :	30.00	W/m ²
Building OTTV Status :	<u>Passed</u>	
RTTV (A/C Zones) :	3.563	W/m ²
Code RTTV :	10.00	W/m ²
Building RTTV Status :	<u>Passed</u>	

ภาคผนวก จ.3

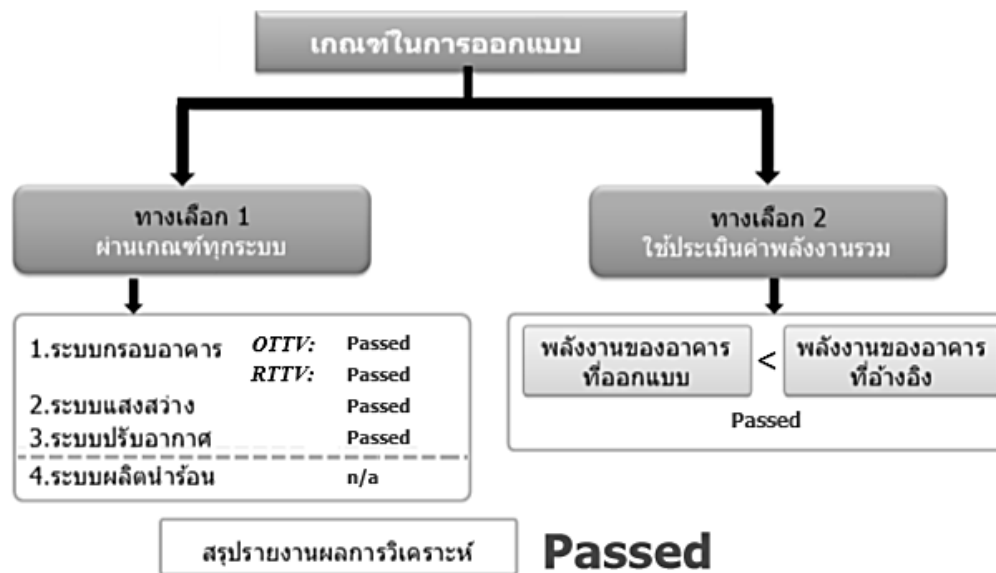
รายงานการประเมินอาคารโดยใช้โปรแกรม BEC ของบ้านแบบที่ 3



รายงานการประเมินอาคารโดยใช้โปรแกรม BEC

Building Information

Project Name : บ้าน(WSS)
Building Type : Hotel & Hospital
Location : Bangkok

**Building Energy Consumption**

Building Energy Consumption :	4,899.66	kWh/Year
Energy from PV System :	0	kWh/Year
Net Energy Consumption (Evaluated Building) :	4,899.66	kWh/Year
Net Energy Consumption (Reference Building) :	13,998.59	kWh/Year
Building Energy Code Compliance :	Passed	

Building Envelope System

OTTV (All Zones) :	21.301	W/m ²
OTTV (A/C Zones) :	21.301	W/m ²
Code OTTV :	30.00	W/m ²
Building OTTV Status :	Passed	
RTTV (A/C Zones) :	3.563	W/m ²
Code RTTV :	10.00	W/m ²
Building RTTV Status :	Passed	

ภาคผนวก จ.4

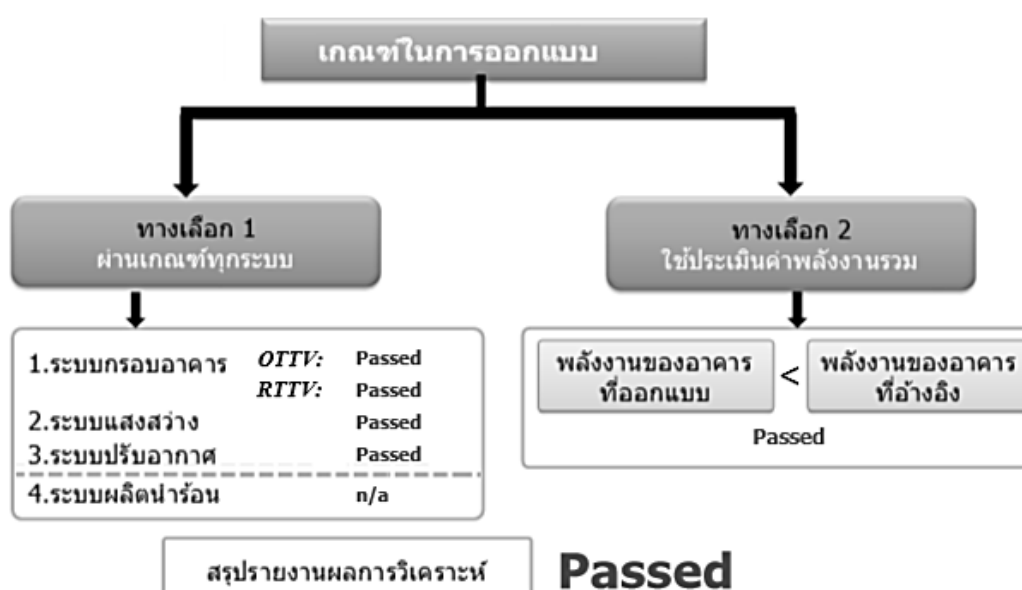
รายงานการประเมินอาคารโดยใช้โปรแกรม BEC ของบ้านแบบที่ 4



