

การใช้เศษแก้วในการทำอิฐคอนกรีตเพื่อใช้เป็นทางเลือกในการจัดการเศษแก้วในเกาะสีชัง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE USE OF WASTE GLASS TO PRODUCE CONCRETE BRICKS AS AN ALTERNATIVE  
WASTE GLASS MANAGEMENT IN SI CHANG ISLAND



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science  
Inter-Department of Environmental Science  
Graduate School  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2018  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เศษแก้วในการทำอิฐคอนกรีตเพื่อใช้เป็นทางเลือกในการจัดการเศษแก้วในเกาะสีชัง
โดย	น.ส.หทัยชนก วันเพ็ญ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.นุตา ศุภคต
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมยิ้ม)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.นุตา ศุภคต)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อนุชา วรรณก้อน)	

หทัยชนก วันเพ็ญ : การใช้เศษแก้วในการทำอิฐคอนกรีตเพื่อใช้เป็นทางเลือกในการจัดการเศษแก้วในเกาะสีชัง. ( THE USE OF WASTE GLASS TO PRODUCE CONCRETE BRICKS AS AN ALTERNATIVE WASTE GLASS MANAGEMENT IN SI CHANG ISLAND) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.นุตา ศุภคต, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.วรพจน์ กนกกันตพงษ์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวม และระยะเวลาบ่มในการผลิตอิฐคอนกรีต รวมทั้งประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการเศษแก้วบนเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี การใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมที่ทำการศึกษา คือ ร้อยละ 0 10 20 30 และ 100 ระยะเวลาบ่มที่ 7 14 และ 28 วัน และมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.150 ถึง 4.75 มิลลิเมตร จากการศึกษาคุณสมบัติของอิฐคอนกรีตพบว่า การใช้เศษแก้วแทนที่ทรายหยาบร้อยละ 20 บ่มที่ 28 วัน ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด (48.49 เมกะปาสคาล) และให้การดูดซึมน้ำต่ำที่สุด (5.35%) ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเศษแก้ว (ร้อยละ 0) และบ่มที่ 28 วัน ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 45.06 เมกะปาสคาล (สูงกว่าร้อยละ 7.61) จากการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์โดยโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ใช้วิธี Eco-indicator 99 พิจารณาตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และการผลิต พบว่าอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วแทนที่ทรายหยาบร้อยละ 20 (1.33 Pt) มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าอิฐคอนกรีตทั่วไป (1.56 Pt) และสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ร้อยละ 17.3 (ต่อการใช้งาน 1 ตารางเมตร) และจากการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าจุดคุ้มทุนของการนำเศษแก้วมาใช้ในการผลิตอิฐคอนกรีตเท่ากับ 233,333 ก้อน และระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 17 เดือน ดังนั้น เศษแก้วสามารถใช้แทนที่มวลรวมบางส่วนในการผลิตอิฐคอนกรีต และสามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการจัดการเศษแก้วได้

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5987223220 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Concrete Brick, Waste Glass, Life Cycle Assessment, Koh Sichang

Hathaichanok Warnphen : THE USE OF WASTE GLASS TO PRODUCE CONCRETE BRICKS AS AN ALTERNATIVE WASTE GLASS MANAGEMENT IN SI CHANG ISLAND.

Advisor: Assoc. Prof. NUTA SUPAKATA, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Vorapot Kanokkantapong, Ph.D.

The objectives of this research are to manage waste glass in Koh Sichang, Chonburi province, used as a partial fine aggregate replacement in concrete bricks production, and evaluate Life Cycle Assessment (LCA) between concrete bricks using waste glass as aggregate replacement and normal concrete bricks. Also, estimate Economic Feasibility. An experimental approach aimed to determine the level of waste glass replacement for the optimal compressive strength. Five samples of 0, 10, 20, 30 and 100% waste glass aggregates by weight were test at 7, 14 and 28 days and using a particle size about 0.150 to 4.75 mm. The experimental result showed that the compressive strength was improved by increments in replacing waste glass up to 20%. Especially, The compressive strength of concrete brick was 20% by weight which had the highest value (48.49 MPa at 28 days) and the lowest water absorption (5.35%). The LCA results by SimaPro 8.3, show that concrete bricks with 20% waste glass had lower environmental impacts than normal concrete bricks reducing environmental impacts 17.3% (per 1 square meter usage). According to the economic value assessment, It was found that the break-even point was 233,333 units and the payback period was 17 months. Therefore, waste glass can be used as a partial fine aggregate for producing concrete bricks and it can be employed as an alternative material for waste glass management.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นุตา ศุภคต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ และช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นด้วยความเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด ตั้งแต่ต้นจนเสร็จสมบูรณ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สำหรับคำแนะนำ การดูแลเอาใจใส่และการช่วยเหลือที่ตลอดมา

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมยิ้ม ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์กรรมการในการสอบ และดร.อนุชา วรรณก้อน กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย สำหรับคำปรึกษา คำแนะนำ และความคิดเห็นต่าง ๆ ในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ในหลักสูตรที่คอยให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณโปรแกรมวิจัย Municipal Solid Waste and Hazardous Waste Management Program HSM-PJ-CT-17-02 สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำการวิจัย และเจ้าหน้าที่ประจำภาคที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้อุปกรณ์ และเครื่องมือในการเตรียมและทดสอบตัวอย่าง รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาที่ให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ และให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเทศบาลตำบลเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์พิเศษแก้ว เพื่อใช้เป็นวัตถุติดในการทดลอง และให้การสนับสนุนด้านข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์

และท้ายสุดขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ สำหรับคำปรึกษาและกำลังใจที่ดีตลอดมา จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

หทัยชนก วันเพ็ญ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 คำนิยามศัพท์.....	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 แกะสีซัง.....	6
2.1.1.1 ข้อมูลทั่วไปของแกะสีซัง.....	6
2.1.1.2 ปัญหามูลฝอยบนแกะสีซัง.....	7
2.1.2 แก้ว (Waste Glass).....	8
2.1.2.1 แก้วโซดาไลม์ (Soda Lime Glass).....	9
2.1.3 คอนกรีต (Concrete).....	11

2.1.3.1 องค์ประกอบของคอนกรีต.....	11
2.1.3.2 ประเภทของคอนกรีต.....	17
2.1.3.3 กระบวนการทำคอนกรีต.....	18
2.1.3.4 การบ่มคอนกรีต (Concrete Curing).....	19
2.1.3.5 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้อง.....	22
2.1.4 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials).....	24
2.1.4.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน.....	26
2.1.5 คุณสมบัติของคอนกรีต.....	26
2.1.5.1 การรับแรงอัด (Compressive Strength).....	26
2.1.5.2 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	27
2.1.5.3 ความหนาแน่น (Density).....	27
2.1.6 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA).....	28
2.1.6.1 ความหมายและหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	28
2.1.6.2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	29
2.1.7 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility).....	38
2.1.7.1 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break Even Point Analysis).....	38
2.1.7.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period).....	39
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	49
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับการวิจัย.....	49
3.1.1 วัสดุสำหรับการวิจัย.....	49
3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับการวิจัย.....	49
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	51
3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการทำวิจัย.....	51



3.2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ.....	51
3.2.2.1 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) และโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของทรายหยาบและเศษแก้ว .....	51
3.2.2.2 ศึกษาความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของทรายหยาบและเศษแก้ว.....	52
3.2.2.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของทรายหยาบและเศษแก้วด้วยเครื่องวิเคราะห์ โดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry: XRF) เพื่อวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุ.....	52
3.2.2.4 ศึกษาสารประกอบทางเคมีของทรายหยาบและเศษแก้วด้วยเครื่องวิเคราะห์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบที่มีอยู่ภายใน.....	52
3.2.3 การเตรียมตัวอย่างในการผลิตอิฐคอนกรีต .....	53
3.2.4 การศึกษาคุณสมบัติของอิฐคอนกรีต .....	54
3.2.4.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength).....	54
3.2.4.2 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption).....	55
3.2.4.3 ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีต.....	55
3.2.4.4 สารประกอบภายในอิฐคอนกรีต โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Driffraction).....	56
3.2.4.5 โครงสร้างของอิฐคอนกรีต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) .....	56
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	56
3.3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของอิฐคอนกรีต .....	56
3.3.2 การวิเคราะห์การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) .....	56
3.3.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้ว.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	62

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง .....	62
4.1.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) และโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของทรายหยาบและเศษแก้ว.....	62
4.1.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของทรายหยาบและเศษแก้ว .....	63
4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ทรายหยาบและเศษแก้ว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry: XRF).....	64
4.1.4 สารประกอบทางเคมีของทรายหยาบและเศษแก้ว ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD).....	64
4.1.5 ลักษณะทางกายภาพของทรายหยาบและเศษแก้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) .....	66
4.2 การศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของอิฐคอนกรีต .....	66
4.2.1 ผลของกำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีต .....	66
4.2.2 ผลของการดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีต.....	69
4.2.3 ผลของความหนาแน่นของอิฐคอนกรีต.....	73
4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของอิฐคอนกรีต .....	75
4.3.1 สารประกอบทางเคมีของอิฐคอนกรีต ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD).....	75
4.3.2 ลักษณะทางกายภาพของอิฐคอนกรีต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM).....	78
4.4 การประเมินวัฏจักรชีวิตของอิฐคอนกรีตจากเศษแก้วและอิฐคอนกรีตทั่วไป .....	82
4.4.1 การวิเคราะห์บัญชีรายการ.....	82
4.4.1.1 การได้มาของวัตถุดิบ .....	83
4.4.1.2 การขนส่ง .....	83
4.4.1.3 การเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีต.....	84

4.4.2 ผลจากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม .....	85
4.4.2.1 ผลการประเมินการได้มาของวัตถุดิบ .....	85
4.4.2.2 ผลการประเมินการขนส่ง.....	90
4.4.2.3 ผลการประเมินการเตรียมวัตถุดิบ และผลิตอิฐคอนกรีต .....	95
4.4.2.4 ผลการประเมินในทุกกระบวนการ .....	99
4.4.3 การแปลผล และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ (Interpretation).....	104
4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้ว .....	105
4.5.1 จุดคุ้มทุน (The Breakeven Point: Q).....	107
4.5.2 ระยะเวลาคืนทุน (The Payback Period).....	107
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	108
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	108
บรรณานุกรม.....	110
ภาคผนวก ก.....	117
ภาคผนวก ข.....	118
ภาคผนวก ค.....	121
ภาคผนวก ง .....	124
ภาคผนวก จ.....	130
ภาคผนวก ฉ.....	131
ประวัติผู้เขียน.....	135

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วโซดาไลม์.....	10
ตารางที่ 2.2 สมบัติของแก้วโซดาไลม์.....	10
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพอลิโซลันตามมาตรฐาน ASTM C618 .....	25
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิโซลันตามมาตรฐาน ASTM C618.....	25
ตารางที่ 2.5 การแทนที่ของเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่มของอิฐคอนกรีต .....	46
ตารางที่ 3.1 ตำรับการทดลอง (อัตราส่วนผสม) .....	54
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ทรายหยาบและเศษแก้ว .....	64
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดและการจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% .....	69
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของการดูดซึมน้ำและการจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ..	72
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นและการจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	75
ตารางที่ 4.5 บัญชีรายการของการขนส่งวัสดุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐคอนกรีต และอิฐคอนกรีตทั่วไป .....	84
ตารางที่ 4.6 บัญชีรายการของกระบวนการผลิตอิฐคอนกรีต และอิฐคอนกรีตทั่วไป.....	84
ตารางที่ 4.7 ค่าเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาของวัสดุดิบจากขั้นตอนการ จำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization).....	87
ตารางที่ 4.8 ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการได้มาของวัสดุดิบ .....	89
ตารางที่ 4.9 ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการได้มาของวัสดุดิบ .....	90
ตารางที่ 4.10 ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการขนส่งจาก ขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization).....	91
ตารางที่ 4.11 ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการขนส่ง .....	93

ตารางที่ 4.12	ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการขนส่ง .....	94
ตารางที่ 4.13	ค่าเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีตจากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization).....	95
ตารางที่ 4.14	ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีต .....	96
ตารางที่ 4.15	ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีต .....	98
ตารางที่ 4.16	ค่าเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของทุกระบวนการ จากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization).....	102
ตารางที่ 4.17	ค่าเปรียบเทียบผลของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของทุกระบวนการ .....	103
ตารางที่ 4.18	ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) ของการผลิตอิฐคอนกรีต .....	105
ตารางที่ 4.19	การคำนวณหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ .....	107
ตารางที่ ข.1	กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 7 วัน.....	118
ตารางที่ ข.2	กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 14 วัน .....	118
ตารางที่ ข.3	กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 28 วัน .....	118
ตารางที่ ข.4	การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 7 วัน .....	119
ตารางที่ ข.5	การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 14 วัน .....	119
ตารางที่ ข.6	การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 28 วัน .....	119
ตารางที่ ข.7	ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 7 วัน .....	120
ตารางที่ ข.8	ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 14 วัน.....	120
ตารางที่ ข.9	ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 28 วัน.....	120

ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลบัญชีรายการของการได้มาของวัตถุดิบ (ต่อการผลิต 50 ก้อน).....	131
ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลบัญชีรายการของการขนส่ง (ต่อการผลิต 50 ก้อน).....	132
ตารางที่ ฉ.3 ข้อมูลบัญชีรายการของการผลิต (ต่อการผลิต 50 ก้อน).....	134



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะอสัณฐานควอตซ์และแก้ว .....	8
รูปที่ 2.2 ชื่อเรียกเฉพาะตามองค์ประกอบของคอนกรีต .....	11
รูปที่ 2.3 ชื่อเรียกรูปแบบมวลรวม .....	16
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการกระจายขนาดของมวลรวม .....	17
รูปที่ 2.5 กรอบการดำเนินงาน LCA จากอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 .....	30
รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของกระดาษ .....	33
รูปที่ 3.1 เศษแก้วที่ใช้ในการศึกษา .....	50
รูปที่ 3.2 ทราหยาบที่ใช้ในการศึกษา .....	50
รูปที่ 3.3 ขนาดอิฐคอนกรีต 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร .....	53
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผลิตอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้ว .....	58
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไป (ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว) .....	58
รูปที่ 3.6 ส่วนที่ 1 ขั้นตอนการผลิตอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้ว .....	60
รูปที่ 3.7 ส่วนที่ 2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบระหว่างอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วกับการผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไป (ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว) .....	61
รูปที่ 3.8 ส่วนที่ 3 ขั้นตอนการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ .....	61
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของทรายหยาบและเศษแก้ว .....	63
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทรายหยาบจากเครื่อง XRD .....	65
รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเศษแก้วจากเครื่อง XRD .....	65
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของทรายหยาบ .....	66
รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของเศษแก้ว .....	66
รูปที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีต .....	67
รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น/ลดลงเปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว .....	68

รูปที่ 4.8	การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีต.....	70
รูปที่ 4.9	การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น/ลดลงเปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว ...	71
รูปที่ 4.10	ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีต .....	73
รูปที่ 4.11	ความหนาแน่นที่ลดลงเปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว.....	74
รูปที่ 4.12	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างอิฐคอนกรีตจากเครื่อง XRD.....	78
รูปที่ 4.13	ภาพตัดขวางของอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 28 วัน.....	80
รูปที่ 4.14	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัย ..	86
รูปที่ 4.15	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไป .....	86
รูปที่ 4.16	เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป.....	87
รูปที่ 4.17	เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐ คอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป .....	89
รูปที่ 4.18	เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป.....	90
รูปที่ 4.19	เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการขนส่งในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป.....	92
รูปที่ 4.20	เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการขนส่งในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป .....	93
รูปที่ 4.21	เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการขนส่งในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป.....	94
รูปที่ 4.22	เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีตในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป .....	96
รูปที่ 4.23	เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป.....	97
รูปที่ 4.24	เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป.....	98



รูปที่ 4.25	เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของทุกกระบวนการ .....	99
รูปที่ 4.26	เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของทุกกระบวนการ .....	100
รูปที่ 4.27	เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของทุกกระบวนการ .....	100
รูปที่ ค.1	วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย .....	121
รูปที่ ค.2	อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย .....	122
รูปที่ ค.3	อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย .....	123



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันขยะชุมชนของประเทศไทย (Municipal Solid Waste) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี เป็นปัญหามลพิษที่มีความสำคัญอันดับต้น ๆ ของประเทศ เนื่องมาจากการพัฒนาด้านความเป็นเมือง ของชุมชน จำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตของชุมชนขยายวงกว้างอย่างรวดเร็ว รวมไปถึง พฤติกรรมการบริโภคของประชาชนที่เปลี่ยนแปลงไป มีการใช้บรรจุภัณฑ์ฟุ่มเฟือยมากขึ้น เกิดการใช้ ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด ในการอุปโภค บริโภค ไม่ว่าจะเป็นการนำไปทำเป็นวัตถุดิบใน การผลิตอาหาร บรรจุภัณฑ์ รวมไปถึงในการก่อสร้าง ทำให้เกิดการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติ รวมไปถึงการขาดแคลนสถานที่กำจัดหลังจากการใช้งาน (ควบคุมมลพิษ, 2551)

ในปี พ.ศ.2559 มีขยะชุมชนเกิดขึ้นทั่วประเทศ ประมาณ 27.04 ล้านตัน (หรือประมาณ 74,073 ตันต่อวัน) ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ.2558 ประมาณ 190,000 ตัน (ร้อยละ 0.7) โดยพบว่า จังหวัดชลบุรี เป็นจังหวัดที่มีขยะเกิดขึ้นต่อวันมากเป็นอันดับที่สองของประเทศ เฉลี่ยวันละ 3,000 ตัน รองจากกรุงเทพมหานคร มีปริมาณ 11,500 ตันต่อวัน (สำนักงานประชาสัมพันธ์จังหวัดชลบุรี, 2560) ซึ่งมีเพียงร้อยละ 36 ของขยะที่เก็บได้เท่านั้นที่นำไปกำจัดที่สถานที่กำจัดได้อย่างถูกต้อง ส่วนอีก ร้อยละ 43 ถูกกำจัดที่สถานที่กำจัดไม่ถูกต้อง เช่น การเผากลางแจ้ง การเทกองทิ้งบริเวณบ่อดินเก่า หรือพื้นที่รกร้าง และมีเพียงร้อยละ 21 ที่มีการนำกลับมาใช้ประโยชน์ (ควบคุมมลพิษ, 2560) โดย พบว่าปัญหาด้านการจัดการขยะชุมชนของจังหวัดชลบุรีกำลังทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากระบบ กำจัดขยะที่มีอยู่ในพื้นที่จังหวัดชลบุรีเป็นระบบแบบฝังกลบจึงมีข้อจำกัดด้านพื้นที่ จากปัญหาขยะที่มี ปริมาณสะสมเป็นจำนวนมาก และขาดการจัดการให้ถูกต้องนี้เอง ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสุขอนามัยของประชาชน ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางดิน น้ำ อากาศ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของเชื้อโรค ทัศนียภาพเสื่อมโทรม เป็นต้น (ปิยชาติ ศิลปะสุวรรณ, 2557)

เกาะสีชัง เป็นเกาะที่มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ และการท่องเที่ยวแห่งหนึ่งของจังหวัด ชลบุรี เนื่องจากเป็นสถานที่พักผ่อนที่เงียบสงบ อากาศบริสุทธิ์ มีธรรมชาติอันงดงาม โดยมีพื้นที่รวม พื้นที่ทะเลรวมทั้งสิ้น 25.61 ตารางกิโลเมตร และยังมีท่าเรือที่จอดเรือขนส่งสินค้าเพราะ มีลมสงบ และเกาะเป็นที่กำบังลมได้อย่างดี พื้นที่ทะเลของเกาะสีชัง มีความลึกของระดับน้ำทะเลที่เหมาะสมแก่ การทอดสมอเรือทำให้เป็นศูนย์กลางการถ่ายสินค้ากลางทะเล จึงทำให้มีการใช้พื้นที่บริเวณรอบเกาะ และบนเกาะสีชังเพื่อพาณิชย์กรรมและการท่องเที่ยวอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีเรือชนิดต่าง ๆ เช่น เรือบรรทุกสินค้า เรือลำเลียงสินค้า (เรือโปะ) เรือยนต์ลากจูง เรือประมง เรือท่องเที่ยว และเรือ

โดยสารเป็นจำนวนมาก เฉลี่ยวันละประมาณ 400–500 ลำ ทำให้เกิดปัญหาขยะที่เทศบาลตำบลเกาะสีชังต้องรับนำมากำจัดด้วยเตาเผา (Incinerator) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสภาพพื้นที่เป็นหินไม่สามารถขุดหลุมฝังกลบได้ ซึ่งขยะที่รับมาเป็นขยะอุปโภค-บริโภคในชีวิตประจำวัน ประมาณ 10–15 ตันต่อวัน ประกอบกับขยะที่เกิดขึ้นบนเกาะอีกประมาณ 10–15 ตันต่อวัน รวมทั้งสิ้น 20–30 ตันต่อวัน (นฤมล รัตนสุวรรณ, 2559) โดยพบว่าขยะที่ย่อยสลายได้มีปริมาณมากที่สุด ร้อยละ 40 รองลงมา คือ พลาสติกร้อยละ 20 ขวดแก้วร้อยละ 10 กระดาษร้อยละ 10 และอื่นๆ ร้อยละ 20 ตามลำดับ(เทศบาลตำบลเกาะสีชัง, 2557) ปัญหาของเศษแก้วที่พบบนเกาะสีชัง คือ ร้านรับซื้อของเก่าบนเกาะไม่รับซื้อขวดแก้ว ยกเว้นศูนย์บริหารจัดการขยะชุมชน เนื่องจากแก้วมีน้ำหนักมากและราคาถูก จึงไม่คุ้มค่าในการขนส่งไปขายที่จังหวัดชลบุรี ทำให้มีเศษแก้วตกค้างอยู่บนลานเทกองเป็นจำนวนมาก (จรรยา พันธมา, 2559) ซึ่งเศษแก้วเป็นขยะชนิดย่อยสลายไม่ได้ ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการเผา และไม่สามารถรีไซเคิลได้บนเกาะสีชัง ดังนั้นเศษแก้วจึงเป็นขยะที่มีปัญหามากที่สุดที่ทางเทศบาลตำบลเกาะสีชังต้องการหาแนวทางกำจัด จึงต้องมีการศึกษาหาแนวทางในการนำเศษแก้วบนเกาะสีชังมาใช้ประโยชน์ และจากการศึกษาของ Taha และ Nounu (2008) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของแก้ว พบว่าองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) โดยมีปริมาณร้อยละ 72.1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับทราย โดยทรายมีปริมาณร้อยละ 78.6 จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำแก้วมามาใช้แทนทรายในการผลิตคอนกรีต

คอนกรีต เป็นวัสดุผสมที่นำมาใช้ในงานก่อสร้าง ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หิน กรวด หรือทราย) และน้ำ ซึ่งความต้องการใช้คอนกรีตในงานก่อสร้างที่มีจำนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเจริญเติบโตของชุมชน และเศรษฐกิจ ทำให้ทราย กรวด และหินถูกนำมาใช้เป็นมวลรวม (Aggregate) ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งทราย กรวด และหิน เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัด (วีรยต์ม เฉลิมพนธ์, 2560) จึงทำให้มีการศึกษาหาวัสดุทางเลือกที่สามารถนำมาทดแทนทรัพยากรธรรมชาติได้

จากงานวิจัยของ Ismail และ Al-Hashmi (2009) เปรียบเทียบเศษแก้วและทราย พบว่าเศษแก้วมีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายกับทราย ทั้งความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และความหนาแน่น (Density) แต่การดูดซับ (Absorption) เศษแก้วมีค่าต่ำกว่าประมาณ 14% (ทรายมีค่าเท่ากับ 2.71 ส่วนแก้วมีค่าเท่ากับ 0.39) ดังนั้นคอนกรีตที่ทำจากเศษแก้วจะมีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำ จึงเป็นส่วนที่น่าสนใจที่จะนำเศษแก้วมาเป็นวัตถุดิบแทนที่มวลรวมในการผลิตคอนกรีต Hooi และ Min (2017) นำเศษแก้วแบบใสและแบบมีสี มาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมี โดยเทคนิค X-Ray Fluorescence พบว่าทั้งเศษแก้วแบบใสและแบบมีสี มีส่วนประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เหมือนกัน และสารประกอบบางตัวแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงสามารถใช้แทนกัน หรือรวมกันได้

Limbachiya (2009) ศึกษาคุณสมบัติและความทนทานของคอนกรีต โดยใช้เศษแก้วแทนที่ทรายหยาบร้อยละ 0, 15, 20, 30 และ 50 พบว่าการใช้เศษแก้วแทนที่ทรายหยาบต่ำกว่าร้อยละ 20 จะไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) และจากการศึกษาของ Batayneh, Marie และ Asi (2007), Degirmenci, Yilmaz และ Cakir (2011), Ali และ Al-Tersawy (2012) ที่นำเศษแก้วมาแทนที่มวลรวม ก็พบว่าการแทนที่ต่ำกว่าร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด

ในแต่ละกระบวนการการผลิตนั้น ก็มีการใช้ทรัพยากรและพลังงาน และมีการปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการที่จะทราบได้ว่าในแต่ละกระบวนการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ยังไงก็สามารถวิเคราะห์และประเมินได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment) ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง การใช้ การนำกลับมาใช้ใหม่ และการจัดการหลังการใช้งานได้

Giama และ Papadopoulos (2015) ประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์สิ่งก่อสร้าง เช่น เหล็ก ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ อิฐ มวลรวม คอนกรีต เป็นต้น กำหนดขอบเขตการศึกษาแบบ Cradle to Gate และมีหน่วยการทำงาน (Functional Unit) เท่ากับ 1 กิโลกรัมของการผลิต ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด คือ กระบวนการผลิต โดยเฉพาะกระบวนการผลิตเหล็ก ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และมวลรวม

Hossain *et al.* (2016) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการจัดการเศษแก้ว โดยการนำเศษแก้วมาผลิตเป็นมวลรวม เพื่อใช้ในการก่อสร้างเปรียบเทียบกับการผลิตมวลรวมจากธรรมชาติของฮ่องกง กำหนดขอบเขตการศึกษาแบบ Cradle to Gate โดยมีหน่วยการทำงาน (Functional Unit) เท่ากับ 1 ตันของเศษแก้ว จากผลการศึกษาพบว่าการนำเศษแก้วมาผลิตแทนที่มวลรวม ทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงร้อยละ 59

อย่างไรก็ตาม พบว่ายังไม่มีการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment) ของการใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมในการผลิตอิฐคอนกรีต และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำเศษแก้วมาผลิตเป็นอิฐคอนกรีต

ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาการนำเศษแก้วมาทดแทนทรายหยาบซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง และเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาขยะเศษแก้วบนเกาะสีชัง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำเศษแก้วบนเกาะสีชังมาผลิตเป็นอิฐคอนกรีต โดยศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ การแทนที่ของเศษแก้ว และระยะเวลาที่เหมาะสมในการบ่ม คุณสมบัติทางกายภาพของอิฐคอนกรีต ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น จากนั้นทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการนำเศษแก้วมาผลิตอิฐคอนกรีต เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำเศษแก้วมาผลิตเป็นอิฐคอนกรีต ซึ่งเป็นการนำ

ของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ ช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนและระยะเวลาของการบ่มในการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้วที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น

1.2.2 เพื่อประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA) ของอิฐคอนกรีตจากเศษแก้ว

1.2.3 เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำเศษแก้วมาผลิตอิฐคอนกรีต

## 1.3 สมมติฐานการวิจัย

แก้วสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนทรายหยาบในการผลิตอิฐคอนกรีต และสามารถใช้เป็นทางเลือกในการจัดการขยะเศษแก้วบนเกาะสี่ซังได้

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 เศษแก้ว จากเทศบาลตำบลเกาะสี่ซัง

1.4.2 ศึกษาองค์ประกอบของทรายหยาบและเศษแก้ว โดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) และศึกษาสารประกอบทางเคมีของทรายและเศษแก้ว โดยใช้เทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

1.4.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของทรายหยาบและเศษแก้ว โดยศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) ความละเอียดโมดูลัส (Fineness Modulus) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (Absorption)

1.4.4 ศึกษาการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมของอิฐคอนกรีต ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทดสอบหากล้างรับแรงอัด (Compressive Strength) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และความหนาแน่น (Density)

1.4.5 ศึกษาโครงสร้างภายใน และองค์ประกอบของอิฐคอนกรีต โดยใช้ Scanning Electron Microscopy (SEM) และ X-Ray Diffractometer (XRD)

1.4.6 ประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA) ของอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วที่มีคุณสมบัติทางกายภาพดีที่สุด เปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตทั่วไป เป้าหมายและขอบเขตการประเมินผลกระทบเริ่มตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง และการผลิต เรียกว่า “Cradle to Gate”

1.4.7 ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility) ของอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้ว โดยการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และระยะเวลาในการผลิต

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถใช้เศษแก้วทดแทนทรายหยาบในการผลิตอิฐคอนกรีตได้

1.5.2 สามารถใช้เป็นทางเลือกในการจัดการเศษแก้ว โดยการนำมารีไซเคิลผลิตเป็นอิฐคอนกรีตสำหรับการก่อสร้างบนเกาะสีชังได้

1.5.3 สามารถใช้เป็นแนวทางและข้อมูลสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษาเกี่ยวกับการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้วต่อไป

## 1.6 คำนิยามศัพท์

อิฐคอนกรีต = อิฐคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ/หรือ ทรายหยาบ และ/หรือเศษแก้ว และน้ำ มีขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 เกาะสีซัง

##### 2.1.1.1 ข้อมูลทั่วไปของเกาะสีซัง

เกาะสีซัง เป็นเกาะใหญ่ที่มีฐานะเป็นอำเภอหนึ่งของชลบุรี โดยตั้งอยู่ที่ ตำบลท่าเทววงษ์ อำเภอเกาะสีซัง จังหวัดชลบุรี อยู่บริเวณอ่าวไทยตรงกันข้ามกับอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ห่างกันประมาณ 12 กิโลเมตร และอยู่ห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 117 กิโลเมตร มีพื้นที่ประมาณ 7.9 ตารางกิโลเมตร (เฉพาะพื้นดิน) และมีพื้นที่รวมพื้นที่ทะเลรวมทั้งสิ้น 25.61 ตารางกิโลเมตร มีเกาะบริวาร 8 เกาะ คือ เกาะยายเท้า เกาะค้ำควง เกาะท้ายตาหมื่น เกาะปรัง เกาะขามใหญ่ เกาะขามน้อย เกาะส้มป่นย้อย และเกาะร้านดอกไม้ มีสภาพภูมิประเทศเป็นเกาะ โดยมีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นภูเขา โขดหิน และหาดทราย มีโครงสร้างทางธรณีวิทยาเป็นภูเขาหิน โดยมีพื้นที่บนเกาะส่วนใหญ่เป็นหินปูน ประมาณ 80%

เกาะสีซัง เป็นเกาะที่มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ และการท่องเที่ยวแห่งหนึ่งของจังหวัดชลบุรี เนื่องจากเป็นสถานพักผ่อนตากอากาศที่ไม่ไกลจากกรุงเทพฯ มีสถานที่ท่องเที่ยวมากมาย ทรัพยากรทางธรรมชาติที่สวยงามจำนวนมาก เช่น ภูเขา ทะเล หาดทราย แหลม เกาะเล็กเกาะน้อย โดยรอบ ชายฝั่งเว้าแหว่ง อีกทั้งยังมีความสำคัญทางประวัติศาสตร์ เพราะเป็นสถานที่ประทับของพระเจ้าแผ่นดินถึง 3 พระองค์ คือ รัชกาลที่ 4 รัชกาลที่ 5 และรัชกาลที่ 6 ซึ่งมีหลักฐานปรากฏจากพระนามาภิไธยหลายแห่ง และ รัชกาลที่ 5 ทรงโปรดเกล้าฯ ให้สร้างพระราชฐานบนเกาะขึ้นเป็นแห่งแรก เพื่อเป็นสถานที่ประทับในฤดูร้อน และพระราชทานนามว่า พระจุฑาธุชราชฐาน ตามพระนามพระราชโอรสที่ประสูติบนเกาะสีซังแห่งนี้ และบริเวณหน้าเกาะสีซังเป็นท่าเทียบเรือธรรมชาติเป็นที่รู้จักของนักเดินเรือทั้งชาวไทยและชาวต่างประเทศ เนื่องจากสภาพทะเลระหว่างเกาะสีซังและเกาะขามใหญ่ มีลักษณะเหมาะสมแก่การทอดสมอเรือ ทั้งลักษณะความกว้างของพื้นผิวน้ำที่กว้างใหญ่ถึง 10 กิโลเมตร ความลึกของน้ำทะเลระหว่าง 6-30 เมตร ตัวเกาะจึงเป็นที่กำบังลมอย่างดี (สถาบันสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร, 2553)

### 2.1.1.2 ปัญหามูลฝอยบนเกาะสีชัง

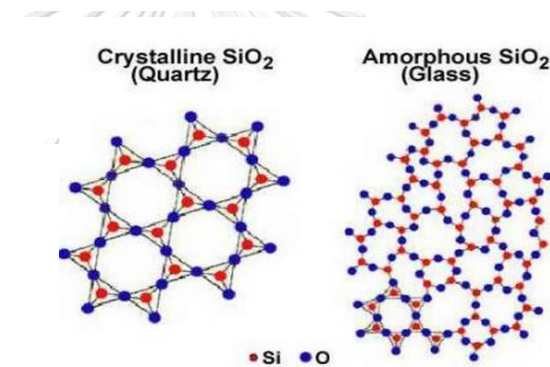
เกาะสีชัง มีขยะเกิดขึ้นบนเกาะวันละประมาณ 10-15 ตัน และมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากประชากรบนเกาะและนักท่องเที่ยวที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่ามีขยะอีกส่วนหนึ่งเพิ่มขึ้นมา เพราะเกาะสีชังมีปริมาณการขนส่งทางทะเลสูงเป็นอันดับ 1 ของประเทศไทย ทำให้มีเรือชนิดต่าง ๆ เช่น เรือบรรทุกสินค้า เรือลำเลียงสินค้า (เรือโป๊ะ) เรือยนต์ลากจูง เรือประมง เรือท่องเที่ยว และเรือโดยสารเป็นจำนวนมาก เฉลี่ยวันละประมาณ 400-500 ลำ ทำให้เกิดปัญหาขยะที่เทศบาลตำบลเกาะสีชังต้องรับนำมากำจัดด้วยเตาเผา (Incinerator) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสภาพพื้นที่เป็นหินไม่สามารถขุดหลุมฝังกลบได้ ซึ่งขยะที่รับมาเป็นขยะอุปโภค-บริโภคในชีวิตประจำวัน ประมาณ 10-15 ตันต่อวัน ประกอบกับขยะที่เกิดขึ้นบนเกาะอีกประมาณ 10-15 ตันต่อวัน รวมทั้งสิ้น 20-30 ตันต่อวัน การขนถ่ายสินค้าโดยเฉพาะการขนถ่ายระหว่างเรือต่อเรือในทะเลบริเวณพื้นที่ระหว่างเกาะสีชังและอำเภอศรีราชาจะมีการขนถ่ายสินค้าจากเรือเดินทะเลขนาด 20,000-120,000 ตัน ซึ่งไม่สามารถเข้าจอดที่ท่าเรือได้จึงต้องขนถ่ายสินค้าบริเวณนอกฝั่ง โดยจะมีเรือเดินทะเลขนาดใหญ่ จำนวน 60-80 ลำ ในแต่ละวันมาจอด แล้วนำเรือโป๊ะหรือเรือลำเลียงสินค้าขนาดเล็กมาเทียบแล้วใช้เครื่องตัก (Grab) หรือสายพานในการลำเลียงสินค้า สินค้าที่ขนถ่ายมีทั้งแบบบรรจุหีบห่อหรือถุงและประเภทเทกอง ชนิดของสินค้าที่ขนถ่าย ได้แก่ มันสำปะหลัง ข้าว ปูนซีเมนต์ ถ่านหิน ปุ๋ยเคมี ทำให้เกิดปัญหามลพิษขึ้น เช่น ฝุ่นละอองจากการขนถ่ายสินค้าเทกอง ขยะมูลฝอยและสิ่งปฏิกูล น้ำเสียจากเรือ ความเสื่อมโทรมของตะกอนพื้นทะเล ปูนซีเมนต์ ถ่านหิน ปุ๋ยเคมี เป็นต้น (นฤมล รัตนสุวรรณ, 2559) โดยขยะอุปโภคบริโภคจากเรือสินค้า เทศบาลเกาะสีชังเป็นผู้ดำเนินการเก็บ และขนมากำจัดบนเกาะ

จากการศึกษาองค์ประกอบของขยะบนเกาะสีชัง พบว่าขยะที่ย่อยสลายได้มีปริมาณมากที่สุด ร้อยละ 40 รองลงมา คือ พลาสติกร้อยละ 20 ขวดแก้วร้อยละ 10 กระดาษร้อยละ 10 และอื่น ๆ ร้อยละ 20 ตามลำดับ (เทศบาลตำบลเกาะสีชัง, 2557) ปัญหาของเศษแก้วที่พบบนเกาะสีชังคือ ร้านรับซื้อของเก่าบนเกาะไม่รับซื้อขวดแก้ว ยกเว้นศูนย์บริหารจัดการขยะชุมชน เนื่องจากแก้วมีน้ำหนักมากและราคาถูก จึงไม่คุ้มค่าในการขนส่งไปขายที่จังหวัดชลบุรี ทำให้มีเศษแก้วตกค้างอยู่บนลานเทกองเป็นจำนวนมาก (จรรยา พันธมา, 2559) ซึ่งเศษแก้วเป็นขยะชนิดย่อยสลายไม่ได้ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการเผา และไม่สามารถรีไซเคิลได้บนเกาะสีชัง ดังนั้นเศษแก้วจึงเป็นขยะที่มีปัญหามากที่สุดที่ทางเทศบาลตำบลเกาะสีชังต้องการหาแนวทางกำจัด จึงต้องมีการศึกษาหาแนวทางในการนำเศษแก้วบนเกาะสีชังมาใช้ประโยชน์



### 2.1.2 แก้ว (Waste Glass)

แก้ว เป็นของแข็งที่ประกอบด้วยอะตอม หรือโมเลกุลที่อยู่รวมกันโดยไม่มีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ หรือเรียกว่า อสัณฐาน (Amorphous) ดังรูปที่ 2.1 โดยแก้วจะได้จากการหลอม อนินทรีย์สารที่อุณหภูมิสูง ได้แก่ ซิลิกา (Silica) กับสารโลหะออกไซด์ จนวัตถุหลอมเป็นน้ำ อยู่ในสถานะเป็นของเหลว จากนั้นถูกขึ้นรูปและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนองค์ประกอบของโครงสร้าง แก้วไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเรียงตัวให้เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ หรือไม่มีการตกผลึก (Crystallization) โดยของแข็งที่ได้จากการขึ้นรูปจากแก้วหลอมมีลักษณะเป็นของแข็งที่ไม่มีผลึก และมีสมบัติกึ่งเสถียร องค์ประกอบทางเคมีของแก้วประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide,  $\text{SiO}_2$ ) โบรอนออกไซด์ (Boron Oxide,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium Carbonate,  $\text{MgCO}_3$ )



รูปที่ 2.1 ลักษณะอสัณฐานควอตซ์และแก้ว

ที่มา: ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP (2560)

จากรูป เห็นได้ว่า โครงสร้างของควอตซ์ (Quartz) มีความเป็นระเบียบสูง มีการเชื่อมต่อกันอย่างสวยงาม แต่เมื่อนำควอตซ์มาผลิตแก้ว โครงสร้างที่เคยเป็นระเบียบจะเกิดการกระจัดกระจายตัว เกิดโครงสร้างใหม่ที่ไม่เป็นระเบียบ

ลักษณะทางกายภาพของแก้ว เป็นวัสดุที่มีความแข็ง (Hard) โปร่งใส (Transparent) เปราะ (Brittle) มีความแวววาว (Relative) มีจุดหลอมละลายสูง (High Softening Point) ไม่ละลายในน้ำ และในสารละลายใด ๆ (Insoluble in Water and Organic Solvents) อีกทั้งไม่ติดไฟ (Non Inflammable) สมบัติทั่วไปของแก้วมีดังนี้ (ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP, 2560)

1. มีโครงสร้างทางเคมีไม่แน่นอน แต่จะมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกัน คือ ประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เป็นหลัก

2. มีความแข็งแรงแต่เปราะทำให้แตกหักง่าย
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องไม่ดี แต่ที่อุณหภูมิสูงจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
4. มีลักษณะโปร่งใส (Transparency)
5. สามารถทำให้หลอมละลายได้ด้วยความร้อน
6. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสมบัติของแก้วจะเปลี่ยนไปทั้งลักษณะทางกายภาพ และสมบัติ

ทางเคมี

7. มีช่วงการหลอมละลายกว้าง
8. สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะสามารถสังเกตเห็นได้

### 2.1.2.1 แก้วโซดาไลม์ (Soda Lime Glass)

แก้วโซดาไลม์เป็นแก้วชนิดที่พบได้ทั่วไป และถูกนำมาใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมแก้ว วัสดุหลัก ได้แก่ ททรายซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ประมาณ 70–74% แคลเซียมออกไซด์หรือปูนขาว ( $\text{CaO}$ ) ประมาณ 5–11% โซดาแอชหรือโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ประมาณ 12–16% โดยใช้โซดาแอชเป็นสารช่วยหลอมละลาย เพื่อลดจุดหลอมให้ต่ำลง ลดความหนืดให้สะดวกในการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังมีแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide,  $\text{MgO}$ ) ประมาณ 1–3% และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ประมาณ 1–3% ปนอยู่เล็กน้อย เพื่อให้แก้วมีความคงทนต่อสารเคมี โดยจะมีส่วนประกอบน้อยต่างกันไปตามการใช้งานที่ต่างกัน จะใช้อุณหภูมิปานกลางในการหลอม ประมาณ 1,300–1,400 องศาเซลเซียส แก้วชนิดนี้มีความทนทานอยู่ในระดับกลาง ถ้าขึ้นรูปให้บาง จะไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยกะทันหันได้ (Thermal Shock) นิยมใช้ทำขวด กระจกหน้าต่าง กระจกแผ่น ถ้วยแก้ว แก้วกันกระสุน (Bullet Proof Glass) แก้วกระจกรถยนต์ เป็นต้น (อุตสาหกรรม, 2527) โดยองค์ประกอบทางเคมี และสมบัติของแก้วโซดาไลม์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วโซดาไลม์

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)	
	A	B
SiO <sub>2</sub>	70.60	72.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.10	1.40
CaO	11.50	8.60
MgO	1.90	4.00
Na <sub>2</sub> O	13.40	13.6

ที่มา : A เมทนี อ้วนเส้ง (2559)

B วรพงษ์ เทียมสอน (2554)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของแก้วโซดาไลม์

สมบัติ	ค่า
Density	2.50 g/cm <sup>3</sup>
Thermal Expansion Coefficient	92 x 10 <sup>-7</sup> K <sup>-1</sup>
Heat Conductivity at 100°C	1.1 W/(m.k)
Specific Heat at 100°C	0.87 kJ/(kg.K)
Young's Modulus	10 <sup>9</sup> Pa
Glass Process Temperatures	
- Working Point	990 °C
- Softening Point	700 °C
- Annealing Point	520-540 °C

ที่มา : Mclellan และ Shand (1984)

จากองค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบหลัก และเป็นวัสดุที่มีความแข็ง จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอิฐคอนกรีต

### 2.1.3 คอนกรีต (Concrete)

คอนกรีต เป็นวัสดุที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้ในงานก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน เพราะเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมทั้งด้านราคาและมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดี และมีความทนทานสูง ทั้งยังสามารถเลือกใช้ส่วนผสมให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน เพื่อให้เหมาะกับงานก่อสร้างแต่ละชนิดได้

คอนกรีต ประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วน คือ วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และสารผสม ผสมกับวัสดุผสมละเอียดและหยาบ ได้แก่ ทราย หิน หรือกรวด เมื่อนำมาผสมกัน น้ำจะทำให้ปูนซีเมนต์แทรกตามเม็ดทรายและหิน จะคงสภาพของเหลวอยู่ในช่วงเวลาหนึ่ง และนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามต้องการ เช่น เสา คาน พื้น ผนัง เป็นต้น เมื่อคอนกรีตเริ่มก่อตัว จากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้คอนกรีตแข็งตัว มีความแข็งแรงและสามารถรองรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

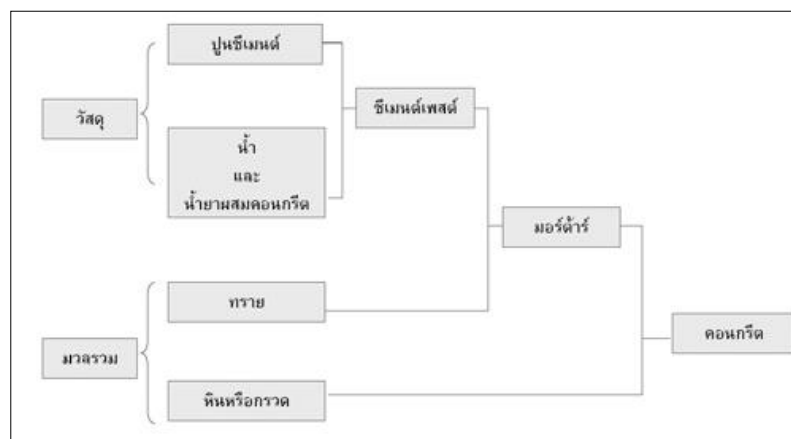
#### 2.1.3.1 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีต คือ วัสดุที่ได้จากการผสมกันของปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และสารผสม ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณลักษณะที่ต้องการ โดยเมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ เหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะ ดังรูปที่ 2.2 ดังนี้

ปูนซีเมนต์ ผสมกับ น้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า “ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)”

ซีเมนต์เพสต์ ผสมกับ ทราย เรียกว่า “มอร์ตาร์ (Mortar)”

มอร์ตาร์ ผสมกับ หินหรือกรวด เรียกว่า “คอนกรีต (Concrete)”



รูปที่ 2.2 ชื่อเรียกเฉพาะตามองค์ประกอบของคอนกรีต

ที่มา: พงศ์พิชญ์ พิมพิไสย (ม.ป.ป.)

