



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การใช้ประโยชน์และการประเมินวัฏจักรชีวิตของปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากกากอุตสาหกรรม

Utilization and Life Cycle Assessment of Cement Produced from Industrial Wastes

นามผู้วิจัย นายเกียรติคุณ ทองแดง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มณฑล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

(รองศาสตราจารย์ศุภกิจ นนทนานันท์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา.....

(รองศาสตราจารย์ชาติ เจริญไชยศรี, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้ประโยชน์และการประเมินวัฏจักรชีวิตของปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากกากอุตสาหกรรม

Utilization and Life Cycle Assessment of Cement Produced from Industrial Wastes

โดย

นายเกียรติคุณ ทองแดง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เกียรติคุณ ทองแดง 2554: การใช้ประโยชน์และการประเมินวัฏจักรชีวิตของปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากกาก
อุตสาหกรรม ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
มณฑล ฐานุตตมวงศ์, Ph.D. 124 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางในการจัดการกากอุตสาหกรรมโดยเสนอทางเลือกในการนำ
กากอุตสาหกรรมบางประเภทมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยการคัดเลือกที่มีศักยภาพตามเกณฑ์
“NICE Criteria” จากการศึกษาพบว่า ตะกอนประป้า ฟูนผงหินปูน เปลือกหอยแครง และปูนขาว ที่อัตราส่วน 25 :
50 : 5 : 20 สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการเผาเพื่อผลิตสารเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่มีความสามารถในการ
แข็งตัวได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จากการวิเคราะห์โดยวิธี X-ray Diffraction (XRD) พบว่าปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมสี่เท่า
มีสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S เช่นเดียวกับที่ตรวจพบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติ
ด้านการรับกำลังอัดของมอร์ต้าพบว่ามีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม สามารถประยุกต์ใช้ผลิต
คอนกรีตพูนโดยใช้ร่วมกับเถ้าลอยลิกไนต์ที่สัดส่วนผสม 10 - 30% โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่ามอร์ต้า
คอนกรีตพูนมีอัตราส่วนโพรงและความชื้นน้ำดี มีการพัฒนากำลังตามอายุการบ่ม ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮ
เดรชันของ C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic
Reaction) จากเถ้าลอยลิกไนต์เกิดเป็น Calcium Silicate Hydrate (CSH)

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตปูนเม็ดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้าน
ภาวะโลกร้อน (Global Warming) ที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โปรแกรม SimaPro 7.1 วิธี
Superseded (IPCC 2001 GWP 100a Version 1.04) และวิธีการประเมินแบบ Gate to Gate พบว่าในกระบวนการ
ผลิตปูนเม็ดปริมาณ 1 กิโลกรัม มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนมากที่สุดเท่ากับ 0.538 kg CO₂ eq. รองลงมาคือ การ
ใช้พลังงานไฟฟ้า การได้มาของปูนขาว และการขนส่งด้วยรถบรรทุกน้ำหนักบรรทุก 16 ตัน มีผลกระทบต่อภาวะ
โลกร้อนเท่ากับ 0.397, 0.255 และ 0.0386 kg CO₂ eq. ตามลำดับ โดยมีผลรวมของผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน
เท่ากับ 1.120 kg CO₂ eq. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษากการผลิตปูนเม็ดที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมจาก
งานวิจัยในลักษณะเดียวกัน

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kiattikun ThongDaeng 2011: Utilization and Life Cycle Assessment of Cement Produced from Industrial Wastes. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Monthon Thanuttamavong, Ph.D. 124 pages.

This research aims to propose an alternative approach on industrial waste management using combinations of certain types of industrial waste to reuse as construction materials. By selection of potential wastes in accordance with the “NICE Criteria” for a process of clinkerization, new cementing materials can be produced. It is found that a combination of wastes namely water supply sludge, waste limestone powder, ark shell and lime with a proportion of 25 : 50 : 5 : 20 is an appropriate proportion which produces cementing materials having self hardening properties and environmental friendly.

Based on the XRD analysis on a gray cementing material (GCM), compounds of C_3S and C_2S are found similar to those exist in an Ordinary Portland Cement. Experimental results show that strengths of GCM mortar markedly increase with initial curing time. In addition, the porous concretes can be produced using GCM with lignite fly ash with 10 - 30% by dry weight. The porous concrete mortars can obtain sufficient void ratio and permeability and increased strength with curing time. It was believed that hydration of the major compounds such as Calcium Silicate (C_3S and C_2S) and the pozzolanic reaction due to a presence of lignite fly ash produced Calcium Silicate Hydrate (CSH) which contributes to strength development of concrete mortars.

Evaluation on a Life Cycle Analysis on GCM clinkerization in laboratory concerning global warming due to emission of carbon dioxide as a potential impact is performed using SimaPro 7.1 with Superseded (IPCC 2001 GWP 100a Version 1.04) and Gate to Gate as evaluation methods. It is found that a highest impact on global warming of 0.538 kg CO_2 eq. is significantly attributed to a process of clinkerization for 1 kilogram. Subsequently, energy use, induced lime and transportation also contribute to global warming with impacts of 0.397, 0.255 and 0.0386 kg CO_2 eq. respectively. In addition, a total environmental impact due to global warming of 1.120 kg CO_2 eq. obtained in this study conforms to result obtained by a similar research.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑล ฐานุตตมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ นนทนานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยด้วยความเมตตา เอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงและสมบูรณ์ด้วยดี ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ ประธานกรรมการดำเนินการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ

ขอขอบพระคุณ ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ และดร.ถนัดกิจ ชารีรัตน์ ในการให้คำแนะนำทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมหมาย ผิวสะอาด คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ ดร.สรพงษ์ ภาสุปรีย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง SEM และ XRD ตลอดจนอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ ในการอนุเคราะห์ให้ใช้โปรแกรม SimaPro Version 7.1

ขอขอบคุณนายณพล อยู่บรรพต และนายกฤตย์ คมขำ ที่ได้ร่วมทำงานวิจัยด้วยกันจนบรรลุตามวัตถุประสงค์ ขอขอบคุณ คุณพวยร เสนทองแก้ว คุณสาคร จันทร์ขอนแก่น นายยุทธนา บุญสินชัย นายธนกร วิรุฬห์มงคล นายภานุพงศ์ ศรีนาคเอี้ยง นายภูริทัต ใจหลัก นายปิยะพงษ์ รักช่วย ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องและการทดสอบต่างๆ และขอขอบคุณ นายสุรศักดิ์ วิทย์ศลาพงษ์ และ นายวัชระ สุระวงศ์ ในคำแนะนำการโปรแกรม SimaPro ขอขอบคุณ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณวรการ พงษ์ศิริกุล คุณนิสิต ยัวร์ตัน และคุณทวีศักดิ์ เข้มมณี ในการให้ความอนุเคราะห์การวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของปูนซีเมนต์และบดตัวอย่างปูนเม็ด

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่จัดสรรทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2553 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินงานบรรลุตามวัตถุประสงค์ บุญกุศลงานวิจัยนี้ขออุทิศแด่อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และประสบการณ์อันดีงาม ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเพียร - คุณแม่คำเพียร ทองแดง ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม สั่งสอนและเมตตาเสมอมา และขอขอบพระคุณญาติพี่น้องทุกคนที่คอยช่วยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

เกียรติคุณ ทองแดง

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	23
ผลการทดลองและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
สรุป	94
ข้อเสนอแนะ	96
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	98
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก จำนวนตัวอย่างที่ทดสอบในงานวิจัยจำแนกตามการทดสอบและ ข้อมูลกำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปทรงกระบอกและมอร์ต้ารูปลูกบาศก์	104
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดสอบ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC ที่ผสมเส้นใยลิกไนต์ ที่สัดส่วนต่างๆ	110
ภาคผนวก ค สรุปขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (LCA) ของปูนเม็ด (Clinker) จากกากอุตสาหกรรม	116
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	124

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างของเสียที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน	7
2	สารประกอบและคุณสมบัติที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ	11
3	คุณสมบัติของ Eco-Cement เปรียบเทียบกับ Ordinary Portland Cement	17
4	แผนและระยะเวลาการดำเนินการวิจัย	42
5	ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของวัตถุดิบหลักตั้งต้นวิธี Atomic Absorbtion	43
6	องค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ	44
7	ตารางแสดงการวิเคราะห์กำหนดค่าไฮดรเจน โมดูลัส	44
8	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ต้า BCM 100% และ BCM:OPC (80:20)	47
9	ปริมาณสารประกอบก่อนและหลังปฏิกิริยาไฮดรเจนของ OPC และ BCM	49
10	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ OPC และ GCM โดย XRF	54
11	สารประกอบหลัก C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ในสารเชื่อมประสานต่างๆ	54
12	ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของปูนซีเมนต์ BCM และ GCM	56
13	อัตราส่วนผสมต่างๆ ของคอนกรีตพูนที่อัตราส่วนโพรง 30%	60
14	คุณสมบัติทางด้านกายภาพและวิศวกรรมของคอนกรีตพูน	60
15	สัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ GCM และ OPC กับเถ้าลอยลิกไนต์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมประสานผลิตคอนกรีตพูน	64
16	อัตราส่วนโพรงและค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของคอนกรีตพูน MIX-4 ถึง MIX -10	65
17	กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าของคอนกรีตพูน MIX-4 ถึง MIX-10	70
18	แสดงปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ของซีเมนต์พอสต์ปูน OPC และ GCM	77
19	แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ $Ca(OH)_2$ ของซีเมนต์พอสต์ปูน OPC และ GCM	78
20	ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ซีเมนต์พอสต์ ของ OPC และ GCM	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	ค่าพลังงานที่ใช้ในการเผาเพื่อผลิตปูนเม็ดในห้องปฏิบัติการ	90
22	การคำนวณระยะทางและน้ำหนักวัสดุหลักตั้งต้นในการเผา	91
23	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านภาวะโลกร้อนของปูนเม็ด GCM	92
ตารางผนวกที่		
ก1	กำลังรับแรงอัดตัวอย่างคอนกรีตพูน	108
ก2	กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าทรงกระบอก MIX-1, MIX-4, MIX-8 และ MIX-10	109
ก3	กำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปลูกบาศก์ MIX-1, MIX-4, MIX-8 และ MIX-10	109

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	หลักการและวิธีการใช้ประโยชน์ใหม่ของกากของเสีย	8
2	การใช้ประโยชน์ของคอนกรีตพูนโดยแบ่งตามขนาดมวลรวมหยาบ	13
3	ลักษณะซีเมนต์เพสต์ในงานคอนกรีตพูนเคลือบผิวมวลรวม	14
4	การหาอัตราส่วนโพรงของแท่งคอนกรีตพูน	15
5	การทดสอบหาค่าความชื้นน้ำ	15
6	ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์	19
7	ลำดับขั้นตอนการวิจัย	23
8	ตัวอย่างตะกอนประปาบางเขน	25
9	ตัวอย่างฝุ่นผงหินปูน	25
10	ตัวอย่างเปลือกหอยแครง	25
11	ตัวอย่างถ้ำลอยลิกไนต์	26
12	ถ้วยครุฑีบีลสำหรับเผา	26
13	เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง	26
14	รูปแบบการเผาที่อุณหภูมิและช่วงเวลาต่างๆ	27
15	ครก Agate สำหรับบดปูนเม็ดจากกากอุตสาหกรรม	28
16	เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill)	29
17	ตลับเหล็กสำหรับใส่ตัวอย่างบดละเอียดตัวอย่าง	29
18	เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill)	30
19	เครื่อง Blaine Air Permeability หาค่าความละเอียดปูนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรม	30
20	เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)	31
21	อุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD)	31
22	เครื่อง X-ray Diffractometer (Philips รุ่น X'Pert) วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	32
23	ช่องใส่ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)	32
24	อุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM)	33
25	เครื่องเคลือบตัวอย่าง JEOL Coater รุ่น JFC-1600 สำหรับการวิเคราะห์ SEM	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL รุ่น JSM-6510 ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	34
27	ช่องใส่ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (SEM)	34
28	เครื่อง Horbart ผสมเพสต์และมวลรวมหยาบสำหรับผลิตคอนกรีตพูน	36
29	เพสต์กับมวลรวมหยาบที่ผสมเสร็จแล้ว	36
30	แบบทองเหลืองสำหรับหล่อแบบมอร์ต้าคอนกรีตพูน	36
31	เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	37
32	เครื่องชั่งสำหรับหาอัตราส่วนโพรงรวม	37
33	การวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ	37
34	ขอบเขตของระบบที่ศึกษาแบบ Gate to Gate	39
35	เครื่องวัดวัตต์มิเตอร์ (Wattmeter)	41
36	รูปแบบการเผาที่อุณหภูมิและช่วงเวลาต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุด	45
37	วัตถุดิบหลักตั้งต้นก่อนเผา (น้ำหนัก 100 กรัม)	46
38	ปูนเม็ดสีเทาดำและผงวัสดุสีน้ำตาลอ่อนหลังการเผา	46
39	ผลทดสอบคุณสมบัติการแข็งตัวได้เบื้องต้น (เพสต์ที่อายุการบ่ม 3 วัน แช่น้ำ)	47
40	กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน	47
41	ตัวอย่างมอร์ต้าภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด	48
42	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ OPC (anhydrous)	50
43	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ BCM (anhydrous)	50
44	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 3 วัน	51
45	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ BCM ที่อายุการบ่ม 3 วัน	51
46	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่ม 28 วัน	52
47	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่ม 90 วัน	52
48	ผงปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมสีเทาดำ (GCM)	53
49	ซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ GCM	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	ผลการวิเคราะห์ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC และปูนซีเมนต์ GCM	55
51	กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า GCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน	57
52	กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารูปทรงกระบอกของ OPC ที่ผสมเถ้าลอย	57
53	กำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปทรงกระบอกกับปริมาณเถ้าลอย	58
54	กำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปลูกบาศก์ของ OPC ที่ผสมเถ้าลอย	58
55	กำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปลูกบาศก์กับปริมาณเถ้าลอย	59
56	ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปลูกบาศก์กับรูปทรงกระบอก	59
57	ตัวอย่างคอนกรีตพูนก่อนการทดสอบ	60
58	อัตราส่วนโพรงรวมของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3	62
59	อัตราส่วนโพรงต่อเนื่องของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3	62
60	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3	62
61	กำลังรับแรงอัดของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3 ที่อายุการบ่มต่างๆ	63
62	ลักษณะของตัวอย่างคอนกรีตพูนภายหลังการพืบัติ	63
63	อัตราส่วนโพรงรวมของ MIX-4 ถึง MIX-10	66
64	อัตราส่วนโพรงต่อเนื่องของ MIX-4 ถึง MIX-10	66
65	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของ MIX-4 ถึง MIX-10	67
66	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำและอัตราส่วนโพรง	67
67	คอนกรีตพูน MIX-4 (OPC90 : FA10)	68
68	คอนกรีตพูน MIX-5 (OPC80 : FA20)	68
69	คอนกรีตพูน MIX-6 (GCM90 : FA10)	69
70	คอนกรีตพูน MIX-7 (GCM80 : FA20)	69
71	คอนกรีตพูน MIX-8 (OPC70 : FA30)	69
72	คอนกรีตพูน MIX-9 (OPC60 : FA40)	70
73	คอนกรีตพูน MIX-10 (OPC50 : FA50)	70
74	กำลังรับแรงอัดของ MIX-4 ถึง MIX-10 ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
75	กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน OPC ที่ปริมาณเถ้าลอย 10% - 50%	72
76	รอยแตกของตัวอย่างคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 7 วัน	73
77	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ GCM ที่อายุการบ่ม 28 วัน	76
78	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ GCM80:FA20 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (MIX-7)	76
79	กราฟ XRD ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน	77
80	กราฟ XRD ของซีเมนต์เพสต์ GCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน	78
81	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยเมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ	82
82	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ MIX-4 (OPC90 : FA10) ที่อายุการบ่มต่างๆ	83
83	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ MIX-8 (OPC70 : FA30) ที่อายุการบ่มต่างๆ	84
84	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ MIX-10 (OPC50 : FA50) ที่อายุการบ่มต่างๆ	85
85	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ BCM, GCM และ OPC ที่อายุการบ่ม 3 วัน	86
86	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ GCM ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน	87
87	ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน	88
88	สารขาเข้าและสารขาออกในการผลิตปูนซีเมนต์ GCM	89
89	กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาอุณหภูมิสูงในช่วงระยะเวลา 5.85 ชั่วโมง	90
90	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อนในกระบวนการผลิตปูนเม็ด GCM 1 กิโลกรัม ประเมินด้วยวิธี Superseded (IPCC 2001 GWP 100a Version 1.04)	93
ภาพผนวกที่		
ข1	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC90:FA10 ที่อายุการบ่ม 7 วัน (MIX-4)	111
ข2	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC70:FA30 ที่อายุการบ่ม 7 วัน (MIX-8)	111
ข3	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC50:FA50 ที่อายุการบ่ม 7 วัน (MIX-10)	112
ข4	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC90:FA10 ที่อายุการบ่ม 14 วัน (MIX-4)	112
ข5	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC70:FA30 ที่อายุการบ่ม 14 วัน (MIX-8)	113

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข6	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC50:FA50 ที่อายุการบ่ม 14 วัน (MIX-10)	113
ข7	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC90:FA10 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (MIX-4)	114
ข8	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC70:FA30 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (MIX-8)	114
ข9	กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC50:FA50 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (MIX-10)	115
ค1	แสดงขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม	117
ค2	แสดงไอคอนของโปรแกรม SimaPro 7.1	117
ค3	หน้าจอเข้าใช้งาน โปรแกรม SimaPro 7.1	118
ค4	แสดงค่าที่กรอกในฐานข้อมูล Input/Output	118
ค5	แสดงค่าที่กรอกในฐานข้อมูล Emission to air	119
ค6	หน้าจอเพื่อทำการ analyze การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	120
ค7	หน้าจอแสดงโดย Double click เลือก Method	120
ค8	หน้าจอเลือก Method ที่ต้องการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	121
ค9	หน้าจอเลือก calculate เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	121
ค10	กราฟแท่งแสดงผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของปูน GCM (Emission to air)	122
ค11	แสดงตารางผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของปูน GCM (Emission to air)	122
ค12	flow diagram แสดงผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของปูน GCM (Emission to air)	123

การใช้ประโยชน์และการประเมินวัฏจักรชีวิตของปูนซีเมนต์ ที่ผลิตจากกากอุตสาหกรรม

Utilization and Life Cycle Assessment of Cement Produced from Industrial Wastes

คำนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญประการหนึ่งคือ การจัดการขยะ การเพิ่มขึ้นของขยะเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากร การขยายขนาดของเมือง และการพัฒนาอุตสาหกรรม ซึ่งสภาพเศรษฐกิจยิ่งเจริญเติบโตขึ้นมากเท่าไรปัญหาขยะก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะกากอุตสาหกรรมที่เกิดมากขึ้นเนื่องจากประเทศไทยได้พัฒนาเป็นประเทศอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งปัญหาที่ตามมาขึ้นเกิดจากการขาดประสิทธิภาพในการกำจัดที่ถูกต้อง และกากอุตสาหกรรมไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ใหม่เท่าที่ควร

แนวทางการบริหารจัดการกากอุตสาหกรรมรูปแบบใหม่เน้นการนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Resource conservation and recovery) ซึ่งเป็นหลักการที่ยอมรับกันในทุกๆ ประเทศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2549) การจัดการขยะแบบผสมผสาน (Integrated solid waste management) เป็นแนวทางใหม่ในการจัดการกากอุตสาหกรรมในประเทศไทยที่มุ่งเน้นหลักการ 3Rs (Reduce Reuse and Recycle) โดยเป็นการจัดการขยะที่แหล่งกำเนิด เพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยก และใช้ประโยชน์จากขยะหรือของเสียที่เกิดขึ้นก่อนที่จะนำไปกำจัดขั้นสุดท้าย (Sanitary landfill) ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาการจัดการขยะในระยะยาวได้ โดยมีเป้าหมายสูงสุดคือให้เกิดการลดของเสีย (Waste reduction) ให้มากที่สุด หลักการดังกล่าวเป็นการแก้ปัญหาการจัดการขยะในระยะยาวและช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี (กรมควบคุมมลพิษ, 2549)

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงอย่างชัดเจนว่ากากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆเช่น ตะกอนสลัดจ์ ถ้ำลอย และตะกอนจากระบวนการผลิตน้ำประปา มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง (ปิติฤกษ์, 2547) การนำกากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์อย่างมีศักยภาพสามารถดำเนินการได้โดย

การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุดิบเพื่อยืนยันว่ามีคุณสมบัติสอดคล้องกับ “NICE Criteria” (Nontananandh, 1991)

สำหรับงานวิจัยนี้เสนอแนวทางการจัดการกากอุตสาหกรรมแบบผสมผสาน (Integrated solid waste management) โดยใช้กากอุตสาหกรรมหลายๆประเภท (Combination of Wastes) โดยผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติความเชื่อมประสานจากกากอุตสาหกรรมบางประเภท (ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม) ที่มีคุณสมบัติเหมือนหรือใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา และทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นเช่น การแข็งตัวได้ กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่อายุการบ่มต่างๆ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบหลักตั้งต้น และวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ใช้ในการอธิบายกลไกการพัฒนากำลัง แนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมใช้หลักการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงเชิงเดี่ยว (Single Waste Utilization) โดยการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในลักษณะเป็นสารทดแทนปูนซีเมนต์ (Cement Replacement Material)

นอกจากนี้งานวิจัยยังศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง เช่น ผลิตคอนกรีตพูน (Eco-Concrete) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment; LCA) ของปูนเม็ดที่ผลิตจากกากอุตสาหกรรมโดยใช้โปรแกรม SimaPro 7.1 เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น โดยเน้นในด้านการเกิดสภาวะโลกร้อน (Global Warming)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาในงานวิจัยนี้มีหลายประการ เช่น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารเชื่อมประสานที่เหมือนหรือเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ การนำกากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิตปูนเม็ดเป็นการเสนอทางเลือกในการจัดการกับขยะเพื่อลดปัญหามลภาวะสิ่งแวดล้อมและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปริมาณกากอุตสาหกรรมที่นับวันจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ทำให้ประเทศต้องเสียงบประมาณในการกำจัดหรือทำลายเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำกากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ใหม่ นอกจากจะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะและช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนพื้นที่ฝังกลบขยะแล้ว ยังเป็นการสร้างแหล่งวัตถุดิบใหม่โดยการเปลี่ยนขยะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า ซึ่งในอนาคตหากมีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องจะสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้

1. ศึกษาแนวทางในการจัดการกากอุตสาหกรรมบางประเภทเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการพัฒนาปูนซีเมนต์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Eco-Cementing Materials)
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากปูนซีเมนต์สังเคราะห์เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างเน้นการใช้งานในด้านสิ่งแวดล้อม
3. ประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) ของปูนเม็ด (Clinker) ที่ผลิตจากกากอุตสาหกรรมบางประเภทเพื่อยืนยันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเบื้องต้น

ขอบเขตการศึกษา

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1. ศึกษาแนวทางในการจัดการขยะแบบผสมผสาน (Integrated solid waste management) โดยใช้กากอุตสาหกรรมหลายๆประเภท (Combination of Wastes) ได้แก่ ตะกอนประปาจากโรงกรองน้ำ ฟุ้งผงหินปูนจากอุตสาหกรรมโรงโม่หิน และเปลือกหอยแครง ผลิตปูนเม็ด (Clinker) ในห้องปฏิบัติการ โดยเลือกสัดส่วนผสมและกระบวนการเผาที่เหมาะสมที่สุดจากงานวิจัยที่ทำร่วมกับณพลและคณะ (2552) และเปรียบเทียบคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ เช่นสารประกอบหลักในซีเมนต์ (Cement Compounds) กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์เป็นสารเชื่อมประสาน (Cement Pastes) ในการผลิตตัวอย่างมอร์ต้าคอนกรีตพรุน (Porous Concrete) โดยศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นที่สำคัญได้แก่ กำลังรับแรงอัดมอร์ต้า อัตราส่วนโพรง และสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ ที่สัดส่วนผสมและอายุการบ่มต่างๆ

3. การพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากขยะที่มีศักยภาพสูงเชิงเดี่ยว (Single Waste Utilization) โดยทดลองใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะที่สัดส่วนผสมต่างๆเป็นสารผสมทดแทนเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดมอร์ต้า

4. การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) ของปูนเม็ดที่สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมในห้องปฏิบัติการโดยใช้เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro Version 7.1 วิธี Superseded (IPCC 2001 GWP 100a Version 1.04) แบบ Gate to Gate สำหรับประมวลและประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในเบื้องต้น โดยเน้นการเกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) และการใช้พลังงานในการเผา (Energy Consumption) เป็นต้น

การตรวจเอกสาร

แนวคิดการจัดการกากอุตสาหกรรม

การจัดการกากอุตสาหกรรมโดยการนำวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมหนึ่งมาใช้ประโยชน์ใหม่ หรือใช้เป็นวัสดุตั้งต้นทดแทนวัสดุอีกชนิดหนึ่งเป็นแนวความคิดใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมนับอย่างมา และได้มีการศึกษาและใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายๆประเทศ เช่น ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา เยอรมัน ตลอดจน ประเทศที่มีอุตสาหกรรมหนักขนาดใหญ่เป็นปริมาณมากในอันดับแนวหน้าของโลก และมีปริมาณกากอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตต่อปีสูงมาก

ในปัจจุบันประเทศไทยก็ประสบปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในลักษณะเดียวกันคือ การเพิ่มขึ้นของขยะ ซึ่งจำเป็นจะต้องหาแนวทางการจัดการขยะที่เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากความเจริญและการขยายขนาดของเมือง ซึ่งสภาพเศรษฐกิจยิ่งดีมากขึ้นเท่าไรปัญหาขยะก็เพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นแนวทางการบริหารจัดการขยะรูปแบบใหม่จึงเน้นการนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Resource Conservation and Recovery) ซึ่งเป็นหลักการที่ยอมรับกันในหลายๆประเทศ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

หลักการนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Reuse Recycle Recovery) สามารถดำเนินการได้หลายวิธีดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

1. ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน (Use as raw material substitution) เช่น การนำเถ้าลอยลิกไนต์จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนปูนซีเมนต์ในโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ หรือใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินอ่อน
2. ส่งกลับผู้ขายเพื่อกำจัด (Return to original producer for disposal) เช่น การส่งกลับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานหรือหมดอายุให้แก่โรงงานผู้ผลิต เพื่อกำจัดหรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่
3. ส่งกลับผู้ขายเพื่อนำกลับไปบรรจุใหม่หรือใช้ซ้ำ (Reuse container, to be refilled) เช่น การส่งภาชนะบรรจุคืนโรงงานผู้ผลิตเพื่อนำกลับไปบรรจุใหม่หรือใช้ซ้ำ
4. นำกลับมาใช้ซ้ำด้วยวิธีอื่นๆ (Other reuse method) เช่น การนำแกนสายไฟ หรือด้ายกลับไปใช้ซ้ำในโรงงานผู้ผลิต

5. ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน (Use as fuel substitution or burn for energy recovery) เช่น การนำเศษไม้ หรือน้ำมันที่ใช้อย่างอื่นแล้วมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิต
6. ใช้ทำเชื้อเพลิงผสม (Fuel blending) เช่น การนำวัสดุที่ไม่ได้ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพหรือผสมกันเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์
7. ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ (Use as co-material in cement kiln or rotary kiln) เช่น การนำฝุ่นผงซีเมนต์ (Cement kiln dust) มาใช้เป็นวัตถุดิบในเตาเผาปูนซีเมนต์
8. เข้ากระบวนการกลั่นตัวทำละลายและนำกลับมาใหม่ (Solvent reclamation / regeneration) เช่น การนำโทลูอีน (Toluene) หรือ ไซลีน (Xylene) ที่ใช้แล้วซึ่งเป็นวัสดุประเภทตัวทำละลายไปกลั่นและนำกลับมาใช้ใหม่
9. นำโลหะกลับมาใหม่ (Reclamation / regeneration of metal and metal compounds) เช่น การนำเศษเหล็กจากการก่อสร้างอาคารกลับมาหลอมใช้ใหม่
10. เผาเพื่อเอาพลังงาน (Burn for energy recovery) เช่น การเผากากอ้อยเพื่อนำความร้อนไปใช้ต้มน้ำร้อนน้ำแรงดันสูง (Boiler) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า
11. การคืนสภาพกรด / ด่าง (Acid / Base regeneration) เพื่อให้มีความบริสุทธิ์พร้อมนำกลับไปใช้ประโยชน์ต่อไป
12. การคืนสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst regeneration) เช่น การคืนสภาพแพลตตินัม (Platinum) เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์สารอินทรีย์

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงอย่างชัดเจนว่ากากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น ถังลอย ถังตะกรันเหล็ก หรือตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำตาล มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง (Pan *et al.*, 2003; Kamon and Nontananandh, 1991; ปิติฤกษ์, 2547) นอกจากนี้ ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างของเสียที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน (พวงรัตน์ และอริสรา, 2549)

การนำกากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์โดยเปลี่ยนวัสดุที่ไม่มีมูลค่าเป็นวัสดุผลิตภัณฑ์ (By - product) ซึ่งมีมูลค่าและใช้แทนวัสดุตามธรรมชาติ (Raw Material) สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุดิบเพื่อยืนยันว่ามีคุณสมบัติสอดคล้องกับ “NICE Criteria” ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ยอมรับอย่างแพร่หลายก่อนการนำไปใช้งาน (Nontananandh *et al.*, 1991; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549) โดยพิจารณาคุณสมบัติหลักดังต่อไปนี้

- N หมายถึง วัสดุที่ไม่เป็นพิษ (Nonhazardous Waste Materials)

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อยืนยันว่ากากอุตสาหกรรมไม่มีอันตรายและไม่เป็นพิษ ไม่เป็นสารติดไฟ ไม่เป็นสารก่อให้เกิดการกัดกร่อน และไม่เป็นสารก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี

- I หมายถึง วัสดุที่นำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Improvability)

กากอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ ใช้งานได้ง่าย มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกับวัสดุอื่นและสามารถเพิ่มความทนทานในระยะยาว

- C หมายถึง วัสดุที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอ (Consistency and Compatible)

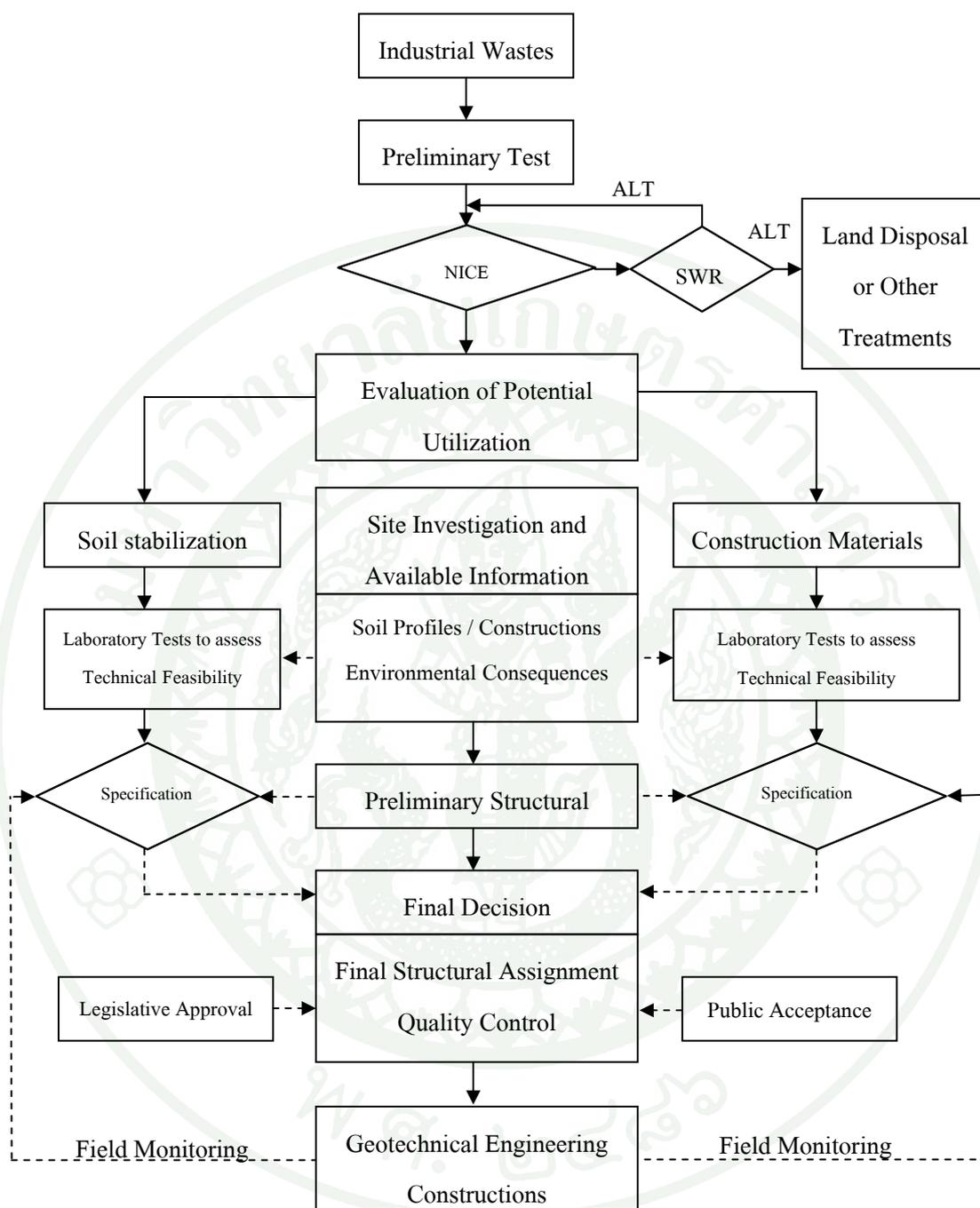
พิจารณาเลือกใช้กากอุตสาหกรรมที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ โดยการสุ่มตัวอย่างและทดสอบ องค์ประกอบทางเคมีอย่างละเอียด เลือกใช้กากอุตสาหกรรมประเภทอื่นที่สามารถทดแทนกันได้