รายงานการประเมินอาคารโดยใช้โปรแกรม BEC

Building Information

Project Name : บ้าน(PCB)
Building Type : Hotel & Hospital
Location : Bangkok

**Building Energy Consumption**

Building Energy Consumption :	4,826.25	kWh/Year
Energy from PV System :	0	kWh/Year
Net Energy Consumption (Evaluated Building) :	4,826.25	kWh/Year
Net Energy Consumption (Reference Building) :	13,998.59	kWh/Year
Building Energy Code Compliance :	Passed	

Building Envelope System

OTTV (All Zones) :	20.733	W/m ²
OTTV (A/C Zones) :	20.733	W/m ²
Code OTTV :	30.00	W/m ²
Building OTTV Status :	Passed	
RTTV (A/C Zones) :	3.563	W/m ²
Code RTTV :	10.00	W/m ²
Building RTTV Status :	Passed	



ภาคผนวก ฉ.1 ตารางแสดงการคำนวณ ด้วยเครื่องมือการตัดสินใจทางเศรษฐศาสตร์ ในการผลิตกระแสเบืองหลังค้ำซีเมนต์

ปี	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1) ต้นผลตอบแทน										
1.1) ขายผลิตภัณฑ์	2,880,000.00	2,923,200.00	2,967,048.00	3,011,553.720	3,056,727.026	3,102,577.931	3,149,116.600	3,196,353.349	3,244,298.649	3,292,963.129
1.2) การประหยัดค่ากำจัดของเสีย	384,000.00	389,760.00	395,606.400	401,540.496	407,563.603	413,677.057	419,882.213	426,180.447	432,573.153	439,061.751
รวม(1)	3,264,000.00	3,312,960.00	3,362,654.400	3,413,094.216	3,464,290.629	3,516,254.989	3,568,998.814	3,622,533.796	3,676,871.803	3,732,024.880
2) ต้นทุน										
2.1) ต้นทุนคงที่										
ที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง	300,000.00									
เครื่องจักร อุปกรณ์	415,000.00									
รวม(2)	715,000.00									
2.2) ต้นทุนการดำเนินงาน										
บุคลากร 4 คน	432,000.00	442,800.00	453,870.000	465,216.750	476,847.169	488,768.348	500,987.557	513,512.246	526,350.052	539,508.803
วัตถุดิบ ปูน ของเสีย น้ำ พราย	2,260,800.00	2,294,712.00	2,329,132.68	2,364,069.67	2,399,530.72	2,435,523.68	2,472,056.53	2,509,137.38	2,546,774.44	2,584,976.06
ค่าพลังงาน ค่าไฟฟ้า	120,000.00	121,800.00	123,627.000	125,481.405	127,363.626	129,274.080	131,213.192	133,181.390	135,179.110	137,206.797
อุปกรณ์อื่นๆ	48,000.00	48,720.00	49,450.800	50,192.562	50,945.450	51,709.632	52,485.277	53,272.556	54,071.644	54,882.719
การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และ อุปกรณ์ป้องกันของพนักงาน	10,000.00	10,150.000	10,302.250	10,456.784	10,613.636	10,772.840	10,934.433	11,098.449	11,264.926	11,433.900
รวม(3)	2,870,800.00	2,918,182.00	2,966,382.730	3,015,417.171	3,065,300.596	3,116,048.577	3,167,676.989	3,220,202.019	3,273,640.172	3,328,008.275
อัตราคิดลด(=0.08) #(6.5+1.5)%	1.00	0.93	0.79	0.74	0.68	0.63	0.58	0.54	0.50	0.46
ผลตอบแทนสุทธิ(PVB)	3,022,222.22	2,840,329.22	2,669,383.48	2,508,726.14	2,357,737.99	2,215,837.09	2,082,476.53	1,957,142.29	1,839,351.32	1,728,649.62
ต้นทุนสุทธิ(PVC)	2,658,148.15	2,501,870.71	2,354,810.25	2,216,421.64	2,086,192.08	1,963,639.17	1,848,309.10	1,739,774.95	1,637,635.11	1,541,511.76
NPV = 3,218,674.63	364,074.07	338,458.50	314,573.23	292,304.50	271,545.91	252,197.93	234,167.43	217,367.34	201,716.21	187,137.86
B/C = 1.10										
IRR = 44%										
Pay back = 3 ปี 1 เดือน	(715,000.00)	(350,925.93)	302,105.81	594,410.31	865,956.22	1,118,154.14	1,352,321.57	1,569,688.91	1,771,405.12	1,958,542.98