เมื่อพิจารณาคอนกรีตตามลักษณะเนื้อคอนกรีต สามารถแบ่งคอนกรีตออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) และวัสดุมวลรวม (Aggregate) โดยส่วนผสมของคอนกรีตจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวม และน้ำ

### 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

มีการค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1824 (พ.ศ. 2367) โดย โจเซฟ แอสปดิน (Joseph Aspdin) ได้รับสิทธิบัตรสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ (Improve Cement) โดยการเผาส่วนผสมของ หินปูนและดินเหนียว แล้วนำมาบดให้เป็นผงละเอียด โจเซฟ เรียกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) เพราะ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เมื่อแข็งตัวแล้วจะเป็นสีเหลืองปนเทา มีลักษณะคล้าย ก้อนหินที่พบในเหมืองต่าง ๆ บนเกาะเล็ก ๆ ของเมืองปอร์ตแลนด์ (Portland) ประเทศอังกฤษ จึงเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า นายโจเซฟ แอสปดินเป็นบิดาของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ชนิดนี้เองที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบัน (ประณต กุลประสูตร, 2536)

ประกอบด้วย หินปูน (Limestone) และดินเหนียว (Clay) เป็นส่วนใหญ่ เหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) และมีโคโลไมต์ ( $CaMg(CO_3)_2$ ) จำนวนเล็กน้อย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ใช้กันทั่วไป ปกติจะมีสีเทาแกมเขียว (Greenish Gray) เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ ได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อะลูมิเนียม และ เหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมี และรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก

สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	$3 CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	$2 CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต	$3 CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
เตตราแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์	$4 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$

$C_3S$  ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้เร็วภายใน 14 วัน

$C_2S$  ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงได้ช้า ความร้อนเกิดขึ้นน้อย

$C_3A$  ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาเริ่มแข็งตัว เกิดความร้อนสูงมีกำลังรับแรงเร็ว

$C_4AF$  มีผลน้อย ให้ความแข็งแรงเล็กน้อย เต็มเข้าไปเพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้น

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ เป็นต้น

### ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

โดยสมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ATM.C.150) (Type I-V) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย (มอก. 15) แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ 5 ประเภท คือ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับลักษณะงานธรรมดาที่ไม่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตที่ต้องการลดอุณหภูมิ เนื่องจากสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูง งานคอนกรีตเหลา หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงดินหนา ๆ หรือท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ๆ ต่อม่อ

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ให้กำลังสูงในระยะแรกมีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา มีประโยชน์สำหรับคอนกรีตที่จะต้องใช้งานเร็ว หรือรีบแบบได้เร็ว เช่น เสาค้ำคอนกรีต ถนน พื้น และคานาที่ต้องถอดแบบเร็ว เป็นต้น

4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) สามารถลดปริมาณความร้อน เนื่องจากการรวมตัวของปูนซีเมนต์กับน้ำ สามารถลดการขยายตัวและหดตัวของคอนกรีตภายหลังการแข็งตัว ใช้มากในการสร้างเขื่อน เนื่องจากอุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่างานชนิดอื่นไม่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างทั่วไปเพราะแข็งตัวช้า

5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulfate Resistant Portland Cement) ใช้ในบริเวณที่น้ำหรือดินมีค่าต่างสูง มีระยะเวลาการแข็งตัวช้า และมีการกระทำของซัลเฟตอย่างรุนแรง

นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ อีก เช่น Portland Pozzolana Cement ซึ่งเหมาะ สำหรับงานอาคารคอนกรีตในทะเล ปูนซีเมนต์ผสมซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ซิลิกา (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดากับทราย 25-30%) มีราคาถูกแข็งตัวช้า ไม่ยึดหรือหดตัวเหมาะกับงานก่ออิฐ ทำถนน เทพื้น ต่อม่อ หล่อท่อ เทภาชนะคอนกรีต กระเบื้องมุงหลังคา และตึกแถว เป็นต้น (อาทิตย์ วัจนัยกุล, 2554)

## 2) วัสดุมวลรวม (Aggregates)

วัสดุมวลรวมหรือวัสดุผสม คือ ส่วนผสมคอนกรีตที่ยึดเข้าไว้ด้วยกันด้วยซีเมนต์เพสต์ วัสดุมวลรวมนี้ จะได้จากธรรมชาติ เป็นแร่ธาตุเฉื่อยไม่มีปฏิกิริยา ที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ หินอ่อน หินกรวด และทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้คอนกรีตมีความคงทนและแข็งแรง การเลือกใช้วัสดุมวลรวมมีส่วนสำคัญที่ช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดี

### ประเภทของวัสดุมวลรวม

สามารถแบ่งตามลักษณะขนาดได้เป็น 2 ชนิด คือ

#### 1. วัสดุมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือเป็นเม็ดที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่จะต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร วัสดุมวลรวมที่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร เรียกว่า ฝุ่น (Silt หรือ Clay) วัสดุมวลรวมละเอียดที่ใช้กันทั่วไป คือ ทรายหยาบ

#### 2. วัสดุมวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

หมายถึง วัสดุมวลรวมที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่ หิน กรวด การเลือกใช้วัสดุมวลรวมหยาบ อาจกำหนดขนาดเพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างนั้น ๆ เช่น ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมหยาบ อาจเป็น 1 ใน 5 ของความหนาของคาน หรือ 1 ใน 3 ของความหนาของแผงพื้น

หน้าที่หลักของมวลรวม คือ เป็นตัวแทรกประสานที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์ ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน และปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก

### คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมเป็นองค์ประกอบหลักของคอนกรีต ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม จึงมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตโดยตรง คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุมวลรวม มีดังต่อไปนี้

#### 1. กำลัง (Strength)

วัสดุมวลรวม ต้องมีความสามารถรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่ากำลังที่ต้องการของคอนกรีต โดยทั่วไปหินจะมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตมาก กำลังรับแรงอัดของหินมีค่าประมาณ 700 ถึง 3,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

## 2. ความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasive Resistance)

หินที่นำมาผสมคอนกรีตในงาน ต้องทนทานต่อแรงกระแทกและเสียดสีได้ โดยเฉพาะคอนกรีตที่ใช้ทำพื้นหรือถนน ซึ่งต้องเจอการเสียดสีอยู่ตลอดเวลา

## 3. ความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature Resistance)

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและหดตัว หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลบ ๆ ซ้ำ ๆ ตลอดเวลา จะทำให้เกิดแรงมากพอที่จะทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ วัสดุผสมจึงควรทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี คือ ไม่ขยายหรือหดตัวมาก และทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลบ ๆ ซ้ำ ๆ ได้ดี

## 4. ความคงตัวต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability)

วัสดุผสมรวมต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์

## 5. รูปร่าง และผิว (Particle Shape and Surface Texture)

มีความสำคัญต่อการยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ และความสามารถเทได้ของคอนกรีต ดังนั้น วัสดุที่ใช้ควรมีลักษณะเป็นแฉกเหลี่ยมคม และผิวหยาบเพื่อช่วยในการยึดเกาะ และไม่ควรมีรูปร่างเป็นแผ่นแบน ๆ หรือเป็นชิ้นยาว ๆ เพราะจะทำให้เทได้ยาก ควรมีรูปร่างก้อนกลม หรือลูกบาศก์

## 6. ความสะอาด (Cleanliness)

วัสดุผสมรวม ต้องสะอาดมีสารที่จะทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพต่อคอนกรีตน้อยที่สุด สารเหล่านี้ ได้แก่ เปลือกหอย ชานอ้อย ถ่านหิน ถ่าน เศษไม้ เศษกระดาษ ก้อนหิน โคลนเลน ฝุ่น หรือผงละเอียด (Silt) ฝุ่นพลาสติก ใยไม้ เป็นต้น สิ่งดังกล่าวนี้ ทำให้ความทนทาน และแรงยึดเหนี่ยวลดลง บางครั้งทำให้คอนกรีตร้าว มีกำลังต่ำ และแข็งตัวช้า

## 7. ความลดหลั่นของขนาด หรืออัตราส่วนขนาดคละ (Gradation)

วัสดุผสมรวมที่ใช้ผสมทำคอนกรีต จะต้องมีความลดหลั่นของขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้เรียงตัวกันแน่น และมีช่องว่างน้อย ทำให้คอนกรีตมีกำลังมากขึ้น ทั้งยังช่วยให้ทำงานได้ง่าย (วินิต ช่อวิเชียร, 2557)

ขนาดคละ คือ การกระจายของขนาดต่าง ๆ ของอนุภาค ซึ่งมีผลอย่างมากต่อความสามารถทำงานได้ และปริมาณซีเมนต์ แต่ละอนุภาคของวัสดุผสมรวมจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่าวัสดุผสมรวมนั้นจะเล็กหรือใหญ่ นอกจากนี้วัสดุผสมรวมจะต้องมีส่วนที่



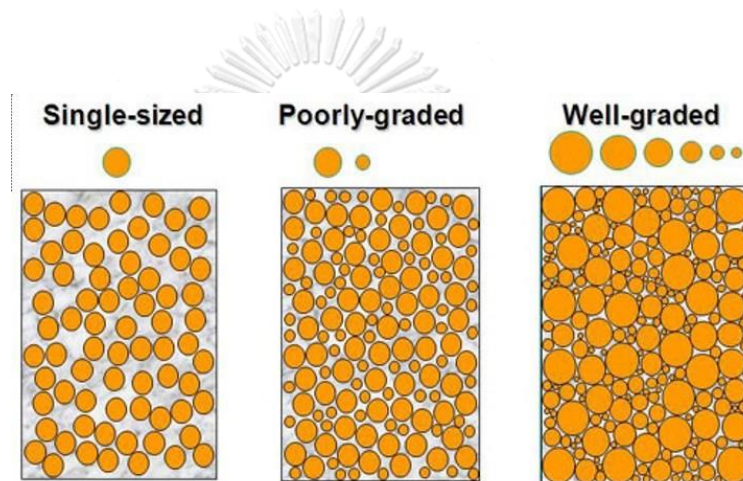
เหมาะสมในการผสมกัน เพื่อให้วัสดุมวลรวมขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของวัสดุมวลรวมที่ใหญ่กว่าให้มากที่สุด ซึ่งมีผลทำให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่จะยึดวัสดุมวลรวมเข้าไว้ด้วยกัน และอุดช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม

มวลรวมที่คละขนาดดี (Well Graded) ประกอบด้วย มวลรวมที่มีมวลรวมหลาย ๆ ขนาดคละ หรือปะปนกันให้เหลือช่องว่างน้อยที่สุด

มวลรวมที่ไม่คละขนาดกัน (Poorly Graded) ประกอบด้วย มวลรวมที่ขนาดขาดช่วง (Gap graded soil)

มวลรวมที่มีขนาดใกล้เคียง หรือพอ ๆ กัน (Uniform Graded or Single Sized)

ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ชื่อเรียกรูปแบบมวลรวม

ที่มา: Civil Engineers PK (2016)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัมประสิทธิ์บ่งชี้การคละขนาด ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ของโค้งการกระจายขนาดของมวลรวม (Coefficient of Curvature,  $C_c$ )

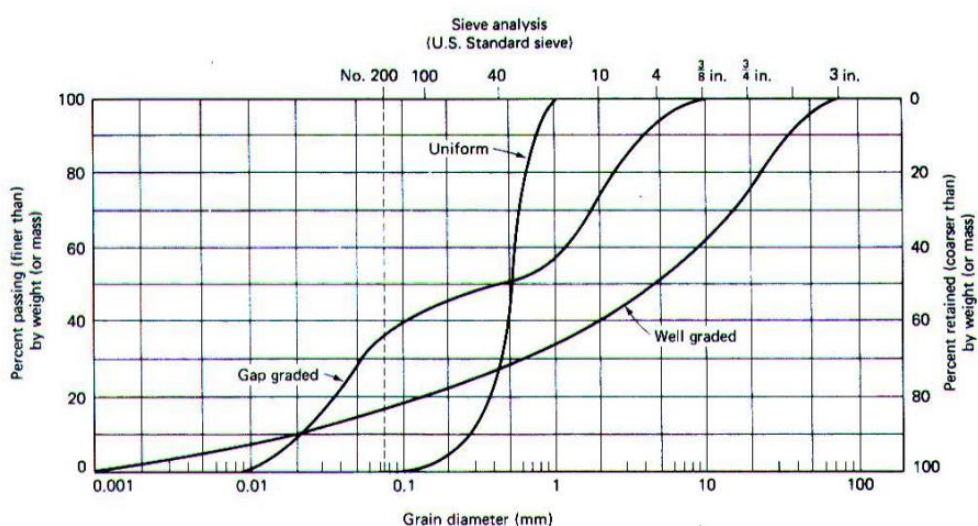
$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอของขนาดมวลรวม (Coefficient of Curvature,  $C_u$ )

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

เมื่อ  $D_{10}$  ,  $D_{30}$  ,  $D_{60}$  เป็นขนาดมวลรวมที่มีสวณละเอียดกว่า (Percent Finer) ร้อยละ 10 , 30 และ 60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

สำหรับการคละขนาดที่ดี  $C_c$  จะมีค่าระหว่าง 1-3 และ  $C_u$  มากกว่า 4 (สำหรับกรวด) หรือ  $C_u$  มากกว่า 6 (สำหรับทราย) (สถาพร โภคา, 2555) โดยสามารถหาค่า  $C_c$ ,  $C_u$  และรูปแบบของขนาดคละได้จากกราฟ ดังเช่นรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการกระจายขนาดของมวลรวม  
ที่มา: Atkins (1997)

### 3) น้ำ

น้ำเป็นส่วนผสมสำคัญในการผสมคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีบทบาทที่สำคัญต่องานคอนกรีตด้านอื่น เช่น การใช้น้ำในการบ่มคอนกรีต เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ และในกรณีที่มวลรวมสกปรกจะใช้น้ำล้างมวลรวมให้สะอาดพอสำหรับนำไปใช้ทำคอนกรีต โดยน้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำที่สะอาด หรือน้ำจืดที่ดื่มได้

#### 2.1.3.2 ประเภทของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้าง สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท (สุวิมล สัจจาณิษฐ์ และคณะ, 2558) ได้แก่

##### 1. คอนกรีตล้วน (Plain Concrete)

เป็นคอนกรีตอย่างเดียวล้วน ๆ ไม่มีวัสดุอื่นมาเสริม จะใช้กับโครงสร้างรับแรงอัด

## 2. คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforce Concrete)

เป็นคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมร่วมกับคอนกรีต โดยจะหล่ออยู่ในเนื้อคอนกรีตใช้กับโครงสร้างที่รับแรงดึงและแรงอัด

## 3. คอนกรีตอัดแรง (Pre-Stress Concrete)

เป็นคอนกรีตที่อัดแรงก่อนไว้ก่อนใช้งาน โดยการดึงเหล็กที่ทนแรงดึงสูงให้ยืดออกและตัดเหล็ก ปล่อยให้เหล็กพยายามหดตัวกลับจากจุดที่ยึดเป็นการอัดแรงให้กับคอนกรีต คอนกรีตอัดแรงสามารถรับแรงได้ดีกว่า เพราะใช้ประโยชน์จากหน้าตัดคอนกรีต ได้ดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก

## 4. คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete)

เป็นคอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 1800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้วัสดุมวลรวมน้ำหนักเบาหรือเติมอากาศเข้าไป

## 5. คอนกรีตหล่อสำเร็จรูป (Precast Concrete)

เป็นคอนกรีตที่หล่อสำเร็จมาจากโรงงานและนำมาติดตั้งที่หน้างาน

### 2.1.3.3 กระบวนการทำคอนกรีต

การทำคอนกรีตต้องมีกระบวนการผลิตที่เป็นขั้นตอน เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอทั้งทางด้านความสามารถในการเทได้ (Workability) กำลัง (Strength) ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) และความทนทาน (Durability)

กระบวนการทำคอนกรีต เรียงลำดับขั้นตอนได้ ดังนี้

1. การเลือกหาวัตถุดิบที่เหมาะสม
2. การกำหนดอัตราส่วนผสม
3. การชั่งหรือตวงวัตถุดิบ เพื่อให้ได้อัตราส่วนที่ถูกต้อง
4. การผสม
5. การลำเลียงคอนกรีตสดเทลงแบบ
6. การเท
7. การทำให้คอนกรีตอัดแน่น
8. การแต่งผิว
9. การบ่ม
10. การแกะแบบหล่อคอนกรีตตามระยะเวลาที่ถูกต้อง

### 2.1.3.4 การบ่มคอนกรีต (Concrete Curing)

การบ่มคอนกรีต คือ วิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน นอกจากนี้การบ่มคอนกรีตยังจะช่วยป้องกันการแตกร้าว เนื่องมาจากการสูญเสียน้ำและการหดตัวของคอนกรีต

#### หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ

1. ป้องกันการสูญเสียน้ำและความชื้นจากเนื้อคอนกรีต
2. รักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

#### วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต

1. เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน
2. เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต
3. เพื่อเป็นการดูแลเอาใจใส่ในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้างให้ถูกต้องตามแบบมากที่สุด
4. เป็นการทำงานที่ถูกขั้นตอน ถูกหลักวิชาการ ทำให้ได้คุณภาพของงานที่ดีมีประสิทธิภาพ

#### ระยะเวลาการบ่ม

โดยทั่วไประยะเวลาการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนผสมของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ขนาดและรูปร่างของแท่งคอนกรีต อุณหภูมิที่ใช้บ่ม ความชื้นในขณะบ่ม เป็นต้น องค์ประกอบเหล่านี้ถือได้ว่า จะมีผลต่อระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต ซึ่งอาจจะถึง 1 เดือน สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทำเขื่อน หรือเพียง 3 วัน สำหรับคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์ผสมอยู่ในปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว

สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป ส่วนใหญ่จะกำหนดระยะเวลาในการบ่มไว้ 3 วัน จนถึง 2 สัปดาห์ ซึ่งกำหนดเวลาดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยปกติ นิยมกำหนดระยะเวลาการบ่มไว้ประมาณ 1 สัปดาห์ สำหรับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา

## อุณหภูมิสำหรับบ่มคอนกรีต

อุณหภูมิที่ใช้บ่มคอนกรีตสำหรับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ควรอยู่ระหว่าง 15–39 องศาเซลเซียส สำหรับงานคอนกรีตหลายควรใช้อุณหภูมิให้ต่ำลง เพราะปฏิกิริยาของน้ำกับปูนซีเมนต์นั้นให้ความร้อนออกมาเป็นจำนวนมากอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามไม่ควรบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส เพราะคอนกรีตจะแข็งตัวช้ามาก เมื่อบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงมากและอากาศแห้ง จะทำให้น้ำระเหยออกจากคอนกรีตอย่างรวดเร็วกำลังของคอนกรีตที่ได้จะต่ำ และอาจเกิดรอยแตกร้าวได้ง่าย

## วิธีการบ่มคอนกรีตแบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามอุณหภูมิ

### 1. การบ่มที่อุณหภูมิกปกติ สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

#### 1.1 การบ่มโดยการเพิ่มความชื้นให้คอนกรีต

เป็นการบ่มที่เพิ่มความชื้นให้กับผิวคอนกรีตโดยตรง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

1.1.1 การขังหรือหล่อน้ำ (Ponding) เป็นการทำแนวกันน้ำไม่ให้น้ำไหลออก มักจะใช้กับงานทางระดับ เช่น พื้น หรือถนน เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำทาบอาจจะเป็นดินเหนียว หรืออิฐก็ได้

1.1.2 การฉีดน้ำหรือรดน้ำ (Sprinkling or Spraying) เป็นการฉีดน้ำ หรือพรมน้ำด้วยหัวฉีด หรือท่ออย่างให้ผิวคอนกรีตเปียกอยู่เสมอวิธีนี้ใช้ได้กับงานคอนกรีต ทั้งในแนวตั้ง แนวระดับ หรือแนวเอียง วิธีนี้ต้องสิ้นเปลืองน้ำมาก และต้องอาศัยที่มีแรงดันน้ำมากพอ

1.1.3 การคลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น (Wet Covering) เป็นวิธีที่ใช้กันมาก เพราะสะดวก ประหยัด และสามารถใช้ได้กับงานทั้งแนวระดับ แนวตั้ง และแนวเอียง วัสดุที่ใช้คลุมอาจจะเป็นผ้าใบ กระสอบ หรือวัสดุอื่นที่อมน้ำ ถ้าใช้ฟางหรือขี้เลื่อยคลุมควรหนาไม่น้อยกว่า 15 เซนติเมตร สำหรับการคลุมงานคอนกรีตในแนวตั้งต้องยึดวัสดุคลุมให้แน่นหนา ไม่เลื่อนหล่นลงมาได้ โดยเฉพาะเวลาที่รดน้ำซึ่งจะต้องทำเป็นประจำ

#### 1.2 การบ่มโดยการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต

เพื่อป้องกันมิให้ความชื้นจากคอนกรีตระเหยออกจากเนื้อคอนกรีต การบ่มลักษณะนี้สามารถกระทำได้หลายวิธีดังนี้

1.2.1 การบ่มในแบบหล่อ (Curing the Mold) แบบหล่อไม้ที่เปียก และแบบหล่อเหล็ก สามารถป้องกันการสูญเสียน้ำได้ดี โดยทิ้งแบบหล่อให้อยู่กับคอนกรีตที่หล่อไว้ให้นาน

ที่สุดเท่าที่จะทำได้ และคอยดูแลให้ผิวด้านบนคอนกรีตมีน้ำอยู่ โดยน้ำสามารถไหลซึมลงมาระหว่างแบบหล่อกับคอนกรีตได้

1.2.2 การใช้กระดาษกันน้ำซึม (Waterproof Paper) เป็นการใช้อุปกรณ์กันน้ำซึม ปิดทับผิวคอนกรีตให้สนิท เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน วิธีนี้มักนิยมใช้กับงานคอนกรีตแนวระดับ กระดาษกันน้ำซึมได้ ควรมีคุณภาพตามข้อกำหนดของ ASTM C 171 มี 2 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นของกระดาษเหนียวยึดติดด้วยชั้นของกาวประเภทยางมะตอย เสริมความเหนียวด้วยใยแก้ว และมีความสมบัติยึดหดตัวไม่มาก

1.2.3 การใช้แผ่นผ้าพลาสติกคลุม (Plastic Sheet) การใช้แผ่นพลาสติกทำงานได้ง่ายมีน้ำหนักเบา และควรใช้แผ่นพลาสติกสีขาวเพื่อสะท้อนแสงแดด ไม่อมความร้อน สามารถใช้ได้กับงานโครงสร้างทุกชนิด แผ่นพลาสติกที่ใช้ควรมีคุณภาพตามข้อกำหนดของ ASTM C 171

1.2.4 การใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต (Curing Compound) เป็นการพ่นสารเคมีลงบนผิวคอนกรีตซึ่งสารเคมีที่พ่นนี้จะกลายเป็นเยื่อบาง ๆ คลุมผิวคอนกรีตป้องกันการระเหยออกของน้ำในคอนกรีตได้ การบ่มวิธีนี้ทั้งสะดวกและรวดเร็วแต่ค่าใช้จ่ายจะสูง การพ่นสารเคมีนี้ต้องกระทำในขณะที่ผิวคอนกรีตยังชื้นอยู่ สารเคมีที่ใช้ควรมีคุณภาพตามข้อกำหนดของ มอก. 841 หรือ ASTM C 309

2. การบ่มที่อุณหภูมิสูง หรือการบ่มแบบเร่งกำลัง สามารถเร่งอัตราการเพิ่มกำลังได้อย่างรวดเร็ว

### ข้อดีของการบ่มที่อุณหภูมิสูง

1. สามารถผลิตได้รวดเร็วขึ้น
2. ประหยัดแบบหล่อ เพราะสามารถถอดแบบได้เร็ว
3. คอนกรีตมีกำลังสูงเร็ว ทำให้ทนต่อการเคลื่อนย้าย และใช้งานได้ดี
4. นิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป

### การบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

#### 2.1 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันต่ำ (Low Pressure Stream Curing)

อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 40–100 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ได้ผลดีที่สุดจะอยู่ระหว่าง 65–80 องศาเซลเซียส การเลือกอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มกำลังและกำลังสูงสุดที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้กำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกำลังประลัยสูงสุดจะมีค่าต่ำ อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้กำลังประลัยสูงสุดที่สูง แต่อัตราการเพิ่มกำลังที่ต่ำ

## 2.2 การบ่มด้วยไอน้ำที่ความกดดันสูง (High Pressure Steam Curing)

หากต้องการบ่มคอนกรีตด้วยอุณหภูมิเกิน 100 °C ต้องให้ความกดดันสูงขึ้น และต้องบ่มคอนกรีตในภาชนะที่ปิดสนิท ซึ่งมีชื่อว่า Autoclave อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 160–210 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 6–20 atm (สุรศักดิ์ มนตรี และ เสรี วิเศษวงษา, 2557)

### 2.1.3.5 ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้อง

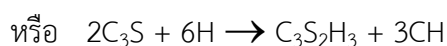
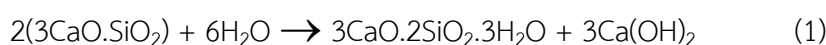
#### 1) ปฏิกริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

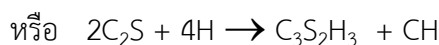
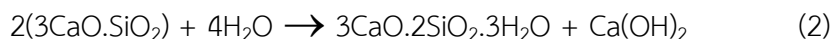
ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ปฏิกริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะทำให้ปูนซีเมนต์แปรสภาพจากเม็ดเล็กละเอียด เป็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายเจลลาติน (หรือวุ้น) ซึ่งจะค่อย ๆ ก่อตัวและแข็งตัวขึ้นตามลำดับ เมื่อยังมีน้ำเข้าทำปฏิกริยาอยู่ กล่าวคือปฏิกริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเริ่มต้นตอนแรก และจะช้าลงตามลำดับในตอนหลัง ดังนั้นปฏิกริยาไฮเดรชันจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด ขึ้นกับปริมาณสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบนี้จะทำปฏิกริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ สามารถเริ่มต้นด้วยปฏิกริยาของแต่ละสารประกอบในปูนซีเมนต์ หลังจากเทคอนกรีตและถอดแบบแล้ว ต้องทำการบ่มคอนกรีตทันที เพื่อให้มีน้ำเข้าทำปฏิกริยากับปูนซีเมนต์ตลอดไม่ขาดตอน

ผลลัพธ์ของปฏิกริยาไฮเดรชัน นอกจากจะทำให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว ยังมีความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาด้วย ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration) จะระบายผ่านออกมาทางเนื้อคอนกรีต แต่ถ้ามีความร้อนมาก ๆ จะทำให้คอนกรีตเสียกำลังไปและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ เนื่องจากแรงดันภายในคอนกรีต ดังนั้นในการเทคอนกรีตขนาดใหญ่หนา ๆ เช่น ฐานรากขนาดใหญ่ ความร้อนจะระบายออกไม่ทัน ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้สารผสมเพิ่มเพื่อลดปริมาณความร้อนที่จะเกิดขึ้น

#### (1) ปฏิกริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ , $C_2S$ )

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $Ca(OH)_2$  และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) (โดยอัตราส่วนของ  $CaO$ ,  $SiO_2$  และ  $H_2O$  เป็นค่าโดยประมาณ) ดังสมการที่ 1 และ 2

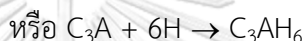




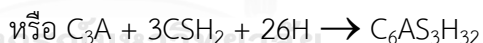
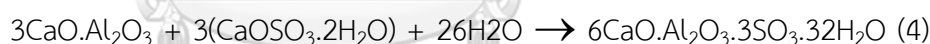
$\text{C}_2\text{S}$  ทำปฏิกิริยากับน้ำในทำนองเดียวกันกับ  $\text{C}_3\text{S}$  แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นช้ากว่า เพราะ  $\text{C}_2\text{S}$  ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเท่ากับ  $\text{C}_3\text{S}$  ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_2\text{S}$  กับน้ำ จึงน้อยกว่ากรณีของ  $\text{C}_3\text{S}$  กับน้ำ

(2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและยิปซัม

ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Aluminate Hydrate, CAH) ดังสมการที่ 3

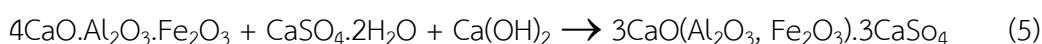


ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องผสมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยาในขบวนการบดปูน เมื่อยิปซัมจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับ  $\text{C}_3\text{A}$  ก่อให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium Sulfoaluminate Hydrate,  $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ) หรือเรียกกันทั่วไปว่า “เอ็ททริงไกต์ (Ettringite)” ดังสมการที่ 4



(3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

ปฏิกิริยาของ  $\text{C}_4\text{AF}$  คล้ายกับปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{A}$  แต่เกิดขึ้นช้ากว่า และมีความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า สารประกอบเหล็กออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาคลายกับอะลูมิเนียมออกไซด์ และสามารถแทนที่กันได้ ยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ  $\text{C}_4\text{AF}$  มากกว่าการหน่วงปฏิกิริยาของ  $\text{C}_3\text{A}$  ปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_4\text{AF}$  และยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium Sulfoaluminate) และแคลเซียมซัลเฟอร์ไรต์ (Calcium Sulfoferrite) (สราวุธ เจริญศิริเสถียร, 2552) ดังสมการที่ 5

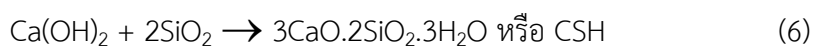




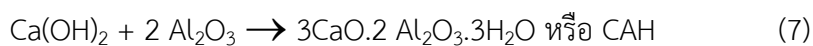
## 2) ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction)

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก เป็นปฏิกิริยาขั้นที่ 2 เกิดขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์และจะทำปฏิกิริยากับ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่ เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ตามลำดับใน เนื้อคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ช่วยปรับปรุง คุณสมบัติต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลัง การซึมผ่านของน้ำ และความ ทนทาน เป็นต้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)” สามารถสรุปเป็นสมการทางเคมี ได้ดังสมการที่ 6 และ 7 (วชิรวิทย์ สำราญรมย์, 2553)

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ปฏิกิริยาปอซโซลาน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



### 2.1.4 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

คอนกรีตที่ขาดมวลรวมละเอียดจะทำให้เกิดการแยกตัวง่าย เป็นสาเหตุของการยุบ จึงต้องมี มวลรวมละเอียดเพื่อลดการยุบและช่วยเพิ่มการเกาะตัวของคอนกรีต ซึ่งวัสดุปอซโซลาน ได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าลอย เป็นต้น

วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมิเนียม ออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ/หรือเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยา ไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำ แล้วเกิดสารที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน สารประกอบของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ/หรือแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) เพิ่มขึ้น เรียก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาปอซโซลานิก” (ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน, 2558)

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามมาตรฐาน ASTM C618 โดยพิจารณาตามองค์ประกอบ ทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4

**ตารางที่ 2.3** องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

องค์ประกอบทางเคมี	วัสดุปอซโซลาน		
	N	F	C
ซิลิกอนไดออกไซด์ + อลูมิเนียมออกไซด์ + เพอร์ริกออกไซด์ ต่ำสุดร้อยละ	70.0	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ สูงสุดร้อยละ	4.0	5.0	5.0
อัลคาไลด์ สูงสุดร้อยละ	1.5	1.5	1.5
ปริมาณความชื้น สูงสุดร้อยละ	3.0	3.0	6.0

**ตารางที่ 2.4** คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618

คุณสมบัติทางกายภาพ	วัสดุปอซโซลาน		
	N	F	C
ความละเอียด: ปริมาณค้ำตะแกรงเบอร์ 325 สูงสุดร้อยละ	34	34	34
ความอยู่ตัว: การขยายหรือหดตัว สูงสุดร้อยละ	0.8	0.8	0.8
ความต้องการปริมาณน้ำ สูงสุดร้อยละ	115	105	105
ดัชนีกำลัง			
ที่อายุ 7 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75
ที่อายุ 28 วัน ต่ำสุดร้อยละ	75	75	75

ตามมาตรฐาน ASTM C618 ซึ่งจำแนกประเภทของวัสดุปอซโซลานออกเป็น 3 ชนิด ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4

หมวด N ได้แก่ วัสดุดิบ หรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ เช่น ใ้แก่กลบ (Rice Husk Ash) หินเซอร์ท (Opaline Cherts) หินชั้น (Shale) ใ้แก่ภูเขาไฟ (Volcanic Ash) เป็นต้น

หมวด F ได้แก่ ใ้แกล่อยทั่วไปที่ได้จากการเผาถ่านหิน (Bituminous) และแอนทราไซต์ (Anthracite) ซึ่งจะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ (CaO)

หมวด C ได้แก่ ใ้แกล่อยทั่วไปที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) และซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) ซึ่งจะมีแคลเซียมออกไซด์สูง (CaO) และมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) กับ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ต่ำ

### 2.1.4.1 ชนิดของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลานมีสองชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan) และ ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan) มีรายละเอียดดังนี้

#### 1. ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Natural Pozzolan)

ได้แก่ หินดินดาน (Shales) เศษหินภูเขาไฟ (Tuff) เถ้าภูเขาไฟ (Volcanic Ash) หินภูมิไซต์ (Pumisite) หินโอเพิลเหลือง (Opaline) หินชั้น (Shale) หินเชิร์ต (Chert) หินปูน (Limestone) ปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เมื่อต้องการนำไปใช้งาน จะต้องนำมาบดก่อน

#### 2. ปอซโซลานดัดแปลง (Modify Pozzolan)

เกิดจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Products) หรือเกิดจากการตั้งใจที่จะนำปอซโซลานที่เกิดขึ้นเองมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนขึ้น ส่วนมากจะเป็นขบวนการเผาไหม้ ปัจจุบันปอซโซลานดัดแปลงที่พบ ได้แก่ เถ้าลอย (Fly Ash) ได้จากการเผาเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) จะได้มาจากการผลิตโลหะอัลลอยด์ และตะกรันเตาถลุงเหล็ก (Slag) ได้จากการถลุงเหล็ก เป็นต้น (ปิติศานต์ กร้ามาตร, 2553)

### 2.1.5 คุณสมบัติของคอนกรีต

#### 2.1.5.1 การรับแรงอัด (Compressive Strength)

การรับแรงอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของคอนกรีต คือ ความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุ มีหน่วยในการวัดเป็น แรงต่อพื้นที่ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากกระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่วัสดุสามารถคงรูปอยู่ได้ ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ

$$C = \frac{W}{A}$$

เมื่อ C คือ กำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่าง หน่วย เมกะปาสกาล (MPa)

W คือ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด หน่วย นิวตัน (N)

A คือ พื้นที่ทั้งหมดโดยเฉลี่ยจากพื้นที่ด้านบนและด้านล่างของชิ้นตัวอย่าง หน่วย ตารางมิลลิเมตร (mm<sup>2</sup>)

### 2.1.5.2 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

การดูดซึมน้ำเป็นคุณสมบัติที่ใช้บอกปริมาณช่องว่างในเนื้อวัสดุ หรือความพรุนของวัสดุ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปร้อยละของน้ำหนักที่ดูดซึมอยู่ภายในวัสดุโดยแช่น้ำ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำเข้าไปเต็มรูพรุน แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้ง ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{ร้อยละของการดูดซึมน้ำ} = 100 \times \frac{(W_s - W_d)}{W_d}$$

เมื่อ  $W_s$  คือ น้ำหนักอิมัตว หน่วย กรัม (g)

$W_d$  คือ น้ำหนักแห้ง หน่วย กรัม (g)

### 2.1.5.3 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับวัสดุวิศวกรรม เมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำและไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาใด ๆ โดยทั่วไปความหนาแน่นมักจะบอกเป็นความหนาแน่นมวลเชิงปริมาตร (ภรพนา บุญมา, 2548) ดังสมการ

$$\rho = \frac{m}{v}$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นมวลเชิงปริมาตร หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  คือ มวลของวัสดุ หน่วย กิโลกรัม (kg)

$v$  คือ ปริมาตรของวัสดุ หน่วย ลูกบาศก์เมตร ( $\text{m}^3$ )

ซึ่งในการผลิตคอนกรีตนั้น มีการปลดปล่อยมลภาวะออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก จึงควรมีการศึกษาถึงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมไปถึงมลภาวะที่ปลดปล่อยสู่ทางดิน น้ำ สุขภาพมนุษย์ และระบบนิเวศ ตลอดวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์คอนกรีต โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) เป็นเครื่องมือ

## 2.1.6 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

### 2.1.6.1 ความหมายและหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต เป็นเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ โดยองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization: ISO) ได้นิยามความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิตในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ว่า “เป็นการรวบรวมและประเมินค่าสารขาเข้าและสารขาออก รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต” ซึ่งกล่าวได้ว่าพิจารณาผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เกิดจนตาย (Cradle to Grave) คือ ตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่งและกระจายผลิตภัณฑ์ การใช้งานผลิตภัณฑ์ การใช้ใหม่หรือแปรรูปผลิตภัณฑ์ และการกำจัดซากผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน โดยการวัดปริมาณในทุกลำดับขั้นตอนของวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ รวมถึงปริมาณของเสียที่มีการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถประเมินและบ่งชี้ผลกระทบที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อทำการลดผลกระทบให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด และสามารถกำหนดแนวทางในการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมต่อไปได้

เทคนิคของการประเมินวัฏจักรชีวิตมีความแตกต่างจากเครื่องมือการประเมินทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่มีอยู่ โดยการประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นกระบวนการประเมินค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ หรือหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์หรือการบริการนั้น ซึ่งเน้นผลเชิงปริมาณชัดเจน ทำให้การประเมินวัฏจักรชีวิตมีความซับซ้อนมากกว่าเทคนิคการประเมินสิ่งแวดล้อมอื่น เนื่องจากต้องทำการวิเคราะห์ตั้งแต่แหล่งกำเนิดของวัตถุดิบจวบจนกระทั่งถึงขั้นตอนการจัดการของเสียของผลิตภัณฑ์หลังใช้งาน ซึ่งการประเมินวัฏจักรชีวิตนี้สามารถบ่งชี้และระบุปริมาณของภาระทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Loads) ตลอดวัฏจักรชีวิต และประเมินค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts) จากการพิจารณาปริมาณของภาระทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ นอกจากนี้ยังนำไปสู่การประเมินหาโอกาสในการปรับปรุงทางสิ่งแวดล้อม โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจ

การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเครื่องมือหนึ่งในด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ถูกจัดอยู่ในอนุกรมมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม ISO 14000 โดยมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต มีทั้งหมด 7 ฉบับ (เศรษฐกิจ สังคม 2555) ดังนี้

1) ISO 14040 - Life Cycle Assessment เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงหลักการ นิยามศัพท์ และกรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิต

2) ISO 14041 - Life Cycle Assessment เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงการกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต การวิเคราะห์และจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (LCI)

3) ISO 14042 - Life Cycle Assessment เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึงการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ (LCIA)

4) ISO 14043 - Life Cycle Assessment เป็นมาตรฐานกล่าวถึงการแปรผลข้อมูลที่ได้จากการทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (LCI) และการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ (LCIA)

5) ISO/TR 14047 - Life Cycle Assessment เป็นรายงานทางวิชาการที่ได้แสดงถึงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ออกุณกรรมมาตรฐาน ISO 14042 สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

6) ISO/TR 14048 - Life Cycle Assessment เป็นรายงานทางวิชาการที่ได้แสดงถึงตัวอย่างรูปแบบเอกสารของข้อมูลด้านการประเมินวัฏจักรชีวิต

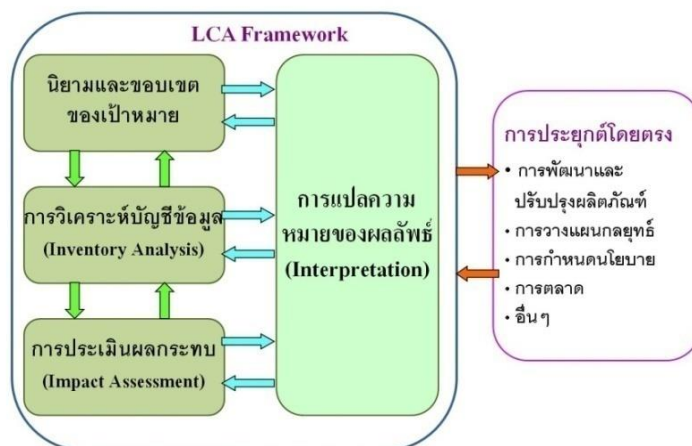
7) ISO/TR 14049 - Life Cycle Assessment เป็นรายงานทางวิชาการที่ได้แสดงถึงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ออกุณกรรมมาตรฐาน ISO 14041 สำหรับจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (LCI)

### 2.1.6.2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต

วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งพิจารณากระบวนการต่าง ๆ ตลอดวัฏจักรชีวิต โปรแกรมฐานข้อมูลสำเร็จรูปจึงได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถจัดการกับข้อมูลได้รวดเร็ว แม่นยำ สามารถใช้ได้กับกระบวนการผลิตที่มีขั้นตอนมาก และเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก โปรแกรมฐานข้อมูลสำเร็จรูปที่ถูกพัฒนา และนิยมใช้สำหรับศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต เช่น SimaPro<sup>TM</sup> GaBi<sup>TM</sup> TEAM<sup>TM</sup> เป็นต้น

การประเมินวัฏจักรชีวิตมีวิธีการประเมินหลากหลาย แต่ปัจจุบันวิธีการหลักในการประเมินวัฏจักรชีวิตนิยมใช้วิธีการและขั้นตอนการศึกษาตามมาตรฐาน ISO 14040 เพื่อเป็นแนวทางเดียวกัน โดยศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์จากออกุณกรรมมาตรฐาน ISO 14040-14043 แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.5

### ISO 14040 Life Cycle Assessment, Principles and framework



รูปที่ 2.5 กรอบการดำเนินงาน LCA จากอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (2558)

#### 1) การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (Goal and Scope Definition)

การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาเป็นขั้นตอนแรก และเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้เกิดความชัดเจน สอดคล้อง และครอบคลุมในวัตถุประสงค์ ประกอบด้วย การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and Scope) หน้าที่ของผลิตภัณฑ์ (Product Function) หน่วยการทำงานของผลิตภัณฑ์ (Functional Unit) ขอบเขตระบบ (System Boundary) และระบบผลิตภัณฑ์ (Product System)

##### การกำหนดเป้าหมาย

เป้าหมายของการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตต้องมีความชัดเจน ไม่คลุมเครือ กำหนดเหตุผลในการศึกษา ผลการศึกษา การนำผลการศึกษาไปใช้หรือการประยุกต์ใช้ และผู้ใช้ผลการศึกษา (Target Audience) โดยเป้าหมายจะเป็นตัวบ่งชี้ขอบเขตของการศึกษา หากวัตถุประสงค์ในการศึกษาต้องการข้อมูลและการสรุปผลที่มีความน่าเชื่อถือสูง ในส่วนของขอบเขต ระยะเวลา และงบประมาณของการศึกษาต้องสูงขึ้นด้วย ซึ่งผลการศึกษาจะเป็นข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่สนับสนุนให้ผลวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ และสามารถกำหนดแนวทางการประยุกต์เพื่อพัฒนากระบวนการผลิต หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

## การกำหนดขอบเขตของการศึกษา

การกำหนดขอบเขตของการศึกษาต้องสอดคล้องกับเป้าหมาย เป็นการกำหนดสิ่งที่ต้องการประเมินและรายละเอียดภายในระบบ โดยขอบเขตที่กำหนดต้องครอบคลุมหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ หน่วยการทำงานของผลิตภัณฑ์ คำจำกัดความของระบบ ขอบเขตของระบบ ขอบเขตของเวลาดำเนินการศึกษา สมมติฐานที่ใช้ โปรแกรมฐานข้อมูล ข้อจำกัดของการศึกษา และข้อกำหนดคุณภาพของข้อมูล

### ❖ หน้าที่ของผลิตภัณฑ์

การกำหนดขอบเขตต้องระบุหน้าที่และคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน เนื่องจากผลิตภัณฑ์หนึ่งชนิด สามารถมีหน้าที่แตกต่างกันได้ หากทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์โดยครอบคลุมทั้งหน้าที่หลักและหน้าที่รอง จะทำให้การศึกษาดังกล่าวมีความซับซ้อนและประเมินยากยิ่งขึ้น ดังนั้นหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ที่เลือกมาเพื่อศึกษาวัฏจักรชีวิต ต้องสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

### ❖ หน่วยการทำงาน

หน่วยการทำงานถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้เป็นพื้นฐานเดียวกันในการเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบ โดยมีความสำคัญในการเปรียบเทียบผลของการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ หรือหลายผลิตภัณฑ์ที่รวมเป็นผลิตภัณฑ์เดียว เพื่อให้ข้อมูลมีหน่วยการทำงานเดียวกัน

### ❖ ขอบเขตของระบบ

การกำหนดขอบเขตของระบบ เป็นการกำหนดขอบเขตระหว่างระบบผลิตภัณฑ์กับสิ่งแวดล้อม หรือกับระบบผลิตภัณฑ์อื่น ซึ่งระบบผลิตภัณฑ์ คือ ระบบที่เป็นการจำลองขึ้นจากกระบวนการย่อยหลายกระบวนการมารวมกัน โดยมีการไหลของผลิตภัณฑ์ หรือของเสียที่ต้องบำบัดของแต่ละกระบวนการย่อยเป็นตัวเชื่อมโยง กล่าวคือ มีการเชื่อมโยงกันของสารขาเข้า (Input) และสารขาออก (Output) ของแต่ละกระบวนการย่อยทุกกระบวนการเกิดเป็นระบบผลิตภัณฑ์ขึ้น

นอกจากการจำลองระบบผลิตภัณฑ์แล้ว การจัดทำแผนภาพการไหลเป็นสิ่งจำเป็น และเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์สมดุลมวลสารของแต่ละกระบวนการเป็นไปอย่างถูกต้อง ขอบเขตของระบบมีรูปแบบการกำหนดขอบเขต ดังนี้



- Gate to Gate คือ การประเมินผลกระทบที่มีขอบเขตเฉพาะกระบวนการใด กระบวนการหนึ่ง จากทั้งสายโซ่การผลิต โดยเป็นเพียงบางส่วนของกระบวนการประเมินวัฏจักรชีวิต

- Gate to Grave คือ การประเมินผลกระทบที่มีขอบเขตตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่เริ่มจากกระบวนการผลิตจนได้ผลิตภัณฑ์ ตลอดจนการขนส่ง การกระจายสินค้า และ ขั้นตอนการกำจัดซากของผลิตภัณฑ์

- Cradle to Gate คือ การประเมินผลกระทบที่มีขอบเขตตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ จนถึงการผลิตได้ผลิตภัณฑ์มา แต่ไม่รวมขั้นตอนการใช้งานและการกำจัดซาก

- Cradle to Grave คือ การประเมินผลกระทบที่มีขอบเขตตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่กระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ การผลิต การขนส่งและการกระจายผลิตภัณฑ์ การนำไปใช้งาน และการกำจัดซากหลังจากการใช้งาน ซึ่งขอบเขตนี้เป็นการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เต็มรูปแบบ

- Cradle to Cradle คือ เป็นรูปแบบพิเศษของขอบเขต Cradle to Grave ที่พิจารณาถึงขั้นตอนรีไซเคิล ในกรณีที่ขั้นตอนการกำจัดซากของผลิตภัณฑ์เป็นกระบวนการรีไซเคิล

## 2) การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory Analysis: LCI)

เป็นการรวบรวมและคำนวณข้อมูลที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและการกำหนดขอบเขตของการศึกษา และสร้างแผนผังของระบบผลิตภัณฑ์ โดยการคำนวณหาปริมาณของสารขาเข้า และสารขาออกจากระบบของผลิตภัณฑ์ต้องพิจารณาถึงทรัพยากรและพลังงานที่ใช้ในระบบ หรือการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมควรพิจารณาในประเด็นหลัก ได้แก่ การเก็บรวบรวมข้อมูล การคำนวณข้อมูล และการป็นส่วน

### การเตรียมการเก็บรวบรวมข้อมูล

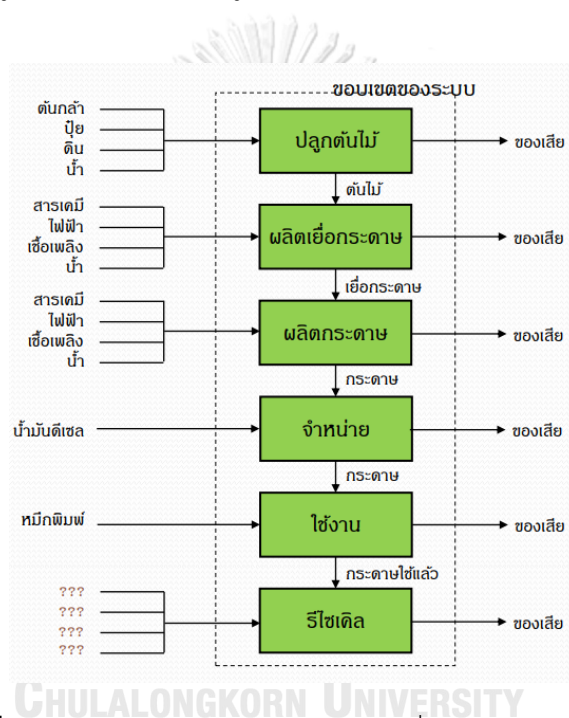
(1) การร่างผังการไหลของกระบวนการย่อยทั้งหมด และความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการย่อย ดังรูปที่ 2.6

(2) การอธิบายรายละเอียดของแต่ละกระบวนการย่อย และความสัมพันธ์กันเพื่อจัดกลุ่มข้อมูลในแต่ละกระบวนการย่อยนั้น ๆ

(3) กำหนดและระบุหน่วยการทำงานที่ใช้ในการวัด เพื่อให้หน่วยเป็นไปตามทิศทางเดียวกัน

(4) อธิบายถึงเทคนิคในการเก็บรวบรวมข้อมูลและการคำนวณแต่ละกลุ่มข้อมูล เพื่อให้ทราบถึงแหล่งที่มาของข้อมูล นอกจากนี้ยังทำให้ทราบว่าต้องใช้ข้อมูลใดบ้างในการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ในครั้งนี้

(5) ข้อมูลที่เกี่ยวกับวัตถุดิบที่เป็นสารขาเข้าไปในระบบ ต้องเลือกใช้ข้อมูลที่สามารถตรวจสอบย้อนกลับไปยังวัตถุดิบได้ โดยต้องมีข้อมูลของสารที่ออกจากระบบย่อยทั้งหมด ข้อมูลของการปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม และข้อมูลการขนส่งภายในระบบ



รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของกระดาษ

ที่มา: ศุภณี เรียบเลิศศิริ และ แววบุญ แยมแสงสังข์ (2555)

### การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลในการจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม แบ่งข้อมูลตามแหล่งของข้อมูล คือ ข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ ซึ่งข้อมูลปฐมภูมิ คือ ข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาจากแหล่งข้อมูลชั้นต้นที่ได้มาจากแหล่งข้อมูลโดยตรง จึงเป็นข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ แม่นยำ ถูกต้อง และเป็นข้อมูลปัจจุบันมากกว่าข้อมูลทุติยภูมิ ส่วนข้อมูลทุติยภูมิ คือ ข้อมูลที่ได้จากแหล่งรวบรวมข้อมูลไว้แล้ว เป็นข้อมูลที่สามารถอ้างอิงได้ ประกอบด้วย หนังสือ วารสาร งานวิจัย เอกสาร หรือรายงานที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น และเมื่อพบว่าไม่มีข้อมูลที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้โดยตรง สามารถใช้ข้อมูลอื่น

เช่น ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ การคำนวณทางวิศวกรรม การประมาณจากกระบวนการ หรือ วัตถุประสงค์ที่คล้ายกัน สิ่งตีพิมพ์และฐานข้อมูลแหล่งอื่น เป็นต้น

### 3) การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Impact Assessment)

มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม โดยการจำแนกการจัดกลุ่มผลกระทบ และการคัดเลือกตัวชี้วัดของกลุ่ม ซึ่งผลของการคำนวณจะบ่งชี้ว่ากลุ่มผลกระทบใดมีความสำคัญหรือก่อให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงที่สุด และเกิดจากกระบวนการใดของระบบผลิตภัณฑ์ เพื่อเป็นการเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการแปลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ต่อไป โดยหลักการการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ตามที่กำหนดในมาตรฐาน 14042 แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

#### ขั้นตอนที่ต้องดำเนินการ ได้แก่

- การคัดเลือกกลุ่มผลกระทบ (Impact Categories) ตัวชี้วัดกลุ่มผลกระทบ (Category Indicators) และแบบจำลองการกำหนดบทบาท (Characterization Models)
- การจำแนกข้อมูลการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมเข้าอยู่ในกลุ่มผลกระทบ (Classification)
- การกำหนดบทบาท (Characterization)

ขั้นตอนที่เป็นทางเลือกให้ศึกษาเพิ่มเติม เป็นขั้นตอนที่ไม่ได้บังคับ ซึ่งเป็นค่าผลกระทบที่มาจากวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับผู้ทำการคำนวณ สภาพภูมิประเทศ และการให้น้ำหนักความสำคัญในแต่ละกลุ่มผลกระทบของแต่ละประเทศที่ทำการคำนวณ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินผลกระทบจะแสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่เลือกทำการศึกษานั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในประเด็นปัญหาใด และทราบผลกระทบที่เป็นปัญหาสำคัญที่สุดตามที่คุณทำการศึกษได้ ให้น้ำหนักความสำคัญ ได้แก่

- การเทียบหน่วย หรือการหาขนาดของผลกระทบ (Normalization)
- การจัดกลุ่ม (Grouping)
- การให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting)
- การวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล (Data Quality Analysis)

### 3.1) การคัดเลือกกลุ่มผลกระทบ (Impact Categories)

การนำเอาข้อมูลจากการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมมาวิเคราะห์ และจำแนกผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสาขาเข้าและสาขาออกอย่างเป็นหมวดหมู่ เพื่อจำแนกว่าระบบผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านใดและเกิดจากกระบวนการใด โดยการจำแนกเพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและนิยมนำมาใช้ (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2547) ได้แก่

- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change)
- การทำให้โลกร้อน (Global Warming)
- การทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone Depletion)
- การก่อให้เกิดความเป็นกรดในดินและแหล่งน้ำ (Acidification)
- การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำ (Eutrophication)
- การสิ้นเปลืองทรัพยากร (Resource Depletion)
- การสิ้นเปลืองพลังงาน (Energy Depletion)
- การออกซิเดชันที่เกิดจากปฏิกิริยาแสง-เคมี (Photochemical Oxidation)
- การก่อให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ (Human Toxicity)
- การก่อให้เกิดความเป็นพิษในมหาสมุทร (Aquatic Ecotoxicity)

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตสามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ ผลกระทบชั้นกลาง (Midpoint Category) และผลกระทบชั้นปลาย (Endpoint Category) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการเลือกใช้กลุ่มผลกระทบชั้นกลางจะแปลผลได้ยากเนื่องจากผลกระทบชั้นกลาง 1 ชนิด สามารถส่งผลให้เกิดผลกระทบชั้นปลายได้หลายทาง จึงควรคำนวณไปจนถึงผลกระทบปลายทาง ซึ่งจะสามารถทำให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างระบบผลิตภัณฑ์กับผลกระทบสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน

### 3.2) การคัดเลือกตัวชี้วัดกลุ่มผลกระทบ (Category Indicators)

เนื่องจากแต่ละกลุ่มผลกระทบมีตัวชี้วัดผลกระทบหลากหลาย เพื่อให้สามารถคัดเลือกตัวชี้วัดได้อย่างเหมาะสม จึงต้องพิจารณาผลกระทบ และตัวชี้วัดผลกระทบปลายทางให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ และประเภทของผลกระทบที่ได้คัดเลือกไว้

### 3.3) การคัดเลือกแบบจำลองการกำหนดบทบาท (Characterization Models)

การคัดเลือกแบบจำลองการกำหนดบทบาท เป็นแบบจำลองสำเร็จรูปสำหรับการแปลง ค่าสารแต่ละตัวในกลุ่มผลกระทบเดียวกัน ให้อยู่ในรูปตัวเลขที่สามารถบอกถึงค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารแต่ละตัวก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่ต่างกัน ซึ่งค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบ (Potential Environment Impact) ของแต่ละสารนั้น แตกต่างกันไปในแต่ละแบบจำลอง ดังนั้นการคัดเลือกแบบจำลองต้องพิจารณาถึงการยอมรับและความแพร่หลาย โดยแบบจำลองที่นิยมอย่างแพร่หลายคือ IPCC model ซึ่งพัฒนาโดยคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) เป็นต้น

### 3.4) การกำหนดบทบาท (Characterization)

เป็นขั้นตอนการแปลงค่าสารแต่ละตัวในกลุ่มผลกระทบเดียวกันให้อยู่ในรูปตัวเลขที่บอกค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยทำการเทียบอิงกับสารพื้นฐาน เนื่องจากสารแต่ละตัวมีศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่ต่างกัน ซึ่งการกำหนดบทบาทนั้นดูจากค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบ (Potential Environmental Impact) คือ การนำปริมาณสารในแต่ละกลุ่มคูณกับแฟกเตอร์เทียบเท่า (Equivalent Factor หรือ Characterization Factor) เพื่อให้เป็นหน่วยเดียวกัน การอ้างอิงนี้นิยมดูผลกระทบที่เกิดขึ้นจากก๊าซเรือนกระจกในรอบ 100 ปี เป็นการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปดัชนีบ่งชี้ (Indicator) ความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละด้าน ดังสมการที่ 8

$$EP_j = Q_j \times EF_{ij} \quad (8)$$

โดยที่  $EP_j$  (Environment Impact Potential) คือ ศักยภาพของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภท  $j$  (kg Substance Equivalent)

$Q_j$  (Quantity of Substance) คือ ปริมาณมลสาร  $j$  ที่ปล่อยออกมา (kg Substance  $j$ )

$EF_{ij}$  (Equivalency Factor) หรือ Characterization Factor คือ ค่าเทียบเท่าของสาร  $i$  ที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภท  $j$  (kg Substance Equivalent/ kg Substance  $j$ )

### 3.5) การเทียบหน่วย หรือการหาขนาดของผลกระทบ (Normalization)

เป็นการศึกษาว่าผลกระทบแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมในภาพรวมทั้งหมดอย่างไร การเปรียบเทียบทำได้โดยการเทียบกับปริมาณทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่กำหนดว่ามีผลิตภัณฑ์ หรือกิจกรรมที่ศึกษาส่งผลกระทบต่อ เมื่อเทียบกับระดับโลก ระดับทวีป หรือระดับประเทศ โดยคะแนนหลังจากการเทียบหน่วยนั้น เป็นคะแนนที่ไม่มีหน่วย ดังสมการที่ (9)

$$NP_j = EP_j / (T \times ER_j) \quad (9)$$

โดยที่  $NP_j$  (Normalized Environment Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมประเภท  $j$  ของผลิตภัณฑ์ (Person)

$T$  (Lifetime of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (Year)

$ER_j$  (Equivalency Factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่  $j$  ใดๆ เกิดจากการ กระทำของคนหนึ่งคนต่อปี (kg Substance Equivalent/Person/Year)

### 3.6) การจัดกลุ่ม (Grouping)

เป็นการจัดกลุ่มผลกระทบของผลที่ได้จากการเทียบหน่วย โดยปกตินิยมแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์ ผลกระทบต่อระบบนิเวศ และผลกระทบต่อการคงเหลือของทรัพยากร เพื่อให้ทราบว่ากลุ่มผลกระทบใดมีความสำคัญและรุนแรงที่สุด

### 3.7) การให้น้ำหนักความสำคัญ (Weighting)

เป็นการกำหนดน้ำหนักความสำคัญในกลุ่มผลกระทบทั้ง 3 ประเภท คือ สุขภาพมนุษย์ (Human Health) ระบบนิเวศ (Ecosystem Quality) และการใช้ทรัพยากร (Resources) โดยการคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ความสำคัญ (Weighting Factor) จากนั้นรวมค่าของดัชนีบ่งชี้ทั้ง 3 ประเภท ให้เป็นคะแนนเชิงเดียว ดังสมการที่ (10) การกำหนดน้ำหนักความสำคัญนั้นมีความละเอียด และต้องขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพภูมิประเทศ ประเภทของผลกระทบ ความรุนแรงของผลกระทบ ความสำคัญของผลกระทบ เป็นต้น

$$WP_j = WF_j \times NP_j \quad (10)$$

โดยที่  $WP_j$  (Weighted Environment Impact Potential) คือ ค่าศักยภาพของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภท  $j$  ใด ๆ หลังการให้น้ำหนักความสำคัญ (Person for Target Year: Pt)

$WF_j$  (Weighted Factor) คือ ค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อม  $j$  ใด ๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้

#### 4) การแปลผลการศึกษา (Life Cycle Interpretation)

วัตถุประสงค์ คือ วิเคราะห์ผลลัพธ์ สรุปผล อธิบายข้อจำกัดและข้อเสนอแนะของการศึกษา และสรุปการแปลผลการศึกษาที่สมบูรณ์ครบถ้วน สามารถเข้าใจได้ง่าย และมีความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตที่กำหนดไว้ (Bunprom และ Thirawanutpong, 2013, ฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศ, ม.ป.ป.)

ในการดำเนินการผลิตจำเป็นต้องมีการลงทุน หลักการทั่วไปของการลงทุนเพื่อประกอบการใด ๆ จะต้องมีความคุ้มค่า และมีผลตอบแทนที่เหมาะสมคุ้มค่าแก่การลงทุน จึงควรมีการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility) เพื่อนำผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์มาเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจว่าผลงานวิจัยที่ได้มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่

##### 2.1.7 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility)

เป็นการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนเป็นส่วนหนึ่งของการตัดสินใจสำหรับผู้ลงทุน เช่นเดียวกับหลักการลงทุนในธุรกิจทั่วไป การลงทุนในงานวิจัยสามารถนำมาประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนเพื่อพิจารณาว่างานวิจัยชิ้นนั้น ๆ สมควรได้รับการสนับสนุนส่งเสริมต่อไปหรือไม่ รวมทั้งพิจารณาโครงการวิจัยว่าให้ผลประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับคุ้มกับการลงทุนหรือไม่ การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์นั้นประกอบด้วย มูลค่าของผลประโยชน์ที่เกิดจากงานวิจัย และต้นทุนวิจัยที่สามารถวัดด้วยราคาที่สามารถและไม่ปรากฏในระบบตลาด

โดยเป็นการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ได้แก่ ที่ดิน แรงงาน ทุน และทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับความต้องการหรือวัตถุประสงค์

##### 2.1.7.1 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break Even Point Analysis)

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นเทคนิคในการวางแผนการลงทุนที่วิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) ต้นทุนผันแปร (Variable Cost) เพื่อให้ทราบว่าจะต้องใช้ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร ในการดำเนินกิจกรรมที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีกำไรตามคาดการณ์ไว้ โดยทั่วไปการวิเคราะห์จะเริ่มที่จุดคุ้มทุน ณ ปริมาณการขายที่ทำให้กิจการมีรายได้เท่ากับค่าใช้จ่ายรวมพอดี นั่นคือดำเนินการไปแล้วเท่าทุนและไม่มีกำไร แต่ก็ไม่ขาดทุนหรืออีกนัยหนึ่งกำไรทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Profit) เท่ากับศูนย์ แต่ถ้ารายได้สูงกว่าระดับจุดคุ้มทุน แสดงว่ามีกำไร ตรงกันข้ามถ้ามีรายได้น้อยกว่าระดับจุดคุ้มทุน แสดงว่าขาดทุน

ดังนั้น จุดคุ้มทุน (Breakeven Point) หมายถึง ณ ระดับการผลิต หรือการขายระดับใดระดับหนึ่งที่ทำให้เกิดรายได้รวม (Total Revenue) เท่ากับต้นทุนรวม (Total Cost) ต้นทุนรวมประกอบด้วย ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร ดังนี้

ต้นทุนคงที่ (Fixed Costs) ซึ่งจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่ผันแปรไปตามจำนวนหน่วยผลิตหรือขาย ต้นทุนคงที่รวมจะคงที่ตลอดเวลา แต่ต้นทุนคงที่ต่อหน่วยจะลดลง ถ้าปริมาณการผลิตหรือการขายสูงขึ้น เช่น ค่าเสื่อมราคา ค่าเช่า เงินเดือน ภาษีทรัพย์สิน เป็นต้น

ต้นทุนผันแปร (Variable Costs) เป็นค่าใช้จ่ายที่ผันแปรไปตามจำนวนหน่วยผลิตหรือขาย ถ้าปริมาณการผลิตหรือขายมาก ต้นทุนผันแปรจะมาก แต่ถ้าปริมาณการผลิตหรือขายน้อย ต้นทุนผันแปรจะน้อย นั่นคือ ต้นทุนผันแปรรวมจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการผลิตหรือขาย แต่ว่าต้นทุนผันแปรต่อหน่วยจะคงที่ เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าแรงงาน

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน คือ การวิเคราะห์โดยสูตรเพื่อแสดงการคำนวณต้นทุนและระยะเวลาคืนทุนในรูปแบบตัวเลข (เบญจวรรณ รักสุทธิ, 2536) วิธีการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนโดยใช้สูตร

$$Q = \frac{TFC}{P - AVC}$$

โดย Q (Quantity) คือ จำนวนการผลิต ณ จุดคุ้มทุน หน่วย หน่วย

TFC (Total Fixed Cost) คือ ต้นทุนคงที่รวม หน่วย บาท

P (Price) คือ ราคาขาย หน่วย บาท

AVC (Average Variable Cost) คือ ต้นทุนแปรผันเฉลี่ย หน่วย บาท

### 2.1.7.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

การคำนวณระยะเวลาคืนทุน หรือจำนวนปีในการดำเนินงาน ทำให้มูลค่าของการลงทุน สอดคล้องกับมูลค่าตอบแทนเงินสดสุทธิสะสม หรืออาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาในการดำเนินการ ซึ่งทำให้ผลกำไรที่ได้รับในแต่ละเดือนรวมกันแล้ว มีค่าเท่ากับจำนวนเงินลงทุนเริ่มแรก ผลกำไรในที่นี้ คือ ผลรวมของกำไรสุทธิหลังจากหักภาษี ดอกเบี้ย และค่าเสื่อมราคา (จิระนันท์ เหลาพร และ กรวิทย์ ชาภักดี, 2555) ซึ่งระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ระยะเวลาผลิตที่จะคุ้มทุน (หรือ คืนทุน)} = \frac{Q}{N}$$



โดย Q (Quantity) คือ จำนวนการผลิต ณ จุดคุ้มทุน หน่วย หน่วย

N (Number) คือ จำนวนการผลิตต่อปี

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ismail และ Al-Hashmi (2009) เปรียบเทียบเศษแก้วและทรายหยาบ พบว่าเศษแก้วมีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายกับทรายหยาบ ทั้งความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และความหนาแน่น (Density) แต่การดูดซึมน้ำ (Absorption) เศษแก้วมีค่าต่ำกว่าประมาณ 14% (ทรายมีค่าเท่ากับ 2.71 ส่วนแก้วมีค่าเท่ากับ 0.39) ดังนั้นคอนกรีตที่ทำจากเศษแก้วจะมีอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำ อาจจะมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีตได้ และนำเศษแก้วมาแทนที่มวลรวมละเอียดในการผลิตคอนกรีต โดยใช้เศษแก้วขนาด 4.75–0.15 มิลลิเมตร แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 15 และ 20 บ่มเป็นเวลา 3 7 14 และ 28 วัน พบว่าเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และการบ่มที่ 3 7 และ 14 วัน การแทนที่ร้อยละ 10 ให้กำลังรับแรงอัด เท่ากับ 29.1 34.6 และ 39.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และที่ 28 วัน การแทนที่ที่ทำให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สุด คือ ร้อยละ 20 โดยมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ 45.9 เมกะปาสคาล

Limbachiya (2009) ศึกษาคุณสมบัติและความทนทานของคอนกรีต ทดสอบพื้นที่ผิวของแก้วสีเขียวและแบบใส โดยเทคนิค Scanning Electron Microscopy พบว่าพื้นที่ผิวของแก้วสีเขียวและแบบใสไม่แตกต่างกัน จึงสามารถใช้แทนหรือรวมกันได้ และนำเศษแก้วแทนที่มวลรวมละเอียด ร้อยละ 0 15 20 30 และ 50 บ่มที่ 7 และ 28 วัน พบว่าที่ 28 วันจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่า 7 วัน และการแทนที่ต่ำกว่าร้อยละ 20 จะไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ถ้ามากกว่าร้อยละ 20 จะทำให้กำลังอัดแรงอัดลดลงกว่าชุดควบคุม รวมไปถึงการแทนที่ร้อยละ 15 จะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซึมน้ำและผลกระทบต่อคอนกรีต

Degirmenci *et al.* (2011) ศึกษาปริมาณการแทนที่โดยใช้แก้วที่มีสีแตกต่างกัน เพื่อดูผลของแก้วแต่ละสีว่าส่งผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างไร โดยนำเศษแก้วมาแทนที่มวลรวมละเอียดของการผลิตคอนกรีต ในการทดลองใช้แก้วใส สีเขียว และสีน้ำตาล ขนาด 4–0.125 มิลลิเมตร แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 30 และ 100 บ่มที่ 7 28 และ 90 วัน พบว่าการแทนที่เศษแก้วเพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างแก้วทั้งสามสีลดลง และในตัวอย่างที่ใช้แก้วสีน้ำตาลมีค่าลดลงมากที่สุด และเมื่อใช้เวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลการทดลอง พบว่าการแทนที่ที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 10 โดยแก้วใสมีกำลังรับแรงอัดที่ 7 28 และ 90 วัน เท่ากับ 32.75 43.27 และ 49.56 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แก้วสีเขียวมีค่า เท่ากับ 34.75 42.01 และ

48.88 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และแก้วสีน้ำตาลมีค่า เท่ากับ 33.74 42.61 และ 47.38 เมกะปาสคาล ตามลำดับ โดยพบว่าคอนกรีตที่แทนที่มวลรวมด้วยเศษแก้วร้อยละ 10 จะให้กำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว อย่างไรก็ตามแม้ว่าแก้วใสจะให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด แต่แก้วสีเขียวและสีน้ำตาลก็ให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าสีของแก้วไม่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด

Tan และ Du (2013) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเศษแก้วแบบใส สีเขียว และสีน้ำตาล โดยเทคนิค X-Ray Fluorescence พบว่าองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) มีปริมาณร้อยละ 72.14 71.22 และ 72.08 ตามลำดับ และเมื่อดูโครงสร้างภายในโดยเทคนิค Scanning Electron Microscopy พบว่าภายในของแก้วแบบใสและสีเขียว มีรอยแตกเล็ก ๆ ภายใน (Micro Cracks) ส่วนแก้วสีน้ำตาลไม่พบรอยแตก เนื่องมาจากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน จากนั้นนำเศษแก้วขนาด 4.75–0.15 มิลลิเมตร มาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 25 50 75 และ 100 โดยแบ่งออกเป็น 4 การทดลอง คือ แก้วแบบใส แก้วสีเขียว แก้วสีน้ำตาล และแบบผสมกันทุกสี บ่มที่ 7 และ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า กำลังรับแรงอัดลดลงตามการแทนที่เศษแก้วที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 4 การทดลอง และมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่การแทนที่ร้อยละ 25 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสีของแก้วที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแตกต่างกัน จึงสามารถใช้ผสมกันได้

Hooi และ Min (2017) ได้นำเศษแก้วแบบใสและแบบมีสี มาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางเคมี โดยเทคนิค X-Ray Fluorescence พบว่าทั้งเศษแก้วแบบใสและแบบมีสี มีส่วนประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เหมือนกัน และสารประกอบบางตัวแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เช่น  $\text{TiO}_2$  และ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ปรากฏในแก้วแบบสี และ  $\text{BaO}$ ,  $\text{Pb}$  และ  $\text{ZnO}$  ปรากฏในแก้วแบบใส ซึ่งถือว่ามีเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  จึงสามารถใช้แทนหรือรวมกันได้

Batayneh *et al.* (2007) กังวลถึงปัญหาขยะที่เกิดขึ้นจนเกิดเป็นปัญหา จึงได้ทำการศึกษาโดยการนำขยะ ประกอบด้วย เศษแก้ว พลาสติก และขยะคอนกรีต (ที่เกิดจากการรื้อถอน) มารีไซเคิลผลิตเป็นคอนกรีต เศษแก้วและพลาสติกใช้แทนที่มวลรวมละเอียด (ขนาด 4.75–0.15 มิลลิเมตร) ส่วนขยะคอนกรีตใช้แทนที่มวลรวมหยาบ โดยแทนที่ร้อยละ 5 10 15 และ 20 ของแต่ละวัสดุที่ใช้ในการทดลอง บ่มเป็นเวลา 28 วัน จากผลการทดลองพบว่า พลาสติกให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด โดยมีค่าสูงสุด เท่ากับ 26 เมกะปาสคาล ของการแทนที่ร้อยละ 5 และจะลดลงตามการแทนที่พลาสติกที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เศษแก้วกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ และมีค่าสูงสุด เท่ากับ 43 เมกะปาสคาล ของการแทนที่ร้อยละ 20 ส่วนขยะคอนกรีตให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด เท่ากับ

33 เมกะปาสคาล ที่การแทนที่ร้อยละ 5 และจะมีค่าลดลงเมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ว่า ขยะเศษแก้วสามารถนำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดและให้กำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุด จึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตคอนกรีต

Magesware และ Vidivelli (2010) ศึกษาแก้วที่ได้มาจากหน้าต่าง (Sheet Glass) ของร้านสะดวกซื้อ นำมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในการผลิตคอนกรีต โดยใช้เศษแก้วขนาด 1.18–0.15 มิลลิเมตร แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 20 30 40 50 และ 100 บ่มที่ 28 45 60 90 และ 180 วัน จากผลการศึกษาพบว่า การแทนที่ร้อยละ 30 40 และ 50 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตลดลงในทุกช่วงเวลาของการบ่ม และการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่การแทนที่ร้อยละ 10 พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว

Ali และ Al-Tersawy (2012) ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมละเอียด โดยใช้เศษแก้วขนาด 5–0.075 มิลลิเมตร และแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 บ่มเป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน พบว่าระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน จะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น เท่ากับ 43.5–65.2 เมกะปาสคาล เมื่อเทียบกับบ่มเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 33.1–47.6 เมกะปาสคาล และพบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเศษแก้วจะทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง โดยอัตราส่วนการแทนที่ที่ทำให้ได้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สุด คือ ร้อยละ 10 และเมื่อดูโครงสร้างภายในโดยเทคนิค Scanning Electron Microscopy เมื่อตัวอย่างคอนกรีตถูกแทนที่ด้วยเศษแก้ว พบว่าการยึดติดกันระหว่างซีเมนต์และมวลรวมค่อนข้างแย่มาก ไม่สานยึดติดเป็นเนื้อเดียวกัน (Poor Homogeneity) และพบช่องว่างและรอยแตกเพิ่มขึ้นในเนื้อคอนกรีตเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเศษแก้ว

Castro และ Brito (2013) ศึกษาความทนทานของคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวม โดยใช้เศษแก้วขนาด 4 มิลลิเมตร แทนที่มวลรวมละเอียด และใช้เศษแก้วขนาด 11.2 มิลลิเมตร แทนที่มวลรวมหยาบ ซึ่งแบ่งการทดลองเป็นการแทนที่มวลรวมละเอียด แทนที่มวลรวมหยาบ และแทนที่มวลรวมทั้งหมด ใช้การแทนที่ร้อยละ 5 10 และ 20 ของทุกการแทนที่ บ่มเป็นเวลา 28 วัน พบว่าการใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 5 และ 10 ให้กำลังรับแรงอัดสูง และลดลงเมื่อแทนที่เพิ่มขึ้น ส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด และการใช้เศษแก้วแทนที่ทั้งมวลรวมหยาบและละเอียดพร้อมกัน พบว่าให้กำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด และเมื่อทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) พบว่าการใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมละเอียดให้การดูดซึมน้ำสูงสุด และสูงที่สุดที่ร้อยละ 10 ส่วนการแทนที่มวลรวมหยาบให้ค่าต่ำที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปจากการทดลอง

ได้ว่า กำลังรับแรงอัดจะลดลงเมื่อการแทนที่เศษแก้วเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเศษแก้วที่ใช้แทนที่ใหญ่ขึ้น (ใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมหยาบให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่ามวลรวมละเอียด) ส่วนการดูดซึมน้ำจะลดลงเมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้นและขนาดของเศษแก้วใหญ่ขึ้น

Islam, Rahman และ Kazi (2017) ศึกษาการผลิตคอนกรีตโดยใช้เศษแก้วขนาด 1.19–0.15 มิลลิเมตร แทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 25 บ่มที่ 7 14 28 56 90 180 และ 365 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นหลังจาก 28 วัน เนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดใน 28 56 และ 90 วันหลังการบ่ม ส่วนช่วงเวลาอื่นเป็นผลมาจากส่วนผสมดั้งเดิม โดยการแทนที่ร้อยละ 10 กำลังรับแรงอัดจะมีค่าสูงในช่วงระยะเวลาการบ่มช่วงแรก ส่วนที่ร้อยละ 20 จะมีค่าสูงสุดในระยะยาว และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า 35 เมกะปาสคาล ในทุกการแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 20 เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าต่อสิ่งแวดล้อมและเงินทุน พบว่าการแทนที่ร้อยละ 20 มีความคุ้มค่ามากที่สุด

Nishikant *et al.* (2016) ศึกษาการผลิตอิฐคอนกรีตทางเท้าโดยใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมละเอียด โดยใช้เศษแก้วขนาด 4.75–0.090 มิลลิเมตร แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 15 30 และ 45 ผสมกับมวลรวมหยาบที่มีขนาด 10 มิลลิเมตร ปูนซีเมนต์ และแฉะลอย บ่มเป็นเวลา 7 และ 28 วัน ผลจากการศึกษาพบว่า เวลาการบ่มที่ 28 วันจะใช้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเศษแก้ว คือ ร้อยละ 15 (34.12 เมกะปาสคาล) และร้อยละ 30 (35.27 เมกะปาสคาล) และจะลดลงในการแทนที่ร้อยละ 45 (33.11 เมกะปาสคาล) เนื่องจากมีช่องว่างภายในเพิ่มขึ้น

การใช้เศษแก้วในงานที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างนั้น ยังสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตได้ โดยมีการศึกษาดังนี้

Aliabdo, Elmoaty และ Aboshama (2016) นำเศษแก้วมาบดให้เป็นผงมีขนาดต่ำกว่า 75 ไมครอน แล้วนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ โดยแทนที่ร้อยละ 5 10 15 20 และ 25 บ่มเป็นเวลา 7 28 และ 56 วัน พบว่าการแทนที่ร้อยละ 10 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดในช่วงเวลาที่บ่ม โดยจะมีค่าสูงสุดที่ 56 วันเท่ากับ 49.18 เมกะปาสคาล โดยการใช้ผงแก้วแทนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง และมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จากการดูปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเมื่อมีการแทนที่ของผงแก้วเพิ่มขึ้น ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะมีปริมาณลดลง เนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้น