- E หมายถึง วัสดุที่มีความคุ้มค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์ (Economic Feasibility)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างของเสียที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน

ตัวอย่างกากที่ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน	ตัวอย่างกากที่ใช้เป็นพลังงาน
ตะกรันจากงานหลอมโลหะ	สารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างๆ
ขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าหนัก	พลาสติกและผ้าปนเปื้อน
ทรายหล่อแบบ	กากสีและตะกอนสี
อิฐทนไฟเสื่อมสภาพ	สินค้าและวัตถุดิบหมดอายุหรือไม่ได้คุณภาพ
สารโพลิเมอร์	เมลานินหรือกระเบื้องเสื่อมสภาพ
ผลิตภัณฑ์เซรามิคชำรุด	เศษยางหรือผลิตภัณฑ์จากยางที่ไม่ใช้แล้ว
แม่พิมพ์เซรามิค	ยางรถยนต์เก่า
กากตะกอนประปาจากโรงบำบัดน้ำเสีย	ผงคาร์บอน
ดินและโคลนปนเปื้อนสารเคมี	ตัวทำละลายต่างๆ
สารดูดความชื้นเสื่อมสภาพ	น้ำมันใช้แล้วหรือวัสดุปนเปื้อนน้ำมัน
น้ำหล่อเย็น	น้ำเสีย เศษไม้ ขี้เลื่อย แกลบ พลาสติกเรซิน

ที่มา : พวงรัตน์ และอริสรา (2549)



ภาพที่ 1 หลักการและวิธีการใช้ประโยชน์ใหม่ของกากของเสีย

ที่มา : Nontananandh (1991)

พิจารณาเลือกใช้กากอุตสาหกรรมที่มีคุณภาพสูงสามารถใช้ในปริมาณที่มากเพื่อประหยัดค่าก่อสร้าง ควรเลือกกากอุตสาหกรรมที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่ต้องเพิ่มค่าใช้จ่าย ในการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้โดยไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม Nontananandh (1991) เสนอหลักการและวิธีการใช้ประโยชน์ใหม่ของกากอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพสามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 1

การผลิตปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ากำลังแก่คอนกรีต นอกจากนี้ ยังสามารถประยุกต์ใช้ปรับปรุงกำลังของดินเหนียวอ่อนได้ (กมล, 2545) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะกับงานที่หลากหลาย โดยมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญ 2 ประเภท คือ วัสดุที่มีออกไซด์ของธาตุแคลเซียม (calcareous materials) เช่น หินปูนและหินชอล์ก และ วัสดุที่มีออกไซด์ของธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม เช่น ดินเหนียวและหินดินดาน สำหรับดินบางประเภทมีทั้งออกไซด์ของแคลเซียมและซิลิกอน เช่น ดินมาร์ล (ปริญญาและชัย, 2552) การผลิตปูนซีเมนต์ยังต้องการวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก (iron oxide) ซึ่งได้จากดินลูกรัง (laterite) ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการยิปซัม (gypsum) เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วเกินไปโดยบดร่วมกับปูนเม็ด (Clinker) ในขั้นตอนสุดท้าย (Naville, 2002) นอกจากนี้ อุณหภูมิและรูปแบบการเผายังมีส่วนทำให้ปูนเม็ดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน (ณพลและคณะ, 2552; Nontananandh *et al.*, 2011) พบว่าความละเอียดของปูนซีเมนต์มีผลต่อคุณสมบัติ เช่น กำลังรับแรงอัด เป็นต้น

เตาเผาที่ใช้ในโรงงานปูนซีเมนต์เป็นเตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) โดยใช้ถ่านหิน น้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการเผา สำหรับกรณีการผลิตแบบแห้งกระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาเผาสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. การขจัดน้ำอิสระโดยการระเหย (Evaporation) ที่ช่วงอุณหภูมิ 250 – 450 °C
2. การขจัดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (Calcination) ที่ช่วงอุณหภูมิ 450 – 600 °C
3. การทำปฏิกิริยาเป็นปูนซีเมนต์ (Clinkering) ที่ช่วงอุณหภูมิ 1200 – 1400 °C
4. การลดอุณหภูมิ (Cooling)

การนำกากอุตสาหกรรมมาเผาพร้อมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Waste Co-processing) นอกจากการนำกากอุตสาหกรรมมาใช้เพื่อทดแทนเชื้อเพลิง เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมในด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม โดยช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกำจัดกากอุตสาหกรรมด้วยวิธีการฝังกลบ และการเผาแบบดั้งเดิม

โดยทั่วไป กากอุตสาหกรรมที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบทดแทนนี้มีทั้งกากอุตสาหกรรมที่ไม่อันตราย และกากอุตสาหกรรมที่เป็นอันตรายที่มีโลหะหนักเจือปนมาด้วย ในปริมาณที่แตกต่างกัน เช่น ในน้ำมันและตัวทำละลายที่ใช้แล้วจะมีตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ในพลาสติกจะมีโลหะหนัก ได้แก่ โคบอลต์ (Co) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) ส่วนยางรถยนต์จะมีสังกะสีอยู่มาก และตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียมักมีโลหะหนักหลายชนิดเจือปนอยู่ เป็นต้น

เตาเผาปูนซีเมนต์ที่รับกำจัดกากอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนการผลิตปูนเม็ดในกระบวนการผลิตซีเมนต์ในเชิงพาณิชย์ มีข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกระบวนการเผาปูนเม็ดที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส ที่สามารถหลอมละลายกากอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท และการลดมลภาวะแก่บรรยากาศเนื่องจากคุณสมบัติ Neutralize ของปูนเม็ด ตลอดจนกระบวนการดักฝุ่นของการเผาปูนซีเมนต์ และที่สำคัญคือเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับกำจัดกากอุตสาหกรรมที่จะต้องสร้างโรงงานเตาเผาใหม่ (Incineration plant) ใหม่

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถ้าตะกอนประปาบางชนิดเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C มีคุณสมบัติเป็นวัสดุพอซโซลาน (ชนศ, 2546) ในทำนองเดียวกันตะกอนประปาเมื่อเผาพร้อมกับปูนขาวที่อุณหภูมิสูงถึง 1500 °C สามารถผลิตปูนเม็ดที่ทำให้กำลังอัดของมอร์ต้ามีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน (Fabiano *et al.*, 2008)

ในการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าตะกอนน้ำเสียประเภทต่างๆ นักวิจัยพบว่านอกจากจะสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุแทนซีเมนต์ได้ถึง 20% โดยไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตแล้วยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะแบบผสมผสานโดยการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสม เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อีกด้วย (Lin 2003; Shunsuke, 2005; Kamon and Supakij, 1991)

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้กากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบ นักวิจัยหลายกลุ่มประสบความสำเร็จ โดย Alp *et al.* (2008) ได้ทดลองใช้ตะกรันทองแดง (Copper Slag) Tsakiridis *et al.* (2008) ได้ทดลองใช้ตะกรันเหล็ก (Steel slag) เกศรินทร์และคณะ (2550) ได้ทดลองใช้เถ้าลอย ยิปซัม และตะกรันเหล็ก (Jarosite slag) ทำการผลิตวัสดุซีเมนต์ซึ่งพบว่ามีคุณสมบัติเชื่อมประสาน (hardening properties) และมีองค์ประกอบทางเคมีตลอดจนสารประกอบหลักเทียบเคียงกับปูนซีเมนต์ทั่วไป

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

ออกไซด์หลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบไปด้วย CaO ประมาณ 60 - 67%, SiO₂ ประมาณ 17 - 25% , Al₂O₃ ประมาณ 3 - 8% , Fe₂O₃ ประมาณ 0.5 - 6% สำหรับออกไซด์ เช่น MgO, Na₂O, K₂O มีสัดส่วนขององค์ประกอบในปริมาณที่น้อย ตารางที่ 2 แสดงสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 2 สารประกอบและคุณสมบัติที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่างๆ

ชื่อสารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ปริมาณ (%)
Tricalcium silicate	3CaO.SiO ₂	C ₃ S (alite)	25 - 56
Dicalcium silicate	2CaO.SiO ₂	C ₂ S (belite)	15 - 50
Tricalcium aluminate	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A (aluminite)	5 - 12
Tetracalcium aluminoferrite	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF (ferlite)	8 - 13
คุณสมบัติ	ค่ามาตรฐาน	หน่วย	หมายเหตุ
ความละเอียดของเบตน	3,000 - 4,500	ชม. ² /กรัม	-
กำลังอัดลูกบาศก์มอร์ต้า	80 - 310	กก./ชม. ²	ที่อายุ 3 วัน
ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	270 - 430	จูล/กรัม	ที่อายุ 28 วัน

ที่มา: ปริญาและชัย (2552)

สำหรับปริมาณของสารประกอบ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF สามารถคำนวณโดยใช้วิธีของ Bogue (1955) ตามสมการดังนี้

$$C_3S = 4.071CaO - 7.600SiO_2 - 6.718Al_2O_3 - 1.430Fe_2O_3 - 2.852SO_3 \quad (1)$$

$$C_2S = 2.867SiO_2 - 0.7544C_3S \quad (2)$$

$$C_3A = 2.650Al_2O_3 - 1.692Fe_2O_3 \quad (3)$$

$$C_4AF = 3.042Fe_2O_3 \quad (4)$$

เมื่อ Tricalcium silicate (C_3S) และ Dicalcium silicate (C_2S) ทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydration) จะเกิดสารผลิตภัณฑ์ Calcium silicate hydrate (CSH) และ Calcium hydroxide ซึ่ง CSH มีผลต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีตและดินซีเมนต์ (ณพลและคณะ, 2552; Nontananandh *et al.*, 2004)

คอนกรีตพรุน (Porous concrete) : วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คอนกรีตพรุน (Porous concrete) ได้ถูกนำมาใช้แล้วกว่า 3 ทศวรรษแล้วในประเทศอเมริกาและอังกฤษ โดยนำมาเป็นทางเดินเท้า หรือถนนเพื่อลดการสิ้นเปลือง ประเทศญี่ปุ่นก็นำคอนกรีตพรุนไปประยุกต์ใช้ก่อสร้างถนน ที่สามารถลดความดังที่เกิดจากเสียงของรถ นอกจากนี้คอนกรีตพรุนสามารถลดการสะท้อนของแสงอาทิตย์ได้ซึ่งต่างจากคอนกรีตทั่วไป คอนกรีตพรุนทั่วไปถูกออกแบบให้มีความสามารถในการซึมน้ำสูงซึ่งต่างจากคอนกรีตทั่วไปที่มีคุณสมบัติกั้นน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตพรุนไม่มีมวลรวมละเอียดในส่วนผสม (No-fine aggregates) และมีโพรงที่ต่อเนื่องน้ำและอากาศสามารถไหลผ่านได้อย่างอิสระ อาจนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น เป็นตัวกรองน้ำเสีย หรือนำคอนกรีตพรุนมาปลูกพืชเพื่อให้ความสวยงามได้อีกด้วย สำหรับการใช้ประโยชน์ของคอนกรีตพรุนโดยแบ่งตามขนาดมวลรวมหยาบ ดังแสดงในภาพที่ 2 (ถนัดกิจและคณะ, 2551)

ถนัดกิจและคณะ (2551) พบว่าคุณสมบัติซีเมนต์เพสต์มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณสารผสมเพิ่มและเวลาในการผสม โดยซีเมนต์เพสต์ที่มีความหนืดสูงและค่าการไหลสูงมีความเหมาะสมในการผลิตคอนกรีตพรุน ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ค่าที่ 0.20-0.25 ใช้สารลดน้ำพิเศษ 1.0 % และใช้เวลาในการผสมที่ 270 วินาที

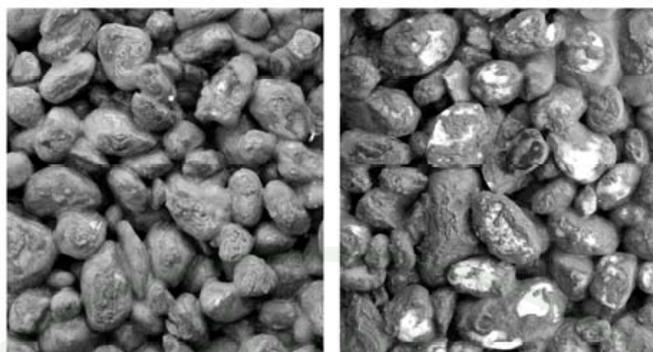
Area newly expanded by this research	Area investigated in the past	Area newly expanded by this research
 (1mm) (2.5mm)	 (5mm) (20mm)	 (100~300mm)
Crushed fine stone, Molten fine slag	Crushed stone, Recycled aggregate	Crushed stone, Concrete rubble
Water retentive and pumping pavement		
Water penetration pavement		
Base for Greenery (Mosses)	(Grasses)	(Trees)
	Noise reduction material	
		Fishing reef

ภาพที่ 2 การใช้ประโยชน์ของคอนกรีตพูน โดยแบ่งตามขนาดมวลรวมหยาบ

ที่มา : ถนัดกิจ และคณะ (2551)

ยวดีและคณะ (2551) กล่าวว่า การนำหินกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 2 และเบอร์ 8 ผสมซีเมนต์เพสต์ระหว่าง 20% - 22% จะทำให้สามารถขึ้นรูปคอนกรีตบล็อกปูถนนได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากกรวดเม็ดเล็กจะแทรกเข้าไปในช่องว่างใหญ่ๆ ได้ เป็นผลให้การยึดเกาะดีมีกำลังรับแรงสูง แต่ความชื้นน้ำต่ำ ในกรณีเมื่อนำหินกรวดที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 2 และเบอร์ 4 มาผสมกันพบว่ามีความชื้นน้ำที่สูงขึ้นเพราะเม็ดกรวดมีขนาดสม่ำเสมอ การใช้อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์เท่ากับ 0.35 จะทำให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่แห้งเกินไป แต่ถ้าใช้อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์เท่ากับ 0.40 จะทำให้ซีเมนต์เพสต์เคลือบผิวได้ดีเป็นมันวาว ดังแสดงในภาพที่ 3

คอนกรีตพูนที่ดี จะต้องไม่มีการจมลงของมวลรวมหยาบ (Segregation) ในซีเมนต์เพสต์ที่ด้านล่าง ภายหลังการผสม ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนจะเพิ่มตามค่าอัตราส่วนความพูนที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนจะลดลงตามค่า w/c ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม (ถนัดกิจและคณะ, 2551)



เคลือบผิวมวลรวมดี

เคลือบผิวของมวลรวมไม่ดี

ภาพที่ 3 ลักษณะซีเมนต์เพสต์ในงานคอนกรีตพูนเคลือบผิวมวลรวม

ที่มา : ยูวดีและคณะ (2551)

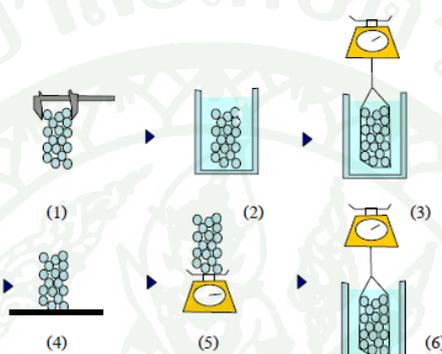
ถนัดกิจ และคณะ (2551) ได้ออกแบบคอนกรีตพูนโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และมวลรวมหยาบ (หินปูน) ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว สารลดน้ำพิเศษ 0.5% ซีเมนต์เพสต์มีค่าการไหล 190 มม. จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมพบว่า มีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 205.6 ksc สามารถนำไปใช้ทำเป็นพื้นที่จอดรถขนาดเล็กและทางเดินเท้าได้ และพบว่ามีการระบายน้ำได้ดีโดยมีความซึมน้ำเท่ากับ 4.52 cm /s เมื่อทำการปลูกพืชขนาดเล็กพบว่าหญ้าสามารถเจริญเติบโตได้ดี ดังนั้น นอกจากกำลังรับแรงอัดแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตพูนในการนำไปประยุกต์ใช้งานคืออัตราส่วนโพรง และค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ

ภาพที่ 4 แสดงการทดสอบหาค่าอัตราส่วนโพรงของแท่งตัวอย่างคอนกรีตพูน สำหรับค่าอัตราส่วนโพรงรวม (Total void ratio) และค่าอัตราส่วนโพรงต่อเนื่อง (Continuous void ratio) สามารถแสดงดังสมการที่ 5 และ 6 ดังนี้

$$A_t (\%) = 1 - \left[\frac{(W_2 - W_1) / \gamma_t}{V_1} \right] \times 100 \quad (5)$$

$$A_c (\%) = A_t - \left[\frac{(W_1 - W_3) / \gamma_t}{V_1} \right] \times 100 \quad (6)$$

โดยที่ A_t	=	อัตราส่วนโพรงรวม (Total void ratio, %)
A_c	=	อัตราส่วนโพรงต่อเนื่อง (Continuous void ratio, %)
V_1	=	ปริมาตรรวมของตัวอย่างคอนกรีตพูน (ซม. ³)
W_1	=	น้ำหนักของแท่งตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ (กรัม)
W_2	=	น้ำหนักของแท่งตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ (กรัม)
W_3	=	น้ำหนักของแท่งตัวอย่างผิวอิมตัวด้วยน้ำ (กรัม)



ภาพที่ 4 การหาอัตราส่วนโพรงของแท่งคอนกรีตพูน

ที่มา : ถนัดกิจ และคณะ (2551)



ภาพที่ 5 การทดสอบหาค่าความชื้นน้ำ

ที่มา : ถนัดกิจ และคณะ (2551)

ภาพที่ 5 แสดงการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (k) ในห้องปฏิบัติการ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of Permeability) สามารถคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$k \text{ (cm/s)} = \left(\frac{H}{h} \right) \cdot \left[\frac{Q}{A(t_2 - t_1)} \right] \quad (7)$$

โดยที่ k = ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of Permeability, ซม.)

Q = ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง (ซม.³)

H = ความสูงของแท่งตัวอย่างคอนกรีตพูน (ซม.)

h = ความสูง (head) ของน้ำ (ซม.)

A = พื้นที่หน้าตัด (ซม.²)

t₁ = เวลาเริ่มต้นในการทดลอง (วินาที)

t₂ = เวลาสุดท้ายในการทดลอง (วินาที)

เทคโนโลยีสะอาด

ปัจจุบันมีการนำแนวคิดเทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology) มาใช้ในการพัฒนาเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่า โดยพิจารณาให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด อาศัยวิธีการลดมลพิษที่แหล่งกำเนิด การนำกลับมาใช้ซ้ำ ลดอัตราการใช้วัตถุดิบ สารเคมี หรือสารอันตราย และการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ หลักการของเทคโนโลยีสะอาดนี้สามารถแบ่งเป็น 2 แนวทางกล่าวคือ

1. การลดมลพิษที่แหล่งกำเนิด โดยการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เช่น การใช้วัตถุดิบที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก มีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิต โดยเน้นการใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพ

2. การใช้ซ้ำหรือการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการหมุนเวียนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านคุณภาพมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อการผลิตใหม่อีกครั้ง หรือการใช้เทคโนโลยีหมุนเวียน เช่น การนำของเสียไปผ่านกระบวนการต่างๆ แล้วนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีก

นำตัวอย่างการนำหลักการของเทคโนโลยีสะอาดมาใช้ในการแก้ปัญหาการเพิ่มขึ้นของภาคอุตสาหกรรม เช่น ประเทศญี่ปุ่นได้นำภาคอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-Cement) โดยมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของ Eco-Cement เปรียบเทียบกับ Ordinary Portland Cement

ชนิดปูนซีเมนต์ (Eco-cement)	ความหนาแน่น	พื้นที่ผิวจำเพาะ	ระยะเวลาก่อตัว (ชม-นาที)		กำลังรับแรงอัด (N/mm ²) ตามอายุการบ่ม (วัน)			
	(g/cm ³)	(cm ² /g)	เริ่ม	สิ้นสุด	1	3	7	28
	Portland Cement Type	3.19	4,500	2-0	4-30	9.0	22.0	37.0
Rapid hardening Type	3.13	4,600	0-9	0-13	23.0	30.0	38.0	46.0
Ordinary Portland Cement	3.17	3,220	2-22	3-20	11.0	27.0	43.0	59.0

ที่มา: Shimoda *et al.* (1999)

ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

กรมควบคุมมลพิษ (2552) ได้จัดทำฐานความรู้การป้องกันมลพิษ โดยรวบรวมแนวคิดประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-Efficiency) ซึ่งเป็นแนวทางที่จะช่วยให้การดำเนินงานด้านธุรกิจประสบความสำเร็จในเชิงนิเวศเศรษฐกิจ 7 ประการ ดังนี้

1. ลดการใช้ทรัพยากรหรือวัตถุดิบในการผลิตและการบริการ
2. ลดการใช้พลังงานในการผลิตและการบริการ
3. ลดการระบายสารพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม
4. เสริมสร้างศักยภาพการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่
5. ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรหมุนเวียน
6. เพิ่มอายุของผลิตภัณฑ์
7. เพิ่มระดับการให้บริการแก่ผลิตภัณฑ์และเสริมสร้างธุรกิจบริการ

แนวคิด Eco-efficiency เป็นวิธีการเพิ่มผลกำไรให้กับองค์กรอย่างเหมาะสมเนื่องจากเป็น การสร้างความสมดุลระหว่างความเจริญก้าวหน้าทางธุรกิจและการรักษาระบบนิเวศ โดยเน้นการ ลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน เครื่องมือที่สำคัญต่อการทำ Eco-efficiency มี ดังนี้

1. การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment; LCA) เป็นเทคนิคที่ใช้ใน การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต หรือกิจกรรม ต่างๆในเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิต ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ การได้มาซึ่ง วัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้งาน การบำรุงรักษา การใช้ซ้ำ รวมถึงการหมุนเวียนนำกลับมา ใช้ใหม่และการกำจัดหลังหมดอายุการใช้งาน

2. เทคโนโลยีสะอาด (Cleaner Technology; CT) เป็นการพัฒนา เปลี่ยนแปลง และ ปรับปรุงของกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และ สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และในขณะเดียวกันต้องมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยใช้หลักการลด มลพิษที่แหล่งกำเนิด การใช้ซ้ำหรือการนำกลับมาใช้ใหม่

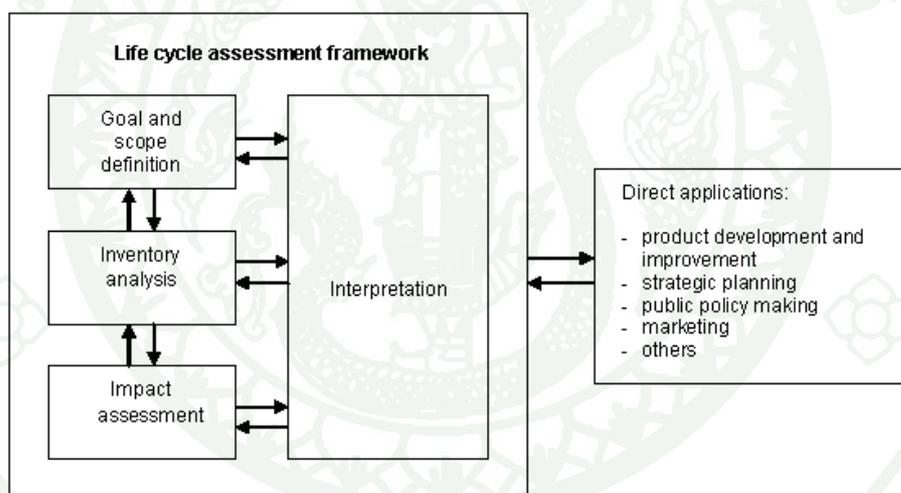
3. การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Economic and Ecological Design; Eco-Design) เป็นการผสมผสานแนวคิดด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม ในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนพัฒนาผลิตภัณฑ์ การออกแบบ การผลิต การนำไปใช้ และการทำลาย และกำจัดหลังการใช้งาน ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนผลิตภัณฑ์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปด้วยกัน

แนวคิดการออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศเศรษฐกิจและการประเมินจักรชีวิต

การออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Economic and Ecological Design) เป็นการ ผสมผสานแนวคิดเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยคำนึงถึง ผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อม หลักการออกแบบเน้นการประหยัดการใช้ทรัพยากร ประหยัดพลังงาน สามารถใช้ซ้ำหรือนำมาใช้ใหม่ กล่าวคือเป็นการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตร ต่อสิ่งแวดล้อม (ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 2551)

การออกแบบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Eco-design) เป็นเทคนิคที่เพิ่มความสามารถทางธุรกิจโดยเน้นการรักษาสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันต้องพิจารณาทั้งวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น โดยการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment; LCA) เริ่มตั้งแต่ขบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ การใช้วัตถุดิบ การผลิตและพลังงานที่ใช้ การขนส่ง กระบวนการกำจัดซากเมื่อหมดอายุการใช้งาน รวมถึงของเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 2551)

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่พิจารณาครอบคลุมไปถึงระบบนิเวศ สุขอนามัยของชุมชน และปัญหาสิ่งแวดล้อมโลก ทั้งนี้เพื่อนำผลไปใช้ในการกำหนดนโยบายการออกแบบผลิตภัณฑ์ การปรับกระบวนการผลิต หรือเพิ่มทางเลือกในการผลิต เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

ที่มา: ISO 14040 (2006)

ขอบเขตการดำเนินงานสรุปโดยย่อได้ดังนี้คือ

1. Life Cycle Inventory เป็นการจัดระบบข้อมูลทั้งส่วนที่รับและส่วนที่เกิดขึ้น ที่มีผลเกี่ยวเนื่องกับผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต และผลกระทบที่เกิดขึ้น เช่น พลังงานที่ใช้ในการผลิต ปริมาณวัตถุดิบที่ต้องการ และอื่น ๆ

2. Life Cycle Impact Assessment เป็นการนำข้อมูลมาทำการประเมินจำแนกตามลักษณะผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

3. Life Cycle Interpretation เป็นการประเมินผลที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้ทดแทนกันได้ แล้วหาข้อสรุปในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์กระบวนการต่าง ๆ ให้เห็นได้ชัดเจน

ปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (LCA) ทั่วโลกมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยพิจารณาจากจำนวนบทความวิจัยในฐานข้อมูล SCI ตั้งแต่ ค.ศ. 1995 - ค.ศ. 2007 ที่สูงถึง 1,707 บทความ (Lu *et al.*, 2009) นอกจากนี้ LCA ยังสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี ปูนซีเมนต์ หรือ เครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น ตู้เย็นที่ใช้ในบ้าน (Phair, 2006; พงษ์วิภาและคณะ, 2547; สุรศักดิ์, 2548) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่คาดว่าจะเกิดสามารถนำไปใช้ตัดสินใจในเรื่องการวางนโยบายและการป้องกันในระยะยาวต่อไป การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การบ่งชี้และระบุปริมาณของภาระทางสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานและวัตถุดิบที่ถูกใช้ การปล่อยของเสีย และการแพร่กระจายของมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม
2. การประเมินและการหาค่าของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาจากปริมาณภาระทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่ถูกบ่งชี้ในขั้นตอนแรก
3. การประเมินโอกาสในการปรับปรุงทางสิ่งแวดล้อม และการใช้ข้อมูลที่มีแสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (High temperature furnace: Nabertherm) 1,700 องศาเซลเซียส พร้อมอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ ทรายอะลูมินา, อิฐทนไฟ, ถ้วยครุชชีเบิ้ล พร้อมฝาปิด
2. เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill)
3. ชุดเครื่องมือ และอุปกรณ์หาความละเอียด (Blaine Air Permeability)
4. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบ X-ray Fluorescence (XRF), Philips รุ่น PW2400
5. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD), Philips รุ่น X'Pert
6. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM), JEOL รุ่น JSM-6510
7. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับการทดสอบ Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
8. ชุดเครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ สำหรับผสมซีเมนต์เพสต์ (Hobart) เพื่อผลิตมอร์ต้าและคอนกรีตพูน
9. ชุดเครื่องมือ และอุปกรณ์ สำหรับการทดสอบการรับกำลังอัดก้อนมอร์ต้าตามมาตรฐาน Standard of American Society for Testing and Material (ASTM C109)
10. โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro® Version 7.1 (ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)
11. เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า 3-phase energy analyzer (วัตต์มิเตอร์) รุ่น Microvip

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม

1. ตะกอนประปาจากบ่อดักตะกอน โรงผลิตน้ำประปาบางเขน
2. ฝุ่นผงหินปูน ซึ่งเป็นกากอุตสาหกรรมจากโรงโม่หินปูน จังหวัดสระบุรี
3. เปลือกหอยแครง บ้านบางตะบูน อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี
4. ปูนขาว ชนิด Hydrate Lime

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาสำหรับเตรียมตัวอย่างมอร์ต้าและซีเมนต์เพสต์ ได้แก่

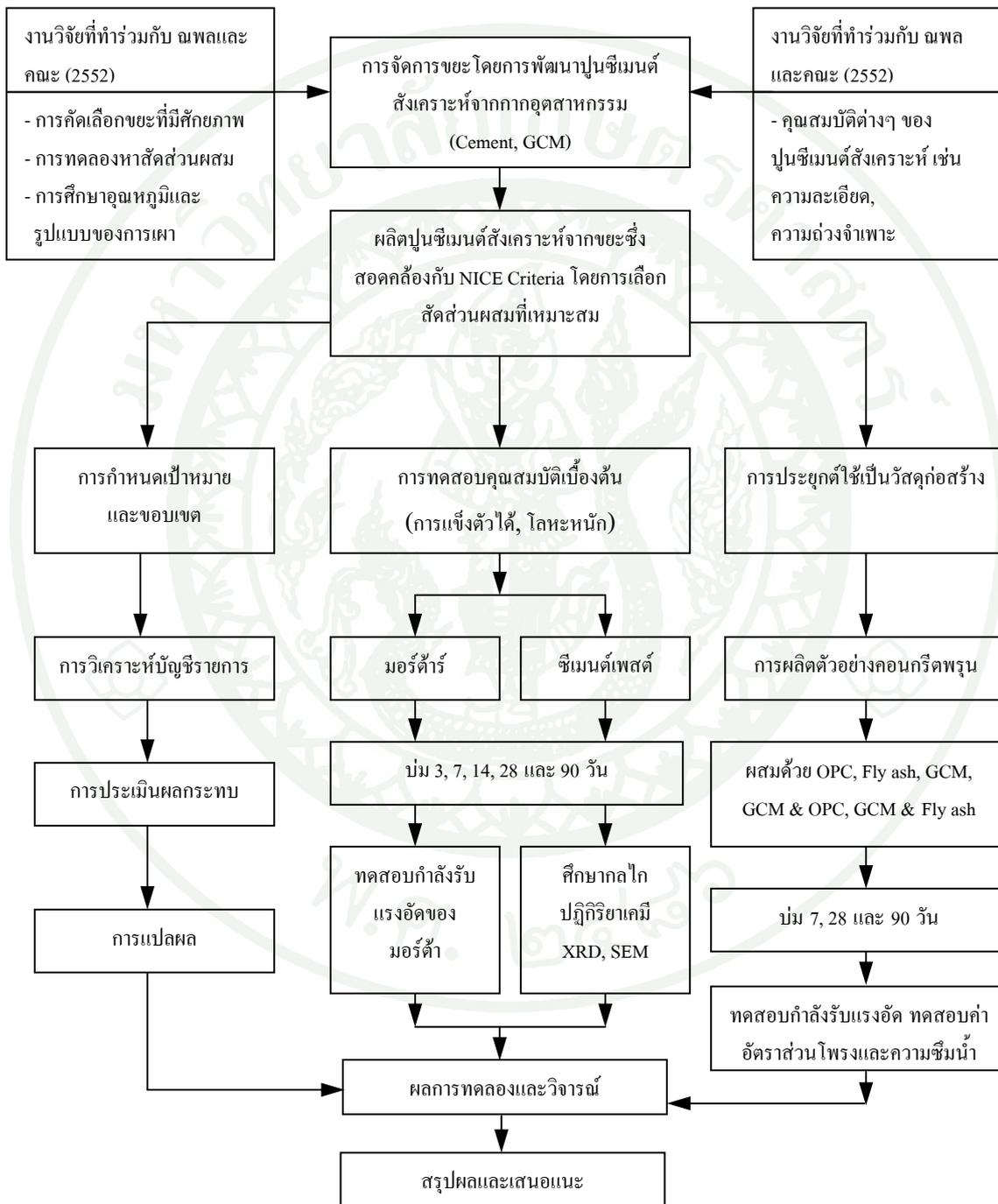
1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement; OPC) ประเภทที่ 1 ตราช้าง
2. ปูนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรมผงสีน้ำตาล (Brown Cementing Material; BCM)
3. ปูนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรมผงสีเทาดำ (Gray Cementing Material; GCM)
4. เถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite fly ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
5. ยิปซั่ม (Gypsum) เกรดการค้า
6. ทราย
7. น้ำประปา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาสำหรับเตรียมตัวอย่างคอนกรีตพูน ได้แก่