ปี	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	รวม
1) ด้านผลตอบแทน											
1.1) ขยายผลิตภัณฑ์	3,342,357.576	3,392,492.940	3,443,380.334	3,495,031.039	3,547,456.504	3,600,668.352	3,654,678.377	3,709,498.553	3,765,141.031	3,821,618.147	
1.2) การประหยัดค่ากำจัดของเสีย	445,647.677	452,332.392	459,117.378	466,004.139	472,994.201	480,089.114	487,290.450	494,599.807	502,018.804	509,549.086	
รวม(1)	3,788,005.253	3,844,825.332	3,902,497.712	3,961,035.177	4,020,450.705	4,080,757.466	4,141,968.828	4,204,098.360	4,267,159.835	4,331,167.233	
2) ด้านต้นทุน											
2.1) ต้นทุนคงที่											
ที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง											
เครื่องจักร อุปกรณ์											
รวม(2)											
2.2) ต้นทุนการดำเนินงาน											
บุคลากร 2 คน	552,996.523	566,821.436	580,991.972	595,516.771	610,404.691	625,664.808	641,306.428	657,339.089	673,772.566	690,616.880	
วัตถุดิบ ปูน ของเสีย น้ำ พราย	2,623,750.70	2,663,106.96	2,703,053.56	2,743,599.37	2,784,753.36	2,826,524.66	2,868,922.53	2,911,956.36	2,955,635.71	2,999,970.25	
ค่าพลังงาน ค่าไฟฟ้า	139,264.899	141,553.872	143,474.181	145,626.293	147,810.688	150,027.888	152,278.266	154,562.440	156,880.876	159,234.089	
อุปกรณ์อื่นๆ	55,705.960	56,541.549	57,389.672	58,250.517	59,124.275	60,011.139	60,911.306	61,824.976	62,752.351	63,693.636	
การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และ อุปกรณ์ป้องกันของพนักงาน	11,605.408	11,779.489	11,956.182	12,135.524	12,317.557	12,502.321	12,689.855	12,880.203	13,073.406	13,269.507	
รวม(3)	3,383,323.487	3,439,603.305	3,496,865.569	3,555,128.472	3,614,410.567	3,674,730.772	3,736,108.382	3,798,563.072	3,862,114.909	3,926,784.358	
อัตราคิดลด($i=0.08$)	0.43	0.40	0.37	0.34	0.32	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	
#($6.5+1.5$)%											
ผลตอบแทนสุทธิ(PVB)	1,624,610.52	1,526,833.04	1,434,940.31	1,348,578.16	1,267,413.73	1,191,134.20	1,119,445.57	1,052,071.53	988,752.41	929,244.17	35,704,879.57
ต้นทุนสุทธิ(PVC)	1,451,049.45	1,365,913.80	1,285,790.21	1,210,382.74	1,139,412.95	1,072,618.88	1,009,754.09	950,586.72	894,898.62	842,484.54	32,486,204.94
NPV = 3,218,674.63	173,561.07	160,919.24	149,150.10	138,195.42	128,000.79	118,515.32	109,691.48	101,484.81	93,853.80	86,759.62	3,218,674.63
B/C = 1.10											1.10
IRR = 44%											44%
Pay back = 3 ปี 1 เดือน	2,132,104.05	2,293,023.30	2,442,173.39	2,580,368.81	2,708,369.60	2,826,884.92	2,936,576.40	3,038,061.21	3,131,915.01	3,218,674.63	3 ปี 1 เดือน