Afshinnia และ Rangaraju (2016) ศึกษาการใช้เศษแก้วแทนที่ปูนซีเมนต์และมวลรวมหยาบ โดยแทนที่ร้อยละ 20 เศษแก้วที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์และมวลรวมหยาบมีขนาดเฉลี่ย 17 ไมครอน ส่วนที่ใช้แทนที่มวลรวมหยาบมีขนาด 9.50–4.75 มิลลิเมตรบ่มที่ 28 วัน ซึ่งในการทดลองจะแบ่งออกเป็นการใช้ผงแก้วแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 การใช้แก้วแทนที่กรวดร้อยละ 100 หรือ ร้อยละ 80 ผสมผงแก้วร้อยละ 20 และการใช้กรวดร้อยละ 80 ผสมผงแก้วร้อยละ 20 จากการทดลองพบว่า การใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมหยาบทั้งหมดกำลังรับแรงอัดจะลดลงกว่าการใช้กรวดทั้งหมด เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นนั้นอ่อนแอ (Poor Bond) ระหว่างพื้นผิวที่เรียบของอนุภาคแก้วและซีเมนต์เพสต์ และการใช้ผงแก้วแทนที่ปูนซีเมนต์ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง แต่เมื่อใช้ผงแก้วผสมกับเศษแก้วที่ใช้แทนที่มวลรวมหยาบส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นเท่ากับ 34.0 เมกะปาสคาล โดยมีค่าสูงกว่าตัวอย่างชุดควบคุมที่ใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมหยาบทั้งหมด แต่เมื่อนำผงแก้วผสมกับกรวดจะทำให้มีค่าลดลงกว่าชุดควบคุมที่ใช้กรวดเป็นมวลรวมหยาบทั้งหมด เนื่องจากการใช้ผงแก้วร่วมกับกรวดจะทำให้ลดความแข็งแรงของมวลรวมได้

Hooi และ Min (2017) นำเศษแก้วมาบดใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตอิฐมวลเบา โดยแบ่งออกเป็น 2 ขนาด คือ มากกว่า 90 ไมครอน และ 75–45 ไมครอน แทนที่ร้อยละ 10 และ 20 บ่มเป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากการทดลองพบว่า ขนาดของเศษแก้ว 75–45 ไมครอน ให้กำลังรับแรงอัดดีกว่า เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีกว่า ส่วนการแทนที่และระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นโดยการแทนที่ร้อยละ 20 บ่มที่ 28 วันมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 1.59 เมกะปาสคาล แต่ก็มีค่าน้อยกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการแทนที่ด้วยผงแก้ว (1.75 เมกะปาสคาล)

และในแต่ละกระบวนการการผลิตนั้น ก็มีการใช้ทรัพยากรและพลังงาน และมีการปลดปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการที่จะทราบได้ว่าในแต่ละกระบวนการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ยังไงก็สามารถวิเคราะห์และประเมินได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment) ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง การใช้ การนำกลับมาใช้ใหม่ และการจัดการหลังการใช้งานได้ การศึกษาโดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตกับงานที่เกี่ยวข้องคอนกรีตมีจำนวนไม่มากนัก ดังงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

Giama และ Papadopoulos (2015) ศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตสิ่งก่อสร้าง เช่น เหล็ก ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ อิฐ มวลรวม คอนกรีต เป็นต้น กำหนดขอบเขตการศึกษาแบบ Cradle to Gate ครอบคลุมตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และกระบวนการผลิต กำหนดหน่วยการทำงาน (Functional Unit) 1 กิโลกรัมของการผลิต ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด คือ กระบวนการผลิต

โดยเฉพาะกระบวนการผลิตเหล็ก ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มวลรวม พบว่ามีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และใช้พลังงานในการผลิตเป็นจำนวนมาก

Hossain *et al.* (2016) ประเมินวัฏจักรชีวิตการจัดการขยะที่เกิดจากรีไซเคิลสิ่งก่อสร้างและเศษแก้วโดยนำมาใช้แทนที่มวลรวมในการก่อสร้างเปรียบเทียบกับการผลิตมวลรวมจากธรรมชาติ (Virgin Sources) ของฮ่องกง เนื่องจากปริมาณเศษแก้วที่มีจำนวนมากในหลุมฝังกลบ ไม่สามารถกำจัดได้และพื้นที่ของหลุมฝังกลบในประเทศไม่เพียงพอ กำหนดขอบเขตการศึกษาแบบ Cradle to Gate ครอบคลุมตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และกระบวนการผลิต กำหนดหน่วยการทำงาน (Functional Unit) 1 ตันของเศษแก้ว ผลการศึกษาพบว่าการใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมในการผลิตคอนกรีต ทำให้ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมลดลงร้อยละ 59 โดยกระบวนการที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดที่สุด คือ การขนส่ง เนื่องจากมวลรวมจากธรรมชาติต้องขนส่งมาจากประเทศจีน ใช้ระยะทางและพลังงานมาก ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นการนำเศษแก้วมาผลิตเป็นมวลรวมจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และเป็นการนำขยะมาใช้ให้เกิดประโยชน์

สามารถสรุปข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาการแทนที่ของเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่มของอิฐคอนกรีต ดังตารางที่ 2.5



**ตารางที่ 2.5** การแทนที่ของเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่มของอิฐคอนกรีต

ชื่อ (ปี)	ร้อยละการแทนที่		ขนาด	w/c ratio	เวลาในการบ่ม (วัน)	Compressive strength		
	Cement	Aggregate						
Batayneh, M., Marie, I. and Asi, I. (2007)		5, 10, 15 และ 20 แทน Fine Aggregate	9.5-0.15 mm.	0.56	28	20 43 Mpa		
Ismail, Z. Z. and Al-Hashmi, E. A. (2009)	-	10, 15 และ 20 แทน Fine Aggregate	4.75-0.15 mm.	0.53	3, 7, 14 และ 28	10 3 วัน 10 7 วัน 10 14 วัน 20 28 วัน	29.1 Mpa 34.6 Mpa 39.1 Mpa 45.9 Mpa	
Magesware, M. and Vidivelli, B. (2010)	-	10, 20, 30, 40, 50 และ 100 แทน Fine Aggregate	1.18-0.15 mm.	-	28, 45, 60, 90 และ 180	10	-	
Degirmenci, N., Yilmaz, A. and Cakir, O. A. (2011)	-	10, 30 และ 100 แทน Fine Aggregate	4.00-0.125 mm.	0.47	7, 28 และ 90	10	7 วัน 28 วัน 90 วัน	32.8 Mpa 43.3 Mpa 49.6 Mpa
Ali, E. E. and Al-Tersawy, S. H. (2012)	-	10, 20, 30, 40 และ 50 แทน Fine Aggregate	5.00-0.075 mm.	0.40	7 และ 28	10	7 วัน 28 วัน	33.1-47.6 Mpa 43.5-65.2 Mpa

ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

ชื่อ (ปี)	ร้อยละการแทนที่		ขนาด	w/c ratio	เวลาในการ ป่ม (วัน)	Compressive strength		
	Cement	Aggregate				ร้อยละที่สูงสุด	ค่า	
Castro, S. D. and Brito, J. D. (2013)	-	แทน Fine Aggregate	แทน Fine	0.55-0.58	28	5, 10	ให้ตารางมา บอก	
		5, 10 และ 20	Aggregate 4 mm.			แทน Coarse	ค่าไม่ได้	
		แทน Coarse				5, 20		
		Aggregate	แทน Coarse			แทน Fine		
		5, 10 และ 20	Aggregate					
		แทนทั้ง Fine	11.2 mm.					
		Aggregate และ						
		Coarse Aggregate						
		5, 10 และ 20						
Tan, K. H. and Du, H. (2013)	-	25, 50, 75 และ 100	4.75-0.15	0.485	7 และ 28	25	7 วัน	42 Mpa
		แทน Fine Aggregate	mm.				28 วัน	49 Mpa
Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. M. and Aboshama, A. Y. (2016)		-	< 75 µm.	0.5	7, 28 และ 56	10	7 วัน	38.51 Mpa
		5, 10, 15, 20 และ 25					28 วัน	46.45 Mpa
							56 วัน	49.18 Mpa



ตารางที่ 2.5 (ต่อ)

ชื่อ (ปี)	ร้อยละการแทนที่		ขนาด	w/c ratio	เวลาในการ ป่ม (วัน)	Compressive strength	
	Cement	Aggregate				ร้อยละที่สูงสุด	ค่า
Afshinia, K. and Rangaraju, P. R. (2016)	20	-	Coarse Aggregate	0.45	28	20	ผงแก้วแทน Cement 36.1 Mpa
	-	20 (แทน Coarse Aggregate)	9.50-4.75 mm.				ผงแก้วแทน Coarse 37.1 Mpa
			Glass Powder (แทน cement)				Aggregate 27 Mpa
			17 $\mu\text{m}$ .				Coarse Aggregate 100%
Hooi, L. S. and Min, P. J. (2017)	10 และ 20	-	>90 $\mu\text{m}$ . 75-45 $\mu\text{m}$ .	-	7 และ 28	20	7 วัน 75-45 $\mu\text{m}$ . 1.55 Mpa
							28 วัน 75-45 $\mu\text{m}$ . 1.59 Mpa
Ziari, H., Barakoochi, A. T. and Moniri, A. (2017)	5, 10 และ 15	-	600-250 $\mu\text{m}$ .	0.475	1, 3, 7, 28 และ 90	10	3 วัน 24 Mpa 7 วัน 36 Mpa 28 วัน 46 Mpa 90 วัน 59 Mpa

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเศษแก้วบนเกาะสีชังมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในการผลิตอิฐคอนกรีต เพื่อหาแนวทางในการจัดการเศษแก้วบนเกาะที่มีปริมาณมากและเป็นปัญหาของเกาะ งานวิจัยนี้สามารถแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ส่วนที่ 1 เป็นการเตรียมวัตถุดิบ ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ ศึกษาการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่ม แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบหากำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาสารประกอบและโครงสร้างภายในของอิฐคอนกรีต ส่วนที่ 2 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วในการผลิต โดยการเก็บรวบรวมข้อมูล และใช้โปรแกรม SimaPro 8.3 ในการวิเคราะห์ และในส่วนที่ 3 เป็นการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยทำการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับการวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุสำหรับการวิจัย

- 1) เศษแก้ว (Waste Glass) ได้รับความอนุเคราะห์จาก เทศบาลตำบลเกาะสีชัง ตำบลเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี ดังรูปที่ 3.1
- 2) ทรายหยาบแม่น้ำ (Coarse Sand) ดังรูปที่ 3.2
- 3) น้ำประปา (Tap Water)
- 4) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement) ตราเอสซีจี

##### 3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับการวิจัย

- 1) เครื่องบดชนิดละเอียด (Ball Mill Work Index, Sprecher Schun Model 06T14FC7A)
- 2) เครื่องร่อนคัดขนาดเบอร์ 4 ขนาดอนุภาค 4.75 มิลลิเมตร (Aggregate Vibration Screen, Gilson Company Model: PS-3F, U.S.A.)

3) เครื่องร่อนคัดขนาดเบอร์ 10 ขนาดอนุภาค 2.00 มิลลิเมตร (Aggregate Vibration Screen, Gilson Company Model: PS-3F, U.S.A.)

4) เครื่องร่อนคัดขนาดเบอร์ 20 ขนาดอนุภาค 850 มิลลิเมตร (Aggregate Vibration Screen, Gilson Company Model: PS-3F, U.S.A.)

5) เครื่องร่อนคัดขนาดเบอร์ 40 ขนาดอนุภาค 425 ไมโครเมตร (Aggregate Vibration Screen, Gilson Company Model: PS-3F, U.S.A.)

6) เครื่องร่อนคัดขนาดเบอร์ 100 ขนาดอนุภาค 150 ไมโครเมตร (Aggregate Vibration Screen, Gilson Company Model: PS-3F, U.S.A.)

7) เครื่องร่อนคัดขนาดเบอร์ 200 ขนาดอนุภาค 75 ไมโครเมตร (Vibrating Screen, Eriez Magnetics Japan Company, Japan)

8) เครื่องทดสอบแรงอัด (Shimadzu Autograph AG-1000E)

9) ตู้อบความร้อน (Isotemp Oven, Model 725F, Fisher Scientific, U.S.A.)

10) เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 2 ตำแหน่ง (Model ML 1602, Mettler Toledo, Switzerland)

11) แม่พิมพ์เหล็ก กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร และสูง 5 เซนติเมตร

12) เครื่องแก้ว เช่น บีกเกอร์ กระจกบดวง

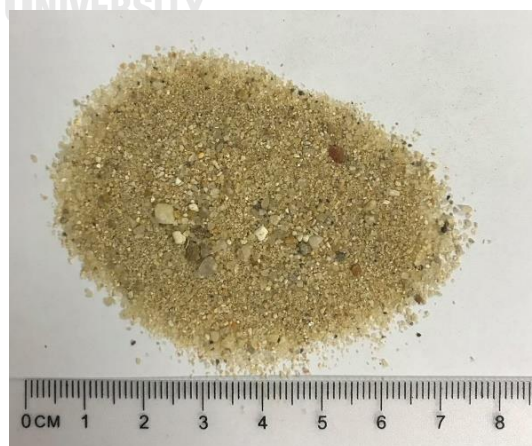
13) ถูกระสอบ

14) ฟิล์มยืดถนอมอาหาร (Plastic Wrap)

15) โปรแกรมซอฟต์แวร์สำเร็จรูป SimaPro 8.3



รูปที่ 3.1 เศษแก้วที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.2 ทราซหยาบที่ใช้ในการศึกษา

### 3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

**ส่วนที่ 1** การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุดิบ การแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมของการผลิตอิฐคอนกรีต

#### 3.2.1 การเตรียมวัสดุดิบที่ใช้ในการทำวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
- 2) ทรายแม่น้ำ นำมาล้างให้สะอาด
- 3) เตรียมมวลรวมจากเศษแก้ว นำเศษแก้วมาล้างทำความสะอาด นำเศษกระดาษ (ฉลากที่ติดอยู่บนบรรจุภัณฑ์) หรือสิ่งเจือปนออกให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียสหรือผึ่งให้แห้ง เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำเศษแก้วเข้าเครื่องบดชนิดละเอียดความเร็ว 1,500 รอบเป็นเวลา 5 นาที เพื่อลดขนาดให้มีขนาดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ค้างตะแกรงเบอร์ 100 แล้วเก็บใส่ถุงพลาสติกมัดปากถุง หรือใช้ถุงซิปล็อค เพื่อควบคุมความชื้นและป้องกันการปนเปื้อนจากวัสดุอื่น ๆ

#### 3.2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุดิบ

3.2.2.1 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) และโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของทรายหยาบและเศษแก้ว

ใช้วิธีการทดสอบตาม ASTM C136 (American Society for Testing and Materials C136M-14, 2014) ใช้ตะแกรงร่อน (Testing Sieves) ซึ่งตะแกรงนี้ทำจากโลหะ โดยใช้ตะแกรงเบอร์ 4 10 20 40 100 และ 200 โดยชั่งมวลตะแกรงและถาดรองก่อน บันทึกข้อมูล แล้วชั่งทรายหยาบและเศษแก้วปริมาณ 200 กรัม วางบนตะแกรงร่อนชั้นบนสุด โดยเรียงลำดับตะแกรงให้ขนาดหยาบอยู่บนสุด และละเอียดลงมาอยู่ในชั้นถัดลงมาเรื่อย ๆ จนตะแกรงชั้นล่างสุดเป็นตะแกรงขนาดละเอียดที่สุด ดังนี้ เบอร์ 4 10 20 40 100 และ 200 และถาดรอง จากบนลงล่าง ตามลำดับ เขย่าเป็นเวลา 15 นาที เมื่อเขย่าครบเวลาที่กำหนด ชั่งมวลตะแกรงกับตัวอย่างที่ค้างได้ในแต่ละชั้นรวมถึงถาดรองกับตัวอย่างที่ค้าง แล้วบันทึกข้อมูล และนำค่าน้ำหนักในแต่ละชั้นมาคำนวณคิดเป็นร้อยละ ดังสมการ

$$\text{ร้อยละน้ำหนักค้างบนตะแกรง} = \frac{\text{น้ำหนักมวลรวมค้างแต่ละตะแกรง} \times 100}{\text{น้ำหนักมวลรวมทั้งหมด}}$$

$$\text{ร้อยละน้ำหนักค้างบนตะแกรงสะสม} = \text{ผลบวกสะสมค่าร้อยละน้ำหนักบนตะแกรง}$$

$$\text{ร้อยละน้ำหนักผ่านตะแกรง} = 100 - \text{ร้อยละน้ำหนักค้างตะแกรงสะสม}$$

แล้วนำมาคำนวณหาค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายหยาบและเศษแก้ว ดังสมการ

$$\text{โมดูลัสความละเอียด} = \frac{\text{ผลรวมเปอร์เซ็นต์สะสมของแต่ละตะแกรง}}{100}$$

3.2.2.2 ศึกษาความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของทรายหยาบและเศษแก้ว

ใช้วิธีการทดสอบตาม ASTM C128 (American Society for Testing and Materials C128-15, 2015) นำทรายหยาบและเศษแก้วมาแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำมาให้ความร้อนโดยเครื่องเป่าลมร้อน หรือไดร์เป่าผมจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัวผิวแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 500 กรัม บันทึกค่า แล้วเทตัวอย่างลงในขวดทดลอง เทน้ำลงไปประมาณ 90% ของปริมาตรขวดทดลอง ไล่ฟองอากาศภายในให้หมด โดยการหมุนไปมา เติมน้ำจนถึงระดับ 500 มิลลิลิตร ชั่งน้ำหนักบันทึกค่า เทตัวอย่างออกจากขวดทดลองใส่ภาชนะนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5$  องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักบันทึกค่า เติมน้ำใส่ขวดทดลองเปล่าจนถึงระดับ 500 มิลลิลิตร แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกค่า คำนวณดังสมการ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{น้ำหนักทราย (ก่อนอบ)}}{(\text{นน.ขวดทดลอง+น้ำ}) + \text{นน.ทราย(ก่อนอบ)} - (\text{นน.ขวดทดลอง+ ทราย+น้ำ})}$$

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักทราย (ก่อนอบ)} - \text{น้ำหนักทราย (หลังอบ)}}{\text{น้ำหนักทราย (หลังอบ)}} \times 100$$

3.2.2.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของทรายหยาบและเศษแก้วด้วยเครื่องวิเคราะห์ โดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry: XRF) เพื่อวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุ

3.2.2.4 ศึกษาสารประกอบทางเคมีของทรายหยาบและเศษแก้วด้วยเครื่องวิเคราะห์ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD) เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบที่มีอยู่ในภายใน

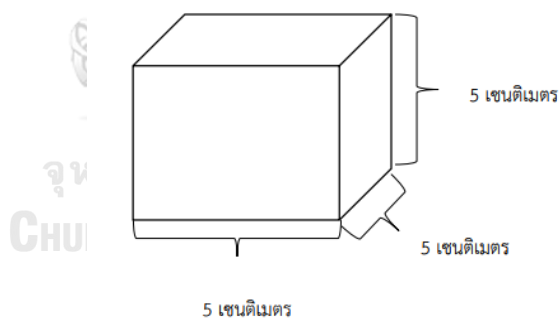
### 3.2.3 การเตรียมตัวอย่างในการผลิตอิฐคอนกรีต

ศึกษาการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วที่เหมาะสม และระยะเวลาในการบ่ม การแทนที่มี 5 อัตราส่วน คือ ร้อยละ 0 10 20 30 และ 100 ระยะเวลาในการบ่มมี 3 ช่วง คือ 7 14 และ 28 วัน โดยการทดลองละ 5 ซ้ำ

1) นำเศษแก้วมาทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเศษแก้วและทรายหยาบ โดยกำหนดให้อัตราส่วนผสมอิฐคอนกรีตต้นแบบ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ : ทรายหยาบ : น้ำ เท่ากับ 1 : 3 : 0.5 โดยน้ำหนัก แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วร้อยละ 0 10 20 30 และ 100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

2) ผสมวัตถุดิบที่แห้ง ได้แก่ เศษแก้ว ทรายหยาบ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังตารางที่ 3.1 ให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงเติมน้ำลงไป จากนั้นผสมต่ออีก 1-2 นาที จึงนำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแม่พิมพ์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3 ทำการทดลองละ 5 ซ้ำ ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์

3) เมื่อนำตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ นำไปบ่มโดยแช่น้ำที่อุณหภูมิปกติ เป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน เพื่อใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และความหนาแน่น (Density)



รูปที่ 3.3 ขนาดอิฐคอนกรีต  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

**ตารางที่ 3.1** ตำรับการทดลอง (อัตราส่วนผสม)

การแทนที่ร้อยละ	ร้อยละโดยน้ำหนัก			
	ปูนซีเมนต์ พอร์ตแลนด์	ทรายหยาบ	เศษแก้ว	น้ำ
0	22.22	66.67	00.00	11.11
10	22.22	60.00	6.67	11.11
20	22.22	53.34	13.33	11.11
30	22.22	46.67	20.00	11.11
100	22.22	00.00	66.67	11.11

### 3.2.4 การศึกษาคุณสมบัติของอิฐคอนกรีต

#### 3.2.4.1 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

ทดสอบหากำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีต เมื่อบ่มครบ 7 14 และ 28 วัน ใช้วิธีการทดสอบตาม ASTM C109 (American Society for Testing and Materials C109M-16a, 2016)

- 1) นำอิฐคอนกรีตตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) นำอิฐคอนกรีตตัวอย่างละ 5 ก้อน มาทดสอบ โดยนำเข้าเครื่องทดสอบหากำลังรับแรงอัด บันทึกค่าที่ได้ และหาค่าเฉลี่ย
- 3) คำนวณหากำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่าง ตามสูตร

$$C = \frac{W}{A}$$

เมื่อ C คือ กำลังรับแรงอัดของชิ้นตัวอย่าง หน่วย เมกะปาสกาล (MPa)

W คือ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด หน่วย นิวตัน (N)

A คือ พื้นที่ทั้งหมดโดยเฉลี่ยจากพื้นที่ด้านบนและด้านล่างของชิ้นตัวอย่าง หน่วย ตารางมิลลิเมตร (mm<sup>2</sup>)

### 3.2.4.2 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีต ใช้วิธีทดสอบตาม ASTM C 642 (American Society for Testing and Materials C642-13, 2006)

1) ใช้อิฐคอนกรีตตัวอย่างละ 5 ก้อนโดยใช้เวลาในการอบ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5$  องศาเซลเซียส แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักของอิฐคอนกรีต เป็นน้ำหนักแห้ง ( $W_d$ )

2) นำอิฐคอนกรีตที่ได้จาก 1) ไปแช่ในน้ำกลั่น (หรือน้ำสะอาดไม่กระด้าง) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา นำอิฐคอนกรีตขึ้นจากน้ำใช้ผ้าเปียกซับน้ำส่วนเกินออกจากผิวตัวอย่าง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักทำให้เสร็จภายใน 3 นาที จะได้น้ำหนักเป็นน้ำหนักอิ่มตัว ( $W_s$ ) โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 5 ก้อน

3) คำนวณหาการดูดซึมน้ำของชิ้นตัวอย่าง ตามสูตร

$$\text{ร้อยละของการดูดซึมน้ำ} = \frac{100 \times (W_s - W_d)}{W_d}$$

เมื่อ  $W_s$  คือ น้ำหนักอิ่มตัว หน่วย กรัม (g)

$W_d$  คือ น้ำหนักแห้ง หน่วย กรัม (g)

### 3.2.4.3 ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีต

1) คำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่าง ตามสูตร

$$\rho = \frac{m}{v}$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นมวลเชิงปริมาตร หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  คือ มวลของวัสดุ หน่วย กิโลกรัม (kg)

$v$  คือ ปริมาตรของวัสดุ หน่วย ลูกบาศก์เมตร ( $\text{m}^3$ )



3.2.4.4 สารประกอบภายในอิฐคอนกรีต โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Driffracton)

3.2.4.5 โครงสร้างของอิฐคอนกรีต โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 3.3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของอิฐคอนกรีต

นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ One-way ANOVA ด้วยโปรแกรม SPSS เพื่อทดสอบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของการแทนที่ทรายหายไปด้วยเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่ม

**ส่วนที่ 2** การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) ของอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วในการผลิต

#### 3.3.2 การวิเคราะห์การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของก้อนอิฐคอนกรีตจากเศษแก้วที่มีคุณสมบัติทางกายภาพดีที่สุด โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ด้วยวิธี Eco-Indicator 99 กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการประเมินผลกระทบ โดยศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้ง 5 ผลกระทบ คือ

- สารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganics)
- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change)
- ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (Ecotoxicity)
- ภาวะความเป็นกรด/การเพิ่มธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำ (Acidification/Eutrophication)
- เชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil Fuels)

#### 1) การกำหนดเป้าหมาย และขอบเขตการศึกษา (Goal and Scope Definition)

เป้าหมายในการศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการ หรือกิจกรรมในการผลิต ตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และกระบวนการผลิตจนได้ผลิตภัณฑ์มา เรียกว่า “Cradle to Gate”

เป้าหมายและขอบเขตของอิฐคอนกรีตที่ผลิตจากเศษแก้ว และอิฐคอนกรีตทั่วไป

- ผลิตภัณฑ์ คือ ก้อนอิฐคอนกรีต
- หน้าที่ผลิตภัณฑ์ คือ การจัดการเศษแก้วเป็นผลิตภัณฑ์ใช้ในการก่อสร้าง
- หน่วยอ้างอิง (Function Unit) คือ อิฐคอนกรีตต่อพื้นที่การใช้งาน 1 ตารางเมตร

- เป้าหมายหลัก คือ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้พลังงานในกระบวนการผลิต ภายใต้หน่วยอ้างอิงเดียวกันคือ 1 ตารางเมตรต่อพื้นที่การใช้งานของก้อนอิฐคอนกรีตที่ผลิตได้ เพื่อจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา ปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไปในอนาคต โดยเปรียบเทียบการผลิตอิฐคอนกรีต 3 ขั้นตอน ได้แก่ การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และกระบวนการผลิต

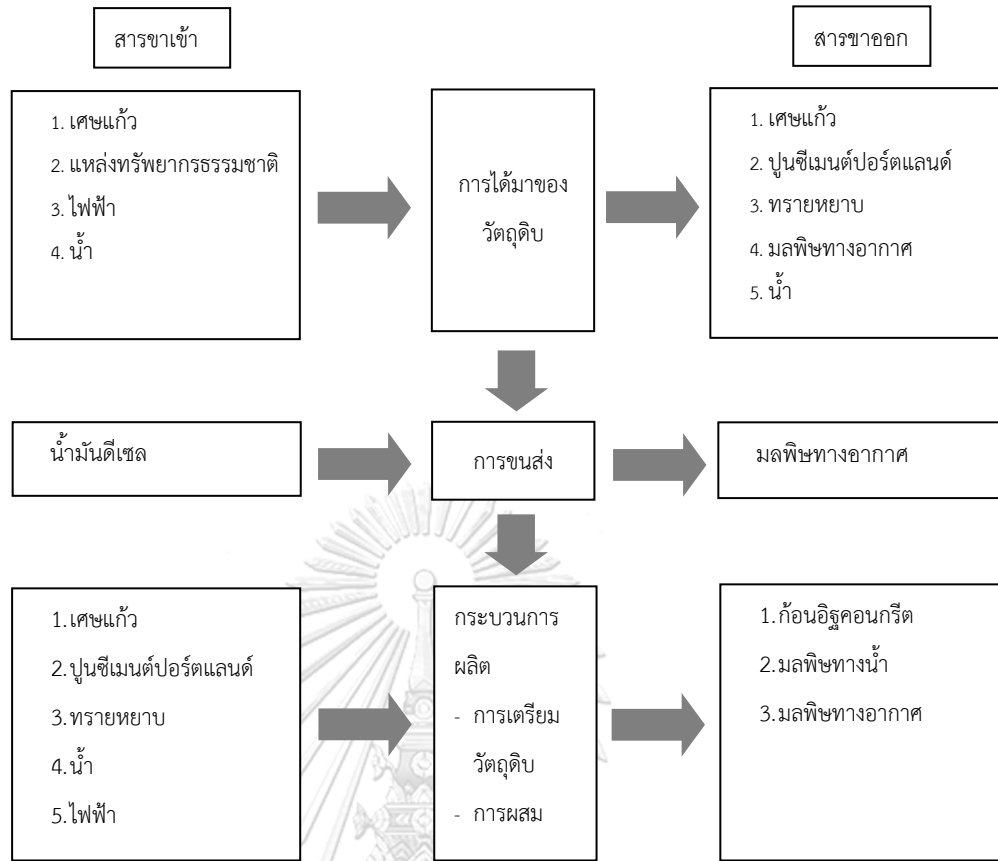
## 2) การวิเคราะห์เพื่อทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Inventory Analysis)

บัญชีรายการสิ่งแวดล้อม คือ ข้อมูลที่แสดงชนิด และปริมาณสารขาเข้า เช่น วัตถุดิบ พลังงาน ทรัพยากร เป็นต้น และสารขาออก ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์พลอยได้ และมลสารที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมรูปแบบต่าง ๆ

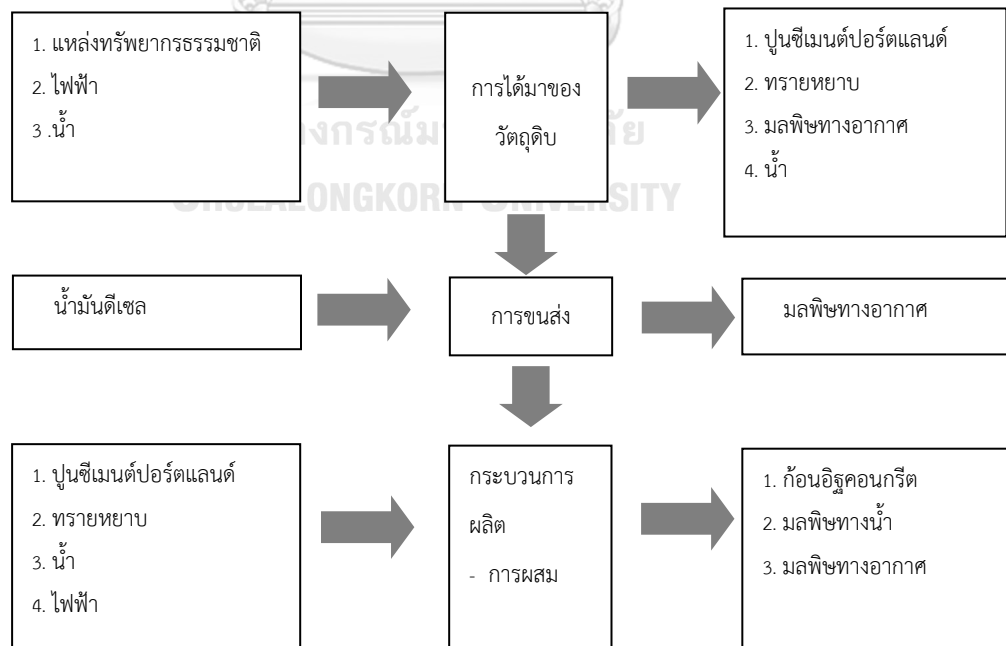
ดังนั้นจึงต้องเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนแรกของผลิตภัณฑ์ ศึกษาขั้นตอนวิธีการทำอิฐคอนกรีตจากเศษแก้ว โดยระหว่างทำการทดลองให้จดบันทึกข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกทั้งหมด

### 2.1) สร้างแผนภาพวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

กำหนดขั้นตอนของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ที่พิจารณาและขอบเขตการศึกษา โดยระบุกระบวนการย่อยของแต่ละขั้นตอนในวัฏจักร ระบุสารขาเข้าและสารขาออกที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการผลิตอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแกล้ว



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไป (ไม่มีการแทนที่ของเศษแกล้ว)

### 3) การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Impact Assessment)

เป็นกระบวนการที่ต้องใช้เทคนิคเพื่อจัดการแปลงข้อมูลการใช้ทรัพยากรและการปลดปล่อยมลสารต่าง ๆ จากข้อมูลบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมที่ได้จากขั้นต้น เพื่อนำมาจำแนกประเภท และกำหนดบทบาทที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การทำให้เกิดภาวะโลกร้อน การทำให้เกิดฝนกรด การทำให้โอโซนในชั้นบรรยากาศลดลง การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในน้ำ และการสิ้นเปลืองทรัพยากร โดยมีค่ามาตรฐานเพื่อใช้ในสูตรการคำนวณจาก MTEC, Thai LCI data, IPCC และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งการคำนวณโดยโปรแกรมซอฟต์แวร์ SimaPro 8.3

### 4) การแปลผล และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ (Interpretation)

เป็นการนำผลการคำนวณที่ได้จากวิธีการคำนวณและจากโปรแกรม SimaPro 8.3 แสดงผลข้อมูลในรูปของตัวเลขที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยแยกเป็นผลของแต่ละกระบวนการต่าง ๆ และผลรวมของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งรูปแบบของกราฟกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อสามารถเปรียบเทียบการมีส่วนทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในแต่ละช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ จากนั้นวิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อสรุปผลการวิจัย ให้ข้อเสนอแนะจากผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าการนำเศษแก้วมาแทนที่มวลรวมในการผลิตอิฐคอนกรีตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากน้อยเพียงใด

## ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วในการผลิต

### 3.3.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้ว

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตจากการใช้ประโยชน์ของเศษแก้วเป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตอิฐคอนกรีต การดำเนินการดังกล่าวจำเป็นต้องมีการลงทุน ในหลักการทั่วไปการลงทุนเพื่อประกอบการใด ๆ จะต้องมีความคุ้มค่า และมีผลตอบแทนที่เหมาะสมคุ้มค่าแก่การลงทุน ผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จะเป็นตัวชี้วัดอย่างหนึ่ง ในการตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่

ดังนั้น จึงวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตโดยวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (ระดับการผลิตหรือการขาย ที่ก่อให้เกิดรายได้รวม เท่ากับต้นทุนรวม) และระยะเวลาคืนทุน (ระยะเวลาผลิตที่จะคุ้มทุน) ในการผลิตอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวม

โดยเลือกก่อนอิฐคอนกรีตที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีที่สุด เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของอิฐคอนกรีตที่ผลิตจากเศษแก้ว

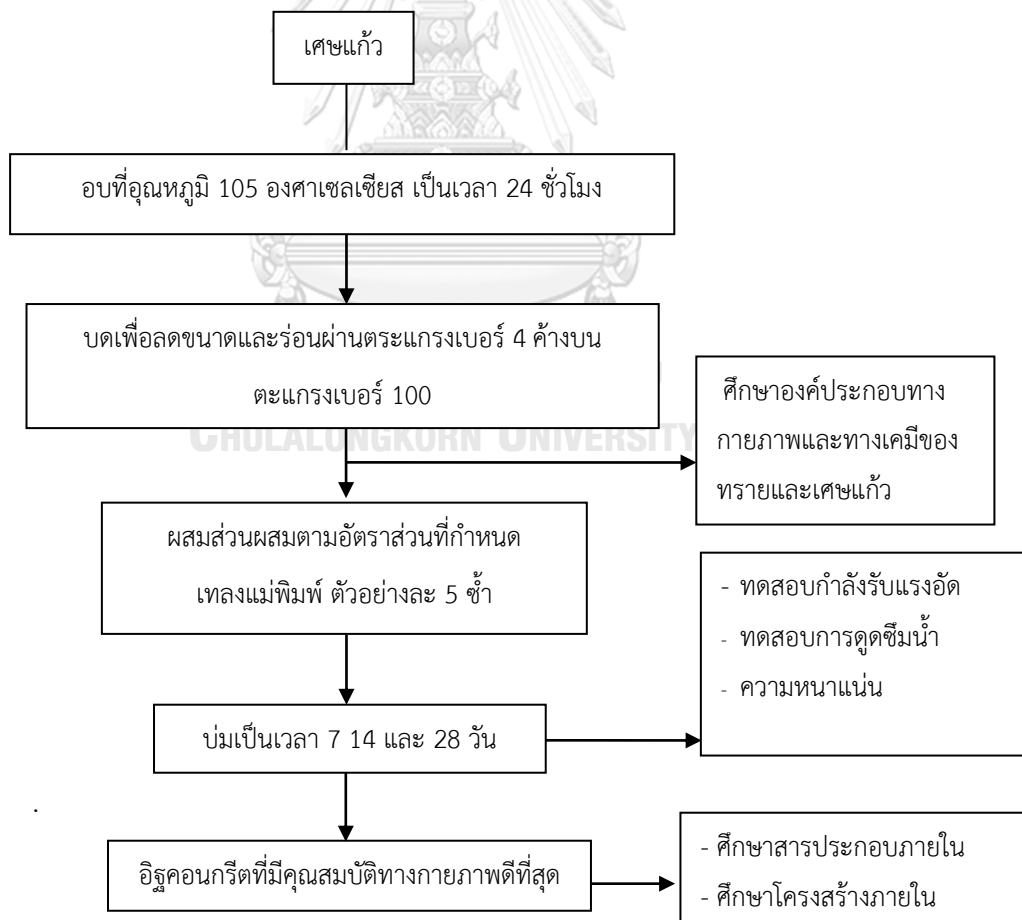
โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณ ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3

$$Q = \frac{TFC}{P - AVC} \quad 3.2$$

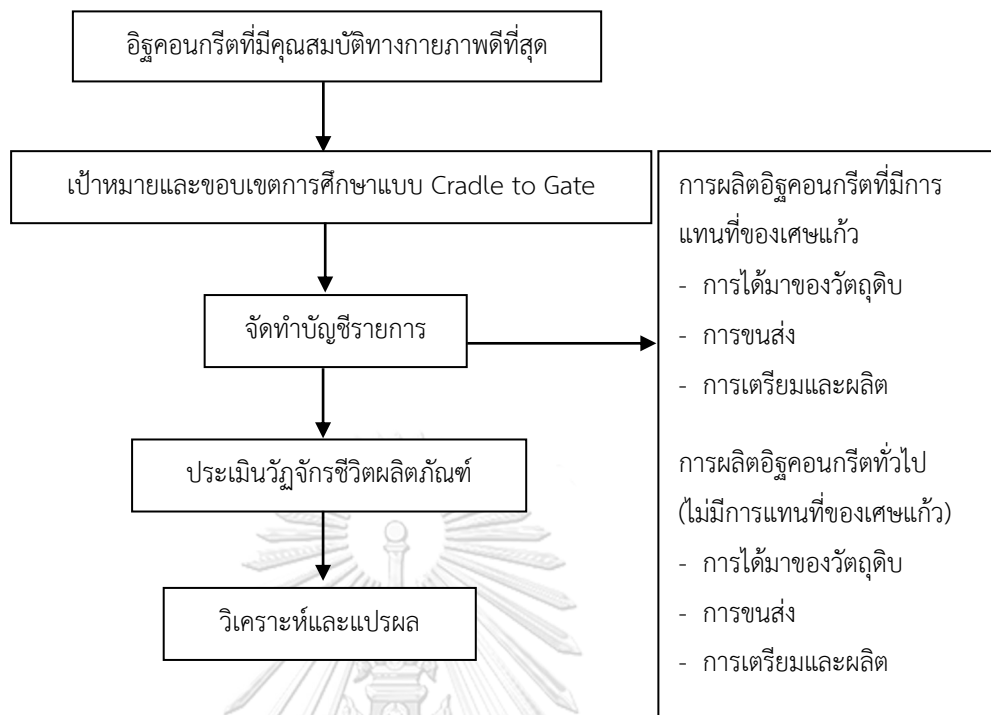
$$\text{ระยะเวลาผลิตที่จะคุ้มทุน} = \frac{Q}{N} \quad 3.3$$

โดย Q (Quantity)	คือ จำนวนการผลิต ณ จุดคุ้มทุน หน่วย หน่วย
TFC (Total Fixed Cost)	คือ ต้นทุนคงที่รวม หน่วย บาท
P (Price)	คือ ราคาขาย หน่วย บาท
AVC (Average Variable Cost)	คือ ต้นทุนแปรผันเฉลี่ย หน่วย บาท
N (Number)	คือ จำนวนการผลิตต่อปี

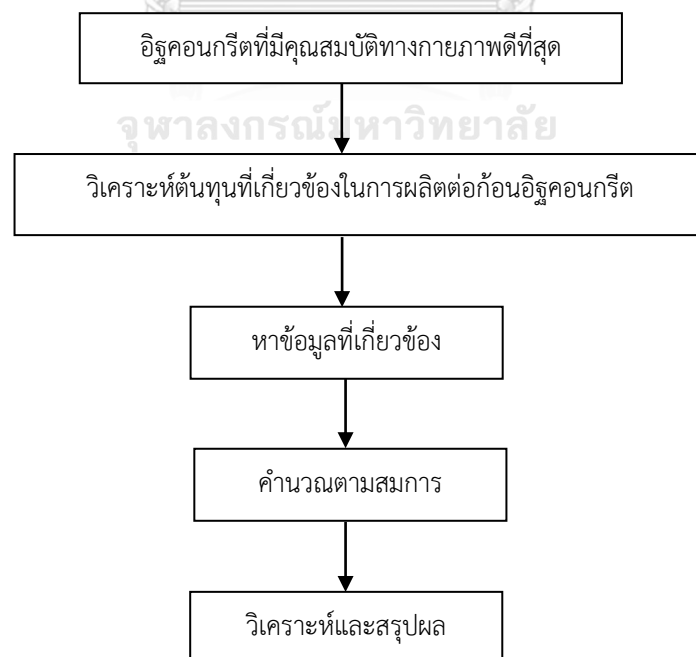
และสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้ดังรูปที่ 3.6-3.8



รูปที่ 3.6 ส่วนที่ 1 ขั้นตอนการผลิตอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้ว



รูปที่ 3.7 ส่วนที่ 2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบระหว่างอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วกับการผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไป (ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว)



รูปที่ 3.8 ส่วนที่ 3 ขั้นตอนการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการนำเศษแก้วบนเกาะสีชังมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียดในการผลิตอิฐคอนกรีต และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมี และคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น โดยงานวิจัยนี้สามารถแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การเตรียมวัสดุ ศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ และศึกษาการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่ม แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบหากำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาสารประกอบและโครงสร้างภายในของอิฐคอนกรีต

ส่วนที่ 2 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วในการผลิต เปรียบเทียบกับการผลิตคอนกรีตทั่วไป โดยใช้โปรแกรม SimaPro 8.3 ในการวิเคราะห์

ส่วนที่ 3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำเศษแก้วมาใช้ร่วมในการผลิตอิฐคอนกรีต

**ส่วนที่ 1** การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ การแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว และระยะเวลาในการบ่มที่เหมาะสมของการผลิตอิฐคอนกรีต