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement; OPC) ประเภทที่ 1 ตราช้าง
2. ปูนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรมผงสีเทาดำ (Gray Cementing Material; GCM)
3. มวลรวมหยาบ (Aggregate) ขนาดผ่านตะแกรง 3/8" และค้ำตะแกรงเบอร์ 4
4. เถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite fly ash) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
5. สารผสมเพิ่ม Type F
6. น้ำประปา

วิธีการ

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งสามารถอธิบายลำดับขั้นตอนได้ดังนี้



ภาพที่ 7 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

ส่วนที่ 1 การพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมโดยเลือกสัดส่วนผสมที่ดีที่สุดจากงานวิจัยที่ทำร่วมกับ ฌพล (2552) ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมที่นำมาผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติสอดคล้องกับ NICE Criteria ได้แก่

1. ตะกอนประปา (Water Supply Sludge)

ตะกอนประปาในงานวิจัยเก็บตัวอย่างจากบ่อดกตะกอน (Clarifier) โรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพมหานคร มีลักษณะคล้ายดินเหนียวสีน้ำตาล จับตัวเป็นก้อนขนาดเม็ดตากแห้งเมื่อบดละเอียดและร่อนผ่านตะแกรง (ช่องเปิดประมาณ 0.15 มม.) ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนเผามีความละเอียด 2,740 ตร.ซม.ต่อกรัม ดังแสดงในภาพที่ 8

2. ฝุ่นผงหินปูน (Waste Lime Powder)

ฝุ่นผงหินปูนเก็บตัวอย่างจากโรงโม่หินปูน จังหวัดสระบุรี มีลักษณะเป็นฝุ่นผงสีขาวแห้ง มีความละเอียด 4,480 ตร.ซม.ต่อกรัม ซึ่งละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 9

3. เปลือกหอยแครง (Ark Shell)

เปลือกหอยแครงในงานวิจัยเก็บตัวอย่างจาก บ้านบางตะบูน อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งเป็นกากอุตสาหกรรมที่ได้จากอุตสาหกรรมหอยแครงสำหรับบริโภค มีลักษณะเป็นเปลือกแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 10 เมื่อบดละเอียดโดย High speed ball mill ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนเผามีความละเอียด 5,710 ตร.ซม.ต่อกรัม

4. เถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite fly ash)

เถ้าลอยลิกไนต์เป็นกากอุตสาหกรรมที่เกิดจากการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 °C เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับในงานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง เถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะทั่วไปเป็นผงละเอียดมีสีน้ำตาลแดง มีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (ซิลิกา และอลูมินา) มีความละเอียด 3,320 ตร.ซม.ต่อกรัม ซึ่งมีความละเอียดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไป จากการทดสอบเบื้องต้นมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.30 ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 8 ตัวอย่างตะกอนประปาบางเขน (Water Supply Sludge)



ภาพที่ 9 ตัวอย่างฝุ่นผงหินปูน (Waste Lime Powder)



ภาพที่ 10 ตัวอย่างเปลือกหอยแครง (Ark Shell)



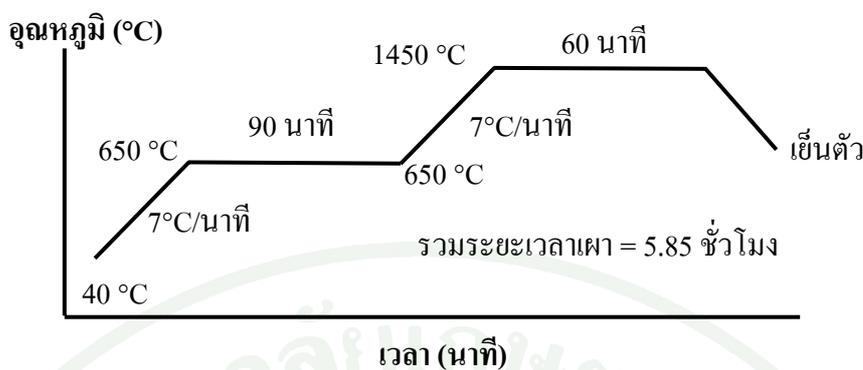
ภาพที่ 11 ตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite fly ash)



ภาพที่ 12 ถ้วยครุฑีบีลสำหรับเผา



ภาพที่ 13 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง



ภาพที่ 14 รูปแบบการเผาที่อุณหภูมิและช่วงเวลาต่างๆ

จากนั้นนำวัตถุดิบหลักตั้งต้นไปหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ X-ray Fluorescence (XRF) เพื่อหาสารประกอบออกไซด์หลักที่มีอยู่ในกากอุตสาหกรรมแต่ละชนิด คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO₂), อลูมินา (Al₂O₃) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ร่วมกับปูนขาว (Lime) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คำนวณหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสม โดยใช้ค่าไฮเดรชันโมดูลัส (Hydration Modulus) เป็นเกณฑ์กำหนดอยู่ในช่วงระหว่าง 2.0 – 2.4 ดังแสดงในสมการที่ 1

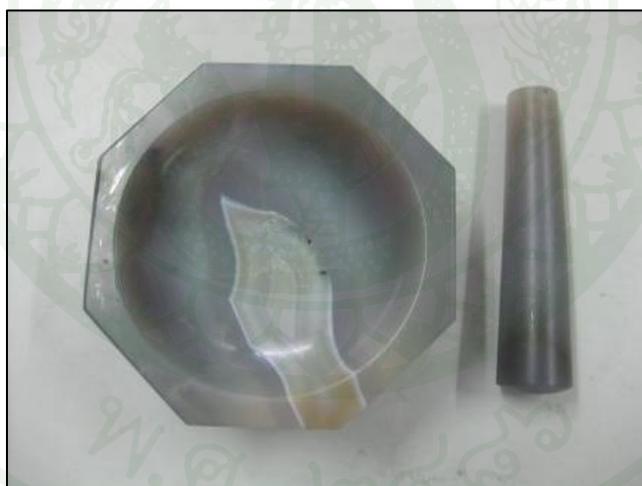
$$\text{Hydration Modulus (H.M.)} = \frac{\text{CaO}}{(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)} \quad (8)$$

นำวัตถุดิบหลักตั้งต้นมาบดละเอียดแล้วและผสมตามสัดส่วนที่เหมาะสม ใส่ในถ้วยครุชีบีล (ภาพที่ 12) แล้วเผาในเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ดังแสดงในภาพที่ 13 โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 40 °C และเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,450 °C สำหรับรูปแบบการเผาแสดงดังภาพที่ 14

ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการเผา นำปูนเม็ดจากกากอุตสาหกรรม (Clinker) มาบดละเอียดในเบื้องต้นด้วยครก Agate (ภาพที่ 15) จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill) ดังภาพที่ 16 และภาพที่ 17 แล้วผสมกับยิปซั่ม 5 % เพื่อผลิตเป็นปูนซีเมนต์ผง สำหรับการบดละเอียดตัวอย่างปริมาณมากใช้เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill) จากโรงปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง) ดังภาพที่ 18 ซึ่งสามารถกำหนดค่าความละเอียดได้

นำปูนเม็ดที่บดละเอียดมาทดสอบด้วยเครื่อง Blaine Air Permeability Test ตามมาตรฐาน ASTM C 204 (ภาพที่ 19) และทดสอบคุณสมบัติการแข็งตัวได้ (Self Hardening Properties) เบื้องต้นของเพสต์ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Anhydrous) เพื่อเปรียบเทียบกับปูน OPC และศึกษาปริมาณ โลหะหนัก (Heavy metal) เพื่อยืนยันความไม่เป็นพิษ (Nonhazardous material) ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ภาพที่ 20

นำปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมที่ได้เตรียมตัวอย่างลูกบาศก์เพื่อทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 109 และทดสอบซีเมนต์เพสต์เพื่อศึกษาสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และอธิบายการพัฒนากำลังโดยศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วย X-ray Diffraction (XRD) ดังแสดงในภาพที่ 21 – 23 และศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 24 – 27



ภาพที่ 15 ครก Agate สำหรับบดปูนเม็ดจากกากอุตสาหกรรม



ภาพที่ 16 เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill)



ภาพที่ 17 ตลับเหล็กสำหรับใส่ตัวอย่างบดละเอียดตัวอย่าง



ภาพที่ 18 เครื่องบดละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill)



ภาพที่ 19 เครื่อง Blaine Air Permeability หาคความละเอียดของปูนซีเมนต์



ภาพที่ 20 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม



ภาพที่ 21 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD)



ภาพที่ 22 เครื่อง X-ray Diffractometer (Philips รุ่น X'Pert) วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์



ภาพที่ 23 ช่องใส่ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)



ภาพที่ 24 อุปกรณ์สำหรับเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์ Scanning Electron Microscope (SEM)



ภาพที่ 25 เครื่องเคลือบตัวอย่าง JEOL Coater รุ่น JFC-1600 สำหรับการวิเคราะห์ SEM



ภาพที่ 26 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL รุ่น JSM-6510 ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค



ภาพที่ 27 ช่องใส่ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคเครื่อง SEM

ส่วนที่ 2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม

การประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมโดยผลิตเป็นคอนกรีตพรุนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้ผลิตตัวอย่างคอนกรีตพรุนรูปลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ โดยใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆกับคอนกรีตพรุนมาตรฐานที่ผลิตโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (OPC) มวลรวมหยาบประกอบด้วยหินปูนขนาดผ่านตะแกรง $3/8 \text{ ''}$ และค้างตะแกรงเบอร์ 4 เลือกใช้อัตราส่วนเพสต์ต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.235 อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสาน (w/c) อยู่ในช่วง 0.30 - 0.60 และสารผสมเพิ่มอยู่ในช่วง 1 - 3%

ขั้นตอนการผสมซีเมนต์เพสต์และการผสมคอนกรีตพรุนใช้เทคนิคตามที่เสนอโดยนักวิจัยและคณะ (2551) สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผสมซีเมนต์เพสต์แบ่งเป็น 2 ช่วง ที่ความเร็ว 50 รอบ/นาที ใช้เวลา 30 วินาที และที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที ใช้เวลา 240 วินาที
2. การผสมมวลรวมหยาบกับซีเมนต์เพสต์เพื่อผลิตคอนกรีตพรุน ใช้เวลา 30 วินาทีผสมที่ความเร็ว 50 รอบ/นาที และต่อจากนั้นใช้อีกเวลา 90 วินาทีผสมที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที ภาพที่ 28 แสดงเครื่อง Hobart ที่ใช้ในการผสมเพสต์และมวลรวมหยาบ และภาพที่ 29 แสดงเพสต์กับมวลรวมหยาบที่ผสมเสร็จแล้ว
3. ผลิตตัวอย่างคอนกรีตพรุนในแบบรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ดังแสดงในภาพที่ 30 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ใช้มาตรฐานเดียวกับการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้า ASTM C109 ดังแสดงในภาพที่ 31 เมื่อคอนกรีตพรุนมีอายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน สำหรับการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนโพรงรวม (Total void ratio; A_v) อัตราส่วนโพรงต่อเนื่อง (Continuous void ratio; A_c) สัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (Coefficient of water permeability; k) ใช้วิธีการที่นำเสนอโดย นักวิจัยและคณะ (2551) ดังแสดงในภาพที่ 32 - 33 โดยเลือกตัวอย่างคอนกรีตพรุนที่อายุการบ่ม 28 วันมาทดสอบ สำหรับหลักการวิธีการคำนวณหาอัตราส่วนโพรงและความชื้นน้ำได้กล่าวไว้แล้วในส่วนการตรวจเอกสาร



ภาพที่ 28 เครื่อง Hobart ผสมเพสต์และมวลรวมหยาบสำหรับผลิตคอนกรีตพูน



ภาพที่ 29 เพสต์กับมวลรวมหยาบที่ผสมเสร็จแล้ว



ภาพที่ 30 แบบทองเหลืองสำหรับหล่อแบบมอร์ต้าคอนกรีตพูน



ภาพที่ 31 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด



ภาพที่ 32 เครื่องชั่งสำหรับหาอัตราส่วนโพรงรวม



ภาพที่ 33 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ

ส่วนที่ 3 การศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

งานวิจัยในส่วนนี้เน้นการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment; LCA) ของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม โดยพิจารณาขอบเขตเฉพาะผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Global Warming) ที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในกระบวนการผลิต (Manufacturing process) ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นส่วนใหญ่เป็นสารที่ทำให้เกิด CO₂ เมื่อผ่านกระบวนการเผาไหม้

ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้เสนอทางเลือกในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมจากกากอุตสาหกรรมบางประเภท จึงพิจารณากากอุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านั้นเป็นวัตถุดิบสารขาเข้าได้โดยตรง เพื่อป้อนข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมแบบ Gate to Gate โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro Version 7.1 ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จัดทำเป็นฐานข้อมูลเบื้องต้นในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม

วิธีการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมส่วนที่เป็นสี่เตาดำ (GCM) ดำเนินการตามขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งมี 4 ขั้นตอน คือ การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and Scope Definition) การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Inventory Analysis) การประเมินผลกระทบ (Impact Assessment) และการแปลผล (Interpretation) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.1 วิธี Superseded (IPCC 2001 GWP 100a Version 1.04) สำหรับประมวลและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ซึ่งตรงกับวัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้น

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต

1.1 กำหนดเป้าหมาย

ประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ที่ผลิตจากกากอุตสาหกรรม 300 กรัม โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.1 จัดทำฐานข้อมูลการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับทรัพยากร และพลังงานที่ใช้พลังงานในการขนส่ง การปลดปล่อยของเสียออกสู่อากาศ ของปูนซีเมนต์สังเคราะห์ 300 กรัม

1.2 หน่วยหน้าที่ของการศึกษา

กำหนดขึ้นเพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับกำหนดการวัดหรือเก็บข้อมูลของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบที่ศึกษา ในงานวิจัยนี้หน่วยหน้าที่ของการศึกษาคือปริมาณการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม (GCM) 1 กิโลกรัม

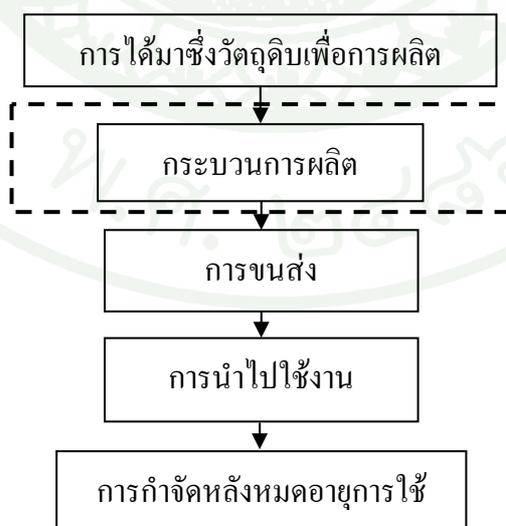
1.3 กำหนดขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นเฉพาะผลกระทบที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศจากก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเน้นขอบเขตของระบบที่ศึกษาแบบ Gate to Gate ในส่วนกระบวนการผลิต ดังแสดงในภาพที่ 34

1.4 ตั้งสมมติฐานและข้อจำกัดในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ฐานข้อมูลการผลิตวัตถุดิบซึ่งได้มาจากต่างประเทศที่รวบรวมในโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.1 สำหรับพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ 300 กรัมด้วยเตาไฟฟ้าหาค่าโดยการใช้วัตต์มิเตอร์วัดพลังงานที่ใช้ในการผลิตจริง พลังงานไฟฟ้าในหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) ได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของพลังงานกับเวลา จากนั้นเปรียบเทียบค่าพลังงานกับฐานข้อมูลเดียวกันกับที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1 ซึ่งกำหนดใช้ฐานข้อมูลจากพลังงาน Reservoir Hydropower plant



ภาพที่ 34 ขอบเขตของระบบที่ศึกษาแบบ Gate to Gate

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์บัญชีรายการ

เก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ ตามที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต เพื่อคำนวณหาจำนวนสารขาเข้า (Inputs) และสารขาออก (Outputs) ของการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม

2.1 ข้อมูลสารขาเข้า (Inputs)

2.1.1 ปริมาณวัตถุดิบหลักตั้งต้นที่ใช้ในผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมในห้องปฏิบัติการมีดังนี้

- ผุ่นผงหินปูน (Waste Lime Powder) ปริมาณ 150 กรัม
- ตะกอนประปา (Water Supply Sludge) ปริมาณ 75 กรัม
- เปลือกหอยแครง (Ark Shell) ปริมาณ 15 กรัม
- ปูนขาว (Quick lime) ปริมาณ 60 กรัม

2.1.2 ระยะทางในการขนส่งวัตถุดิบหลักตั้งต้น โดยใช้รถกระบะน้ำหนักบรรทุก 16 ตัน จากฐานข้อมูล SimaPro 7.1 จากแหล่งกำเนิดจนถึงห้องปฏิบัติการมีดังนี้

- ผุ่นผงหินปูน มีระยะทางขนส่ง 105 กิโลเมตร
- ตะกอนประปา มีระยะทางขนส่ง 10 กิโลเมตร
- เปลือกหอยแครง มีระยะทางขนส่ง 125 กิโลเมตร
- ปูนขาว มีระยะทางขนส่ง 5 กิโลเมตร

2.1.3 พลังงานที่ใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เทียบกับพลังงานเดียวกับที่ใช้ผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ประเภทที่ 1 จากค่าพลังงานที่วัดจริงในการเผาปูนซีเมนต์ในช่วงระยะเวลา 5.85 ชั่วโมง โดยใช้วัตต์มิเตอร์ (Wattmeter) ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 35 เครื่องวัดวัตต์มิเตอร์ (Wattmeter)

2.2 ข้อมูลสารขาออก (Outputs)

2.2.1 ผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมสีเทาจำปริมาณ 180 กรัม

2.2.2 สารขาออกสู่อากาศ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 105 กรัม

เมื่อได้ข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกทั้งหมดแล้วนำข้อมูลไปประมวลผลโดยใช้โปรแกรม SimaPro 7.1 เพื่อทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินผลกระทบ

ประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลการใช้ทรัพยากรและการปลดปล่อยของเสียหรือสารขาเข้าและขาออก ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม โดยการจำแนกจัดกลุ่ม และเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้น กับการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1

ขั้นตอนที่ 4 แปลผล

แปลผลจากขั้นตอนของการประเมินผลกระทบ เพื่อหาแนวทางในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ โดยจัดลำดับจากกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดตามลำดับ

สถานที่และระยะเวลาในการทำวิจัย

สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร
2. ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์วิจัยวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร
3. ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร

ระยะเวลาในการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้เวลาในการวิจัย 18 เดือน (ตุลาคม 2552 ถึง มีนาคม 2554) โดยมีกิจกรรมที่ดำเนินการตามช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แผนและระยะเวลาการดำเนินการวิจัย

กิจกรรม	ช่วงเวลา (เดือนที่)																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
รวบรวมข้อมูล	←→																	
การทดสอบเบื้องต้น		←→																
เสนอ Proposal			←→															
ทดลองวิจัย				←→														
วิเคราะห์และสรุปเขียนและ											←→							
สอบ													←→					

ผลการทดลองและวิจารณ์

การพัฒนาปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม : แนวทางการจัดการขยะแบบผสมผสาน

จากงานวิจัยที่ทำร่วมกับณพลและคณะ (2552) ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เพื่อผลิตสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม) พบว่า ตะกอนประปา ฟุ้งผงหินปูน เปลือกหอยแครง และปูนขาว ที่อัตราส่วนผสม 25 : 50 : 5 : 20 โดยน้ำหนักแห้ง มีศักยภาพเหมาะสมและสอดคล้องกับเกณฑ์ NICE Criteria ที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักตั้งต้นในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักของวัตถุดิบหลักตั้งต้นด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) พบว่าปริมาณโลหะหนักของวัตถุดิบหลักตั้งต้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ USEPA (United State Environmental Protection Agency) ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของวัตถุดิบหลักตั้งต้น โดยวิธี Atomic Absorption

ตัวอย่าง	Cu (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Zn (mg/kg)
ตะกอนประปา	34.68	ND	32.76	24.72	38.88	102.01
เปลือกหอยแครง	3.10	ND	0.80	ND	ND	5.03
ฟุ้งผงหินปูน	3.34	0.05	1.85	ND	ND	5.34
เกณฑ์กำหนด USEPA	1,500.00	39.00	3,000.00	420.00	18.00	2,800.00

หมายเหตุ ND (Not Detected) หมายถึง ตรวจไม่พบ

ผลการศึกษาร้อยประกอบทางเคมีของวัตถุดิบหลักตั้งต้นด้วย X-ray Fluorescence (XRF) เพื่อนำปริมาณออกไซด์หลักซึ่งได้แก่ CaO, Al₂O₃, SiO₂ และ Fe₂O₃ แสดงดังตารางที่ 6 พบว่า ตะกอนประปามีปริมาณ SiO₂ ค่อนข้างสูงถึง 52.19 % แต่มี CaO ค่อนข้างต่ำมากและมีปริมาณ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับ 17.39 % และ 9.56 % โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สำหรับฟุ้งผงหินปูนและเปลือกหอยแครงเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ถูกออกแบบให้มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูงซึ่งจากการทดสอบ

พบว่ามีความสูงถึง 51.70 % และ 53.91 % โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีปริมาณ SiO_2 และ Fe_2O_3 ก่อนข้างต่ำ และไม่พบองค์ประกอบของ Al_2O_3

เมื่อนำค่าปริมาณออกไซด์หลักมาวิเคราะห์คำนวณไฮเดรชันโมดูลัส (Hydration Modulus) ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์ในการยืนยันสัดส่วนผสมของกากอุตสาหกรรมที่ถูกกำหนดไว้ในเบื้องต้นพบว่ามีความเท่ากับ 2.45 ซึ่งอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับเกณฑ์ที่เสนอโดย Kamon และ Nontananandh (1991) สำหรับรายละเอียดการคำนวณไฮเดรชันโมดูลัสแสดงตารางที่ 7

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ

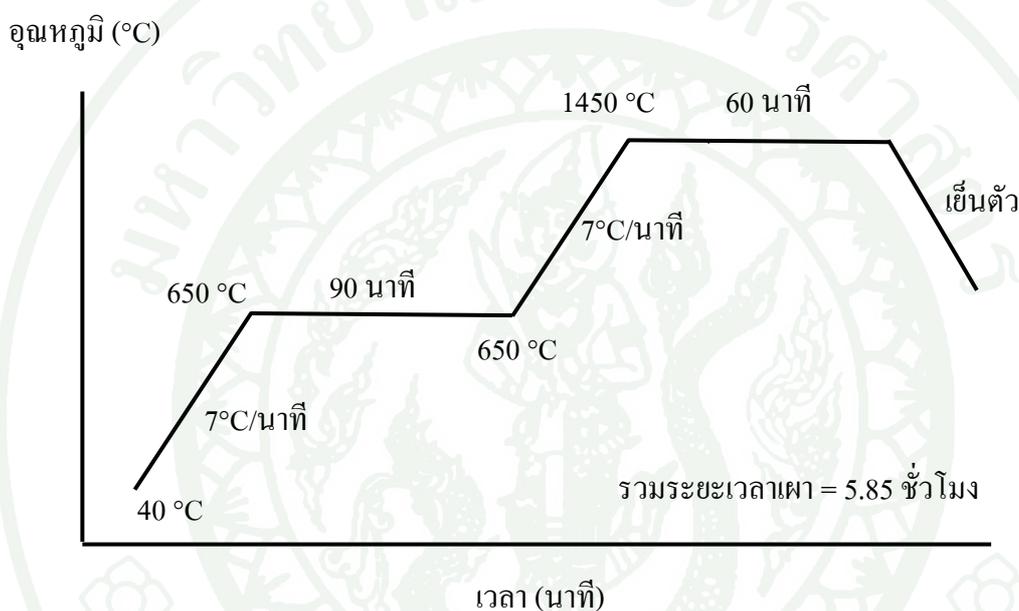
ชนิดกากอุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)								รวม
	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	MgO	K_2O	LOI	
ตะกอนประปา	0.40	17.39	52.19	9.56	0.63	1.04	0.017	17.90	99.12
ฝุ่นผงหินปูน	51.70	-	0.11	0.04	0.01	0.36	0.005	42.40	94.68
เปลือกหอยแครง	53.91	-	0.07	0.02	0.50	0.03	0.002	44.70	99.22

ตารางที่ 7 ตารางแสดงการวิเคราะห์คำนวณค่าไฮเดรชันโมดูลัส

ชนิดกากอุตสาหกรรม	องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)			
	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3
ตะกอนประปา	0.01 (0.04 x 0.25)	4.35 (17.39 x 0.25)	13.05 (52.19 x 0.25)	2.39 (9.56 x 0.25)
ฝุ่นผงหินปูน	25.85 (51.70 x 0.50)	0.00 (0.00 x 0.50)	0.06 (0.11 x 0.50)	0.02 (0.04 x 0.50)
เปลือกหอยแครง	2.70 (53.91 x 0.05)	0.00 (0.00 x 0.05)	0.004 (0.07 x 0.05)	0.001 (0.02 x 0.05)
ปูนขาว	20.00	0.00	0.00	0.00
รวม (%)	48.56	4.35	13.05	2.41

หมายเหตุ ไฮเดรชันโมดูลัส = $48.56 / (4.35 + 13.05 + 2.41) = 2.45$

เมื่อเผาตัวอย่างในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (High Temperature Furnace) ด้วยอุณหภูมิ และระยะเวลาที่แตกต่างกันจนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 1,450 °C พบว่ารูปแบบการเผาที่อุณหภูมิและระยะเวลาในช่วงต่างๆ ที่เหมาะสมคือ เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 40 °C จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 7 °C ต่อ นาที จนถึงอุณหภูมิ 650 °C จากนั้นคงอุณหภูมิเป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 7 °C ต่อ นาที จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 1,450 °C คงอุณหภูมิเป็นเวลา 60 นาที และปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึง อุณหภูมิห้อง รวมระยะเวลาในการเผาเท่ากับ 5.85 ชั่วโมง ภาพที่ 36



ภาพที่ 36 รูปแบบการเผาที่อุณหภูมิและช่วงเวลาต่างๆที่เหมาะสมที่สุด

ที่มา: งานวิจัยร่วมกับ ฌพลและคณะ (2552)

คุณสมบัติของสารเชื่อมประสาน

ผลจากการเผาวัตถุดิบหลักตั้งต้น (Clinkerization) ดังภาพที่ 37 พบว่าเกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นก้อนผลึกแข็งสีเทาดำ (Gray Clinker) ปนอยู่กับผงวัสดุสีน้ำตาลอ่อน (Brown Powder) มีลักษณะคล้ายทรายหยาบดังแสดงในภาพที่ 38 เมื่อนำส่วนที่เป็นผงวัสดุสีน้ำตาลอ่อนมาทดสอบคุณสมบัติการแข็งตัวได้ของเพสต์ (Self Hardening Properties) พบว่าเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนสามารถแข็งตัวและคงรูปโดยไม่มีการละลายตัว (Slaking) หรือเกิดการบวมตัวเมื่อแช่น้ำดังแสดงใน

ภาพที่ 39 ซึ่งแสดงว่าผงวัสดุสีน้ำตาลอ่อนมีคุณสมบัติในเบื้องต้นเป็นสารเชื่อมประสาน (Brown Cementing Material: BCM)

เมื่อนำผงวัสดุเชื่อมประสานสีน้ำตาลอ่อน (BCM) มาเป็นใช้เป็นสารเชื่อมประสานในการทดสอบด้านกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C 109 พบว่า ตัวอย่างมอร์ต้าสามารถคงรูปโดยไม่มีการคลายตัว (Slaking) โดยใช้อัตราส่วน BCM: ทรายมาตรฐาน เท่ากับ 1: 2.75 และอัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสาน (w/c) เท่ากับ 0.485 ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 40 สำหรับภาพที่ 41 แสดงตัวอย่างภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด



ภาพที่ 37 วัสดุดิบหลักตั้งต้นก่อนเผา (น้ำหนัก 100 กรัม)



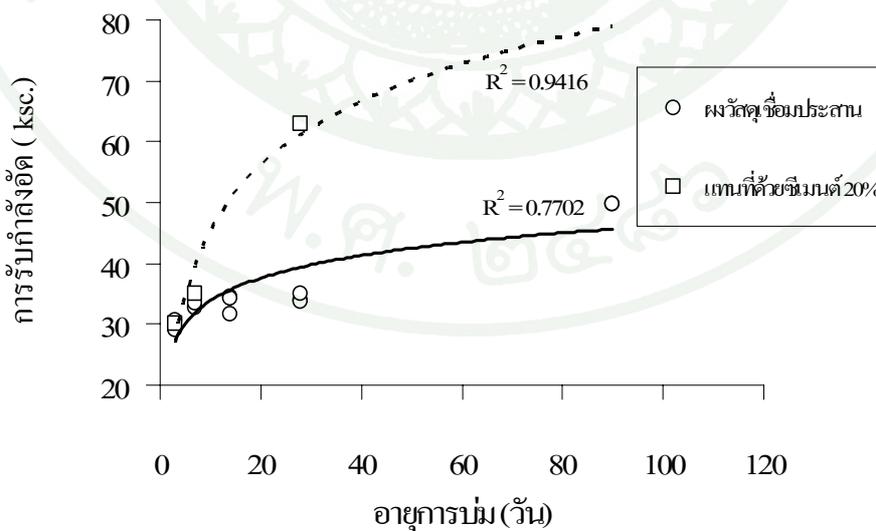
ภาพที่ 38 ปูนเม็ดสีเทาและผงวัสดุสีน้ำตาลอ่อนหลังการเผา



ภาพที่ 39 ผลทดสอบคุณสมบัติการแข็งตัวของปูน
(เพสต์ที่อายุการบ่ม 3 วัน ทดสอบโดยการแช่น้ำ)

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ต้า BCM100% และ BCM:OPC เท่ากับ (80:20)

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (ksc)				
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	90 วัน
BCM 100%	29.62	33.04	33.35	34.21	49.84
BCM80:OPC20	30.08	34.91	55.65	62.97	95.06



ภาพที่ 40 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน



ภาพที่ 41 ตัวอย่างมอร์ต้าภายหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากภาพที่ 40 สังเกตได้ว่ากำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่ผลิตจาก BCM และ BCM 80 % ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) 20 % มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของมอร์ต้าที่ผลิตจาก BCM เท่ากับ 29.62, 33.04, 33.35, 34.21 และ 49.84 ksc ตามลำดับ และเมื่อแทนที่ด้วย OPC 20 % พบว่ากำลังรับแรงอัดมอร์ต้า ที่อายุการบ่ม 3 และ 7 วัน มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างที่ไม่ได้แทนที่ด้วย OPC โดยมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 30.08 และ 34.91 ksc ตามลำดับ ส่วนอายุการบ่มที่ 28 และ 90 วัน การเติม OPC ทำให้การพัฒนากำลังในระยะยาวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่าเท่ากับ 62.97 และ 95.06 ksc ตามลำดับ

จากการสังเกตลักษณะการพืดของตัวอย่างมอร์ต้าทุกช่วงอายุการบ่ม ดังแสดงในภาพที่ 41 พบว่าจะเกิดระนาบพืดในแนวตั้ง ในทิศทางเดียวกันกับแรงที่กระทำ ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะแตกต่างจากระนาบการพืดของมอร์ต้ามาตรฐานที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยมีระนาบการพืดที่ทำมุมประมาณ 45 องศากับแนวแรงที่มากกระทำ อย่างไรก็ตาม BCM ยังมีแนวโน้มความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสารเชื่อมประสานในลักษณะอื่นๆ เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากผลการวิเคราะห์สารประกอบหลักใน ปูนซีเมนต์ OPC ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ X-ray Diffraction (XRD) เปรียบเทียบสารประกอบหลักที่เกิดขึ้นใน BCM ในสภาพแห้ง (Anhydrous) พบว่ามีสารประกอบหลักของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate; C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate; C_2S) เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 42 และภาพที่ 43 โดย