ภาคผนวก ข.2 ตารางแสดงการคำนวณ ด้วยเครื่องมือการตัดสินใจทางเศรษฐศาสตร์ ในการผลิตคอนกรีตบล็อกปูผนัง

ปี	0=ก่อสร้าง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1) ด้านผลตอบแทน											
1.1) ขยายผลิตภัณฑ์		1,680,000.00	1,705,200.00	1,730,778.00	1,756,739.67	1,783,090.76	1,809,837.12	1,836,984.68	1,864,539.45	1,892,507.54	1,920,895.15
1.2) การประหยัดค่ากำจัดของเสีย		384,000.00	389,760.00	395,606.40	401,540.49	407,563.60	413,677.07	419,882.21	426,180.44	432,573.15	439,061.75
รวม(1)		2,064,000.00	2,094,960.00	2,126,384.40	2,158,280.16	2,190,654.36	2,223,514.18	2,256,866.89	2,290,719.90	2,325,080.69	2,359,956.90
2) ด้านต้นทุน											
2.1) ต้นทุนคงที่											
ที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง	300,000.00										
เครื่องจักร อุปกรณ์	320,000.00										
รวม(2)	620,000.00										
2.2) ต้นทุนการดำเนินงาน											
บุคลากร 2 คน		216,000.00	221,400.00	226,935.00	232,608.37	238,423.58	244,384.17	250,493.78	256,756.12	263,175.02	269,754.40
วัตถุดิบ ปูน น้ำ ทரசย หินปูน		1,368,000.00	1,388,520.00	1,409,347.80	1,430,488.02	1,451,945.34	1,473,724.52	1,495,830.39	1,518,267.84	1,541,041.86	1,564,157.49
ค่าพลังงาน ค่าไฟฟ้า		120,000.00	121,800.00	123,627.00	125,481.40	127,363.62	129,274.08	131,213.19	133,181.39	135,179.11	137,206.79
อุปกรณ์อื่นๆ		48,000.00	48,720.00	49,450.80	50,192.56	50,945.45	51,709.62	52,485.27	53,272.56	54,071.64	54,882.71
การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และอุปกรณ์ป้องกันของพนักงาน		10,000.00	10,150.00	10,302.25	10,456.78	10,613.63	10,772.84	10,934.43	11,098.44	11,264.92	11,433.90
รวม(3)		1,762,000.00	1,790,590.00	1,819,662.85	1,849,227.14	1,879,291.63	1,909,865.24	1,940,957.06	1,972,576.35	2,004,732.56	2,037,435.30
อัตราคิดลด($=0.08$) $\#(6.5+1.5)\%$	1.00	0.93	0.86	0.79	0.74	0.68	0.63	0.58	0.54	0.50	0.46
ผลตอบแทนสุทธิ(PVB)	-	1,911,111.11	1,796,090.53	1,687,992.49	1,586,400.35	1,490,922.55	1,401,191.10	1,316,860.16	1,237,604.69	1,163,119.22	1,093,116.67
ต้นทุนสุทธิ(PVC)	620,000.00	1,631,481.48	1,535,142.32	1,444,507.04	1,359,237.15	1,279,014.31	1,203,539.07	1,132,529.80	1,065,721.63	1,002,865.39	943,726.76
NPV = 2,499,807.38	(620,000.00)	279,629.63	260,948.22	243,485.46	227,163.20	211,908.25	197,652.04	184,330.35	171,883.06	160,253.82	149,389.91
B/C = 1.12											
IRR = 38%											
Pay back = 3 ปี 4 เดือน	(620,000.00)	(340,370.37)	(79,422.15)	164,063.30	391,226.50	603,134.75	800,786.78	985,117.13	1,157,000.19	1,317,254.01	1,466,643.92

ภาคผนวก ฉ.2 ตารางแสดงการคำนวณ ด้วยเครื่องมือการตัดสินใจทางเศรษฐศาสตร์ ในการผลิตคอนกรีตบล็อกปูผนัง (ต่อ)