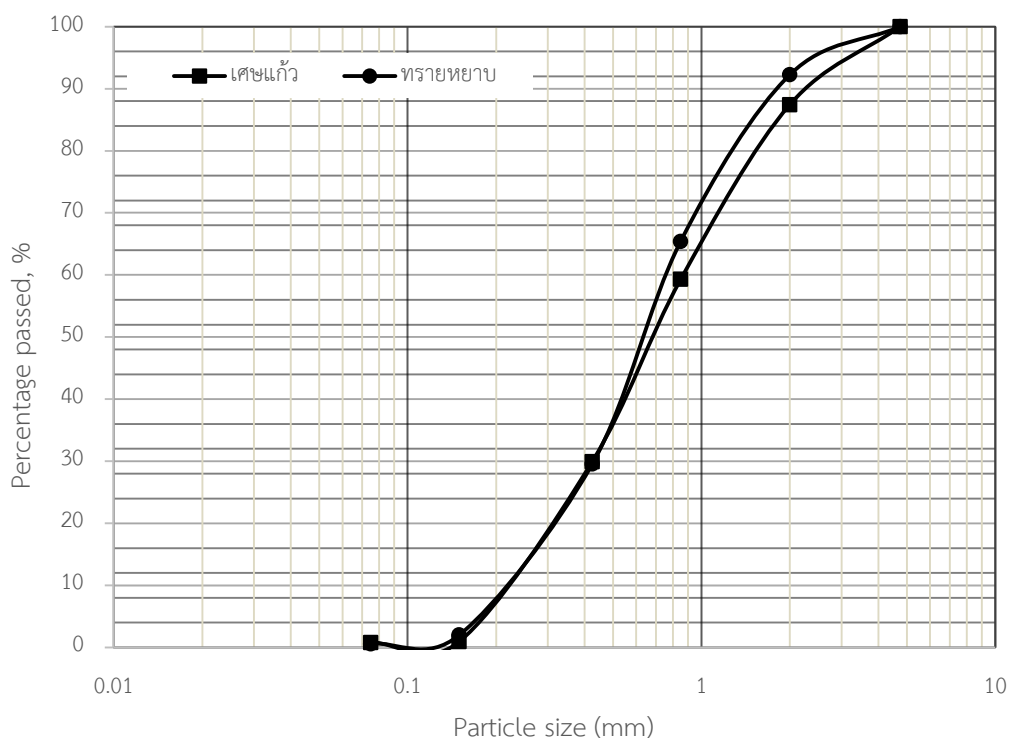
#### 4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษามี 3 ชนิดด้วยกัน ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทรายหยาบ และเศษแก้ว

##### 4.1.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) และโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) ของทรายหยาบและเศษแก้ว

จากผลการทดลองการกระจายตัวของอนุภาคของทรายหยาบและเศษแก้วที่ใช้เป็นมวลรวม โดยใช้วิธีการทดสอบตาม ASTM C33 โดยชั่งตัวอย่าง ปริมาณ 200 กรัม มาสั่นร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 10 20 40 100 และ 200 ตามลำดับ

พบว่าอนุภาคของทรายหยาบและเศษแก้ว มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.150 ถึง 4.75 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของทรายหยาบและเศษแก้ว เท่ากับ 0.65 และ 0.70 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 และมีโมดูลัสความละเอียดของทรายหยาบและเศษแก้ว เท่ากับ 2.92 และ 3.08 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM C33 ที่กำหนดค่าความละเอียดของมวลรวมละเอียดอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 3.1



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของทรายหยาบและเศษแก้ว

#### 4.1.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของทรายหยาบและเศษแก้ว

จากผลการทดลองหาความถ่วงจำเพาะ และการดูดซึมน้ำของทรายหยาบและเศษแก้วที่ใช้เป็นมวลรวม โดยใช้วิธีการทดสอบตาม ASTM C128 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของทรายหยาบและเศษแก้วมีค่าเท่ากับ 2.46 และ 2.32 ตามลำดับ และการดูดซึมน้ำเท่ากับ 3.93% และ 0.28% ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่าเศษแก้วมีค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำต่ำกว่าทรายหยาบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail และ Al-Hashmi (2009), Jani และ Hogland (2014), Afshinnia และ Rangaraju (2016), Ziari, Barakoochi และ Moniri (2017)



#### 4.1.3 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ทรายหยาบและเศษแก้ว ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry: XRF)

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ทรายหยาบ และเศษแก้วด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ทรายหยาบ และเศษแก้ว

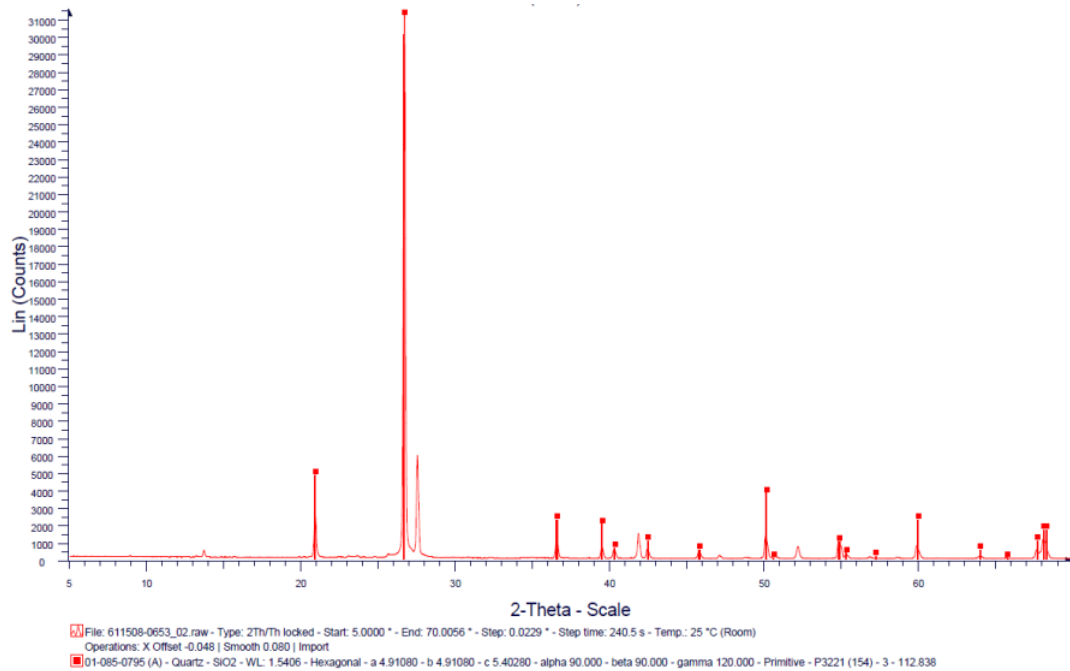
ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	วัสดุดิบ		
	ปูนซีเมนต์	ทรายหยาบ	เศษแก้ว
SiO <sub>2</sub>	15.4	89.7	71.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.48	5.56	1.89
CaO	56.7	0.142	11.4
SO <sub>3</sub>	3.35	0.084	0.170
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.53	0.479	0.223
MgO	1.58	0.131	1.98
K <sub>2</sub> O	0.524	3.29	0.209
Na <sub>2</sub> O	0.386	0.335	12.7
TiO <sub>2</sub>	0.189	0.239	0.149

พบว่าปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียม (Ca) ร้อยละ 56.7 รองลงมาคือ ซิลิกา (Si) ร้อยละ 15.4 และอะลูมิเนียม (Al) ร้อยละ 3.48 ส่วนทรายหยาบและเศษแก้ว พบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็น ซิลิกา (Si) โดยมีปริมาณ ร้อยละ 89.7 และ 71.1 ตามลำดับ โดยเศษแก้วพบว่าองค์ประกอบรองลงมา คือ โซเดียม (Na) และแคลเซียม (Ca) ร้อยละ 12.7 และ 11.4 ตามลำดับ โดยเป็นส่วนผสมที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตแก้วโซดาไลน์ (Glassware chemical, 2009) ซึ่งซิลิกาที่พบทั้งในทรายหยาบและเศษแก้วถือว่ามีปริมาณที่สูง จึงน่าสนใจที่จะนำเศษแก้วมาใช้แทนที่ทรายหยาบเพื่อเป็นมวลรวมในการผลิตอิฐคอนกรีต

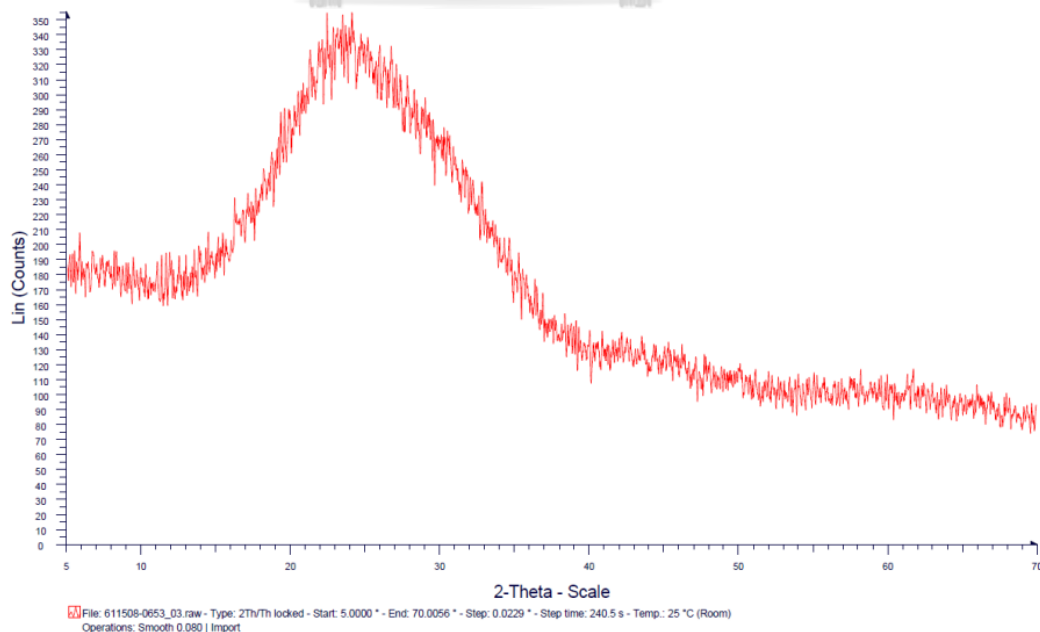
#### 4.1.4 สารประกอบทางเคมีของทรายหยาบและเศษแก้ว ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)

จากผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของทรายหยาบ และเศษแก้วด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าทรายหยาบมีรูปแบบของพิกมมองเห็นได้ชัดเจน โดยพิกที่เห็นได้ชัดเจน คือ

ตำแหน่งที่ 20.8 26.6 และ 36.6 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) (Funk, Weiss และ Zeising, 1958) และเป็นองค์ประกอบหลักของทรายหยาบและเศษแก้ว ดังรูปที่ 4.2 ส่วนเศษแก้วมีรูปแบบของพีคที่ไม่ชัดเจน มีลักษณะหลายพีคซ้อนทับกัน เนื่องจากเศษแก้วมีโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก หรือที่เรียกว่า อมัลฟัส (Amorphous) (วิไลวรรณ ลินะกุล, 2558) ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของทรายหยาบจากเครื่อง XRD

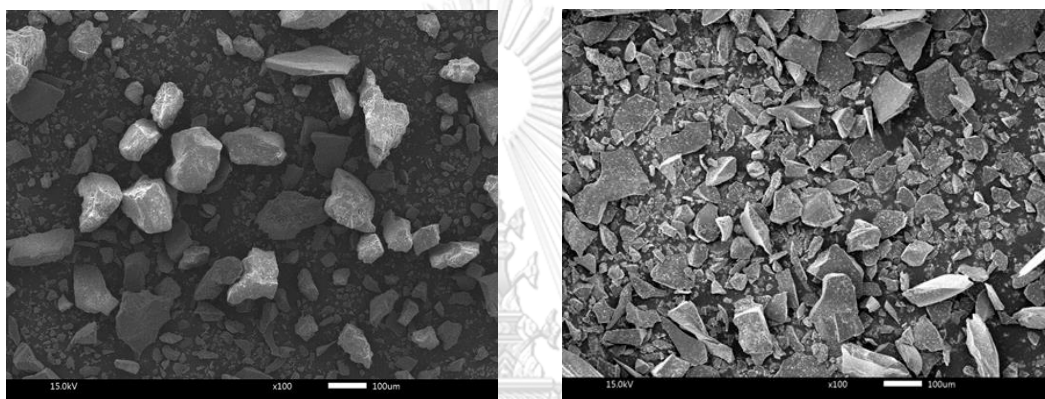


รูปที่ 4.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของเศษแก้วจากเครื่อง XRD

#### 4.1.5 ลักษณะทางกายภาพของทรายหยาบและเศษแก้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของทรายหยาบ และเศษแก้วด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 100 เท่า ปรากฏดังรูปที่ 4.4 และ 4.5

จากรูปที่ 4.4 พบว่าลักษณะของทรายหยาบมีหลายเหลี่ยม ผิวค่อนข้างขรุขระ มีความแวววาวบ้างเล็กน้อย ส่วนเศษแก้วพบว่ามีลักษณะคล้ายกับทรายหยาบ คือ มีหลายเหลี่ยม แต่ผิวมีความเรียบและความแวววาวมากกว่า ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของทรายหยาบ

รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของเศษแก้ว

#### 4.2 การศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของอิฐคอนกรีต

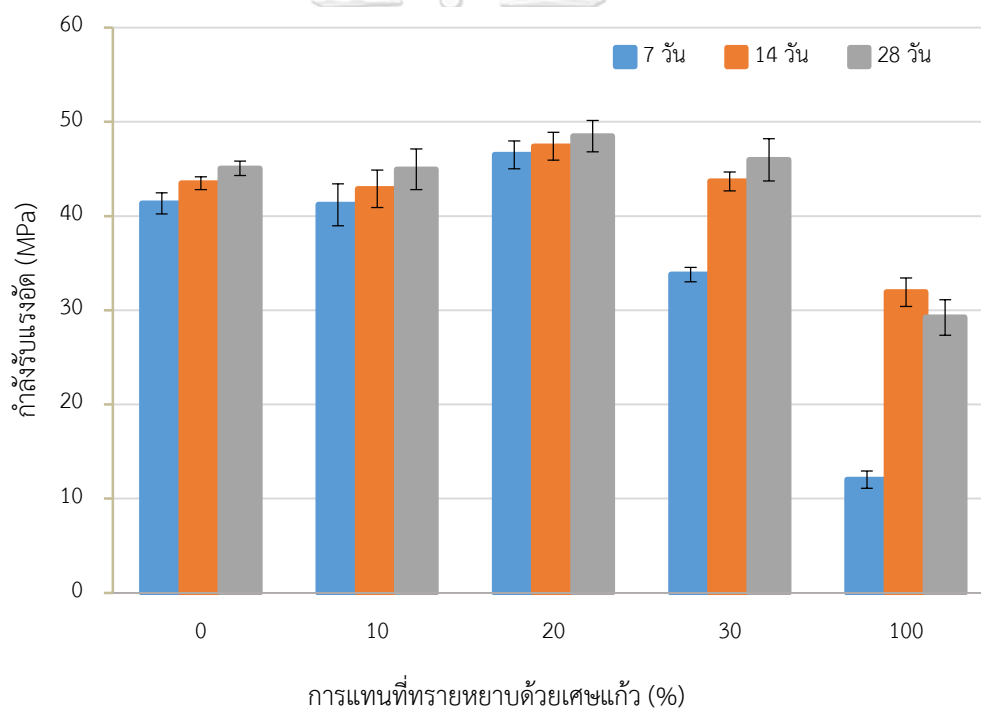
ในการศึกษาคุณสมบัติของอิฐคอนกรีตที่เหมาะสมนี้ จะศึกษาการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วร้อยละ 0 10 20 30 และ 100 โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการบ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบคุณสมบัติของอิฐคอนกรีต

##### 4.2.1 ผลของกำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีต

หลังจากบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน แล้วนำเข้าสู่เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด คำนวณค่าออกมาได้ผลดังรูปที่ 4.6 และ 4.7

จากรูปที่ 4.6 พบว่ากำลังรับแรงอัดของการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วร้อยละ 10 มีค่าใกล้เคียงกับร้อยละ 0 (ไม่มีการแทนที่ด้วยเศษแก้ว) และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อแทนที่ทรายหยาบร้อยละ 20 และลดลงเมื่อแทนที่ทรายหยาบร้อยละ 30 และต่ำสุดเมื่อแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วทั้งหมด (ร้อยละ 100) เนื่องจากเมื่อมีการแทนที่ของเศษแก้วมากขึ้น เศษแก้วมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบมากกว่าทรายหยาบ จึงทำให้การยึดเกาะของซีเมนต์เพสต์ไม่ค่อยดี (Ismail และ Al-Hashmi, 2009) จึงส่งผล

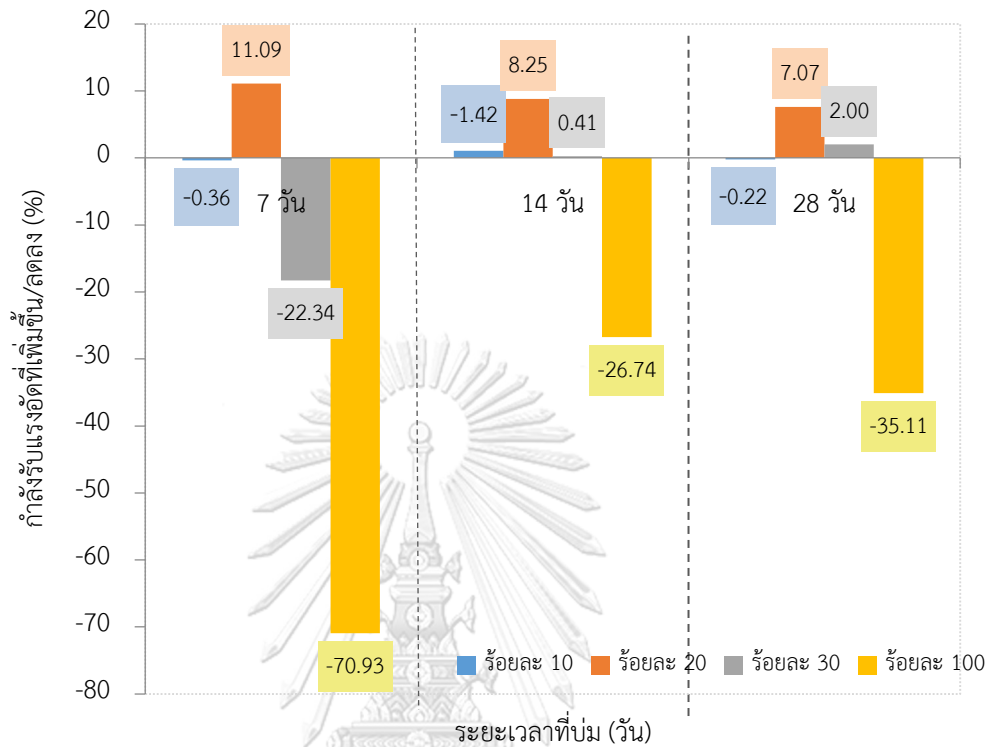
ให้กำลังรับแรงอัดลดลง นอกจากนั้นกำลังรับแรงอัดจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นเจล ประสานส่งผลให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (Wang et al., 2018) โดยกำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ อิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ 20 บ่มที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 48.49 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความสูงกว่าอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเศษแก้ว (ร้อยละ 0) บ่มที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 45.06 เมกะปาสคาล เนื่องมาจากการใช้เศษแก้วแทนที่ทรายหยาบ ทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าลดลง (จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.2.2) เพราะขนาดอนุภาคของเศษแก้ว (จากผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1.1) ทำให้เกิดการเติมเต็มช่องว่างภายในได้ดีขึ้น จึงทำให้มีรูพรุนลดลงและการดูดซึมน้ำลดลง จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดดีขึ้น (Nishikant et al., 2016) และกำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด คือ อิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ร้อยละ 100 บ่มที่ 7 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.02 เมกะปาสคาล



**รูปที่ 4.6** กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีต

จากรูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น/ลดลงของกำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเศษแก้วร้อยละ 10 20 30 และ 100 เปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว บ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ากำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ 100 มีค่าลดลงในทุก ๆ ระยะเวลาบ่ม และการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ 10 บ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน กำลังรับแรงอัดมีค่าต่ำกว่าอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของ

เศษแก้วเล็กน้อย และการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ 20 พบว่ามีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้วในทุกระยะเวลาที่บ่ม



รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น/ลดลงเปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว

และเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ 20 และ 100 มีกำลังรับแรงอัดแตกต่างจากตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนระยะเวลาในการบ่มพบว่าที่ 14 และ 28 วัน ไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสามารถจัดกลุ่มได้ ดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดและการจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

	ร้อยละการแทนที่ ของเศษแก้ว	จำนวน	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)	การจัดกลุ่ม
7 วัน	0	5	41.35	a
	10	5	41.20	a
	20	5	42.89	a
	30	5	33.80	b
	100	5	12.02	c
14 วัน	0	5	43.57	c
	10	5	44.04	b
	20	5	47.41	a
	30	5	43.68	c
	100	5	31.92	d
28 วัน	0	5	45.06	a
	10	5	44.96	b
	20	5	48.49	a
	30	5	45.97	a
	100	5	29.24	c

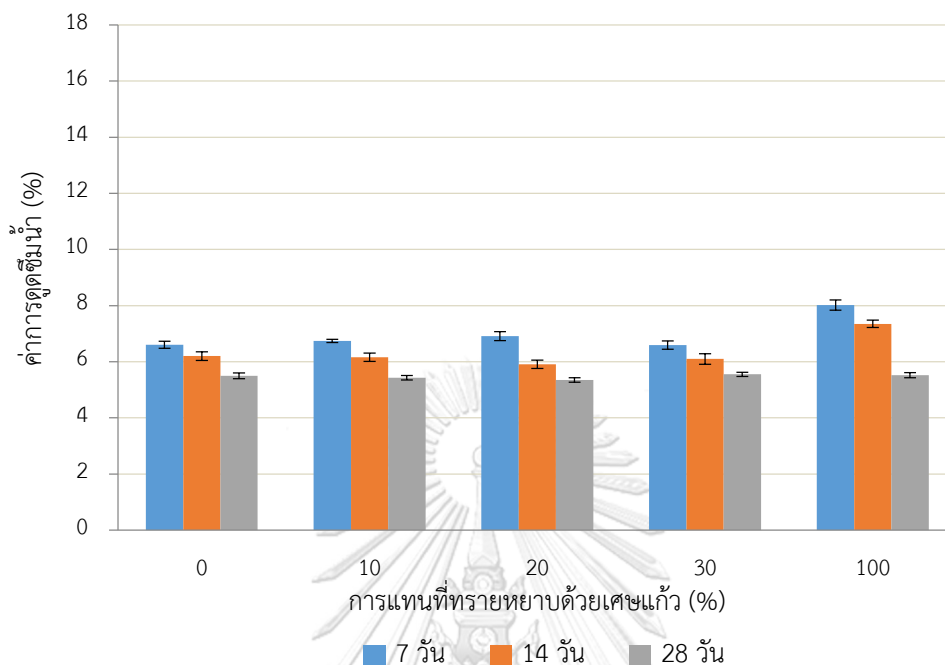
**หมายเหตุ** ตัวอักษรที่เหมือนกันในแต่ละกลุ่มของระยะเวลาบ่ม หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $P > 0.05$ ) โดย a b c คือ ค่าเฉลี่ยที่มีค่าสูงที่สุดในกลุ่มเดียวกัน และลดลงมา ตามลำดับ

#### 4.2.2 ผลของการดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีต

หลังจากบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน แล้วนำตัวอย่างมาอบและชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักเปียก จากนั้นคำนวณค่าออกมาได้ผลดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

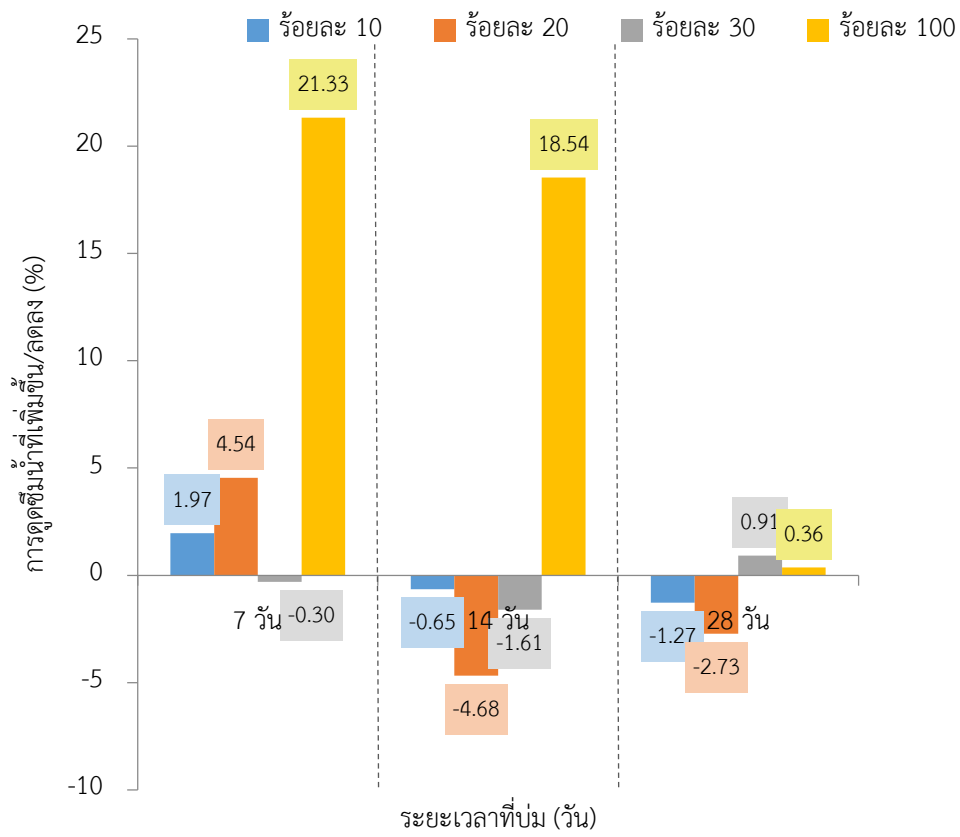
จากรูปที่ 4.8 พบว่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมีแนวโน้มเหมือนกัน คือ มีการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำจะพบว่าอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ 20 บ่มเป็นเวลา 28 วัน มีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด คือ 5.35% ซึ่งสอดคล้องกับกำลังรับ

แรงอัดที่มีค่ามากที่สุด เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้น ทำให้ช่องว่างในอิฐคอนกรีตลดลง การดูดซึมน้ำจึงลดลงไปด้วย (Gene และ Li, 2017)



รูปที่ 4.8 การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีต

จากรูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้น/ลดลงของการดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเศษแก้วร้อยละ 10 20 30 และ 100 เปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว บ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลง ยกเว้นการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ 30 บ่มที่ 28 วัน มีการดูดซึมน้ำที่มากกว่าอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว 0.91% แต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนการแทนที่ร้อยละ 100 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ในช่วงระยะเวลาบ่มที่ 7 และ 14 วัน การดูดซึมน้ำมีค่าสูงกว่าอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้วมาก เนื่องมาจากการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วทั้งหมด การเติมเต็มช่องว่างภายในนั้นไม่ดี เพราะเศษแก้วมีรูปร่างหลายเหลี่ยมและพื้นผิวที่เรียบ (จากรูปที่ 4.4 และ 4.5) จึงเกิดการยึดเกาะที่ไม่ดี ทำให้มีจำนวนของรูพรุนด้านในมากกว่า (Afshinnia และ Rangaraju, 2016) แต่เมื่อบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน การดูดซึมน้ำมีค่าลดลง เพราะซีเมนต์เพสต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงเข้าไปเติมเต็มรูพรุนได้ดีขึ้น



**รูปที่ 4.9** การดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้น/ลดลงเปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว

และเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อัตราส่วนการแทนที่ของเศษแก้วไม่มีผลต่อการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นการแทนที่ร้อยละ 100 ส่วนระยะเวลาในการบ่มพบว่า มีผลต่อการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสามารถจัดกลุ่มได้ ดังตารางที่ 4.3



**ตารางที่ 4.3** ค่าเฉลี่ยของการดูดซึมน้ำและการจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

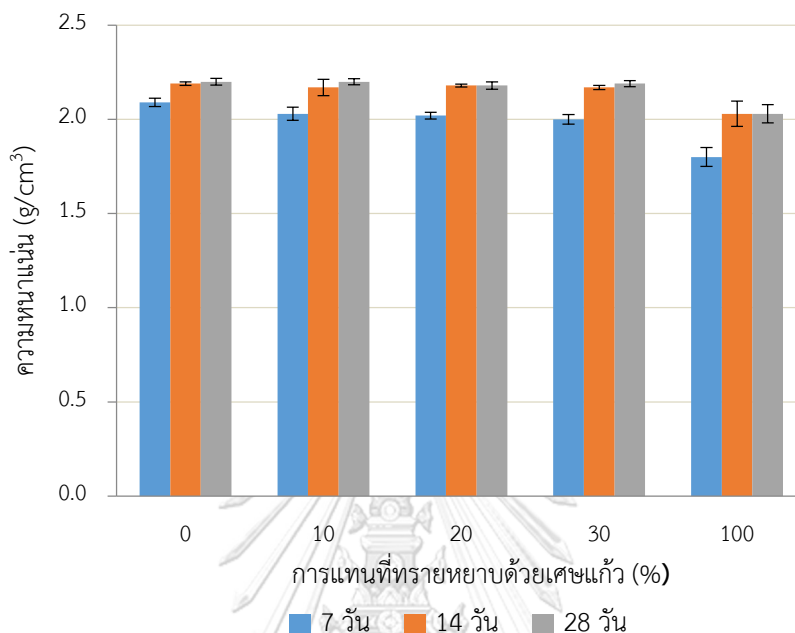
	ร้อยละการแทนที่ ของเศษแก้ว	จำนวน	ค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำ (%)	การจัดกลุ่ม
7 วัน	0	5	6.61	b c
	10	5	6.74	b
	20	5	6.91	b
	30	5	6.59	b c
	100	5	8.02	a
14 วัน	0	5	6.20	b
	10	5	6.16	c
	20	5	5.91	e
	30	5	6.10	d
	100	5	7.35	a
28 วัน	0	5	5.50	a
	10	5	5.43	a b
	20	5	5.35	b
	30	5	5.55	a
	100	5	5.52	a

**หมายเหตุ** ตัวอักษรที่เหมือนกันในแต่ละกลุ่มของระยะเวลาบ่ม หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $P > 0.05$ ) โดย a b c คือ ค่าเฉลี่ยที่มีค่าสูงที่สุดในกลุ่มเดียวกัน และลดลงมา ตามลำดับ

### 4.2.3 ผลของความหนาแน่นของอิฐคอนกรีต

หลังจากบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน และเก็บข้อมูลมาคำนวณ ได้ผลดังรูปที่

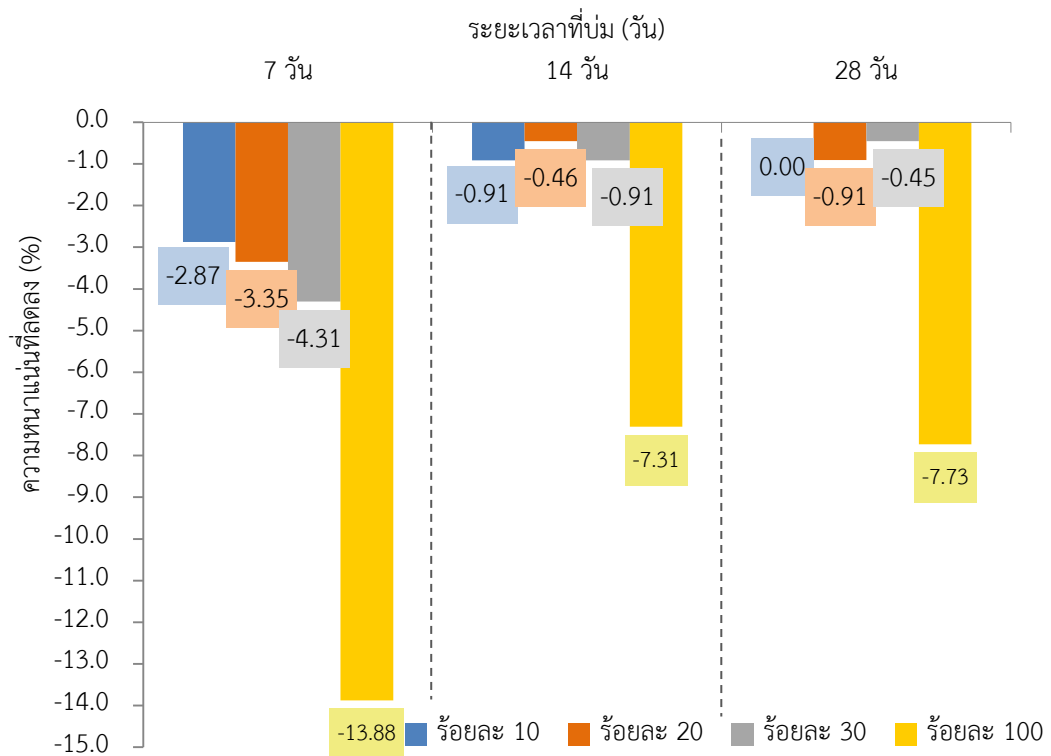
4.10



รูปที่ 4.10 ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีต

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 พบว่าการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของอิฐคอนกรีตมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อความหนาแน่นมีค่าน้อย การดูดซึมน้ำก็จะมีค่ามาก แต่ในทางกลับกันเมื่อความหนาแน่นมีค่ามาก การดูดซึมน้ำก็จะน้อย ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากกำลังรับแรงอัดที่ดีขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณรูพรุนที่ลดลง (Du และ Tan, 2017)

จากรูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความหนาแน่นของอิฐคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเศษแก้วร้อยละ 10 20 30 และ 100 เปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีแทนที่ของเศษแก้ว บ่มเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าการใช้เศษแก้วแทนที่ทรายหยาบส่งผลให้อิฐคอนกรีตมีความหนาแน่นลดลง เนื่องจากเศษแก้วมีน้ำหนักที่เบากว่าทรายหยาบ



รูปที่ 4.11 ความหนาแน่นที่ลดลงเปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ของเศษแก้ว

และเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า อัตราส่วนการแทนที่ของเศษแก้วไม่มีผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นการแทนที่ร้อยละ 100 ส่วนระยะเวลาในการบ่ม พบว่าที่ 14 และ 28 วัน ค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสามารถจัดกลุ่มได้ ดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นและการจัดกลุ่มข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

	ร้อยละการแทนที่ ของเศษแก้ว	จำนวน	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	การจัดกลุ่ม
7 วัน	0	5	2.09	a
	10	5	2.03	b
	20	5	2.02	b
	30	5	2.00	b
	100	5	1.80	c
14 วัน	0	5	2.19	a
	10	5	2.17	a
	20	5	2.18	a
	30	5	2.17	a
	100	5	2.03	b
28 วัน	0	5	2.20	a
	10	5	2.20	a
	20	5	2.18	a
	30	5	2.19	a
	100	5	2.03	b

**หมายเหตุ** ตัวอักษรที่เหมือนกันในแต่ละกลุ่มของระยะเวลาบ่ม หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $P > 0.05$ ) โดย a b c คือ ค่าเฉลี่ยที่มีค่าสูงที่สุดในกลุ่มเดียวกัน และลดลงมา ตามลำดับ

#### 4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของอิฐคอนกรีต

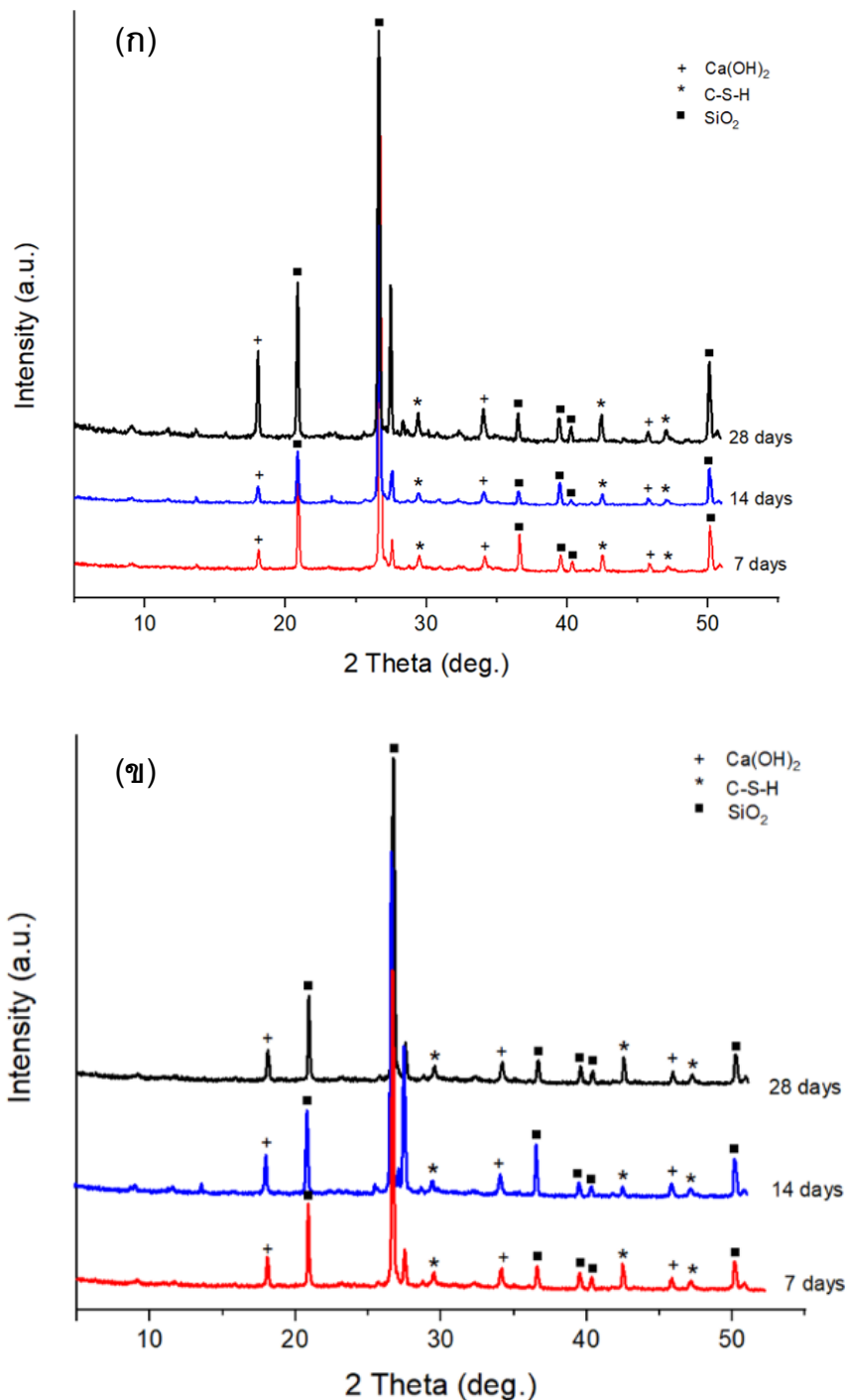
##### 4.3.1 สารประกอบทางเคมีของอิฐคอนกรีต ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

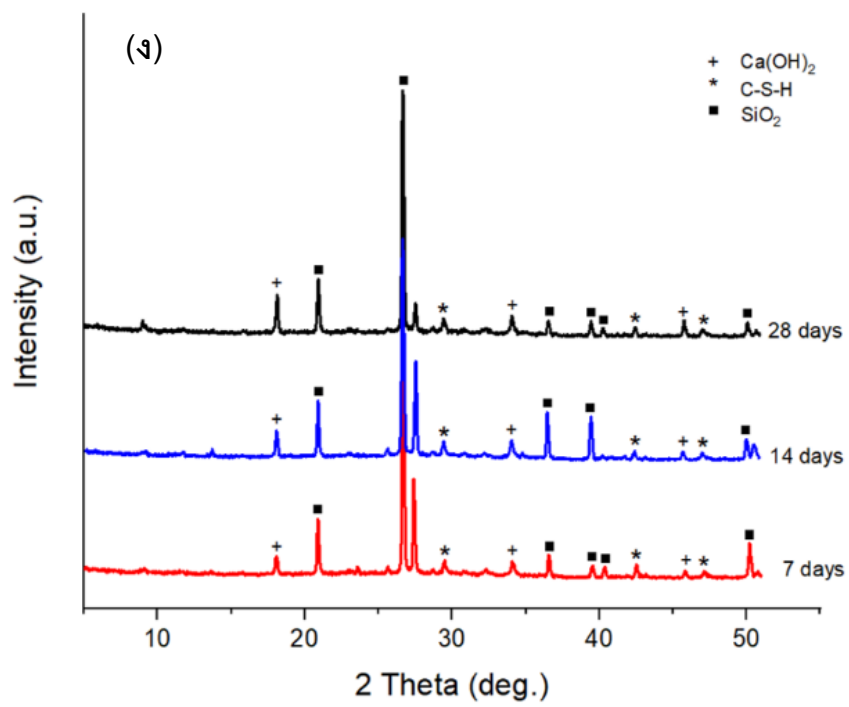
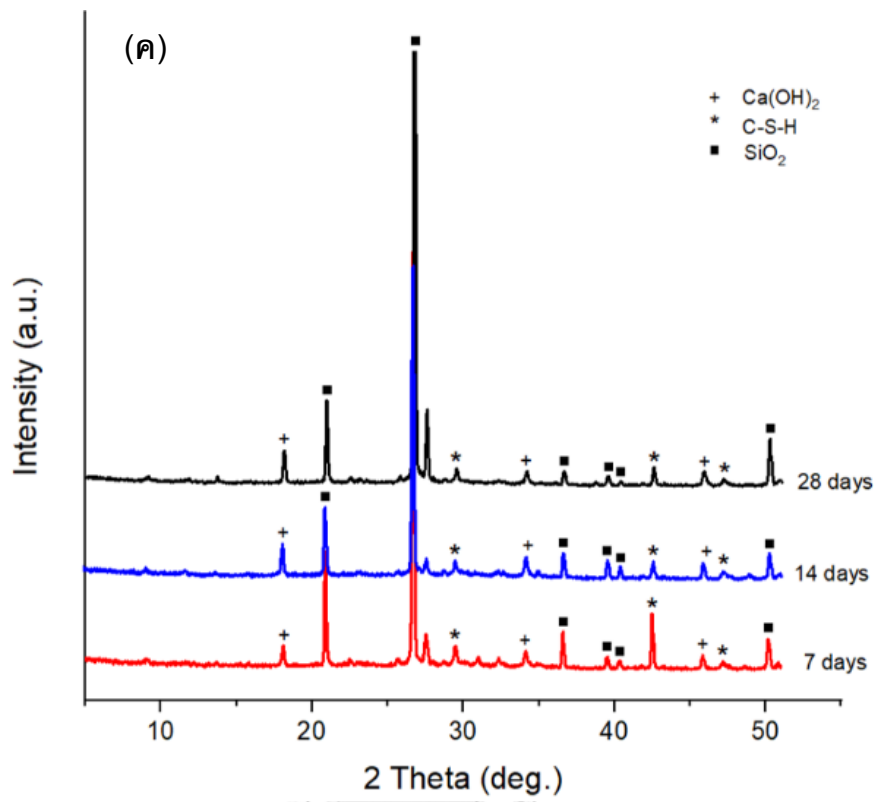
##### (X-Ray Diffraction: XRD)