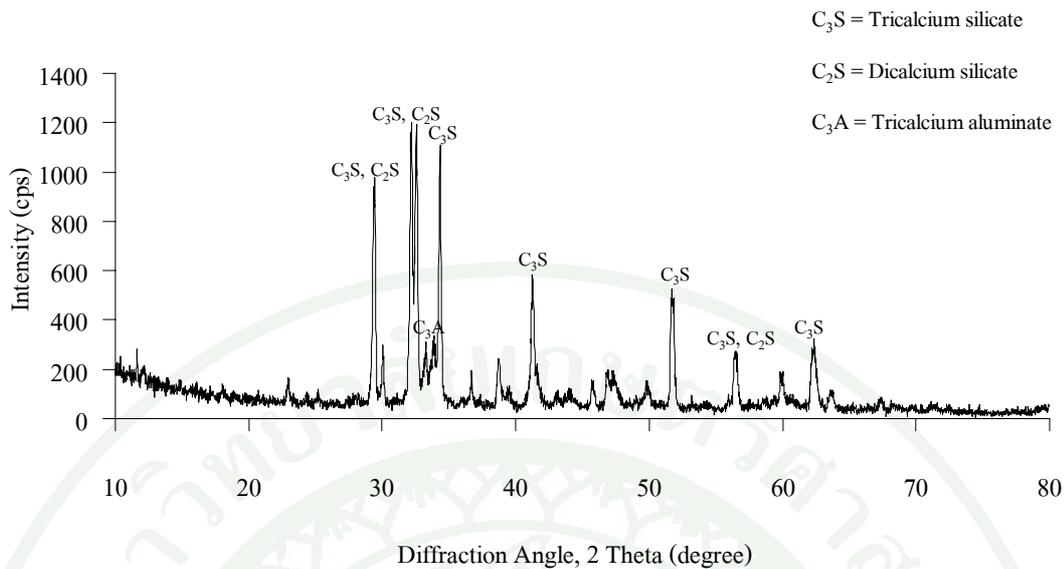
ปูนซีเมนต์ OPC (Anhydrous) มีปริมาณของ C_3S เท่ากับ 1,010 หน่วยต่อวินาที (cps) และ BCM มีปริมาณของ C_3S เท่ากับ 640 cps

เมื่อนำซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ OPC และ BCM มาทำการวิเคราะห์ XRD ที่อายุการบ่ม 3 วัน พบว่าซีเมนต์เพสต์ OPC และ BCM มีปริมาณ C_3S ลดลง จาก 1,010 cps เป็น 522 cps และ จาก 640 cps เป็น 434 cps ตามลำดับดังแสดงในภาพที่ 44 และภาพที่ 45 โดยมีสารผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; CSH) เกิดขึ้นในปริมาณที่เพิ่มขึ้น สำหรับตัวอย่างมอร์ต้า BCM พบว่ามีปริมาณของ CSH ที่อายุการบ่ม 28 และ 90 วัน ดังแสดงในภาพที่ 46 และภาพที่ 47 เพิ่มขึ้นเป็น 239 cps และ 287 cps ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าที่เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม สำหรับ

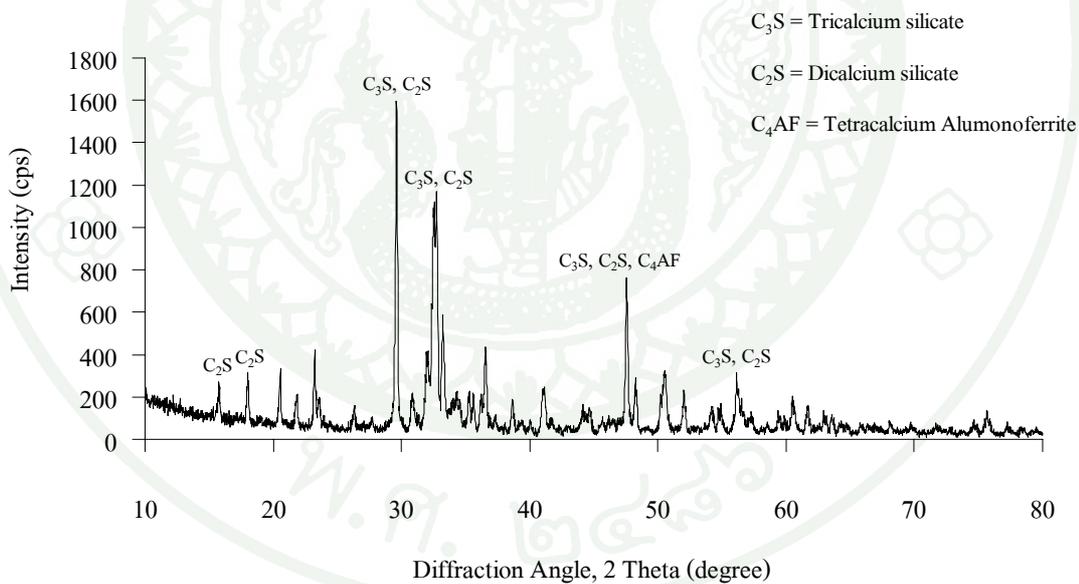
ปริมาณสารประกอบหลักของสารตั้งต้น (Anhydrous) และ สารผลิตภัณฑ์ (Hydrate) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC และ BCM สรุปดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ปริมาณสารประกอบหลักก่อนและหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC และ BCM

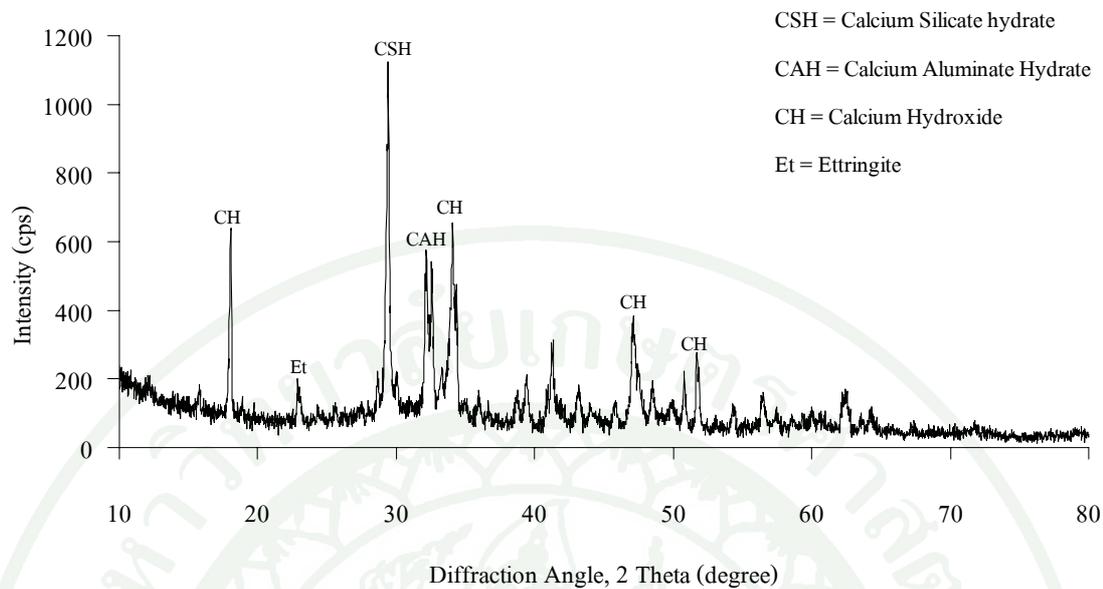
ตัวอย่าง	C_3S (cps)	CSH (cps)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC anhydrous)	1,010	-
BCM (anhydrous)	640	-
ซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 3 วัน	522	1,124
ซีเมนต์เพสต์ BCM ที่อายุการบ่ม 3 วัน	434	366
มอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่ม 28 วัน	314	239
มอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่ม 90 วัน	274	287



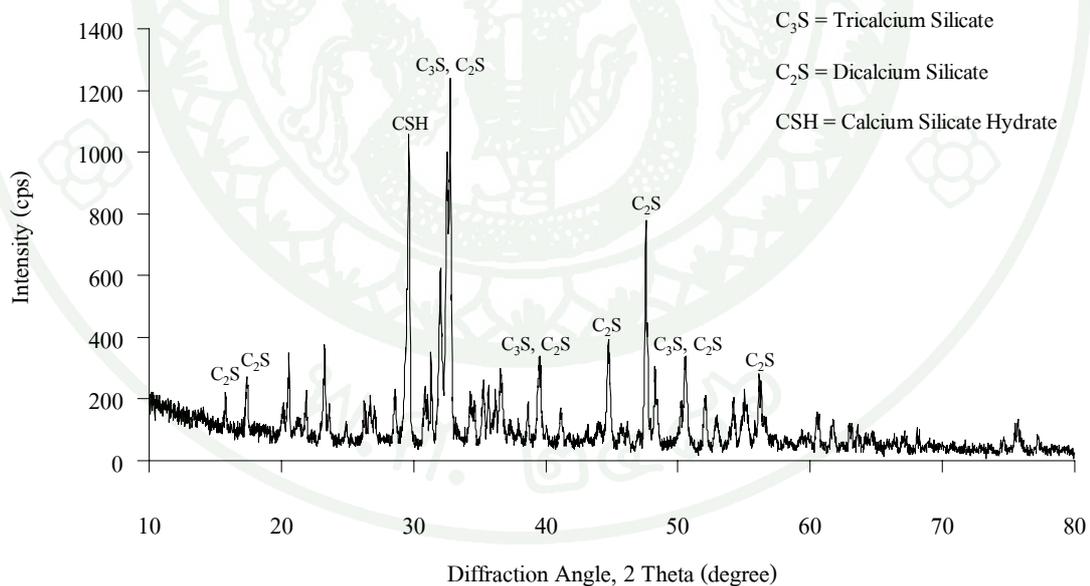
ภาพที่ 42 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ OPC (anhydrous)



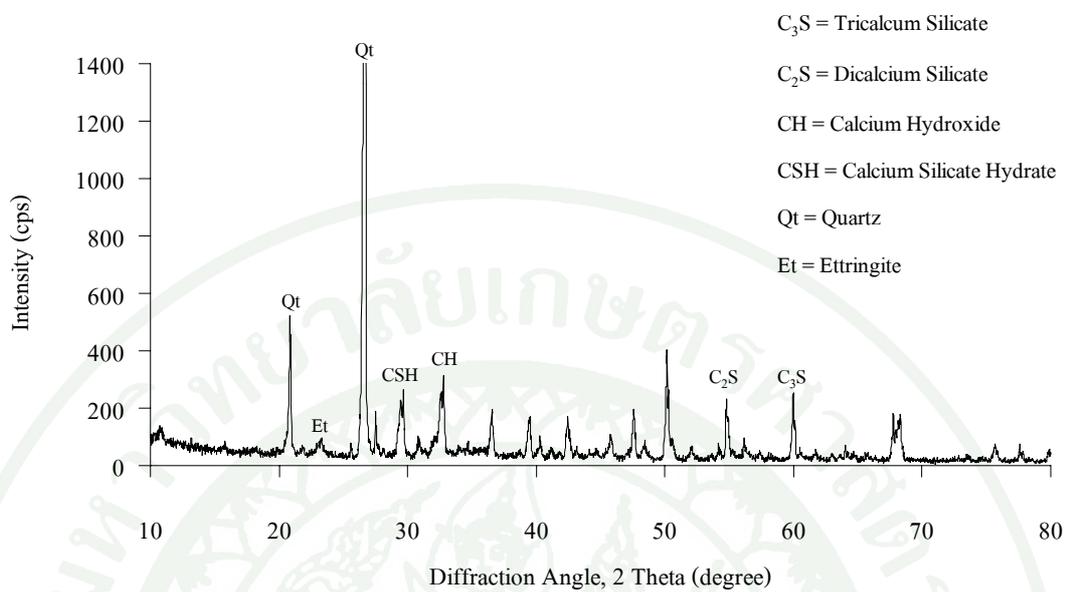
ภาพที่ 43 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ BCM (anhydrous)



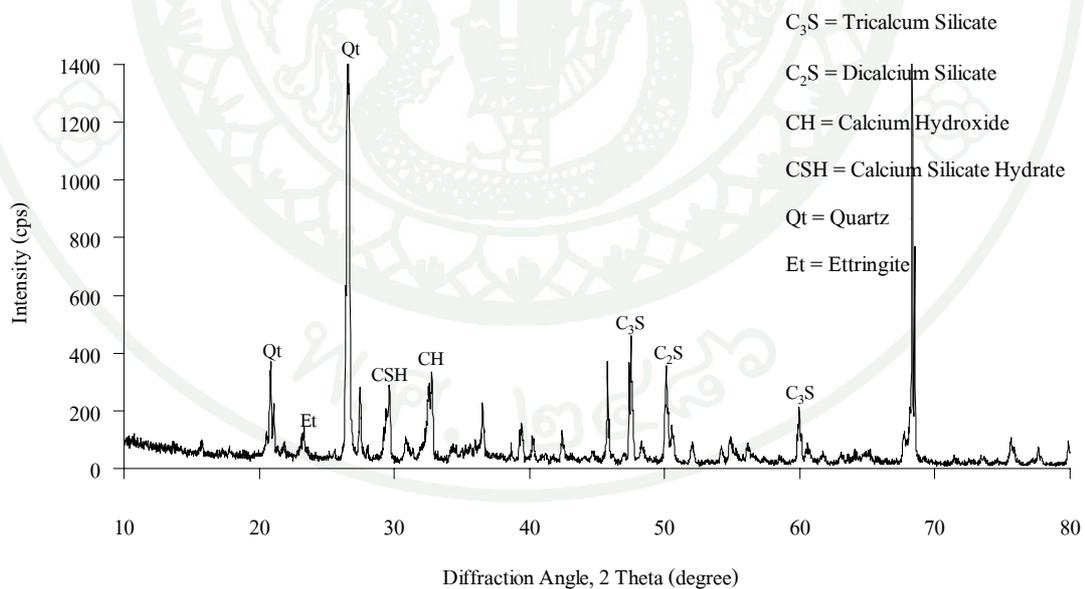
ภาพที่ 44 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 3 วัน



ภาพที่ 45 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ BCM ที่อายุการบ่ม 3 วัน



ภาพที่ 46 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 47 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของมอร์ต้า BCM ที่อายุการบ่ม 90 วัน

คุณสมบัติของสารเชื่อมประสานสีเทา

เนื่องจากวัสดุเชื่อมประสานสีน้ำตาลอ่อน (BCM) เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยกว่าปูนเม็ดสีเทาดำ (Gray Clinker) ในอัตราส่วนเฉลี่ยร้อยละ 9 และ 54 จากการเผาวัตถุดิบตั้งต้น 100 กรัม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเน้นการใช้ประโยชน์จากปูนเม็ดสีเทาดำ (Gray Clinker) โดยทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของปูนเม็ดซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในลำดับต่อไป

เมื่อบดปูนเม็ดสีเทาดำด้วยเครื่องบดละเอียดความเร็วสูง (High speed ball mill) จะได้วัสดุที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทากลายปูนซีเมนต์ (Gray Cementing Material; GCM) ดังภาพที่ 48 จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพพบว่า มีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เท่ากับ 3.20 มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) อยู่ในช่วง 3,500 - 6,600 ตร.ซม./กรัม ซึ่งสูงกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ OPC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,100 ตร.ซม./กรัม



ภาพที่ 48 ผงปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมสีเทาดำ (GCM)



ภาพที่ 49 ซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ GCM

ผลการทดสอบคุณสมบัติการแข็งตัวได้ (Self Hardening Properties) เบื้องต้นของซีเมนต์เพสต์จาก GCM พบว่ามีคุณสมบัติการแข็งตัวได้เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ BCM ดังภาพที่ 49

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี X-ray Fluorescence (XRF) ของปูนซีเมนต์ OPC และปูนซีเมนต์ GCM พบว่า มีออกไซด์หลัก (Major Oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃) มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ปูนซีเมนต์ OPC มีออกไซด์หลักเท่ากับ 65.63 %, 20.26 %, 6.05 % และ 3.11% ตามลำดับ ส่วนปูนซีเมนต์ GCM มีค่าเท่ากับ 64.31 %, 18.42 %, 9.25 % และ 2.63% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ OPC และ GCM โดยวิธี X-ray Fluorescence

ชนิดของปูนซีเมนต์	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	LOI
OPC	65.63	20.26	6.05	3.11	1.07	2.67	1.49
GCM	64.31	18.42	9.25	2.63	1.23	0.09	1.06

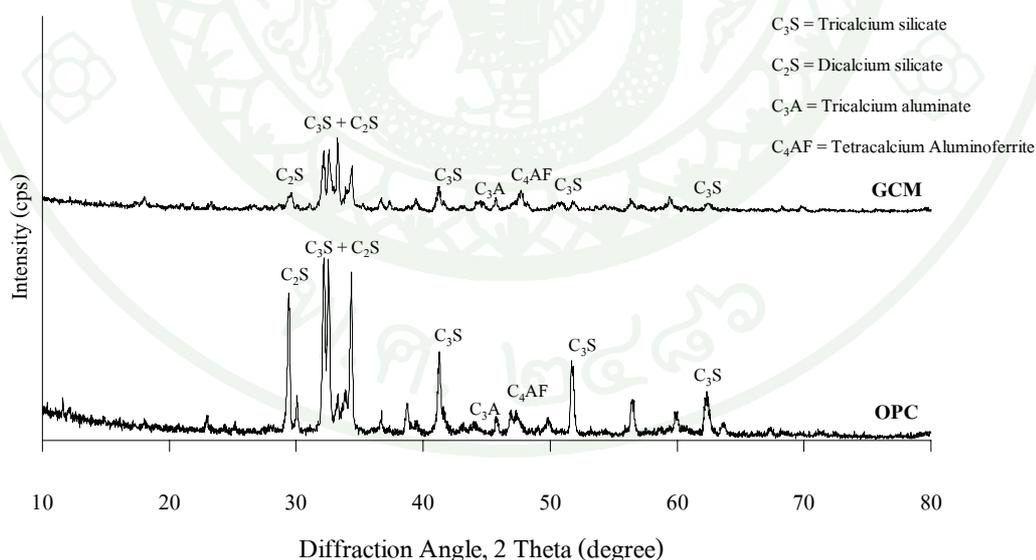
หมายเหตุ LOI (Loss on Ignition) หมายถึง การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา

ตารางที่ 11 สารประกอบหลัก C₃S, C₂S, C₃A และ C₄AF ในสารเชื่อมประสานประเภทต่างๆ

สัญลักษณ์	สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ (%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	60.43	12.83	10.78	9.45
GCM	55.57	11.19	20.07	8.00
GCM:OPC (80:20)	56.54	11.51	18.21	8.29

การคำนวณหาปริมาณสารประกอบหลักของ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate; C_3S), ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate; C_2S), ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate; C_3A) และ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite; C_4AF) ใช้วิธีที่เสนอโดย Bouge and Lerch (1934) ตามมาตรฐาน ASTM C150 พบว่าปูนซีเมนต์ OPC มีปริมาณของ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF เท่ากับ 60.43 %, 12.83 %, 10.78 % และ 9.45% ตามลำดับ ปูนซีเมนต์ GCM มีปริมาณของ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF เท่ากับ 55.57 %, 11.19 %, 20.07 % และ 8.00 % ตามลำดับ สำหรับปูนซีเมนต์ GCM ต่อปูนซีเมนต์ OPC ที่อัตราส่วน 80 : 20 ใช้วิธีคำนวณจากสัดส่วนของสารประกอบหลักของปูน GCM ต่อปูนซีเมนต์ OPC ที่อัตราส่วน 80 : 20 ได้เท่ากับ 56.54 %, 11.51 %, 18.21 % และ 8.29 % ตามลำดับ จากตารางที่ 11 พบว่าปริมาณ C_3S , C_2S และ C_4AF ของปูนซีเมนต์ OPC มีปริมาณมากกว่าปูนซีเมนต์ GCM เท่ากับ 4.86 %, 1.64 % และ 1.45 % ตามลำดับ แต่ปูนซีเมนต์ GCM มีปริมาณ C_3A มากกว่าปูนซีเมนต์ OPC อยู่เท่ากับ 9.29 %

เมื่อเปรียบเทียบสารประกอบหลัก (Major Compounds) โดยยืนยันจากผลการทดสอบโดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) ในภาพที่ 50 พบว่าปูนซีเมนต์ GCM มีสารประกอบหลัก (Bouge's Compounds) เช่นเดียวกับที่พบในปูนซีเมนต์ OPC



ภาพที่ 50 ผลการวิเคราะห์ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC และปูนซีเมนต์ GCM (Anhydrous)

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของปูนซีเมนต์ BCM และปูนซีเมนต์ GCM

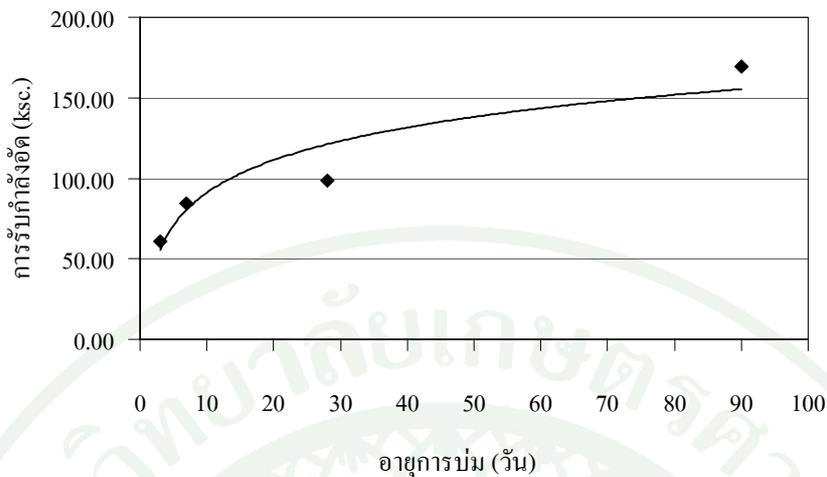
ตัวอย่าง	Cu	Cd	Cr	Pb	Ni	Zn
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
ปูน BCM	14.78	0.68	21.39	3.16	9.93	29.80
ปูน GCM	28.53	ND	27.71	4.30	16.90	153.26
USEPA	1,500.00	39.00	3,000.00	420.00	18.00	2,800.00

หมายเหตุ ND (Not Detected) หมายถึง ตรวจไม่พบ

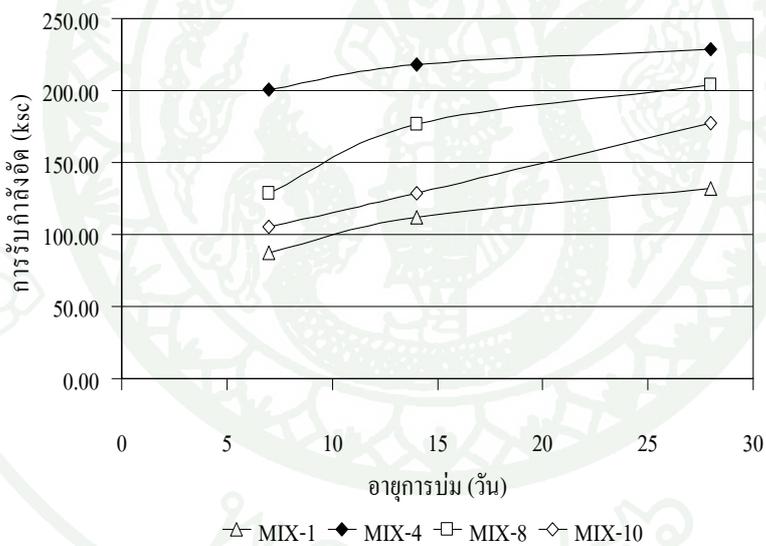
จากการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก (Heavy metal) ของสารเชื่อมประสาน BCM และปูนซีเมนต์ GCM ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectrophotometer ดังแสดงในตารางที่ 12 พบว่าปูนซีเมนต์ BCM และปูนซีเมนต์ GCM มีปริมาณโลหะหนักมีปริมาณโลหะหนักน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดย USEPA (United State Environmental Protection Agency) โดย BCM มีปริมาณทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ตะกั่ว (Pb) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) โลหะหนักเท่ากับ 14.78, 0.68, 21.39, 3.16, 9.93 และ 29.80 mg/kg ตามลำดับ และปูนซีเมนต์ GCM มีปริมาณโลหะหนักเท่ากับ 28.53, ND, 27.71, 4.30, 16.90 และ 153.26 mg/kg ตามลำดับ

จากภาพที่ 51 แสดงกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่ผลิตจาก GCM (ความละเอียด 3,500 ตร.ซม. ต่อกรัม) ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ผลการทดลองยืนยันว่ากำลังมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของมอร์ต้าที่ผลิตจาก GCM เท่ากับ 60.62, 84.38, 98.50 และ 169.17 ksc ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับสารเชื่อมประสาน BCM พบว่า GCM เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีกว่า ซึ่งสังเกตจากการทำปฏิกิริยากับน้ำในช่วงเริ่มต้นที่เร็วกว่า ผลการวิเคราะห์ XRD พบว่าปริมาณ CSH ที่ตรวจพบในตัวอย่าง GCM มอร์ต้าที่อายุ 3 วันมีค่าเท่ากับ 236 cps ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณ CSH ในตัวอย่าง BCM มอร์ต้า ที่อายุ 28 วันซึ่งตรวจวัดค่าได้เท่ากับ 239 cps จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าที่ผลิตจาก GCM สูงกว่าตั้งแต่ช่วงต้นจนตลอดอายุของการบ่มในระยะยาว

ผลการวิเคราะห์แสดงว่าสารเชื่อมประสาน BCM และปูนซีเมนต์ GCM เป็นวัสดุสังเคราะห์ชนิดใหม่ที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Non-hazardous Material) มีศักยภาพที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ OPC เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติต่างๆ ในภาพรวม โดยสนับสนุนแนวคิดในการจัดการขยะแบบผสมผสาน (Combined waste utilization)

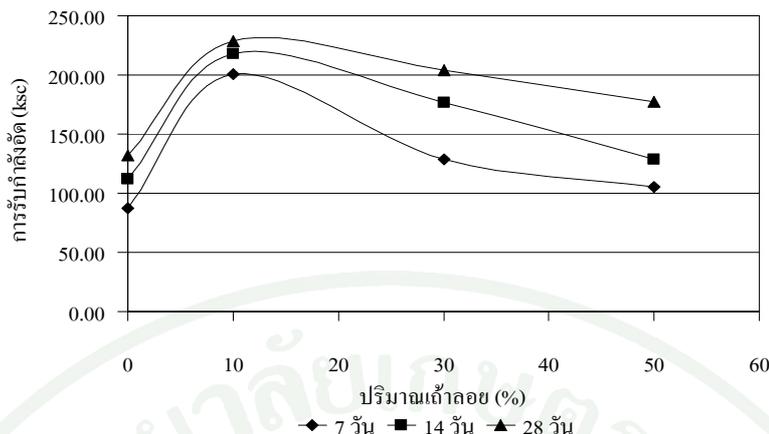


ภาพที่ 51 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า GCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน

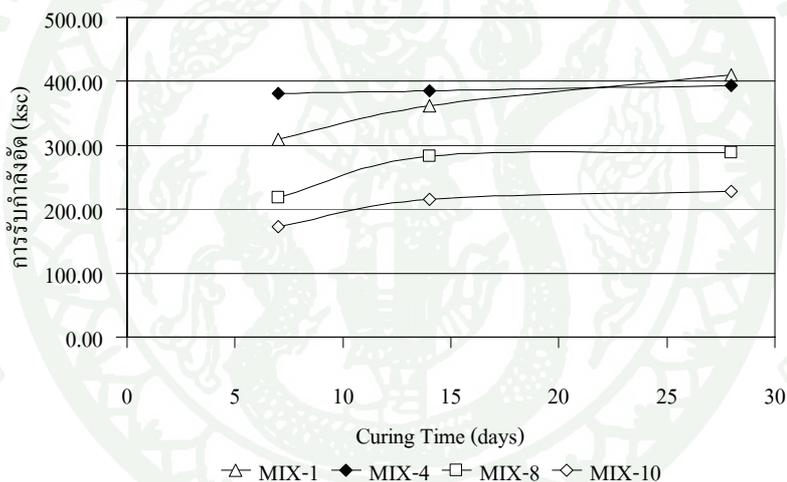


ภาพที่ 52 กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารูปทรงกระบอกของ OPC ที่ผสมเถ้าลอย

ภาพที่ 52 แสดงกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้ารูปทรงกระบอกของปูนซีเมนต์ (MIX-1) เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์มีเถ้าลอยลิกไนต์แทนที่ในสัดส่วน 10% (MIX-4), 30 % (MIX-8) และ 50% (MIX-10) โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าทุกสัดส่วนผสมมีการพัฒนากำลังตามอายุการบ่ม และมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่า MIX-1 ในทุกกรณี ทั้งนี้อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังลดลงตามปริมาณเถ้าลอยดังแสดงในภาพที่ 53

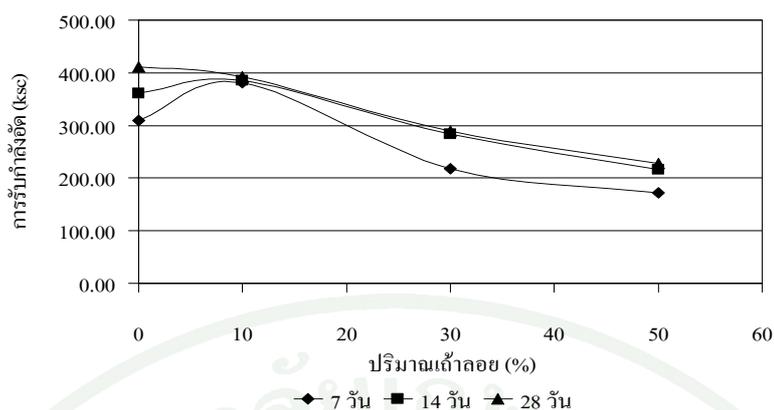


ภาพที่ 53 กำลังรับแรงอัดมอร์ตารูปทรงกระบอกกับปริมาณแก้าลอย

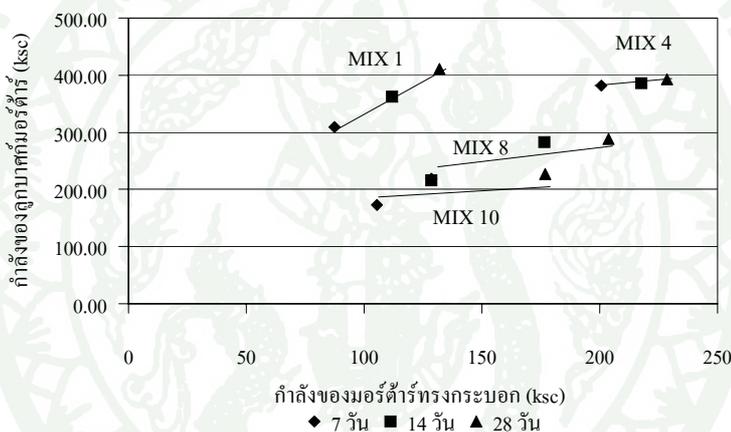


ภาพที่ 54 กำลังรับแรงอัดมอร์ตารูปลูกบาศก์ของ OPC ที่ผสมแก้าลอย

ภาพที่ 54 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตารูปลูกบาศก์ของ OPC ที่ผสมแก้าลอยที่อายุการบ่มต่างๆ ผลการทดสอบพบว่ามอร์ตารูปลูกบาศก์พัฒนากำลังค่อนข้างมากในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้น กำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สัดส่วนผสมของแก้าลอย 10 % ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด และมีค่ามากกว่ามอร์ตารูปลูกบาศก์ของ OPC อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณแก้าลอยที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 55 เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดมอร์ตารูปที่สัดส่วนผสมเดียวกันพบว่ามอร์ตารูปลูกบาศก์มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตารูปทรงกระบอก สำหรับความสัมพันธ์สามารถแสดงดังภาพที่ 56



ภาพที่ 55 กำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปลูกบาศก์กับปริมาณเถ้าลอย



ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปลูกบาศก์กับรูปทรงกระบอก

การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM เป็นวัสดุก่อสร้าง การประยุกต์ใช้ปูนซีเมนต์ GCM ในการผลิตคอนกรีตพูนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การศึกษาในลำดับต่อมาได้ทดลองนำปูนซีเมนต์ GCM เป็นสารเชื่อมประสานผลิตตัวอย่าง คอนกรีตพูนรูปลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ เปรียบเทียบกับเมื่อใช้ปูนซีเมนต์ OPC โดยออกแบบ ที่อัตราส่วนโพรงเท่ากับ 30% และใช้มวลรวมหยาบ (หินปูน) ขนาดผ่านตะแกรง 3/8" อัตราส่วน เพลสต์ต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.235 อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสาน (w/c) อยู่ในช่วง 0.30 – 0.60 และสารผสมเพิ่ม (Type F) อยู่ในช่วง 1 – 3 % สัญลักษณ์และสัดส่วนผสมคอนกรีตพูนสรุป ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 อัตราส่วนผสมต่างๆของคอนกรีตพูนที่อัตราส่วนโพรง 30 %

สัญลักษณ์	สารเชื่อมประสาน (%)		w/c ratio	สารผสมเพิ่ม Type F (%)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm ² /g)
	OPC	GCM			
MIX-1	100	0	0.30	1.0	3,100
MIX-2	0	100	0.60	3.0	6,600
MIX-3	20	80	0.60	3.0	5,860



(ก) MIX-1 (OPC)



(ข) MIX-2 (GCM)



(ค) MIX-3 (GCM80:OPC20)

ภาพที่ 57 ตัวอย่างคอนกรีตพูนก่อนการทดสอบ

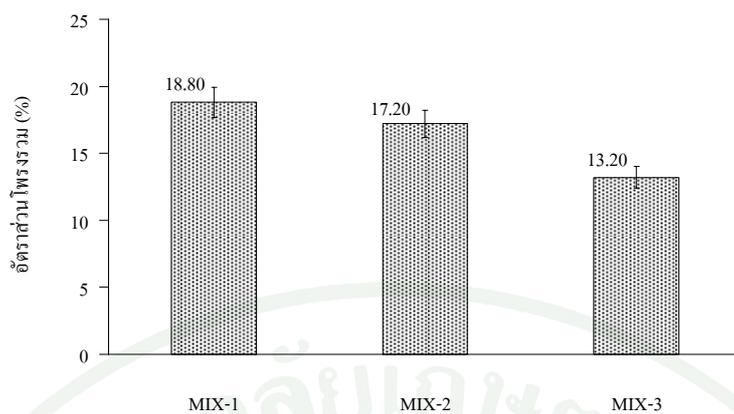
ตารางที่ 14 คุณสมบัติทางด้านกายภาพและวิศวกรรมของคอนกรีตพูน

สัญลักษณ์	อัตราส่วนโพรงรวม (%)	อัตราส่วนโพรงต่อเนื่อง (%)	ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำ (cm/s)	กำลังรับแรงอัด (ksc)		
				7 วัน	28 วัน	90 วัน
MIX-1	18.80	18.48	0.81	145.80	153.40	214.10
MIX-2	17.20	13.12	0.68	40.64	52.60	72.71
MIX-3	13.20	12.80	0.55	54.43	73.60	N.A.