ปี	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	รวม
1) ต้นผลตอบแทน											
1.1) ขาดผลผลิต	1,949,708.586	1,978,954.215	2,008,638.528	2,038,768.106	2,069,349.628	2,100,389.872	2,131,895.720	2,163,874.156	2,196,332.268	2,229,277.252	
1.2) การประหยัดค่ากำจัดของเสีย	445,647.677	452,332.392	459,117.378	466,004.139	472,994.201	480,089.114	487,290.450	494,599.807	502,018.804	509,549.086	
รวม(1)	2,395,356.263	2,431,286.607	2,467,755.906	2,504,772.244	2,542,343.828	2,580,478.986	2,619,186.170	2,658,473.963	2,698,351.072	2,738,826.338	
2) ต้นต้นทุน											
2.1) ต้นทุนคงที่											
ที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง											
เครื่องจักร อุปกรณ์											
รวม(2)											
2.2) ต้นทุนการดำเนินงาน											
บุคลากร 2 คน	276,498.262	283,410.718	290,495.986	297,758.386	305,202.345	312,832.404	320,653.214	328,669.544	336,886.283	345,308.440	
วัสดุปั๊ม น้ำ ทราช หินปูน	1,587,619.85	1,611,434.15	1,635,605.66	1,660,139.74	1,685,041.84	1,710,317.47	1,735,972.23	1,762,011.81	1,788,441.99	1,815,268.62	
ค่าพลังงาน ค่าไฟฟ้า	139,264.899	141,353.872	143,474.181	145,626.293	147,810.688	150,027.848	152,278.266	154,562.440	156,880.876	159,234.089	
อุปกรณ์อื่นๆ	55,705.960	56,541.549	57,389.672	58,250.517	59,124.275	60,011.139	60,911.306	61,824.976	62,752.351	63,693.636	
การซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และ อุปกรณ์ป้องกันของพนักงาน	11,605.408	11,779.489	11,956.182	12,135.524	12,317.557	12,502.321	12,689.855	12,880.203	13,073.406	13,269.507	
รวม(3)	2,070,694.377	2,104,519.775	2,138,921.679	2,173,910.464	2,209,496.705	2,245,691.179	2,282,504.871	2,319,948.976	2,358,034.906	2,396,774.292	
อัตราคิดลด($i=0.08$) #(6.5+1.5)%	0.43	0.40	0.37	0.34	0.32	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	
ผลตอบแทนสุทธิ(PVB)	1,027,327.24	965,497.36	907,388.73	852,777.37	801,452.80	753,217.22	707,884.70	665,280.53	625,240.50	587,610.28	22,578,085.61
ต้นทุนสุทธิ(PVC)	888,085.33	835,733.76	786,477.06	740,131.82	696,525.51	655,495.85	616,890.20	580,564.98	546,385.14	514,223.63	20,078,278.22
NPV = 2,499,807.38	139,241.92	129,763.60	120,911.66	112,645.55	104,927.29	97,721.37	90,994.50	84,715.55	78,855.36	73,386.65	2,499,807.38
B/C = 1.12											1.12
IRR = 38%											38%
Pay back = 3 ปี 4 เดือน	1,605,885.84	1,735,649.44	1,856,561.11	1,969,206.65	2,074,133.95	2,171,855.32	2,262,849.82	2,347,565.37	2,426,420.73	2,499,807.38	3 ปี 4 เดือน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปาณิสรา นามจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2537 ที่จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2559

การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

Namchan, P., Denpetkul, T., Pheinsusom, P., and Khaodhiar, S. 2018. Rock wool and printed circuit boards (PCBs) as partial fine aggregate replacements in cement mortar. Proceedings of the 8th International Conference on Key Engineering Materials, Osaka, Japan, 16-18 March 2018, pp. 42.

ปาณิสรา นามจันทร์, ดวงสิทธิ์ เต๋นเพชรกุล, พูลศักดิ์ เพียรสุขสม และ สุธา ขาวเขียว. 2561. การใช้ตะกอนจากโรงผลิตน้ำประปาเป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียดในการผลิตคอนกรีตบล็อก. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 17, จังหวัดอุดรธานี, ประเทศไทย, 24-25 พฤษภาคม 2561, หน้า 109-110.