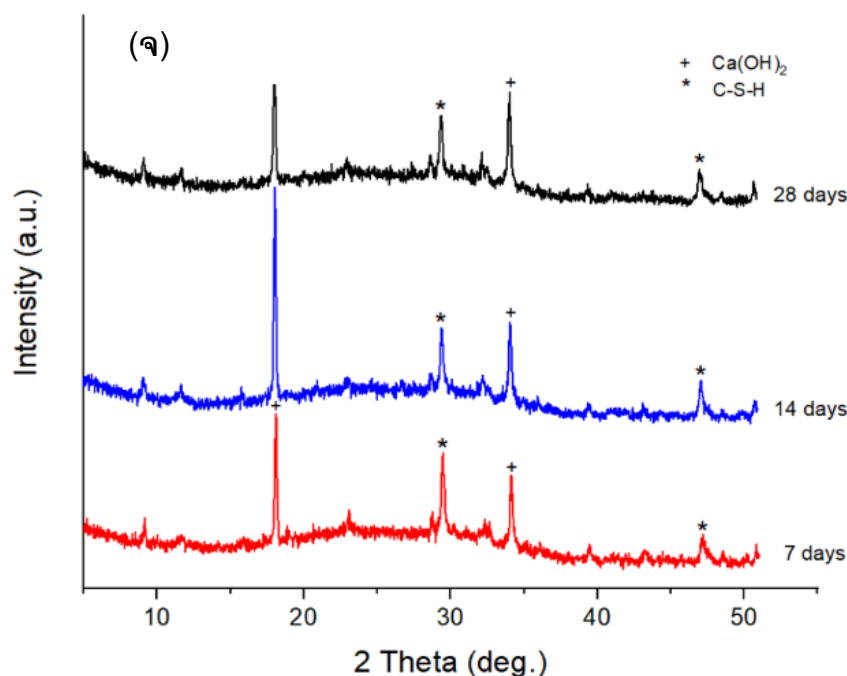
จากผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของตัวอย่างอิฐคอนกรีตในทุกการแทนที่ ด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 พบว่าในทุกอัตราส่วนเกิดพีคของสารประกอบหลัก ๆ คือ ควอตซ์ (SiO<sub>2</sub>) ซึ่งมาจากทรายหยาบและเศษแก้วที่ใช้เป็นมวลรวม สามารถเทียบพีคกับผลจากเครื่อง XRD ในรูปที่ 4.2

ต่อมา คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่สำคัญของปฏิกิริยา ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนกาวที่ประสานยึดติดซีเมนต์เฟสต์เข้าไว้ด้วยกัน (Loannidou et al., 2016) และพีคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นจะอยู่ในตำแหน่งที่ 29.3 30.9 และ 47.7 องศา ซึ่งเป็นการยืนยันว่าในทุกอัตราส่วนมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้น และไม่พบพีคของสารประกอบที่แตกต่างเกิดขึ้น





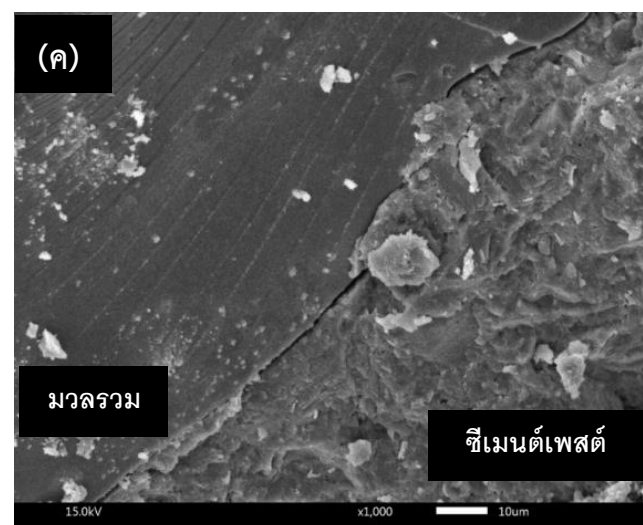
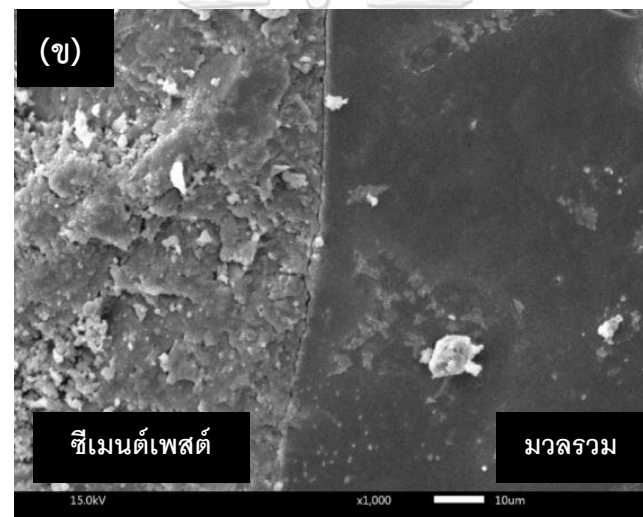
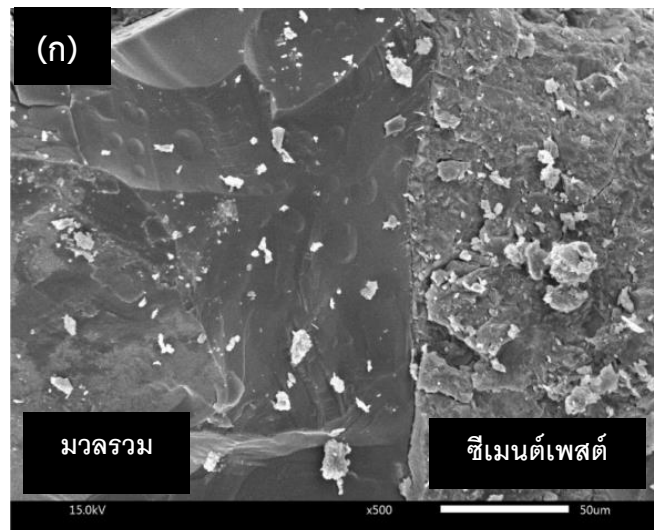


รูปที่ 4.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างอิฐคอนกรีตจากเครื่อง XRD อิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ (ก) 0 (ข) 10 (ค) 20 (ง) 30 (จ) 100

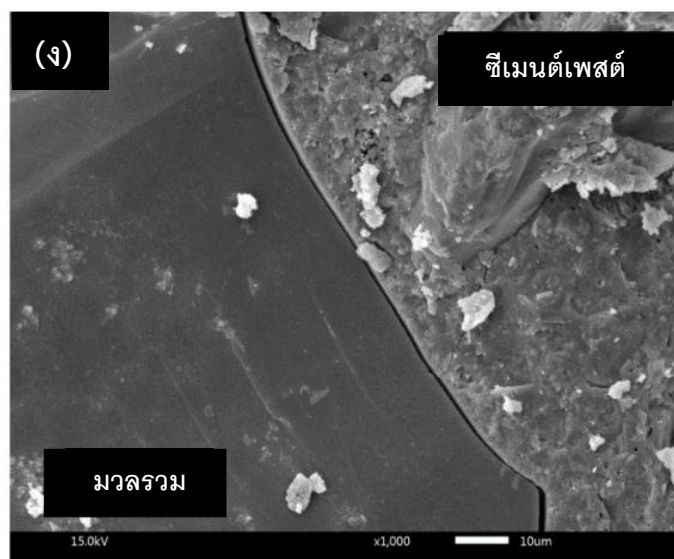
#### 4.3.2 ลักษณะทางกายภาพของอิฐคอนกรีต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

หลังจากนำอิฐคอนกรีตมาตัดขวางแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ ได้ผลดังรูปที่ 4.13

จากรูปที่ 4.13 (ก) พบว่าอิฐคอนกรีตที่การแทนที่ร้อยละ 0 (ไม่มีการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว) รอยต่อระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ค่อนข้างแนบสนิท เกิดการประสานกันได้ดี มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนรูปที่ 4.13 (ข) อิฐคอนกรีตที่การแทนที่ร้อยละ 20 พบว่าระหว่างรอยต่อมีการประสานกันดี แต่มีบางช่วงของรอยต่อที่เกิดรอยแยกบ้างเล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.13 (ค) และรูปที่ 4.13 (ง) ซึ่งเป็นอิฐคอนกรีตที่การแทนที่ร้อยละ 30 และ 100 ตามลำดับนั้น จะพบว่าเกิดรอยแยกระหว่างมวลรวม และซีเมนต์เพสต์อย่างชัดเจน จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากมวลรวมที่เป็นทรายหยาบมีผิวที่ขรุขระมากกว่าจึงทำให้การยึดติดของซีเมนต์เพสต์ดีกว่า ส่วนเศษแก้วมีผิวเรียบซีเมนต์เพสต์จึงยึดเกาะได้ไม่ดี (Afshinnia และ Rangaraju, 2016)







รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางของอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 28 วัน

อิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ของเศษแก้วร้อยละ (ก) 0 (ไม่มีเศษแก้ว) (ข) 20 (ค) 30 (ง) 100

จากผลการทดลองของการศึกษาลักษณะทางเคมีและกายภาพ รวมไปถึงคุณสมบัติของอิฐคอนกรีตที่มีการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วร้อยละ 0 10 20 30 และ 100 ในระยะเวลาในการบ่ม 7 14 และ 28 วัน พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสม คือ การแทนที่ร้อยละ 20 ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน ซึ่งให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด และการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด เท่ากับ 48.49 และ 5.35% ตามลำดับ

จากผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เท่ากับ 48.49 เมกะปาสคาล คือ การแทนที่ร้อยละ 20 บ่มที่ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Batayneh *et al.* (2007) ซึ่งได้กำลังรับแรงอัด 43 เมกะปาสคาล Ismail และ Al-Hashmi (2009) ได้กำลังรับแรงอัด 45.9 เมกะปาสคาล และของ Limbachiya (2009) และ Castro และ Brito (2013) ที่ได้ทำการศึกษาแล้วพบว่า การแทนที่ร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุด กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นจะลดลงเมื่อการแทนที่ของเศษแก้วเพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษแก้วมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าทรายหยาบ ดังนั้นเมื่อแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วมากขึ้นทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c ratio) ที่ใช้นั้นมีน้ำมากกว่า จึงทำให้เมื่อน้ำเกิดการระเหยออกไปแล้วมีช่องว่างภายในอิฐคอนกรีตมากขึ้น ความแข็งแรงจึงลดลง

เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca(OH)}_2$  และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, C-S-H) (Wang *et al.*, 2018) ซึ่ง C-S-H มีลักษณะเป็นเจลที่มีความสำคัญต่อความแข็งแรงในอิฐคอนกรีต มาก โดยระยะเวลาในการบ่มจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เจล C-S-H เกิดมากขึ้น อิฐคอนกรีตที่ใช้ระยะเวลาในการบ่มมาก จึงมีความแข็งแรงมากกว่า โดยเฉพาะการบ่มที่ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับ Ismail และ Al-Hashmi (2009), Limbachiya (2009), Castro และ Brito (2013), Tan และ Du (2013) และ Ali และ Al-Tersawy (2012) และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม Islam *et al.* (2017) พบว่า ไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีระยะเวลาในการเกิด 28 วัน

และในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากวัสดุปอซโซลานที่มีสารประกอบซิลิโคนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไดออกไซด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อ จะเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และขนาดของเศษแก้วก็มีผล โดยจากการทดลองของ Shao *et al.* (2000), Khmiri, Chaabouni และ Samet (2013) และ Aliabdo *et al.* (2016) พบว่าต้องใช้เศษแก้วขนาดต่ำกว่า 100 ไมครอน แทนที่ซีเมนต์ในการผลิตอิฐคอนกรีตจึงจะเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้น โดยขนาดที่ต่ำกว่า 40 ไมครอนจะส่งผลที่ดีที่สุด เพราะพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นและแก้วมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ทำให้ไวต่อการทำปฏิกิริยา และปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะต้องใช้ระยะเวลาที่มากกว่า 28 วันขึ้นไป เพื่อให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเบสแก่สูงขึ้น แล้วแตกตัวทำปฏิกิริยาต่อไป (Sargent, 2015)

นอกจากนี้พื้นที่ผิวของวัสดุมวลรวมก็มีส่วนสำคัญ เนื่องมาจากเศษแก้วมีพื้นที่ผิวที่เรียบมากกว่าทรายหยาบ จึงส่งผลให้การเกิดพันธะระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ไม่ดี (Afshinnia และ Rangaraju (2016); Kim, Choi และ Yang (2018); Mohammadinia *et al.* (2019)) โดย Rashid *et al.* (2018) ได้ให้เหตุผลเพิ่มเติมว่ามวลรวมธรรมชาตินั้นมีการดูดซึมน้ำที่ดีกว่าเศษแก้ว และมีความขรุขระมากกว่า การซึมผ่าน/แทรก (Penetration) ของ C-S-H ที่บริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ หรือที่เรียกว่า “Interfacial Transition Zone” นั้นจึงดีกว่า พันธะที่เกิดขึ้นจึงแข็งแรง แต่เศษแก้วการดูดซึมน้ำน้อยกว่าการผ่าน/แทรกของ C-S-H ไม่ดี โดย Mohammadinia *et al.* (2019) และ Topcu และ Canbaz (2004) ได้กล่าวว่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำจะไปขัดขวางการยึดติดระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้ความแข็งแรงน้อยกว่า และเมื่อมีการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง สอดคล้องกับการทดลองของ Demir (2009), Ali และ Al-Tersawy (2012), Castro และ Brito (2013), Jani และ Hogland (2014), Nishikant

*et al.* (2016), Hooi และ Min (2017), Kim *et al.* (2018) แต่ผลการดูดซึมน้ำไม่สอดคล้องกัน จากการทดลอง พบว่าเมื่อแทนที่เศษแก้วเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำก็จะสูงขึ้นด้วย สาเหตุเกิดจากเศษแก้วมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำ เมื่อมีการแทนที่ด้วยเศษแก้วเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีน้ำอยู่ในตัวอย่างมากจึงเกิดรูพรุนมาก และการเข้าแทรกของ C-S-H ไม่ดี จึงทำให้การดูดซึมน้ำสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Afshinnia และ Rangaraju (2016) คือ เศษแก้วมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำ ในขณะที่มวลรวมธรรมชาติมีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าจึงมีการดูดซึมน้ำไปลดปริมาณน้ำในตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดช่องว่างในตัวอย่างน้อยกว่า ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่า

**ส่วนที่ 2** การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) ของอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วในการผลิต

#### 4.4 การประเมินวัฏจักรชีวิตของอิฐคอนกรีตจากเศษแก้วและอิฐคอนกรีตทั่วไป

จากผลการทดลองพบว่า การแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้วที่เหมาะสมเท่ากับ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จึงทำการเก็บข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออก เพื่อจัดทำบัญชีรายการ โดยเริ่มตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และการเตรียมวัตถุดิบตลอดจนกระบวนการผลิตของอิฐคอนกรีต หรือเรียกว่า “Cadle to Gate” จากนั้นทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของอิฐคอนกรีตจากเศษแก้วและอิฐคอนกรีตทั่วไป

##### 4.4.1 การวิเคราะห์บัญชีรายการ

จากการจัดทำบัญชีรายการ เพื่อศึกษาปริมาณของสารขาเข้าและสารขาออกของกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการผลิตอิฐคอนกรีต เพื่อนำไปประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธี Eco-indicator 99 หน่วยการทำงาน คือ อิฐคอนกรีตต่อพื้นที่การใช้งาน 1 ตารางเมตร (ขนาด 10 x 20 x 6 เซนติเมตร จำนวน 50 ก้อน) ผลจากการประเมินวัฏจักรชีวิตจะแสดงออกมาในรูปแบบของการกำหนดบทบาท (Characterization) และคะแนนเชิงเดี่ยว (Single Score) ซึ่งจะแบ่งออกเป็นกลุ่มผลกระทบ 5 กลุ่ม และกลุ่มเป้าหมาย 3 กลุ่ม

โดยกลุ่มผลกระทบที่ศึกษา 5 กลุ่ม ดังนี้

- 1) สารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganics)
- 2) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change)
- 3) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (Ecotoxicity)
- 4) ภาวะความเป็นกรด/การเพิ่มธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำ (Acidification/Eutrophication)
- 5) เชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil Fuels)

และกลุ่มเป้าหมาย 3 กลุ่ม ดังนี้

- 1) สุขภาพมนุษย์ (Human Health)
- 2) ระบบนิเวศ (Ecosystem Quality)
- 3) การลดลงของทรัพยากร (Resource Depletion)

โดยคะแนนเชิงเดียว สามารถแสดงได้ทั้งรูปแบบของผลกระทบแบบแยกกลุ่มผลกระทบและแบบกลุ่มเป้าหมาย ซึ่งค่าคะแนนเชิงเดียวจะแสดงออกมาเป็นหน่วย Pt (Person for Target Year) เกิดจากการหาขนาดของผลกระทบที่ต้องการจะรวมค่าในกลุ่มผลกระทบต่าง ๆ ที่มีหน่วยต่างกันให้แสดงค่าในหน่วยเดียวกัน ดังนั้นหน่วย Pt จะมีค่ามากหรือน้อยจะต้องเปรียบเทียบกับค่ากลาง หรือใช้เปรียบเทียบกับค่า Pt ด้วยกัน

#### 4.4.1.1 การได้มาของวัตถุดิบ

เป็นขั้นตอนของการสกัดวัตถุดิบมาจากแหล่งธรรมชาติ จนมาเป็นวัตถุดิบที่ใช้งานในกระบวนการผลิตต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ในขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบนั้นจะอ้างอิงมาจากฐานข้อมูลในโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3

#### 4.4.1.2 การขนส่ง

เป็นขั้นตอนของการขนส่ง โดยเริ่มตั้งแต่แหล่งผลิตวัตถุดิบไปยังสถานที่ทำการผลิตอิฐคอนกรีต ดังตารางที่ 4.5

โดยปูนซีเมนต์เริ่มมาจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ขนส่งโดยใช้รถบรรทุก 28 ตัน ส่งไปยังเกาะลอย จังหวัดชลบุรี เป็นระยะทาง 277 กิโลเมตร แล้วขนส่งทางเรือและรถบรรทุกขนาดเล็กไปยังเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี เป็นระยะทาง 13 และ 3.5 กิโลเมตร ตามลำดับ

ทรายเริ่มมาจาก อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ขนส่งโดยใช้รถบรรทุก 28 ตัน ส่งไปยังเกาะลอย จังหวัดชลบุรี เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร แล้วขนส่งทางเรือและรถบรรทุกขนาดเล็กไปยังเกาะสีชัง จังหวัดชลบุรี เป็นระยะทาง 13 และ 3.5 กิโลเมตร ตามลำดับ

ส่วนเศษแก้วเป็นขยะที่เกิดขึ้นบนเกาะสีชัง และมีการเก็บรวบรวมไว้ที่ลานเทกองของเกาะสีชังอยู่แล้ว จึงไม่คิดการขนส่ง

ตารางที่ 4.5 บัญชีรายการของการขนส่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐคอนกรีต และอิฐคอนกรีตทั่วไป

วัตถุดิบ	ชนิดของการขนส่ง	อิฐคอนกรีต (ของงานวิจัย)		อิฐคอนกรีตทั่วไป	
		ปริมาณ	หน่วย	ปริมาณ	หน่วย
ปูนซีเมนต์	รถบรรทุก 28 ตัน	8.31	tkm	8.31	tkm
	เรือขนส่งสินค้า	0.39	tkm	0.39	tkm
	รถบรรทุกขนาดเล็ก	0.10	tkm	0.10	tkm
ทราย	รถบรรทุก 28 ตัน	1.40	tkm	1.80	tkm
หยาบ	เรือขนส่งสินค้า	0.91	tkm	1.17	tkm
	รถบรรทุกขนาดเล็ก	0.25	tkm	0.32	tkm

หมายเหตุ หน่วย tkm คือ ตันกิโลเมตร

#### 4.4.1.3 การเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีต

เป็นขั้นตอนที่ประกอบด้วย ขั้นตอนการล้าง การบด การร่อนคัดขนาดของวัตถุดิบ และการผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน ในการศึกษานี้วัตถุดิบที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทรายหยาบ เศษแก้ว และน้ำประปา และในการผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไปวัตถุดิบที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำประปา โดยแต่ละขั้นตอนหลัก ๆ จะประกอบด้วยน้ำประปา และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเครื่องบดใช้เวลา 15 นาที เครื่องร่อนคัดขนาดใช้เวลา 15 นาที และเครื่องผสมใช้เวลา 5 นาที โดยทั้ง 3 เครื่องใช้มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า หรือเท่ากับ 2.24 กิโลวัตต์ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 บัญชีรายการของกระบวนการผลิตอิฐคอนกรีต และอิฐคอนกรีตทั่วไป

ขั้นตอน	ชนิดของ สารขาเข้า	อิฐคอนกรีต (ของงานวิจัย)		อิฐคอนกรีตทั่วไป	
		ปริมาณ	หน่วย	ปริมาณ	หน่วย
<b>การเตรียมวัตถุดิบ</b>					
การล้างเศษแก้ว	น้ำประปา	18.3	kg	-	-
การบดเศษแก้ว	พลังงานไฟฟ้า	0.5595	kWh	-	-
การร่อนคัดขนาด	พลังงานไฟฟ้า	0.5595	kWh	-	-

#### ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

การผลิต			
การผสม	พลังงานไฟฟ้า	0.1857 kWh	0.1857 kWh

หมายเหตุ หน่วย kWh คือ กิโลวัตต์ชั่วโมง

#### 4.4.2 ผลจากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม

จากการประเมินวัฏจักรชีวิตของอิฐคอนกรีตโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ของงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกระทบจากกระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และการเตรียมวัตถุดิบและผลิตอิฐคอนกรีต เพื่อวิเคราะห์ว่าแต่ละกระบวนการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านใดมากที่สุด โดยเปรียบเทียบระหว่างอิฐที่ใช้ในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป

โดย หน่วย DALYs (Disability Adjusted Life Years) หมายถึง การสูญเสียการมีสุขภาพที่ดี ซึ่งหนึ่งหน่วยเท่ากับ การสูญเสียช่วงอายุของการมีสุขภาพที่ดีไปจำนวน 1 ปี

หน่วย PAF (Potentially Affected Fraction) หมายถึง สัดส่วนของพืชที่มีโอกาสได้รับผลกระทบต่อพื้นที่

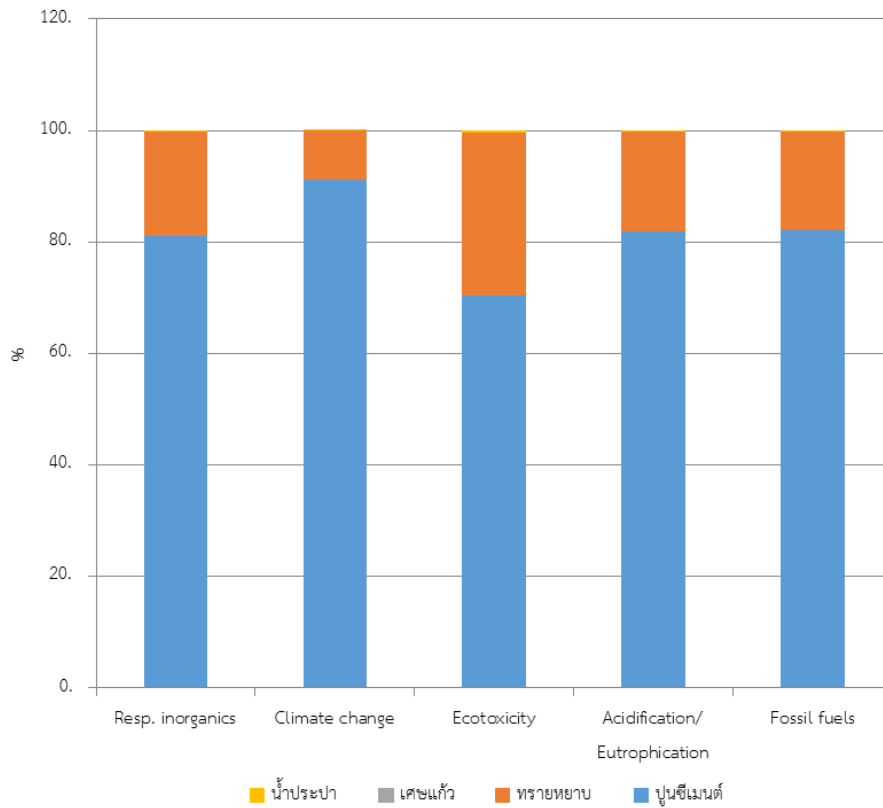
หน่วย PDF (Potentially Disappeared Fraction) หมายถึง สัดส่วนการสูญหายของความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตต่อพื้นที่

หน่วย MJ Surplus Energy หมายถึง การลดลงของทรัพยากร หรือปริมาณที่เหลืออยู่ทั้งในรูปของสินแร่ และเชื้อเพลิง (MJ เท่ากับปริมาณของเชื้อเพลิงที่ถูกใช้ในการสกัดแร่หรือเชื้อเพลิง)

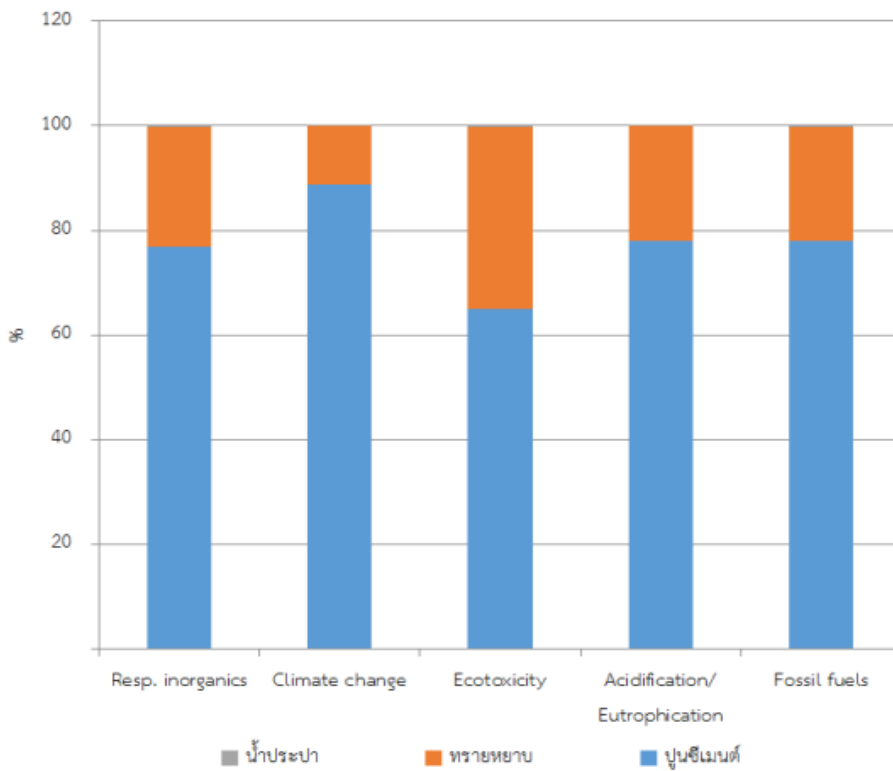
##### 4.4.2.1 ผลการประเมินการได้มาของวัตถุดิบ

การได้มาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย หยาบ น้ำประปา และเศษแก้ว แต่เศษแก้วถือว่าเป็นขยะที่เกิดขึ้นบนเกาะสีชัง และต้องการที่จะหาแนวทางในการจัดการ จึงถือว่าผลกระทบของการได้มาของวัตถุดิบนั้นไม่มี แสดงผลจากการประเมินดังรูปที่ 4.14–4.15

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 เป็นผลจากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization) ของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป ตามลำดับ พบว่าทั้งอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป ขั้นตอนที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ มากที่สุดคือ การได้มาของปูนซีเมนต์ รองลงมา คือ การได้มาของทราย หยาบ โดยส่งผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) มากที่สุด รองลงมาคือ สารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganics)



รูปที่ 4.14 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาของวัสดุขุดในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัย

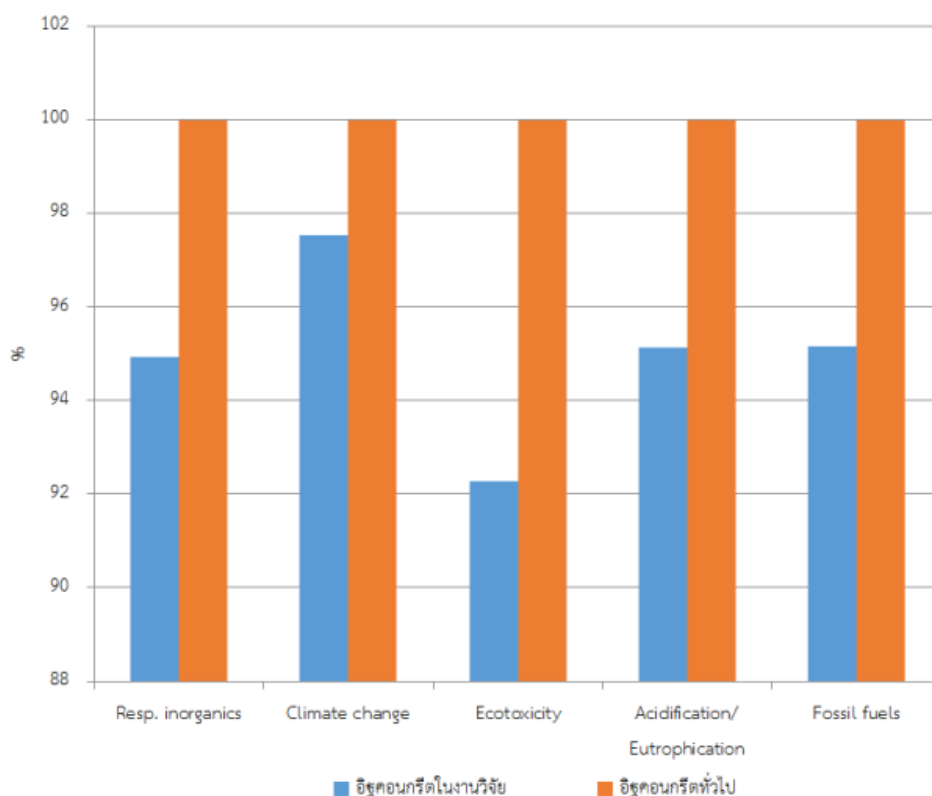


รูปที่ 4.15 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาของวัสดุขุดในการผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไป

และเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป จะพบว่าอิฐคอนกรีตทั่วไปส่งผลกระทบมากกว่าอิฐคอนกรีตในงานวิจัยในทุกด้าน ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.16

**ตารางที่ 4.7** ค่าเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาของวัตถุดิบจากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization)

ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Respiratory Inorganics	DALY	1.45E-05	1.52E-05
Climate Change	DALY	6.31E-06	6.47E-06
Ecotoxicity	PAF*m2yr	2.31E+00	2.50E+00
Acidification/Eutrophication	PDF*m2yr	3.50E-01	3.68E-01
Fossil Fuels	MJ Surplus	1.00E+01	1.06E+01



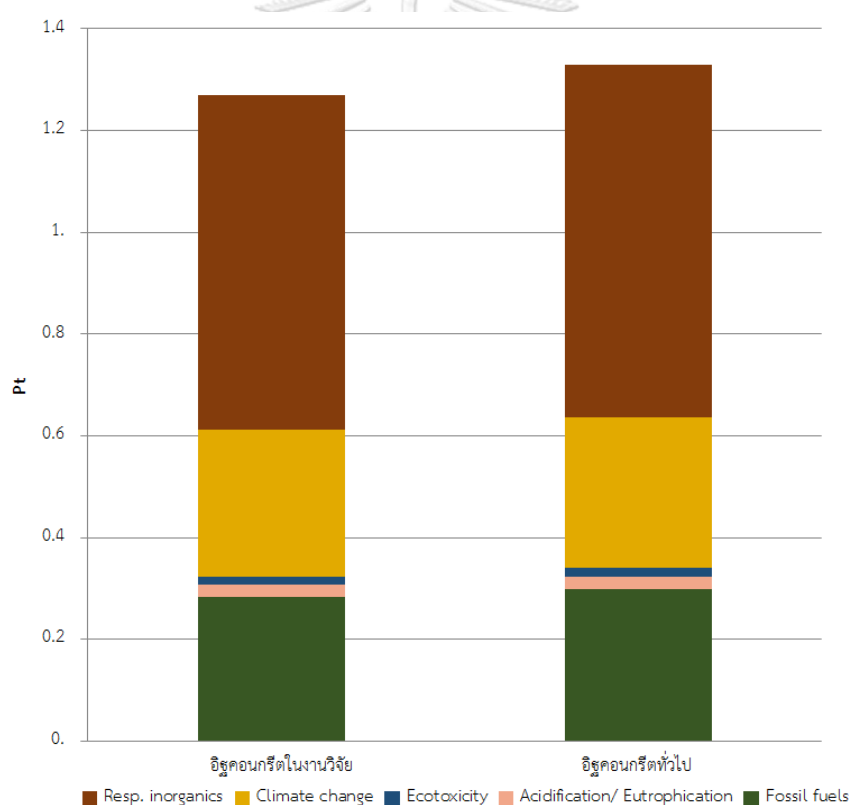
**รูปที่ 4.16** เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป



และเมื่อพิจารณาคะแนนเชิงเดี่ยว (Single Score) แบบแยกกลุ่มผลกระทบของการได้มาของวัตถุดิบของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป ตามตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.17 พบว่าผลกระทบที่มากที่สุด คือ สารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganics) มีค่าเท่ากับ 0.659 และ 0.694 Pt ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากสสารที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า PM 2.5 ในขั้นตอนสกัดวัตถุดิบ และการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ถูกปลดปล่อยออกมา (Jolliet et al., 2003) รองลงมา คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) มีค่าเท่ากับ 0.288 และ 0.295 Pt ตามลำดับ เกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ถูกเผาไหม้จากกระบวนการผลิตวัตถุดิบ โดยเฉพาะการผลิตปูนซีเมนต์ (Hoenig และ Schneider, 2002) และอีกผลกระทบ คือ การใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil Fuels) เพื่อนำมาผลิตเป็นวัตถุดิบ โดยมีค่าเท่ากับ 0.283 และ 0.298 Pt ตามลำดับ ส่วนคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายตามตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.18 พบว่าการได้มาของวัตถุดิบจะส่งผลกระทบต่อด้านสุขภาพของมนุษย์ (Human Health) มากที่สุด และเมื่อรวมค่าของทั้ง 3 กลุ่มเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 1.37 และ 1.43 Pt ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการได้มาของวัตถุดิบ

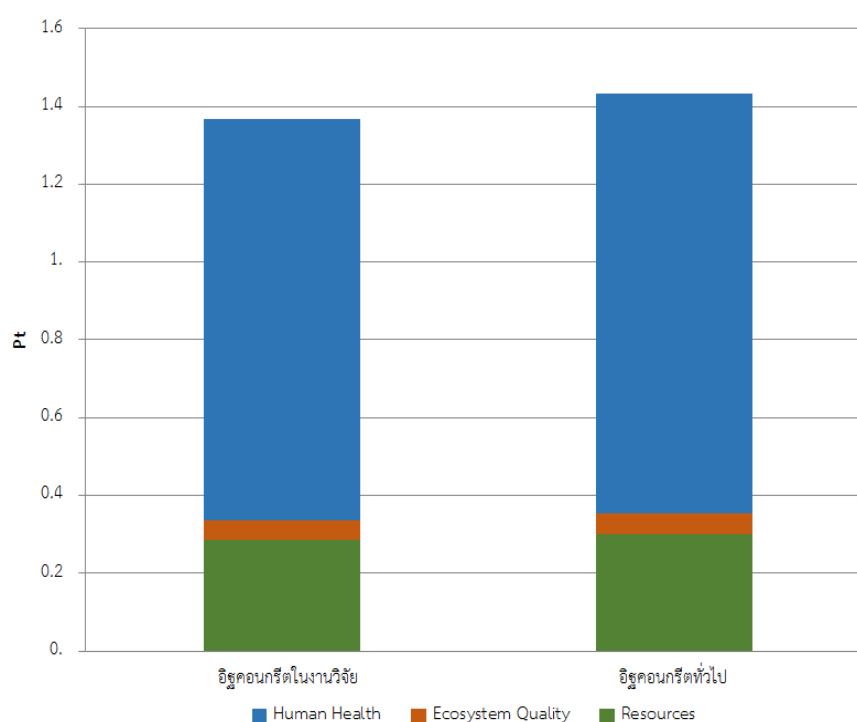
ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Respiratory Inorganics	Pt	6.59E-01	6.94E-01
Climate Change	Pt	2.88E-01	2.95E-01
Ecotoxicity	Pt	1.61E-02	1.75E-02
Acidification/Eutrophication	Pt	2.45E-02	2.57E-02
Fossil Fuels	Pt	2.83E-01	2.98E-01
รวมทั้งหมด	Pt	1.27E+00	1.33E+00



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป

ตารางที่ 4.9 ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการได้มาของวัตถุดิบ

ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Human Health	Pt	1.03E+00	1.08E+00
Ecosystem Quality	Pt	5.00E-02	5.38E-02
Resources	Pt	2.87E-01	3.01E-01
รวมทั้งหมด	Pt	1.37E+00	1.43E+00



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการได้มาของวัตถุดิบในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป

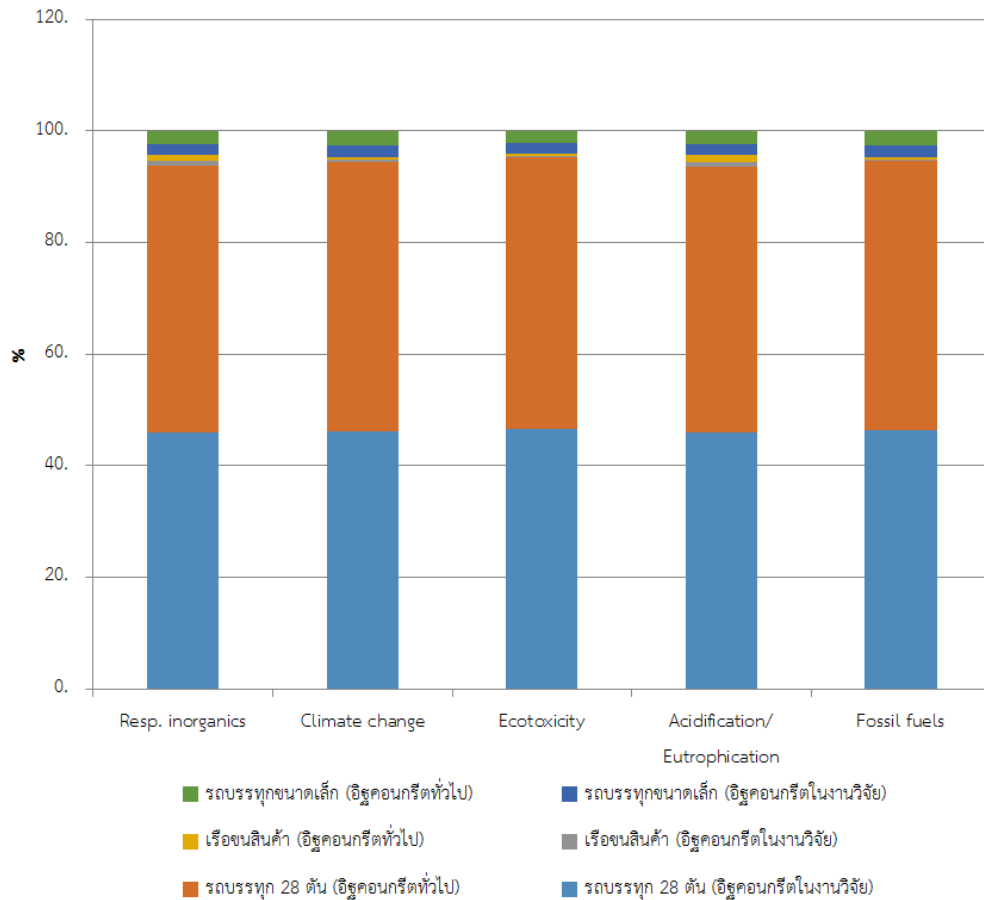
#### 4.4.2.2 ผลการประเมินการขนส่ง

การขนส่งจะแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ รถบรรทุกขนาด 28 ตัน เรือขนส่งสินค้า และรถบรรทุกขนาดเล็ก โดยทั้ง 3 ประเภท ใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวกัน คือ น้ำมันดีเซล พิจารณาเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการขนส่งวัตถุดิบมายังสถานที่ผลิตอิฐคอนกรีตบนเกาะสีชัง ทั้งอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป แสดงผลจากการประเมินดังตารางที่ 4.10 พบว่าอิฐคอนกรีตทั่วไปส่งผลกระทบมากกว่าอิฐคอนกรีตในงานวิจัยในทุก ๆ ผลกระทบที่ศึกษา