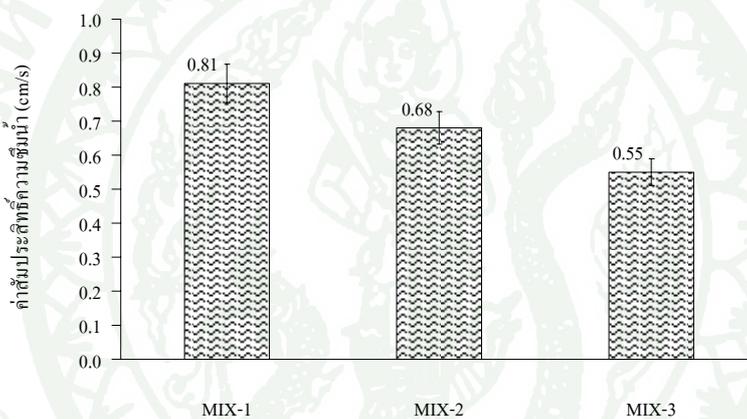
ภาพที่ 57 แสดงตัวอย่างคอนกรีตพูนที่ผลิตด้วยปูนซีเมนต์ OPC และ GCM จากการสังเกต ตัวอย่างคอนกรีตพูนด้วยตาเปล่า พบว่าคอนกรีตพูน OPC (MIX-1) มีสีเทาเข้ม ผิวมันวาวและมีการเชื่อมประสานระหว่างมวลรวมหยาบกับซีเมนต์เพสต์ที่สมบูรณ์ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตพูน GCM (MIX-2) และ MIX-3 ซึ่งเป็นคอนกรีตพูนที่แทนที่ GCM ด้วยปูนซีเมนต์ OPC ในอัตราส่วน 20 % โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะคล้าย MIX-1 แต่จะมีสีอ่อนกว่า ดังแสดงในภาพที่ 57 (ก) - (ค)

คุณสมบัติทางด้านกายภาพและวิศวกรรมของคอนกรีตพูนที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ GCM เปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ OPC แสดงดังตารางที่ 14 ผลจากการทดสอบ พบว่าค่าอัตราส่วนโพรงรวมของ MIX-1, MIX-2 และ MIX-3 มีค่าเท่ากับ 18.80 %, 17.20 % และ 13.20% ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนโพรงต่อเนื่องของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3 มีค่าเท่ากับ 18.48, 13.12 และ 12.80 % ตามลำดับ ภาพที่ 58 และภาพที่ 59 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนโพรงพบว่า MIX-1 มีค่าสูงกว่า MIX-2 และ MIX-3 ตามลำดับ

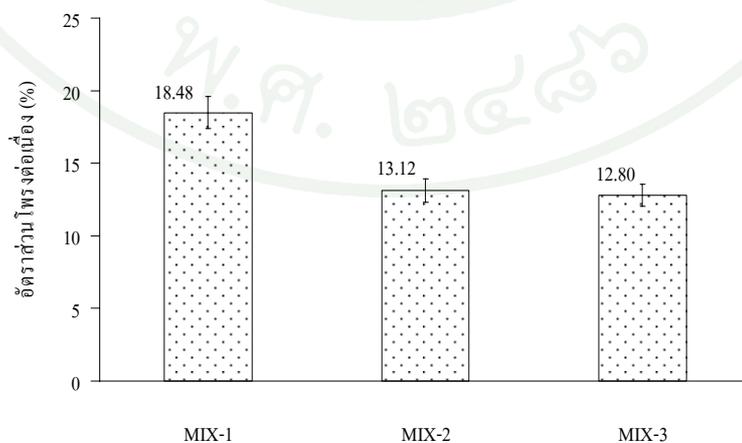
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของคอนกรีตพูนพบว่า MIX-1 (0.81 cm/s) มีค่าสูงกว่า MIX-2 (0.68 cm/s) และ MIX-3 (0.55 cm/s) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 60 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราส่วนโพรง กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนโพรงรวมและอัตราส่วนโพรงต่อเนื่องสูง จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำสูงขึ้นด้วย ค่าอัตราส่วนโพรงและค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้



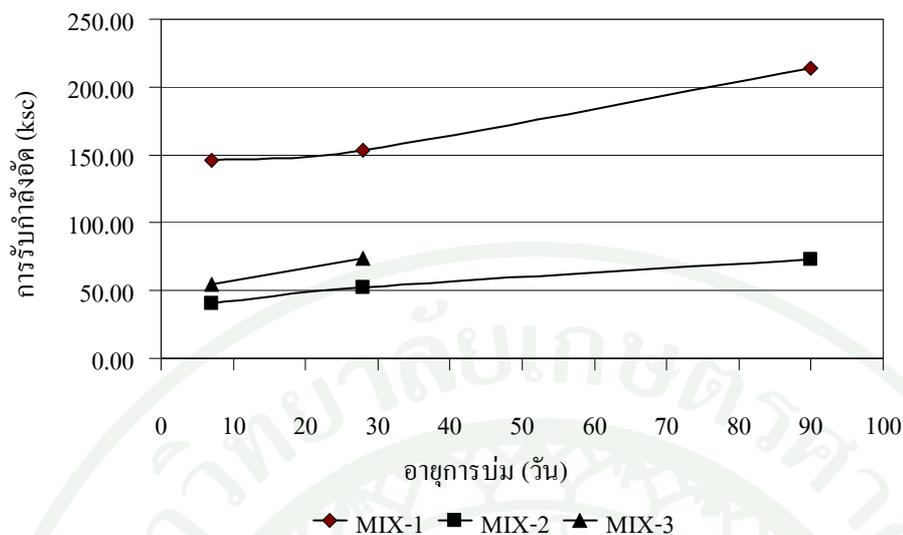
ภาพที่ 58 อัตราส่วนโพรงรวมของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3



ภาพที่ 59 อัตราส่วนโพรงต่อเนื่องของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3



ภาพที่ 60 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3



ภาพที่ 61 กำลังรับแรงอัดของ MIX-1 MIX-2 และ MIX-3 ที่อายุการบ่มต่างๆ

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนที่ผลิตโดยใช้ปูนซีเมนต์ OPC และ GCM ดังแสดงในภาพที่ 61 พบว่ามีการพัฒนากำลังอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม โดย MIX-1 มีค่ากำลังสูงกว่า MIX-2 ที่อายุการบ่ม 7 วันประมาณ 3.6 เท่า อย่างไรก็ตาม เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ GCM ด้วยปูนซีเมนต์ OPC ที่ 20 % โดยน้ำหนัก มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เช่น กำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ของ MIX-3 มีค่า 73.60 ksc ซึ่งสูงกว่า MIX-2 ประมาณ 1.40 เท่าที่อายุการบ่มเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตพูนมีการพัฒนากำลังอย่างชัดเจนในระยะยาว



(ก) MIX-2 (GCM)



(ข) MIX-3 (GCM80: OPC20)

ภาพที่ 62 ลักษณะของตัวอย่างคอนกรีตพูนภายหลังการพืบัติ

เมื่อสังเกตลักษณะของตัวอย่างคอนกรีตพูนภายหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า MIX-2 ในภาพที่ 62 (ก) จะมีรอยแตกชัดเจนกว่า MIX-3 ในภาพที่ 62 (ข) นอกจากนี้ยังพบการหลุดร่อนของมวลรวมหยาบบริเวณผิวมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตพูน MIX-3 แสดงว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ OPC บางส่วนในปูนซีเมนต์ GCM ทำให้คอนกรีตพูนเชื่อมประสานได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

แนวคิดในการจัดการขยะแบบผสมผสานร่วมกับการจัดการขยะชนิดเดียว :

การประยุกต์ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับปูนซีเมนต์ GCM และปูนซีเมนต์ OPC ผลิตคอนกรีตพูน

เพื่อพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ GCM และปูนซีเมนต์ OPC ให้ดียิ่งขึ้น จึงนำแนวคิดในการจัดการขยะแบบผสมผสานร่วมกับการจัดการขยะชนิดเดียว (Single waste utilization) โดยทดลองผลิตตัวอย่างคอนกรีตพูนรูปลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ด้วยปูนซีเมนต์ GCM และปูนซีเมนต์ OPC เป็นสารเชื่อมประสาน ร่วมกับเถ้าลอยลิกไนต์ในสัดส่วนผสมต่างๆ เริ่มตั้งแต่ 10 - 50% โดยน้ำหนัก ตัวอย่างคอนกรีตพูนถูกออกแบบโดยใช้มวลรวมหยาบ (หินปูน) ขนาดผ่านตะแกรง 3/8" อัตราส่วนเปสต์ต่อมวลรวมหยาบเท่ากับ 0.235 อัตราส่วนน้ำต่อสารเชื่อมประสาน (w/c) อยู่ในช่วง 0.10 - 0.60 และสารผสมเพิ่มอยู่ในช่วง 1 - 3% สำหรับสัญลักษณ์และสัดส่วนผสมต่างๆ ของคอนกรีตพูน แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 สัดส่วนผสมของปูนซีเมนต์ GCM และปูนซีเมนต์ OPC กับเถ้าลอยลิกไนต์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมประสานผลิตคอนกรีตพูน

สัญลักษณ์	สารเชื่อมประสาน (%)		เถ้าลอย (FA) (%)	w/c ratio	สารผสมเพิ่ม Type F (%)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm^2/g)
	OPC	GCM				
MIX-4	90	0	10	0.30	1	3,290
MIX-5	80	0	20	0.30	1	3,230
MIX-6	0	90	10	0.60	3	6,245
MIX-7	0	80	20	0.53	3	5,750
MIX-8	70	0	30	0.26	1	3,160
MIX-9	60	0	40	0.24	1	3,190
MIX-10	50	0	50	0.15	1	3,210

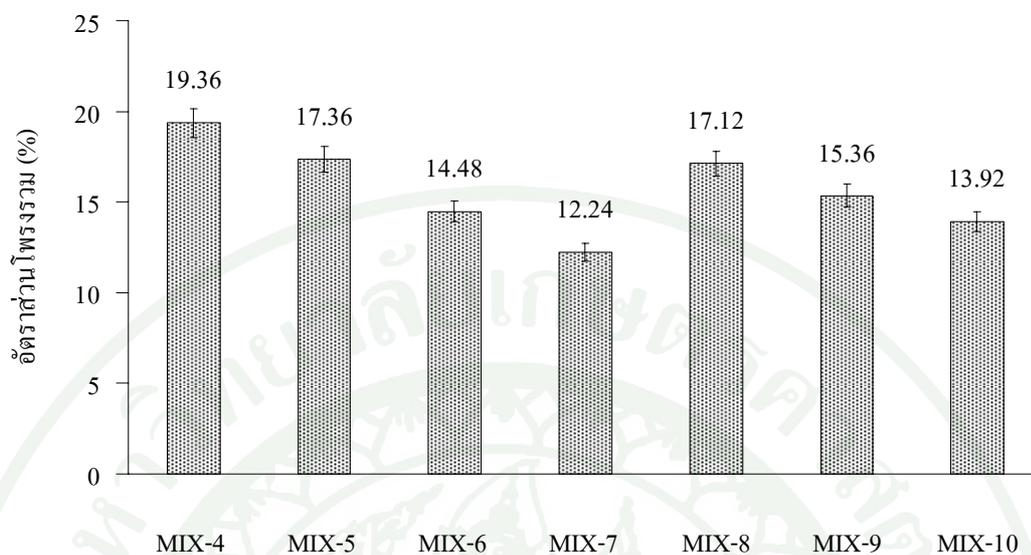
ตารางที่ 16 อัตราส่วนโพรงและค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของคอนกรีตพูน MIX-4 ถึง MIX-10 ที่อายุการบ่ม 28 วัน

สัญลักษณ์	อัตราส่วนโพรงรวม (%)	อัตราส่วนโพรงต่อเนื่อง (%)	ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ (cm/s)
MIX-4	19.36	18.88	0.78
MIX-5	17.36	16.40	0.69
MIX-6	14.48	8.96	0.52
MIX-7	12.24	5.26	0.45
MIX-8	17.12	15.20	0.58
MIX-9	15.36	14.64	0.54
MIX-10	13.92	13.52	0.51

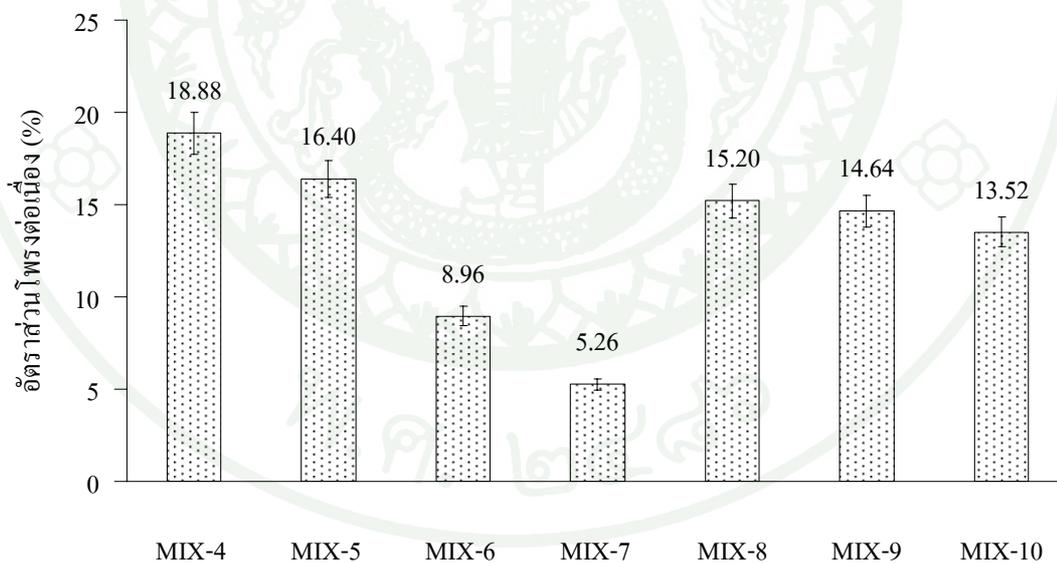
อัตราส่วนโพรง (Void ratio) และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำ (Coefficient of water permeability)

จากผลการทดสอบอัตราส่วนโพรงรวม อัตราส่วนโพรงต่อเนื่อง และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของคอนกรีตพูน MIX-4 ถึง MIX-10 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในตารางที่ 16 พบว่าค่าอัตราส่วนโพรงรวม อัตราส่วนโพรงต่อเนื่อง และค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของคอนกรีตพูน MIX-4, MIX-5, MIX-8, MIX-9 และ MIX-10 ซึ่งเป็นคอนกรีตพูนที่ใช้ปูนซีเมนต์ OPC กับเถ้าลอยเป็นสัดส่วนผสม มีค่าสูงกว่าคอนกรีตพูน MIX-6 และ MIX-7 ที่ใช้ปูนซีเมนต์ GCM ผสมร่วมกับเถ้าลอย

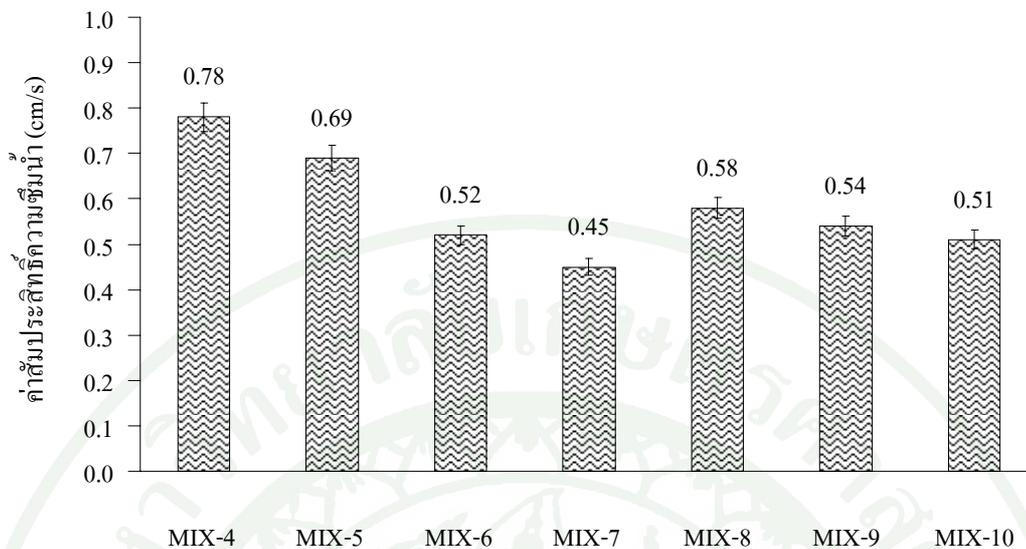
อัตราส่วนโพรงและสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำคอนกรีตพูนของทุกสัดส่วน มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น เช่นเมื่อเถ้าลอยเพิ่มขึ้น 10 - 50 % อัตราส่วนโพรงรวมของคอนกรีตพูนที่ใช้ปูนซีเมนต์ OPC กับเถ้าลอยจะมีค่าเป็น 19.36 %, 17.36 %, 17.12 %, 15.36 % และ 13.92 % ดังแสดงในภาพที่ 63 - ภาพที่ 65 ทั้งนี้จากการวิเคราะห์อัตราส่วนโพรงและค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำของคอนกรีตพูนทุกสัดส่วนผสมพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นดังแสดงในภาพที่ 66



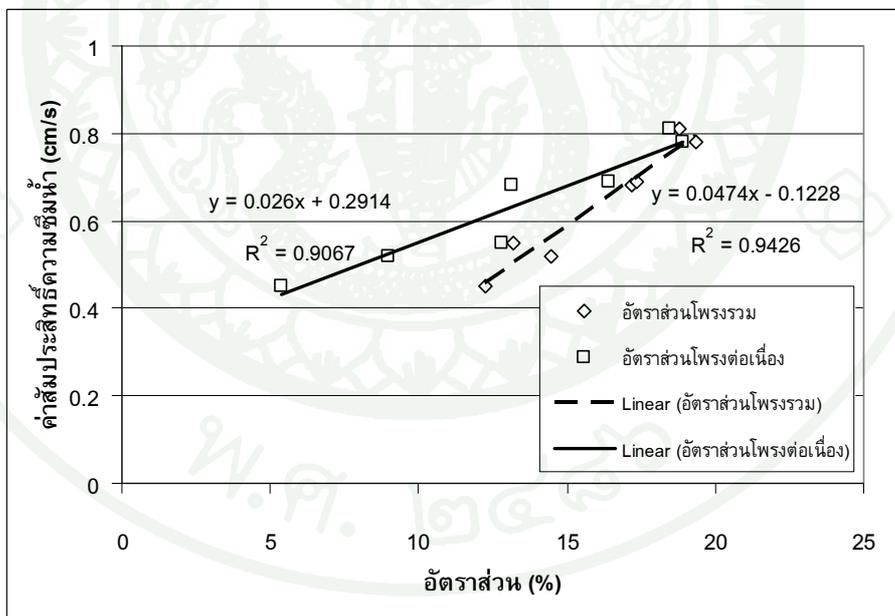
ภาพที่ 63 อัตราส่วนโพรงรวมของ MIX-4 ถึง MIX-10



ภาพที่ 64 อัตราส่วนโพรงต่อเนื้อของ MIX-4 ถึง MIX-10



ภาพที่ 65 ค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำของ MIX-4 ถึง MIX-10



ภาพที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำและอัตราส่วนโพรง

กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าคอนกรีตพูน

ตัวอย่างมอร์ต้าคอนกรีตพูน MIX-4 ถึง MIX-10 มีความสมบูรณ์โดยสังเกตจากการเชื่อมประสานระหว่างมวลรวบหยาบกับซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตามจะสังเกตพบว่า คอนกรีตพูนที่ใช้ปูนซีเมนต์ OPC กับเถ้าลอยเป็นสัดส่วนผสม คือ MIX-4, MIX-5, MIX-8, MIX-9 และ MIX-10 จะมีสีเข้มกว่าคอนกรีตพูนที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ GCM กับเถ้าลอย คือ MIX-6 และ MIX-7 ดังแสดงในภาพที่ 67 ถึง ภาพที่ 73 ซึ่งเป็นตัวอย่างคอนกรีตพูนที่อายุ 7 วัน



ภาพที่ 67 คอนกรีตพูน MIX-4 (OPC90 : FA10)



ภาพที่ 68 คอนกรีตพูน MIX-5 (OPC80 : FA20)



ภาพที่ 69 คอนกรีตพูน MIX-6 (GCM90 : FA10)



ภาพที่ 70 คอนกรีตพูน MIX-7 (GCM80 : FA20)



ภาพที่ 71 คอนกรีตพูน MIX-8 (OPC70 : FA30)



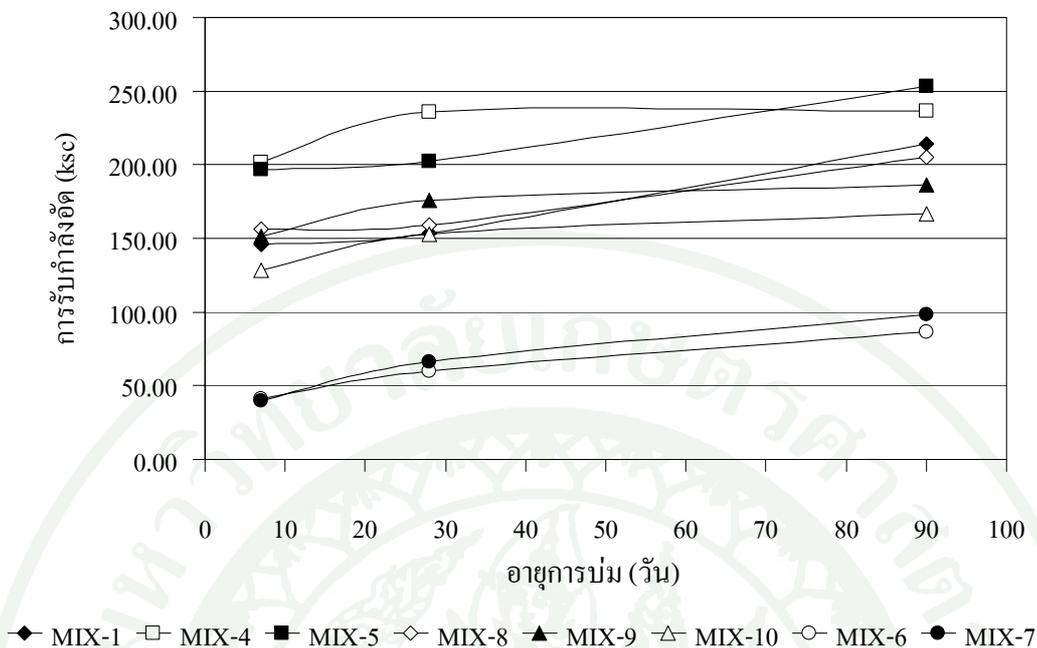
ภาพที่ 72 คอนกรีตพูน MIX-9 (OPC60 : FA40)



ภาพที่ 73 คอนกรีตพูน MIX-10 (OPC50 : FA50)

ตารางที่ 17 กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าของคอนกรีตพูน MIX-4 ถึง MIX-10

สัญลักษณ์	กำลังรับแรงอัด (ksc)		
	7 วัน	28 วัน	90 วัน
MIX-4	201.70	236.10	236.80
MIX-5	196.90	202.20	253.60
MIX-6	41.00	60.30	86.60
MIX-7	39.80	66.10	98.70
MIX-8	156.30	159.00	204.80
MIX-9	151.40	175.60	186.60
MIX-10	128.40	153.10	166.80

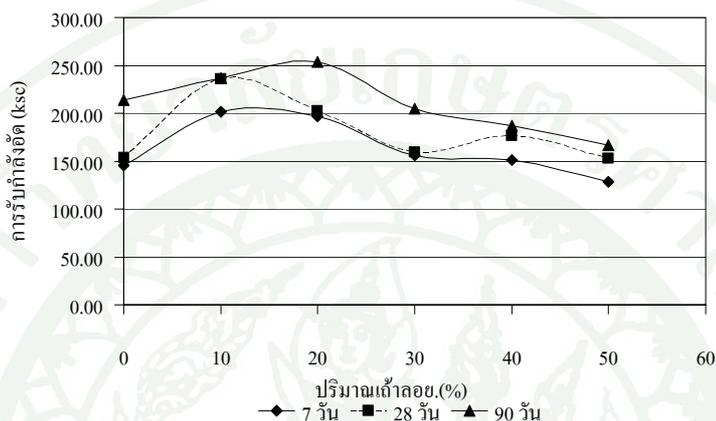


ภาพที่ 74 กำลังรับแรงอัดของ MIX-4 ถึง MIX-10 ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่อายุต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 17 และภาพที่ 74 พบว่าคอนกรีตที่ใช้น้ำปูนซีเมนต์ OPC กับเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานในส่วนผสมของ MIX-4, MIX-5, MIX-8, MIX-9 และ MIX-10 มีกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 7 วันเพิ่มขึ้นเท่ากับ 201.70, 196.90, 156.30, 151.40 และ 128.40 ksc ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่อายุการบ่มช่วงต้น ปริมาณเถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์ OPC ในช่วง 10 - 40 % โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ากรณีที่ไม่มีเถ้าลอย (MIX-1) ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 145.80 ksc

สำหรับกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน เถ้าลอยเล็กน้อยยังคงมีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตทุกสัดส่วนผสมมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าหรือเท่ากับ MIX-1 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัด 153.40 ksc ที่ 28 วัน สำหรับ MIX-4, MIX-5, MIX-8, MIX-9 และ MIX-10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับ 236.10, 202.20, 159.00, 175.60 และ 153.10 ksc ตามลำดับ

ที่อายุการบ่ม 90 วัน คอนกรีตพูนที่สัดส่วนผสมต่างๆมีการพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่อง แต่จะสังเกตเห็นชัดเจนพบว่าอัตราการพัฒนากำลังในระยะยาวมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนผสมของเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ OPC เพิ่มขึ้นมากกว่า 30 % ดังแสดงในกราฟการพัฒนากำลังของ MIX-4, MIX-5, MIX-8 เปรียบเทียบกับ MIX-9 และ MIX-10 ในภาพที่ 74 และภาพที่ 75



ภาพที่ 75 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูน OPC ที่ปริมาณเถ้าลอย 10% - 50%

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ต้าคอนกรีตพูนที่ใช้ปูนซีเมนต์ GCM กับเถ้าลอยเป็นสารเชื่อมประสานจากตารางที่ 17 พบว่าเถ้าลอยมีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้กำลังพัฒนาขึ้นอย่างชัดเจนในระยะยาว เช่น ในส่วนผสมของ MIX-6 และ MIX-7 ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 41.00 และ 39.80 ksc ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 60.30 และ 66.10 ksc และที่อายุการบ่ม 90 วัน กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็น 86.60 ksc และ 98.70 ksc ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเถ้าลอยที่แทนที่ในปูนซีเมนต์ GCM ในสัดส่วนผสมอยู่ในช่วง 10% - 20%

จากการทดลองพบว่าตัวอย่างคอนกรีตพูนหลังการทดสอบจะมีรอยแตก (Cracks) แบ่งเป็น 2 ลักษณะกล่าวคือในคอนกรีตพูนที่มีกำลังรับแรงอัดสูงจะพบรอยแตกผ่านมวลรวมหยาบ คือ MIX-4, MIX-5, MIX-8, MIX-9 และ MIX-10 ภาพที่ 76 (ก) - (จ) ส่วนคอนกรีตพูนที่มีกำลังค่อนข้างต่ำจะพบรอยแตกบริเวณที่เป็นซีเมนต์เพสต์แข็งตัว คือ MIX-6 และ MIX-7 ภาพที่ 76 (ฉ) - (ซ)



(ก) รอยแตกคอนกรีตพูน MIX-4



(ข) รอยแตกคอนกรีตพูน MIX-5



(ค) รอยแตกคอนกรีตพูน MIX-8

ภาพที่ 76 รอยแตกของตัวอย่างคอนกรีตพูนที่อายุการบ่ม 7 วัน



(ง) รอยแตกคอนกรีตพูน MIX-9



(จ) รอยแตกคอนกรีตพูน MIX-10

ภาพที่ 76 (ต่อ)



(จ) รอยแตกคอนกรีตพูน MIX-6

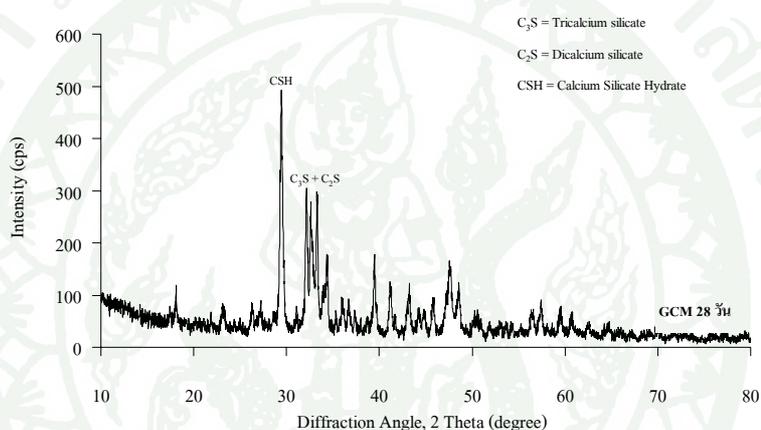


(ข) รอยแตกคอนกรีตพูน MIX-7

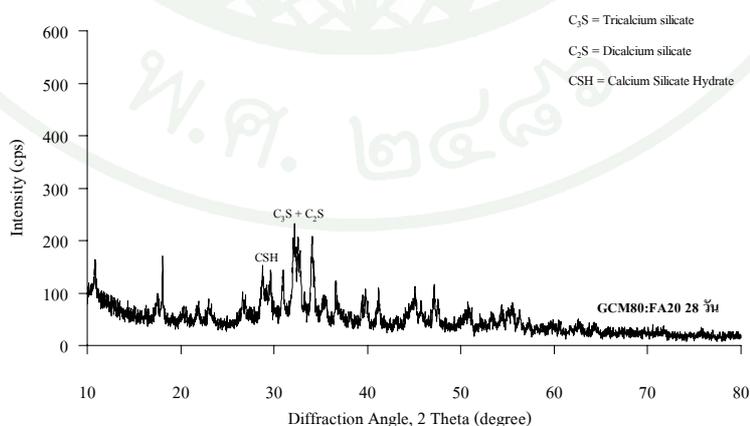
ภาพที่ 76 (ต่อ)

การพัฒนากำลังของคอนกรีตพูน

การพัฒนากำลังของมอร์ต้าคอนกรีตและคอนกรีตพูนใช้เทคนิคการวิเคราะห์ซีเมนต์เฟสของสารเชื่อมประสานต่างๆ โดยวิธีวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) เปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่มต่างๆ จากการสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของสารประกอบหลักในซีเมนต์ (C_3S และ C_2S) และสารผลิตภัณฑ์ (CSH) ตัวอย่างการวิเคราะห์ XRD ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงดังภาพที่ 42 และภาพที่ 43 สำหรับกราฟ X-ray Diffraction (XRD) ของซีเมนต์เฟส OPC และ GCM สัดส่วนผสมและที่อายุการบ่มต่างๆ ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ข

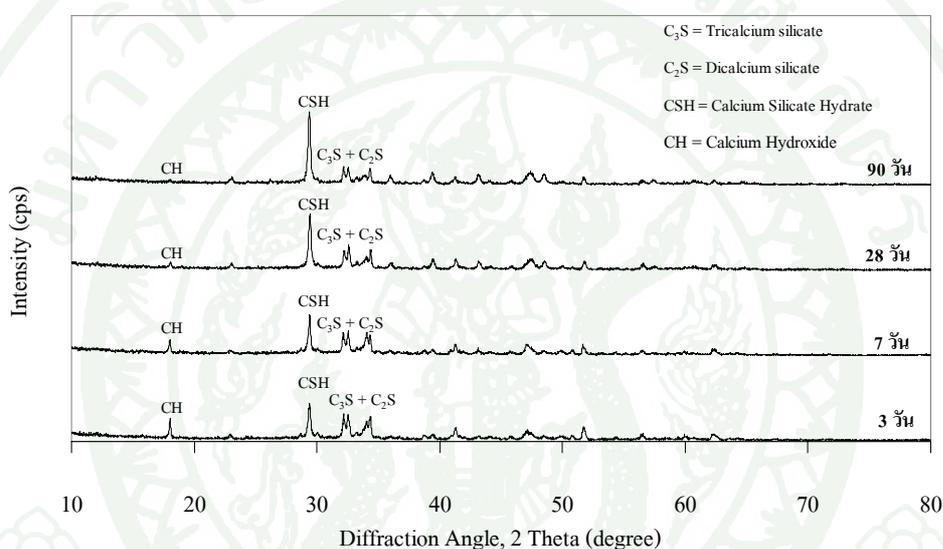


ภาพที่ 77 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ GCM ที่อายุการบ่ม 28 วัน



ภาพที่ 78 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ GCM80:FA20 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (MIX-7)

กราฟการวิเคราะห์ XRD ของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ OPC ที่อายุการบ่มต่างๆ แสดงดังภาพที่ 79 จากการวิเคราะห์ XRD (Semi-quantitative Analysis) ของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ OPC ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน พบว่า มีสารประกอบหลักตั้งต้นของ C_3S ลดลงตามลำดับคือ เท่ากับ 269, 249, 214 และ 199 cps ตามลำดับ สำหรับ C_2S ก็มีปริมาณลดลงเช่นกัน คือ เท่ากับ 254, 231, 204 และ 183 cps ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 18 และเกิดสารผลิตภัณฑ์หลักของ CSH เพิ่มขึ้นที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 441, 479, 617 และ 836 cps ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 19



ภาพที่ 79 กราฟ XRD ของซีเมนต์เพสต์ OPC ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน

ตารางที่ 18 แสดงปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ GCM

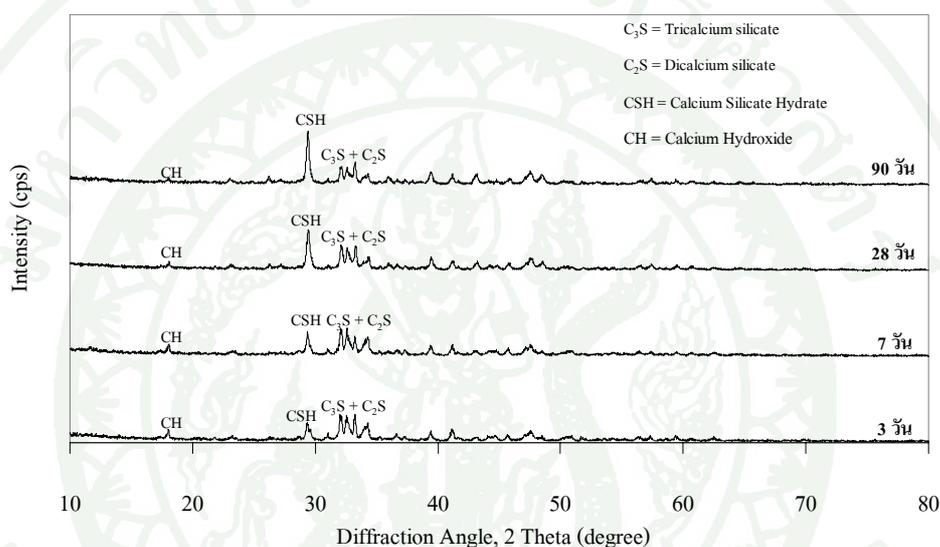
สัญลักษณ์	C_3S (cps)				C_2S (cps)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
OPC	269	249	214	199	254	231	204	183
GCM	314	277	242	187	318	294	274	221

หมายเหตุ Anhydrous OPC มีปริมาณ C_3S และ C_2S เริ่มต้นจากภาพที่ 50 เท่ากับ 1,010 และ 980 cps

Anhydrous GCM มีปริมาณ C_3S และ C_2S เริ่มต้นจากภาพที่ 50 เท่ากับ 386 และ 421 cps

ตารางที่ 19 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์หลัก CSH และ Ca(OH)_2 ของซีเมนต์เพสต์ปูน OPC และ GCM

สัญลักษณ์	CSH (cps)				Ca(OH)_2 (cps)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
OPC	441	479	617	836	173	128	110	58
GCM	204	247	455	626	126	117	107	88



ภาพที่ 80 กราฟ XRD ของซีเมนต์เพสต์ GCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน

สำหรับซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ GCM ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน ดังแสดงในภาพที่ 80 พบว่ามีสารประกอบหลักตั้งต้นของ C_3S ลดลงตามลำดับ คือ เท่ากับ 314, 277, 242 และ 187 cps ตามลำดับ สำหรับ C_2S ก็มีปริมาณลดลงเช่นกัน คือ เท่ากับ 318, 294, 274 และ 221 cps ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 18 และเกิดสารผลิตภัณฑ์หลักของ CSH เพิ่มขึ้นที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 204, 247, 455 และ 626 cps ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 19

ผลการวิเคราะห์ XRD ดังกล่าวสามารถใช้อธิบายการพัฒนากำลังของตัวอย่างมอร์ต้า GCM และคอนกรีตพูน GCM กล่าวคือกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นเดียวกับที่ตรวจพบใน OPC เพสต์ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเกิดขึ้นในระยะยาว มีผลทำให้กำลังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา กล่าวคือเมื่ออายุ

การบ่มเพิ่มขึ้น สารประกอบหลักตั้งต้น (C_3S และ C_2S) จะลดลง เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์หลัก (CSH) ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก GCM เพลสต์ มีปริมาณ C_3S และ C_2S ตั้งต้นที่น้อยกว่า จึงเกิด CSH ในปริมาณที่น้อยกว่า OPC เพลสต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าและคอนกรีตพูน

การใช้เถ้าลอยแทนที่ OPC และ GCM ในปริมาณที่เหมาะสมในช่วง 10 - 30% โดยน้ำหนักมีส่วนช่วยในการเพิ่มกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของอนุภาคเถ้าลอยกับ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นในช่วงตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่เสนอโดย Saitoh *et al* (1985) และ Kamon และ Nontananandh (1990) อย่างไรก็ตาม การอธิบายกลไกการพัฒนากำลังของคอนกรีตพูนที่มีเถ้าลอยผสมอยู่ในสารเชื่อมประสานที่สัดส่วนผสมต่างๆสามารถอธิบายได้โดยการวิเคราะห์อัตราการทำปฏิกิริยาของสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ในปูนซีเมนต์ OPC และ GCM ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบหลักตั้งต้นที่อายุการบ่มต่างๆ แสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ของซีเมนต์เพลสต์ปูน OPC และ GCM

สารประกอบ	อายุการบ่ม	MIX-1	MIX-2	MIX-4	MIX-5	MIX-6	MIX-7
C_3S (cps)	Anhydrous	1,010	386	916	824	355	325
	7 วัน	249	336	173	172	182	163
	28 วัน	204	242	128	131	189	147
C_2S (cps)	Anhydrous	980	421	890	799	386	352
	7 วัน	231	321	145	143	211	172
	28 วัน	266	274	133	129	166	140

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอัตราการลดลงของปริมาณสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ในปูนซีเมนต์ OPC และ GCM ตั้งแต่ช่วงตั้งต้นที่สูงกว่า ทำให้คอนกรีตพูนมีการพัฒนากำลังสูงกว่า โดยซิลิกาและอลูมินาจากเถ้าลอยเป็นตัวเร่งการทำปฏิกิริยาทำให้ C_3S และ C_2S ลดลงอย่างชัดเจนเป็นผลทำให้คอนกรีตพูนมีการพัฒนากำลังในระยะต้นและระยะยาว

การพัฒนากำลังคั่งกล่าวสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค โดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) ภาพที่ 81 (ก) - (ค) แสดงโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยากับน้ำที่อายุการบ่ม 7, 14, และ 28 วัน การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของอนุภาคเถ้าลอยทำให้เกิดสารผลึกภัณฑ์ Ettringite เป็นผลึกรูปเข็มเชื่อมประสานปกคลุมผิวโครงสร้าง ปฏิกิริยาคั่งกล่าวมีผลต่อการพัฒนากำลังเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ ยังสามารถสังเกตอนุภาคเถ้าลอยบางส่วนยังคงในสภาพเดิมเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาคั่งกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สารประกอบโดยวิธี XRD ซึ่งตรวจพบ Ettringite เป็นจำนวนค่อนข้างมาก แต่มีปริมาณ CSH ในปริมาณเล็กน้อย

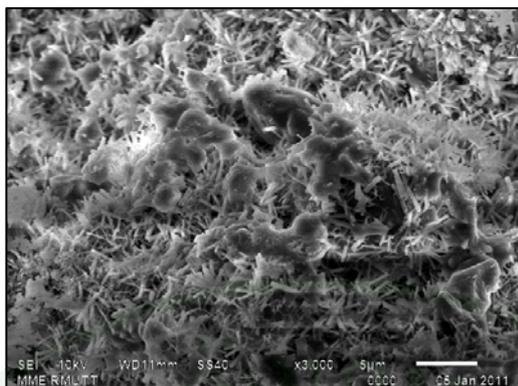
ภาพที่ 82 (ก) - (ค) แสดงโครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์และน้ำที่อายุการบ่ม 7, 14, และ 28 วัน เมื่อนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปแทนที่ปูนซีเมนต์ OPC ในปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก จากภาพถ่าย SEM ของ MIX-4 (OPC90 : FA10) พบว่าอนุภาคเถ้าลอยมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการบ่ม โดยจะสังเกตพบการชะบริเวณผิวของอนุภาคเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น เกิดเป็นสารผลึกภัณฑ์ในขณะเดียวกัน จากภาพที่ 82 (ก) จะสังเกตพบ Ettringite ในปริมาณมากปกคลุมทั่วบริเวณผิว เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น CSH มีแนวโน้มการเกิดเพิ่มมากขึ้นทำให้โครงสร้างหนาแน่นขึ้น ในขณะที่ผลึก Ettringite เปลี่ยนรูปไปเป็น Monosulphate ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกแผ่นรูป 6 เหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 82 (ค)

เมื่อปริมาณสัดส่วนผสมเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็น 30% โครงสร้างจุลภาคของอนุภาคเถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ใน MIX-8 (OPC70 : FA30) มีลักษณะคล้ายกับที่สังเกตพบใน MIX-4 ดังแสดงในภาพที่ ภาพที่ 83 (ก) - (ค) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคเถ้าลอยและความหนาแน่นของโครงสร้างที่เกิดจากผลึกของสารผลึกภัณฑ์ ตามอายุการบ่ม พบว่า MIX-8 มีความเชื่อมประสานค่อนข้างสมบูรณ์กว่า MIX-4 (OPC90 : FA10) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งผลการตรวจสอบคั่งกล่าวสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD ดังนั้นการสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค จึงสามารถใช้อธิบายยืนยันกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการพัฒนากำลังซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน การแทนที่ปริมาณเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานในปริมาณที่เหมาะสมจึงเป็นการเร่งปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้เกิดสารผลึกภัณฑ์ CSH ได้เร็วขึ้นตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของการทำปฏิกิริยา

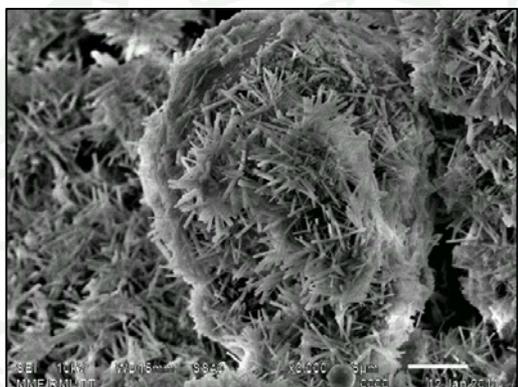
เมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ในปริมาณ 50% ปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงต้นมีแนวโน้มที่ เกิดขึ้นช้ากว่า MIX-4 และ MIX-8 สืบเนื่องจากการชะของอนุภาคเถ้าลอยในปริมาณค่อนข้างน้อยกว่า และมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไม่ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 84 (ก) - (ข) จากการสังเกตโครงสร้าง ซีเมนต์เพสต์ของ MIX-10 (OPC50:FA50) ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 84 (ค) พบว่า อนุภาคเถ้าลอยบางส่วนยังคงมีสภาพเดิมแม้อายุการบ่มเพิ่มขึ้นในระยะยาว และสารผลิตภัณฑ์ที่ เชื่อมประสาน โครงสร้างเกิดในปริมาณค่อนข้างน้อย เป็นผลทำให้อัตราการพัฒนากำลังในระยะ ยาวต่ำกว่า MIX-4 และ MIX-8

ในการอธิบายการพัฒนากำลังของสารเชื่อมประสาน BCM ปูนซีเมนต์ GCM และ ปูนซีเมนต์ OPC ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยที่ทำร่วมกับ ณพลและคณะ โดยในภาพที่ 85 (ก) - (ค) แสดง โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารเชื่อมประสาน BCM ปูนซีเมนต์ GCM และ ปูนซีเมนต์ OPC ที่อายุการบ่ม 3 วัน ตามลำดับ โดยใช้กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากการสังเกตพบว่ามีสารผลิตภัณฑ์ Ettringite เกิดขึ้นชัดเจนใน ลักษณะผลึกรูปเข็ม ปกคลุมทั่วบริเวณพื้นผิวของซีเมนต์เพสต์ที่ผลิตจากสารเชื่อมประสาน BCM ปูนซีเมนต์ GCM และ ปูนซีเมนต์ OPC นอกจากนี้ยังพบผลึกรูปหกเหลี่ยมของ Monosulfate ใน ปูนซีเมนต์ GCM และสังเกตพบสารผลิตภัณฑ์ CSH ปกคลุมบริเวณผิวซีเมนต์เพสต์ OPC ชัดเจน ดังภาพที่ 85 (ง) - (ค) ตามลำดับ

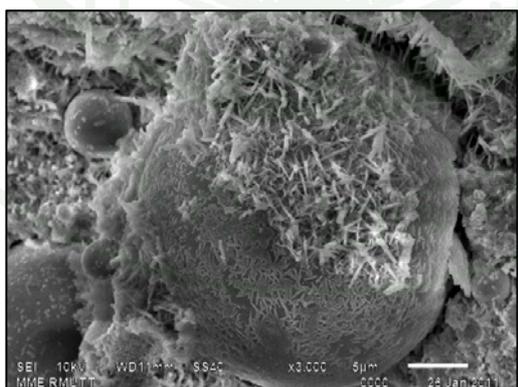
เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์จาก GCM และ OPC มีการเชื่อม ประสานมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 86 (ก) - (ค) และภาพที่ 87 (ก) - (ค) อย่างไรก็ตาม โครงสร้าง จุลภาคของ OPC มีสารผลิตภัณฑ์ CSH ปกคลุมหนาแน่นกว่า เป็นผลทำให้กำลังพัฒนาขึ้นสูงกว่า ปูนซีเมนต์ GCM ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและการวิเคราะห์ XRD



(ก) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 3000)

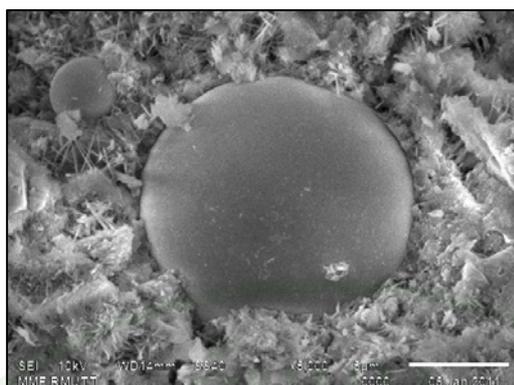


(ข) อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย x 3000)



(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 3000)

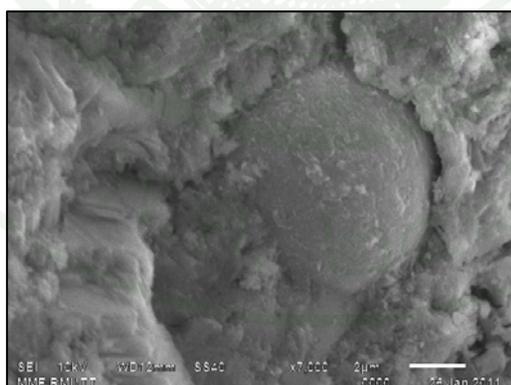
ภาพที่ 81 ปฏิกริยาไฮเดรชันของน้ำตาลเมื่อผสมน้ำที่อายุการบ่มต่างๆ



(ก) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

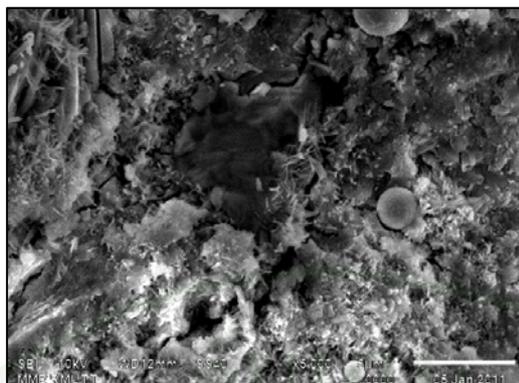


(ข) อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย x 3000)



(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 7000)

ภาพที่ 82 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ MIX-4 (OPC90 : FA10) ที่อายุการบ่มต่างๆ



(ก) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

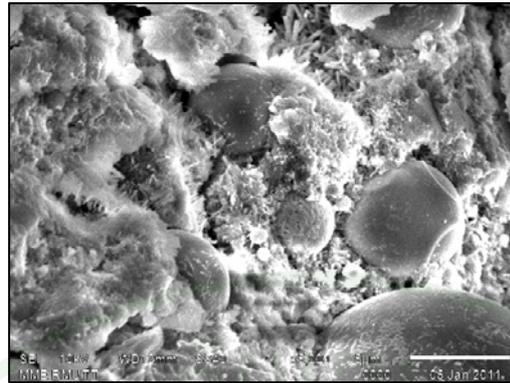


(ข) อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย x 7000)

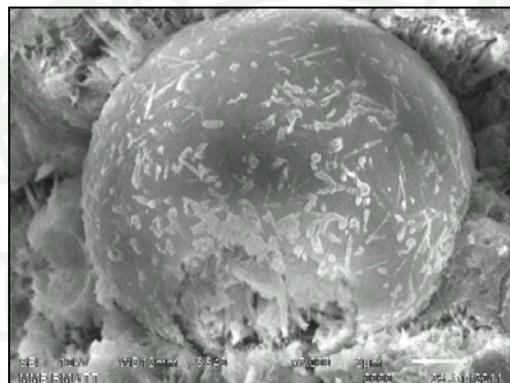


(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 5000)

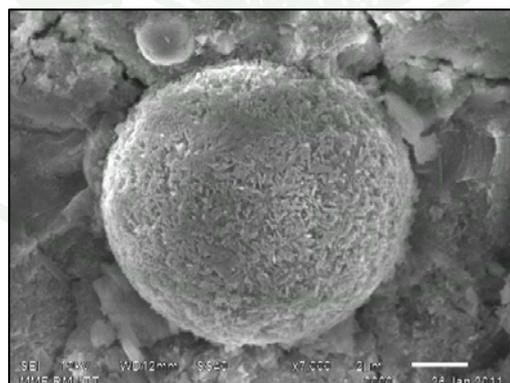
ภาพที่ 83 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ MIX-8 (OPC70 : FA30) ที่อายุการบ่มต่างๆ



(ก) อายุการบ่ม 7 วัน (กำลังขยาย x 5000)

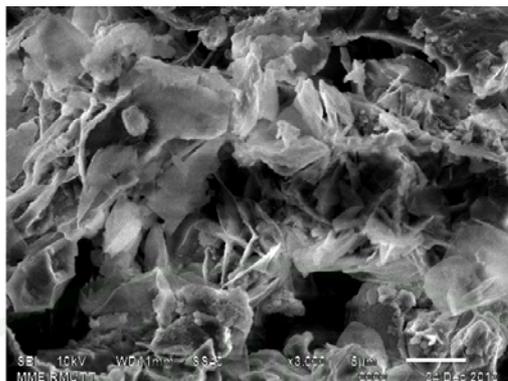


(ข) อายุการบ่ม 14 วัน (กำลังขยาย x 7000)

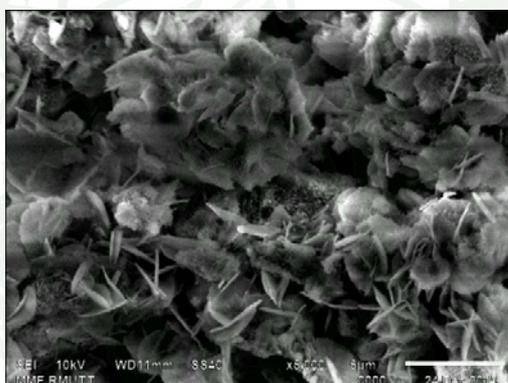


(ค) อายุการบ่ม 28 วัน (กำลังขยาย x 7000)

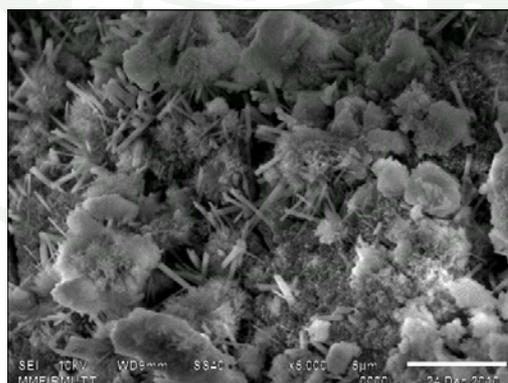
ภาพที่ 84 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ MIX-10 (OPC50 : FA50) ที่อายุการบ่มต่างๆ



(ก) อายุการบ่ม 3 วัน ของ BCM (กำลังขยาย x 3000)

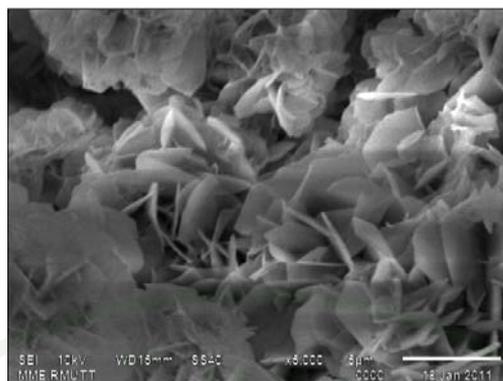


(ข) อายุการบ่ม 3 วัน ของ GCM (กำลังขยาย x 5000)

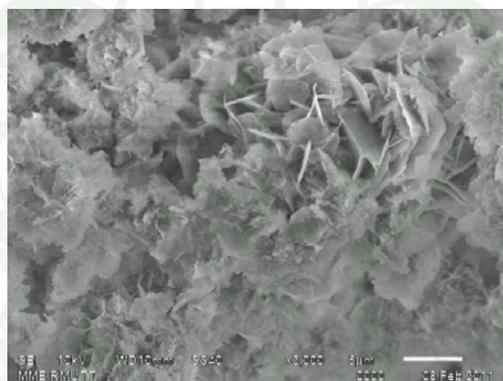


(ค) อายุการบ่ม 3 วัน ของ OPC (กำลังขยาย x 5000)

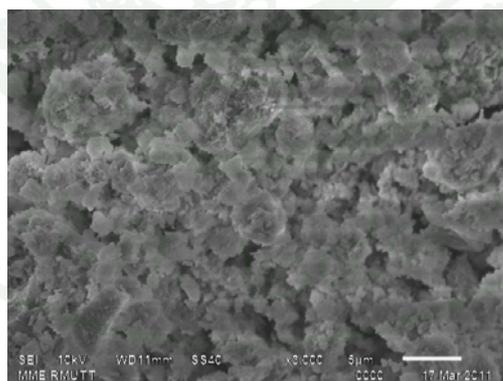
ภาพที่ 85 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ BCM, GCM และ OPC ที่อายุการบ่ม 3 วัน



(ก) อายุการบ่ม 7 วัน ของ GCM (กำลังขยาย x 5000)



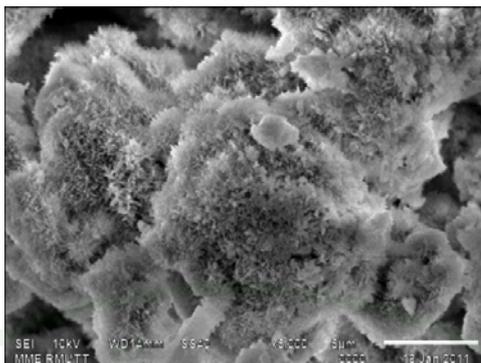
(ข) อายุการบ่ม 28 วัน ของ GCM (กำลังขยาย x 5000)



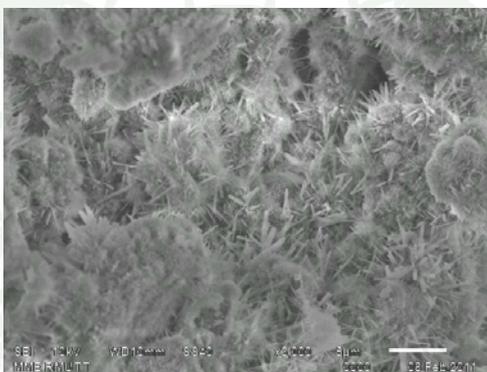
(ค) อายุการบ่ม 90 วัน ของ GCM (กำลังขยาย x 5000)

ภาพที่ 86 ปฏิกริยาไฮเดรชันของ GCM ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน

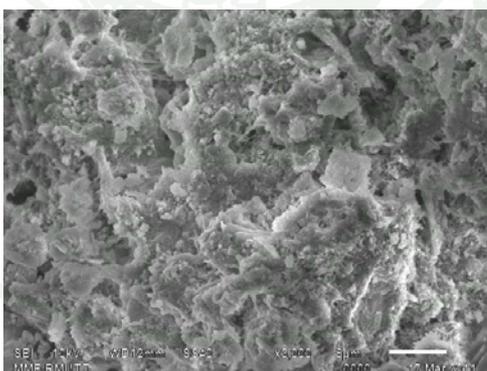
ที่มา : จากงานวิจัยร่วมกับ ณฑลและคณะ (2552)



(ก) อายุการบ่ม 7 วัน ของ OPC (กำลังขยาย x 5000)



(ข) อายุการบ่ม 28 วัน ของ OPC (กำลังขยาย x 5000)



(ค) อายุการบ่ม 90 วัน ของ OPC (กำลังขยาย x 5000)

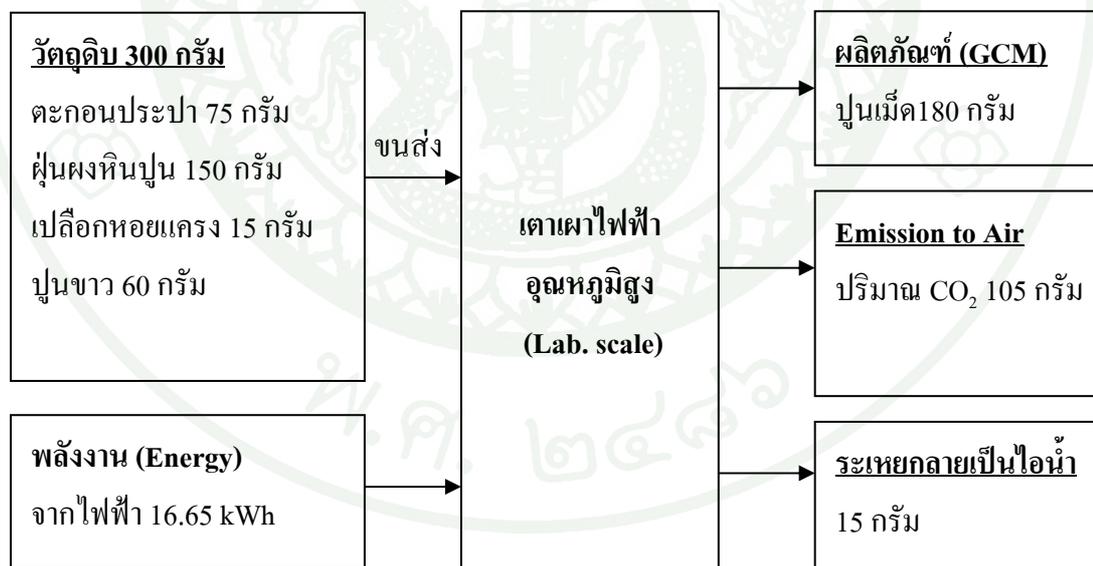
ภาพที่ 87 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC ที่อายุการบ่ม 7, 28 และ 90 วัน

ที่มา : จากงานวิจัยร่วมกับ ฌพลและคณะ (2552)

การศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ GCM

จากการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment; LCA) ของปูนซีเมนต์ GCM ที่สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม โดยได้พิจารณาขอบเขตเฉพาะผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (Global Warming) ที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในกระบวนการผลิต (Manufacturing process) ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูงเนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นส่วนใหญ่เป็นสารที่ทำให้เกิด CO_2 เมื่อผ่านกระบวนการเผาไหม้ สามารถแสดงปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกในการผลิตปูนเม็ด GCM ในภาพที่ 88

วัตถุดิบหลักตั้งต้นในการเผาเพื่อผลิตปูนเม็ด GCM ใช้ปริมาณ 300 กรัม โดยมีตะกอนประปา 75 กรัม ฝุ่นผงหินปูน 150 กรัม และเปลือกหอยแครง 15 กรัม ซึ่งวัตถุดิบตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นวัตถุดิบที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม โดยไม่ต้องนำไปคิดคำนวณในโปรแกรม SimaPro 7.1 สำหรับปูนขาวใช้ปริมาณ 60 กรัมโดยใช้ฐานข้อมูลจากโปรแกรม SimaPro 7.1 โดยเลือกใช้ Lime, hydrated, packed, at plant ในส่วนของวัสดุ (Material)

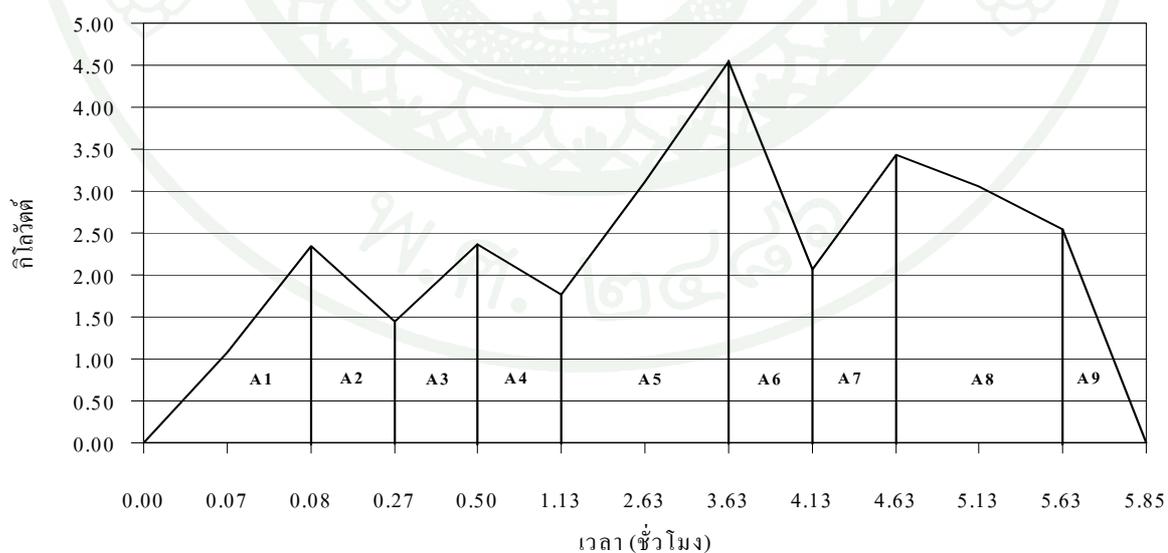


ภาพที่ 88 สารขาเข้าและสารขาออกในการผลิตปูนซีเมนต์ GCM

ตารางที่ 21 ค่าพลังงานที่ใช้ในการเผาเพื่อผลิตปูนเม็ดในห้องปฏิบัติการ

ช่วงเวลาในการเผา(ชั่วโมง)	พลังงานในหน่วยกิโลวัตต์ เริ่มต้น - สิ้นท้าย	พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง) *	
		พื้นที่	พลังงานที่ใช้
0.00 – 0.08	0.00 – 2.34	A1	0.10
0.08 – 0.27	2.43 – 1.44	A2	0.35
0.27 – 0.42	1.44 – 2.37	A3	0.44
0.42 – 0.87	2.37 – 1.77	A4	1.31
0.87 – 3.13	1.77 – 4.55	A5	7.90
3.13 – 3.63	4.55 – 2.07	A6	1.65
3.63 – 4.13	2.07 – 3.43	A7	1.38
4.13 – 5.13	3.43 – 2.55	A8	2.99
5.13 – 5.85	2.55 – 0.00	A9	0.53
5.85	รวม		16.65

หมายเหตุ * พลังงานที่ใช้ได้จากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟในภาพที่ 86