จากรูปที่ 4.19 เป็นผลจากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization) จะพบว่าการขนส่งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ มากที่สุดของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป คือ รถบรรทุก 28 คัน ซึ่งส่งผลกระทบร้อยละ 45 ถึง 49 ของการขนส่งทั้งหมด รองลงมา คือ รถบรรทุกขนาดเล็ก ส่งผลกระทบร้อยละ 2 ถึง 3 ของการขนส่งทั้งหมด

**ตารางที่ 4.10** ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการขนส่งจากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization)

ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Respiratory Inorganics	DALY	2.05E-06	2.15E-06
Climate Change	DALY	3.59E-07	3.76E-07
Ecotoxicity	PAF*m2yr	1.12E+00	1.18E+00
Acidification/Eutrophication	PDF*m2yr	6.92E-02	7.27E-02
Fossil Fuels	MJ Surplus	2.13E+00	2.24E+00

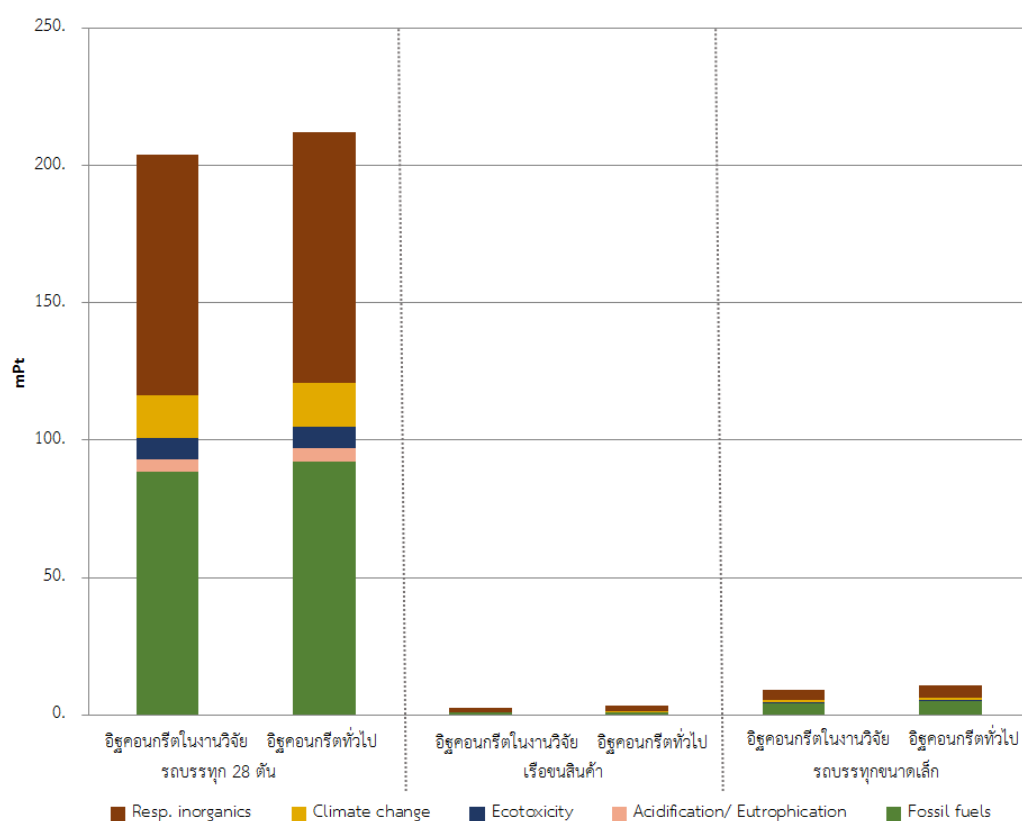


รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการขนส่งในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป

และเมื่อพิจารณาเป็นคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการขนส่ง ผลจากการประเมินแสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.20 พบว่าผลกระทบที่มากที่สุดของอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป คือ การใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil Fuels) มีค่าเท่ากับ 23.0 และ 98.0 mPt ตามลำดับ เนื่องมาจากการใช้เชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการคมนาคมขนส่ง รองลงมาคือ สารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganics) มีค่าเท่ากับ 23.5 และ 97.9 mPt ตามลำดับ เป็นผลมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ทำให้มีการปล่อยฝุ่นละอองขนาดเล็กออกสู่บรรยากาศ

ตารางที่ 4.11 ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการขนส่ง

ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Respiratory Inorganics	mPt	2.35E+01	9.79E+01
Climate Change	mPt	4.06E+00	1.72E+01
Ecotoxicity	mPt	1.89E+00	8.23E+00
Acidification/Eutrophication	mPt	1.23E+00	5.08E+00
Fossil Fuels	mPt	2.30E+01	9.80E+01
รวมทั้งหมด	mPt	5.37E+01	2.26E+02

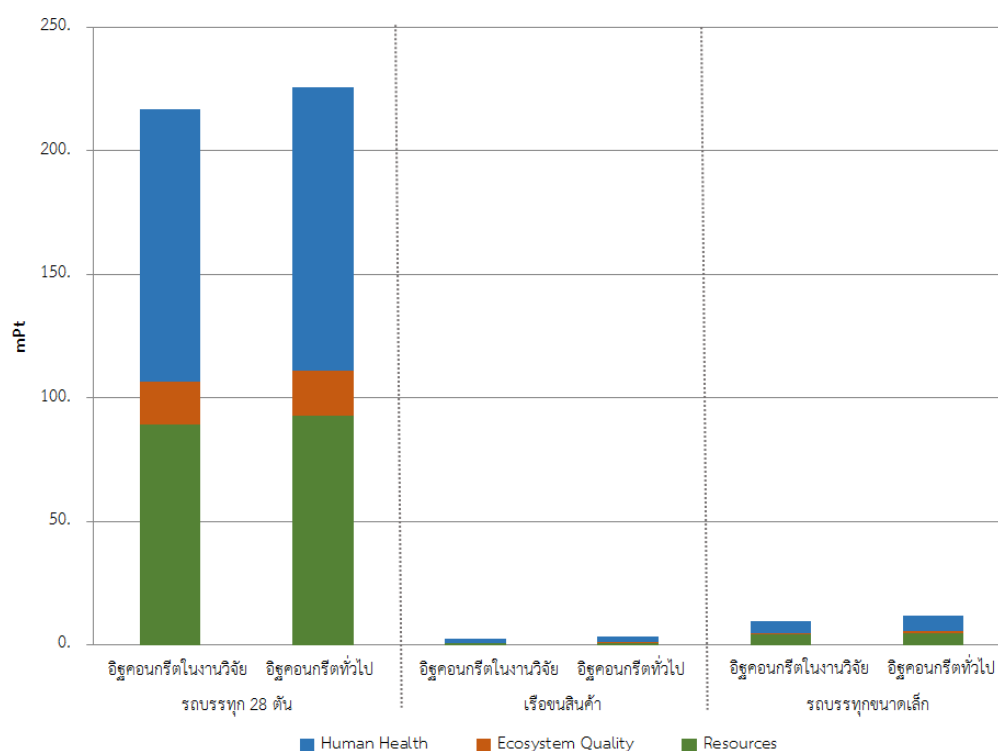


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการขนส่งในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป

และเมื่อพิจารณาเป็นคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการขนส่งผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.21 จะพบว่าทั้งอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปในขั้นตอนการขนส่งจะส่งผลกระทบต่อด้านสุขภาพของมนุษย์ (Human Health) มากที่สุด โดยเมื่อรวมค่าทั้ง 3 กลุ่มเป้าหมายจะมีค่าเท่ากับ 57.0 และ 241.0 mPt ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการขนส่งของอิฐทั่วไปมีค่าสูงกว่าการขนส่งของอิฐคอนกรีตในงานวิจัยถึง 4 เท่า

**ตารางที่ 4.12** ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการขนส่ง

ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Human Health	mPt	2.94E+01	1.23E+02
Ecosystem Quality	mPt	4.47E+00	1.93E+01
Resources	mPt	2.31E+01	9.84E+01
รวมทั้งหมด	mPt	5.70E+01	2.41E+02



**รูปที่ 4.21** เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการขนส่งในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป

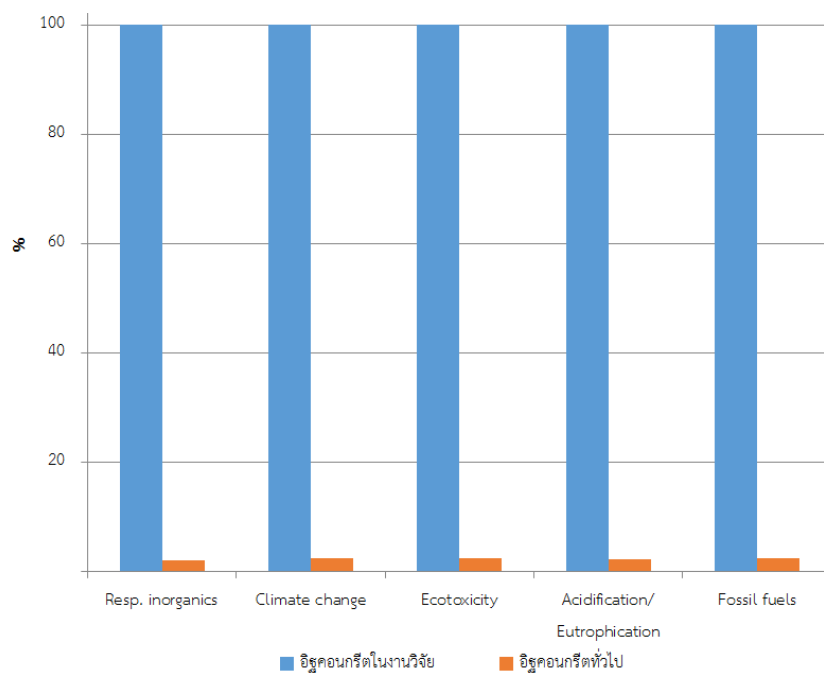
#### 4.4.2.3 ผลการประเมินการเตรียมวัตถุดิบ และผลิตอิฐคอนกรีต

การเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ขั้นตอนการล้างวัตถุดิบ การบดเพื่อลดขนาด การร่อนคัดขนาด และขั้นตอนการผสม เพื่อผลิตเป็นก้อนอิฐคอนกรีต ผลจากการประเมินแสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.22 พบว่าการเตรียมและผลิตอิฐคอนกรีตของงานวิจัยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าอิฐคอนกรีตทั่วไปในทุกด้าน เนื่องมาจากการเตรียมและผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยนั้น ต้องมีขั้นตอนการล้าง การบด และคัดขนาดของวัตถุดิบที่เป็นเศษแก้วเพิ่มเติมเข้ามา จึงทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไปจะมีเพียงขั้นตอนการผสมเท่านั้น

**ตารางที่ 4.13** ค่าเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีตจากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization)

ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Respiratory Inorganics	DALY	9.23E-09	1.95E-10
Climate Change	DALY	6.55E-09	1.54E-10
Ecotoxicity	PAF*m2yr	6.34E-03	1.47E-04
Acidification/Eutrophication	PDF*m2yr	2.38E-04	5.46E-06
Fossil Fuels	MJ Surplus	3.40E-02	8.04E-04



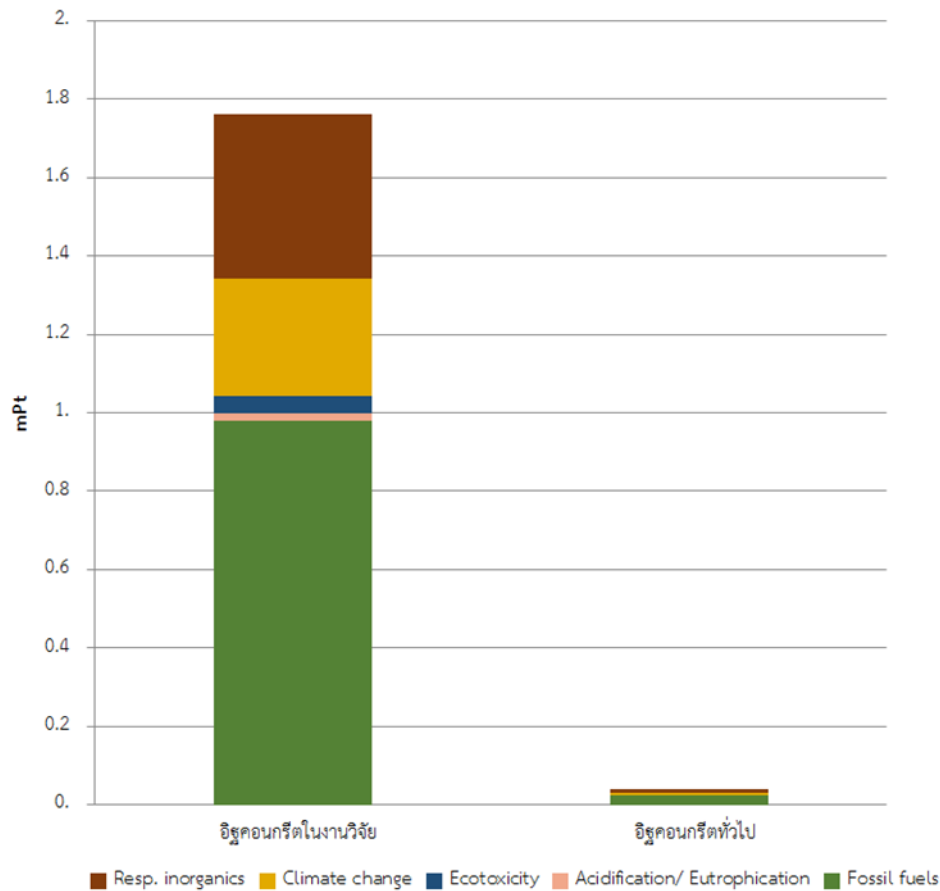


**รูปที่ 4.22** เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการเตรียมวัสดุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีตในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป

และเมื่อพิจารณาเป็นคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการเตรียมวัสดุดิบและการผลิตอิฐคอนกรีต ผลจากการประเมินแสดงดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.23 พบว่าผลกระทบที่มากที่สุดของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป คือ การใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil Fuels) มีค่าเท่ากับ 0.981 และ 0.0233 mPt ตามลำดับ เนื่องมาจากการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในเครื่องจักร รองลงมา คือ สารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganics) มีค่าเท่ากับ 0.419 และ 0.0088 mPt ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.14** ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการเตรียมวัสดุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีต

ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Respiratory Inorganics	mPt	4.19E-01	8.80E-03
Climate Change	mPt	2.99E-01	7.00E-03
Ecotoxicity	mPt	4.44E-02	1.00E-03
Acidification/Eutrophication	mPt	1.67E-02	4.00E-04
Fossil Fuels	mPt	9.81E-01	2.33E-02
รวมทั้งหมด	mPt	1.76E+00	4.05E-02

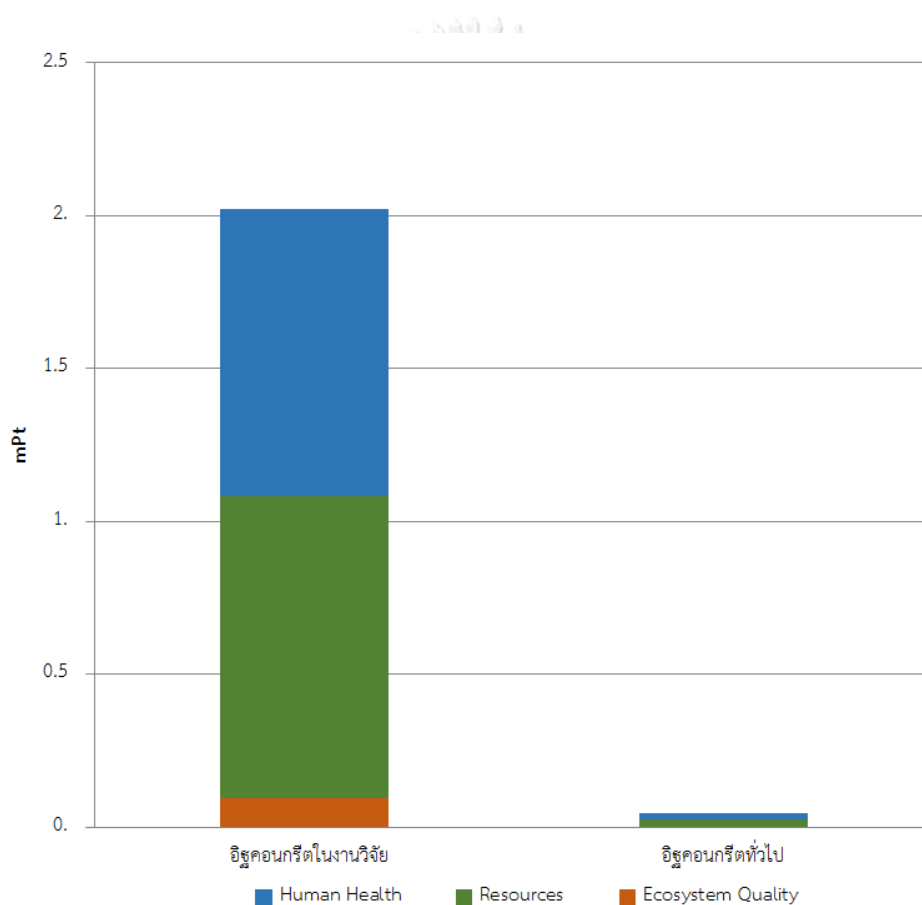


รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป

และเมื่อพิจารณาเป็นคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการเตรียมและผลิตอิฐคอนกรีต ผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.24 จะพบว่าทั้งอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป ในขั้นตอนการเตรียมและผลิต จะส่งผลกระทบด้านการใช้ทรัพยากร (Resources) มากที่สุด โดยเมื่อรวมค่าทั้ง 3 กลุ่มเป้าหมายจะมีค่าเท่ากับ 1.76 และ 0.0405 mPt ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.15** ค่าเปรียบเทียบของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีต

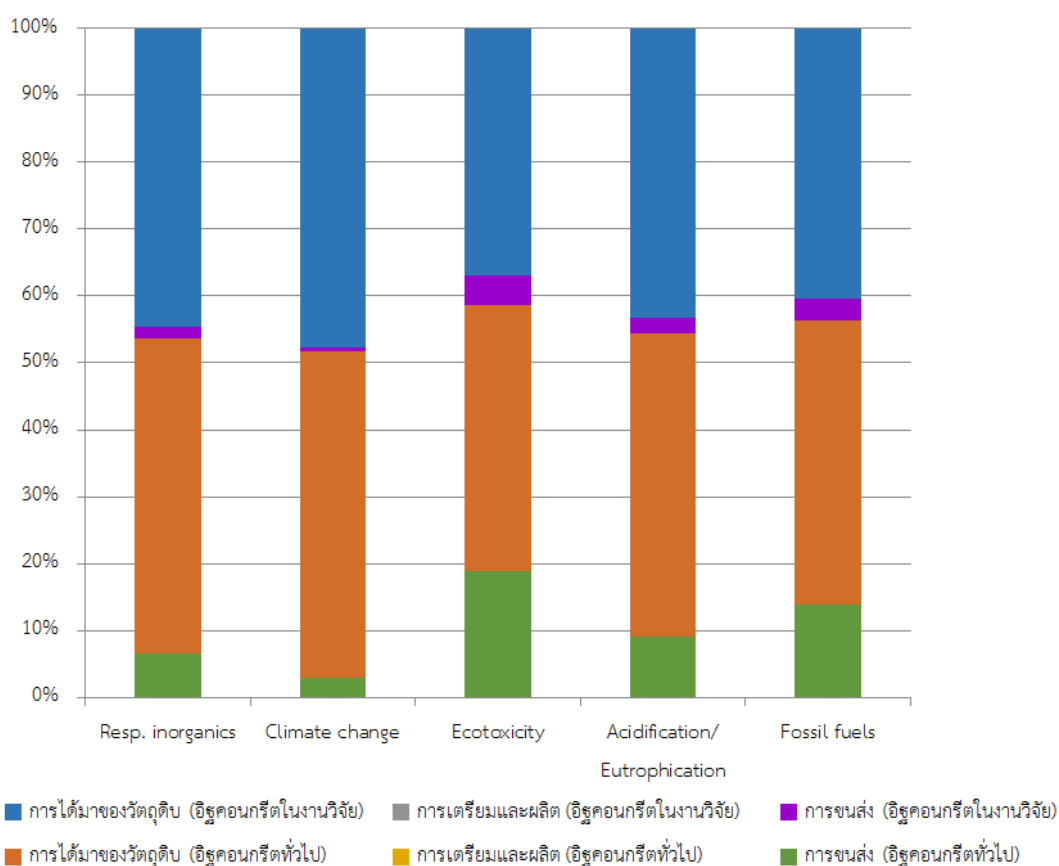
ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย	อิฐคอนกรีตทั่วไป
Human Health	mPt	9.40E-01	2.10E-02
Ecosystem Quality	mPt	9.35E-02	2.20E-03
Resources	mPt	9.87E-01	2.34E-02
รวมทั้งหมด	mPt	1.76E+00	4.05E-02



**รูปที่ 4.24** เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของการเตรียมวัตถุดิบ และการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยและอิฐคอนกรีตทั่วไป

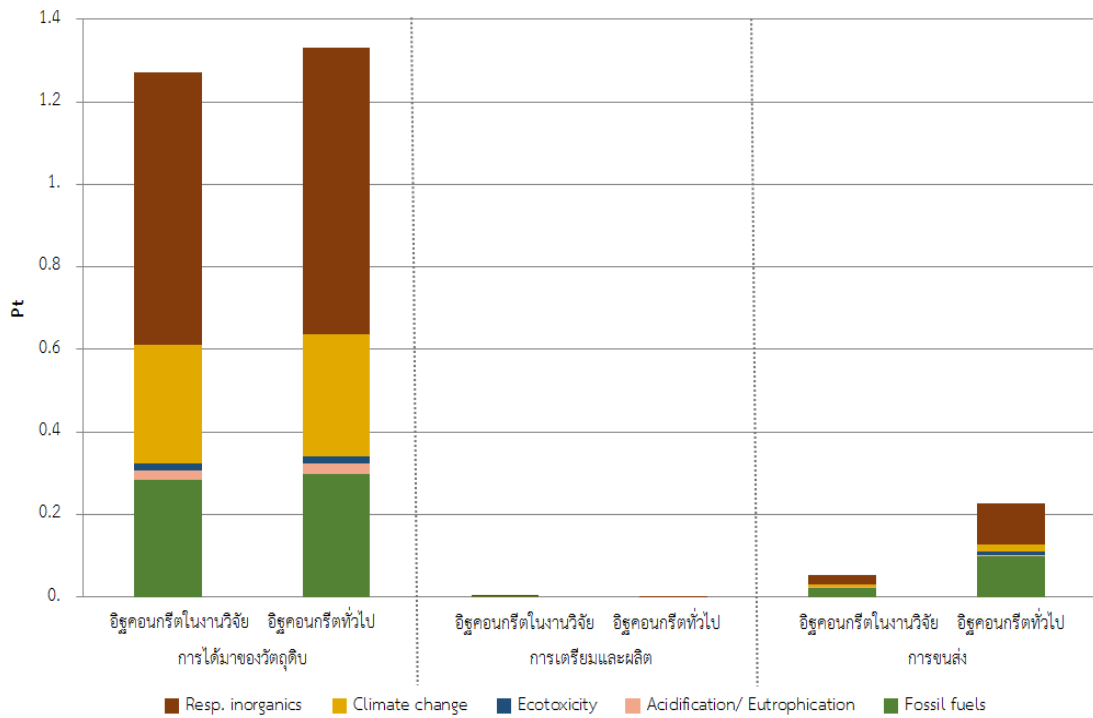
#### 4.4.2.4 ผลการประเมินในทุกกระบวนการ

เป็นการเปรียบเทียบทุกกระบวนการที่ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และการเตรียมและผลิตอิฐคอนกรีต ของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าการได้มาของวัตถุดิบของอิฐคอนกรีตทั่วไป ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดในทุกกระบวนการ รองลงมาคือ การได้มาของวัตถุดิบของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย การขนส่งของอิฐคอนกรีตทั่วไป และการขนส่งของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย ตามลำดับ ซึ่งพบว่าในกระบวนการเตรียมและผลิตแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ

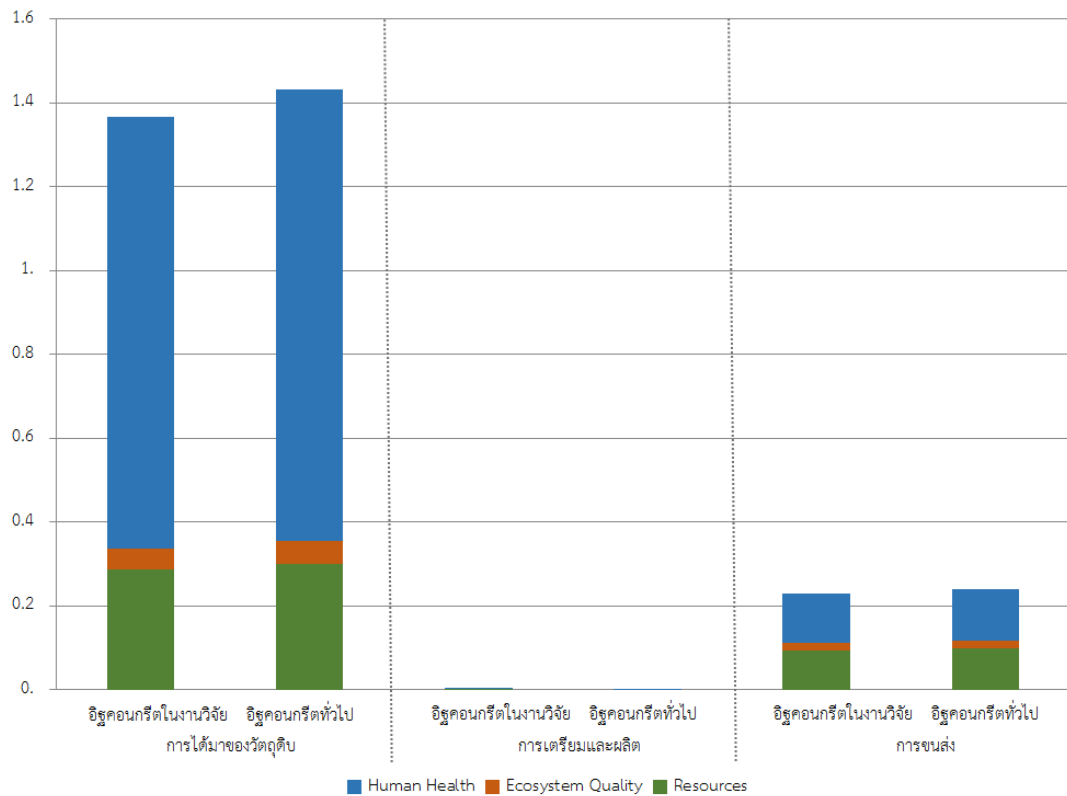


รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของทุกกระบวนการ

และเมื่อพิจารณาคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของทุกกระบวนการ ดังรูปที่ 4.26 จะพบว่าในทุกกระบวนการนั้น จะมีผลกระทบหลัก ๆ คือ สารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganics) และการใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil Fuels) โดยมาจากขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบสูงที่สุด ส่วนผลของคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของทุกกระบวนการ ดังรูปที่ 4.27 พบว่าจะมีผลกระทบหลัก ๆ คือ ด้านสุขภาพของมนุษย์ (Human Health) และด้านการใช้ทรัพยากร (Resources) โดยมาจากขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบสูงที่สุด



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของทุกกระบวนการ



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบคะแนนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มเป้าหมายของทุกกระบวนการ

จากการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของอิฐคอนกรีต เพื่อใช้เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และการเตรียมและผลิตอิฐคอนกรีตของงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไป หรือที่เรียกว่า “Cadle to Gate” นั้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.16 และอธิบายได้ดังนี้

สารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganics) ของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปมีค่าเท่ากับ  $9.23E-09$  และ  $1.74E-05$  DALY ตามลำดับ หมายถึง อิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปทำให้เกิดการสูญเสียโอกาสที่มีสุขภาพที่ดี เนื่องจากสารอนินทรีย์ที่มีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ เท่ากับ  $9.23E-09$  และ  $1.74E-05$  ปี ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปมีค่าเท่ากับ  $6.68E-06$  และ  $6.85E-06$  DALY ตามลำดับ หมายถึง อิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปทำให้เกิดการสูญเสียโอกาสที่มีสุขภาพที่ดี เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เท่ากับ  $6.68E-06$  และ  $6.85E-06$  ปี ตามลำดับ

ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (Ecotoxicity) ของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปมีค่าเท่ากับ  $3.44E+00$  และ  $3.68E+00$  PAF\*m2yr ตามลำดับ หมายถึง อิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปทำให้สัดส่วนของสิ่งมีชีวิตมีโอกาสได้รับผลกระทบ (โดยจะดูผลกระทบของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ และในดินเท่านั้น) เท่ากับ  $3.44E+00$  และ  $3.68E+00$  ของพื้นที่ 1 ตารางเมตร ต่อปี ตามลำดับ

ภาวะความเป็นกรด/การเพิ่มธาตุอาหารพืชในแหล่งน้ำ (Acidification/ Eutrophication) ของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปมีค่าเท่ากับ  $4.19E-01$  และ  $4.41E-01$  PDF\*m2yr ตามลำดับ หมายถึง อิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปทำให้มีสัดส่วนการสูญหายไปของพืช (โดยจะดูการหายไปของพืชเท่านั้น) เท่ากับ  $4.19E-01$  และ  $4.41E-01$  ของพื้นที่ 1 ตารางเมตรต่อปี ตามลำดับ

การใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติ (Fossil Fuels) ของอิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปมีค่าเท่ากับ  $1.22E+01$  และ  $1.28E+01$  MJ Surplus ตามลำดับ หมายถึง อิฐคอนกรีตในงานวิจัย และอิฐคอนกรีตทั่วไปจะส่งผลให้ความต้องการพลังงานเพิ่มเติมเพื่อชดเชยในอนาคต เท่ากับ  $1.22E+01$  และ  $1.28E+01$  MJ ตามลำดับ

และเมื่อพิจารณาคะแนนเชิงเดี่ยวพบว่ากระบวนการได้มาของวัตถุดิบส่งผลกระทบสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.27 และ 1.33 Pt ตามลำดับ รองลงมาคือ การขนส่ง มีค่าเท่ากับ 0.0537 และ 0.226 Pt ตามลำดับ และการเตรียมและผลิตอิฐคอนกรีต มีค่าเท่ากับ 0.00176 และ 0.0000405 Pt ตามลำดับสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.17

**ตารางที่ 4.16** ค่าเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของทุกกระบวนการ จากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบ (Classification) และกำหนดบทบาท (Characterization)

ผลกระทบ	หน่วย	อิฐคอนกรีตในงานวิจัย				อิฐคอนกรีตทั่วไป			
		การได้มา ของ วัตถุดิบ	การขนส่ง	การเตรียม และผลิต	รวม	การได้มา ของ วัตถุดิบ	การขนส่ง	การเตรียม และผลิต	รวม
Respiratory Inorganics	DALY	1.45E-05	2.05E-06	9.23E-09	1.66E-05	1.52E-05	2.15E-06	1.95E-10	1.74E-05
Climate Change	DALY	6.31E-06	3.59E-07	6.55E-09	6.68E-06	6.47E-06	3.76E-07	1.54E-10	6.85E-06
Ecotoxicity	PAF*m2yr	2.31E+00	1.12E+00	6.34E-03	3.44E+00	2.50E+00	1.18E+00	1.47E-04	3.68E+00
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	3.50E-01	6.92E-02	2.38E-04	4.19E-01	3.68E-01	7.27E-02	5.46E-06	4.41E-01
Fossil Fuels	MJ Surplus	1.00E+01	2.13E+00	3.40E-02	1.22E+01	1.06E+01	2.24E+00	8.04E-04	1.28E+01

ตารางที่ 4.17 ค่าเปรียบเทียบผลประโยชน์และต้นทุนเชิงเดี่ยวแบบแยกกลุ่มผลกระทบของทุกกระบวนการ

ผลกระทบ	หน่วย	อัตรากอปรัดเงินงานวิจัย			อัตรากอปรัดทั่วไป		
		การได้มาของ วัตถุดิบ	การขนส่ง	การเตรียมและ ผลิต	การได้มาของ วัตถุดิบ	การขนส่ง	การเตรียมและ ผลิต
Respiratory Inorganics	Pt	6.59E-01	2.35E-02	4.19E-04	6.94E-01	9.79E-02	8.80E-06
Climate Change	Pt	2.88E-01	4.06E-03	2.99E-04	2.95E-01	1.72E-02	7.00E-06
Ecotoxicity	Pt	1.61E-02	1.89E-03	4.44E-05	1.75E-02	8.23E-03	1.00E-06
Acidification/ Eutrophication	Pt	2.45E-02	1.23E-03	1.67E-05	2.57E-02	5.08E-03	4.00E-07
Fossil Fuels	Pt	2.83E-01	2.30E-02	9.81E-04	2.98E-01	9.80E-02	2.33E-05
รวม	Pt	1.27E+00	5.37E-02	1.76E-03	1.33E+00	2.26E-01	4.05E-05



โดยงานวิจัยของ Colangelo et al. (2018) ทำการประเมินวัฏจักรของอิฐคอนกรีตที่ใช้วัสดุแทนที่มวลรวม (Aggregate) ในการผลิตอิฐคอนกรีต โดยใช้วัสดุแทนที่ 4 ชนิดด้วยกันคือ ถ้ำจากเตาเผา (Incinerator Ashes) ตะกรันถลุงเหล็ก (Blast Furnace Slag) สิ่งก่อสร้างและรื้อถอน (Construction and Demolition Waste) และกากหินอ่อน (Marble Sludge) ประเมินโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ด้วยวิธี Eco-indicator 99 เช่นเดียวกัน เปรียบเทียบกับการผลิตอิฐคอนกรีตทั่วไป จากผลการศึกษาพบว่าวัสดุที่ใช้แทนที่มวลรวมที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดคือ ตะกรันถลุงเหล็ก ซึ่งการใช้วัสดุแทนที่มวลรวมนั้น สามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) และสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้

#### 4.4.3 การแปลผล และปรับปรุงผลิตภัณฑ์ (Interpretation)

จากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 จากที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่า กระบวนการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คือ การได้มาของวัตถุดิบ โดยเฉพาะการได้มาของปูนซีเมนต์ และทรายหยาบ รองลงมาคือ การขนส่ง ดังนั้นแนวทางในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้น ควรจะลดจากสองกระบวนการนี้ ซึ่งพบว่าการนำเศษแก้วมาใช้ร่วมในการผลิตอิฐคอนกรีตในงานวิจัยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการผลิตอิฐทั่วไป เนื่องมาจากช่วยลดการได้มาของวัตถุดิบ และลดปริมาณการขนส่งไปที่เกาะสีชังได้ และควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมของการหาวัตถุดิบที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บนเกาะสีชังได้ ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมวัสดุก่อสร้างสีเขียวต่อไป

#### 4.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้ว

เป็นการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และระยะเวลาคืนทุน ในการผลิตอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวมร้อยละ 20 เพื่อใช้ในการตัดสินใจผลตอบแทนในการลงทุน ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) ได้แก่ เครื่องจักร (เครื่องบด เครื่องร่อนคัดขนาด และเครื่องผสม) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) ได้แก่ ค่าน้ำประปา ค่าไฟฟ้า ค่าแรงงาน ค่าขนส่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) ของการผลิตอิฐคอนกรีต

ค่าใช้จ่าย	จำนวน	หน่วย
<b>ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost: F)</b>		
Los Angeles Abrasion Machine (30 กิโลกรัม/รอบ)	98,000	บาท
Aggregate Vibration Screen (30 กิโลกรัม/รอบ)	145,000	บาท
Pan Mixer (50 กิโลกรัม/รอบ)	22,000	บาท
Block Machine (2 ก้อน/ครั้ง)	50,000	บาท
<b>รวม ต้นทุนคงที่ (Total Fixed Cost: TFC)</b>	<b>315,000</b>	<b>บาท</b>
<b>วัตถุดิบ</b>		
ปูนซีเมนต์	360	กิโลกรัม
ทรายหยาบ	840	กิโลกรัม
เศษแก้ว	240	กิโลกรัม
<b>รวม</b>		
น้ำหนักของอิฐคอนกรีต	2.7	กิโลกรัม/ก้อน
จำนวนของอิฐคอนกรีต	600	ก้อน/วัน
<b>ต้นทุนผันแปร (Variable Cost: V)</b>		
ปูนซีเมนต์	2.5	บาท/กิโลกรัม
ทรายหยาบ	0.3	บาท/กิโลกรัม
เศษแก้ว	0	บาท/กิโลกรัม
ค่าใช้จ่ายวัตถุดิบ	1,150	บาท/วัน
จำนวนของอิฐคอนกรีต	600	ก้อน/วัน
<b>รวม ค่าวัตถุดิบต่อชิ้น</b>	<b>1.92</b>	<b>บาท/ก้อน</b>

ตารางที่ 4.18 (ต่อ)

ค่าใช้จ่าย	จำนวน	หน่วย
ค่าแรงงานจำนวน 3 คน (300 บาท/วัน)	900	บาท/วัน
จำนวนของอิฐคอนกรีต	600	ก้อน/วัน
<u>รวม</u> ค่าแรงงานต่อชิ้น	1.5	บาท/ก้อน
<b>การขนส่ง</b>		
ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง	50	บาท/วัน
จำนวนของอิฐคอนกรีต	600	ก้อน/วัน
<u>รวม</u> ค่าขนส่งต่อชิ้น	0.083	บาท/ก้อน
<b>ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ</b>		
ค่าไฟฟ้า	47.04	บาท/วัน
จำนวนของอิฐคอนกรีต	600	ก้อน/วัน
<u>รวม</u> ค่าไฟฟ้าต่อชิ้น	0.078	บาท/ก้อน
ค่าน้ำประปา	40	บาท/วัน
จำนวนของอิฐคอนกรีต	600	ก้อน/วัน
<u>รวม</u> ค่าน้ำประปาต่อชิ้น	0.067	บาท/ก้อน
<b>รวมค่าต้นทุนผันแปร (Variable Cost)</b>		
ค่าวัสดุดิบ	1.92	บาท/ก้อน
ค่าขนส่ง	0.083	บาท/ก้อน
ค่าแรงงาน	1.5	บาท/ก้อน
ค่าไฟฟ้า	0.078	บาท/ก้อน
ค่าน้ำประปา	0.067	บาท/ก้อน
<u>รวม</u> ต้นทุนแปรผันเฉลี่ย (Average Variable Cost: AVC)	3.65	บาท/ก้อน
<b>ผลผลิต/ปี (N)</b>		
จำนวนวันทำงาน (Working Day)	288	วัน/ปี
ผลผลิต (Productivity)	600	ก้อน/วัน
ผลผลิตต่อปี (Number: N)	172,800	ก้อน/ปี

## ตารางที่ 4.18 (ต่อ)

ค่าใช้จ่าย	จำนวน หน่วย
ราคาขาย (Price: P)	
ค่าอิฐคอนกรีต	5 Baht บาท/ก้อน

หลังจากเก็บข้อมูลค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้ว (ใช้เศษแก้วแทนที่ทราย หยาบร้อยละ 20) แล้วนำมาคำนวณตามสูตรในตารางที่ 4.19

## 4.5.1 จุดคุ้มทุน (The Breakeven Point: Q)

จากการคำนวณหาจุดคุ้มทุนที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยนำต้นทุนคงที่ทั้งหมด ราคาขายของ อิฐคอนกรีต และต้นทุนแปรผันเฉลี่ย มาคำนวณตามสูตร พบว่าจุดคุ้มทุนในการผลิตอิฐคอนกรีตจาก เศษแก้ว ต้องผลิตเป็นจำนวน 233,333 ก้อน

## 4.5.2 ระยะเวลาคืนทุน (The Payback Period)

จากสูตรในตารางที่ 4.19 เมื่อนำจำนวนการผลิต ณ จุดคุ้มทุน และจำนวนการผลิตต่อปี มา คำนวณตามสูตร พบว่าระยะเวลาในการคืนทุนของการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้วเท่ากับ 17 เดือน

ดังนั้นจากผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นนี้ ก็จะสามารถนำมาใช้เป็น ทางเลือกในการตัดสินใจที่จะลงทุนเพื่อจัดการเศษแก้วบนเกาะสีชังได้

## ตารางที่ 4.19 การคำนวณหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

	จำนวน หน่วย
จำนวนการผลิต ณ จุดคุ้มทุน (The Breakeven Point: Q)	
$Q = \frac{TFC}{P - AVC}$	233,333 ก้อน
ระยะเวลาผลิตที่จะคุ้มทุน (The Payback Period)	
$\frac{Q}{N}$	17 เดือน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาการผลิตอิฐคอนกรีตจากเศษแก้วเพื่อจัดการเศษแก้วบนเกาะสีชัง และนำมาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เศษแก้วสามารถใช้แทนที่ทรายหยาบในการผลิตอิฐคอนกรีตได้
2. อัตราส่วนของเศษแก้วที่นำมาใช้แทนที่ทรายหยาบในการผลิตอิฐคอนกรีต คือ ร้อยละ 0 10 20 30 และ 100 โดยน้ำหนักของทรายหยาบ และทุกระยะเวลาในการบ่ม (7 14 และ 28 วัน) ให้ค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 33.80 ถึง 48.49 เมกะปาสคาล โดยอัตราส่วนการแทนที่ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงที่สุดคือ ร้อยละ 20 บ่มที่ 28 วัน (48.49 เมกะปาสคาล)
3. อัตราส่วนของเศษแก้วที่ใช้แทนที่ทรายหยาบร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ร้อยละ 30 และ 100 ให้กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ
4. ระยะเวลาในการบ่มอิฐคอนกรีตที่ 14 และ 28 วัน ไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
5. การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์อิฐคอนกรีตโดยโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ใช้วิธี Eco-indicator 99 พิจารณาตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ การขนส่ง และการผลิต พบว่าอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วแทนที่ทรายหยาบร้อยละ 20 (1.33 Pt) มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าอิฐคอนกรีตทั่วไป (1.56 Pt) และสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ร้อยละ 17.3 (ต่อการใช้งาน 1 ตารางเมตร)
6. จุดคุ้มทุนของการนำเศษแก้วมาใช้ในการผลิตอิฐคอนกรีตเท่ากับ 233,333 ก้อน และระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 17 เดือน

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษานี้เป็นการทดลองโดยใช้แบบหลักระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) เท่านั้น สำหรับการนำไปใช้จริงควรมีการทดลองโดยใช้แบบหลักระดับใหญ่ หรือแบบหลักระดับท้องตลาดที่จะใช้ในการผลิต (Pilot Scale)
2. จากการทดลองในครั้งนี้ ใช้เพียงเศษแก้วที่นำมาแทนที่ทรายหยาบในการผลิตอิฐคอนกรีตเท่านั้น อาจจะมีการหาวัสดุแทนที่เพิ่มเติมที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น แก้วลอยจาก

เตาเผาขยะ นำมาศึกษาสารประกอบทางเคมี และการชะละลายก่อนใช้งาน เนื่องจากอาจจะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักได้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการได้มาของวัตถุดิบ และการขนส่ง

3. ควรมีการรณรงค์ให้ทางเกาะสีชัง มีการคัดแยกขยะตามร้านค้า ร้านอาหาร ที่พัก และบ้านเรือน โดยเฉพาะขยะเศษอาหาร ขวดแก้ว และพลาสติก เพื่อลดการใช้น้ำในการทำความสะดวกแล้วสามารถนำขยะที่เกิดขึ้นบนเกาะไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเกิดการจัดการอย่างยั่งยืน



## บรรณานุกรม

### ภาษาไทย

- เทศบาลตำบลเกาะสีชัง. รายงานสถานการณ์ ปัญหา และการบริหารจัดการขยะมูลฝอย ปี 2557. ชลบุรี , 2557.
- เบญจวรรณ รักรัษสี. การเงินธุรกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2536.
- เมทนี อ้วนเส้ง, ดนุพล ต้นนโยภาส และสุชาติ จันทร์มณี. แก้วโซดาโลมผสมกับถั่วลอยลิกลงน้ำดื่มที่ปลอดภัย. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 18 (มกราคม-เมษายน 2559): 47-59.
- เศรษฐ์ สัมภิตตะกุล. การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2555.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. คู่มือแนวทางการลด คัดแยก และใช้ประโยชน์ขยะมูลฝอย. กรุงเทพมหานคร: บริษัท รุ่งศิลป์การพิมพ์ (1997) จำกัด, 2551.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. สถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทยปี พ.ศ.2559. กรุงเทพมหานคร, 2560.
- จรรยา พันธมา. การประยุกต์เปลือกหอยแมลงภู่และหอยแครงผสมกับเศษแก้วและขยะปูนซีเมนต์เพื่อผลิตอิฐคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- จิระนันท์ เหลาพร และ กรวิทย์ ซากักดี. การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาการคืนทุนการปลูกข้าวหอมมะลิและมันสำปะหลัง : จังหวัดอุดรธานี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี, 2555.
- ฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของวัสดุพื้นฐานและพลังงานของประเทศ. การประเมินวัฏจักรชีวิต. [ออนไลน์]. ม.ป.ป. แหล่งที่มา: <http://www.thailcidatabase.net/index.php/history-life-cycle-assessment-lca> [20 มกราคม 2562]
- ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับคุณภาพสินค้า OTOP. ความรู้ทั่วไปด้านแก้ว. [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: <http://www.sptn.dss.go.th/otopinfo/index.php/2014-10-09-08-12-02/article-1/136-2017-05-31-06-33-45> [30 กันยายน 2560]
- นฤมล รัตนสุวรรณ. “ขยะ”ที่เกาะสีชัง. มติชน (18 กุมภาพันธ์ 2559): 10.
- บริษัท โซล่าฮับ จำกัด. การคำนวณค่าไฟฟ้า. [ออนไลน์]. 2559. แหล่งที่มา:

<https://www.solarhub.co.th/solar-information/solar-provision/354-electrical-estimate> [23 กุมภาพันธ์ 2562]

ประณต กุลประสูต. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: อัมรินทร์พรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, 2536.

ปิติศานต์ กร้ามาต. คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.

ปิยชาติ ศิลปะสุวรรณ. ขยะมูลฝอย ปัญหาใหญ่ที่ประเทศกำลังเผชิญ. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา, 2557.

ปิยะพงศ์ กี่สวัสดิ์คอน, รัฐศักดิ์ พรหมมาศ และทวีศักดิ์ รุ่งศักดิ์ทวีกุล. อัตราการซึมผ่านน้ำในคอนกรีตผสมเถ้าทลายปาล์มน้ำมันและหินฝุ่นแทนทรายที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 2558.

พงศ์พิชญ์ พิมพ์ไสย. แผนกวิชาช่างก่อสร้าง. [ออนไลน์]. ม.ป.ป. แหล่งที่มา: <https://con-ltc.blogspot.com/> [30 กันยายน 2560]

ภรพนา บุญมา. สมบัติทางฟิสิกส์บางประการของคอนกรีตบล็อกแบบกลวงที่ผสมเส้นใยกากปาล์มน้ำมันและผสมเส้นใยชานอ้อย. ใน เอกสารประกอบการประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1, 11-13 พฤษภาคม 2548 ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน จังหวัดชลบุรี, 2548.

มนูญศักดิ์ แก้วนาค, เกียรติศักดิ์ ภูแล่นกับ and นันทวิช ภูกิ่งหิน. การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2558.

วชิรวิทย์ สำราญรัมย์. สมบัติเชิงกลและความทนทานของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมผงปูนและเถ้าแกลบดำบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2553.

วรพงษ์ เทียมสอน. ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์และแก้วจากกากเหลือทิ้งอุตสาหกรรม. วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม 218 (สิงหาคม-กันยายน 2554): 68-72.

วิไลวรรณ สีนะกุล. การเตรียมและวิเคราะห์แก้วและแก้วเซรามิกชีวภาพจากระบบแคลเซียมโซเดียมฟอสเฟต. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2558.

วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: บริษัท นิวไทยมิตรการพิมพ์ (1996) จำกัด, 2557.

วีรยตม์ เฉลิมนนท์, อภิรักษ์ สุรภักดี และสุภาพร คล้ายทอง. การใช้ฝุ่นหินปูนในคอนกรีตของโครงการไฟฟ้าพลังน้ำไชยะบุรี. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย 4 (มกราคม-มิถุนายน 2560): 40-51.



- ศุภณี เรียบเลิศศิริภู และ แววบุญ แยมแสงสังข์. หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. ใน รายงานผลการเข้าอบรมหลักสูตรการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์, หน้า 7. 22-24 พฤศจิกายน 2555 ณ โรงแรมสยาม&สยาม ดีไซน์ โฮเต็ล แอนด์ สปา กรุงเทพมหานคร, 2555.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. [ออนไลน์]. 2558. แหล่งที่มา: [http://www.thaiecoproduct.com/index.php/2015-06-04-04-13-14/9-uncategories/14-knowledge-lca.html#\\_ftnref2](http://www.thaiecoproduct.com/index.php/2015-06-04-04-13-14/9-uncategories/14-knowledge-lca.html#_ftnref2) [30 กันยายน 2560]
- สถาบันสิ่งแวดล้อมและทรัพยากร. นิเวศวิทยามนุษย์และทะเลที่เกาะสีชัง. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2553. (อัดสำเนา)
- สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. คู่มือการจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ภายใต้โครงการ “การจัดทำฐานข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์และเหล็กกล้าเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อม”. นนทบุรี: สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2547.
- สถาพร โภคา. วิศวกรรมทาง (Highway Engineering). ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555.
- สรารุช เจริญศิริเสถียร. คุณสมบัติของคอนกรีตผสมผงเถ้าหินปูนจากอุตสาหกรรมผลิตปูนขาว. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2552.
- สำนักงานประชาสัมพันธ์จังหวัดชลบุรี. เกษตร/สิ่งแวดล้อม. [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: [http://thainews.prd.go.th/website\\_th/news/news\\_detail/TNEVN6003280010027](http://thainews.prd.go.th/website_th/news/news_detail/TNEVN6003280010027) [15 กันยายน 2560]
- สุรศักดิ์ มนต์รี และ เสรี วิเศษวงษา. การปมและการป้องกันคอนกรีตสด. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2557. (อัดสำเนา)
- สุวิมล สัจจวานิชย์, จิรวัดณ์ ดำริห์อนันต์, ทศพล ศรีเอี่ยม, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, บุญชัย แสงเพชรงาม และ ชูสิต วัชรสินธุ์. องค์ความรู้ประกอบการสอบเลื่อนระดับเป็นสามัญวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา. สภาวิศวกร, 2558. (อัดสำเนา)
- อาทิตย์ วัจนัยกุล. กระบวนการและวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ และเหล็ก. ลำปาง: มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 2554.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมวิธีทดสอบความต้านทานทางเคมีของภาชนะแก้วบรรจุยา (มอก.501-2527). กรุงเทพมหานคร: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2527.

## ภาษาอังกฤษ

- Afshinnia, K. and Rangaraju, P. R. Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of portland cement concrete. Construction and Building Materials. 117 (2016): 263-272.
- Ali, E. E. and Al-Tersawy, S. H. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. Construction and Building Materials. 35 (2012): 785–791.
- Aliabdo, A. A., Elmoaty, A. M. and Aboshama, A. Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. Construction and Building Materials. 124 (2016): 866–877.
- American Society for Testing and Materials C109M-16a. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). Annual book of ASTM standard. 04.01, 2016.
- American Society for Testing and Materials C128-15. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. Annual book of ASTM standard. 04.02, 2015.
- American Society for Testing and Materials C136M-14. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. Annual book of ASTM standard. 04.02, 2014.
- American Society for Testing and Materials C642-13. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. Annual book of ASTM standard. 04.02, 2006.
- Atkins, H. N. Highway materials, soils, and concretes. Quebecor Printing: USA, 1997.
- Batayneh, M., Marie, I. and Asi, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. Waste Management. 27 (2007): 1870–1876.
- Bunprome, P. and Thirawanutpong, P. Life cycle assessment tools for environmental management. The Journal of KMUTNB. 23 (2013): 232–240.
- Castro, S. D. and Brito, J. D. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. Journal of Cleaner Production. 41 (2013): 7–14.

- Civil Engineers PK. Aggregates types classification. [ออนไลน์]. 2016. แหล่งที่มา: <https://civilengineerspk.com/aggregates-types-classification/> [21 มกราคม 2561]
- Colangelo, F., Forcina, A., Farina, I. and Petrillo, A. Life cycle assessment (LCA) of different kinds of concrete containing waste for sustainable construction. Buildings. 8 (2018): 1–12.
- Degirmenci, N., Yilmaz, A. and Cakir, O. A. Utilization of waste glass as sand replacement in cement mortar. Indian Journal of Engineering and Material Sciences. 18 (2011): 303–308.
- Demir, I. Reuse of waste glass in building brick production. Waste Management and Research. 27 (2009): 572–577.
- Du, H. and Tan, K. H. Properties of high volume glass powder concrete. Cement and Concrete Composites. 75 (2017): 22–29.
- Funk, H., Weiss, W. and Zeising, M. Anorg Allg Chem. 297 (1958): 103.
- Gene, H. and Li, Q. Water absorption and hydration products of metakaolin modified mortar. Key Engineering Materials. 726 (2017): 505–509.
- Giam, E. and Papadopoulos, A. M. Assessment tools for the environmental evaluation of concrete, plaster and brick elements production. Journal of Cleaner Production. 99 (2015): 75–85.
- Glassware chemical. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแก้ว (Glass introduction). [ออนไลน์]. 2009. แหล่งที่มา: <http://glasswarechemical.com/category/introduction-of-glass/> [10 มกราคม 2562]
- Hoening, V. and Schneider, M. VDZ Congress 2002 Process Technology of Cement Manufacturing. Germany: Dusseldorf, 2002.
- Hooi, L. S. and Min, P. J. Potential of substituting waste glass in aerated light weight concrete. Procedia Engineering. 171 (2017): 633–639.
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M. C. and Cheng, J. C. P. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. Resources, Conservation and Recycling. 109 (2016): 67–77.
- Ismail, Z. Z. and Al-Hashmi, E. A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. Waste Management. 29 (2009): 655–659.
- Islam, G. M. S., Rahman, M. H. and Kazi, N. Waste glass powder as partial replacement

- of cement for sustainable concrete practice. International Journal of Sustainable Built Environment. 6 (2017): 37–44.
- Jani, Y. and Hogland, W. Waste glass in the production of cement and concrete - A review. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2 (2014): 1767–1775.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. and Rosenbaum, R. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment. 8 (2003): 324–330.
- Khmiri, A., Chaabouni, M. and Samet, B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. Construction and Building Materials. 44 (2013): 74–80.
- Kim, I. S., Choi, S. Y. and Yang, E. I. Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate. Construction and Building Materials. 184 (2018): 269–277.
- Limbachiya, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. Construction and Building Materials. 23 (2009): 1078–1083.
- Loannidou, K., Kanduc, M., Li, L., Frenkel, D., Dobnikar, J. and Gado, E. D. The crucial effect of early-stage gelation on the mechanical properties of cement hydrates. Nature Communications. 7 (2016): 1–9.
- Magesware, M. and Vidivelli, B. The use of sheet glass power as fine aggregate replacement in concrete. The Open Civil Engineering Journal. 4 (2010): 65–71.
- Mclellan, G. and Shand, E. Glass Engineering Handbook. 3<sup>rd</sup> edition, 1984.
- Mohammadinia, A., Wong, Y. C., Arulrajah, A. and Horpibulsuk, S. Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths. Construction and Building Materials. 197 (2019): 489–496.
- Nishikant, K., Nachiket, A., Avadhut, I. and Sangar, A. Manufacturing of concrete paving block by using waste glass material. International Journal of Scientific and Research Publications. 6 (2016): 61–77.
- Rashid, K., Hameed, R., Ahmad, H. A., Razzaq, A., Ahmad, M. and Mahmood, A. Analytical framework for value added utilization of glass waste in concrete: Mechanical and environmental performance. Waste Management. 79 (2018): 312–323.

- Sargent, P. The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes. 2015.
- Schmied, M. and Knorr, W. Calculating GHG emission for freight forwarding and logistics services. Belgium: European association for forwarding, transport, logistics and customs services (CLECAT) 2012.
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. and Rodriguez, D. Studies on concrete containing ground waste glass. Cement and Concrete Research. 30 (2000): 91–100.
- Taha, B. and Nounu, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. Construction and Building Materials. 22 (2008): 713–720.
- Tan, K. H. and Du, H. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. Cement and Concrete Composites. 35 (2013): 109–117.
- Topcu, I. B. and Canbaz, M. Properties of concrete containing waste glass. Cement and Concrete Research. 34 (2004): 267–274.
- Wang, S., Peng, X., Tang, L., Cao, C. and Zeng, L. Contact-hardening behavior of calcium silicate hydrate powders. Materials. 11 (2018): 1–17.
- Ziari, H., Barakoohi, A. T. and Moniri, A. Laboratory investigation of the effect of temperature on frictional properties of concrete pavements containing crushed glass. International Journal of Pavement Research and Technology. 10 (2017): 297–303.

## ภาคผนวก ก

### วิธีการเตรียมตัวอย่าง

1. หลังจากผสมตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันเสร็จแล้ว ให้นำน้ำมันที่ผิวด้านในของแบบหล่อบาง ๆ ทั่วๆ ถ้ามีน้ำมันส่วนเกินให้เช็ดออก
2. หลังจากนั้นนำตัวอย่างเข้าแบบหล่อ โดยใช้เกรียงตักตัวอย่างใส่แบบหล่อชั้นแรกโดยมีความหนาประมาณ 25 มม. ซึ่งเป็นความหนาครึ่งหนึ่งของตัวอย่าง
3. กระทุ้งด้วยไม้กระทุ้งจำนวน 32 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่างในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบๆ ละ 8 ครั้ง แต่ละรอบการกระทุ้งจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน
4. ประมาณน้ำหนักที่ใช้กระทุ้งให้เพียงพอที่จะทำให้ตัวอย่างในแบบหล่อมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงไม่ควรกระทุ้งแรงจนเกินไป ให้ทำการกระทุ้ง 4 รอบ จำนวน 32 ครั้งให้เสร็จสิ้นในแต่ละตัวอย่าง จากนั้นจึงเริ่มกระทุ้งตัวอย่างต่อไป
5. เมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จสิ้นทุกตัวอย่างแล้ว จึงใส่ตัวอย่างชั้นที่ 2 ซึ่งมีความหนาประมาณ 25 มม. จากนั้นทำการกระทุ้งแต่ละตัวอย่างจำนวน 4 รอบ 32 ครั้ง เช่นเดียวกับกรณีของชั้นแรก (ดังนั้นแต่ละตัวอย่างจึงมีการกระทุ้ง 64 ครั้ง) ในแต่ละรอบของการกระทุ้งชั้นที่ 2 อาจมีตัวอย่างล้นออกมานอกขอบของแบบหล่อ ดังนั้นเมื่อเสร็จการกระทุ้งของแต่ละรอบ ให้ใช้นิ้วมือ (ซึ่งสวมถุงมือยาง) ดันตัวอย่างที่ล้นออกมาเข้าไปในแบบหล่อจากนั้นจึงทำการกระทุ้งในรอบต่อไป
6. เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้งแล้ว ตัวอย่างในแบบหล่อควรมีความสูงกว่าขอบแบบหล่อเล็กน้อย ให้ใช้มือดันตัวอย่างที่ล้นแบบ (เนื่องจากการกระทุ้งรอบสุดท้าย) เข้าไปอยู่ในแบบ แล้วใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบและเสมอกับขอบแบบหล่อ ซึ่งทำได้โดยใช้ขอบเกรียงวางในแนวเกือบตั้งฉากกับขอบแบบจากนั้นค่อย ๆ เลื่อนเกรียงไปตลอดความยาวของแบบหล่อ ทำให้ได้ตัวอย่างที่เรียบและสูงเสมอกับขอบแบบหล่อ
7. นำแผ่นฟิล์มยืดถนอมอาหารมาห่อแบบหล่อ เพื่อป้องกันการระเหยออกของน้ำ แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วถอดก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อ
8. หลังจากนำก้อนตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปแช่ในน้ำทันที แล้วบ่มในน้ำจนครบเวลาที่ต้องการ แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบ (มनुญศักดิ์ แก้วนาค, เกียรติศักดิ์ ภูแล่นกับ และ นันทวัช ภูกิ่งหิน, 2558)

## ภาคผนวก ข

## ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพของอิฐคอนกรีต

ตารางที่ ข.1 กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 7 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)					ค่าเฉลี่ย
	(ก้อนที่)					
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	42.34	39.70	42.32	41.65	40.73	41.35
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	39.58	39.18	43.69	43.55	39.98	41.20
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	44.74	41.78	43.63	41.04	43.26	42.89
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	34.22	33.86	32.84	34.78	33.28	33.80
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	10.58	12.04	11.86	12.96	12.66	12.02

ตารางที่ ข.2 กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 14 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)					ค่าเฉลี่ย
	(ก้อนที่)					
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	43.73	43.53	44.04	44.12	42.43	43.57
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	42.83	46.76	41.50	44.55	44.55	44.04
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	49.23	46.13	46.04	46.95	48.71	47.41
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	42.72	43.41	43.76	45.32	43.18	43.68
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	31.66	29.86	32.54	31.57	33.98	31.92

ตารางที่ ข.3 กำลังรับแรงอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 28 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)					ค่าเฉลี่ย
	(ก้อนที่)					
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	45.02	44.67	44.72	46.39	44.49	45.06
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	42.98	45.22	45.31	48.26	43.01	44.96
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	48.83	49.69	50.10	45.95	47.89	48.49
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	44.96	47.68	46.13	42.72	48.35	45.97
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	32.54	28.08	28.38	29.02	28.18	29.24

**ตารางที่ ข.4** การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 7 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	การดูดซึมน้ำ (%)					ค่าเฉลี่ย
	(ก้อนที่)					
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	6.65	6.69	6.71	6.41	6.56	6.61
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	6.67	6.75	6.79	6.69	6.81	6.74
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	6.69	7.06	7.06	6.89	6.85	6.91
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	6.41	6.74	6.74	6.58	6.50	6.59
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	8.28	7.81	7.98	7.92	8.12	8.02

**ตารางที่ ข.5** การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 14 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	การดูดซึมน้ำ (%)					ค่าเฉลี่ย
	(ก้อนที่)					
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	6.41	6.15	6.10	6.31	6.03	6.20
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	6.08	6.34	6.20	5.97	6.23	6.16
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	6.10	5.74	5.91	6.01	5.79	5.91
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	5.91	6.00	6.32	5.97	6.28	6.10
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	7.52	7.43	7.19	7.28	7.34	7.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ข.6** การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 28 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	การดูดซึมน้ำ (%)					ค่าเฉลี่ย
	(ก้อนที่)					
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	5.61	5.44	5.45	5.38	5.60	5.50
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	5.34	5.41	5.41	5.43	5.56	5.43
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	5.32	5.34	5.48	5.31	5.31	5.35
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	5.60	5.50	5.62	5.58	5.46	5.55
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	5.52	5.66	5.43	5.54	5.45	5.52



**ตารางที่ ข.7** ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 7 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) (ก้อนที่)					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	2.09	2.07	2.11	2.07	2.12	2.09
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	2.02	1.99	2.01	2.07	2.04	2.03
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	2.00	2.02	2.05	2.02	2.03	2.02
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	2.00	1.96	1.98	2.02	2.02	2.00
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	1.77	1.88	1.82	1.80	1.75	1.80

**ตารางที่ ข.8** ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 14 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) (ก้อนที่)					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	2.19	2.19	2.18	2.19	2.18	2.19
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	2.24	2.18	2.17	2.13	2.14	2.17
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	2.18	2.18	2.19	2.18	2.19	2.18
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	2.16	2.16	2.18	2.18	2.18	2.17
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	1.95	1.98	2.12	2.06	2.04	2.03

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ข.9** ความหนาแน่นของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ทรายหยาบด้วยเศษแก้ว บ่มที่ 28 วัน

ตัวอย่าง (ปูนซีเมนต์ : ทราย : เศษแก้ว : น้ำ)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) (ก้อนที่)					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
22.22 : 66.67 : 00.00 : 11.11	2.18	2.20	2.22	2.19	2.20	2.20
22.22 : 60.00 : 6.67 : 11.11	2.18	2.22	2.19	2.19	2.21	2.20
22.22 : 53.34 : 13.33 : 11.11	2.19	2.17	2.22	2.18	2.17	2.18
22.22 : 46.67 : 20.00 : 11.11	2.17	2.21	2.19	2.18	2.21	2.19
22.22 : 00.00 : 66.67 : 11.11	2.08	1.97	2.06	2.04	1.98	2.03

## ภาคผนวก ค

## วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

## รูปที่ ค.1

วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

(ก) ขวดแก้วบนเกาะสีชัง

(ข) เศษแก้วบนลานเทกอง

(ค) ขวดแก้วที่ทุบแล้ว และเศษแก้วที่ยังไม่ทำความสะอาด

(ง) ขวดแก้วที่ทุบแล้ว และเศษแก้วที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว



(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

## รูปที่ ค.2

อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

- (จ) เครื่องทดสอบ Particle size distribution
- (ฉ) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด
- (ช) เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- (ซ) ตู้อบความร้อน





(ณ)



(ญ)



(ฎ)



(ฐ)



(๓)

### รูปที่ ค.3

อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

(ณ) เครื่องบดละเอียด (Ball Mill) (ญ) เครื่องร่อนคัดขนาด

(ฎ) แบบหล่อเหล็กขนาด 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

(ฐ) ตัวอย่างหลังจากใส่ในแบบหล่อ และห่อด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก

(๓) ตัวอย่างก้อนอิฐคอนกรีตในทุกอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 10 20 30 และ 100

## ภาคผนวก ง

## ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS

## ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของกำลังรับแรงอัด

## Descriptives

ค่ากำลังรับแรงอัด

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
0	15	43.3260	1.78884	.46188	42.3354	44.3166	39.70	46.39
10	15	43.3967	2.57712	.66541	41.9695	44.8238	39.18	48.26
20	15	47.4727	5.12675	1.32372	44.6336	50.3118	41.04	62.86
30	15	41.1473	5.63722	1.45552	38.0255	44.2691	32.84	48.35
100	15	24.3940	9.23098	2.38343	19.2821	29.5059	10.58	33.98
Total	75	39.9473	9.72108	1.12249	37.7107	42.1840	10.58	62.86

## ANOVA

ค่ากำลังรับแรงอัด

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4849.352	4	1212.338	39.589	.000
Within Groups	2143.600	70	30.623		
Total	6992.952	74			

## Post Hoc Tests

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: ค่ากำลังรับแรงอัด

Tukey HSD

(I) การแทนที่	(J) การแทนที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0	10	-.07067	2.02066	1.000	-5.7288	5.5875
	20	-4.14667	2.02066	.253	-9.8048	1.5115
	30	2.17867	2.02066	.817	-3.4795	7.8368
	100	18.93200*	2.02066	.000	13.2739	24.5901
10	0	.07067	2.02066	1.000	-5.5875	5.7288
	20	-4.07600	2.02066	.269	-9.7341	1.5821
	30	2.24933	2.02066	.799	-3.4088	7.9075
20	0	4.14667	2.02066	.253	-1.5115	9.8048
	10	4.07600	2.02066	.269	-1.5821	9.7341
	30	6.32533*	2.02066	.021	.6672	11.9835
30	0	-2.17867	2.02066	.817	-7.8368	3.4795
	10	-2.24933	2.02066	.799	-7.9075	3.4088
	20	-6.32533*	2.02066	.021	-11.9835	-6.672
100	0	16.75333*	2.02066	.000	11.0952	22.4115
	10	-18.93200*	2.02066	.000	-24.5901	-13.2739
	20	-19.00267*	2.02066	.000	-24.6608	-13.3445
	30	-23.07867*	2.02066	.000	-28.7368	-17.4205
	100	-16.75333*	2.02066	.000	-22.4115	-11.0952

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

### Descriptives

ค่ากำลังรับแรงอัด

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
7	25	34.9748	13.02748	2.60550	29.5973	40.3523	10.58	62.86
14	25	42.1244	5.55695	1.11139	39.8306	44.4182	29.86	49.23
28	25	42.7428	7.20725	1.44145	39.7678	45.7178	28.08	50.10
Total	75	39.9473	9.72108	1.12249	37.7107	42.1840	10.58	62.86

### ANOVA

ค่ากำลังรับแรงอัด

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	932.009	2	466.004	5.536	.006
Within Groups	6060.944	72	84.180		
Total	6992.952	74			

### Post Hoc Tests

#### Multiple Comparisons

Dependent Variable: ค่ากำลังรับแรงอัด

Tukey HSD

(I) วันเก็บม	(J) วันเก็บม	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
7	14	-7.14960 <sup>*</sup>	2.59507	.020	-13.3599	-.9393
	28	-7.76800 <sup>*</sup>	2.59507	.010	-13.9783	-1.5577
14	7	7.14960 <sup>*</sup>	2.59507	.020	.9393	13.3599
	28	-.61840	2.59507	.969	-6.8287	5.5919
28	7	7.76800 <sup>*</sup>	2.59507	.010	1.5577	13.9783
	14	.61840	2.59507	.969	-5.5919	6.8287

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

## ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการดูดซึมน้ำ

### Descriptives

ค่าการดูดซึมน้ำ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
0	15	6.1000	.48877	.12620	5.8293	6.3707	5.38	6.71
10	15	6.1120	.56351	.14550	5.7999	6.4241	5.34	6.81
20	15	6.0573	.67819	.17511	5.6818	6.4329	5.31	7.06
30	15	6.0807	.46015	.11881	5.8258	6.3355	5.46	6.74
100	15	6.9647	1.10219	.28458	6.3543	7.5750	5.43	8.28
Total	75	6.2629	.76635	.08849	6.0866	6.4393	5.31	8.28

### ANOVA

ค่าการดูดซึมน้ำ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9.259	4	2.315	4.738	.002
Within Groups	34.201	70	.489		
Total	43.460	74			

## Post Hoc Tests

### Multiple Comparisons

Dependent Variable: ค่าการดูดซึมน้ำ

Tukey HSD

(I) การแทนที่	(J) การแทนที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0	10	-.01200	.25523	1.000	-.7267	.7027
	20	.04267	.25523	1.000	-.6720	.7574
	30	.01933	.25523	1.000	-.6954	.7340
	100	-.86467 <sup>*</sup>	.25523	.010	-1.5794	-.1500
10	0	.01200	.25523	1.000	-.7027	.7267
	20	.05467	.25523	1.000	-.6600	.7694
	30	.03133	.25523	1.000	-.6834	.7460
	100	-.85267 <sup>*</sup>	.25523	.011	-1.5674	-.1380
20	0	-.04267	.25523	1.000	-.7574	.6720
	10	-.05467	.25523	1.000	-.7694	.6600
	30	-.02333	.25523	1.000	-.7380	.6914
	100	-.90733 <sup>*</sup>	.25523	.006	-1.6220	-.1926
30	0	-.01933	.25523	1.000	-.7340	.6954
	10	-.03133	.25523	1.000	-.7460	.6834
	20	.02333	.25523	1.000	-.6914	.7380
	100	-.88400 <sup>*</sup>	.25523	.008	-1.5987	-.1693
100	0	.86467 <sup>*</sup>	.25523	.010	.1500	1.5794
	10	.85267 <sup>*</sup>	.25523	.011	.1380	1.5674
	20	.90733 <sup>*</sup>	.25523	.006	.1926	1.6220
	30	.88400 <sup>*</sup>	.25523	.008	.1693	1.5987

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

## Oneway

### Descriptives

ค่าการดูดซึมน้ำ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
7	25	6.9744	.56195	.11239	6.7424	7.2064	6.41	8.28
14	25	6.3444	.54288	.10858	6.1203	6.5685	5.74	7.52
28	25	5.4700	.10575	.02115	5.4263	5.5137	5.31	5.66
Total	75	6.2629	.76635	.08849	6.0866	6.4393	5.31	8.28

### ANOVA

ค่าการดูดซึมน้ำ

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	28.539	2	14.270	68.858	.000
Within Groups	14.921	72	.207		
Total	43.460	74			

## Post Hoc Tests

### Multiple Comparisons

Dependent Variable: ค่าการดูดซึมน้ำ

Tukey HSD

(I) วัชพืชม	(J) วัชพืชม	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
7	14	.63000 <sup>*</sup>	.12876	.000	.3219	.9381
	28	1.50440 <sup>*</sup>	.12876	.000	1.1963	1.8125
14	7	-.63000 <sup>*</sup>	.12876	.000	-.9381	-.3219
	28	.87440 <sup>*</sup>	.12876	.000	.5663	1.1825
28	7	-1.50440 <sup>*</sup>	.12876	.000	-1.8125	-1.1963
	14	-.87440 <sup>*</sup>	.12876	.000	-1.1825	-.5663

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



## ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่น

## Descriptives

ค่าความหนาแน่น

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
0	15	2.1587	.05125	.01323	2.1303	2.1870	2.07	2.22
10	15	2.1320	.08377	.02163	2.0856	2.1784	1.99	2.24
20	15	2.1313	.07999	.02065	2.0870	2.1756	2.00	2.22
30	15	2.1200	.09289	.02398	2.0686	2.1714	1.96	2.21
100	15	1.9533	.12099	.03124	1.8863	2.0203	1.75	2.12
Total	75	2.0991	.11394	.01316	2.0729	2.1253	1.75	2.24

## ANOVA

ค่าความหนาแน่น

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.410	4	.103	13.048	.000
Within Groups	.550	70	.008		
Total	.961	74			

## Post Hoc Tests

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: ค่าความหนาแน่น

Tukey HSD

(I) การแทนที่	(J) การแทนที่	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0	10	.02667	.03238	.922	-.0640	.1173
	20	.02733	.03238	.916	-.0633	.1180
	30	.03867	.03238	.755	-.0520	.1293
	100	.20533*	.03238	.000	.1147	.2960
10	0	-.02667	.03238	.922	-.1173	.0640
	20	.00067	.03238	1.000	-.0900	.0913
	30	.01200	.03238	.996	-.0787	.1027
	100	.17867*	.03238	.000	.0880	.2693
20	0	-.02733	.03238	.916	-.1180	.0633
	10	-.00067	.03238	1.000	-.0913	.0900
	30	.01133	.03238	.997	-.0793	.1020
	100	.17800*	.03238	.000	.0873	.2687
30	0	-.03867	.03238	.755	-.1293	.0520
	10	-.01200	.03238	.996	-.1027	.0787
	20	-.01133	.03238	.997	-.1020	.0793
	100	.16667*	.03238	.000	.0760	.2573
100	0	-.20533*	.03238	.000	-.2960	-.1147
	10	-.17867*	.03238	.000	-.2693	-.0880
	20	-.17800*	.03238	.000	-.2687	-.0873
	30	-.16667*	.03238	.000	-.2573	-.0760

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

## Oneway

### Descriptives

ค่าความหนาแน่น

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
7	25	1.9884	.10355	.02071	1.9457	2.0311	1.75	2.12
14	25	2.1488	.06930	.01386	2.1202	2.1774	1.95	2.24
28	25	2.1600	.07280	.01456	2.1299	2.1901	1.97	2.22
Total	75	2.0991	.11394	.01316	2.0729	2.1253	1.75	2.24

### ANOVA

ค่าความหนาแน่น

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.461	2	.230	33.193	.000
Within Groups	.500	72	.007		
Total	.961	74			

## Post Hoc Tests

### Multiple Comparisons

Dependent Variable: ค่าความหนาแน่น

Tukey HSD

(I) วันที่ย้อม	(J) วันที่ย้อม	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
7	14	-.16040*	.02357	.000	-.2168	-.1040
	28	-.17160*	.02357	.000	-.2280	-.1152
14	7	.16040*	.02357	.000	.1040	.2168
	28	-.01120	.02357	.883	-.0676	.0452
28	7	.17160*	.02357	.000	.1152	.2280
	14	.01120	.02357	.883	-.0452	.0676

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

## ภาคผนวก จ

### วิธีการคำนวณข้อมูล

#### การคำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า

โดยวิธีการคำนวณหาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละขั้นตอนของการผลิตอิฐคอนกรีตสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 ดังนี้

$$ก \times ข \times \frac{1 \text{ ชั่วโมง}}{60 \text{ นาที}} \quad (1)$$

เมื่อ ก คือ ปริมาณการใช้ของพลังงานไฟฟ้า หน่วย กิโลวัตต์ (kW)

ข คือ จำนวนเวลาการใช้งาน หน่วย นาที (min)

หลังจากคำนวณตามสมการที่ 1 แล้ว จะได้ค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละกระบวนการผลิต โดยมีหน่วยเป็น กิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) แล้วนำเข้าสู่โปรแกรมต่อไป (บริษัท โซล่าฮับ จำกัด, 2559)

#### การคำนวณหาปริมาณการขนส่ง

โดยวิธีการคำนวณหาปริมาณการขนส่ง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 ดังนี้

$$จ \times ง \times \frac{1 \text{ ตัน}}{1000 \text{ กิโลกรัม}} \quad (2)$$

เมื่อ ค คือ น้ำหนักของวัตถุดิบ หน่วย กิโลกรัม

ง คือ ระยะทางที่ใช้ในการขนส่ง หน่วยกิโลเมตร

หลังจากคำนวณตามสมการที่ 2 แล้ว จะได้ค่าปริมาณการขนส่งจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง โดยมีหน่วยเป็น ตันกิโลเมตร (tkm) แล้วนำเข้าสู่โปรแกรมต่อไป (Schmied และ Knorr, 2012)

## ภาคผนวก ฉ

## ข้อมูลบัญชีรายการ (LCI)

ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลบัญชีรายการของการได้มาของวัตถุดิบ (ต่อการผลิต 50 ก้อน)

<u>Raw material</u>	Unit	Concrete brick with waste glass	Concrete brick without waste glass
Calcite, in ground	kg	34.04	34.04
Clay, unspecified, in ground	kg	11.93	11.93
Coal, brown, in ground	g	289.12	300.99
Coal, hard, in ground	kg	2.88	3.08
Energy, kinetic (in wind), converted	kJ	236.50	246.32
Gas, natural/m <sup>3</sup> , in ground	l	368.22	376.86
Gravel, in ground	kg	76.03	97.66
Kaolinite, in ground	mg	44.48	41.12
Oil, crude, in ground	kg	1.24	1.30
Water, turbine use, unspecified natural origin	kg	17.64	17.96
<u>Emission to air</u>			
Ammonia	mg	832.74	837.85
Carbon dioxide, fossil	kg	23.36	23.48
Carbon monoxide, fossil	g	16.20	16.68
Formaldehyde	mg	17.15	21.47
Heat, waste	MJ	4.05	4.05
Methane, fossil	g	1.00	1.02
Nitrogen oxides	g	36.44	37.38
Particulates, < 2.5 um	mg	476.87	547.57
Particulates, > 10 um	mg	379.11	455.46
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	mg	184.90	221.00
Sulfur dioxide	g	12.05	12.09
<u>Emission to water</u>			
BOD5, Biological Oxygen Demand	mg	40.68	41.75
Calcium	mg	690.38	703.56
Chloride	g	7.78	7.93
COD, Chemical Oxygen Demand	mg	68.36	70.42
DOC, Dissolved Organic Carbon	mg	24.08	24.68

ตารางที่ ๑.1 (ต่อ)

	Unit	Concrete brick with waste glass	Concrete brick without waste glass
Iron	mg	12.99	13.25
Magnesium	mg	134.69	137.26
Silicon	mg	46.04	48.92
Sodium	g	2.19	2.23
Sulfate	mg	21.29	21.80
TOC, Total Organic Carbon	mg	24.60	25.23
<u>Emission to soil</u>			
Chromium VI	ng	7.68	8.13
Oils, unspecified	mg	7.08	7.53
Organic carbon	ng	826.61	880.39
Silicon	mg	0.97	1.16
Sulfate	mg	1.35	1.61
Zinc	mg	4.09	4.92

ตารางที่ ๑.2 ข้อมูลบัญชีรายการของการขนส่ง (ต่อการผลิต 50 ก้อน)

<u>Raw material</u>	Unit	Concrete brick with waste glass	Concrete brick without waste glass
Aluminium, in ground	mg	5.00	5.25
Calcite, in ground	g	9.93	10.40
Clay, unspecified, in ground	g	2.87	3.00
Coal, brown, in ground	g	7.59	7.95
Coal, hard, in ground	g	19.98	20.95
Energy, gross calorific value, in biomass	kJ	51.51	53.96
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	kJ	52.42	54.94
Gravel, in ground	g	56.51	59.16
Oil, crude, in ground	g	491.76	515.96
Water, turbine use, unspecified natural origin	kg	0.20	0.21

ตารางที่ ๑.2 (ต่อ)

	Unit	Concrete brick with waste glass	Concrete brick without waste glass
<u>Emission to air</u>			
Calcium	mg	2.93	3.07
Carbon dioxide, fossil	kg	1.25	1.31
Carbon monoxide, fossil	g	2.15	2.25
Methane, fossil	mg	22.03	23.07
Nitrogen oxides	g	9.98	10.46
Particulates, < 2.5 um	mg	524.38	548.99
Particulates, > 10 um	mg	850.38	890.30
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	mg	414.16	433.60
Sulfur dioxide	mg	47.38	49.63
<u>Emission to water</u>			
BOD5, Biological Oxygen Demand	mg	3.09	3.24
Calcium	mg	9.44	9.90
Chloride	mg	106.50	111.59
COD, Chemical Oxygen Demand	mg	8.31	8.70
DOC, Dissolved Organic Carbon	mg	1.64	1.72
Sodium	mg	29.93	31.36
Suspended solids, unspecified	mg	135.47	141.95
TOC, Total Organic Carbon	mg	1.62	1.73
<u>Emission to soil</u>			
Calcium	mg	1.60	1.68
Carbon	ng	25.43	26.63
Chloride	ng	50.97	53.43
Iron	mg	5.56	5.82
Oils, unspecified	mg	4.16	4.36
Silicon	mg	3.24	3.39
Sodium	mg	1.16	1.21

**ตารางที่ ๑.3** ข้อมูลบัญชีรายการของการผลิต (ต่อการผลิต 50 ก้อน)

<u>Raw material</u>	Unit	Concrete brick with waste glass	Concrete brick without waste glass
Energy, gross calorific value, in biomass	kJ	41.04	0.98
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	kJ	13.65	0.32
Kaolinite	mg	1.46	0.04
Oil, crude, in ground	mg	715.22	16.73
<u>Emission to air</u>			
Carbon dioxide, fossil	mg	758.13	17.94
Carbon monoxide, fossil	mg	1.28	0.03
Nitrogen oxides	mg	1.57	0.03
Sulfur dioxide	mg	1.19	0.03
<u>Emission to water</u>			
Chloride	mg	3.43	0.05
Organic compounds (unspecified)	g	65.00	0.00
<u>Emission to soil</u>			
Calcium	ng	49.21	1.11
Carbon	ng	9.62	0.23
Organic carbon	ng	22.76	0.54
Potassium	ng	15.47	0.35
Sulfate	ng	138.27	3.12

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	หทัยชนก วันเพ็ญ
วัน เดือน ปี เกิด	24 ธันวาคม 2535
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลชลประทาน จังหวัดนนทบุรี
วุฒิการศึกษา	ปี 2559 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 25558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจาก คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ สาขาพันธุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	53/703 หมู่3 ถนนติวานนท์ ตำบลบ้านใหม่ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120
ผลงานตีพิมพ์	การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 วันที่ 15 มีนาคม 2561 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เรื่อง การประเมินวัฏจักรชีวิตของอิฐคอนกรีตที่ใช้เศษแก้วแทนที่มวลรวม เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการจัดการเศษแก้วบนเกาะสีซัง จังหวัดชลบุรี (Life Cycle Assessment of Concrete Bricks using Waste Glass as Aggregate Replacement for an Alternative Management of Waste Glass on Koh Sichang, Chonburi Province)