ภาพที่ 89 กราฟแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าจากเตาเผาอุณหภูมิสูงในช่วงระยะเวลา 5.85 ชั่วโมง

ค่าพลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบหลักตั้งต้นจากการใช้วัตต์มิเตอร์ได้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ (ในหน่วยกิโลวัตต์) ตลอดช่วงกับระยะเวลาในการเผาปูนเม็ด (ในหน่วยชั่วโมง) ตามรูปแบบของการเผา แสดงในตารางที่ 21 มีอุณหภูมิสูงที่สุดเท่ากับ 1,450 °C รวมระยะเวลาในการเผา 5.85 ชั่วโมง โดยจากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 16.65 kWh ดังแสดงในภาพที่ 89 เมื่อตรวจสอบกับฐานข้อมูลการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ปูนเม็ด) จากโปรแกรม SimaPro 7.1 พบว่าพลังงานในการผลิตปูนเม็ดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเขื่อน (Electricity, hydropower, at reservoir power plant) ดังนั้น เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลบนฐานเดียวกัน ในการวิเคราะห์จึงเลือกใช้ประเภทพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากเขื่อนเช่นเดียวกัน

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการขนส่งวัตถุดิบตั้งต้นในการศึกษานี้ใช้รถบรรทุกขนาดน้ำหนักบรรทุก 16 ตัน ซึ่งมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยเลือกจากฐานข้อมูล SimaPro 7.1 สำหรับระยะทางในการขนส่งวัตถุดิบต่างๆมายังห้องปฏิบัติการเพื่อทดลองเผาตัวอย่างในการผลิตปูนเม็ด GCM สรุปดังตารางที่ 22

นอกจากนี้ จากข้อมูลการผลิตปูนเม็ด GCM โดยการเผาวัตถุดิบตั้งต้นปริมาณ 300 กรัม ในห้องปฏิบัติการ สามารถผลิตปูนเม็ด GCM ได้ในปริมาณ 180 กรัม (ร้อยละ 60) มีการระเหยกลายเป็นไอน้ำในปริมาณ 15 กรัม (ร้อยละ 5) และในส่วนที่เหลือเป็นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณเท่ากับ 105 กรัม (ร้อยละ 35) จากสมมติฐานการเกิดปฏิกิริยา Calcination และ Clinkerization ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นส่วนใหญ่ (ร้อยละ 75) อยู่ในกลุ่มของแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนต

ตารางที่ 22 การคำนวณระยะทางและน้ำหนักวัตถุดิบหลักตั้งต้นในการเผา

ประเภทของภาคอุตสาหกรรม	ปริมาณ (กรัม)	ปริมาณในหน่วย (ตัน)	ระยะทางในการขนส่ง (กิโลเมตร)	ระยะทาง (ตัน.กิโลเมตร)
ตะกอนประปา	75	0.000075	10	0.000750
ฝุ่นผงหินปูน	150	0.000150	105	0.015750
เปลือกหอยแครง	15	0.000015	125	0.001875
ปูนขาว	60	0.000060	5	0.000300
		รวม		0.018675

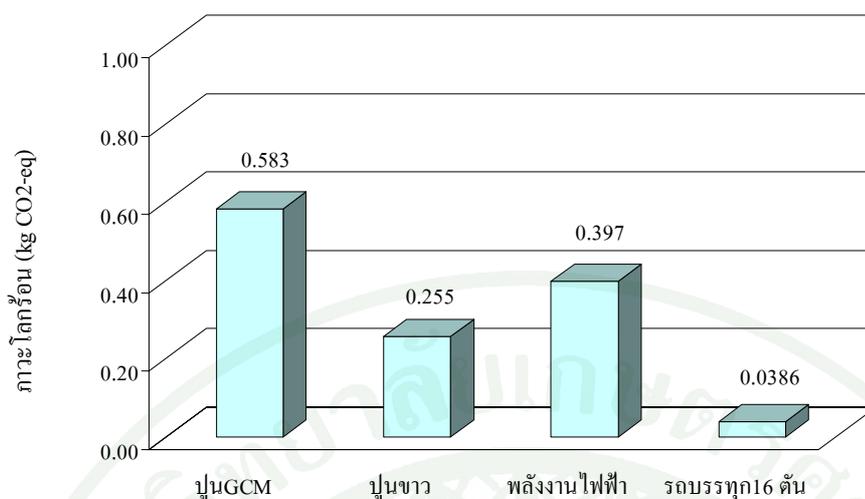
ในการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ของปูนเม็ดที่สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม ส่วนที่เป็นสีเทา (GCM) ได้ดำเนินการตามขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ซึ่งมี 4 ขั้นตอน คือ การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and Scope Definition) การวิเคราะห์บัญชีรายการ (Inventory Analysis) การประเมินผลกระทบ (Impact Assessment) และการแปลผล (Interpretation) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.1 วิธี Superseded (IPCC 2001 GWP 100a Version 1.04) สำหรับประมวลและประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการเสนอทางเลือกในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมจากกากอุตสาหกรรม บางประเภท ในการวิเคราะห์จึงพิจารณาป้อนข้อมูลโดยเลือกวิธีการประเมินแบบ Gate to Gate ซึ่ง ตรงกับวัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้น และสอดคล้องกับแนวคิดในการวิจัยซึ่งเสนอโดยพงษ์วิภาและคณะ (2547) ที่สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ในแต่ละกระบวนการของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ

ผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านภาวะโลกร้อน (Global Warming) ที่เกิด จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของกระบวนการผลิตปูนเม็ด GCM โดยใช้โปรแกรม SimaPro 7.1 วิธี Superseded (IPCC 2001 GWP 100a Version 1.04) แสดงดังตารางที่ 23 และภาพที่ 90

ตารางที่ 23 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านภาวะโลกร้อนของปูนเม็ด GCM

ผลกระทบ	ปูนGCM	ปูนขาว	พลังงานไฟฟ้า	รถบรรทุก16 ตัน	หน่วย
ภาวะโลกร้อน	0.583	0.255	0.397	0.0386	kg CO ₂ eq.



ภาพที่ 90 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อนในกระบวนการผลิตปูนเม็ด GCM 1 กิโลกรัม ประเมินด้วยวิธี Superseded (IPCC 2001 GWP 100a Version 1.04)

จากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อนในกระบวนการผลิตปูนเม็ด GCM ปริมาณ 1 กิโลกรัม พบว่าปูนเม็ด GCM มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนมากที่สุดเท่ากับ 0.538 kg CO₂ eq. รองลงมาคือ การใช้พลังงานไฟฟ้า การได้มาของปูนขาว และการขนส่งด้วยรถบรรทุกน้ำหนักบรรทุก 16 ตัน มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเท่ากับ 0.397, 0.255 และ 0.0386 kg CO₂ eq. ตามลำดับ

โดยมีผลรวมของผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการผลิตปูนเม็ดเท่ากับ 1.120 kg CO₂ eq. ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการศึกษการผลิตปูนเม็ดที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมจากงานวิจัยของ พงษ์วิภาและคณะ (2547) ที่พบว่าในกระบวนการผลิตปูนเม็ดปริมาณ 1 กิโลกรัมมีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนมากที่สุดเท่ากับ 0.909 kg CO₂ eq. ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ซึ่งปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตจึงน้อยกว่าความสามารถของเตาเผาอุณหภูมิสูง นอกจากนี้การผลิตปูนเม็ดในโรงงานอุตสาหกรรมมีการนำความร้อนกลับมาใช้อีกโดยกระบวนการให้ความร้อนก่อนเผาแก้วตุ้ดดิบ (Pre-heater) เพื่อทำการผลิตปูนเม็ด โดยใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) จึงเป็นการประหยัดพลังงานสำหรับการผลิต

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการจัดการกากอุตสาหกรรมโดยเสนอแนวทางในการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง เพื่อการจัดการกากอุตสาหกรรมในปริมาณมากโดยเสนอทางเลือกในการประยุกต์ใช้แบบผสมผสาน (Combined Wastes Utilization) สำหรับขยะที่มีคุณลักษณะเด่นเพียงบางประการ และการประยุกต์ใช้แบบเชิงเดี่ยว (Single Waste Utilization) สำหรับขยะที่มีศักยภาพสูงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปริมาณขยะแล้วยังสามารถเสาะแสวงหาแหล่งวัตถุดิบใหม่อีกด้วย จากการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์โดยการคัดเลือกกากอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีศักยภาพตามเกณฑ์ “NICE Criteria” เป็นตัวอย่างทางเลือกในการจัดการขยะแบบผสมผสาน (Combined Wastes Utilization) จากการศึกษาพบว่า ตะกอนประปา ผุ่นผงหินปูน เปลือกหอยแครง และปูนขาวที่อัตราส่วน 25 : 50 : 5 : 20 โดยการเลือกรูปแบบการเผาที่อุณหภูมิและช่วงเวลาที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อผลิตสารเชื่อมประสาน ที่มีความสามารถในการแข็งตัวได้เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมมีสารประกอบหลัก (Bouge's Compounds) เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จากการวิเคราะห์โดยวิธี X-ray Diffraction (XRD) พบว่าสารประกอบ C_3S , C_2S , C_4AF ที่ตรวจพบมีปริมาณน้อยกว่าในปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามปริมาณสารประกอบ C_3A ที่ตรวจพบมีปริมาณมากกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3. เมื่อนำปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมมาใช้ผลิตตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงต้นค่อนข้างต่ำถึงปานกลาง อย่างไรก็ตามมอร์ต้ามีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามอายุการบ่ม ทั้งนี้การพัฒนากำลังของมอร์ต้า ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมเกิดจากสารผลิตภัณฑ์ Calcium Silicate Hydrate (CSH) จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่นเดียวกับที่ตรวจพบในมอร์ต้าปูนซีเมนต์มาตรฐาน

4. จากศึกษาความเป็นไปได้เพื่อใช้ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม (GCM) ผลิตคอนกรีตพูน เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตพูนที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC)

พบว่าอัตราส่วนโพรง สัมประสิทธิ์ความชื้นน้ำและกำลังอัดมอร์ต้ามีค่าต่ำกว่าคอนกรีตพูน OPC อย่างไรก็ตาม คอนกรีตพูน GCM มีการพัฒนากำลังตามอายุการบ่มอย่างชัดเจน การแทนที่ปูนซีเมนต์ GCM ด้วยปูนซีเมนต์ OPC 20% โดยน้ำหนัก ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน การศึกษาในเบื้องต้นพบว่าปูนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรมสามารถใช้เป็นสารเชื่อมประสานในการผลิตคอนกรีตพูนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งสอดคล้องกับหลักการของการใช้ประโยชน์จากขยะอย่างมีประสิทธิภาพ (NICE Criteria)

5. ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กากอุตสาหกรรมเชิงเดี่ยว (Single Waste Utilization) เช่น การใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในสัดส่วนผสมที่เหมาะสมไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้กำลังของมอร์ต้าและคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุการบ่มต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก Calcium Silicate (C_3S และ C_2S) ในปูนซีเมนต์สังเคราะห์และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เมื่อมีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุผสมทดแทนปูนซีเมนต์ เกิดสารผลิตภัณฑ์ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ประสิทธิภาพของเถ้าลอยสามารถยืนยันจากผลการวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) และ จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างตามอายุการบ่มโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM)

6. จากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อนในกระบวนการผลิตปูนเม็ด GCM ปริมาณ 1 กิโลกรัม พบว่าปูนเม็ด GCM มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนมากที่สุดเท่ากับ 0.538 kg CO₂ eq. รองลงมาคือ การใช้พลังงานไฟฟ้า การได้มาของปูนขาว และการขนส่งด้วยรถบรรทุกน้ำหนักบรรทุก 16 ตัน มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเท่ากับ 0.397, 0.255 และ 0.0386 kg CO₂ eq. ตามลำดับ โดยมีผลรวมของผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเท่ากับ 1.120 kg CO₂ eq. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมจากงานวิจัยในลักษณะเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรแสวงหาแหล่งวัตถุดิบเพิ่มเติมในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีศักยภาพสามารถทดแทนวัตถุดิบหลักเป็นปริมาณมากได้ เช่น ตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล โรงงานผลิตแก้วและพลาสติก โรงงานผลิตกระดาษ โรงงานผลิตเหล็ก และโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูปต่างๆ เป็นต้น โดยพิจารณาคัดเลือกจากเกณฑ์ NICE Criteria การค้นพบแหล่งวัสดุใหม่จากการเปลี่ยนกากอุตสาหกรรมเป็นวัสดุที่มีประโยชน์ นอกจากจะเป็นทางเลือกในการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นแล้ว ยังเป็นการสงวนทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดอีกด้วย

2. ในงานวิจัยในอนาคต ควรศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรมให้มีกำลังสูงขึ้นรวมถึงการประยุกต์ใช้งานในลักษณะอื่นอย่างต่อเนื่อง เช่น การนำไปใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพในการปรับปรุงคุณภาพดินในงานด้านวิศวกรรมปฐพี

3. จากคุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตพูนของงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ผลิตเป็นบล็อกคอนกรีตพูนปูทางเดินในสนามหญ้า ตกแต่งสวนหย่อม หรือใช้ในการกรองน้ำเสีย สำหรับงานงานวิจัยในอนาคตมีเป้าหมายที่จะพัฒนาปูนซีเมนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์จากคอนกรีตพูนที่สามารถประยุกต์ใช้งานที่ขยายผลต่อไป

4. ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ดังนั้นปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตจึงไม่ได้เน้นการผลิตจากศักยภาพสูงสุดที่เตาเผาจะสามารถผลิตได้ นอกจากนี้ การผลิตปูนเม็ดในโรงงานอุตสาหกรรมใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ที่มีการนำความร้อนกลับมาใช้อีกโดยใช้กระบวนการให้ความร้อนก่อนเผาแก้ววัตถุดิบ (Pre-heater) ทำให้การผลิตปูนเม็ดโดยประหยัดพลังงานได้มากกว่า ดังนั้นการศึกษาวิจัยในอนาคต จึงควรพิจารณาควบคุมปัจจัยของกระบวนการผลิตให้ใกล้เคียงกับการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม

5. ในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์ในอนาคต ควรประเมินวัฏจักรชีวิตโดยพิจารณาให้ครอบคลุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีของกากอุตสาหกรรมที่จะนำมาใช้หลากหลายมากขึ้น เช่น การทำให้โลกร้อน การทำลายชั้นโอโซน การทำให้เกิดฝนกรด เป็นต้น

6. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเพื่อยืนยันความไม่เป็นพิษและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มี

เกณฑ์มาตรฐาน โดยตรงสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ ดังนั้น ก่อนการนำไปใช้งานจริง จึงควรทำการทดลองเพิ่มเติมโดยใช้เกณฑ์มาตรฐานปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากภาคอุตสาหกรรมในต่างประเทศ เช่นในประเทศญี่ปุ่น ใช้การทดสอบน้ำชะ (leachate) จากมอร์ต้าที่อายุการบ่ม 28 วัน เปรียบเทียบกับค่าโลหะหนักต่างๆที่ยอมให้ในการปนเปื้อนของดินและน้ำ



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กมล อมรฟ้า. 2545. การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมควบคุมมลพิษ. 2549. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย.

กรมควบคุมมลพิษ. 2552. **ฐานข้อมูลการป้องกันมลพิษ**. แหล่งที่มา: <http://ptech.pcd.go.th>, 24 มกราคม 2553.

เกศรินทร์ พิมรักษา และ สกตวรรณ ห่านจิตสุวรรณ. 2550. การผลิตวัสดุซีเมนต์ที่มีเบไลท์เป็นองค์ประกอบสูงจากวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อประหยัดพลังงาน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ.

เกียรติคุณ ทองแดง, ศุภกิจ นนทนานันท์, ณฑล อยู่บรรพต, ดวงฤดี ฉายสุวรรณ และ มณฑล ฐานุดตมวงศ์. 2553. การศึกษาแนวทางการจัดการขยะอุตสาหกรรมเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง. รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15. สุนีย์ แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์, อุบลราชธานี. (ENV025)

ณฑล อยู่บรรพต, ศุภกิจ นนทนานันท์, ดวงฤดี ฉายสุวรรณ, เกียรติคุณ ทองแดง และ สมณพร สุทธิบาท. 2552. การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาแนวทางในการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากขยะอุตสาหกรรม, น. 114-121. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการครั้งที่ 48 (สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ถนัดกิจ ชาริรัตน์, ปริญญา จินดาประเสริฐ และ Shigemitsu Hatanaka. 2551. คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์สำหรับการผลิตคอนกรีตพูน. รายงานการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4, อุบลราชธานี. (MAT162-MAT167)

ถนัดกิจ ชาริรัตน์, ยุวดี หิรัญ, สุมิตร นันท์คำ และ อนันศักดิ์ บุญก้อน. 2553. การวางระบบท่อในงานทางเดินเท้าหรือฟุตบอลคอร์ทคอนกรีตพูน. รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15. สุนีย์ แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์, อุบลราชธานี. (MAT071)

ถนัดกิจ ชาริรัตน์, สมณพร สุทธิบาท, จาตุรงค์ จงใจ, อนุพงษ์ โพธิ์ป้อม และ ยงยุทธ คำศิลา. 2553. การประยุกต์ใช้คอนกรีตพูนในงานบำบัดน้ำเสีย. รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15. สุนีย์ แกรนด์ แอนด์ คอนเวนชัน เซ็นเตอร์, อุบลราชธานี. (MAT073)

ปิติฤกษ์ หัสนันท์. 2547. คุณสมบัติทางกลและความทนทานของมอร์ต้าผสมเถ้าตะกอนสลัดจ์จากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2552. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย. บริษัทเอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, อธิวัตร จิรจิรายเวช, วัชรพงษ์ ศิลาเลิศรักษา และ วุฒิพงษ์ ปริดาภัทรพงษ์. 2547. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์การจัดทำฐานข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์และเหล็กกล้าเพื่อการจัดการสิ่งแวดล้อม. สำนักนายกรัฐมนตรี, กรุงเทพฯ.

พวงรัตน์ ขจิตวิชานุกุล และ อริสรา ทองศรีนุ่น. 2549. ผลของแคะเมี่ยมที่มีต่อลักษณะของซีเมนต์และการวิเคราะห์การชะล้าง. รายงานความก้าวหน้า RDG4950004. สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.). สำนักนายกรัฐมนตรี, กรุงเทพฯ.

ยุวดี หิรัญ, ธวัชชัย ดันชัยสวัสดิ์, พลยุทธ์ มุตรังมี, วิชัย บำรุงนาม และ อัญชลี เพ็ญสุระ. 2551. บล็อกปูถนนคอนกรีตพูน. รายงานการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 4, อุบลราชธานี. (MAT173-MAT179)

สุรศักดิ์ วิทย์สถาพงษ์. 2548. การประเมินวัฏจักรชีวิตของตู้เย็นที่ใช้ในบ้าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ. 2551. การประยุกต์ใช้หลักการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

ศุภกิจ นนทนานันท์, เกียรติคุณ ทองแดง, ณพล อยู่บรรพต, มณฑล ฐานุตตมวงศ์ และ
ยุทธนา บุญสินชัย. 2554. การพัฒนาปูนซีเมนต์จากขยะที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้
เถ้าลอยถิกไนต์. รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16.
เดอะชาयน์ พัทยา, ชลบุรี.

ศุภกิจ นนทนานันท์, เกียรติคุณ ทองแดง, ณพล อยู่บรรพต, ดวงฤดี นายสุวรรณ และ
มณฑล ฐานุตตมวงศ์. 2554. การใช้ประโยชน์ปูนซีเมนต์จากขยะอุตสาหกรรมโดยผลิตเป็น
คอนกรีตพรุน, น. 312- 319. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 49.
(สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ASTM C 109. 2001. **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement
Mortars (using 2-in. or (50-mm) Cube Specimens)**, Annual Book ASTM Standards.

Bouge, R.H. 1955. **Chemistry of Portland Cement**. Reinhold Publishing Corp., New York.

Chareerat, T., S. Nontananandh, M. Praserttrungruang, P. Chindaprasirt, T. Nakagawa and
S. Hatanaka. 2009. Porous Concrete: Environmentally Friendly Applications
in Thailand. **Proc. of the 16th Tri-University International Joint Seminar and
Symposium**, Mie University, Japan.

Garces, P., M. Perez Carrion, E. Garcia-Alcocel, J. Paya, J. Monzo and M.V. Borrachero. 2008.
Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash. **Waste
Management 28(12): 2495-2502.**

International Organization for Standardization. 2006. **ISO/DIS 14040: Environmental
management - Life Cycle Assessment - Principles and framework.**

- Kamon, M. and S. Nontananandh. 1990. Contribution of Stainless-Steel Slag to the Development of Strength for Seabed Hedoro. **Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering** 30(4): 63-72.
- Kamon, M. and S. Nontananandh. 1991. Combining Industrial Waste with Lime for Soil Stabilization. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE** 117(1): 1-17.
- Lu, H.Y., E. Masanet and L. Price. 2009. Evaluation of Life-Cycle Assessment Studies of Chinese Cement Production: Challenges and Opportunities, pp. 1-13. *In Proc. of the 2009 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry.*
- Morgan. 1985. Oil Sludge Solidification using Cement Kiln Dust. **Journal of Environmental Engineering, ASCE** 110(5): 935-948.
- Mairaing, W. 2002. Monitoring the Largest RCC Dam in Thailand. Khong Tha Dan Dam, pp. 23-25. *In the 8th National Convention on Civil Engineering*, Khon Kaen Raja Orchid Hotel. Khon Kaen.
- Neville, A.M. 2002. **Properties of Concrete**. the 4th ed. Pearson Education Limited, UK.
- Nontananandh, S., M. Kamon and T. Seishi. 1991. Environmental Geotechnology for Potential Waste Utilization, pp. 397-400. *In Proc. of 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Bangkok, Thailand.
- Nontananandh, S., Boonyong, S., T. Yoobanpot, and K. Chantawarangul. 2004. Strength Development of Soft Marine Clay Stabilized with Cement and Fly ash. **Kasetsart Journal (Natural Science)** 38: 539-552.

- Nontananandh, S., Yoobanpot, N., D. Chaysuwan and K.Thongdaeng. 2011. Influence of Fineness of Cement Produced from Industrial Wastes on Strength of Mortar. **Kasetsart Journal (Natural Science) 45(3)** (Accepted for published).
- Pan, J.R., C.H. Huang, J.J. Kuo and S.H. Lin. 2008. Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement. **Waste Management 28 (7): 1113-1118.**
- Pan, S.C., D.H. Tseng, C.C. Lee, and C. Lee. 2003. Influence of the Fineness of Sewage Sludge Ash on the Mortar Properties. **Cement and Concrete Research 33: 749-1754.**
- Phair, J.W. 2006. Green Chemistry for Sustainable Cement Production and Use. **Green Chem 8: 763-780.**
- Saitoh, S., Y. Suzuki and K. Shirai. 1985. Hardening of Soil Improved by Deep Mixing Method, pp. 1745-1748. **Proc. of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, San Francisco, USA.
- Shimoda, T., S. Yokoyama and H. Hirao. 1999. Eco-cement: A New Portland Cement to Solve Municipal and Industrial Waste Problems, pp. 1-11. **In Proc. of the International Conference on Creating with Concrete.**
- Tsakiridis, P.E., G.D. Papadimitriou, S. Tsivilis and C. Koroneos. 2008. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. **Journal of Hazardous Materials 152(2): 805-811.**



ภาคผนวก



จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยจำแนกตามวิธีการทดสอบได้ดังนี้

ก1 การทดสอบด้านการรับกำลังอัดของคอนกรีตพูน

สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I (MIX-1)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง
สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์สังเคราะห์ 100% (MIX-2)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง
สารตั้งต้น	ปูน GCM80% ต่อ OPC 20% โดยน้ำหนัก (MIX-3)
ระยะเวลาในการบ่ม	7 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	6 ตัวอย่าง
สารตั้งต้น	ปูน OPC90% ต่อ ใ้ถาลอย 10% โดยน้ำหนัก (MIX-4)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง
สารตั้งต้น	ปูน OPC80% ต่อ ใ้ถาลอย 20% โดยน้ำหนัก (MIX-5)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ปูนGCM90% ต่อ ใ้ล้ลอย10% โดยน้ำหนัก (MIX-6)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ปูนGCM80% ต่อ ใ้ล้ลอย20% โดยน้ำหนัก (MIX-7)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ปูนOPC70% ต่อ ใ้ล้ลอย30% โดยน้ำหนัก (MIX-8)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ปูนOPC60% ต่อ ใ้ล้ลอย40% โดยน้ำหนัก (MIX-9)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง

สารตั้งต้น	ปูนOPC50% ต่อ ใ้ล้ลอย50% โดยน้ำหนัก (MIX-10)
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 28 และ 90 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	9 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้านการรับกำลังอัดของมอร์ต้าคอนกรีตพูนทั้งหมด 87 ตัวอย่าง

ก2 การทดสอบด้านการรับกำลังอัดของมอร์ต้า (ASTM C 109) ตัวอย่างทรงกระบอก

สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I, OPC90:FA10, OPC70:FA30, OPC50:FA50
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 14 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	36 ตัวอย่าง

ก3 การทดสอบด้านการรับกำลังอัดของมอร์ต้า (ASTM C 109) ตัวอย่างทรงลูกบาศก์

สารตั้งต้น	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I, OPC90:FA10, OPC70:FA30, OPC50:FA50
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 14 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	3 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	36 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้านการรับกำลังอัดของมอร์ต้าทั้งหมด 72 ตัวอย่าง

ก4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

สารตั้งต้น	เถ้าลอยลิกไนต์, ซีเมนต์เพสต์ OPC90:FA10, OPC70:FA30, OPC50:FA50
ระยะเวลาในการบ่ม	7, 14 และ 28 วัน
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1 ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	12 ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้วยเทคนิค SEM ทั้งหมด 12 ตัวอย่าง

ก5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

สารตั้งต้น	ซีเมนต์เพสต์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Type I และปูนซีเมนต์สังเคราะห์ GCM	
ระยะเวลาในการบ่ม	3, 7, 28 และ 90 วัน	
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชุด	1	ตัวอย่าง
รวมจำนวนตัวอย่าง	8	ตัวอย่าง

รวมจำนวนตัวอย่างการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ทั้งหมด 8 ตัวอย่าง

กำลังรับแรงอัดจากการทดสอบต่างๆ สรุปดังนี้

ก1 กำลังรับแรงอัดตัวอย่างคอนกรีตพูน

ตารางผนวกที่ ก1 กำลังรับแรงอัดตัวอย่างคอนกรีตพูน

สัญลักษณ์	สารเชื่อมประสาน (%)		เถ้าลอย (FA) (%)	กำลังรับแรงอัด (ksc)		
	OPC	GCM		7 วัน	28 วัน	90 วัน
MIX-1	100	0	0	145.80	153.40	214.10
MIX-2	0	100	0	40.64	52.60	72.71
MIX-3	20	80	0	54.43	73.60	N.A.
MIX-4	90	0	10	201.70	236.10	236.80
MIX-5	80	0	20	196.90	202.20	253.60
MIX-6	0	90	10	41.00	60.30	86.60
MIX-7	0	80	20	39.80	66.10	98.70
MIX-8	70	0	30	156.30	159.00	204.80
MIX-9	60	0	40	151.40	175.60	186.60
MIX-10	50	0	50	128.40	153.10	166.80

ก2 กำลังรับแรงอัดตัวอย่างมอร์ต้าคอนกรีต

ตารางผนวกที่ ก2 กำลังรับแรงอัดมอร์ต้าทรงกระบอก MIX-1, MIX-4, MIX-8 และ MIX-10

สัญลักษณ์	กำลังรับแรงอัด (ksc)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
MIX-1	87.47	111.80	131.87
MIX-4	200.57	217.70	228.43
MIX-8	128.41	176.69	203.68
MIX-10	105.39	128.41	177.03

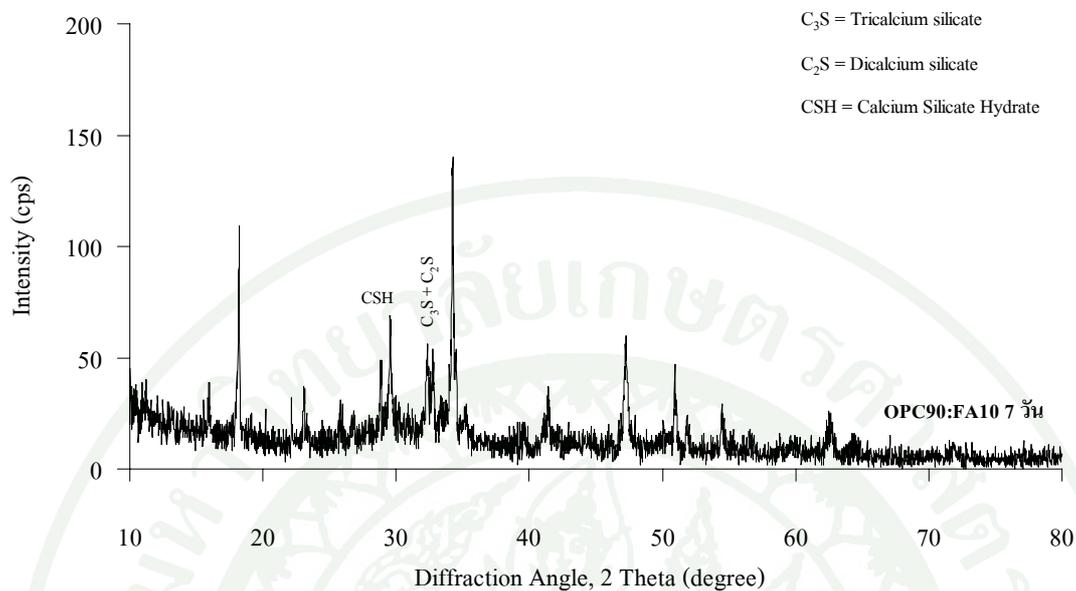
ตารางผนวกที่ ก3 กำลังรับแรงอัดมอร์ต้ารูปลูกบาศก์ MIX-1, MIX-4, MIX-8 และ MIX-10

สัญลักษณ์	กำลังรับแรงอัด (ksc)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
MIX-1	309.88	361.67	410.87
MIX-4	381.45	385.73	393.07
MIX-8	218.35	283.18	288.69
MIX-10	172.48	216.11	227.52

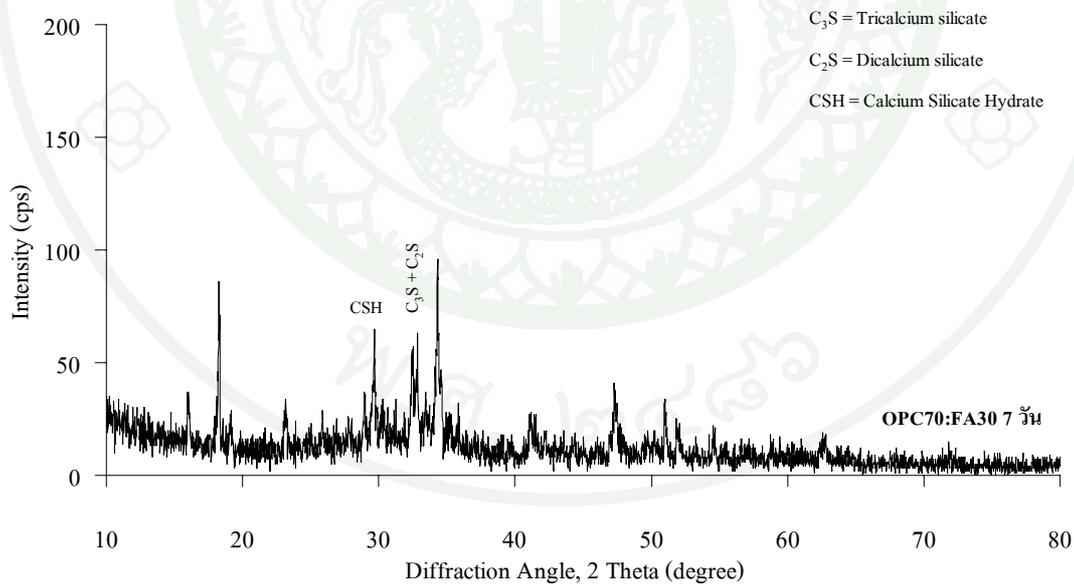


ภาคผนวก ข

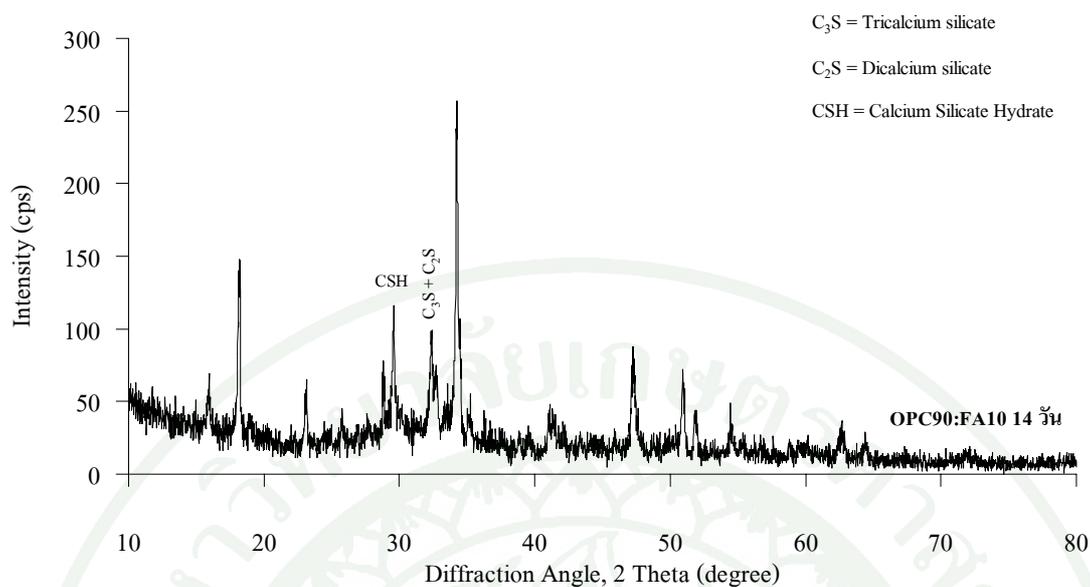
ข้อมูลการทดสอบ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC ที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ที่สัดส่วนต่างๆ



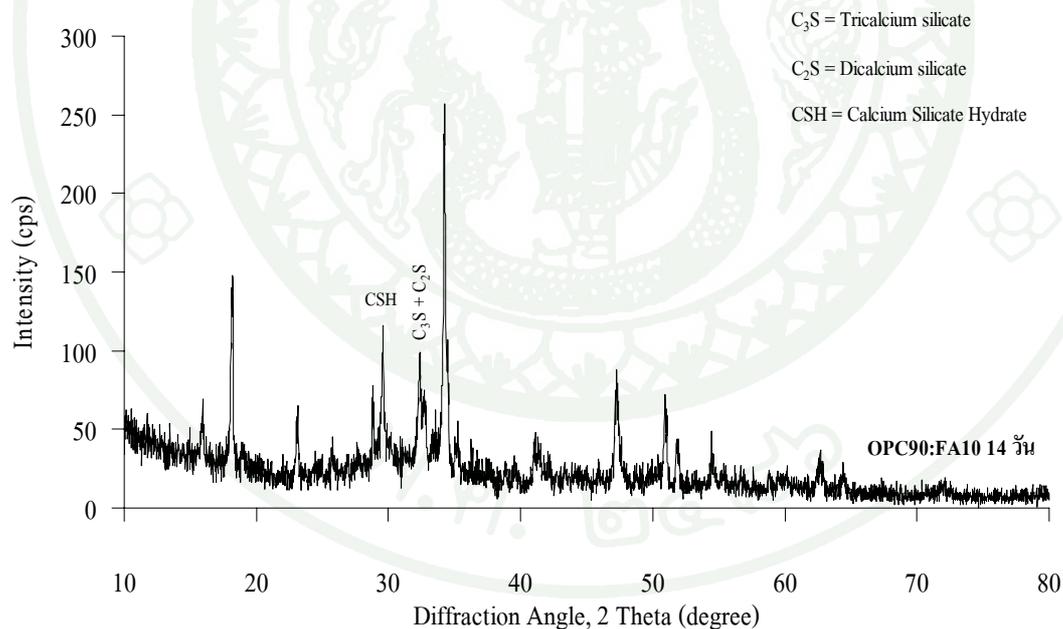
ภาพผนวกที่ ข1 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC90:FA10 ที่อายุการบ่ม 7 วัน (MIX-4)



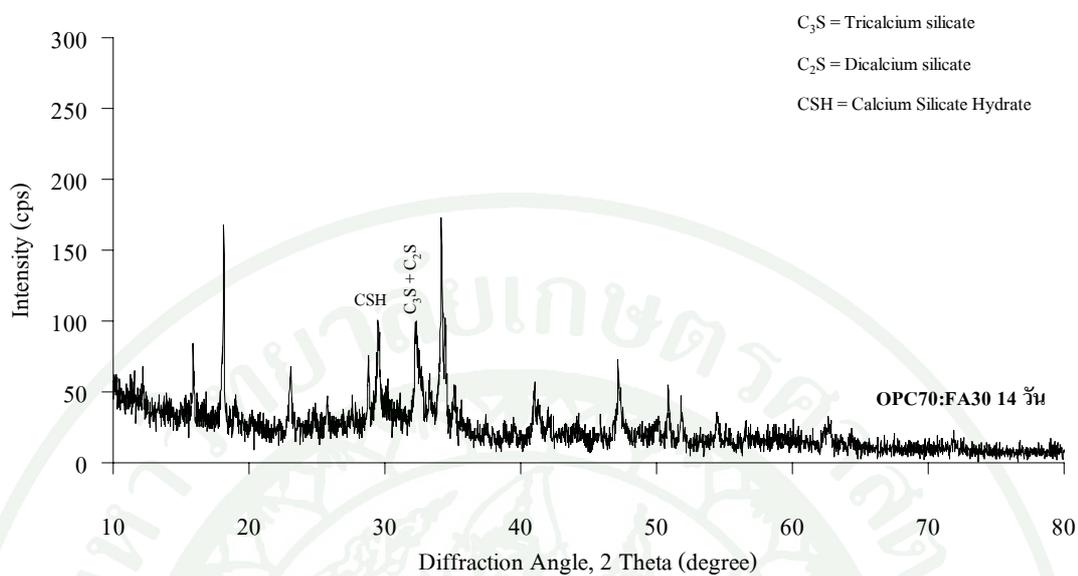
ภาพผนวกที่ ข2 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC70:FA30 ที่อายุการบ่ม 7 วัน (MIX-8)



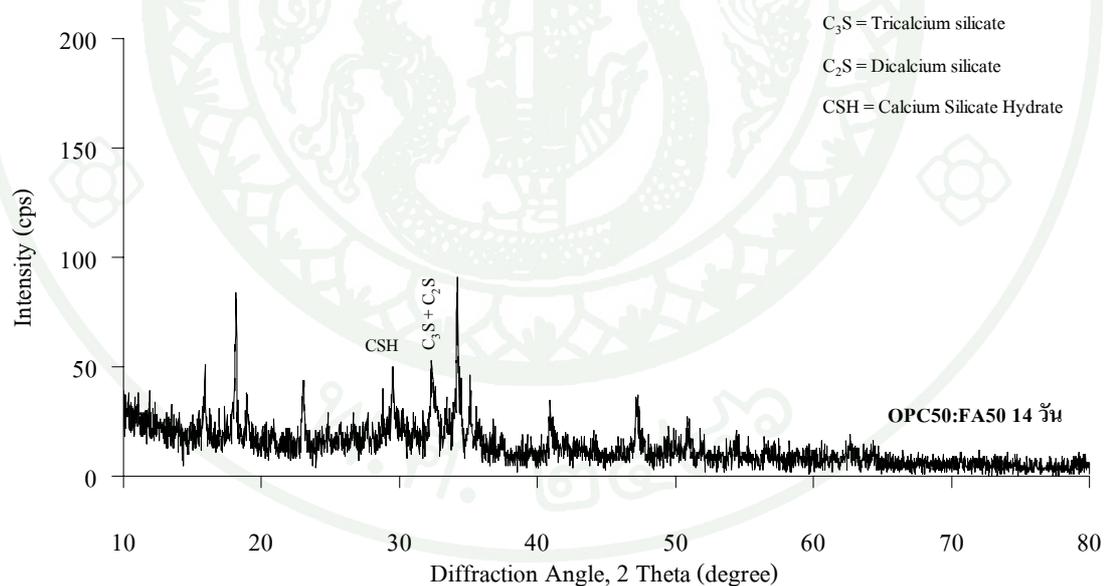
ภาพผนวกที่ ข3 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC50:FA50 ที่อายุการบ่ม 7 วัน (MIX-10)



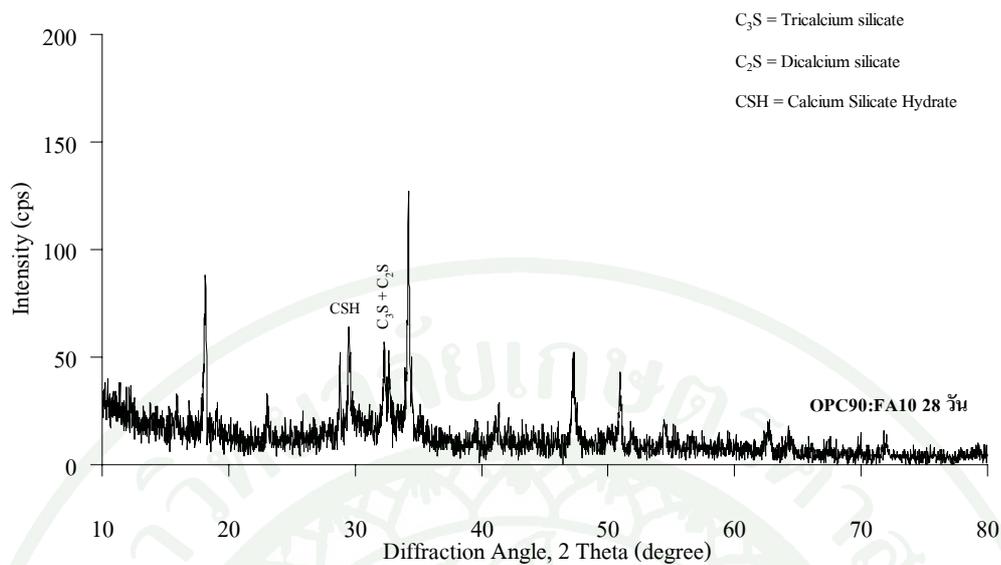
ภาพผนวกที่ ข4 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC90:FA10 ที่อายุการบ่ม 14 วัน (MIX-4)



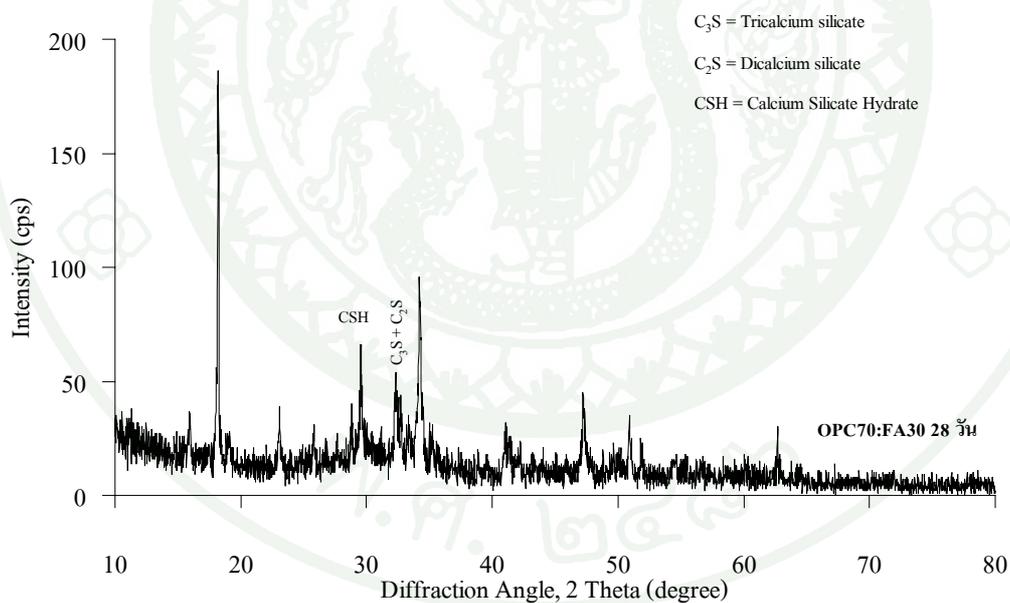
ภาพผนวกที่ ข5 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC70:FA30 ที่อายุการบ่ม 14 วัน (MIX-8)



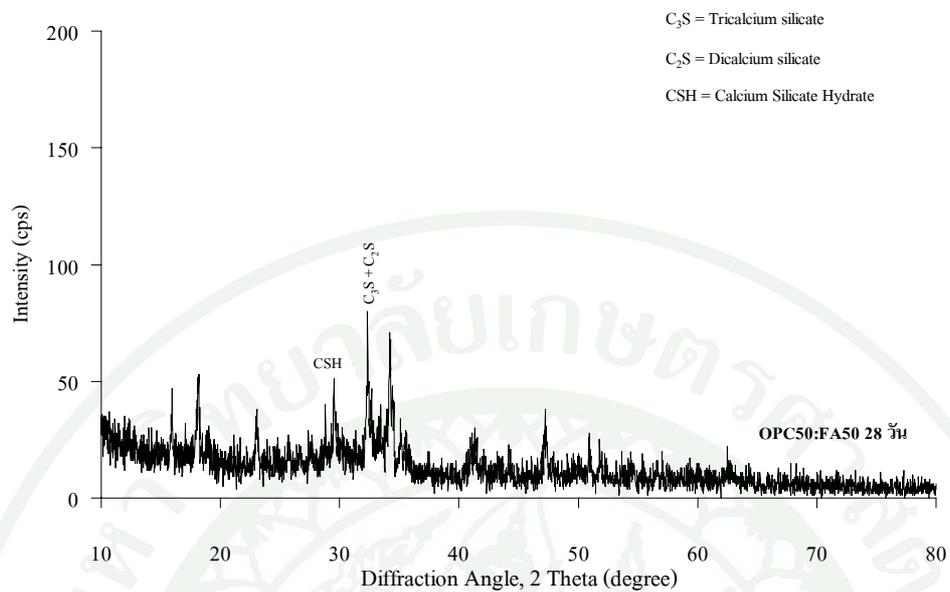
ภาพผนวกที่ ข6 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC50:FA50 ที่อายุการบ่ม 14 วัน (MIX-10)



ภาพผนวกที่ ข7 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC90:FA10 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (MIX-4)



ภาพผนวกที่ ข8 กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC70:FA30 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (MIX-8)

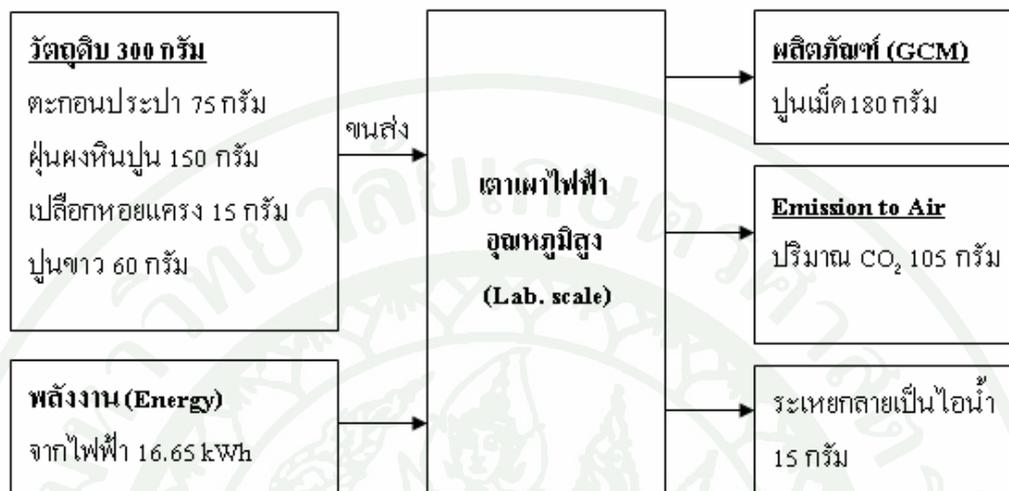


ภาพผนวกที่ ข๑ กราฟ XRD ของปูนซีเมนต์ OPC50:FA50 ที่อายุการบ่ม 28 วัน (MIX-10)



ภาคผนวก ค
สรุปขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (LCA) ของปูนเม็ด (Clinker)
จากกากอุตสาหกรรม

สรุปขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (LCA) ของปูนเม็ดจากกากอุตสาหกรรมแบบ Gate to Gate ในส่วนกระบวนการผลิต (Manufacturing process) (ดังภาพผนวกที่ ค1)



ภาพผนวกที่ ค1 แสดงขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากกากอุตสาหกรรม

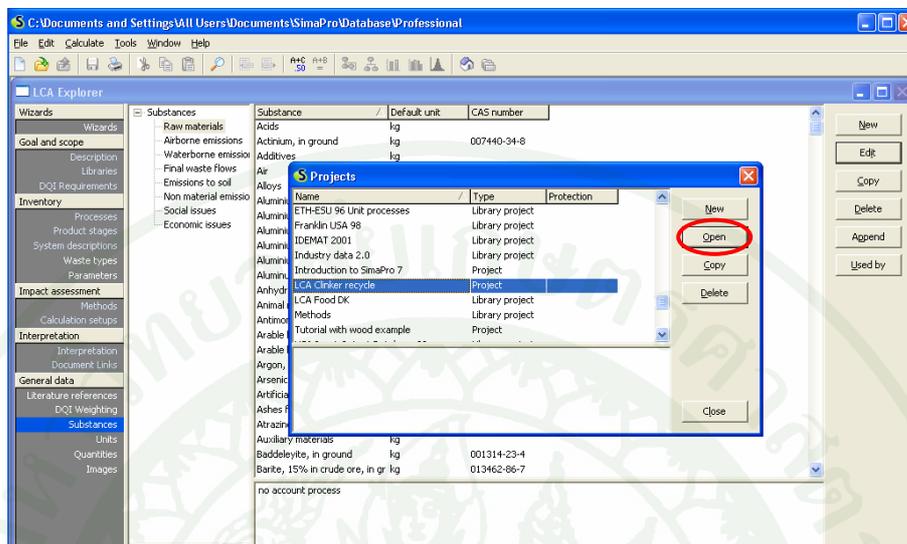
การใช้งานโปรแกรม SimaPro 7.1 มีขั้นตอนดังนี้

1. Double click โปรแกรม SimaPro 7.1 (ดังภาพผนวกที่ ค2)



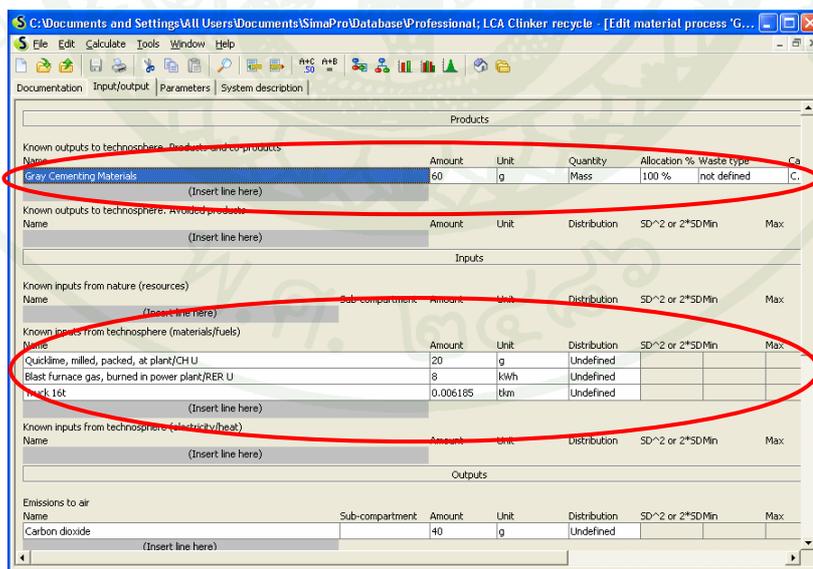
ภาพผนวกที่ ค2 แสดงไอคอนของโปรแกรม SimaPro 7.1

2. ตั้งชื่อ Project ตรง Name... แล้วคลิก Open (ดังภาพผนวกที่ ค3)



ภาพผนวกที่ ค3 หน้าจอใช้งานโปรแกรม SimaPro 7.1

3. Double click ไฟล์ Name (Gray Cementing Materials) ที่เราตั้งชื่อเอาไว้ (ดังภาพผนวกที่ ค4)



ภาพผนวกที่ ค4 แสดงค่าที่กรอกในฐานข้อมูล Input/Output

4. กรอกข้อมูลใน Input/Output ให้ครบถ้วนตามข้อมูลที่ระบุในโปรแกรม เช่น Amount, Unit, Quantity เป็นต้น

4.1 Output ในงานวิจัยสามารถระบุได้ดังนี้

- Name Gray Cementing Materials, Amount 180, Unit (g), Quantity (Mass)

4.2 Input ในงานวิจัยสามารถระบุได้ดังนี้

ในส่วน (Materials/fuels)

- Name Lime, hydrate, paked, at plant/CH U, Amount 60, Unit (g)

- Name Electricity, hydropower, at reservoir power plant/CH U, Amount 16.65, Unit (kWh)

- Name Truck 16t, Amount 0.006185, Unit (tkm)

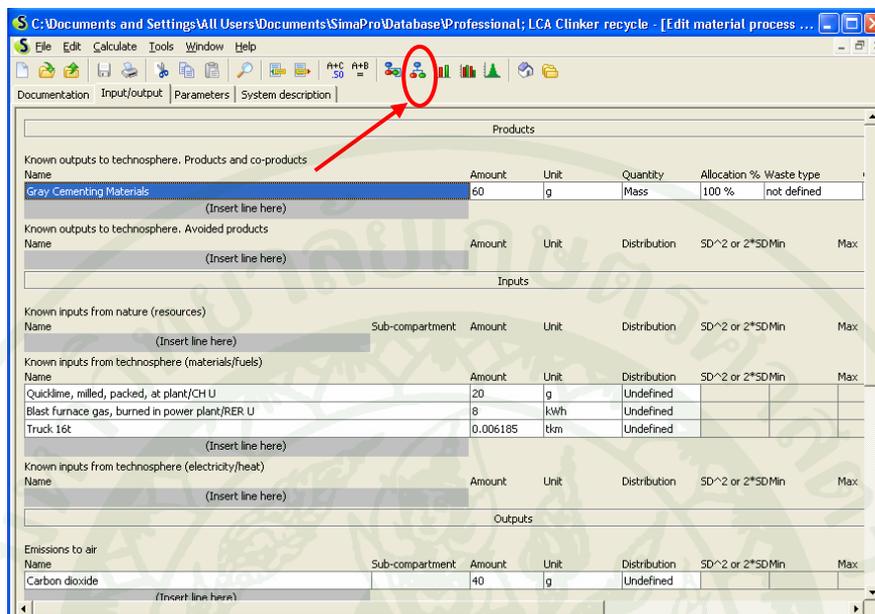
4.3 กรอก Emission to air (ดังภาพผนวกที่ ค5)

- Name Carbon dioxide, Amount 105 g, Unit (g)

Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
(Insert line here)						
Outputs						
Emissions to air						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
Carbon dioxide		40	g	Undefined		
(Insert line here)						
Emissions to water						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
(Insert line here)						
Emissions to soil						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
(Insert line here)						
Final waste flows						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
(Insert line here)						
Non material emissions						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
(Insert line here)						
Social issues						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
(Insert line here)						
Economic issues						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
(Insert line here)						
Known outputs to technosphere. Waste and emissions to treatment						
Name	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD ² or 2*SDMin	Max
(Insert line here)						

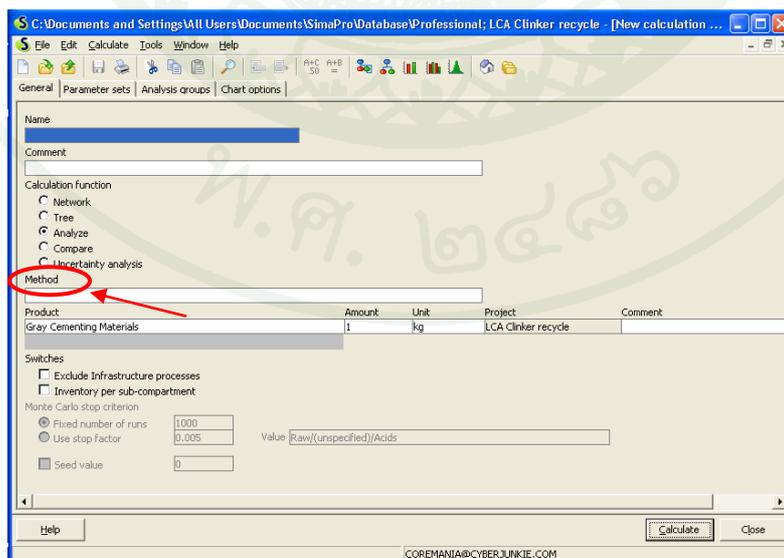
ภาพผนวกที่ ค5 แสดงค่าที่กรอกในฐานข้อมูล Emission to air

5. คลิก analyze เพื่อคำนวณค่าการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ดังภาพผนวกที่ ค6)



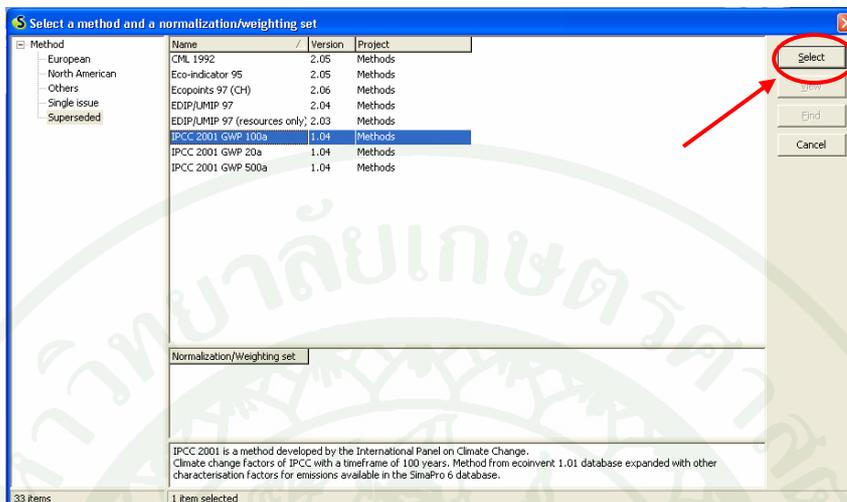
ภาพผนวกที่ ค6 หน้าจอเพื่อทำการ analyze การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

6. Double click เลือก Method ที่ต้องการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ดังภาพผนวกที่ ค7)



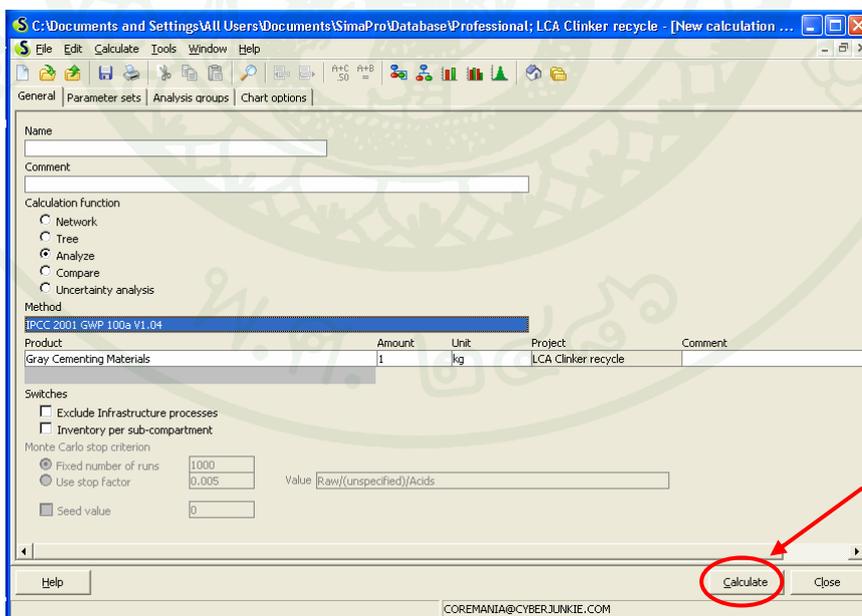
ภาพผนวกที่ ค7 หน้าจอแสดงโดย Double click เลือก Method

7. Click ที่ select ตรง Method ที่เราใช้ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ดังภาพผนวกที่ ค8)



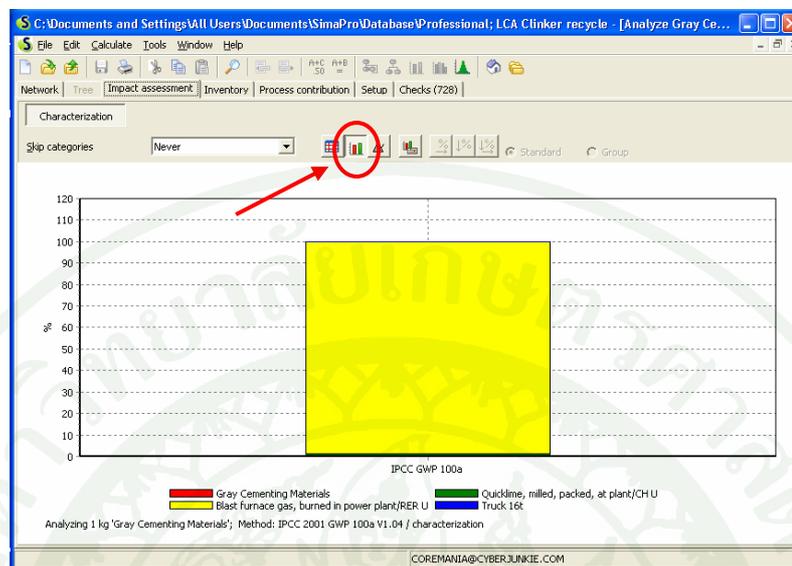
ภาพผนวกที่ ค8 หน้าจอเลือก Method ที่ต้องการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

8. Click ที่ calculate เพื่อผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (ดังภาพผนวกที่ ค9)



ภาพผนวกที่ ค9 หน้าจอเลือก calculate เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

9. แสดงผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในรูปกราฟแท่ง (ดังภาพผนวกที่ ค10)



ภาพผนวกที่ ค10 กราฟแท่งแสดงผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของปูน GCM (Emission to air)

10. แสดงผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในตาราง (ดังภาพผนวกที่ ค11)

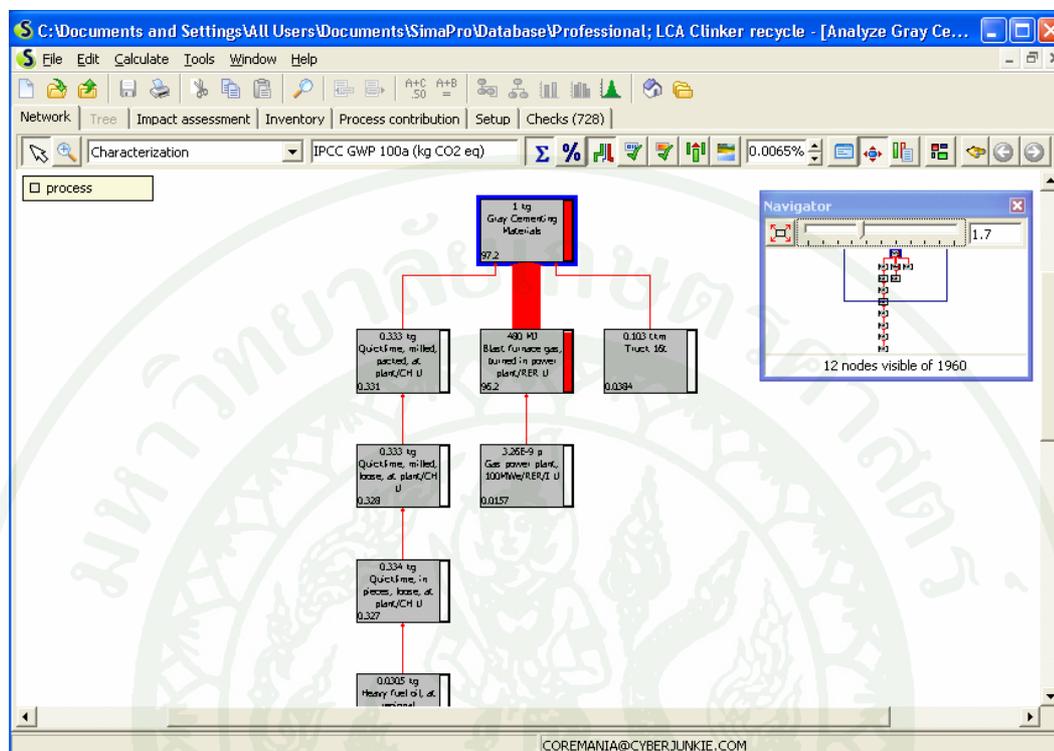
The screenshot shows the SimaPro software interface. The main window displays a table of environmental impact results for IPCC GWP 100a. A red arrow points to the table icon in the toolbar. The table below shows the following data:

Impact category	Unit	Total	Gray Cementing Materials	Quicklime, milled, packed, at	Blast furnace gas, burned in power	Truck 16t
IPCC GWP 100a	kg CO2 eq.	97.2	0.667	0.331	96.2	0.0304

The text below the table reads: 'Analyzing 1 kg 'Gray Cementing Materials'; Method: IPCC 2001 GWP 100a V1.04 / characterization'.

ภาพผนวกที่ ค11 แสดงตารางผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของปูนGCM (Emission to air)

11. แสดงผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใน Flow diagram (ดังภาพผนวกที่ ค12)



ภาพผนวกที่ ค12 Flow diagram แสดงผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของปูน GCM (Emission to air)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายเกียรติคุณ ทองแดง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 กันยายน 2523
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(เคมี) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	นักวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร