

การใช้เก้าอี้กลมผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USE OF RICE HUSK ASH BLENDED WITH CEMENT FOR QUALITY IMPROVEMENT OF CON
CRETE

Mr. Panupong Pongpitakkul



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

ภาณพงศ์ พงษ์พิทักษ์กุล : การใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต (USE OF RICE HUSK ASH BLENDED WITH CEMENT FOR QUALITY IMPROVEMENT OF CONCRETE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ธวัชชัย ชรินพาณิชย์กุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ศักดิ์ประยุทธ สินธุภิญโญ, 139 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งการนำเถ้าแกลบมาผสมในปูนซีเมนต์โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการวิจัย เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต โดยอาศัยกลไกการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายตัวของเถ้าแกลบที่เหมาะสม เถ้าแกลบที่ใช้มีโครงสร้างที่ได้มีปริมาณซิลิกาที่เป็นอสัณฐานร้อยละ 96.96 โดยมวล ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความละเอียดของเถ้าแกลบและสัดส่วนการผสมเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์โดยมวล มีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต ซึ่งพิจารณาจากความต้านแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน และระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดยใช้เข็มไวแคต ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของความละเอียดของเถ้าแกลบด้วยหม้อบดในห้องปฏิบัติการ (Lab mill) ตั้งแต่ค่าความละเอียด 3,200 ถึง 5,100 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และค่าสัดส่วนการผสมเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ถึง 20 โดยมวล พบว่าค่าความละเอียดของเถ้าแกลบและสัดส่วนการผสมเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์มีผลต่อความต้านแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน ความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน และระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดนใช้เข็มไวแคต ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความละเอียดที่ 5,100 ตารางเซนติเมตรต่อกรัมจะให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตและมอร์ตาร์ ที่มากที่สุดในทุกช่วงอายุที่ค่าสัดส่วนการผสมผสมเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 15 โดยมวล โดยที่ระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดยใช้เข็มไวแคตยาวขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณและขนาดของซิลิกาที่เป็นอสัณฐานที่เหมาะสมทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จลง ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าประเภทมูลค่าเพิ่มสูง นอกจากนี้เป็นการใช้เถ้าแกลบที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2559	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5870954321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: RICE HUSK ASH / CEMENT / POZZOLANIC REACTION / AMORPHOUS SILICA

PANUPONG PONGPITAKKUL: USE OF RICE HUSK ASH BLENDED WITH CEMENT FOR QUALITY IMPROVEMENT OF CONCRETE. ADVISOR: ASSOC. PROF.TAWATCHAI CHARINPANITKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: SAKPREYUT SINTHUPINYO, Ph.D., 139 pp.

This research aims to improve the quality of concrete by mixing rice husk ash (RHA) with cement by making use of Pozzolanic reaction mechanism and the fineness suitable for RHA. The RHA mainly consists of 96.96 percent by weight of amorphous silica. The relationship between RHA fineness and mixing ratio of RHA content affects concrete quality. A ball mill was employed to prepare RHA samples with controlled fineness with a range of 3,200 to 5,100 cm^2/g because compressive strength of ready-mixed concrete, mortar compressive strength and hydraulic cement setting time could be affected by the fineness of main constituents . In addition, the mixing ratio of RHA and cement was varied from 5 to 20 percent by weight. Consequently, the effects of RHA fineness and the mixing ratio of RHA and cement on the 3, 7 and 28-day compressive strength of ready-mixed concrete, the 1, 3, 7 and 28-day compressive strength of mortar, and the time of setting of hydraulic cement by Vicat Needle were investigated. With regards to experimental results, RHA with fineness 5,100 cm^2/g results in the highest compressive strength of concrete and mortars while the proportion of mixing RHA with cement was 10 to 15 percent by weight. However, this approach took little longer setting time of hydraulic cement due to the fact that amorphous silica within ground RHA was generated by the pozzolanic reaction and reduced water demand in ready-mixed concrete. The improvement of concrete quality to enhance the properties and qualities of the concrete surface, minimize production expenses, and increase the value of high value-added products were experimentally confirmed. As a result, the mixing of RHA, with control of the RHA fineness and mixing ratio between RHA and cement could benefit in production, and environment.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร. ศักดิ์ประยุทธ สินธุภิญโญ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้านเป็นอย่างดีตลอดมา ทั้งความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมถึงประธานกรรมการและคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้เสียสละเวลามอบคำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนขอขอบพระคุณความช่วยเหลือที่ได้รับจากบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ดร. ศักดิ์ประยุทธ สินธุภิญโญ หัวหน้ากลุ่ม Cement and Cementitious บริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด สำหรับคำแนะนำและคำวิจารณ์ในการทำงานวิจัยด้านการใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตมาโดยตลอด

คุณ กมล บางยี่ขัน ผู้จัดการส่วนส่งเสริมการผลิต บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด สำหรับความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือวิจัย และสถานที่ทำงานวิจัย

คุณ สมชาย ขำพล ผู้จัดการแผนกทดสอบฟิสิกส์ บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด คุณ อภัย ช่างถ่าย ผู้จัดการแผนกวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์และเคมี บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด และคุณประมุท ทับทอง ผู้จัดการแผนกบริการเทคนิคและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด สำหรับความช่วยเหลือในการวิเคราะห์และทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์และคอนกรีต

อ.ดร. วรัญ แต่ไพสิฐพงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผศ.ดร. ณัฐพร โทณานนท์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ อ.ดร. วีรวุฒิ ชัยวัฒน์ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการภัยพิบัติ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิชาสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี สำหรับการร่วมอภิปราย คำแนะนำ และแสดงความคิดเห็นมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบุพการี คณาจารย์และเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือให้ความรู้และคำแนะนำที่ดีตลอดมา

ทั้งนี้หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1	1
ที่มาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.1 ที่มาของประเด็นวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
บทที่ 2	3
หลักการทางวิชาการ และข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของแก้วเคลือบ	3
2.2 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำและปฏิกิริยาปอซโซลานิก	4
2.3 คุณสมบัติของมวลรวม (Aggregate).....	6
2.4 สารผสมเพิ่ม.....	9
2.5 ข้อมูลงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3	12
แนวทางการดำเนินการวิจัย	12
3.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบ.....	12
3.2 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี.....	16
3.3 วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์	21

3.4 วิธีดำเนินการศึกษา.....	32
3.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	32
บทที่ 4	34
ผลการทดลองและการอภิปรายผล	34
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ	34
4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์เถ้าแกลบที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาด.....	36
4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	38
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	44
บทที่ 5	58
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
รายการอ้างอิง	60
ภาคผนวก.....	63
ภาคผนวก ก.....	64
ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD).....	64
ภาคผนวก ข.....	72
ผลการทดสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution.....	72
ภาคผนวก ค.....	89
ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis.....	89
ภาคผนวก ง.	110
ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้เข็มแบบไวแคต.....	110
ภาคผนวก จ.....	115
ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	115

ภาคผนวก ฉ.....	119
ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ	119
ภาคผนวก ช.....	122
การคำนวณตัวประกอบการปรับแก้.....	122
ภาคผนวก ญ. บทความงานวิจัยการใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของ คอนกรีตในงานสัมมนาเชิงวิชาการ	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	139



สารบัญรูป

รูปที่ 1 เครื่องบด lab mill (INDUCTION MOTOR FLS).....	15
รูปที่ 2 อุปกรณ์ Automatic Sample Preparation Machines (PHOENIX – 2000)	17
รูปที่ 3 อุปกรณ์ X-Ray Fluorescence (XRF) (ARL 8680S).....	17
รูปที่ 4 อุปกรณ์ X-Ray Diffraction (XRD) (Bruker D4 ENDEAVOR).....	18
รูปที่ 5 ขวดแก้วเลอซาเตอลิเออร์	19
รูปที่ 6 เครื่อง Thermogravimetric analysis (Leco TGA-701)	21
รูปที่ 7 เครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้.....	22
รูปที่ 8 สเกลและเข็มแบบไวแคตใช้ทดสอบระยะการก่อตัวของปูนซีเมนต์	24
รูปที่ 9 เครื่อง Particle size distribution (Sympatec MYTOS)	26
รูปที่ 10 แบบหล่อและอ่างข่มใช้ทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	29
รูปที่ 11 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง Particle size distribution	36
รูปที่ 12 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบด้วยเครื่อง Particle size distribution	36
รูปที่ 13 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบผสม (Mixed RHA) ด้วยเครื่อง Particle size distribution... 37	
รูปที่ 14 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA) ด้วยเครื่อง Particle size distribution	37
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างอณูฐานและสัดส่วนการผสมของเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์.....	40
รูปที่ 16 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแต่ละองค์ประกอบของปูนซีเมนต์.....	45
รูปที่ 17 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	46
รูปที่ 18 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	46

รูปที่ 19 รูปแสดงความสัมพันธ์ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	47
รูปที่ 20 รูปแสดงความสัมพันธ์ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	48
รูปที่ 21 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 1 วัน.....	51
รูปที่ 22 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 3 วัน.....	51
รูปที่ 23 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 7 วัน.....	52
รูปที่ 24 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 28 วัน	52
รูปที่ 25 ปริมาณผลิตภัณฑ์เทียบเวลาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ	53
รูปที่ 26 ผลการทดลองกำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 3 วัน.....	56
รูปที่ 27 ผลการทดลองกำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 7 วัน.....	56
รูปที่ 28 ผลการทดลองกำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 28 วัน.....	57
รูปที่ 29 ผลการทดลองกำลังอัดของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์กับช่วงอายุ.....	57
รูปที่ ก. 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ตัวอย่าง B.....	67
รูปที่ ก. 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของเถ้าแกลบ	67
รูปที่ ก. 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P5.....	67
รูปที่ ก. 4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P10	68
รูปที่ ก. 5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P15	68
รูปที่ ก. 6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P20	68
รูปที่ ก. 7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M5	69
รูปที่ ก. 8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M10	69
รูปที่ ก. 9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M15	69
รูปที่ ก. 10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M20	70
รูปที่ ก. 11 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G5.....	70

รูปที่ ก. 12 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G10.....	70
รูปที่ ก. 13 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G15.....	71
รูปที่ ก. 14 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G20.....	71
รูปที่ ข. 1 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ตัวอย่าง B	73
รูปที่ ข. 2 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบดั้งเดิม (Pristine RHA)	74
รูปที่ ข. 3ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบผสม (Mixed RHA).....	75
รูปที่ ข. 4 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA)	76
รูปที่ ข. 5 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P5	77
รูปที่ ข. 6 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P10	78
รูปที่ ข. 7 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P15	79
รูปที่ ข. 8 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P20	80
รูปที่ ข. 9 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M5	81
รูปที่ ข. 10 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M10.....	82
รูปที่ ข. 11 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M15.....	83
รูปที่ ข. 12 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M20.....	84
รูปที่ ข. 13 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G5.....	85
รูปที่ ข. 14 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G10.....	86
รูปที่ ข. 15 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G15.....	87
รูปที่ ข. 16 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G20.....	88
รูปที่ ค. 1 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ตัวอย่าง B ที่อายุ 28 วัน..	103
รูปที่ ค. 2 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P5 ที่อายุ 28 วัน.....	104
รูปที่ ค. 3 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P10 ที่อายุ 28 วัน.....	104

รูปที่ ค. 4 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P15 ที่อายุ 28 วัน.....	105
รูปที่ ค. 5 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P20 ที่อายุ 28 วัน.....	105
รูปที่ ค. 6 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M5 ที่อายุ 28 วัน.....	106
รูปที่ ค. 7 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M10 ที่อายุ 28 วัน.....	106
รูปที่ ค. 8 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M15 ที่อายุ 28 วัน.....	107
รูปที่ ค. 9 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M20 ที่อายุ 28 วัน.....	107
รูปที่ ค. 10 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G5 ที่อายุ 28 วัน.....	108
รูปที่ ค. 11 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G10 ที่อายุ 28 วัน.....	108
รูปที่ ค. 12 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G15 ที่อายุ 28 วัน.....	109
รูปที่ ค. 13 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G20 ที่อายุ 28 วัน.....	109

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ร้อยละโดยมวลขององค์ประกอบทางเคมีโดยมวลของเถ้าแกลบ	4
ตารางที่ 2 การแบ่งประเภทของมวลรวมและลักษณะตาม ASTM C33-97	7
ตารางที่ 3 ลักษณะผิวของมวลรวม ตาม ASTM C33-97	8
ตารางที่ 4 สัดส่วนการกระจายขนาดของหินคละตามมาตรฐาน ASTM C33-97	8
ตารางที่ 5 สัดส่วนการกระจายขนาดของทรายตามมาตรฐาน ASTM C33-97	9
ตารางที่ 6 สัดส่วนร้อยละโดยมวลขององค์ประกอบหลักใน RHA และซีเมนต์	10
ตารางที่ 7 องค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด	13
ตารางที่ 8 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด	14
ตารางที่ 9 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำหนักของตัวอย่างที่หายไปในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ	21
ตารางที่ 10 เกณฑ์การยอมรับความคลาดเคลื่อนของอายุทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	28
ตารางที่ 11 ปริมาณวัสดุที่ใช้ผสม	29
ตารางที่ 12 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของอายุทดสอบ	31
ตารางที่ 13 แผนงานวิจัยการใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของงานคอนกรีต	33
ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ	34
ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ	35
ตารางที่ 16 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ใช้ในการทดลอง	38
ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	39
ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	40
ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	41
ตารางที่ 20 ผลการทดสอบค่าความละเอียดโดยเครื่องแอร์เพอร์มิโอะบิลิตีของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	42

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ.....	43
ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่อายุ 28 วัน.....	44
ตารางที่ 23 ผลการทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ.....	55
ตารางที่ ก. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบผลึกกับมุมตกกระทบของพีคเดี่ยวเบน (2 θ).....	66
ตารางที่ ง. 1 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวและผลการคำนวณระยะเวลาก่อตัวของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ.....	110
ตารางที่ จ. 1 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ช่วงอายุ 1 วัน.....	115
ตารางที่ จ. 2 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ช่วงอายุ 3 วัน.....	116
ตารางที่ จ. 3 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ช่วงอายุ 7 วัน.....	117
ตารางที่ จ. 4 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ช่วงอายุ 28 วัน.....	118
ตารางที่ ฉ. 1 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ช่วงอายุ 3 วัน.....	119
ตารางที่ ฉ. 2 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ช่วงอายุ 7 วัน.....	120
ตารางที่ ฉ. 3 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ช่วงอายุ 28 วัน.....	121
ตารางที่ ช. 1 ตัวประกอบการปรับแก้ค่าของผลการวิเคราะห์และทดสอบ.....	123

บทที่ 1

ที่มาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.1 ที่มาของประเด็นวิจัย

ปูนซีเมนต์ (Cement) มาจากภาษาละติน (Latin) มีความหมายว่า วัสดุที่สามารถยึดติดและเป็นตัวประสานระหว่างของแข็งได้ ทำให้ หิน กรวด และทราย แข็งติดรวมเป็นชิ้นเดียวกัน ใช้ในงานก่อสร้างเป็นหลัก ซึ่งสามารถนำปูนซีเมนต์มาใช้งานได้หลายรูปแบบ ได้แก่ ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต ในแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันดังนี้ ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) คือ ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ กับ น้ำ และอาจมีสารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต มอร์ตาร์ (Mortar) คือ ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ กับ ทราย และ คอนกรีต (Concrete) คือ ส่วนผสมประกอบด้วยปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย หิน หรือกรวด และอาจมีสารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีตด้วย ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติ ต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างให้อาคารมีความแข็งแรง จึงนิยมใช้กันตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เมื่อนำส่วนผสมต่าง ๆ ของคอนกรีตมาทำการผสมกันจะอยู่ในรูปของของเหลวในช่วงเวลาหนึ่ง ที่สามารถจะนำเทเข้าแบบหล่อเป็นรูปร่างที่ต้องการได้ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง ซึ่งมีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น แต่ปัจจุบันคอนกรีตได้มีการจำหน่ายในรูปแบบของคอนกรีต ก้นอย่างแพร่หลาย ซึ่งคือคอนกรีตที่ผสมเสร็จเรียบร้อยจากโรงงานและลำเลียงใส่รถเพื่อจัดส่งให้หน่วยงานก่อสร้างทดแทนการใช้คอนกรีตผสมไม่เล็ก เนื่องจากเวลาและสถานที่ในการก่อสร้างมีจำกัด แรงงานหายาก และวงการก่อสร้างต้องการคอนกรีตที่มีคุณภาพสูงขึ้น นอกจากนี้การผลิตคอนกรีตสมัยใหม่ยังมีรายละเอียดที่น่าสนใจอีกมาก เช่น มีการนำวัสดุใหม่ ๆ มาใช้ในการผสมเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ ทำให้เหมาะสมต่อการใช้งานแต่ละชนิด [1]

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตโดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีต หรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับสภาพของคอนกรีตสดให้ทำงานได้ง่ายขึ้น ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดของคอนกรีตในระยะปลาย เป็นต้น สำหรับมาตรฐาน ASTM C168 [2] ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (Silica) หรือซิลิกา (Silica) และอลูมินา (Alumina) เป็นองค์ประกอบหลัก ในประเทศไทยวัสดุปอซโซลานที่นิยมเป็นที่ใช้กัน ได้แก่ ถ้ำถ่านหิน ถ้ำแกลบ ถ้ำน้ำมันปาล์ม ถ้ำชานอ้อย ซิลิกาฟูม และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น

ในปัจจุบันสิ่งแวดล้อมได้รับผลกระทบเป็นอย่างมากจากการเติบโตทางด้านอุตสาหกรรม ดังนั้นเพื่อสร้างความตระหนักทางด้านสิ่งแวดล้อม บริษัทชั้นนำต่าง ๆ ในประเทศไทยจึงมีนโยบายที่มุ่งเน้นปรับปรุงกระบวนการผลิต และใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า ลดการเกิดของเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งถือเป็นความรับผิดชอบต่อสังคม ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการส่งออกข้าวเป็นรายใหญ่ของโลก ดังนั้นอุตสาหกรรมข้าวจึงมีวัสดุเหลือทิ้งจำพวกแกลบเป็นจำนวนมาก ในแต่ละปีจะได้แกลบจากการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน โดยในแต่ละตันของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีแกลบอยู่ประมาณ 200 กิโลกรัม วิธีการกำจัดแกลบในปัจจุบันส่วนใหญ่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานขนาดกลางและขนาดใหญ่ ที่มีการนำความร้อนไปใช้ในการผลิตไอน้ำ เมื่อนำแกลบไปเผาจะได้เถ้าแกลบประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักของแกลบหรือประมาณ 40 กิโลกรัมต่อตันข้าวเปลือก [3] ทำให้ส่งผลกระทบเกิดเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ตั้งแต่กระบวนการกองเก็บจนถึงการกำจัดเถ้าแกลบ สำหรับประโยชน์ของเถ้าแกลบยังมีการนำมาใช้งานได้น้อย จึงมีแนวความคิดที่จะนำ “เถ้าแกลบ” ที่เหลือจากกระบวนการผลิตซึ่งมีปริมาณซิลิกาสูง และเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการนำมาพัฒนาทำวัสดุพอลิโซลาน มาปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาด เพื่อเป็นการศึกษาอิทธิพลเกี่ยวกับบทบาทของคุณสมบัติการกระจายและสัดส่วนของซิลิกาที่ได้มาจากเถ้าแกลบ ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้งานเป็นวัสดุพอลิโซลาน ทำให้ใช้เป็นส่วนผสมในงานคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น และสามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาพอลิโซลานิก (Pozzolanic reaction) ได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้การใช้เถ้าแกลบเป็นองค์ประกอบสำคัญในการลดต้นทุนการผลิต ปรับปรุงคุณภาพและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าประเภทมูลค่าเพิ่มสูง (HVA-High Value Added) สร้างความเป็นผู้นำในอุตสาหกรรมการผลิตและเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมทั้งภายในอุตสาหกรรมการผลิตและชุมชนอย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการวิจัย โดยนำเถ้าแกลบมาปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาดด้วยวิธีการบดด้วยหม้อบด Lab mill จากนั้นจึงนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ โดยจะมุ่งเน้นประเด็นปัจจัยควบคุมอันได้แก่ ค่าความละเอียดของเถ้าแกลบ สัดส่วนเถ้าแกลบโดยมวลที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผสม และความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างออสซิลานและสัดส่วนการผสมของเถ้าแกลบ เพื่อใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต

บทที่ 2

หลักการทางวิชาการ และข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง

จากประเด็นที่มาของงานวิจัย จึงได้เริ่มรวบรวมความรู้เบื้องต้น และบทความต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเถ้าแกลบและการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาดที่ส่งผลต่อคุณภาพของงานคอนกรีต ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ดังนี้ 1. องค์ประกอบและคุณสมบัติของเถ้าแกลบ 2. ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำและปฏิกิริยาปอซโซลานิก 3. คุณสมบัติและขนาดคละของมวลรวม (Aggregate) 4. สารผสมเพิ่ม 5. ข้อมูลงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของเถ้าแกลบ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบมี SiO_2 สูงถึงร้อยละ 90 โดยมวล ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์ของโซเดียม (Sodium) โพแทสเซียม (Potassium) แมกนีเซียม (Magnesium) เหล็ก (Iron) ฟอสฟอรัส (Phosphorus) และซัลเฟอร์ (Sulfur) [4] และค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (Loss on Ignition) ซึ่งบ่งบอกถึงการเผาไหม้ ถ้าเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ LOI จะมีค่าที่สูงขึ้น เถ้าแกลบส่วนใหญ่จะดูดน้ำสูงและถ้ามีจำนวนที่มากเกินไปจะทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงได้ [5]

คุณสมบัติของเถ้าแกลบ แกลบที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มี LOI ต่ำ และมีปริมาณซิลิกาสูง [5] เถ้าแกลบที่ได้จะมีสถานะของซิลิกาอยู่ 2 สถานะคือ ออสัญฐาน (Amorphous) และผลึก (Crystalline) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผา ซิลิกาที่เป็นอสัญฐานจะเกิดขึ้นจากการเผาที่อุณหภูมิไม่สูงจนเกินไป (200-600 องศาเซลเซียส) ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ขึ้นอยู่กับ ความละเอียดของเถ้าแกลบ และปริมาณเถ้าแกลบที่ผสมในคอนกรีต สำหรับความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับวิธีการเผา เถ้าแกลบที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีสิ่งที่ไม่หมดและคาร์บอนปนอยู่มากและจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบที่เผาไหม้สมบูรณ์มีค่าระหว่าง 1.9-2.3 นอกจากนี้ค่าความละเอียดของแกลบจะขึ้นอยู่กับวิธีการเผาแกลบ เช่น ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้เถ้าแกลบที่มีพื้นที่ผิวสูงสุด ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้พื้นที่ผิวจะลดลงอย่างมาก [4]

ตารางที่ 1 ร้อยละโดยมวลองค์ประกอบทางเคมีโดยมวลของเถ้าแกลบ [4]

สารประกอบ (%)	ชนิด		
	เถ้าแกลบ	เถ้าแกลบเทาขาว	เถ้าแกลบดำโรงสี
SiO ₂	86.9-97.3	88.33	89.95
K ₂ O	0.6-2.5	2.76	1.49
Na ₂ O	0.0-1.5	0.15	0.07
CaO	0.2-1.5	0.52	0.5
MgO	0.12-1.96	0.28	0.23
Fe ₂ O ₃	0.0-0.6	3.37	1.89
P ₂ O ₅	0.2-0.9	-	-
SO ₃	0.1-1.1	0.12	0.02
Cl ₂	0.0-0.4	-	-
Al ₂ O ₃	N/A	0.48	0.54
LOI (%)	N/A	3.71	4.7

2.2 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำและปฏิกริยาปอซโซลานิก

ในปฏิกริยาปูนซีเมนต์และน้ำ เรียกว่าปฏิกริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัว และการแข็งตัวทำให้เกิดความสามารถในการรับกำลังอัดของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนั้นการศึกษาปฏิกริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และน้ำเพื่อนำไปอธิบายกลไกการเกิดปฏิกริยาจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก

องค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนซีเมนต์เกิดจากการทำปฏิกริยากันระหว่าง CaO (Calcium oxide) SiO₂ (Silicon dioxide) Al₂O₃ (Aluminium oxide) Fe₂O₃ (Iron(III) oxide) ในสัดส่วนที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส จนเกิดการรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบที่สำคัญและทำปฏิกริยากับน้ำ ดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)

องค์ประกอบทางเคมีคือ $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S) มีปริมาณอยู่มากในปูนซีเมนต์ จะเกิดผลึกที่เรียกว่า Idiomorphic crystal เป็นผลึกที่มีขอบชัดเจน เป็นผลึกที่มีหน้าตัดเป็นรูป 6 เหลี่ยม สามารถสลายตัวไปเป็น C_2S (Dicalcium Silicate) ได้ ดังนั้นหลังจากออกจากเตาเผาจึงต้องทำการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วเพื่อรักษาเสถียรภาพของ C_3S เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวและให้ค่ากำลังอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ค่ากำลังอัดเป็นหลัก และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถือเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by product) [6]



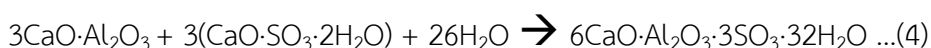
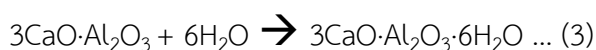
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)

องค์ประกอบทางเคมีคือ $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S) มีลักษณะเป็นเม็ดกลม เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะให้ค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างช้าและช้ากว่า C_3S ค่อนข้างมาก ส่วนใหญ่จะให้ค่ากำลังอัดในช่วงปลาย ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ค่ากำลังอัดเป็นหลัก และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถือเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by product) [6]



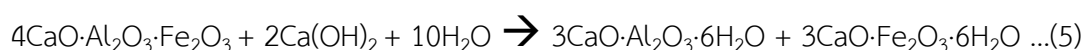
3. ไตรแคลเซียมอลูมินาต (Tricalcium Aluminate)

องค์ประกอบทางเคมีคือ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) มีอยู่ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 โดยมวล ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เหลี่ยม ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและรุนแรง ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการแข็งตัวอย่างทันทีทันใด ตามสมการที่ 3 ดังนั้นจึงต้องมีการเติมยิปซัม ($\text{CaO}\cdot\text{SO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เพื่อใช้ในการหน่วงการเกิดปฏิกิริยา ตามสมการที่ 4 ซึ่ง C_3A จะทำปฏิกิริยากับอ็อกซาลเฟตได้ แคลเซียมซัลโฟอลูมินาตไฮเดรต (Calcium Sulfoaluminate Hydrate, $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) หรือเรียกกันทั่วไปว่าเอทริงไทต์ (Ettringite) เมื่ออ็อกซาลเฟตทำปฏิกิริยาหมดแล้ว C_3A จะทำปฏิกิริยากับเอทริงไทต์เกิดเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมินาต (Calcium Monosulfoaluminate, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งให้ค่ากำลังอัดต่ำมากเมื่อเทียบกับ C_3S และ C_2S [1]



4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)

องค์ประกอบทางเคมีคือ $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 ถึง 10 โดยมวล เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนเม็ดระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เป็นสารที่ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเข้ม ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำ และเมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและก่อตัวอย่างรวดเร็ว ดังนี้ [1]



ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) เกิดจากวัสดุปอซโซลานที่มีองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่เป็นซิลิกา เมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่กล่าวไปในข้างต้น โดยเริ่มวัสดุปอซโซลานสัมผัสกับน้ำทำให้ผิวของสารปอซโซลานมีคุณสมบัติเป็นประจุบวกจากการดูดซับของไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของน้ำส่งผลให้เกิดการแตกตัวของไอออนอื่น ๆ ค่อย ๆ ตามมาเช่น โซเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) ซึ่งจะช่วยให้การแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ของซิลิกาที่โครงสร้างอสัณฐานเกิดการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออน จึงทำให้ความหนาของชั้นอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด จึงทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่าง โครงสร้างอสัณฐานของซิลิกาและแคลเซียมไฮดรอกไซด์



แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะค่อนข้างช้า เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีจะให้สารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เพิ่มขึ้น จะช่วยในการเพิ่มค่ากำลังอัดในระยะปลายดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้

2.3 คุณสมบัติของมวลรวม (Aggregate)

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregate) คือวัสดุเฉื่อยจำพวกหิน ทราย กรวด ที่ใช้เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต มีปริมาตรร้อยละ 70-80 ของปริมาณของส่วนผสมทั้งหมด ประโยชน์ของมวลรวมในงานคอนกรีตคือช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ ใช้เป็นตัวแทรกประสาน ทำให้คอนกรีตมีความคงทนและปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง รวมทั้งมวลรวมยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตด้วย

กำลังและคุณสมบัติของมวลรวมที่เหมาะสมจะสามารถช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพที่ดีขึ้นอีกด้วย มวลรวมที่ดีต้องมีความคงทนไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบในปูนซีเมนต์ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดผลเสียต่อเสถียรภาพทางปริมาตรของคอนกรีต และต้องไม่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดและการก่อตัวของคอนกรีต [7]

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตและความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตที่ดีขึ้น มวลรวมก้อนกลมและผิวเรียบต้องการซีเมนต์เพสต์ที่เคลือบน้อยกว่ามวลรวมรูปร่างอื่น เนื่องจากมีการขัดกันระหว่างก้อนมวลรวมต่ำ ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C33-97 ได้ให้คำนิยามของรูปร่างและลักษณะของมวลรวมไว้ตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 2 การแบ่งประเภทของมวลรวมและลักษณะตาม ASTM C33-97 [8]

การแบ่งประเภท	ลักษณะ	ตัวอย่าง
กลม (Sphere)	เกลี้ยงไม่มีเหลี่ยมเนื่องจากถูกน้ำกัดเซาะหรือจากการเสียดสีกันเอง	กรวดทรายจากแม่น้ำหรือชายทะเล
ไม่สม่ำเสมอหรือมีส่วนกลมอยู่บ้าง (Irregular)	ไม่สม่ำเสมอโดยธรรมชาติหรือถูกเสียดสีมาบ้าง และมีเหลี่ยมมน	กรวดทรายที่ได้จากบ่อหินเหล็กไฟที่ได้จากพื้นดินหรือขุดขึ้นมาหินลูกบาศก์
เหลี่ยม (Angular)	มีเหลี่ยมเกิดจากด้านที่เรียบมาบรรจบกันและเห็นได้ชัด	หินที่ย่อยจากเครื่องไม่ทุกแบบ หินที่ตกจากไหล่เขา
แบน (Flaky)	วัสดุที่มีความหนาไม่มากเมื่อเทียบกับความกว้างหรือความยาว ปกติจะเป็นเหลี่ยม	หินที่มีลักษณะเป็นชั้น

ตารางที่ 3 ลักษณะผิวของมวลรวม ตาม ASTM C33-97 [8]

เนื้อผิว	ตัวอย่าง
ใสคล้ายแก้ว (Glassy)	หินเหล็กไฟดำ (Black Flint)
เรียบ (Smooth)	หินเชิร์ต (Chert) หินชนวน (Slate) หินอ่อน (Marble) และหินไรโอไลต์ (Rhyolite) บางชนิด
เป็นเม็ด (Granular)	หินทราย หินอูไลต์ (Oolite)
เป็นผลึก (Crystalline)	อย่างละเอียด: บะซอลต์ (Basalt) อย่างกลาง: ไดออไรต์ (Diorite) แกรโนไฟร์ แกรนูลิต ไมโครแกรนิต (Micro-granite) หินปูน (Limestone) บางชนิด และหินโดโลไมต์ (Dolomite) ส่วนใหญ่ อย่างหยาบ: แกบโบร (Gabbro) ไนส์ (Gneiss) แกรนิต (Granite) แกรโนไดออไรต์ (Granodiorite)
เป็นโพรงรังผึ้งหรือเป็นรูพรุน (Honeycombed)	สกอเรีย (Scoria) พัมมิช (Pumice)

ขนาดคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีต และปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต แต่คละก้อนของมวลรวมในคอนกรีตที่ดีจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ และมวลรวมหยาบกับมวลรวมละเอียดต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เมื่อทำการผสมมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่าต้องแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างของมวลรวมขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการยึดเกาะมวลรวมเข้าด้วยกัน

ขนาดคละของหินคละที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีตต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตารางที่ 4 สัดส่วนการกระจายขนาดของหินคละตามมาตรฐาน ASTM C33-97 [8]

ขนาด ตะแกรง	1"	3/4"	3/8"	No.4	No.8
ร้อยละโดย มวลผ่าน ตะแกรง	100	90-100	20-55	0-10	0-5

ขนาดละเอียดของทรายที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีตต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

ตารางที่ 5 สัดส่วนการกระจายขนาดของทรายตามมาตรฐาน ASTM C33-97 [8]

ขนาด	9.5	4.75	2.36	1.18	600	300	150 μm	F.M.
ตะแกรง	mm	mm	mm	mm	μm	μm	(No.100)	
	(3/8")	(No.4)	(No.8)	(No.16)	(No.30)	(No.50)		
ร้อยละโดย								
มวลผ่าน	100	95-	80-	50-85	25-60	5-30	0-10	2.3-
ตะแกรง		100	100					3.2

ค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) คือ ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับขนาดเฉลี่ยของก้อนวัสดุในมวลรวม โดยที่ $F.M. = 1/100$ (ผลบวกของร้อยละสะสมของอนุภาคที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน) สำหรับทรายที่มีค่า F.M. สูงคือทรายที่มีความหยาบมาก ทรายที่มีความละเอียดมากจำเป็นต้องใช้น้ำมากเพื่อให้ได้ความสามารถเท่าได้เท่า ๆ กัน นอกจากนี้อนุภาคที่มีขนาดละเอียดที่ผ่านตะแกรง เบอร์ 50 และ 100 มีผลต่อความสามารถในการใช้งานคอนกรีตสด การแตงผิวหน้า และการเยิ้มของน้ำ (Bleeding) บนผิวคอนกรีตสด [8]

2.4 สารผสมเพิ่ม

สารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีต หมายถึงสารใด ๆ นอกเหนือไปจากน้ำ ปูนซีเมนต์ หิน และทราย ใช้เติมลงไปในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพของคอนกรีตให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ ในงานคอนกรีตนิยมใส่น้ำยาชนิด D ตามมาตรฐาน ASTM C494 [9] ในระหว่างการผสมซึ่งช่วยในการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีต เพราะมีคุณสมบัติในการช่วยลดประจุไฟฟ้าของผิวต่อระหว่างของคอนกรีตและน้ำในคอนกรีต ตามปกติอนุภาคซีเมนต์ในคอนกรีตจะมีประจุไฟฟ้าเหลือตกค้างบนผิว อนุภาคที่มีประจุต่างกันจะดึงดูดกันเป็นกลุ่ม สามารถดูดน้ำได้จำนวนมากทำให้เหลือน้ำหล่อลื่นคอนกรีตอยู่น้อย โมเลกุลของสารผสมเพิ่มชนิดนี้ช่วยทำให้ประจุเป็นกลาง หรือทำให้ประจุบนผิวอนุภาคต่าง ๆ กลายเป็นประจุชนิดเดียวกัน จึงเกิดแรงผลักดันซึ่งกันและกันทำให้แยกตัวกันในเนื้อซีเมนต์เพสต์ น้ำที่ผสมไปในคอนกรีตส่วนใหญ่จึงสามารถถูกใช้ลดความหนืดของซีเมนต์เพสต์ ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้ตามที่ต้องการ [9]

2.5 ข้อมูลงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

Dabai [10] ได้ดำเนินการศึกษาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วันและหาระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยผสม rice husk ash (RHA) สัดส่วนร้อยละโดยมวล 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ซึ่งใช้แหล่งแกลบจาก Arkilla โดยทำให้แห้งด้วยการตากแดดเป็นเวลา 3 วัน แล้วนำเข้าเตาเผา 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 6 สัดส่วนร้อยละโดยมวลขององค์ประกอบหลักใน RHA และซีเมนต์ [10]

Constituents	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	LOI	Free Lime
RHA	68.12	1.01	1.06	0.78	1.31	21.23	0.137	18.25	-
Cement	23.43	64.4	4.84	4.08	1.34	0.29	2.79	5.68	1.5

จากการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน สัดส่วนการผสมที่ RHA ร้อยละ 10 โดยมวล ให้ผลที่ดีที่สุดแต่ยังคงน้อยกว่าปูนซีเมนต์ (blank) สำหรับระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์พบว่าระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ทั้งช่วงต้นและช่วงปลายจะแปรผันตรงกันกับปริมาณสัดส่วนของ RHA

Rao [11] ได้ศึกษาการผสมแถ้าแกลบด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 โดยมวล ลงในปูนซีเมนต์ สำหรับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland pozzolona cement) ตามมาตรฐาน IS: 1489 (Part I)-1991 ขั้นตอนการเตรียมแถ้าแกลบได้จากกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าแถ้าแกลบที่ได้มีปริมาณซิลิกาที่เป็นอสัณฐานร้อยละ 85-90 โดยมวล ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 2.3 และอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 25 ไมครอน มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดเป็นไปตามมาตรฐาน IS 383:1970 ทำการทดลองหาค่ากำลังอัดคอนกรีตอัตราส่วนการผสมตามสูตร M20 (Control ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันให้มีค่ามากกว่า 30.3 เมกะปาสคาล) ตามมาตรฐาน IS: 516-1959 ที่อายุ 3, 7, และ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่าค่ากำลังอัดช่วงต้นจะให้ค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์(blank) แต่สำหรับค่ากำลังอัดช่วงปลายของคอนกรีตซึ่งเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกการผสมแถ้าแกลบที่ร้อยละ 7.5 โดยมวล ให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด และสำหรับค่าแรงดัดของคอนกรีต (Flexural Strength) ค่ากำลังดัดช่วงปลายของคอนกรีตซึ่งเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนิกการผสมแถ้าแกลบที่ร้อยละ 7.5 โดยมวล ให้ค่ากำลังดัดที่สูงที่สุด

Obilade [12] ศึกษาผสมเถ้าแกลบลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement) ตามมาตรฐาน BS EN 197-1:2000 เถ้าแกลบที่นำมาผสมและหินมาจาก Ile Ife, Nigeria และทรายมาจาก Iree, Osun state, Nigeria ตามมาตรฐาน BS 882 (1992) และกำหนดอัตราส่วนการผสม ปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน ในสัดส่วน 1:2:4 โดยมวล และดำเนินการผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 โดยมวล ลงในปูนซีเมนต์ ทำการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน พบว่าค่ากำลังอัดคอนกรีตช่วงปลายที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 5 โดยมวล ให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดแต่ยังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ (blank) และค่า bulk density ของคอนกรีตมีค่าที่น้อยลงตามสัดส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น

Kumar [13] ได้ศึกษาการนำเถ้าแกลบจาก Orissa มาผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland pozzolona cement) ตามมาตรฐาน IS: 1489 (Part I)-1991 ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 โดยมวลและทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งสูตรในการผสมคอนกรีตเป็นเกรด M20 ตามมาตรฐาน IS 120262-1975 ขนาดมวลรวมของทรายที่ใช้ในการผสมเป็นไปตามมาตรฐาน IS 383:1970 และขนาดของหินมีขนาดคละตามมาตรฐาน IS 383:1970 จากการทำทดลองหาค่ากำลังอัดและแรงดัดของคอนกรีตในช่วงอายุ 3, 7, 28 และ 56 วัน พบว่าปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบที่ร้อยละ 7.5 โดยมวล ให้ค่ากำลังอัดและแรงดัดในช่วงปลายที่มากที่สุด และช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต

แม้จะมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาดของอนุภาคผงปูนซีเมนต์โดยการเติมเถ้าแกลบ (RHA) แต่ทั้งนี้ความเข้าใจเกี่ยวกับบทบาทของคุณสมบัติการกระจายขนาดและสัดส่วนของ RHA ที่สามารถเกิดปฏิกิริยา Pozzalone นั้นก็ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างชัดเจน ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาปัจจัยตัวแปรต้น (Independent variables) ได้แก่ ค่าความละเอียดของเถ้าแกลบและสัดส่วนเถ้าแกลบโดยมวลที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ โดยมีตัวแปรตาม (Dependent variables) ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีและผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความละเอียดและขนาดของอนุภาค และ ปริมาณร้อยละโดยมวลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน ซึ่งมีตัวแปรควบคุม (Control variables) ได้แก่ วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ อุณหภูมิและความชื้นในการวิเคราะห์และทดสอบ เพื่อใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยา Pozzalone ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ทั้งในแง่ของค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตคอนกรีต และระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

บทที่ 3

แนวทางการดำเนินการวิจัย

ตามข้อมูลงานทดลองที่ได้จากการสำรวจข้อมูลงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการผสมแก้วแอลบลองในปูนซีเมนต์ จึงได้ดำเนินการออกแบบการทดลองในการศึกษาการใช้แก้วแอลบลองผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของงานคอนกรีตโดยแบ่งการศึกษาและทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ 1. การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบ 2. วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี 3. วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์

3.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด ซึ่งผลิตตามมาตรฐานมอก.15 เล่ม 1-2555 [14] ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 7 องค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด

CHEMICAL COMPOSTIONS		Requirements	Test Results
Silicon dioxide (SiO ₂)	Percent by weight	-	19.70
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	Percent by weight	-	4.73
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	Percent by weight	-	3.05
Calcium oxide (CaO)	Percent by weight	-	64.74
Magnesium oxide (MgO)	max, Percent by weight	6.0	2.06
Sulfur trioxide (SO ₃)	Percent by weight		
When 3CaO.Al ₂ O ₃ is 8 percent or less		3.0	
When 3CaO.Al ₂ O ₃ is more than 8 percent		3.5	3.17
Potassium oxide (K ₂ O)	Percent by weight	-	0.83
Sodium oxide (Na ₂ O)	Percent by weight	-	0.00
Equivalent Alkalies (Na ₂ O + 0.658K ₂ O)	Percent by weight	-	0.55
Loss on ignition	max, Percent by weight	3.0	1.7
Insoluble residue	max, Percent by weight	0.75	0.54
Tricalcium silicate (C ₃ S)*	Percent by weight	-	68.66
Dicalcium silicate (C ₂ S)*	Percent by weight	-	4.68
Tricalcium aluminate (C ₃ A)*	Percent by weight	-	7.37
Tetracalcium aluminoferrite (C ₄ AF)*	Percent by weight	-	9.28

*เป็นสารประกอบสมมุติซึ่งได้จากการคำนวณ ไม่จำเป็นต้องหมายความว่าออกไซด์ต่าง ๆ จะปรากฏอยู่จริง หรืออยู่ในลักษณะสารประกอบนี้ทั้งหมด

สมการการคำนวณหาร้อยละของไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ จากผลการวิเคราะห์ทางเคมีดังต่อไปนี้

$$\text{ไตรแคลเซียมซิลิเกต} = (4.071 \times \text{ร้อยละ CaO}) - (7.600 \times \text{ร้อยละของ SiO}_2) - (6.718 \times \text{ร้อยละ Al}_2\text{O}_3) - (1.430 \times \text{ร้อยละของ Fe}_2\text{O}_3) - (2.852 \times \text{ร้อยละ SO}_3) \dots(7)$$

$$\text{ไตรแคลเซียมซิลิเกต} = (2.867 \times \text{ร้อยละของ SiO}_2) - (0.7544 \times \text{ร้อยละของ 3CaO.SiO}_2) \dots(8)$$

$$\text{ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต} = (2.650 \times \text{ร้อยละ Al}_2\text{O}_3) - (1.692 \times \text{ร้อยละของ Fe}_2\text{O}_3) \dots(9)$$

$$\text{เทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์} = 3.043 \times \text{ร้อยละของ Fe}_2\text{O}_3 \dots(10)$$

สมมุติฐานและวิธีการการคำนวณในสมการที่ 7-10 แสดงอยู่ในภาคผนวก ซ.

ตารางที่ 8 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด

PHYSICAL PROPERTY		Requirements	Test Results
Fineness, specific surface, cm ² /g			
Air permeability test: Average value	min	2800	3382
Soundness : Autoclave expansion,	max, percent	0.80	0.04
Time of setting , min			
Vicat test : Initial set,	min, not less than	45	104
: Final set,	not more than	375	155
Air content of mortar, prepared and tested in accordance with method TIS.15 part 13 ,	max, percent	12	9.4
by volume, less than			
Compressive strength (kg _f /cm ²)			
1 day in moist air	min, kg _f per sq	-	141
cm			
1 day in moist air, 2 days in water ,	min, kg _f per sq cm	122	257
1 day in moist air, 6 days in water ,	min, kg _f per sq cm	194	323
1 day in moist air, 27 days in water ,	min, kg _f per sq cm	-	428
False set, final penetration,	min, percent	50	84.8

3.1.2 เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA)

เถ้าแกลบที่ผ่านกระบวนการเผาของบริษัท พิจิตรไปโอเพาเวอร์ จำกัด โดยบริษัทกระเบื้องกระดาศไทย บจก. (โรงงานทุ่งสง) ได้นำมาบดให้ได้ความละเอียด 3196 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม จากนั้นจึงนำเถ้าแกลบดังกล่าวมาบดใน lab mill อีกครั้งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาดของเถ้าแกลบ ด้วยมอเตอร์ชนิด HA 2 ขนาด 5 แรงม้า ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที และ ลูกบดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร น้ำหนักรวม 28 กิโลกรัม

3.1.5 น้ำยา Type D

น้ำยา Type D (ดาราทาร์ด) จากบริษัท W.R. Grace (Thailand) Co., Ltd.

3.1.6 ทรายออตตาวา (Ottawa Sand)

ทรายออตตาวา (Ottawa Sand) ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน มอก. 15-2532 จากบริษัท มัลติปิเอสซิเนส อัลโลแอนซ์ จำกัด

3.2 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เป็นการวิเคราะห์ในรูป Oxide ต่าง ๆ โดยวัดผ่านรังสี X-Ray ที่ตัวอย่างปล่อยออกมา หลังกระตุ้นด้วยรังสีจากหลอด X-Ray โดยใช้ Manual Preparation เตรียมตัวอย่างแบบ Glass Disk ด้วยเครื่อง Automated Fusion เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

การเตรียมตัวอย่าง Glass Disk ด้วยเครื่อง Automated Fusion หลอมละลายตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

การทำารผสม Flux (FLUORE-X 65 ซึ่งมีส่วนผสมของ Dilithiumtetraborate 66% กับ Dilithiummetaborate 34% ที่ผ่านการ Pre-Fuse และทำให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน) และ สารที่ต้องการทำการ Fuse มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

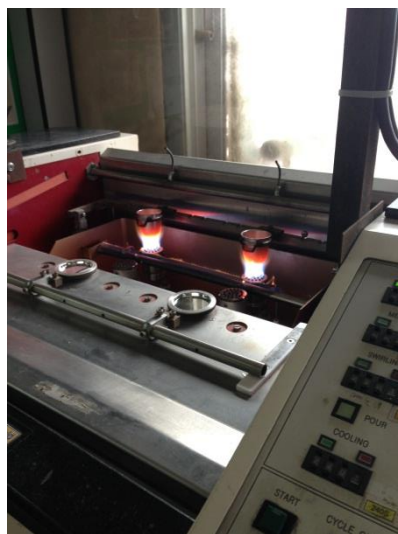
(1) หาค่า % LOI ของตัว Flux 1 กรัม โดยใช้เตาเผา 1200 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ซึ่งน้ำหนักมา 1 กรัม โดยใช้เตาเผา 1200 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที เพื่อหาค่า % LOI จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักของ Flux และ สารที่ต้องการทำการ Fuse จำนวนตามสูตรดังกล่าว

ซึ่ง Flux ที่เตรียมไว้ใส่ถ้วยผสมตัวอย่าง นน. Flux = $\frac{6.6}{1-0.01A}$... (11); A = % LOI ของ Flux

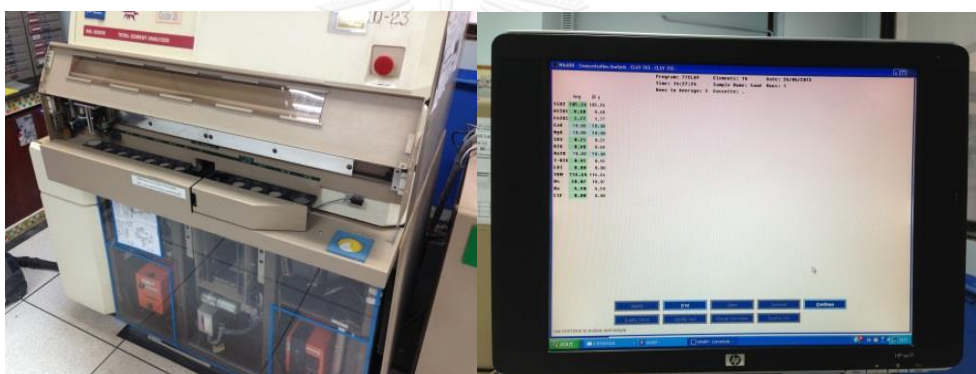
ซึ่งตัวอย่างที่เตรียมไว้ใส่ถ้วยผสมตัวอย่างเดียว ; นน.ตัวอย่าง = $\frac{6.6}{1-0.01B}$... (12); B = % LOI ของตัวอย่างผสมตัวอย่างในถ้วยผสมให้เข้ากัน

(2) นำสารผสมเข้าเครื่อง Automated Fusion เพื่อเตรียมตัวอย่าง Glass Disk เครื่องจะทำการ Pre melt, Melting, Swirling และ Cooling

(3) นำ Glass Disk เข้าเครื่อง XRF เพื่อทำการวิเคราะห์ค่า oxide ต่าง ๆ



รูปที่ 2 อุปกรณ์ Automatic Sample Preparation Machines (PHOENIX – 2000)



รูปที่ 3 อุปกรณ์ X-Ray Fluorescence (XRF) (ARL 8680S)

3.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบสารประกอบต่าง ๆ โดยวัดผ่านรังสีแม่เหล็กที่สะท้อนกลับจากโครงสร้างผลึกในตัวอย่างนั้น ๆ หลังจากได้รับรังสีจากหลอด X-Ray เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบ และ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

การเตรียมตัวอย่างด้วย Manual Preparation สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างต่าง ๆ แบบ Powder Tablet มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) ย่อยตัวอย่างด้วย Jaw Crusher ให้มีขนาดเล็กกว่า 1 มม. ชั่งตัวอย่าง 5 กรัม เติม Grinding Aid 2 หยด บดด้วย Manual Mill แยกครกบดตามชนิดของตัวอย่าง ใช้เวลาบด 5 วินาที

(2) นำตัวอย่างออกจากครกบด โดยใช้แปรงขนอ่อนปัดตัวอย่างออกจากครกบด และทำความสะอาดครกบดให้สะอาด

- (3) ตักตัวอย่างใส่ใน Manual Press โดยมีแหวนเหล็กเป็นแบบ ให้ตัวอย่างเต็มพอดีในแหวนเหล็ก ตั้งเวลาอัด 35 วินาทีและแรงอัด 50 กิโลนิวตัน กดสวิทซ์ให้เครื่องทำงาน จนครบขั้นตอน
- (4) ทำความสะอาดตัวอย่างโดยใช้เครื่องดูดฝุ่นดูดให้สะอาด โดยระวังไม่ให้สัมผัสผิวหน้าตัวอย่าง เพราะอาจทำให้ผลวิเคราะห์ผิดพลาดได้
- (5) นำตัวอย่างใส่ Cassette และวางบนชุด Loader ของเครื่อง X-Ray รอวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4 อุปกรณ์ X-Ray Diffraction (XRD) (Bruker D4 ENDEAVOR)

3.2.3 วิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ ตามมาตรฐานมอก. 15 เล่ม 2-2521 [15]

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

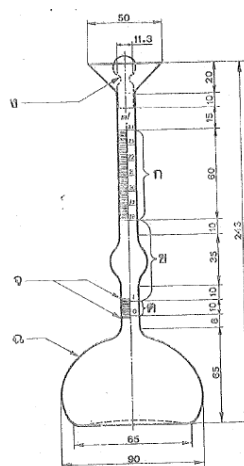
วิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- (1) เติมน้ำมันก๊าดลงในขวดแก้วให้อยู่ในช่วงขีด 0 ถึง 1 ซีซี ภายในขวดแก้วตอนที่สูงกว่าระดับของเหลวต้องแห้ง
- (2) นำขวดแก้วแช่ลงในอ่างน้ำที่อุณหภูมิห้องโดยให้นานพอจนน้ำมันก๊าดอยู่ในระดับคงที่
- (3) อ่านระดับของน้ำมันก๊าดครั้งแรก
- (4) ชั่งตัวอย่างปูนซีเมนต์ประมาณ 64 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วที่ละน้อย ระวังไม่ให้น้ำกระฉอกและไม่ให้ตัวอย่างเกาะติดอยู่ภายในขวดแก้วตอนบนของของเหลว
- (5) ปิดจุกขวดแล้วทิ้งขวดในสภาพเอียง เพื่อไล่ฟองอากาศจนกระทั่งไม่มีฟองอากาศลอยขึ้นมาที่ผิวของเหลวอีก
- (6) นำขวดแก้วแช่ลงในอ่างน้ำที่อุณหภูมิห้อง แช่จนระดับน้ำมันก๊าดคงที่
- (7) อ่านระดับของน้ำมันก๊าดครั้งหลัง โดยที่อุณหภูมิของน้ำในอ่างก่อนและหลัง ต้องต่างกันไม่เกิน 0.2 องศาเซลเซียส
- (8) การคำนวณ ปริมาตรของตัวอย่าง = ระดับน้ำมันก๊าดครั้งหลัง - ระดับน้ำมันก๊าดครั้งแรก ... (13)

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง}} \dots (14)$$

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำที่ 4 องศาเซลเซียส}} \dots (15)$$

หมายเหตุ: ความหนาแน่นของน้ำที่ 4 องศาเซลเซียส = 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



- ก. จู 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ 20 องศาเซลเซียส
 ข. จู 17 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ 20 องศาเซลเซียส
 ค. จู 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่ 20 องศาเซลเซียส
 ง. จุกแก้ว
 จ. ไม้ขีดแบ่ง 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร 2 ชุดกึ่งระยะ 1 และต่ำกว่า 0 ด้วย
 ฉ. ความจุประมาณ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

รูปที่ 5 ขวดแก้วเลอซาเตอลิเออร์

3.2.4 วิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis ของ LECO Model TGA- 701

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่อายุ 28 วัน

วิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis ขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

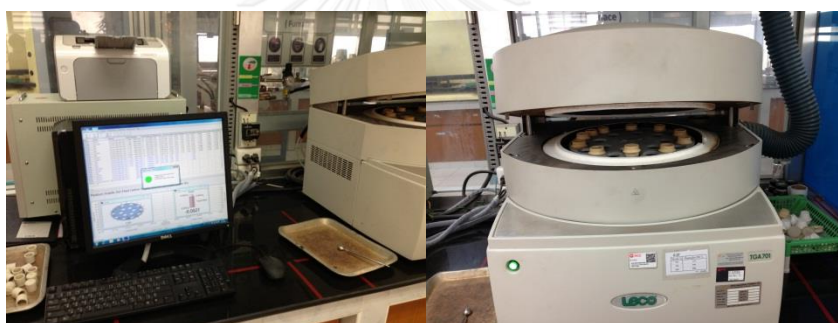
- (1) นำตัวอย่างมาผ่าน Sieve ขนาด 1 นิ้ว ส่วนที่ค้างนำไปย่อยด้วย Jaw Crusher ให้ ผ่าน Sieve ขนาด 1 นิ้ว แล้วนำมารวมกับที่ผ่าน Sieve ครั้งแรก
- (2) นำไปย่อยละเอียดโดยผ่านตะแกรง No.8 (2.36 มิลลิเมตร) บรรจุใส่ถุงเขียนรายละเอียดให้ชัดเจน เพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอก
- (3) ชั่งตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ ประมาณ 300 กรัม ใส่ในภาตซึ่งรู้น้ำหนัก เกลี่ยให้ตัวอย่างกระจายให้ทั่วภาต

- (4) หลังจากชั่งน้ำหนักจนครบทุก Crucible แล้ว Cover จะเปิดขึ้น หน้าจอแสดงให้ Load Sample ลงในไปใน Crucible ใช้ Glass Scoop ตักตัวอย่างที่ผ่านการเตรียม โดยตักมาประมาณ 1 ซ้อน (~ 1.0000 กรัม) ใส่ใน Crucible แล้วกด Next Key Cover จะปิดลงเพื่อบันทึกน้ำหนักไว้ จากนั้น Cover จะเปิดขึ้นไปอีกให้ตักตัวอย่างตัวถัดไปใส่ใน Crucible ตามขั้นตอนข้างต้นจนครบทุกตัวอย่าง
- (5) หลังจากตัวอย่างตัวสุดท้ายถูกบันทึกน้ำหนัก เครื่องจะเริ่มวิเคราะห์ Step Moisture อุณหภูมิของ Furnace จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 107 องศาเซลเซียส จะทำงานจนครบ Step
- (6) เมื่อจบ Step Moisture จะมีเสียงดังขึ้น กด Next key ฝาจะเปิดขึ้น หน้าจอจะบอกให้เราปิดฝา Crucible ตรงลูกศรชี้และกด Next key จะหมุนไป 1 ตำแหน่ง เพื่อให้เราปิดฝา Crucible ตัวถัดไป (ต้องกด Next key ทุกครั้งที่จะปิดฝา Crucible ตัวถัดไป) จากนั้นกด Next key อีกครั้ง Cover จะปิดลงเครื่องก็จะเริ่มวิเคราะห์ Step Volatile ต่อไป (หน้าจอจะแสดง Allowing Cover to Equilibrate รอประมาณ 2 นาที เครื่องจะเข้า Menu ปกติ และเพิ่มอุณหภูมิที่ 750 ± 10 องศาเซลเซียส ประมาณ 4 ชั่วโมง และอุณหภูมิของ Furnace จะเพิ่มขึ้นจนถึง 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมง และจะคงที่อยู่ประมาณ 7 นาที
- (7) เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 800 องศาเซลเซียส Cover จะเปิดขึ้น และอุณหภูมิจะลดลงเหลือ 600 องศาเซลเซียส หน้าจอเครื่องจะบอกให้นำฝา Crucible ออกโดยการกด Next key เมื่อนำฝาของ Crucible ออกมา แล้วกด Next key อีกครั้งเครื่องจะเริ่มวิเคราะห์ Step Ash ต่อไปจนครบ Step Ash Constant Weight ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส
- (8) ในแต่ละขั้นตอนหน้าจอเครื่อง TGA-701 จะแสดงคำสั่งให้ปฏิบัติตามคำสั่งนั้น ๆ
- (9) เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการวิเคราะห์ตาม Method ที่เลือกไว้ เครื่องพิมพ์ ผลการวิเคราะห์ออกมาให้ทั้งหมด นำผลวิเคราะห์ที่ได้ ไปออกรายงานต่อไป
- (10) รอจนอุณหภูมิเครื่องต่ำลงประมาณ 200 องศาเซลเซียส นำ Crucible ออก โดยใช้คีมจับ
- (11) ปิด Switch เครื่อง TGA-701 ปิด Switch เครื่องพิมพ์ ปิดวาล์ว ออกซิเจน ไนโตรเจน และ Compressor Air

สามารถวิเคราะห์หาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)_2) ที่หายไปจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำหนักของตัวอย่างที่หายไปในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ

ช่วงน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนัก	ช่วงอุณหภูมิประมาณ	คำอธิบาย
1	25-110 องศาเซลเซียส	น้ำ (H ₂ O)
2	110-150 องศาเซลเซียส	น้ำจากปฏิกิริยา dehydration ของยิปซั่ม
3	150-450 องศาเซลเซียส	น้ำ (H ₂ O)
4	450-550 องศาเซลเซียส	น้ำจากปฏิกิริยา dehydration แคลเซียมไฮดรอกไซด์
5	550-900 องศาเซลเซียส	คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide, CO ₂) เป็นหลัก

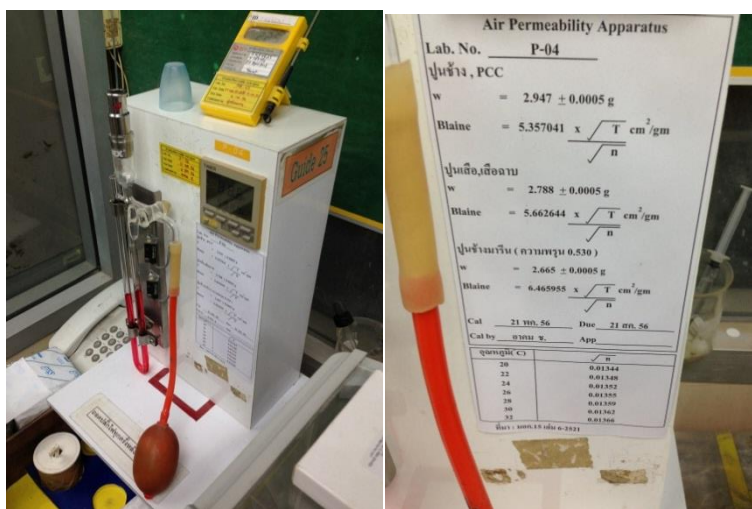


รูปที่ 6 เครื่อง Thermogravimetric analysis (Leco TGA-701)

3.3 วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์

3.3.1 ทดสอบหาความละเอียดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยเครื่องแอร์เพอร์มิออบิลิตี (Air Permeability Apparatus) (มอก.15 เล่ม 6-2519) [16]

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้า



รูปที่ 7 เครื่องแอร์เพอร์มิโอะบิลิตี

- (1) ใส่แผ่นโลหะ (Disk) ซึ่งคว่ำหน้าลงใน Cell
- (2) ใส่กระดาษกรองชนิดไหลเร็วปานกลางสำหรับตะกอนขนาดกลาง 1 แผ่น ให้วางลงบน แผ่นโลหะ (Disk) โดยใช้แท่งกลมขนาดเล็กกว่าเซลล์เล็กน้อย กดกระดาษกรองลงไปให้แนบสนิทกับแผ่นโลหะ (Disk)
- (3) ชั่งตัวอย่างที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องขณะทำการทดสอบตามน้ำหนักและชนิดของปูนซีเมนต์ที่กำหนดตามผลการสอบเทียบ
- (4) ใส่ตัวอย่างปูนซีเมนต์ลงใน Permeability Cell โดยอาศัยกรวย จากนั้นเคาะบริเวณข้าง Cell ในตำแหน่งที่มีตัวอย่างปูนซีเมนต์อยู่เบา ๆ เพื่อให้ผิวหน้าของตัวอย่างปูนซีเมนต์เสมอกัน
- (5) ใช้แปรงเล็ก ๆ กวาดตัวอย่างลงให้หมด ใส่กระดาษกรอง ชนิดไหลเร็วปานกลางสำหรับตะกอนขนาดกลางลงไปทับหน้า 1 แผ่น
- (6) ใช้แท่งอัด (Plunger) กดลงไปจนบ่าล่างแนบสนิทกับขอบบนของ Cell
- (7) ดึงแท่งอัด (Plunger) ขึ้นช้า ๆ หมุนให้ตั้งฉากกับแนวเดิมแล้วกดลงช้า ๆ ให้แนบสนิทกับขอบบนของ Cell อีกครั้งหนึ่ง
- (8) ค่อย ๆ ดึงแท่งอัด (Plunger) ขึ้นมาอย่างช้า ๆ
- (9) ทวารสลิบบริเวณรอบนอกของ Permeability Cell สวม Permeability Cell ลงบนก้าน Manometer ระวังอย่าให้ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่อยู่ใน Permeability Cell กระเทือน
- (10) เปิด Valve ดูดอากาศจากขอบล่างของ Manometer ช้า ๆ โดยการบีบลูกยางจนกระทั่งของเหลวสีแดงขึ้นจนถึงขีดบนสุดจึงปิด Valve
- (11) เมื่อท้องน้ำของของเหลวสีแดงลดลงมาถึงขีดที่ 2 (นับจากบน) ให้เริ่มจับเวลา

(12) หยุดจับเวลาทันทีเมื่อท้องน้ำของของเหลวลงมาถึงขีดที่ 3 (นับจากบน) บันทึกเวลาที่จับได้และอุณหภูมิขณะทำการทดสอบ

(13) วิธีการคำนวณหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface or Blaine; ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)

การคำนวณ

$$S = \frac{S_s \sqrt{T}}{\sqrt{T_s}} = \frac{S_s \rho_s (b - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T}}{\rho (b - \epsilon) \sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s}} \dots (16)$$

เมื่อ S = ความละเอียดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ทดสอบ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม

S_s = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้สอบเทียบเครื่องมือมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม

T = ช่วงเวลาที่ของเหลวใน Manometer ลดต่ำลงมาจากขีดที่ 2 ถึงขีดที่ 3 หน่วยเป็นวินาที

T_s = ช่วงเวลาที่ของเหลวใน Manometer ลดต่ำลงมาเมื่อมีตัวอย่างมาตรฐานสำหรับสอบเทียบเครื่องมือใส่ อยู่เป็นวินาที

ϵ = ความพรุนของตัวอย่างทดสอบ

ϵ_s = ความพรุนของตัวอย่างมาตรฐาน ที่ใช้ในการสอบเทียบ

ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบ (สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3.15 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือ 3.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_s = ความหนาแน่นของตัวอย่างมาตรฐานใช้ในการ Calibrate เครื่องมือ (สมมุติ เท่ากับ 3.15 mg/m³ หรือ 3.15g/cm³)

b = ค่าคงที่สำหรับตัวอย่างทดสอบ (สำหรับ Hydraulic Cement จะใช้ 0.9)

b_s = 0.9 เป็นค่าคงที่สำหรับมาตรฐาน

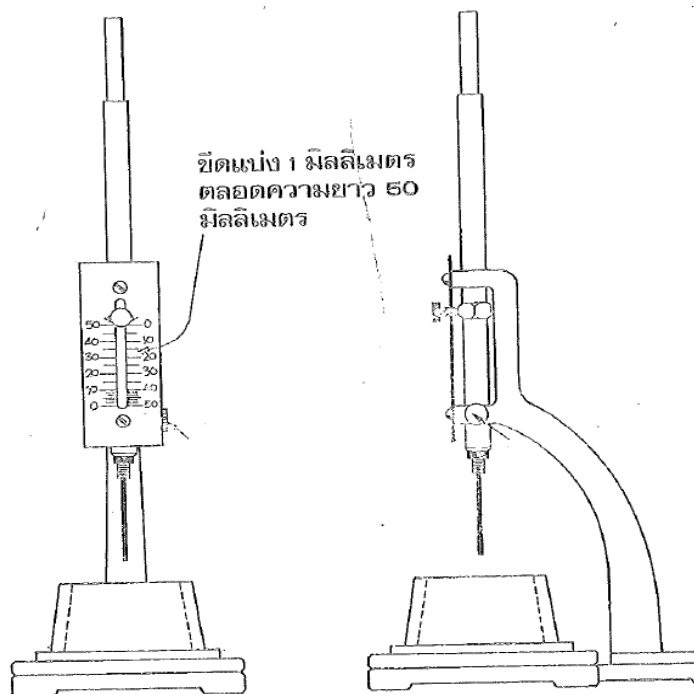
$$S = k \sqrt{T} \dots (17)$$

เมื่อ S = ความละเอียดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ทดสอบ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม

T = ช่วงเวลาที่ของเหลวใน Manometer ลดต่ำลงมาจากขีดที่ 2 ถึงขีดที่ 3 หน่วยเป็นวินาที

k = ค่า Constant Factor จากการสอบเทียบเครื่องแอร์เพอร์มิอะบิลิตี

3.3.2 การหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้เข็มแบบไวแคต (มอก. 15 เล่ม 9-2518)
[17]



รูปที่ 8 สเกลและเข็มแบบไวแคตใช้ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ
เริ่มจากการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อความชื้นเหลว ดังนี้

- (1) เตรียมใบพายและอ่างผสม (Hobart Mixer) ที่แห้งสนิท ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
- (2) ชั่งตัวอย่างปูนซีเมนต์ 500 กรัม และตวงน้ำกลั่นโดยประมาณ 125 กรัม เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติ (10 ± 1 มม.) จากการปล่อยแท่งทดลองในชั้นตอนที่ (15)
- (3) เทน้ำที่เตรียมไว้ลงในอ่างผสม (Hobart Mixer)
- (4) เทปูนซีเมนต์ลงในน้ำ แล้วปล่อยให้ปูนซีเมนต์ดูดซึมน้ำนาน 30 วินาที
- (5) เดินเครื่องผสมในอัตราเร็วต่ำ (140 ± 5 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- (6) หยุดเครื่องผสม 15 วินาทีและชูดซีเมนต์เพสต์ที่ติดอยู่ตามข้างอ่างผสมลงมารวมกัน
- (7) เดินเครื่องผสมในอัตราเร็วปานกลาง (285 ± 10 รอบ/นาที) เป็นเวลา 1 นาที
- (8) หยุดเครื่องผสม
- (9) ปั่นซีเมนต์เพสต์เป็นก้อนกลมและโยนไปมา 6 ครั้งด้วยมือที่สวมถุงมือยาง รักษาระยะระหว่างมือห่างกันประมาณ 150 มิลลิเมตร
- (10) กดซีเมนต์เพสต์ลงทางด้านใหญ่ของแบบซึ่งอยู่บนฝ่ามืออีกข้างหนึ่งจนเต็มแบบ

- (11) ใช้ฝ่ามือปาดส่วนที่ล้นทางด้านใหญ่ออกเพียง 1 ครั้ง วางแบบหล่อลงบนแผ่นกระจกหรือพลาสติก โดยคว่ำหน้าด้านใหญ่ของแบบหล่อลง
- (12) ใช้เกรียงปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนที่เกินด้านเล็กออก โดยปาดในลักษณะเฉียงทำมุมเล็กน้อยกับขอบแบบหล่อและถ้าจำเป็นต้องแต่งผิวให้เรียบ ใช้ปลายเกรียงแตะปาดเพียงเบา ๆ โดยไม่ต้องกด 1 - 2 ครั้ง
- (13) นำแผ่นกระจกหรือแผ่นพลาสติก ซึ่งมีแบบหล่ออยู่ วางใต้แท่งกด โดยให้แท่งกดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแบบหล่อก่อนทดสอบ
- (14) เลื่อนปลายแท่งกดสัมผัสกับผิวซีเมนต์เพสต์ ปรับเข็มแท่งกดให้ชี้ที่เลขศูนย์ซึ่งอยู่ด้านบน พร้อมขึ้นสกรูให้แน่น
- (15) ไม่เกิน 30 วินาที นับจากหยุดเครื่องผสม (285 ± 10 รอบ/นาที) คลายสกรูปล่อยแท่งกดระมัดระวังอย่าให้เครื่องมือสัมผัสระหว่างการทำทดสอบ แล้วอ่านค่าเมื่อปล่อยแท่งกดลงครบ 30 วินาที ถ้าได้ 10 ± 1 มม. ถือได้ว่าได้ความชื้นเหลวปกติ แต่ถ้าไม่ได้ 10 ± 1 มม. ให้ทำการทดสอบใหม่ โดยเพิ่มหรือลดน้ำจนได้ความชื้นเหลวปกติในขั้นตอนที่ (2)
- (16) จำนวนน้ำที่ต้องการเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติ ให้คำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักปูนซีเมนต์แห้งโดย คำนวณ ให้ละเอียดถึงร้อยละ 0.1

$$\text{ร้อยละของน้ำ} = \frac{\text{ปริมาตร} \times 100}{500} \dots(18)$$

- (17) เตรียมใบพายและอ่างผสม (Hobart Mixer) ที่แห้งสนิท ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
- (18) ชั่งตัวอย่างปูนซีเมนต์ 500 กรัม และตวงน้ำกลั่นในปริมาตรพอดีที่จะได้ความชื้นเหลวปกติ (10 ± 1 มม.)
- (19) นำซีเมนต์เพสต์ที่เตรียมได้ ไปเก็บไว้ในกล่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นทันที
- (20) เมื่อครบ 30 นาที เริ่มหาระยะจมของเข็ม Vicat โดยเลื่อนแท่งกดให้ปลายเข็ม Vicat สัมผัสผิวซีเมนต์เพสต์ขึ้นสกรูให้แน่น แล้วปรับเข็มบอกสเกลชี้ไว้ที่เลขศูนย์ คลายสกรู ปล่อยให้แท่งกดเข็ม Vicat จมลงโดยอิสระ เมื่อครบเวลา 30 วินาทีแล้วอ่านค่า จากนั้นทำการหาระยะจมของเข็ม Vicat แบบเดิมแต่อ่านค่าทุก ๆ 15 นาที จนกระทั่งได้ระยะจม 25 มม. หรือน้อยกว่าถือว่าสิ้นสุดเวลาการก่อดั้วระยะต้น (Initial Setting) และทำการเทียบบัญญัติไตรยาง หาระยะเวลาที่เข็มจม 25 มม. ถือเป็นเวลาการก่อดั้วระยะต้น (Initial Setting)
- (21) จุดปล่อยเข็มลงบนซีเมนต์เพสต์ ต้องห่างจากจุดเดิมมากกว่า 5 มม. และห่างจากขอบในของ แบบมากกว่า 10 มม.

(22) ในระหว่างการหาระยะเวลาในการก่อตัว ระวังและดูแลให้เข็ม Vicat ตรงอยู่เสมอและทำความสะอาดเข็ม ขณะทดสอบด้วย

(23) เมื่อสิ้นสุดเวลาการก่อตัวระยะต้น ทำการหาระยะจมของเข็ม Vicat ทุก ๆ 15 นาทีต่อ จนกระทั่งไม่เห็นรอยเข็ม Vicat จมลงไปบนผิวหน้าของเนื้อซีเมนต์เพสต์ ถือว่าสิ้นสุดเวลาการก่อตัวระยะสุดท้าย (Final Setting) คือ ระยะเวลา นับตั้งแต่เริ่มต้นการผสมน้ำกับปูนซีเมนต์ไปจนกระทั่งถึงเวลาที่มองไม่เห็นรอยเข็ม Vicat จมลงไปบน ผิวหน้าของเนื้อซีเมนต์เพสต์

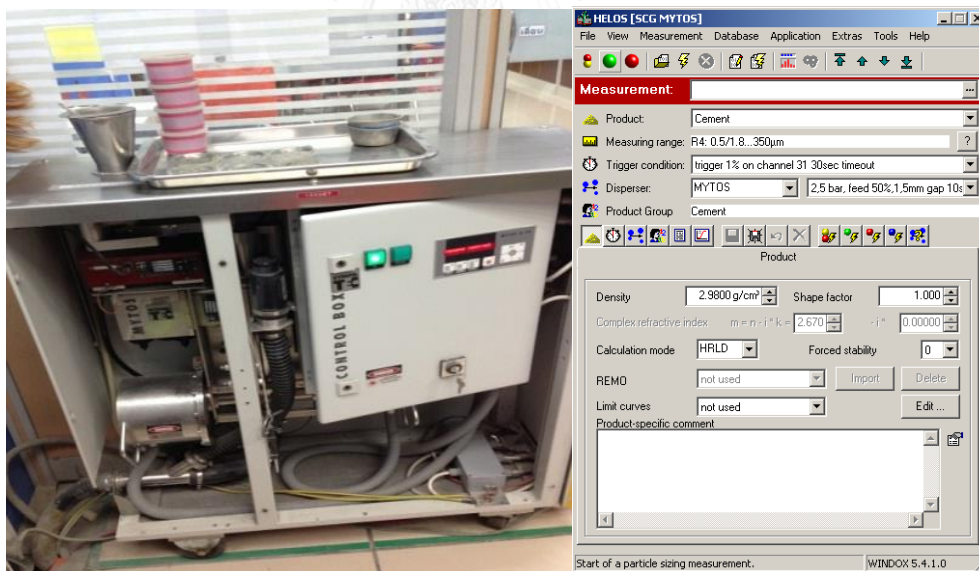
3.3.3 การทดสอบด้วยหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(1) นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบขนาดไม่เกิน 400 ไมครอน ใส่ตัวอย่าง ทดสอบในช่องทดสอบ ประมาณ 5 กรัม (ใช้ช้อนตัก) กำหนดเครื่องใช้ ความดัน 2.5 บาร์, ระยะระหว่างการโปรยตัวอย่างลง เครื่องวิเคราะห์ 1.5 มิลลิเมตร และ อัตราการป้อนตัวอย่าง 0.5 กรัมต่อวินาที และ โหมดการคำนวณ HRLD

(2) กดปุ่ม สีเขียว เพื่อสั่งวิเคราะห์ และป้อนรายละเอียด ของตัวอย่าง

(3) กด OK จนครบเพื่อทดสอบขนาดของอนุภาค



รูปที่ 9 เครื่อง Particle size distribution (Sympatec MYTOS)

3.3.4 การทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ในการผสมคอนกรีตดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C192 Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory [18] ดังนี้

อัตราส่วนผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร

ปูนซีเมนต์	390	กก.
ทรายสภาพแห้ง		
- ขนาด No.4 – 3/8 ”	22.5	กก.
- ขนาด No.8 – No.4	60.0	กก.
- ขนาด No.16 –No.8	180.0	กก.
- ขนาด No.30 –No.16	195.0	กก.
- ขนาด No.50 –No.30	195.0	กก.
- ขนาด No.100 – No.50	97.5	กก.
หินสภาพแห้ง		
- ขนาด 3/4 - 1 ”	57.0	กก.
- ขนาด 3/8 – 3/4 ”	656.0	กก.
- ขนาด No.4 – 3/8 ”	399.0	กก.
- ขนาด No.8 – No.4	28.0	กก.
น้ำยา Type D	3.9	ลิตร
อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยมวล W/C	0.41 – 0.48	
Slump	10.0 ± 1.0	ซม.

วิธีการผสมคอนกรีตและค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- (1) ผสมน้ำยา Super Plasticizer (Type D) ลงในน้ำ
- (2) ใส่หิน ลงในโม่ผสมและตามด้วยน้ำบางส่วนเปิดสวิทซ์โม่ผสม
- (3) ใส่ทราย ปูนซีเมนต์และน้ำที่เหลือลงในโม่ผสมขณะที่เครื่องหมุนอยู่
- (4) ผสมส่วนผสม 3 นาที นับจากหลังใส่ทราย ปูนซีเมนต์และน้ำ
- (5) หยุดเครื่องผสม 3 นาที ปิดฝาโม่กันไม่ให้ น้ำระเหยออกผสมส่วน
- (6) ผสมอีก 2 นาที
- (7) เทคอนกรีตใส่รถเข็น เพื่อนำไปทดสอบ
- (8) ทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ได้ 10.0 ± 1.0 ซม. หากไม่ได้ ให้ผสมคอนกรีตใหม่ โดยปรับลดน้ำตามสภาพเนื้อคอนกรีต การทดสอบค่าการยุบตัวดำเนินการดังนี้ ใช้ช้อนตักคอนกรีต ใส่ลงในโคน โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้มีปริมาณที่เท่า ๆ กัน ชั้นที่ 1 ใส่คอนกรีตในโคนสูงประมาณ 6 – 7 ซม. ต่ำด้วยเหล็กต๋า 25 ครั้ง ในการต๋าต้องต๋าให้ทั่วพื้นที่ ใส่คอนกรีตชั้นที่ 2 จนได้ส่วนสูงประมาณ 15 ซม. ต่ำให้ทะลุถึงคอนกรีตชั้นที่ 1 เล็กน้อย 25 ครั้ง ใส่คอนกรีตชั้นที่ 3 ให้พื้นขอบจนเต็ม แล้วต๋า

ให้ทะลุคอนกรีตชั้นที่ 2 เพียงเล็กน้อย 25 ครั้ง ปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ รวมทั้งทำความสะอาดบริเวณโคนและแผ่นเหล็กกรอง ดึงโคนขึ้นตรง ๆ โดยไม่หมุนหรือเอียง วางโคนลงข้าง ๆ คอนกรีต แล้ววัดค่ายุบตัวของคอนกรีต โดยวัดที่จุดกึ่งกลางของคอนกรีตที่ยุบตัว ในการวัดให้วัดละเอียดถึง 0.5 ซม. โดยควบคุมอุณหภูมิ 27 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 55 ของปริมาณไอน้ำในอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ตู้บ่มคอนกรีต ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของปริมาณไอน้ำในอากาศ ในการทดสอบคอนกรีต

- (9) ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน
- (10) ตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น เท่า ๆ กัน แต่ละชั้นตาดด้วยเหล็กดำ 35 ครั้ง
- (11) ใช้ชั้นอนยางเคาะข้างแบบหล่อ เพื่อไล่ฟองอากาศหลังจากตาดแต่ละชั้น
- (12) เมื่อตาดชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ
- (13) นำแผ่นพลาสติกคลุมผิวหน้าตัวอย่าง เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ
- (14) ให้ถอดแบบหลังจากหล่อภายใน 24 ± 0.5 ชั่วโมง โดยในระหว่างนั้น ป้องกันตัวอย่างทดสอบไม่ให้มีการสั่นสะเทือนและการระเหยของน้ำ
- (15) ทำการบ่มแห้งตัวอย่างทดสอบในน้ำจนกว่าถึงกำหนดเวลาทดสอบ (3, 7 และ 28) การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต
- (16) รักษาความชื้นของตัวอย่างทดสอบอยู่ตลอดเวลา ด้วยเครื่องพ่นหมอก หลังจากนำขึ้นจากบ่อบ่มจนกระทั่งทำการทดสอบ
- (17) ตรวจสอบตัวอย่างทดสอบ สังเกตดูว่ามีตัวอย่างทดสอบใดที่มีขนาดแตกต่างจากมาตรฐานมาก ๆ อย่งเห็นได้ชัด ถ้าพบให้ตัดตัวอย่างทดสอบนั้นทิ้งไป
- (18) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ และบันทึกค่า
- (19) ให้ทดสอบก่อนทดสอบทันทีหลังจากถอดแบบ หรือจากอ่างน้ำที่แช่ก้อนทดสอบ และต้องทดสอบให้เสร็จภายในเวลาที่กำหนด โดยยอมให้ระยะเวลาคลาดเคลื่อนดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เกณฑ์การยอมรับความคลาดเคลื่อนของอายุทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

อายุทดสอบ (วัน)	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (ชั่วโมง)
3	± 1
7	± 2
28	± 4

- (20) นำก้อนตัวอย่างวางกึ่งกลางของแท่นทดสอบ โดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกด

(21) เปิดเครื่องทดสอบ โดยในการทดสอบนี้ จะต้องควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอโดยสำหรับตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ต้องควบคุมน้ำหนักกดให้มีอัตราการกด 1.12 – 2.72 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

(22) กดก่อนตัวอย่างจนพัง บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ นำค่าน้ำหนักและพื้นที่หน้าตัดที่ได้ มาหาค่ากำลังอัด (Compressive Strength)

$$\text{กำลังอัด} = \frac{\text{น้ำหนักกดประลัย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง}} \dots (19)$$

$$= \text{ค่าที่อ่านได้ (kN)} \times \frac{1000 \text{ N}}{\text{kN}} \times \frac{1}{22500 \text{ mm}^2} \times \frac{0.1019 \text{ kg}_f}{\text{N}} \times \frac{100 \text{ mm}^2}{\text{cm}^2}$$

= ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน) \times 0.4529 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อกิโลนิวตัน
หน่วยที่ใช้เป็น กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

3.3.5 การทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (มอก. 15 เล่ม 12-2532) [19]



รูปที่ 10 แบบหล่อและอ่างบ่มใช้ทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

(1) ชั่งปูนซีเมนต์ 1 ส่วน ต่อทรายออกตาวา (Ottawa Sand) มาตรฐาน 2.75 ส่วนโดยมวล ใช้อัตราส่วนน้ำ / ปูนซีเมนต์ = 0.485 ตามตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ปริมาณวัสดุที่ใช้ผสม

วัสดุ	จำนวนก้อนทดสอบ	
	6	9
ปูนซีเมนต์ (กรัม)	500	740
ทรายออกตาวา (Ottawa Sand) (กรัม)	1375	2035
น้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)	242	359

(2) เตรียมใบพายและอ่างผสมที่แห้งให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

(3) เทน้ำกลั่นที่เตรียมไว้ลงในอ่างผสม

- (4) เติมปูนซีเมนต์ลงไปใต้น้ำแล้วเดินเครื่องผสมอัตราเร็วต่ำ (140 ± 5 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- (5) เททรายที่เตรียมไว้ลงไปอย่างช้า ๆ ให้หมดภายใน 30 วินาทีในขณะที่เดินเครื่องผสมในอัตราเร็วต่ำ (140 ± 5 รอบ/นาที)
- (6) หยุดเครื่องผสม เปลี่ยนเป็นอัตราเร็วปานกลาง (285 ± 10 รอบ/นาที) เป็นเวลา 30 วินาที
- (7) หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 90 วินาที ให้รีบบวมอเตอร์ที่ติดข้าง อ่างผสมลงไปรวมกันให้เสร็จภายใน 15 วินาทีแรก แล้วปิดฝา
- (8) เดินเครื่องผสมด้วยอัตราเร็วปานกลาง (285 ± 10 รอบ/นาที) เป็นเวลา 1 นาที
- (9) สำหรับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ให้ทิ้งมอเตอร์ไว้ในอ่างผสมเป็นเวลา 90 วินาที โดยไม่มีอะไรปิดในระหว่าง เวลา 15 วินาทีสุดท้ายของช่วงเวลาที่ทิ้งไว้ ให้ปาดมอเตอร์ที่ติดตามข้างอ่างลง แล้วเดินเครื่องผสมอัตราเร็วปานกลาง (285 ± 10 รอบ/นาที) เป็นเวลา 15 วินาที หลังจากนั้นชดุมอเตอร์ที่ติดใบพายลงในอ่างผสม และนำไปหล่อก่อนปูนทดสอบต่อไป สำหรับปูนซีเมนต์อย่างอื่น ให้นำมอเตอร์ที่หาค่าการไหลใส่ในอ่างผสม ให้รีบบวมอเตอร์ที่ติดตามข้างอ่างลงในอ่างผสม แล้วเดินเครื่องผสมด้วยอัตราเร็วปานกลาง (285 ± 10 รอบ/นาที) เป็นเวลา 15 วินาที หลังจากนั้นชดุมอเตอร์ที่ติดใบพายลงในอ่างผสม และนำไปหล่อก่อนปูนทดสอบต่อไป
- (10) ให้เริ่มหล่อก่อนปูนทดสอบภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที นับตั้งแต่ครั้งแรกที่ผสมมอเตอร์เสร็จ
- (11) ใช้ช้อนตักมอเตอร์ใส่ในช่องแบบหล่อทุกช่อง ประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงของแบบหล่อ (25 มิลลิเมตร)
- (12) ให้กระทุ้งมอเตอร์แต่ละก้อน 32 ครั้งให้เสร็จ ภายใน 10 วินาทีก่อนที่จะกระทุ้งก้อนถัดไป (กระทุ้งก้อนละ 4 รอบ แต่ละรอบต้องกระทุ้งตั้งฉากกับแนวกระทุ้งรอบก่อน แต่ละรอบกระทุ้ง 8 ครั้ง) โดยกระทุ้งใช้แรงเท่า ๆ กันและแรงพอเพื่อให้มอเตอร์แผ่ทั่วแบบหล่อ
- (13) เมื่อกระทุ้งมอเตอร์ชิ้นแรกครบทุกช่องแล้ว ให้เติมมอเตอร์ใส่ในช่องต่าง ๆ ให้เต็ม และกระทุ้งเช่นเดียวกับครั้งแรก ในแต่ละรอบของการกระทุ้งให้ปรับแต่งมอเตอร์ให้เรียบร้อย โดยใช้แท่งกระทุ้งกับนิ้วมือที่สวมถุงมือเก็บหรือปาดมอเตอร์ที่ล้นออกมาบนขอบแบบหล่อกลับเข้าไปในแบบหล่อก่อนที่จะเริ่มกระทุ้งรอบใหม่
- (14) ใช้เกรียงปาดมอเตอร์ที่ล้นแบบหล่อและทำให้เรียบ โดยเฉยหน้าเกรียงเล็กน้อยปาดไปตามทางขวางของแบบหล่อ แต่ละช่องเพียงครั้งเดียว
- (15) ตัดผิวหน้ามอเตอร์ให้เรียบเสมอขอบบนของแบบหล่อ โดยใช้ขอบด้านตรงของเกรียงวางเกือบตั้งฉากกับแบบ แล้วขยับเกรียงไปมาในลักษณะเช่นเดียวกับการเลื่อยตลอดความยาวของแบบหล่อ
- (16) เพื่อให้ผิวมอเตอร์เรียบ ให้ใช้เกรียงปาดเบา ๆ 1 ครั้ง ตลอดความยาวของแบบหล่อโดยเฉยหน้าเกรียงเล็กน้อย

- (17) ทันทีที่หล่อเสร็จ ให้นำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเป็นเวลา 20-24 ชั่วโมง เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ให้นำแบบหล่อก่อนปูนทดสอบ มาถอดออกจากแบบ
- (18) ก้อนปูนทดสอบชุดที่ต้องการค่าแรงอัด 1 วัน ให้นำไปทดสอบค่าแรงอัด หาค่าแรงอัด 1 วัน
- (19) ก้อนปูนทดสอบชุดที่ต้องการค่าแรงอัด 3, 7, 28 วัน นำไปแช่น้ำปูนใส (Saturated Lime Water) ในอ่างแช่ก้อนปูนที่สะอาดและทนการกัดกร่อน
- (20) สำหรับก้อนปูนทดสอบค่าแรงอัด จะดำเนินการทดสอบตามเวลาที่กำหนด ซึ่งเกณฑ์การทดสอบอายุของก้อนปูนทดสอบ โดยยอมให้เวลาคลาดเคลื่อน เป็นไปตามตารางที่ 12

ตารางที่ 12 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของอายุทดสอบ

เกณฑ์อายุทดสอบ (วัน)	เวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ (ชั่วโมง)
1	$\pm 1/2$
3	± 1
7	± 3
28	± 12

(21) สำหรับการหาค่าแรงอัด 1 วัน ให้ใช้ผ้าชุบน้ำคลุมก้อนปูนทดสอบไว้ก่อน จนกว่าจะถึงเวลาทดสอบ สำหรับการหาค่าแรงอัด 3, 7, 28 วัน ก่อนทำการหาค่าแรงอัดของก้อนปูนทดสอบจำนวนมาก ให้นำก้อนปูนทดสอบจากอ่างแช่น้ำปูนใส มาใส่ในภาชนะที่มีน้ำอุณหภูมิ 23 ± 2 องศาเซลเซียส จนกว่าจะถึงเวลาทดสอบ

(22) ทำการทดสอบความต้านทานแรงอัด เมื่อก้อนปูนทดสอบแตกจะแสดงผลค่าสูงสุดของการต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) บันทึกผลทดสอบ

การคำนวณผลการทดสอบความต้านทานแรงอัด

$$P = F/A \dots (20)$$

เมื่อ P = ความต้านทานแรงอัด (เมกะปาสคาล)

F = แรงอัดสูงสุดมีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน

A = พื้นที่ที่แรงกระทำในแนวตั้งฉาก หน่วย ตารางเซนติเมตร ปกติ Cube 50.0 มิลลิเมตร

เท่ากับ 25.00 ตารางเซนติเมตร

กรณีที่พื้นที่ผิวของก้อนปูนทดสอบ มีค่าเกิน $\pm 1.5\%$ ของพื้นที่ปกติให้ใช้พื้นที่ผิวจริง ของก้อนปูนทดสอบ ในการคำนวณ ค่าความต้านทานแรงอัด

3.4 วิธีดำเนินการศึกษา

3.4.1 Literature survey and review

3.4.2 เตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ

3.4.3 ปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ด้วย lab mill

3.4.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) วิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะ และเครื่อง Thermogravimetric analysis

3.4.5 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ตัวอย่างละ 3 ครั้ง เพื่อเก็บข้อมูลมาเป็นค่าเฉลี่ย \pm (2 x ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ดังนี้ ทดสอบหาความละเอียดของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยเครื่องแอร์เพอร์มีเอปิลิตี (มอก.15 เล่ม 6-2519) การหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้เข็มแบบไวแคต (มอก. 15 เล่ม 9-2518) การทดสอบด้วยหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution วิธีการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ASTM C192 Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory) และ การทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (มอก. 15 เล่ม 12-2532)

3.4.6 Discussion ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเมื่อดำเนินการผสมเถ้าแกลบที่ความละเอียดและสัดส่วนการผสมที่ต่างกัน

3.4.7 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติในปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบกับปริมาณการผสมเถ้าแกลบ

3.4.8 สรุปผลการวิเคราะห์ และอภิปรายผลการศึกษาวิจัยทั้งหมด

3.4.9 จัดพิมพ์บทความเพื่อนำเสนอในการประชุมวิชาการ และจัดทำวิทยานิพนธ์

แผนงานวิจัยการใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของงานคอนกรีตตามตารางที่ 13
แผนงานวิจัยการใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของงานคอนกรีต

3.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

3.5.1 สามารถหาปริมาณเถ้าแกลบและค่าความละเอียดที่เหมาะสมในการผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพงานคอนกรีต

3.5.2 ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต โดยใช้เถ้าแกลบที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 13 แผนงานวิจัยการใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของงานคอนกรีต

ขั้นตอนการทำงาน	ช่วงเวลา (เดือน)										
	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
การสำรวจข้อมูลงานวิจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้อง	→										
เตรียมตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ และปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาดของเถ้าแกลบที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ด้วย lab mill	→										
วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ	→										
พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเมื่อดำเนินการผสมเถ้าแกลบที่ความละเอียดและสัดส่วนการผสมที่ต่างกัน	→										
ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอณูฐานในปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบกับปริมาณการผสมเถ้าแกลบ	→										
สรุปผลการวิเคราะห์ และอภิปรายผลการศึกษาวิจัยทั้งหมด	→										
จัดพิมพ์บทความเพื่อนำเสนอในการประชุมวิชาการ และจัดทำวิทยานิพนธ์	→										

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ในการทดลองงานวิจัยการใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต จึงได้ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์และวิเคราะห์ทางเอ็กซ์เรย์และเคมี โดยแบ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 4 ส่วนดังนี้ 1. ผลการทดลองและวิเคราะห์ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ 2. ผลการทดลองและวิเคราะห์เถ้าแกลบที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาด 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ 4. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

ผลการทดลองการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ซึ่งปริมาณซิลิกาเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ โดยปริมาณซิลิกาที่พบในเถ้าแกลบมีปริมาณร้อยละ 84.55 โดยมวล ตามตารางที่ 14 ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าปูนซีเมนต์และมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 [2] ซึ่งข้อกำหนดทางเคมีของเถ้าลอยและวัสดุปอซโซลานธรรมชาติ โดยใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กอย่างน้อยร้อยละ 70 โดยมวล ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงใช้มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานอ้างอิงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้เพียงพอ สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2555 [14]

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

องค์ประกอบทางเคมี	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Other	LOI
ปูนซีเมนต์	19.7	4.73	3.05	64.74	2.06	0.83	0.00	4.89	1.36
เถ้าแกลบ	85.44	0.30	0.12	0.70	0.04	1.62	0.00	11.78	1.70

LOI = Loss on Ignition

ผลการทดลองวิเคราะห์ผลึกของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบโดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าลักษณะโครงสร้างของเถ้าแกลบเป็นโครงสร้างอสัณฐานร้อยละ 96.96 โดยมวล เป็นองค์ประกอบหลัก ตามตารางที่ 15 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต

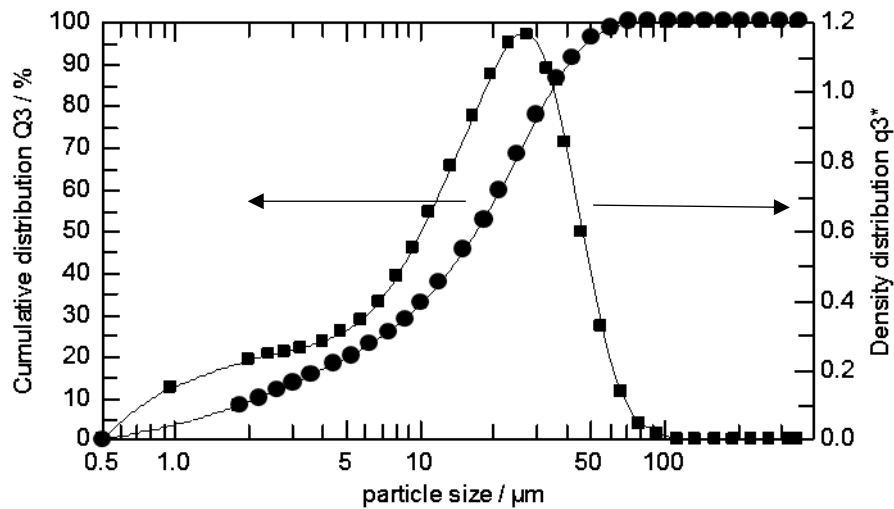
สำหรับโครงสร้างผลึกของปูนซีเมนต์เป็นไปตามมาตรฐานกระบวนการผลิต และ มาตรฐาน มอก.15 เล่ม 1-2555 [14] ประกอบไปด้วย ผลึกของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, C_3S) ร้อยละ 64.04 โดยมวล เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งเป็นผลึกที่ให้ค่ากำลังอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

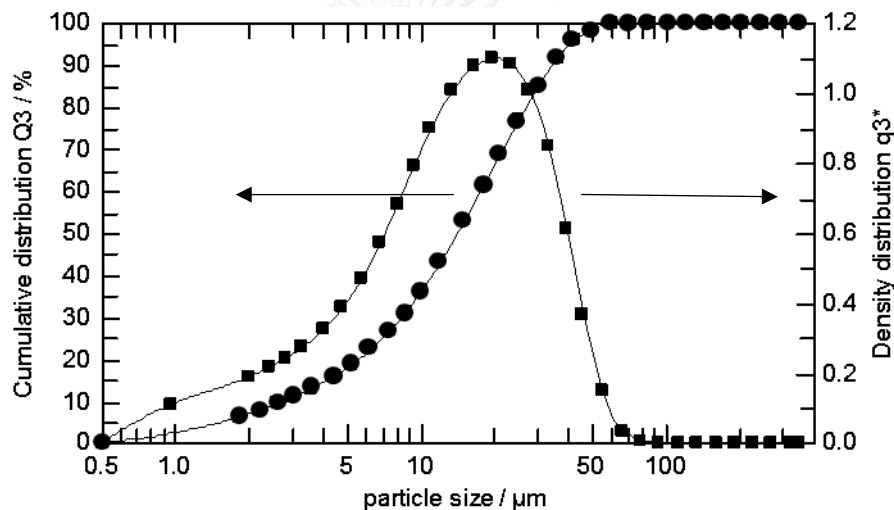
องค์ประกอบผลึก	ปูนซีเมนต์	เถ้าแกลบ
Alite (C_3S)	64.04	0.00
Belite (C_2S)	9.00	0.00
Alum (C_3A)	4.22	0.00
Ferrite (C_4AF)	13.27	0.00
FCaO	0.53	0.00
Arcanite	1.33	0.00
Periclase	0.94	0.00
Gypsum	0.37	0.00
Hemi-hydrate	3.09	0.00
Anhydrite	0.10	0.00
Amorphous	0.00	96.96
Other	3.11	3.04

ผลการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 2-2521 [15] มีค่า 3.12 และ 2.05 ตามลำดับ ซึ่งความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบอยู่ระหว่างค่า 1.90-2.30 [20] แสดงว่าเถ้าแกลบที่นำมาทดลองเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส [21]

ผลการทดสอบค่าความละเอียดโดยเครื่องแอร์เพอร์มิอะบิลิตี (มอก.15 เล่ม 6-2519) [16] และขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution ของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบแสดงว่าปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบมีความละเอียด 3,382 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และ 3,196 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าความละเอียดของเถ้าแกลบมีค่าที่ต่ำกว่าปูนซีเมนต์นอกจากนี้ขนาดอนุภาคช่วง 3-30 ไมครอนของปูนซีเมนต์มีปริมาณที่มากกว่าเถ้าแกลบอย่างมีนัยสำคัญ ตามรูปที่ 11 และ 12 ตามลำดับ ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงค่าความละเอียดของเถ้าแกลบก่อนทำการผสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต



รูปที่ 11 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง Particle size distribution

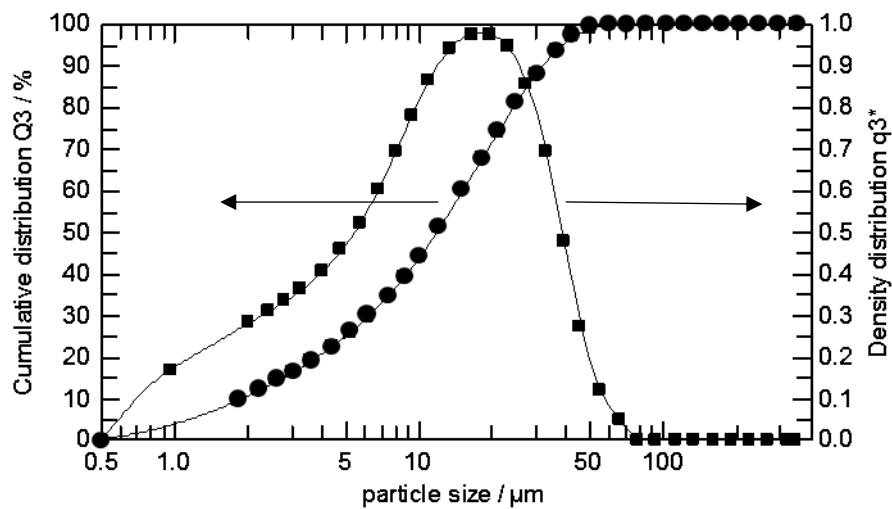


รูปที่ 12 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบด้วยเครื่อง Particle size distribution

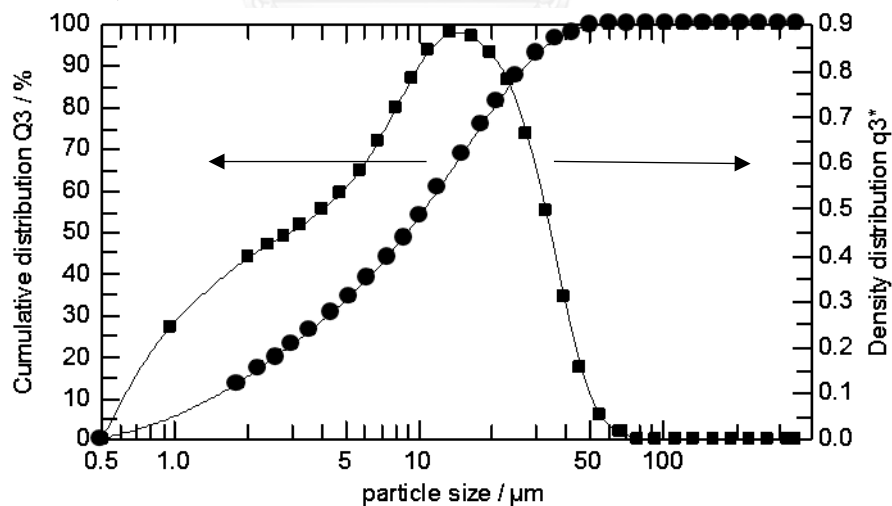
4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์เถ้าแกลบที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาด

จากการนำเถ้าแกลบมาปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาดด้วยเครื่องบด lab mill ได้เถ้าแกลบทั้งหมด 3 ตัวอย่างคือ เถ้าแกลบดั้งเดิม (Pristine RHA) เถ้าแกลบผสม (Mixed RHA) และ เถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA) ผลการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบผสม (Mixed RHA) และ เถ้าแกลบบดละเอียดตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 2-2521 [15] มีค่า 2.25 และ 2.34 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์เถ้าแกลบก่อนบดมีขนาดอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ พื้นที่ผิวหยากกว่าปูนซีเมนต์ และ ความมีรูพรุนสูง ดังนั้นเมื่อนำเถ้าแกลบบดละเอียดเป็นการทำลายโครงสร้างของเซลล์ที่มีความมีรูพรุน ทำให้สามารถควบคุมขนาดอนุภาคเล็กลง พื้นที่ผิวละเอียดขึ้น มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และ ความมีรู

พรุ่นลดลง จึงส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบค่าความละเอียดโดยเครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตี้ (มอก.15 เล่ม 6-2519) [16] และขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution พบว่าค่าความละเอียดของเถ้าแกลบผสม (Mixed RHA) และ เถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA) มีค่า 4,055 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และ 5,127 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าความละเอียดหลังการปรับปรุงคุณสมบัติกระจายขนาดดีขึ้น ส่งผลให้เถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA) มีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ทุกช่วงอนุภาค ตามรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 13 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบผสม (Mixed RHA) ด้วยเครื่อง Particle size distribution



รูปที่ 14 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA) ด้วยเครื่อง Particle size distribution

4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

จากการผสมเถ้าแกลบลงในปูนซีเมนต์ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยมวล จะได้ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจำนวน 13 ตัวอย่างดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยมวล ปูนซีเมนต์:เถ้าแกลบ	ชนิดของเถ้าแกลบ
B (blank)	100:00	-
P5	95:05	เถ้าแกลบดั้งเดิม (Pristine RHA)
P10	90:10	เถ้าแกลบดั้งเดิม (Pristine RHA)
P15	85:15	เถ้าแกลบดั้งเดิม (Pristine RHA)
P20	80:20	เถ้าแกลบดั้งเดิม (Pristine RHA)
M5	95:05	เถ้าแกลบผสม (Mixed RHA)
M10	90:10	เถ้าแกลบผสม (Mixed RHA)
M15	85:15	เถ้าแกลบผสม (Mixed RHA)
M20	80:20	เถ้าแกลบผสม (Mixed RHA)
G5	95:05	เถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA)
G10	90:10	เถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA)
G15	85:15	เถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA)
G20	80:20	เถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA)

ผลการทดลองการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ตามตารางที่ 17 เนื่องจากปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมออกไซด์ และ เถ้าแกลบมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาออกไซด์ จึงพบว่าเมื่อสัดส่วนโดยมวลของเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 โดยมวล ส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีเมื่อเทียบกับตัวอย่าง B จะมีปริมาณซิลิกาออกไซด์เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 4 โดยมวล และ แคลเซียมออกไซด์ลดลงประมาณร้อยละ 3 โดยมวล จากการแทนที่ของเถ้า

แกลบ และเมื่อใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อแกลบเดียวกัน ชนิดของแกลบไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลง เช่น P5, M5 และ G5 จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ผสมแกลบ

องค์ประกอบทางเคมี	P5	P10	P15	P20	M5	M10	M15	M20	G5	G10	G15	G20
SiO ₂	22.91	26.15	29.71	33.20	23.06	26.23	29.65	32.95	22.95	26.40	29.68	33.07
Al ₂ O ₃	4.58	4.43	4.34	4.19	4.62	4.47	4.34	4.23	4.61	4.47	4.37	4.23
Fe ₂ O ₃	2.89	2.74	2.59	2.47	2.90	2.74	2.59	2.47	2.93	2.77	2.61	2.46
CaO	61.06	57.90	54.80	51.81	61.47	58.02	54.88	51.85	61.59	58.38	54.81	51.68
MgO	1.95	1.84	1.75	1.66	1.97	1.86	1.76	1.65	1.97	1.85	1.77	1.66
K ₂ O	0.86	0.90	0.95	1.00	0.88	0.90	0.95	0.99	0.87	0.91	0.95	0.99
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Other	5.75	6.04	5.86	5.67	5.1	5.78	5.83	5.86	5.08	5.22	5.81	5.91
LOI	1.36	1.40	1.42	1.44	1.37	1.39	1.41	1.43	1.36	1.39	1.40	1.43

LOI = Loss on Ignition

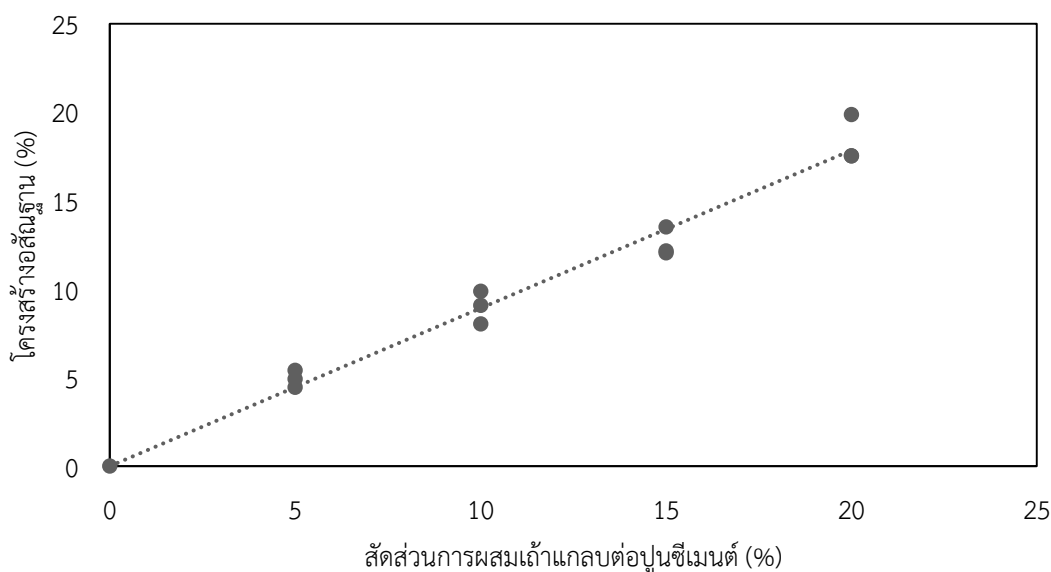
ผลการทดลองวิเคราะห์ผลึกของปูนซีเมนต์ผสมแกลบโดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) พบว่าเมื่อสัดส่วนการผสมแกลบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้องค์ประกอบผลึกของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในการให้ค่ากำลังอัดระยะต้นและระยะปลายของปูนซีเมนต์มีค่าที่ลดลง ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์มีปริมาณที่ลดลง และ ปริมาณโครงสร้างอสัณฐานเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของแกลบที่ใช้ในการผสม ตามตารางที่ 18 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบผลึก ปริมาณโครงสร้างอสัณฐาน และการระบุตำแหน่งมุมหักเหของพีค ตามภาคผนวก ก. และเมื่อใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อแกลบเดียวกัน ชนิดของแกลบไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบผลึกเปลี่ยนแปลง เช่น P5, M5 และ G5 จะมีองค์ประกอบผลึกที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างอสัณฐานและสัดส่วนการผสมของแกลบได้ดังนี้

$$\text{โครงสร้างอสัณฐาน} = 0.89 \times \text{สัดส่วนการผสมแกลบต่อปูนซีเมนต์} \dots (21)$$

และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.97 ตามรูปที่ 15 เพื่อใช้เป็นสมการในการควบคุมคุณภาพสัดส่วนการผสมแกลบในอุตสาหกรรมการผลิต

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

องค์ประกอบผลึก	P5	P10	P15	P20	M5	M10	M15	M20	G5	G10	G15	G20
Alite (C ₃ S)	59.86	58.20	56.88	53.12	59.99	57.37	56.74	54.33	59.47	57.91	56.02	51.23
Belite (C ₂ S)	8.24	7.32	5.95	6.76	8.47	8.46	6.95	5.45	9.02	8.72	7.76	6.01
Alum (C ₃ A)	3.77	3.75	3.46	3.27	3.89	3.65	3.52	3.37	3.80	3.57	3.51	3.28
Ferrite (C ₄ AF)	12.70	11.16	10.48	9.70	12.42	11.25	10.51	9.99	12.56	11.80	10.53	9.79
Lime	0.55	0.33	0.33	0.22	0.26	0.39	0.24	0.21	0.45	0.29	0.30	0.25
Arcanite	1.29	1.36	1.13	1.45	1.29	1.36	1.13	0.95	1.35	1.22	1.84	1.09
Periclase	0.95	0.59	0.80	0.57	0.85	0.71	0.92	0.86	0.76	0.75	0.72	0.72
Gypsum	0.63	0.60	1.10	1.46	0.58	1.05	1.40	1.43	0.62	1.09	0.95	1.29
Bassanite	3.66	3.79	3.48	3.24	4.00	3.84	3.46	2.96	4.06	3.78	3.74	3.25
Anhydrite	0.03	0.08	0.05	0.08	0.00	0.09	0.08	0.12	0.05	0.05	0.03	0.04
Amorphous	5.41	9.87	13.51	17.53	4.91	9.08	12.16	17.53	4.45	8.03	12.05	19.86
Other	2.91	2.94	2.82	2.60	3.35	2.75	2.89	2.80	3.40	2.88	2.46	3.18



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกและสัดส่วนการผสมของเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 2-2521 [15] เมื่อสัดส่วนการผสมเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะมีค่าลดลง เนื่องจากมีเถ้าแกลบที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำผสมอยู่ และเมื่อใช้ชนิดเถ้าแกลบต่างกันที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเดียวกันเช่น ตัวอย่าง P5 จะมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่า ตัวอย่าง M5 และ ตัวอย่าง G5 ตามลำดับ ดังนั้นปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงกว่าจะมีค่าความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้น ตามตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

ตัวอย่าง	P5	P10	P15	P20	M5	M10	M15	M20	G5	G10	G15	G20
ความถ่วง จำเพาะ ของ ปูนซีเมนต์ ผสมเถ้า แกลบ	3.03	3.01	2.95	2.86	3.05	3.03	2.99	2.88	3.07	3.05	3.00	2.90

ผลการทดสอบค่าความละเอียดโดยเครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตี (มอก.15 เล่ม 6-2519) [16] ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบพบว่าปูนซีเมนต์ที่ทำการผสมเถ้าแกลบดั้งเดิม (Pristine RHA) เมื่ออัตราการผสมของเถ้าแกลบโดยมวลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมีค่าที่ลดลงเนื่องจากค่าความละเอียดของเถ้าแกลบดั้งเดิม (Pristine RHA) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ แต่เมื่อนำเถ้าแกลบผสม (Mixed RHA) และ เถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA) มาผสมในปูนซีเมนต์ ค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมเถ้าแกลบโดยมวล และเมื่อใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเดียวกัน ชนิดของเถ้าแกลบจะมีผลต่อค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เช่นความละเอียดของตัวอย่าง G20 มากกว่า ตัวอย่าง M20 และ ตัวอย่าง P20 ตามลำดับ ตามตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบค่าความละเอียดโดยเครื่องแอร์เพอร์มีอะบิลิตีของปูนซีเมนต์ผสมเถ้า
 แกลบ

ตัวอย่าง	ค่าความละเอียด (ตาราง เซนติเมตรต่อกรัม)
P5	3318
P10	3283
P15	3276
P20	3222
M5	3382
M10	3449
M15	3499
M20	3514
G5	3452
G10	3586
G15	3649
G20	3745

ผลการทดสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้า
 แกลบ พบว่า ร้อยละโดยมวลของขนาดอนุภาคที่มากกว่า 30 ไมครอน มีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนการผสม
 เถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณขนาดอนุภาคที่มากกว่า 30 ไมครอน ของเถ้าแกลบมีค่าน้อย
 กว่าปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ที่เมื่อใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเดียวกัน ชนิดของเถ้าแกลบจะ
 มีผลต่อพบว่า ร้อยละโดยมวลของขนาดอนุภาคที่มากกว่า 30 ไมครอนของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ
 โดยเถ้าแกลบที่บดละเอียดจะมีร้อยละโดยมวลของขนาดอนุภาคที่มากกว่า 30 ไมครอนต่ำที่สุด ซึ่ง
 หมายถึงมีปริมาณอนุภาคส่วนละเอียดเพิ่มมากขึ้น ตามตารางที่ 21 เนื่องจากขนาดอนุภาคที่น้อยกว่า
 30 ไมครอนเป็นอนุภาคที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ [22] และรูปขนาดอนุภาคของ
 ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ตามภาคผนวก ข. ผลการทดสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size
 distribution

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ

ตัวอย่าง	ร้อยละโดยมวลของขนาดอนุภาคมากกว่า 30 ไมครอน
B	22.77
P5	22.49
P10	22.19
P15	21.76
P20	20.77
M5	22.15
M10	21.29
M15	20.50
M20	19.70
G5	21.69
G10	21.06
G15	19.85
G20	19.13

ผลการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละโดยมวลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุ 28 วัน ด้วยเครื่อง Thermo gravimetric analysis ของ LECO Model TGA-701 ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก โดยทำการวัดค่าร้อยละโดยมวลของน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (% on ignition weight) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวอย่างของเนื้อปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน เพื่อดูปริมาณร้อยละโดยมวลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)_2) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาปอซลานิก ในสมการ (6) จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 22 พบว่าปูนซีเมนต์ตัวอย่าง B มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นร้อยละ 3.0 โดยมวล โดยปูนซีเมนต์ที่มีการผสมเถ้ากลบจะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงตามอัตราส่วนการผสมเนื่องจากซิลิกาออกไซด์เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้ากลบเดียวกัน ชนิดของเถ้ากลบจะมีผลต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กรณีที่เถ้ากลบละเอียดขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าลดลง

เช่น ตัวอย่าง P15 จะมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มากกว่าตัวอย่าง M15 และตัวอย่าง G15 ตามลำดับ

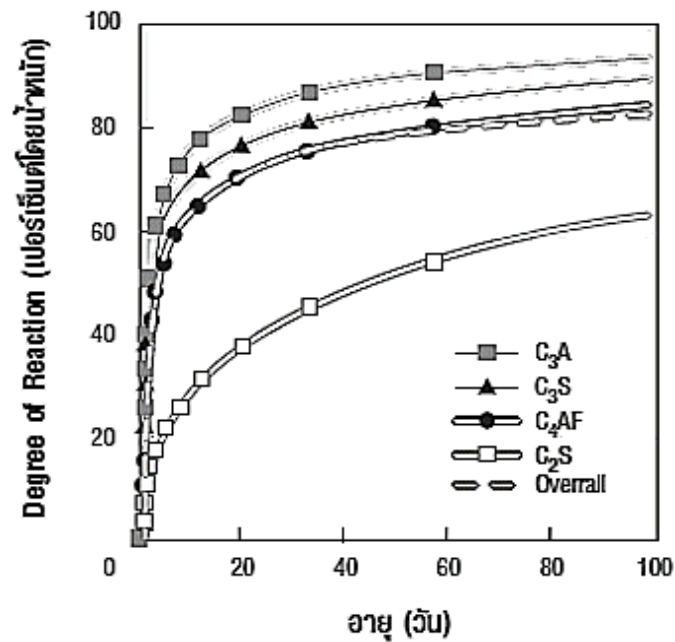
ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่อายุ 28 วัน

ตัวอย่าง	ร้อยละโดยมวลของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์
B	3.00
P5	2.80
P10	2.60
P15	1.60
P20	1.60
M5	2.00
M10	2.00
M15	1.20
M20	1.20
G5	2.00
G10	2.00
G15	1.00
G20	1.00

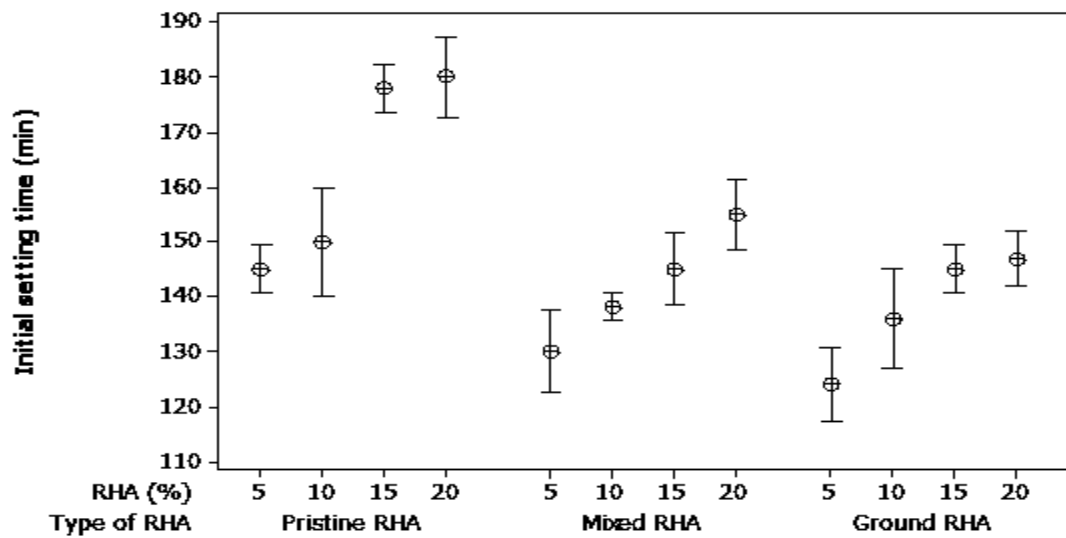
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

การทดสอบหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้เข็มแบบไวแคต (มอก. 15 เล่ม 9-2518) [17] จากผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และ ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) เป็นไปตามรูปที่ 17 และ 18 ตามลำดับ พบว่าเมื่อสัดส่วนการผสมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นค่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายมีค่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนของปูนซีเมนต์ซึ่งมีไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) มีปริมาณลดลงตามตารางที่ 17 ซึ่งจากการศึกษาของ Steven, Beatrix และ William [23] พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่

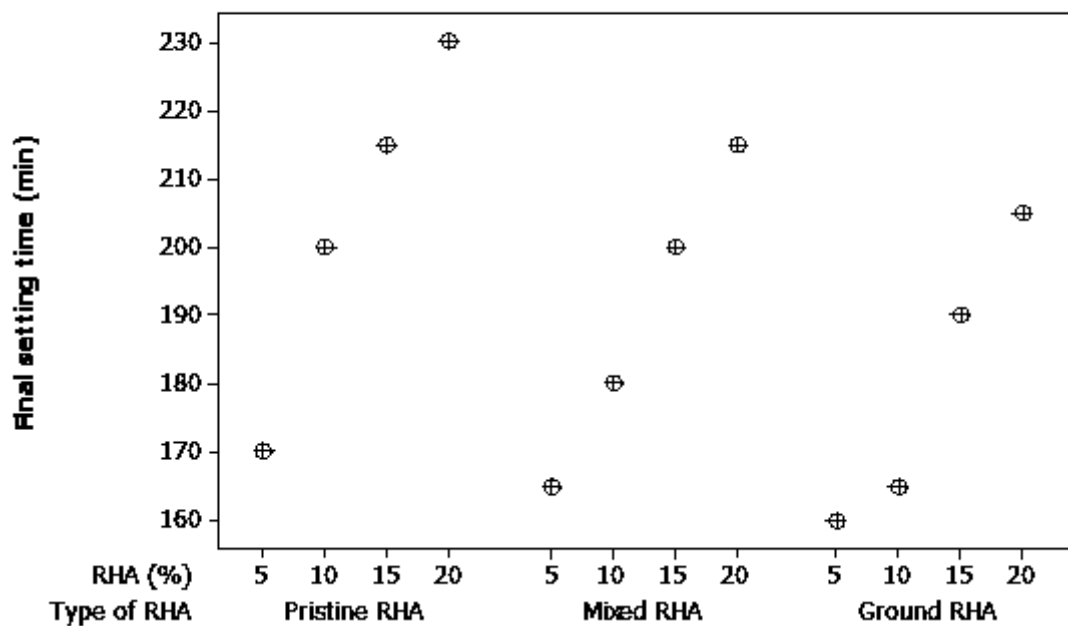
ช่วงอายุต่าง ๆ องค์ประกอบของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) จะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วและความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 850 จูลต่อกรัม จึงเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ตามรูปที่ 16 แต่เมื่อทำการเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวจึงมีค่าที่ลดลง ดังนั้นเมื่อใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเดียวกัน ชนิดของเถ้าแกลบจะมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) จากการสังเกตจะพบว่าระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) มีค่าการเบี่ยงเบนน้อยกว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) เนื่องจากวิธีการรายงานผลของระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) จะให้รายงานลงท้ายด้วยเลข 5 หรือ 0 เท่านั้นจึงทำให้ค่าการเบี่ยงเบนต่ำ



รูปที่ 16 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแต่ละองค์ประกอบของปูนซีเมนต์



รูปที่ 17 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกלב



รูปที่ 18 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกלב

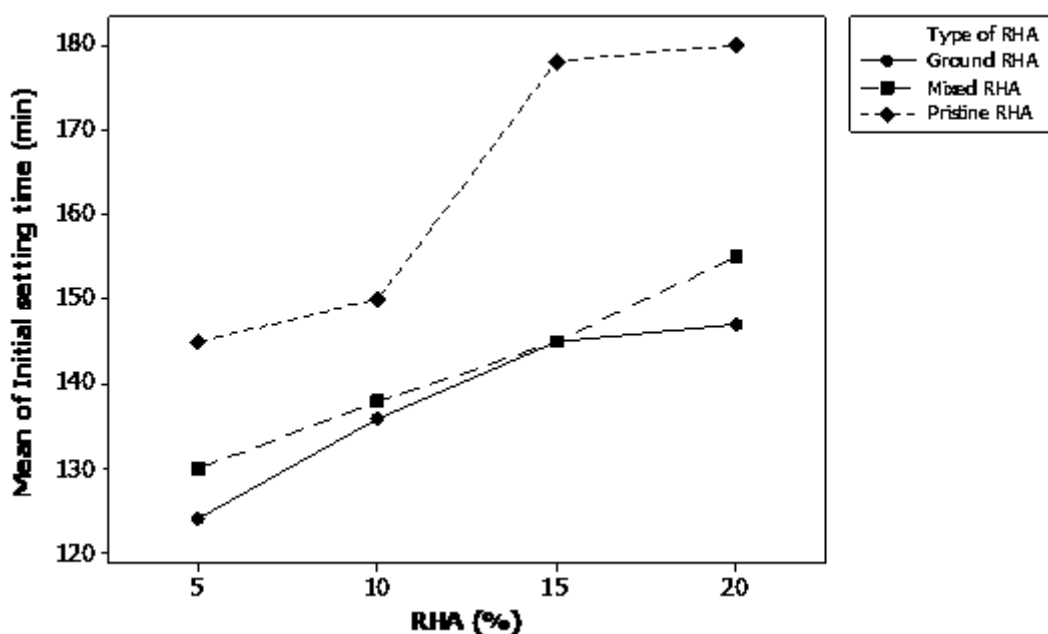
จากรูปที่ 19 และ 20 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ได้แก่ สัดส่วนการผสมปูนซีเมนต์ส่งผลต่อปริมาณร้อยละไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) ชนิดของเถ้าแกלבส่งผลต่อค่าความละเอียดของเถ้าแกלב และ จำนวนน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติ จึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์

กับปริมาณร้อยละไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate) โดยมวล จำนวนน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติและค่าความละเอียดของเถ้าแกลบที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์ได้ดังนี้

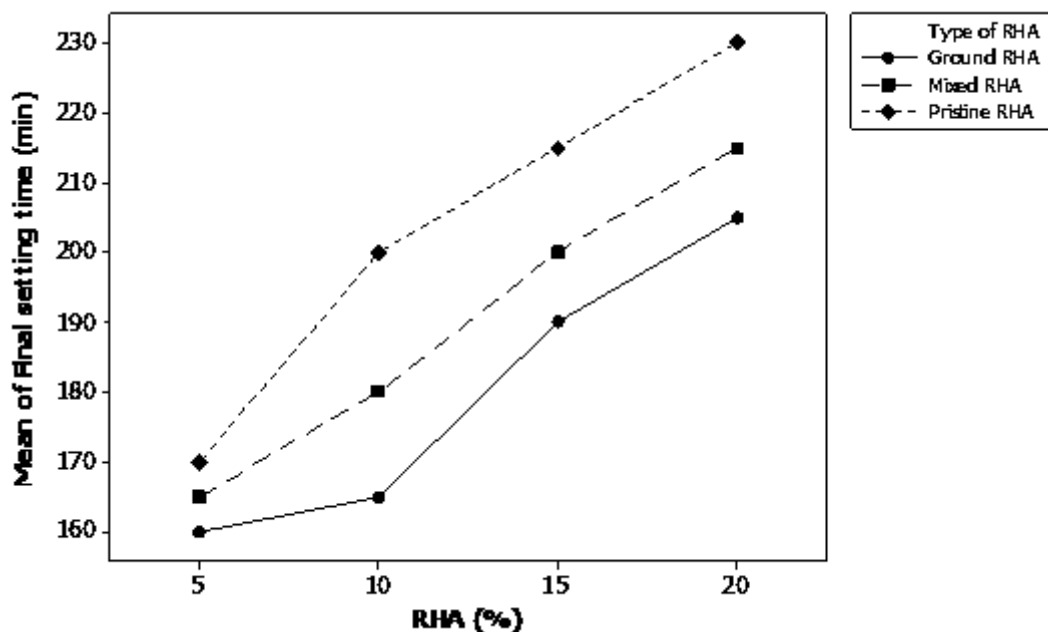
ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (นาทิจ) = $-28.04 \times$ ปริมาณร้อยละไตรแคลเซียมอลูมิเนตโดยมวล $-0.005 \times$ ความละเอียดของเถ้าแกลบ $+7.28 \times$ จำนวนน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติ $+73.78 \dots$ (22) และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.90

ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (นาทิจ) = $-67.76 \times$ ปริมาณร้อยละไตรแคลเซียมอลูมิเนตโดยมวล $-0.007 \times$ ความละเอียดของเถ้าแกลบ $+5.74 \times$ จำนวนน้ำที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวปกติ $+310.13 \dots$ (23) และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.86

รายละเอียดจากการคำนวณสมการที่ 22-23 แสดงอยู่ในภาคผนวก ง. เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการ 22-23 มีค่ามากกว่า 0.8 จึงสามารถใช้สมการอย่างง่ายเพื่อเป็นสมการในการควบคุมระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) และ ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ในอุตสาหกรรมการผลิต



รูปที่ 19 รูปแสดงความสัมพันธ์ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial setting time) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 20 รูปแสดงความสัมพันธ์ปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย (Final setting time) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

การทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตจะมีความแตกต่างกันในแง่ของวิธีการทดสอบ โดยการทดสอบของมอร์ตาร์จะทำการควบคุมปัจจัยเรื่องปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมเพื่อศึกษาปัจจัยของ ประเภทของปูนซีเมนต์องค์ประกอบทางเคมี และความละเอียดของปูนซีเมนต์ ซึ่งจะดำเนินการทดสอบด้วยการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5.0 เซนติเมตร เนื่องจากขนาดที่ค่อนข้างรูปทรงลูกบาศก์ค่อนข้างเล็ก และขั้นตอนการผสมวัสดุต่าง ๆ มีอัตราส่วนการผสมที่แน่นอน ส่งผลให้ผลการทดสอบสามารถเชื่อถือได้และใช้เป็นมาตรฐานในการอ้างอิงของการผลิตปูนซีเมนต์ จึงนิยมนำมาใช้ทดสอบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ตามมาตรฐานสากล แต่ไม่สามารถนำไปใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากการทดสอบคอนกรีต มีปัจจัยเรื่องปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมเพื่อทำการควบคุมค่าการยุบตัว (Slump Test) ได้ 10.0 ± 1.0 ซม. เพื่อให้ได้ค่าความชื้นเหลือที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงของลูกค้ำ ซึ่งขึ้นกับลักษณะความมีรูพรุนของปูนซีเมนต์ การทดสอบคอนกรีตได้คำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ คุณสมบัติของมวลรวม ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ วิธีการก่อสร้าง และสภาพแวดล้อมในสถานที่ก่อสร้างจริง ดังนั้นการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวจะมีส่งผลให้ผลการทดสอบมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงกว่ามอร์ตาร์ เนื่องจาก ขนาดรูปทรงลูกบาศก์ที่ใช้มีขนาด 15.0 เซนติเมตร จึงต้องใช้ปูนซีเมนต์และสารผสมต่าง ๆ ในปริมาณที่มากกว่ามอร์ตาร์ ส่งผลให้ใช้เวลาในการผสมและทดสอบ

มากกว่าการทดสอบมอร์ตาร์ แต่อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการควบคุมคุณภาพของค่ากำลังอัดของคอนกรีต เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานของลูกค้า

การทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต จะแบ่งช่วงอายุการทดสอบออกเป็นสองช่วง ดังนี้ ช่วงอายุ 1 และ 3 วัน เรียกว่า ค่ากำลังอัดช่วงต้น ซึ่งใช้ในการควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เป็นหลัก สามารถคาดการณ์ผลกำลังอัดช่วงปลายเป็นไปตามมาตรฐานการผลิต และใช้เป็นเกณฑ์การตัดสินใจในการจำหน่ายปูนซีเมนต์ให้แก่ลูกค้า สำหรับช่วงอายุ 7 และ 28 วัน เรียกว่า ค่ากำลังอัดช่วงปลาย ในการทดสอบที่อายุ 7 วัน มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการคาดการณ์ผลทดสอบที่ 28 วัน ซึ่งการใช้งานของลูกค้าส่วนใหญ่เป็นที่นิยมต้องการทราบค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันเนื่องจากครบรอบระยะเวลา 4 สัปดาห์พอดี คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดไปมากพอสมควรแก่การนำไปใช้งานได้ง่าย และยืนยันว่าสามารถรับแรงเป็นไปตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้

ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (มอก. 15 เล่ม 12-2532) [19] จากการทดสอบค่ากำลังอัดพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดคือปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ในปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลให้ค่ากำลังอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย ปริมาณซิลิกาออกไซด์และค่าความละเอียดของเถ้าแกลบที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์ อย่างมีนัยสำคัญ

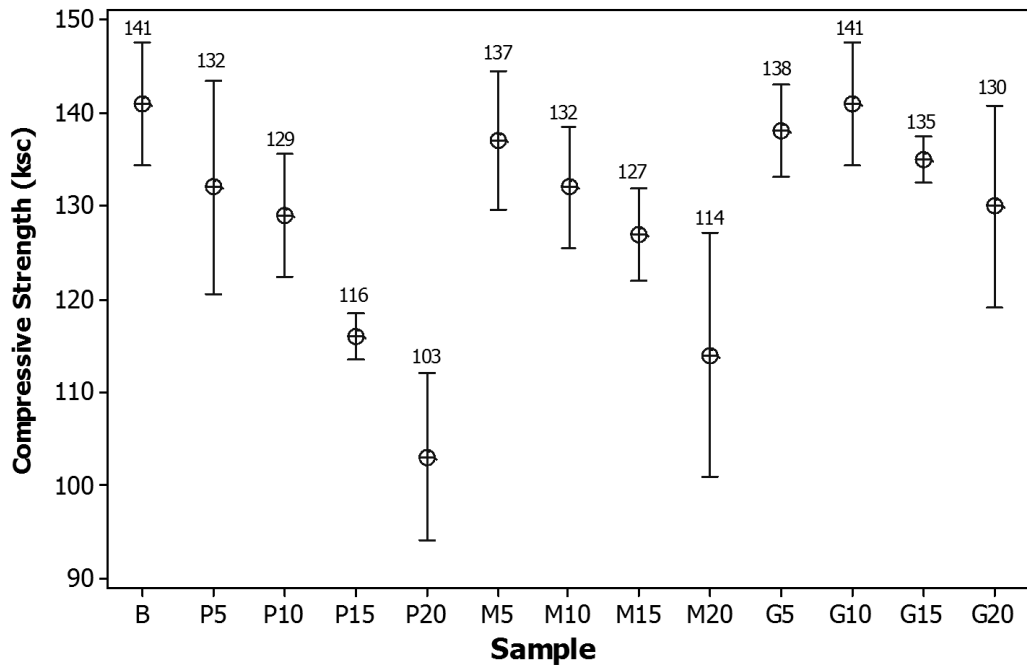
จากการทดสอบค่ากำลังอัดมอร์ตาร์พบว่า ช่วงอายุ 1 และ 3 วัน ตามรูปที่ 21 และ 22 ตามลำดับตัวอย่าง B จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณของเนื้อปูนซีเมนต์มากที่สุด กล่าวคือมีปริมาณร้อยละโดยมวลของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) มากที่สุดตามตารางที่ 18 และจะมีค่ากำลังอัดในช่วงต้นที่ลดลงตามอัตราส่วนการผสมของเถ้าแกลบเพราะปริมาณร้อยละโดยมวลของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ลดลง ตามตารางที่ 18 จากงานวิจัยของ Soroka [22] ในช่วงต้นผลิตภัณฑ์พลอยได้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)_2) เกิดขึ้นน้อย จึงส่งผลไม่มีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิกาออกไซด์ตามรูปที่ 25 แต่เมื่อใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อเถ้าแกลบเดียวกัน ชนิดของเถ้าแกลบที่ละเอียดจะให้ค่ากำลังอัดในช่วงต้นที่สูงกว่าเนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วและมีร้อยละโดยมวลของขนาดอนุภาคมากกว่า 30 ไมครอนที่น้อยกว่าตามตารางที่ 21 ซึ่งเป็นอนุภาคที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา [22]

สำหรับค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ช่วงปลาย (ช่วงอายุ 7 และ 28 วัน) ตามรูปที่ 23 และ 24 ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยเถ้าแกลบดั้งเดิมทุกสัดส่วนการผสมให้ค่ากำลังอัดที่น้อยกว่าตัวอย่าง B เนื่องจากความละเอียดของเถ้าแกลบน้อยกว่าปูนซีเมนต์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นช้า จากปริมาณที่เหลือของร้อยละโดยมวลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามตารางที่ 22 จึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ช่วงปลายมีค่าที่ลดลงตามอัตราส่วนการผสมเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น

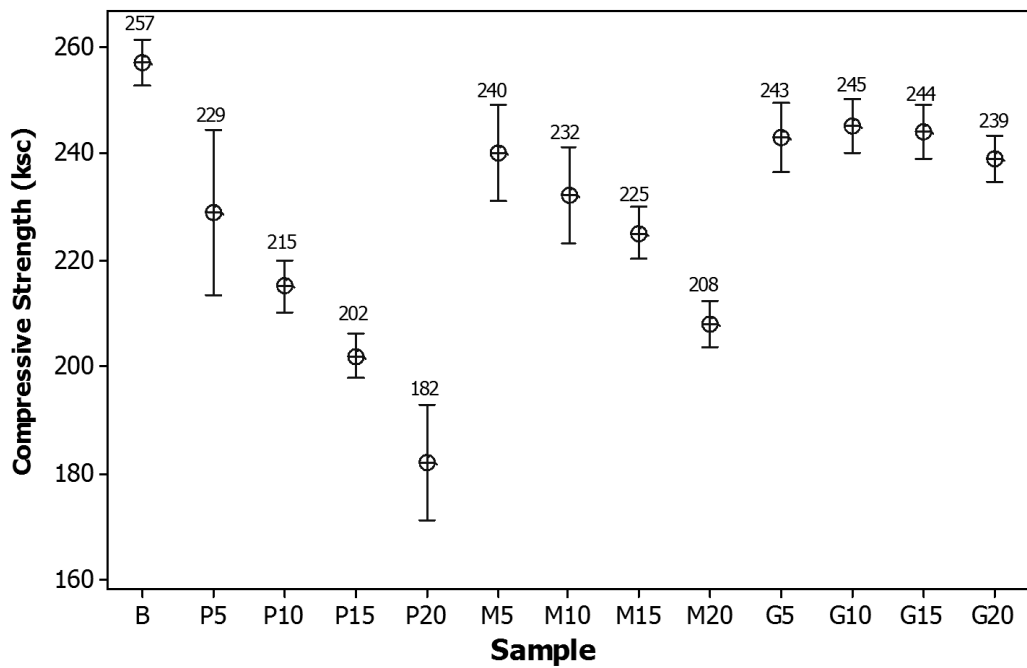
สำหรับปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยเถ้าแกลบผสมและเถ้าแกลบบดละเอียดที่ค่ากำลังอัดที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกับตัวอย่าง B เนื่องจากเริ่มมีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่าง โครงสร้างอสังฐานของซิลิกาและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้มีการพัฒนาค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้น ตามรูปที่ 25 จากงานวิจัยของ Soroka [22] พบว่าที่อายุ 7 วัน ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, Ca(OH)_2) เริ่มมีปริมาณที่มากขึ้น จึงส่งผลให้เริ่มมีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับโครงสร้างอสังฐานของซิลิกาออกไซด์ สำหรับตัวอย่าง M10 และ G10 มีค่ากำลังอัดที่ต่ำเมื่อเทียบกับตัวอย่าง M15, M20, G15 และ G20 เนื่องจาก ปริมาณซิลิกาออกไซด์มีปริมาณไม่เพียงพอกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้น้อย จึงได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) น้อย และ M10 และ G10 มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่าง B, M5 และ G5 เนื่องจากมีสัดส่วนของเนื้อปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณน้อยกว่า

ที่ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบชนิดเถ้าแกลบเดียวกันเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนการผสมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นปริมาณร้อยละโดยมวลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าลดลงตามลำดับ ตามตารางที่ 22 แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ลดลงเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพิ่มมากขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าที่เพิ่มขึ้น ตามสัดส่วนร้อยละการผสมโดยมวล จึงทำให้ค่ากำลังอัดช่วงปลายที่มากกว่าตัวอย่าง B และเมื่ออัตราส่วนการผสมเถ้าแกลบเดียวกัน เถ้าแกลบที่บดละเอียดจะช่วยให้ค่ากำลังอัดช่วงปลายสูงกว่าเถ้าแกลบผสม เนื่องจากมีการพัฒนากำลังอัดช่วงต้นที่ดีกว่าส่งผลให้ค่ากำลังอัดช่วงปลายมีค่าที่สูงขึ้น

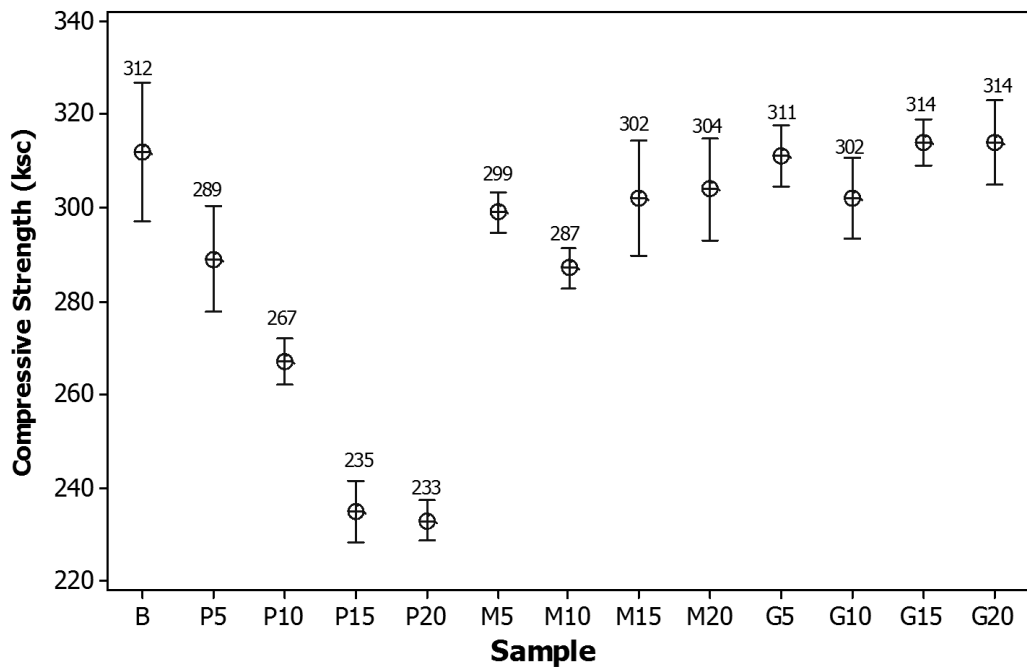
ดังนั้นอัตราส่วนการผสมเถ้าแกลบที่เหมาะสมคือที่ปริมาณร้อยละ 10 และ 15 โดยมวล (ตัวอย่างที่ G10 และ G15) ของเถ้าแกลบบดละเอียด ให้ค่ากำลังอัดที่ดีที่สุด เพราะสัดส่วนการผสมที่เพียงพอกับโครงสร้างอสังฐานของซิลิกาออกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 28 วันเพิ่มขึ้นประมาณ 12 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



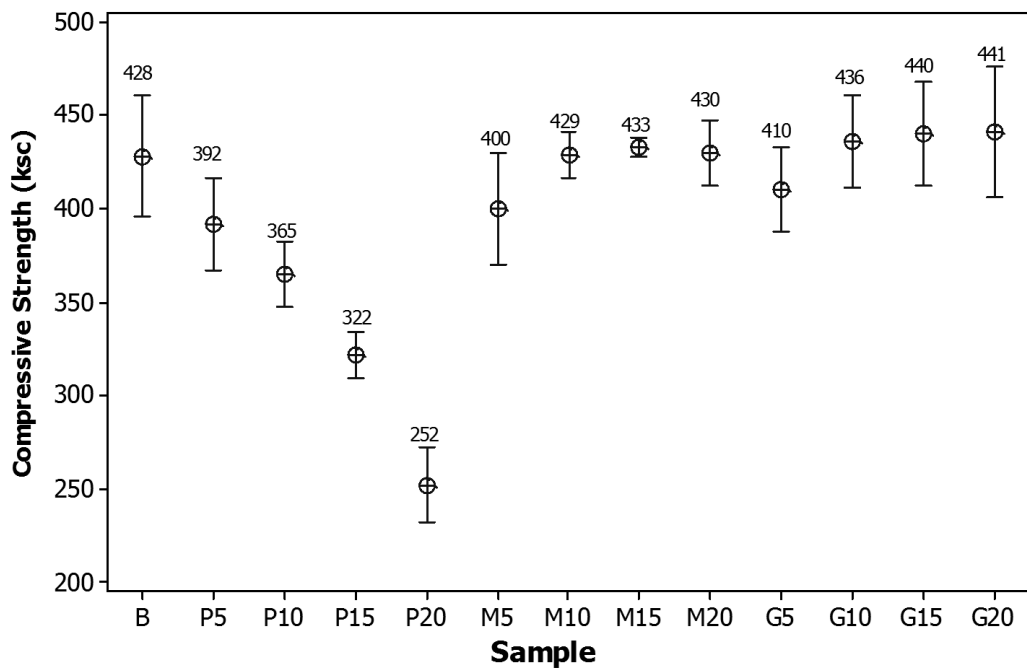
รูปที่ 21 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมแกลบที่ช่วงอายุ 1 วัน



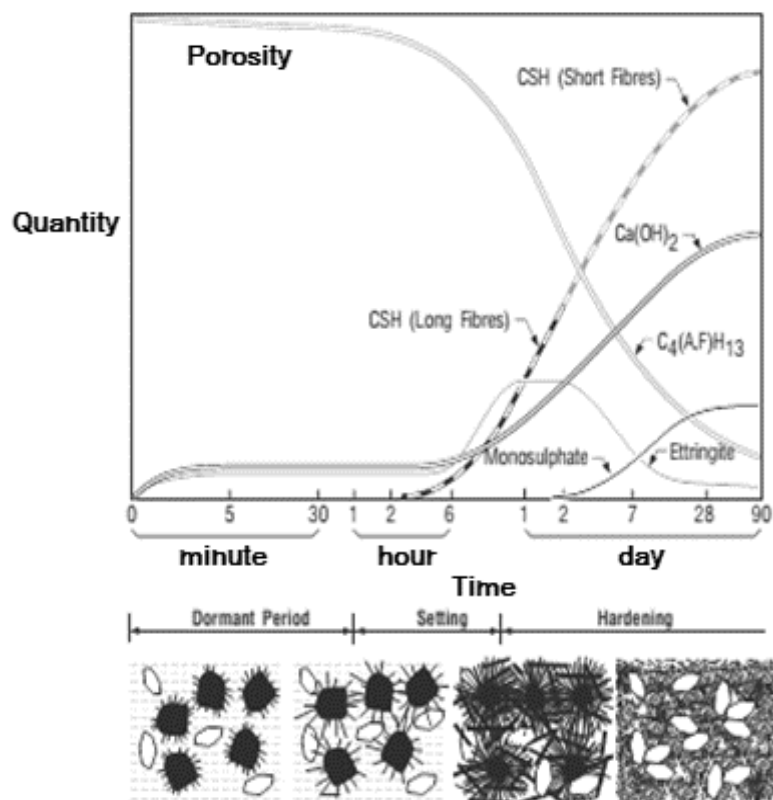
รูปที่ 22 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมแกลบที่ช่วงอายุ 3 วัน



รูปที่ 23 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมแกลบที่ช่วงอายุ 7 วัน



รูปที่ 24 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ผสมแกลบที่ช่วงอายุ 28 วัน



รูปที่ 25 ปริมาณผลิตภัณฑ์เทียบเวลาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ [22]

การทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ช่วงอายุ 3, 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C192 Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory [18] พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดคือปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ในปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นเฟสให้ค่ากำลังอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ ปริมาณซิลิกาออกไซด์และค่าความละเอียดของเถ้าแกลบที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์

ตามมาตรฐานการทดสอบคอนกรีตจะทำการควบคุมค่าการยุบตัว (Slump Test) ได้ 10.0 ± 1.0 ซม. โดยการหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม จากการค้นพบของ Abrams ในปี พ.ศ. 2461 [24] พบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตแปรผกผันกับอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำต่อปูนซีเมนต์ ตามสมการที่ 24

$$S = \frac{A}{B^x} \dots (24)$$

เมื่อ S คือ กำลังอัดของคอนกรีต

x คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำต่อปูนซีเมนต์

A และ B คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อายุของคอนกรีต วิธีการบ่มคอนกรีต ฯลฯ

จากการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้เพิ่มมากขึ้น ตามอัตราส่วนการผสมเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปัจจัยค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่แตกต่างกัน ตามตารางที่ 19 เถ้าแกลบมีลักษณะมีรูพรุนสูงมาก ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนเจลดต่อปริมาตรสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดคอนกรีตต่ำลงซึ่งการเพิ่มค่าความละเอียดของเถ้าแกลบช่วยให้ทำลายรูพรุนของเถ้าแกลบทำให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง จึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มที่สูงขึ้น และในปริมาตรเท่ากันคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบจะมีน้ำหนักเนื้อคอนกรีตน้อยกว่าซึ่งส่งผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต จากตารางที่ 23 จะพบว่าตัวอย่าง B มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้น้อยที่สุดเนื่องจากไม่มีปัจจัยของเถ้าแกลบเข้ามาเกี่ยวข้อง และที่อัตราส่วนผสมเถ้าแกลบเดียวกัน เถ้าแกลบบดละเอียดจะใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่น้อยกว่าเถ้าแกลบผสมและเถ้าแกลบดั้งเดิมตามลำดับ

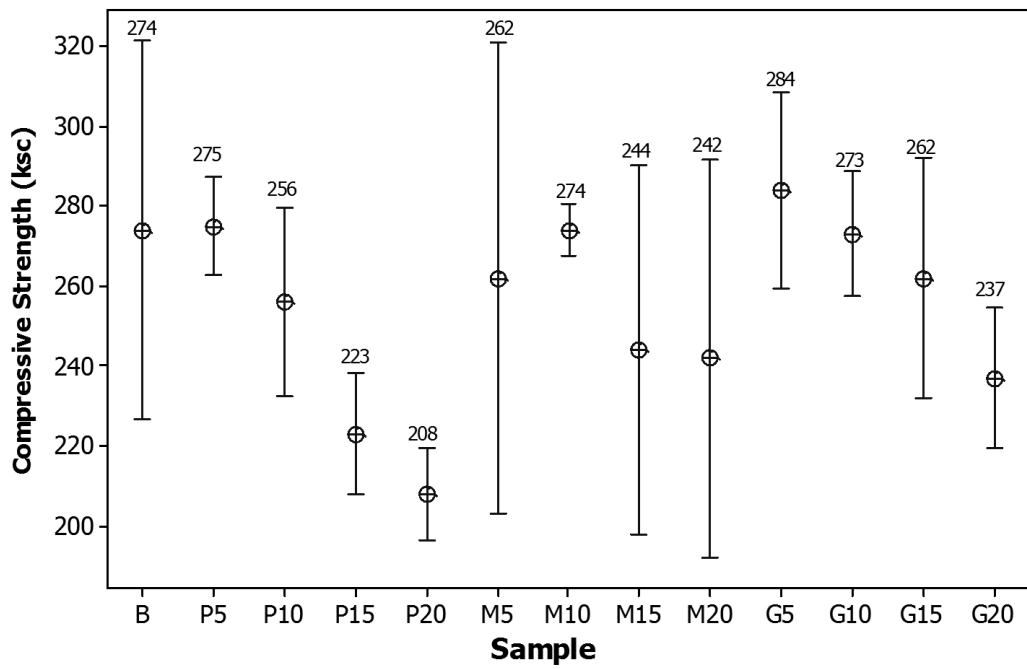
ในช่วงกำลังอัดคอนกรีตช่วงต้น (ช่วงอายุ 3 วัน) ตามรูปที่ 26 ตัวอย่าง B จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณของเนื้อปูนซีเมนต์มากที่สุดและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้น้อยเหตุผลคล้ายกับค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ในช่วงต้น (ช่วงอายุ 1 และ 3 วัน) ที่ได้กล่าวไปในข้างต้น และความละเอียดของเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงจะให้กำลังอัดในระยะต้นสูงเนื่องจากความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง แต่เมื่ออัตราส่วนการผสมเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดต่ำลงเพราะมีขนาดใหญ่และดูดน้ำมาก

สำหรับค่ากำลังอัดคอนกรีตช่วงปลาย (ช่วงอายุ 7 และ 28 วัน) ตามรูปที่ 27 และ 28 ตามลำดับ พบว่าตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ผสมด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 และ 15 ของเถ้าแกลบโดยมวลให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่สูงที่สุด เนื่องจากการผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสมร้อยละ 5 โดยมวล มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ไม่เพียงพอกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้น จากงานวิจัยของ Soroka [22] ได้ทำการศึกษาค่ากำลังอัดของสารประกอบหลักปูนซีเมนต์กับที่ช่วงอายุต่าง ๆ พบว่า ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ส่งผลต่อค่ากำลังอัดมากที่สุดเนื่องจากเป็นสารตั้งต้นหลักในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ในการให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ตามรูปที่ 29 ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนการผสมเถ้าแกลบจนถึงร้อยละ 20 โดยมวลปริมาณเนื้อปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบมากจนทำให้ปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ลดลงอย่างมาก ตามตารางที่ 18 จึงทำให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตช่วงปลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ ปริญา [25] ที่ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดระหว่างการผสมเถ้าแกลบเทาขาวและเถ้าแกลบดำที่อัตราส่วนการผสมร้อยละ 0, 20, 40, 60 และ 80 โดยมวลของ พบว่าอัตราส่วนการผสมที่ร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันที่สูงที่สุด

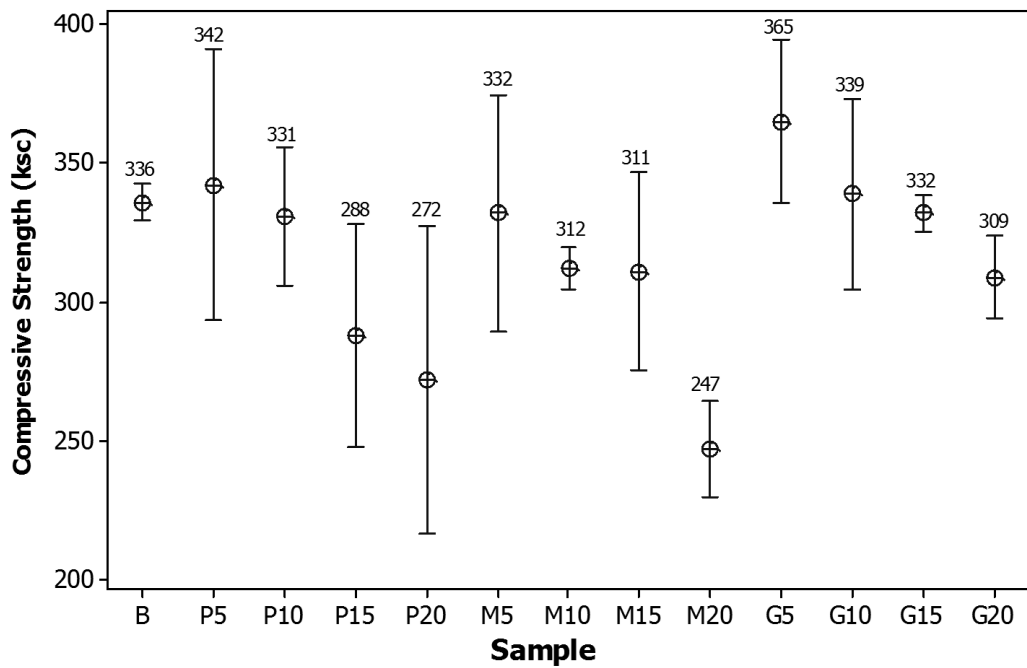
ดังนั้นปริมาณถ้ากลบบดละเอียดในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 และ 15 โดยมีมวลจึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานคอนกรีต ซึ่งช่วยให้ค่ากำลังอัดช่วงปลายสูงกว่าถ้ากลบผสมและถ้ากลบตั้งเดิม จากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก ระหว่างโครงสร้างออสซิลของซิลิกาและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่งผลให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วันเพิ่มขึ้นประมาณ 82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จ

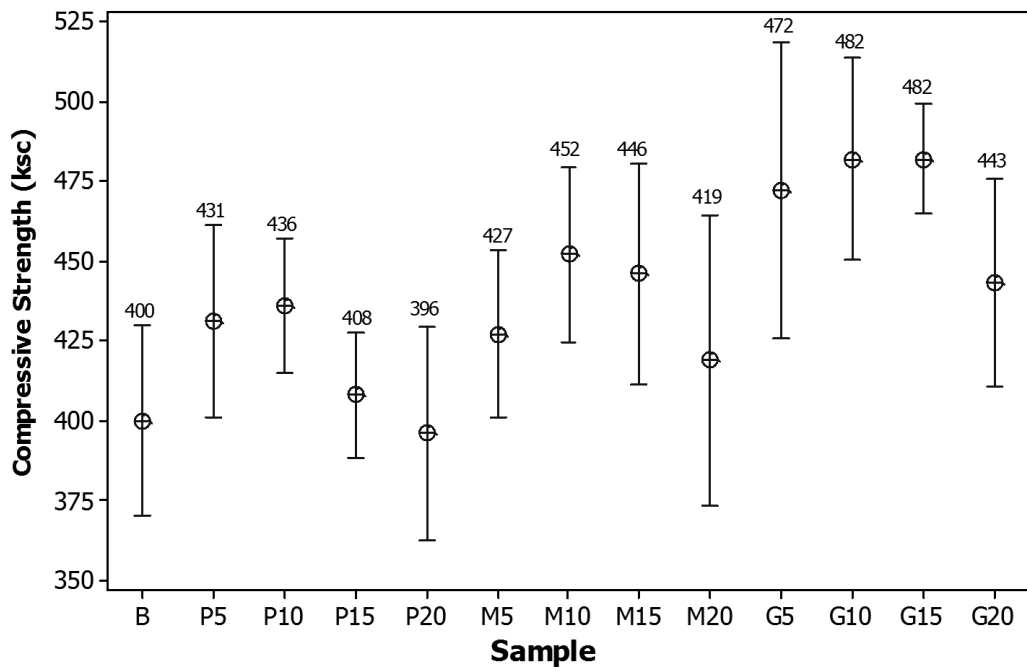
ตัวอย่าง	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์	ปริมาณน้ำที่ใช้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
B	0.64	212
P5	0.64	212
P10	0.65	216
P15	0.67	222
P20	0.68	226
M5	0.64	212
M10	0.65	216
M15	0.66	219
M20	0.66	219
G5	0.64	212
G10	0.64	212
G15	0.65	216
G20	0.66	219



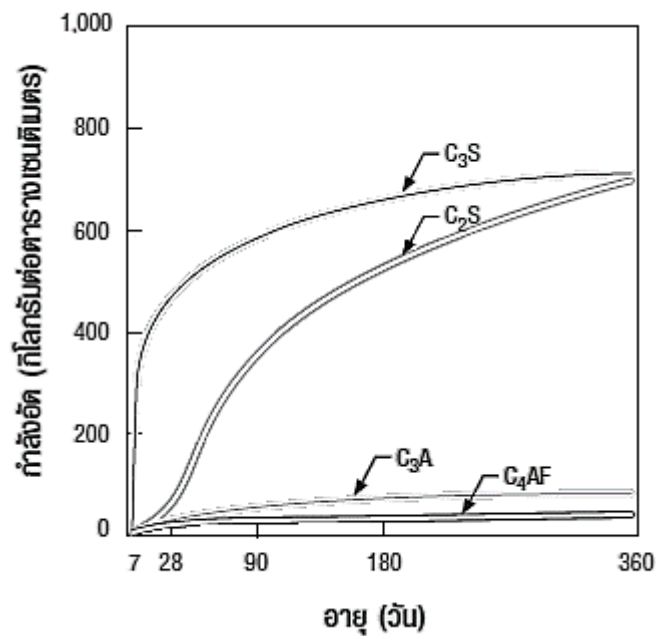
รูปที่ 26 ผลการทดลองกำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จของปูนซีเมนต์ผสมแกลบที่ช่วงอายุ 3 วัน



รูปที่ 27 ผลการทดลองกำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จของปูนซีเมนต์ผสมแกลบที่ช่วงอายุ 7 วัน



รูปที่ 28 ผลการทดลองกำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จของปูนซีเมนต์ผสมแกลบที่ช่วงอายุ 28 วัน



รูปที่ 29 ผลการทดลองกำลังอัดของสารประกอบหลักปูนซีเมนต์กับช่วงอายุ [22]

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

การใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเป็นหนึ่งในทางเลือกที่สามารถเพิ่มคุณภาพของคอนกรีต ด้วยการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายขนาดของเถ้าแกลบด้วยการบดด้วยหม้อบด Lab mill ด้วยการผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียด 5,100 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ในอัตราส่วนการผสมร้อยละ 10 ถึง 20 โดยมวล จะสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วันได้ประมาณ 82 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก จากโครงสร้างออสซิลฐานของซิลิกาของเถ้าแกลบและปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม ซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานิก ที่มีองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่เป็นซิลิกาที่เป็นโครงสร้างออสซิลฐาน เมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีจะให้สารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เพิ่มขึ้น และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ลดลง ส่งผลให้สมบัติด้านความคงทน (Durability) ต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตและการเสื่อมสภาพของคอนกรีตภายใต้สภาวะการใช้งานโดยรวมดีขึ้น [26] และ การปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายตัวของเถ้าแกลบที่เหมาะสมสามารถควบคุมขนาดอนุภาคเล็กลง พื้นที่ผิวละเอียดขึ้น มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และ ความมีรูพรุนลดลง ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตผสมเสร็จลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยการปรับปรุงคุณสมบัติการกระจายของเถ้าแกลบนี้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของทั้งในแง่ผู้ผลิตสำหรับการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าประเภทมูลค่าเพิ่มสูง (HVA-High Value Added) สามารถลดปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม ควบคุมอัตราส่วนการผสมเถ้าแกลบได้คงที่โดยใช้การวิเคราะห์ปริมาณโครงสร้างออสซิลฐานของตัวอย่าง และในแง่ผู้ใช้งานที่สามารถลดปริมาณการใช้งานปูนซีเมนต์ต่อหน่วยสินค้าลงได้โดยยังคงคุณภาพและมาตรฐานของสินค้าคงเดิม

ในปัจจุบันนอกจากการนำเถ้าแกลบที่เป็นวัสดุปอซโซลานิก มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตแล้ว การผลิตคอนกรีตสมัยใหม่ยังมีรายละเอียดที่น่าสนใจอีกมาก มีการนำวัสดุใหม่ ๆ มาใช้ในการผสมเพื่อลดปริมาณคอนกรีตและเพิ่มความเหมาะสมต่อการใช้งานแต่ละชนิด เช่น เถ้าปาล์ม น้ำมัน ซึ่งในประเทศไทยยังมีพื้นที่ปลูกปาล์มและมีผลผลิตเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก ทำให้มีปริมาณกากของผลปาล์มในปริมาณที่มาก มีการนำกากของผลปาล์มที่เหลือจากการเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการกองเก็บและการกำจัด

ทั้งนี้ อีกทั้งนโยบายรัฐยังมีการสนับสนุนให้นำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ย่อมส่งผลให้มีปริมาณเถาปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัว ดังนั้นถือเป็นเรื่องจำเป็นและมีความสำคัญมาก ในการศึกษาพัฒนานำเถาปาล์มน้ำมันมาผสมร่วมกับเถาแอลกอฮอล์ในส่วนที่เหมาะสม เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตและแก้ปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมที่จะตามมาในอนาคตอันใกล้



รายการอ้างอิง

1. Mindess, S., and Young, J.F., *Concrete*. 1981, New Jersey, Prentice-Hall.
2. American Society for Testing and Materials, *ASTM C618-00 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards*, 2001: Philadelphia. **04.02**: p. 310-311.
3. Luh, B.S., *Rice: Production and Utilization*. 1979, Westport, Connecticut: Avi Publishing Company.
4. จินดาประเสริฐ, ป., หอวิจิตร, อ., และ ประภารชนาธร ส., ปูนซีเมนต์เถ้าแกลบ. วารสารวิชาการที่อยู่อาศัย, พ.ศ. 2529. เล่มที่ 2(ปีที่ 3): p. 81-92.
5. Hwang, C.L., and Wu, D.S., *Properties of Cement Paste Containing Rice Husk Ash*, ed. Maholtra V.M., 1989, ACI SP-114.
6. Lea, F.M., *The Chemistry of Cement and Concrete*. 1970: London, Edward Arnold.
7. *Cement Admixture Uses and Application*. 2nd Edition ed. 1988: The Cement Admixture Association.
8. American Society for Testing and Materials, *ASTM C33-01 : Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards*, 1997: Philadelphia. **04.02**: p. 10-17.
9. American Society for Testing and Materials, *ASTM C494/C494M-99a : Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards*, 2001: Philadelphia. **04.02**: p. 261-269.
10. Dabai, M., *Studies on the Effect of Rice Husk Ash as Cement Admixture*. Nigerian Journal of Basic and Applied Science (2009), 2012: p. 252-256.
11. Rao, P., and Singh B., *A Study on Use of Rice Husk Ash in Concrete*. International Journal of Education and applied research, 2014. **4**(Spl-2): p. 75-81.

12. Obilade, I., *Use of Rice Husk Ash As Partial Replacement For Cement in Concrete*. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 2014: p. 11-16.
13. Kumar, P., *Benefits Of Use Of Rice Husk Ash in Concrete*. Journal of Industrial Pollution Control, 2010: p. 239-241.
14. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2555 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ. พ.ศ. 2555, กระทรวงอุตสาหกรรม: กรุงเทพฯ.
15. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2521 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 2 การทดสอบความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 1. พ.ศ. 2537, กระทรวงอุตสาหกรรม: กรุงเทพฯ.
16. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2521 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 6 วิธีทดสอบหาความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยเครื่องแอร์เพอร์มิอะบิลิตี, พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 2. พ.ศ. 2541, กระทรวงอุตสาหกรรม: กรุงเทพฯ.
17. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2518 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 9 การหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดยใช้เข็มไวแคต. พ.ศ. 2518, กระทรวงอุตสาหกรรม: กรุงเทพฯ.
18. American Society for Testing and Materials, *ASTM C192/C192 M-00 : Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Annual Book of ASTM Standards*, 2001: Philadelphia. **04.02**: p. 120-127.
19. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2532 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 12 การทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 2. พ.ศ. 2540, กระทรวงอุตสาหกรรม: กรุงเทพฯ.
20. Nehdi, M., Duquette, J., and El Damatty, A., *Performance of Rice Husk Ash Produced Using a New Technology as a Mineral Admixture in Concrete*. Cement and Concrete Research, 2003. **33**: p. 1203-1210.
21. จินดาประเสริฐ, ป., การนำเถ้าแกลบไปใช้ในงานคอนกรีต, การสัมมนาทางวิชาการ เรื่องการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรและภาคอุตสาหกรรมในงานคอนกรีต. พ.ศ. 2547, สมาคมคอนกรีตไทย. p. 1-13.
22. Soroka, I., *Portland Cement Paste and Concrete*. 1979, London, UK: The Macmillan Press Ltd.

23. Steven, H., Beatrix, K., and William, C., *Design and Control of Concrete Mixtures: Portland, Blended, and Other Hydraulic Cements*. Concrete Information, 2002.
24. Abrams, D.A., *Design of Concrete Mixtures, Bulletin 1, Structural Materials Research Laboratory*. Revised Edition ed. 1918, Chicago: Lewis Institute.
25. Chindaprasirt, P., *Low Cost Cement for Rural Area*. 1983, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.
26. Chindaprasirt, P., Khosree, U., and Sata, V., *Resistance to Chloride Penetration of Concrete Containing Pozzolan, International Conference on Engineering and Technology*. 2005: Brunei. p. 239-243.
27. Scarlett, N.V.Y. and Madsen, I.C., *Quantification of phases with partial or no known crystal structure*. Powder Diffraction, 2006. **21(4)**: p. 278-284.
28. National Institute of Standards and Technology, *NISTIR 5755 : Guide for X-Ray Powder Diffraction Analysis of Portland Cement and Clinker*. 1996: Maryland. p. 7-8.
29. Bhatti, J.I., Dollimore, D., Gamlen, G. A., Mangabhai, R. J., and Olmez, H., *Estimation of Calcium Hydroxide in OPC, OPC/PFA and OPC/PFA/Polymer Modified Systems*. Thermochemical Acta, 1986. **106**: p. 115-123.



ภาคผนวก ก.

ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD)

ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) ด้วยการใช้รังสีเอกซ์ที่ทราบค่าความยาวคลื่นลงไปยังผลึกตัวอย่าง จากนั้นจึงวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่กระเจิงแสงออกมาจากผลึกที่มุมต่าง ๆ ข้อมูลที่บันทึกได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของรังสีเอกซ์ (Intensity) และมุมตกกระทบของพีคเลี้ยวเบน (2θ) กราฟที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งในกราฟสามารถแบ่งส่วนต่าง ๆ ของกราฟได้ดังนี้ ตำแหน่งของพีคต่าง ๆ ใช้ในการคำนวณหาระยะระหว่างระนาบต่าง ๆ ของผลึก (d_{hkl}) ได้ ส่งผลให้ทราบค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameters) ของผลึกได้ ทำให้รู้ลักษณะและขนาดของผลึก ความเข้มพีคของรังสีเอกซ์ (Peak intensities) ใช้ในการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟเพื่อหาปริมาณขององค์ประกอบผลึกต่าง ๆ เค้าโครงของความกว้างและรูปร่างของรูปแบบการเลี้ยวเบน (Profile width and shape) ในการศึกษาความแม่นยำของเครื่องมือและโครงสร้างจุลภาคของขนาดผลึก พื้นหลัง (Background) ในกรณีที่พื้นหลังไม่เรียบ อาจเกิดจากสาเหตุหลายปัจจัยเช่น การกระเจิงจากสิ่งแวดล้อม (อากาศ) การกระเจิงไม่ต่อเนื่อง (Incoherent scattering) หรือ ปริมาณโครงสร้างอสัณฐาน

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบผลึก (Quantitative analysis) ในการวิเคราะห์จะมีการนำรูปแบบมาตรฐาน (Standard pattern) ของผลึกแต่ละชนิดที่ถูกเก็บบันทึกข้อมูลมาใช้ในการเปรียบเทียบกับพีคของรูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ดูว่าตรงกับรูปแบบของสารประกอบตัวใดก็แสดงว่า unknown เป็นสารประกอบตัวนั้น จากนั้นคำนวณหาความเข้มของพีคจากการวัดพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งเมื่อได้ความเข้มของพีคแต่ละพีคจึงสามารถคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบผลึกได้

จากการศึกษาของ Scarlett และ Madsen [27] พบว่ามีวิธีการหาปริมาณโครงสร้างอสัณฐาน เรียกว่า Quantification of phases with partial or no known crystal structures (PONKCS) กล่าวคือในบางครั้ง รูปแบบของโครงสร้างผลึกไม่สามารถอธิบายโครงสร้างได้ถูกต้อง เนื่องจากขาดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของรูปแบบมาตรฐาน (Standard pattern) ไม่ตรงกัน จึงต้องทำการสอบเทียบโครงสร้างอสัณฐานเพิ่มเติม ด้วยวิธีการจำลองผลึกของโครงสร้างอสัณฐานเพิ่มเติม จากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นโครงสร้างอสัณฐานบริสุทธิ์ เพื่อทำการรวบรวมรูปแบบการเลี้ยวเบน และทำการบันทึกข้อมูลเป็นโครงสร้างเฟสของ hkl และจุดพีคของเฟส ใช้เป็นรูปแบบมาตรฐาน (Standard pattern) ของโครงสร้างอสัณฐาน ทำให้หาปริมาณโครงสร้างผลึกที่ไม่รู้จักสามารถวัดได้ด้วย

ถูกต้องและความแม่นยำเหมือนโครงสร้างผลึกทั่วไป เมื่อหาปริมาณโครงสร้างออสถูนาเป็นที่
 เรียบร้อย ให้ทำการหาปริมาณโครงสร้างผลึก ตามสมการ ก.1

$$\text{ร้อยละปริมาณโครงสร้างผลึกทั้งหมดโดยมวล} = 100 - \text{ร้อยละปริมาณโครงสร้างออสถูนาโดยมวล} \\ \dots(\text{ก. 1})$$

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์โดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อให้ผลรวมร้อยละของ
 โครงสร้างผลึกและโครงสร้างออสถูนาโดยมวล เท่ากับ 100 จึงนำผลวิเคราะห์ร้อยละปริมาณของ
 องค์ประกอบผลึกโดยมวลแต่ละสารจากการคำนวณหาข้างต้นมาลดทอนสัดส่วนลง ตามสมการ ก.2

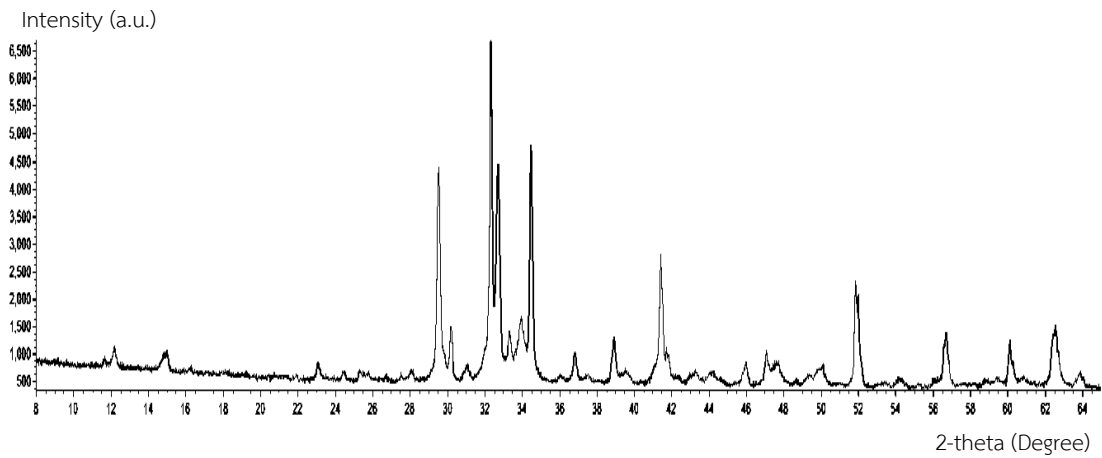
$$\text{ร้อยละปริมาณโครงสร้างผลึกของสาร ก. โดยมวล} = \text{ร้อยละปริมาณโครงสร้างผลึกของสาร ก. โดย} \\ \text{มวล} \times \text{ร้อยละปริมาณโครงสร้างผลึกทั้งหมดโดยมวล} / 100 \dots (\text{ก. 2})$$

ข้อดีของวิธี PONKCS คือ วิธีการหาค่าประกอบปริมาณโครงสร้างออสถูนามีความน่าเชื่อถือ
 และถูกต้องครอบคลุมช่วงการใช้งาน การคำนวณแบบมีขั้นตอนการปฏิบัติใกล้เคียงกับการหาปริมาณ
 โครงสร้างผลึก เป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องควบคุมคุณภาพของ
 ปริมาณโครงสร้างออสถูนา ไม่มีปัญหาในเรื่องการดูดซับระดับไมโคร (No microabsorption
 problem)

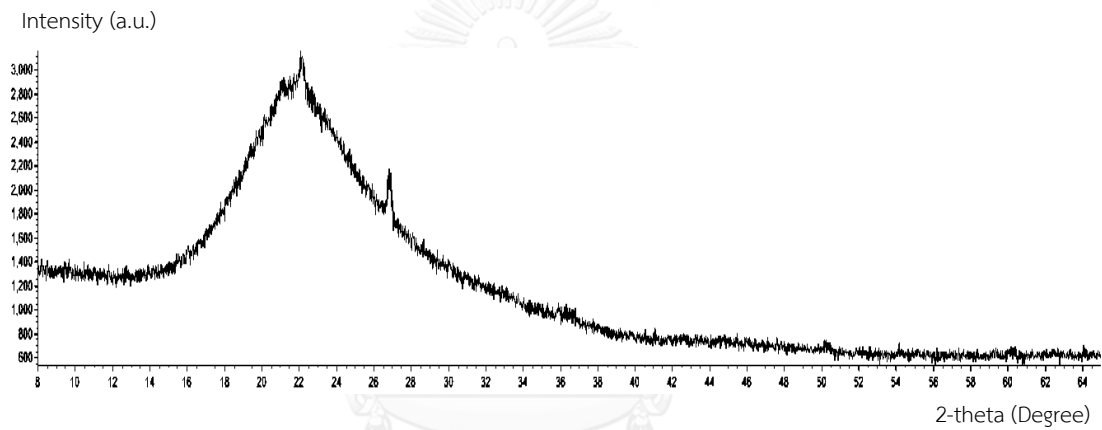
สำหรับตัวอย่างปูนซีเมนต์จะประกอบไปด้วยโครงสร้างผลึกหลายชนิด จึงส่งผลให้กราฟ
 รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) มีพีคที่มุมตกกระทบของพีคเลี้ยวเบน (2θ) ต่าง ๆ ที่
 แตกต่างกัน ซึ่งในแต่ละมุมตกกระทบของพีคเลี้ยวเบน (2θ) Paul ได้ทำการศึกษาและจัดทำ
 มาตรฐาน NISTIR 5755 [28] เพื่อเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบกับรูปแบบมาตรฐาน (Standard
 pattern) ของผลึกแต่ละชนิด ตามตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบผลึกกับมุมตกกระทบของพีคเดี่ยวเบน (2θ) [28]

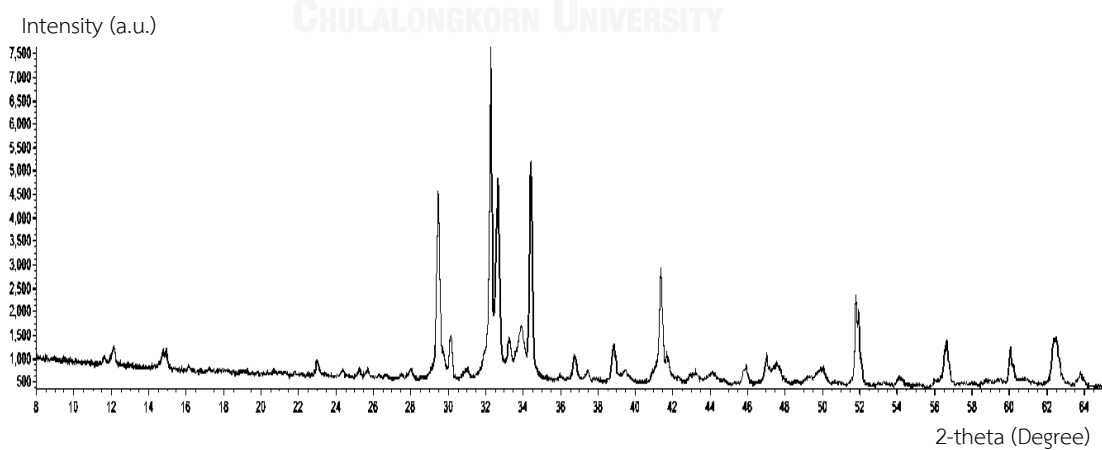
องค์ประกอบผลึก	มุมตกกระทบของพีคเดี่ยวเบน (2θ)
Alite M1 (C_3S)	32.22, 34.36, 32.61, 29.37, 29.42, 32.56, 41.31, 51.72
Alite M3 (C_3S)	34.41, 32.26, 29.51, 32.56, 41.37, 51.78, 32.56, 29.40
Belite β (C_2S)	32.14, 32.05, 32.59, 41.21, 34.33, 32.93, 45.74, 31.77
Alum cubic (C_3A)	33.17, 47.63, 59.27, 21.76, 40.93, 69.64, 32.09, 79.34
Alum ortho (C_3A)	32.24, 59.03, 40.88, 47.33, 48.08, 69.77
Ferrite (C_4AF)	34.07, 33.75, 47.52, 32.45, 44.34, 12.20, 24.48, 42.18
Lime	37.35, 53.86, 32.20, 64.15, 67.38, 91.46, 147.78, 0.98
Portlandite	34.09, 18.09, 47.12, 50.79, 28.66, 54.34, 62.54, 64.23
Periclase	42.91, 62.31, 78.61, 109.73, 127.19, 36.95, 93.99, 74.68
Quartz	26.65, 20.85, 50.14, 59.95, 36.54, 39.46, 68.13, 67.75
Arcanite-K ₂ SO ₄	30.78, 29.75, 30.96, 21.26, 37.09, 43.28, 43.43, 21.34
Langbeinite-K ₂ Mg ₂ (SO ₄) ₃	27.64, 26.87, 27.23, 32.22, 32.10, 32.53, 20.86, 21.03
Aphthitalite-NaKSO ₄	32.20, 31.46, 22.39, 45.67, 25.27, 56.98, 57.44, 38.29
Gypsum	11.59, 20.72, 29.11, 31.10, 33.34, 43.34, 23.40, 47.84
Bassanite	29.69, 31.90, 14.72, 25.67, 49.36, 49.24, 54.14, 55.10
Anhydrite	25.44, 31.32, 38.64, 40.82, 48.68, 55.72, 52.23, 41.31
Calcite	29.41, 39.40, 43.15, 47.49, 48.51, 35.97, 23.02, 57.40
Dolomite	30.94, 41.43, 44.95, 50.53, 51.07, 37.38
Amorphous	23.20



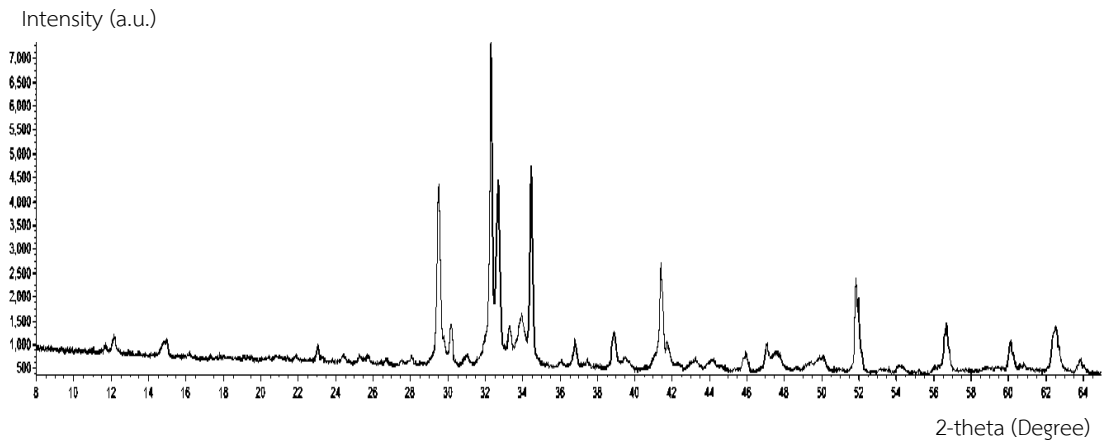
รูปที่ ก. 1 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ตัวอย่าง B



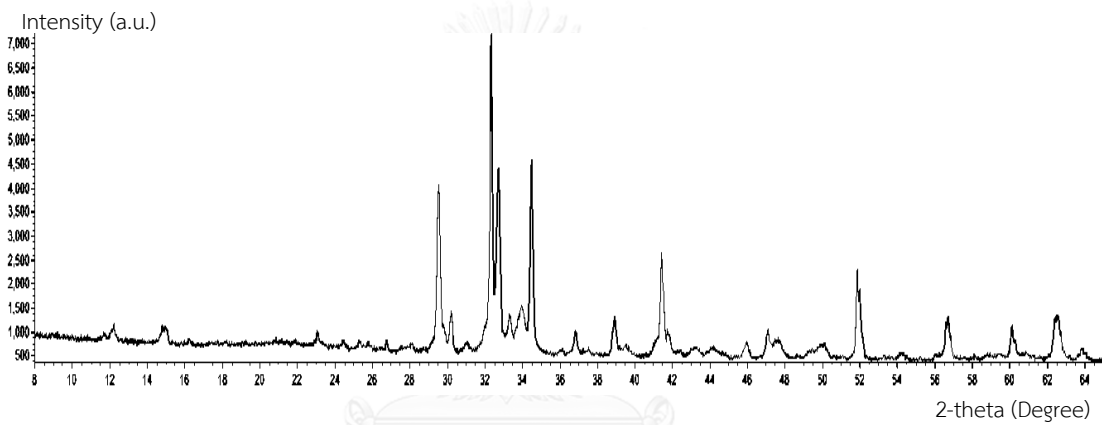
รูปที่ ก. 2 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของเถ้าแกลบ



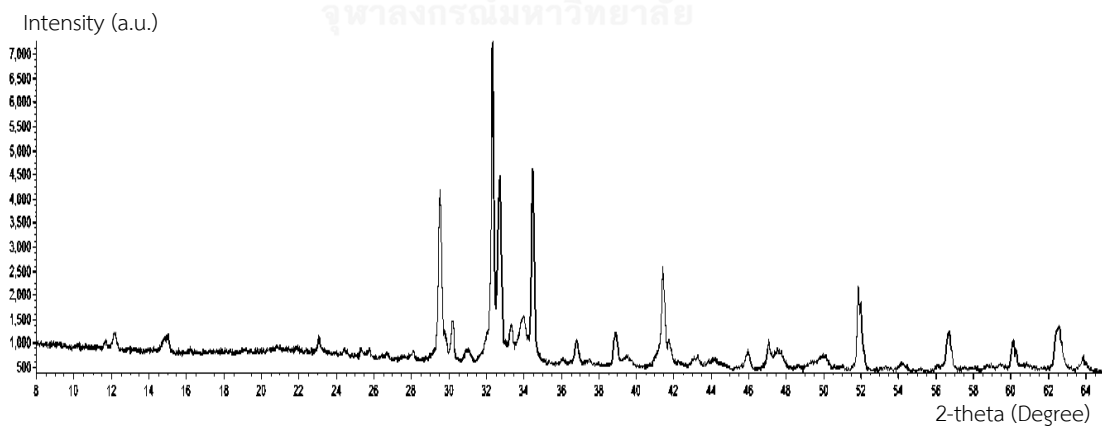
รูปที่ ก. 3 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P5



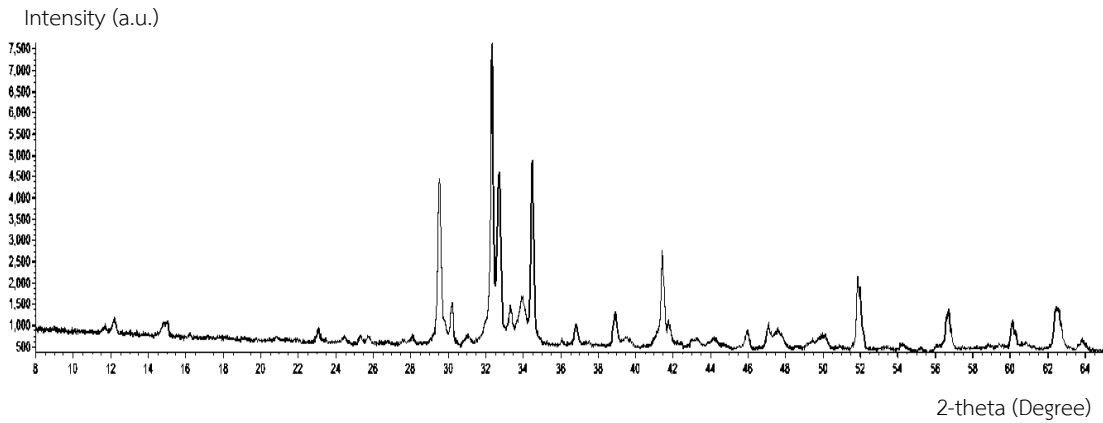
รูปที่ ก. 4 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P10



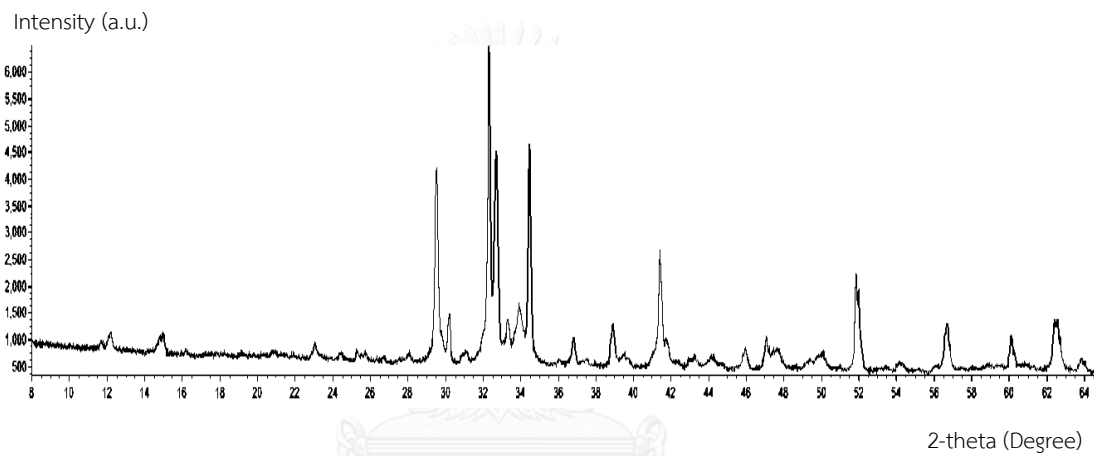
รูปที่ ก. 5 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P15



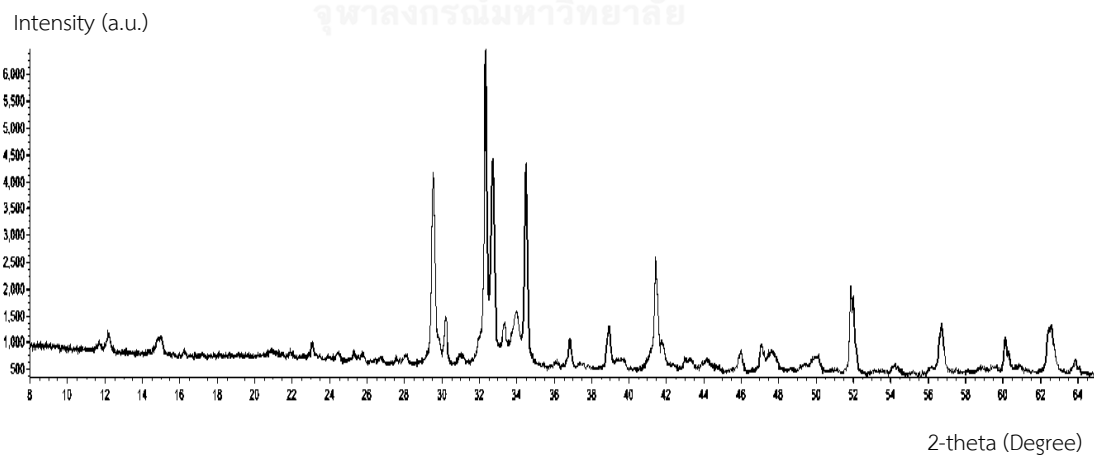
รูปที่ ก. 6 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P20



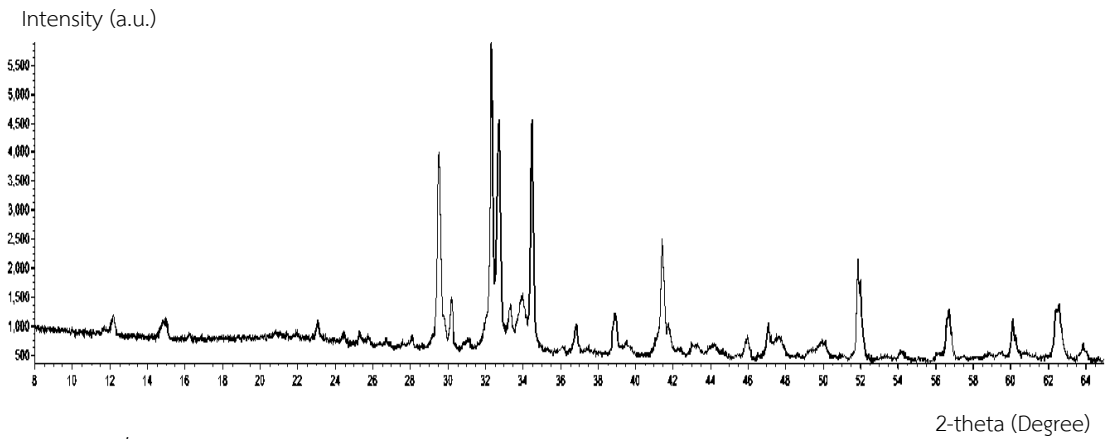
รูปที่ ก. 7 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M5



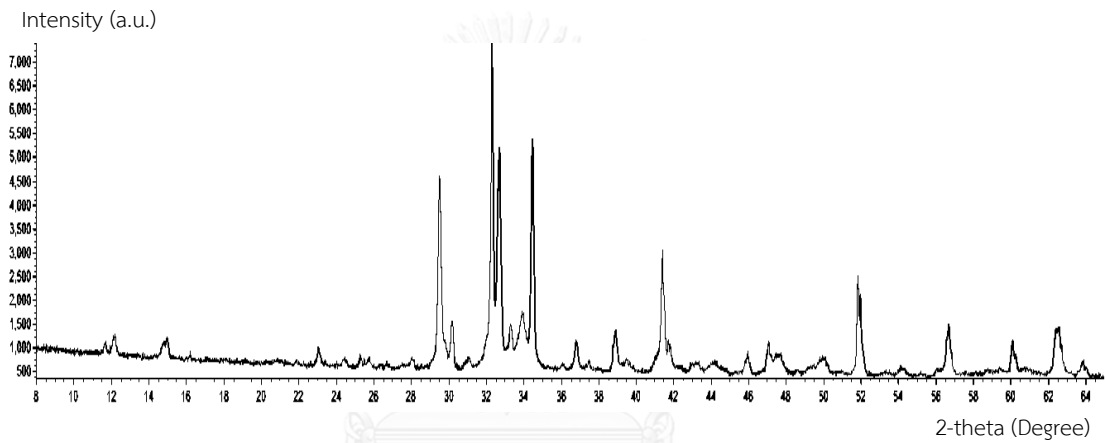
รูปที่ ก. 8 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M10



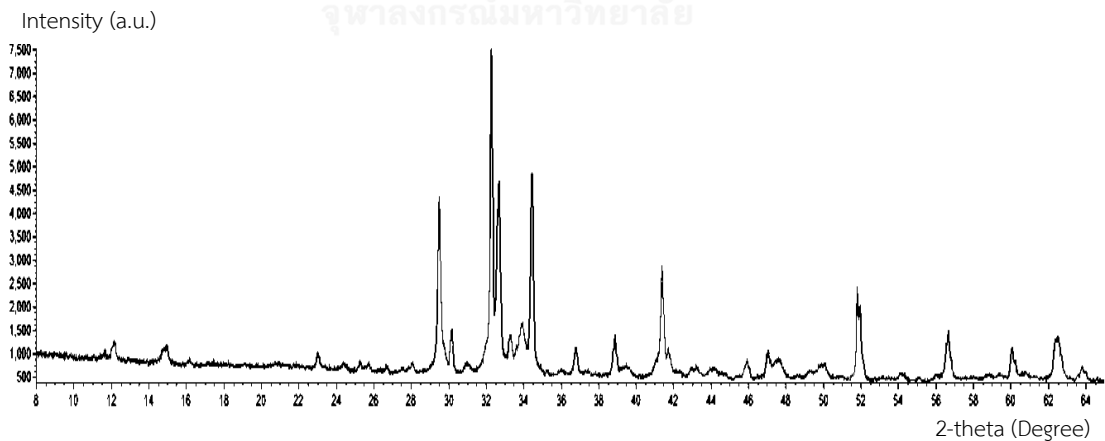
รูปที่ ก. 9 ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M15



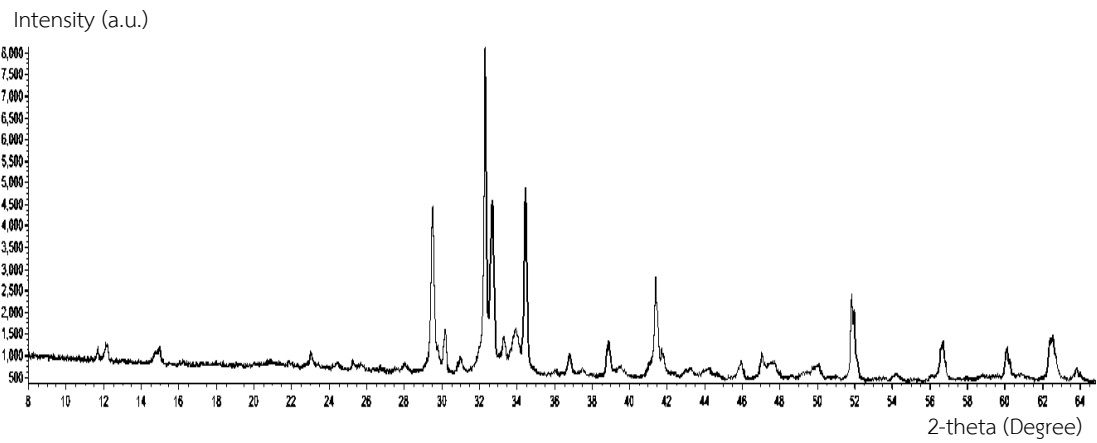
รูปที่ ก. 10 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M20



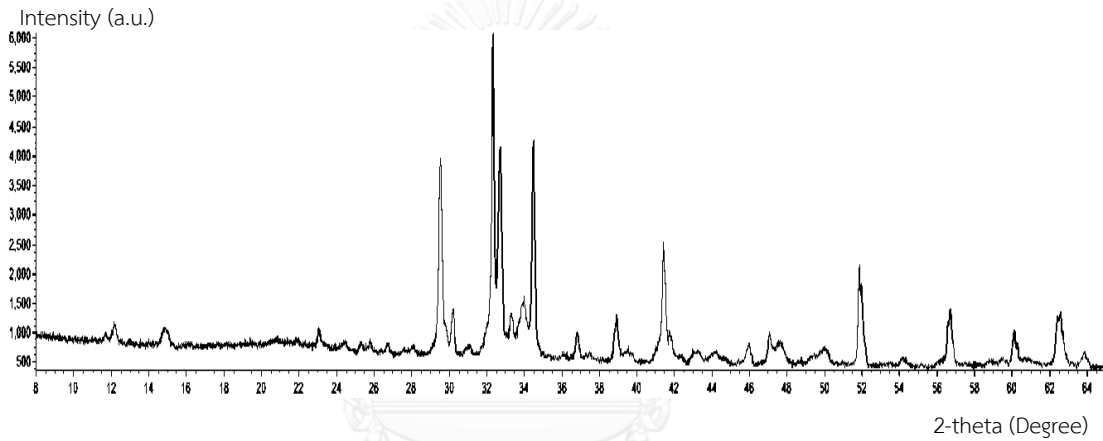
รูปที่ ก. 11 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G5



รูปที่ ก. 12 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G10



รูปที่ ก. 13 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแก้วตัวอย่าง G15



รูปที่ ก. 14 ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบผลึกของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแก้วตัวอย่าง G20

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution

ความหมายของตัวแปรในการทดสอบขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง Particle size distribution มีดังนี้

x10 คือ ร้อยละ 10 โดยปริมาตรที่พบอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน

x50 คือ ร้อยละ 50 โดยปริมาตรที่พบอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน

x90 คือ ร้อยละ 90 โดยปริมาตรที่พบอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน

x80 คือ ร้อยละ 80 โดยปริมาตรที่พบอนุภาคมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้เป็นไมครอน

Sive 3 μm คือ ร้อยละของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยมวลที่มีขนาดน้อยกว่า 3 ไมครอน

Sive 3-30 μm คือ ร้อยละของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคโดยมวลที่มีขนาดอยู่ในช่วง 3-30 ไมครอน

RXX (Residue XX μm) คือ ร้อยละเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยโดยมวลที่มีขนาดมากกว่า XX ไมครอน

VMD (Volume Mean Diameter) คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเฉลี่ยโดยปริมาตร

Span of Distribution คือ ค่าความกว้างในการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ขึ้นกับค่ามัธยฐาน (ผลต่างของ x90 และ x10 หารด้วย x50)

Blaine คือ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของอนุภาค (Specific Surface; ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)

Rosin – Rammler คือ ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคตัวอย่าง

Cement blank (B) $c_{opt}=21.76\%$

$x_{10} = 2.21 \mu\text{m}$ $x_{50} = 17.02 \mu\text{m}$ $x_{90} = 40.55 \mu\text{m}$ $x_{80} = 31.97 \mu\text{m}$

Sieve $3 \mu\text{m} = 13.28\%$ $R_{30} = 22.77 \%$ $VMD = 19.70 \mu\text{m}$

Sieve $3-30\mu\text{m} = 63.94\%$ $R_{60} = 1.53 \%$ $Blaine = 3382.42 \text{ cm}^2/\text{g}$

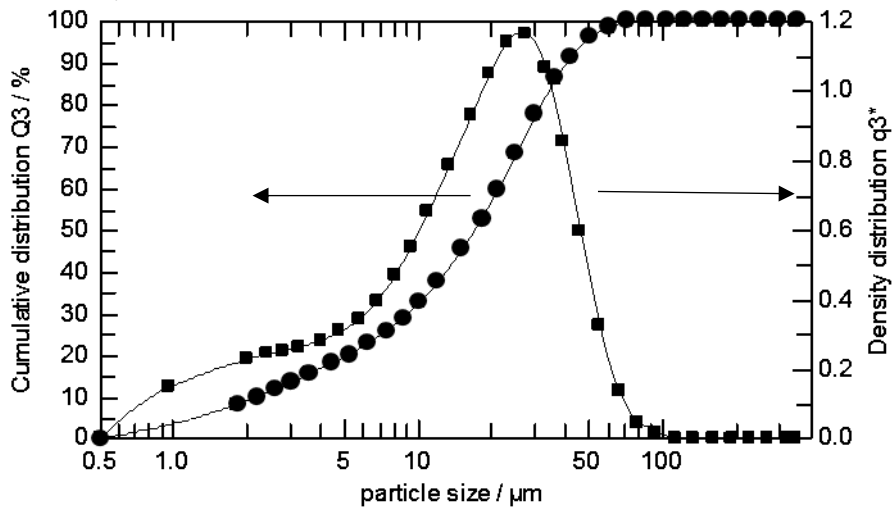
$R_{32} = 19.96 \%$ $R_{45} = 6.93 \%$ $R_{90} = 0.09 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	8.00	7.4	25.65	30.0	77.23	122.0	100.00
2.2	9.97	8.6	28.69	36.0	85.67	146.0	100.00
2.6	11.72	10.0	32.28	42.0	91.39	174.0	100.00
3.0	13.28	12.0	37.43	50.0	95.88	206.0	100.00
3.6	15.36	15.0	45.05	60.0	98.47	246.0	100.00
4.4	17.80	18.0	52.40	72.0	99.54	294.0	100.00
5.2	20.01	21.0	59.41	86.0	99.88	350.0	100.00
6.2	22.61	25.0	68.03	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.25

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 21.93, N:1.09$



รูปที่ ข. 1 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ตัวอย่าง B

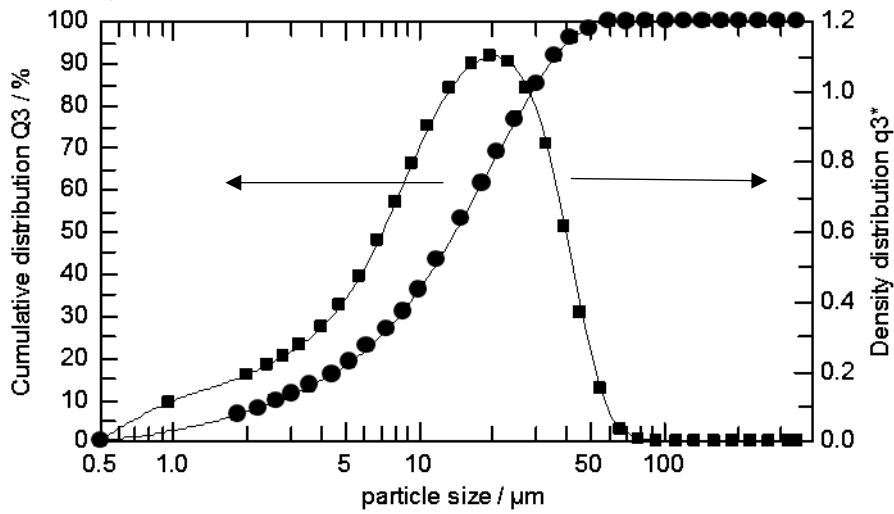
Pristine RHA $\text{copt}=10.22\%$
 $x_{10} = 2.82 \mu\text{m}$ $x_{50} = 14.10 \mu\text{m}$ $x_{90} = 34.49 \mu\text{m}$ $x_{80} = 26.88 \mu\text{m}$
 $\text{Sive } 3 \mu\text{m} = 10.69\%$ $R_{30} = 15.02 \%$ $\text{VMD} = 16.77 \mu\text{m}$
 $\text{Sive } 3\text{-}30\mu\text{m} = 74.29\%$ $R_{60} = 0.30 \%$ $\text{Blaine} = 3195.97 \text{ cm}^2/\text{g}$
 $R_{32} = 12.78 \%$ $R_{45} = 3.17 \%$ $R_{90} = 0.00 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	5.99	7.4	26.44	30.0	84.98	122.0	100.00
2.2	7.63	8.6	30.88	36.0	91.69	146.0	100.00
2.6	9.19	10.0	36.05	42.0	95.80	174.0	100.00
3.0	10.69	12.0	43.17	50.0	98.56	206.0	100.00
3.6	12.85	15.0	52.94	60.0	99.70	246.0	100.00
4.4	15.68	18.0	61.45	72.0	99.96	294.0	100.00
5.2	18.49	21.0	68.80	86.0	100.00	350.0	100.00
6.2	22.06	25.0	77.01	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.25

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 18.47, N:1.27$



รูปที่ ข. 2 ขนาดอนุภาคของเถ้าเคลบดั้งเดิม (Pristine RHA)

Mixed RHA copt=13.81%

x10 = 1.92 μm x50 = 11.79 μm x90 = 32.18 μm x80 = 24.30 μm

Sive 3 μm = 16.00% R30 = 11.99 % VMD = 14.81 μm

Sive3-30μm = 72.01% R60 = 0.35 % Blaine= 4054.58 cm²/g

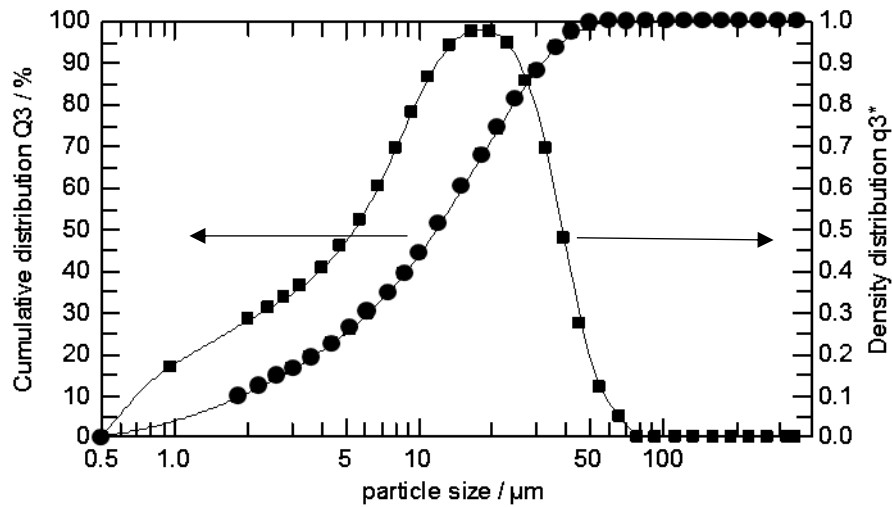
R32 = 10.17 % R45 = 2.56 % R90 = 0.00 % R212 = 0.00 % R146 = 0.00 %

cumulative distribution

x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%
1.8	9.28	7.4	34.24	30.0	88.01	122.0	100.00
2.2	11.71	8.6	38.76	36.0	93.48	146.0	100.00
2.6	13.94	10.0	43.87	42.0	96.67	174.0	100.00
3.0	16.00	12.0	50.73	50.0	98.73	206.0	100.00
3.6	18.85	15.0	59.86	60.0	99.65	246.0	100.00
4.4	22.36	18.0	67.58	72.0	100.00	294.0	100.00
5.2	25.65	21.0	74.11	86.0	100.00	350.0	100.00
6.2	29.61	25.0	81.25	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.57

Rosin - Rammler fit: X (μm): 15.90, N:1.10



รูปที่ ข. ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบผสม (Mixed RHA)

Ground RHA $c_{opt}=13.05\%$

$x_{10} = 1.47 \mu\text{m}$ $x_{50} = 9.01 \mu\text{m}$ $x_{90} = 27.71 \mu\text{m}$ $x_{80} = 20.31 \mu\text{m}$

Sieve $3 \mu\text{m} = 22.57\%$ $R_{30} = 7.61 \%$ $VMD = 12.10 \mu\text{m}$

Sieve $3-30\mu\text{m} = 69.82\%$ $R_{60} = 0.11 \%$ $Blaine = 5126.57 \text{ cm}^2/\text{g}$

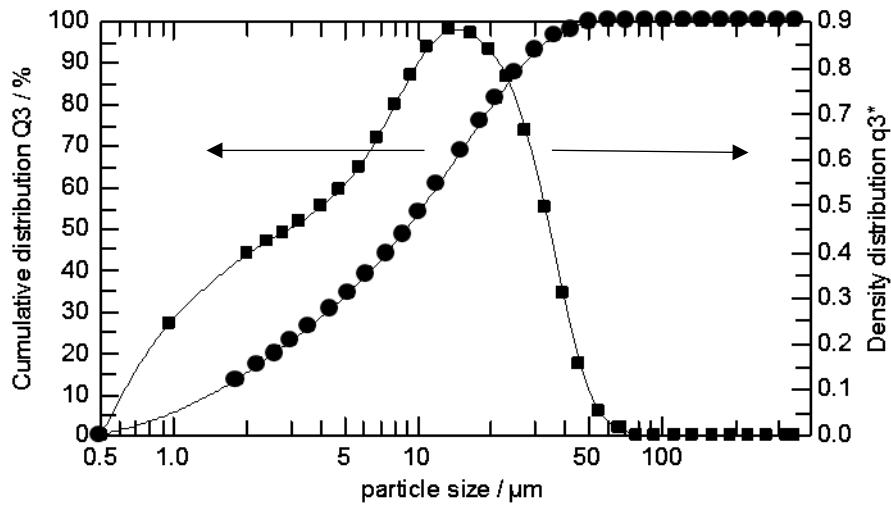
$R_{32} = 6.32 \%$ $R_{45} = 1.24 \%$ $R_{90} = 0.00 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	13.38	7.4	43.82	30.0	92.39	122.0	100.00
2.2	16.80	8.6	48.50	36.0	96.28	146.0	100.00
2.6	19.84	10.0	53.63	42.0	98.33	174.0	100.00
3.0	22.57	12.0	60.29	50.0	99.49	206.0	100.00
3.6	26.24	15.0	68.80	60.0	99.89	246.0	100.00
4.4	30.55	18.0	75.70	72.0	100.00	294.0	100.00
5.2	34.42	21.0	81.30	86.0	100.00	350.0	100.00
6.2	38.86	25.0	87.17	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.91

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 12.58, N:0.99$



รูปที่ ข. 4 ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบบดละเอียด (Ground RHA)

Sample P5 copt=17.15%

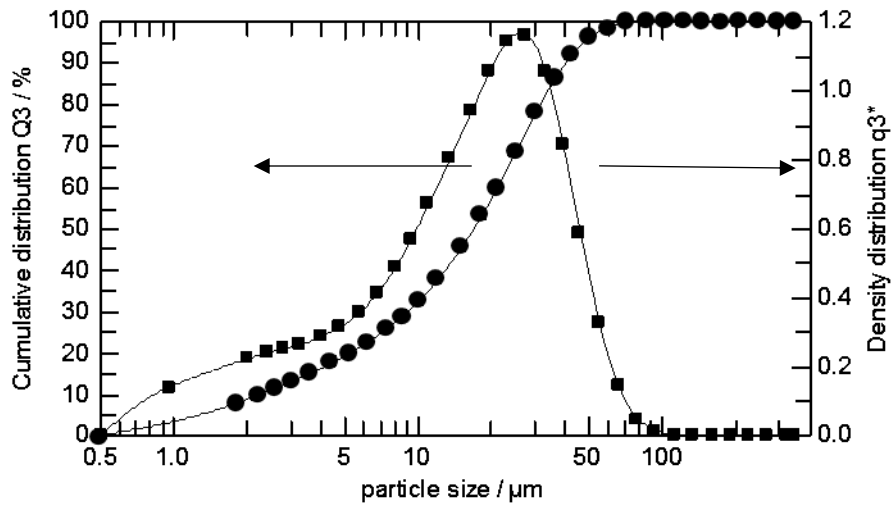
x10 = 2.31 μm x50 = 16.91 μm x90 = 40.41 μm x80 = 31.79 μm
 Sive 3 μm = 12.77% R30 = 22.49 % VMD = 19.64 μm
 Sive3-30μm = 64.74% R60 = 1.53 % Blaine= 3317.67 cm²/g
 R32 = 19.70 % R45 = 6.85 % R90 = 0.06 % R212 = 0.00 % R146 = 0.00 %

cumulative distribution

x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%	x0/μm	Q3/%
1.8	7.62	7.4	25.40	30.0	77.51	122.0	100.00
2.2	9.52	8.6	28.55	36.0	85.87	146.0	100.00
2.6	11.23	10.0	32.25	42.0	91.49	174.0	100.00
3.0	12.77	12.0	37.52	50.0	95.91	206.0	100.00
3.6	14.85	15.0	45.27	60.0	98.47	246.0	100.00
4.4	17.31	18.0	52.69	72.0	99.57	294.0	100.00
5.2	19.57	21.0	59.73	86.0	99.92	350.0	100.00
6.2	22.25	25.0	68.36	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.25

Rosin - Rammler fit: X (μm): 21.81, N:1.11



รูปที่ ข. 5 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง P5

Sample P10 $c_{opt}=17.95\%$

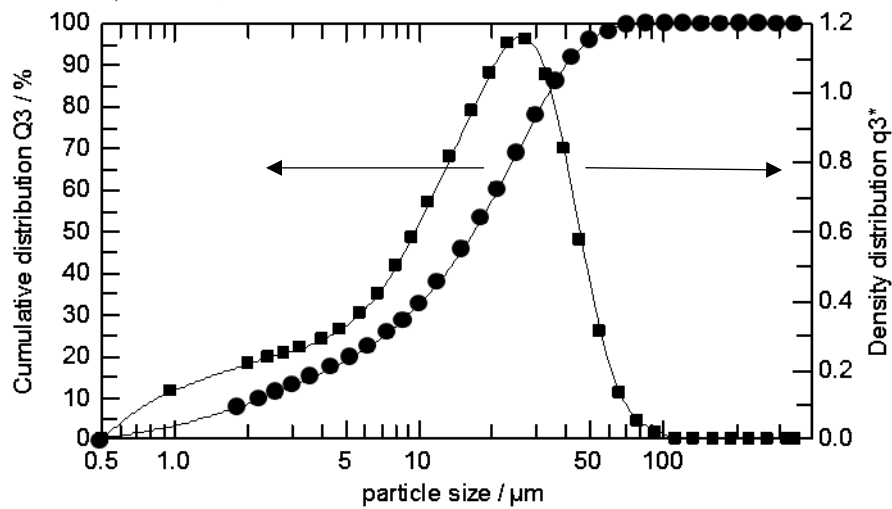
x10 = 2.37 μm x50 = 16.80 μm x90 = 40.17 μm x80 = 31.58 μm
 Sive 3 μm = 12.48% R30 = 22.19 % VMD = 19.58 μm
 Sive3-30 μm = 65.32% R60 = 1.54 % Blaine= 3282.89 cm^2/g
 R32 = 19.42 % R45 = 6.68 % R90 = 0.09 % R212 = 0.00 % R146 = 0.00 %

cumulative distribution

x0/ μm	Q3/%	x0/ μm	Q3/%	x0/ μm	Q3/%	x0/ μm	Q3/%
1.8	7.42	7.4	25.21	30.0	77.81	122.0	100.00
2.2	9.28	8.6	28.44	36.0	86.12	146.0	100.00
2.6	10.96	10.0	32.23	42.0	91.70	174.0	100.00
3.0	12.48	12.0	37.62	50.0	96.02	206.0	100.00
3.6	14.54	15.0	45.50	60.0	98.46	246.0	100.00
4.4	17.00	18.0	53.00	72.0	99.50	294.0	100.00
5.2	19.28	21.0	60.07	86.0	99.87	350.0	100.00
6.2	22.00	25.0	68.69	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.25

Rosin - Rammler fit: X (μm): 21.69, N:1.13



รูปที่ ข. 6 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P10

Sample P15 $c_{opt}=18.62\%$

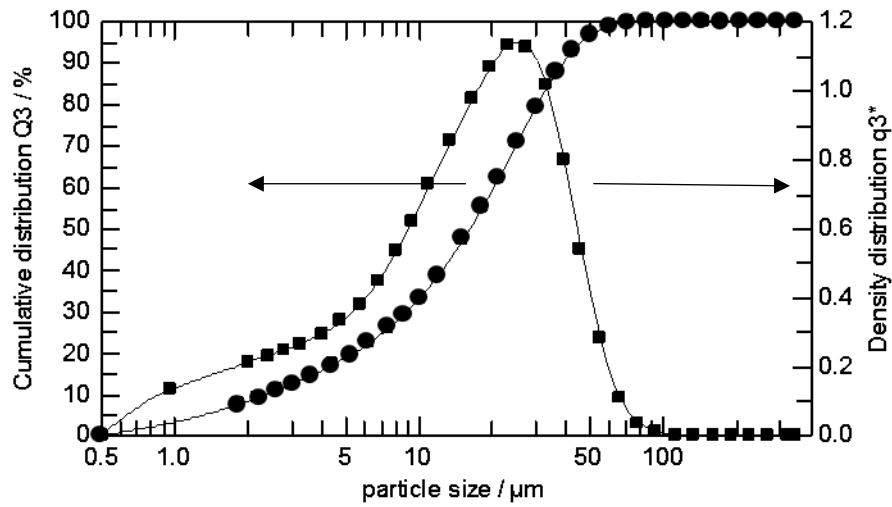
$x_{10} = 2.44 \mu\text{m}$ $x_{50} = 16.17 \mu\text{m}$ $x_{90} = 39.12 \mu\text{m}$ $x_{80} = 30.57 \mu\text{m}$
 Sive $3 \mu\text{m} = 12.20\%$ $R_{30} = 20.77 \%$ $VMD = 18.97 \mu\text{m}$
 Sive $3-30\mu\text{m} = 67.04\%$ $R_{60} = 1.17 \%$ $Blaine = 3275.77 \text{ cm}^2/\text{g}$
 $R_{32} = 18.10 \%$ $R_{45} = 5.92 \%$ $R_{90} = 0.04 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	7.19	7.4	25.50	30.0	79.23	122.0	100.00
2.2	9.02	8.6	28.96	36.0	87.24	146.0	100.00
2.6	10.68	10.0	33.01	42.0	92.55	174.0	100.00
3.0	12.20	12.0	38.74	50.0	96.61	206.0	100.00
3.6	14.28	15.0	46.99	60.0	98.83	246.0	100.00
4.4	16.81	18.0	54.69	72.0	99.69	294.0	100.00
5.2	19.19	21.0	61.81	86.0	99.94	350.0	100.00
6.2	22.07	25.0	70.34	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.27

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 20.99, N:1.15$



รูปที่ ข. 7 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P15

Sample P20 $c_{opt}=16.10\%$

$x_{10} = 2.47 \mu\text{m}$ $x_{50} = 16.71 \mu\text{m}$ $x_{90} = 39.82 \mu\text{m}$ $x_{80} = 31.28 \mu\text{m}$

Sieve 3 $\mu\text{m} = 12.00\%$ $R_{30} = 21.76 \%$ $VMD = 19.45 \mu\text{m}$

Sieve 3-30 $\mu\text{m} = 66.23\%$ $R_{60} = 1.40 \%$ $Blaine = 3221.70 \text{ cm}^2/\text{g}$

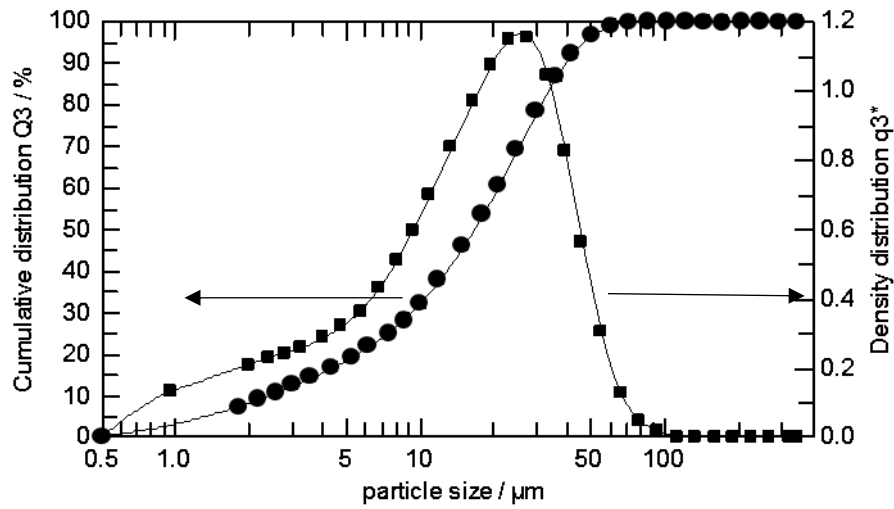
$R_{32} = 19.01 \%$ $R_{45} = 6.42 \%$ $R_{90} = 0.07 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	7.09	7.4	24.82	30.0	78.24	122.0	100.00
2.2	8.89	8.6	28.13	36.0	86.49	146.0	100.00
2.6	10.52	10.0	32.02	42.0	91.99	174.0	100.00
3.0	12.00	12.0	37.57	50.0	96.23	206.0	100.00
3.6	14.03	15.0	45.65	60.0	98.60	246.0	100.00
4.4	16.49	18.0	53.30	72.0	99.58	294.0	100.00
5.2	18.78	21.0	60.46	86.0	99.91	350.0	100.00
6.2	21.54	25.0	69.13	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.24

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 21.56, N:1.15$



รูปที่ ข. 8 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P20

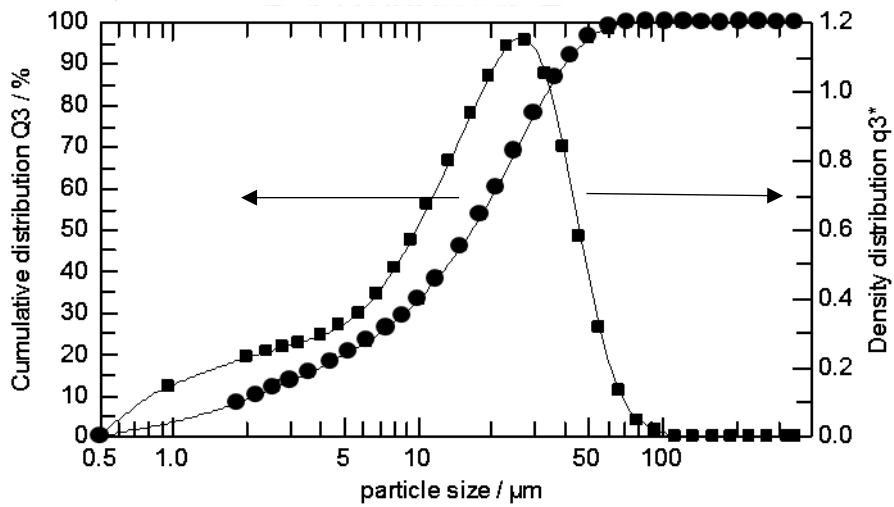
Sample M5 $c_{opt}=17.91\%$
 $x_{10} = 2.24 \mu\text{m}$ $x_{50} = 16.68 \mu\text{m}$ $x_{90} = 40.16 \mu\text{m}$ $x_{80} = 31.56 \mu\text{m}$
 Sive $3 \mu\text{m} = 13.16\%$ $R_{30} = 22.15 \%$ $VMD = 19.44 \mu\text{m}$
 $Sive_{3-30\mu\text{m}} = 64.69\%$ $R_{60} = 1.46 \%$ $Blaine = 3382.31 \text{ cm}^2/\text{g}$
 $R_{32} = 19.39 \%$ $R_{45} = 6.65 \%$ $R_{90} = 0.09 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	7.86	7.4	25.98	30.0	77.85	122.0	100.00
2.2	9.82	8.6	29.14	36.0	86.13	146.0	100.00
2.6	11.58	10.0	32.85	42.0	91.72	174.0	100.00
3.0	13.16	12.0	38.13	50.0	96.07	206.0	100.00
3.6	15.28	15.0	45.86	60.0	98.54	246.0	100.00
4.4	17.80	18.0	53.25	72.0	99.55	294.0	100.00
5.2	20.10	21.0	60.24	86.0	99.89	350.0	100.00
6.2	22.81	25.0	68.78	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.27

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 21.56, N:1.10$



รูปที่ ข. 9 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง M5

Sample M10 $c_{opt}=19.98\%$

$x_{10} = 2.19 \mu\text{m}$ $x_{50} = 16.18 \mu\text{m}$ $x_{90} = 39.63 \mu\text{m}$ $x_{80} = 30.97 \mu\text{m}$

Sieve 3 $\mu\text{m} = 13.46\%$ $R_{30} = 21.29 \%$ $VMD = 19.05 \mu\text{m}$

Sieve 3-30 $\mu\text{m} = 65.25\%$ $R_{60} = 1.38 \%$ $Blaine = 3448.56 \text{ cm}^2/\text{g}$

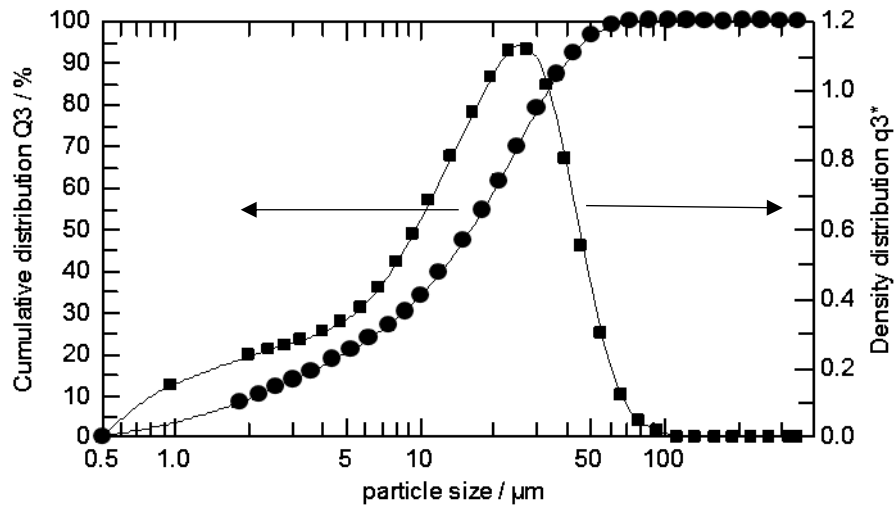
$R_{32} = 18.62 \%$ $R_{45} = 6.32 \%$ $R_{90} = 0.08 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	8.02	7.4	26.76	30.0	78.71	122.0	100.00
2.2	10.03	8.6	30.04	36.0	86.74	146.0	100.00
2.6	11.83	10.0	33.85	42.0	92.12	174.0	100.00
3.0	13.46	12.0	39.25	50.0	96.29	206.0	100.00
3.6	15.65	15.0	47.08	60.0	98.62	246.0	100.00
4.4	18.26	18.0	54.48	72.0	99.57	294.0	100.00
5.2	20.65	21.0	61.43	86.0	99.89	350.0	100.00
6.2	23.47	25.0	69.84	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.31

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 21.03, N:1.09$



รูปที่ ข. 10 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง M10

Sample M15 $c_{opt}=15.62\%$

$x_{10} = 2.17 \mu\text{m}$ $x_{50} = 15.74 \mu\text{m}$ $x_{90} = 39.09 \mu\text{m}$ $x_{80} = 30.39 \mu\text{m}$

Sieve $3 \mu\text{m} = 13.67\%$ $R_{30} = 20.50 \%$ $VMD = 18.66 \mu\text{m}$

Sieve $3-30\mu\text{m} = 65.83\%$ $R_{60} = 1.23 \%$ $Blaine= 3499.16 \text{ cm}^2/\text{g}$

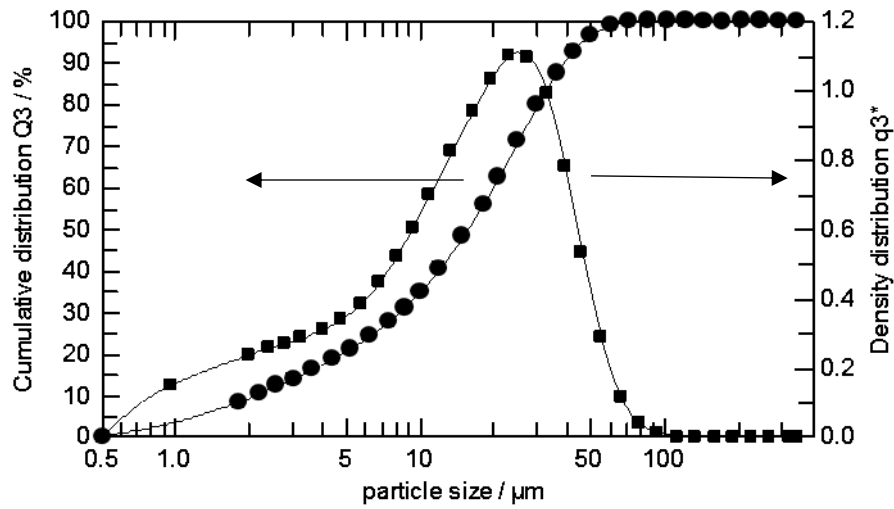
$R_{32} = 17.89 \%$ $R_{45} = 5.97 \%$ $R_{90} = 0.05 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	8.13	7.4	27.35	30.0	79.50	122.0	100.00
2.2	10.18	8.6	30.73	36.0	87.32	146.0	100.00
2.6	12.01	10.0	34.67	42.0	92.53	174.0	100.00
3.0	13.67	12.0	40.21	50.0	96.53	206.0	100.00
3.6	15.91	15.0	48.17	60.0	98.77	246.0	100.00
4.4	18.58	18.0	55.61	72.0	99.67	294.0	100.00
5.2	21.04	21.0	62.52	86.0	99.94	350.0	100.00
6.2	23.95	25.0	70.82	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.35

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 20.56, N:1.09$



รูปที่ ข. 11 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง M15

Sample M20 $c_{opt}=18.91\%$

$x_{10} = 2.17 \mu\text{m}$ $x_{50} = 15.45 \mu\text{m}$ $x_{90} = 38.42 \mu\text{m}$ $x_{80} = 29.83 \mu\text{m}$

Sieve 3 $\mu\text{m} = 13.66\%$ $R_{30} = 19.70 \%$ $VMD = 18.35 \mu\text{m}$

Sieve 3-30 $\mu\text{m} = 66.63\%$ $R_{60} = 1.11 \%$ $Blaine = 3513.76 \text{ cm}^2/\text{g}$

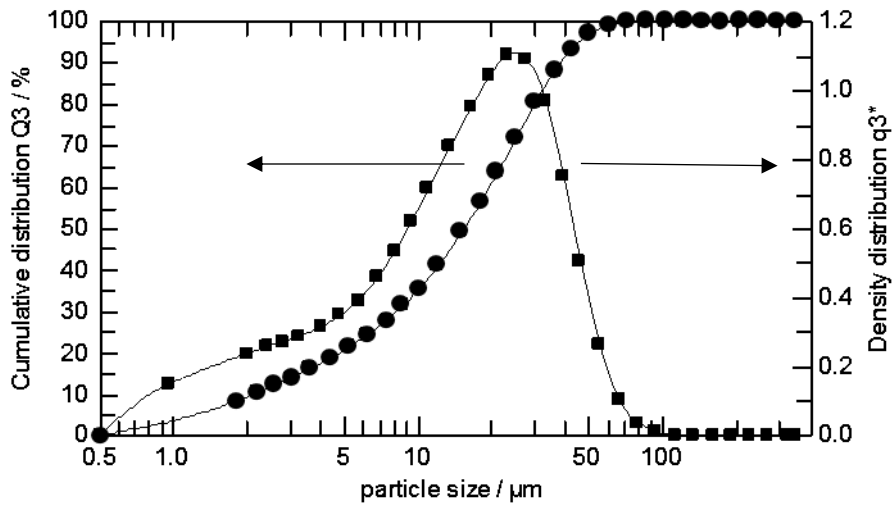
$R_{32} = 17.15 \%$ $R_{45} = 5.57 \%$ $R_{90} = 0.04 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	8.10	7.4	27.64	30.0	80.30	122.0	100.00
2.2	10.14	8.6	31.10	36.0	87.97	146.0	100.00
2.6	11.99	10.0	35.13	42.0	93.00	174.0	100.00
3.0	13.66	12.0	40.79	50.0	96.81	206.0	100.00
3.6	15.93	15.0	48.88	60.0	98.89	246.0	100.00
4.4	18.66	18.0	56.41	72.0	99.71	294.0	100.00
5.2	21.17	21.0	63.37	86.0	99.95	350.0	100.00
6.2	24.15	25.0	71.68	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.35

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 20.20, N:1.10$



รูปที่ ข. 12 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง M20

Sample G5 $c_{opt}=18.68\%$

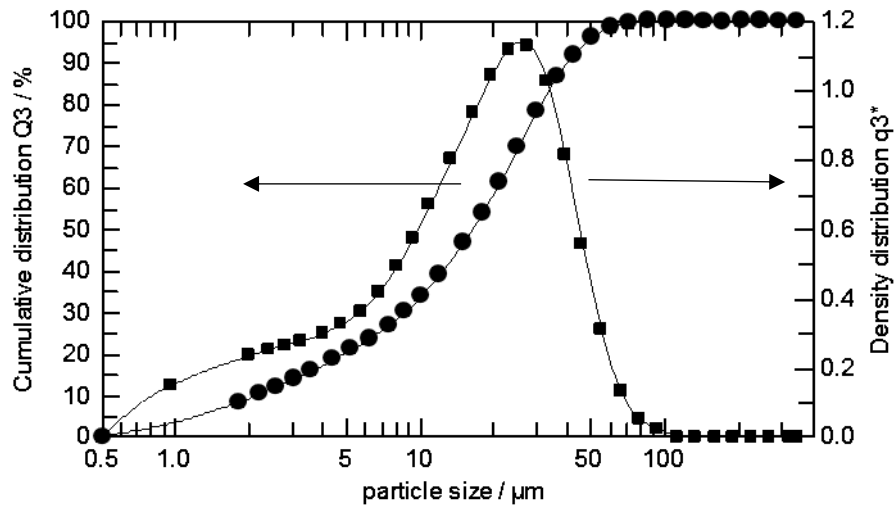
$x_{10} = 2.17 \mu\text{m}$ $x_{50} = 16.40 \mu\text{m}$ $x_{90} = 39.96 \mu\text{m}$ $x_{80} = 31.25 \mu\text{m}$
 $\text{Sive } 3 \mu\text{m} = 13.57\%$ $R_{30} = 21.69 \%$ $\text{VMD} = 19.25 \mu\text{m}$
 $\text{Sive } 3\text{-}30\mu\text{m} = 64.74\%$ $R_{60} = 1.53 \%$ $\text{Blaine} = 3452.22 \text{ cm}^2/\text{g}$
 $R_{32} = 18.99 \%$ $R_{45} = 6.58 \%$ $R_{90} = 0.11 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	8.11	7.4	26.61	30.0	78.31	122.0	100.00
2.2	10.14	8.6	29.80	36.0	86.42	146.0	100.00
2.6	11.95	10.0	33.52	42.0	91.84	174.0	100.00
3.0	13.57	12.0	38.82	50.0	96.05	206.0	100.00
3.6	15.75	15.0	46.57	60.0	98.47	246.0	100.00
4.4	18.32	18.0	53.95	72.0	99.49	294.0	100.00
5.2	20.66	21.0	60.91	86.0	99.86	350.0	100.00
6.2	23.41	25.0	69.38	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.30

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 21.25, N:1.09$



รูปที่ ข. 13 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G5

Sample G10 $c_{opt}=18.35\%$

$x_{10} = 2.07 \mu\text{m}$ $x_{50} = 15.78 \mu\text{m}$ $x_{90} = 39.84 \mu\text{m}$ $x_{80} = 30.82 \mu\text{m}$

Sieve $3 \mu\text{m} = 14.34\%$ $R_{30} = 21.06 \%$ $VMD = 19.06 \mu\text{m}$

Sieve $3-30\mu\text{m} = 64.60\%$ $R_{60} = 1.88 \%$ $Blaine = 3586.22 \text{ cm}^2/\text{g}$

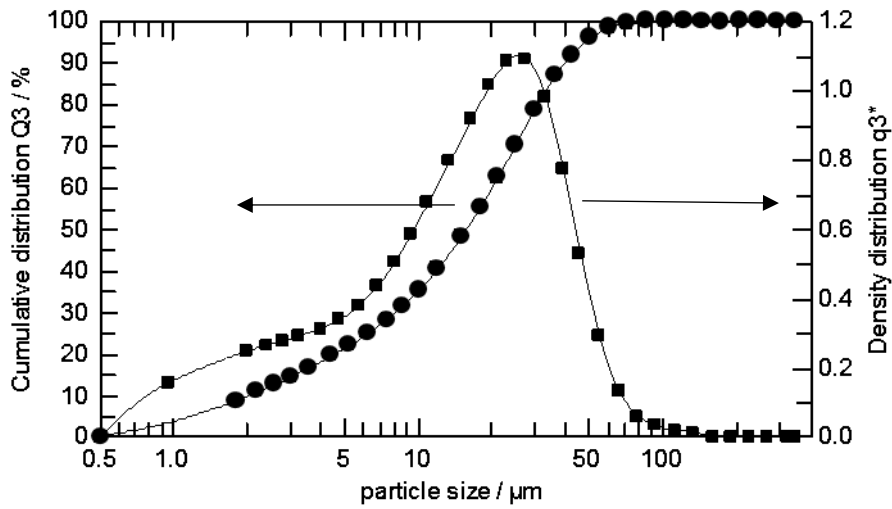
$R_{32} = 18.47 \%$ $R_{45} = 6.65 \%$ $R_{90} = 0.36 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	8.58	7.4	27.96	30.0	78.94	122.0	99.93
2.2	10.72	8.6	31.25	36.0	86.70	146.0	100.00
2.6	12.63	10.0	35.05	42.0	91.86	174.0	100.00
3.0	14.34	12.0	40.40	50.0	95.83	206.0	100.00
3.6	16.63	15.0	48.11	60.0	98.12	246.0	100.00
4.4	19.33	18.0	55.35	72.0	99.15	294.0	100.00
5.2	21.78	21.0	62.13	86.0	99.59	350.0	100.00
6.2	24.65	25.0	70.33	102.0	99.80		

Span of Distribution: 2.39

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 20.65, N:1.06$



รูปที่ ข. 14 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง G10

Sample G15 $c_{opt}=16.29\%$

$x_{10} = 2.04 \mu\text{m}$ $x_{50} = 15.30 \mu\text{m}$ $x_{90} = 38.67 \mu\text{m}$ $x_{80} = 29.91 \mu\text{m}$

Sieve $3 \mu\text{m} = 14.61\%$ $R_{30} = 19.85 \%$ $VMD = 18.32 \mu\text{m}$

Sieve $3-30\mu\text{m} = 65.54\%$ $R_{60} = 1.27 \%$ $Blaine = 3648.85 \text{ cm}^2/\text{g}$

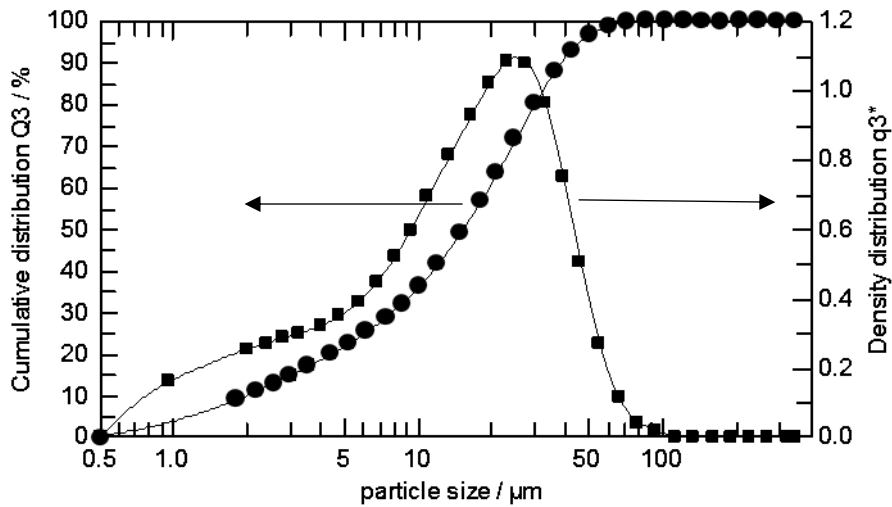
$R_{32} = 17.31 \%$ $R_{45} = 5.78 \%$ $R_{90} = 0.08 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	8.72	7.4	28.66	30.0	80.15	122.0	100.00
2.2	10.90	8.6	32.04	36.0	87.77	146.0	100.00
2.6	12.85	10.0	35.94	42.0	92.79	174.0	100.00
3.0	14.61	12.0	41.42	50.0	96.61	206.0	100.00
3.6	16.97	15.0	49.28	60.0	98.73	246.0	100.00
4.4	19.75	18.0	56.61	72.0	99.59	294.0	100.00
5.2	22.28	21.0	63.43	86.0	99.89	350.0	100.00
6.2	25.24	25.0	71.62	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.39

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 20.07, N:1.06$



รูปที่ ข. 15 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง G15

Sample G20 $c_{opt}=18.26\%$

$x_{10} = 1.98 \mu\text{m}$ $x_{50} = 14.80 \mu\text{m}$ $x_{90} = 38.15 \mu\text{m}$ $x_{80} = 29.47 \mu\text{m}$

Sieve $3 \mu\text{m} = 15.13\%$ $R_{30} = 19.13 \%$ $VMD = 17.93 \mu\text{m}$

Sieve $3-30\mu\text{m} = 65.75\%$ $R_{60} = 1.21 \%$ $Blaine = 3745.04 \text{ cm}^2/\text{g}$

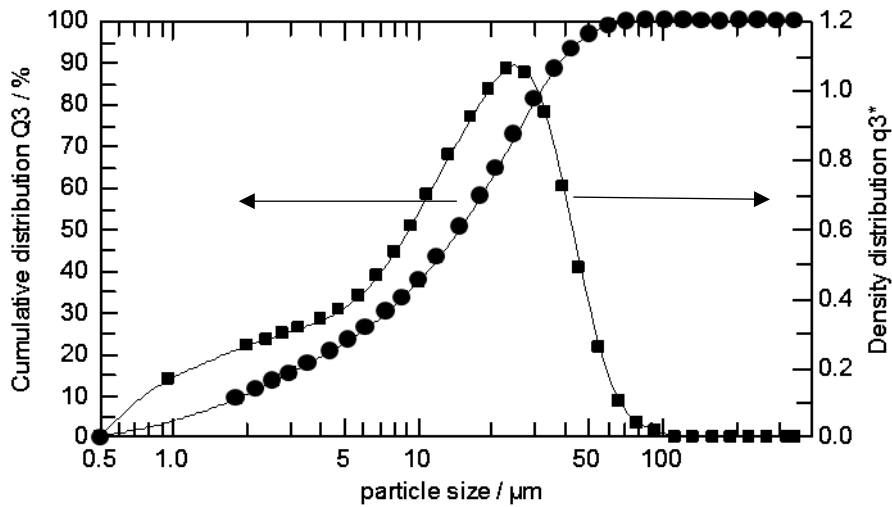
$R_{32} = 16.66 \%$ $R_{45} = 5.52 \%$ $R_{90} = 0.08 \%$ $R_{212} = 0.00 \%$ $R_{146} = 0.00 \%$

cumulative distribution

$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%	$x_0/\mu\text{m}$	Q3/%
1.8	9.00	7.4	29.72	30.0	80.87	122.0	100.00
2.2	11.27	8.6	33.18	36.0	88.27	146.0	100.00
2.6	13.30	10.0	37.15	42.0	93.11	174.0	100.00
3.0	15.13	12.0	42.68	50.0	96.77	206.0	100.00
3.6	17.58	15.0	50.53	60.0	98.79	246.0	100.00
4.4	20.49	18.0	57.81	72.0	99.61	294.0	100.00
5.2	23.12	21.0	64.53	86.0	99.89	350.0	100.00
6.2	26.19	25.0	72.56	102.0	100.00		

Span of Distribution: 2.44

Rosin - Rammler fit: $X (\mu\text{m}) : 19.55, N:1.05$



รูปที่ ข. 16 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง G20

ภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลด้วยเครื่อง

Thermogravimetric analysis

Weight (time) คือ เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง Thermogravimetric analysis มีหน่วยเป็นวินาที

Weight (data) คือ น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ณ ช่วงเวลาและอุณหภูมิต่าง ๆ มีหน่วยเป็นกรัม

% Weight Loss (data) คือ ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป ณ ช่วงเวลาและอุณหภูมิต่าง ๆ เทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น หน่วยเป็นร้อยละ

Furnace Temperature คือ อุณหภูมิเตาเผาตัวอย่างวิเคราะห์ ณ เวลาต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

%Weight Loss on ignition คือ ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป ณ ช่วงเวลาและอุณหภูมิต่าง ๆ เทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น โดยคิดที่ปริมาณเนื้อปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน หน่วยเป็นร้อยละ

การคำนวณ %Weight Loss on ignition = $100 - \%Weight Loss (data) / Weight (data)$
สุดท้ายที่เหลือจากการเผา และการวิเคราะห์ตัวอย่างทุกตัวอย่างมีปริมาณเนื้อปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน

ตารางผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่าง ดังนี้

ตารางที่ ค. 1 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ตัวอย่าง B ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
512	1.3328	0.00	29.92	100.00
913	1.3282	0.35	29.80	99.64
1131	1.3265	0.47	35.36	99.50
1349	1.3086	1.82	64.12	98.09
1581	1.2049	9.60	122.88	89.89
1804	1.1111	16.63	205.20	82.48
2016	1.0719	19.58	293.84	79.38
2212	1.0509	21.15	379.22	77.72
2412	1.0329	22.50	460.85	76.30
2615	0.9898	25.73	536.43	72.90
2810	0.9735	26.96	608.34	71.61
3003	0.9686	27.32	665.17	71.23
3197	0.9588	28.06	730.97	70.45
3389	0.9536	28.45	808.38	70.04
3575	0.9512	28.63	875.89	69.85
3767	0.9503	28.70	940.02	69.78
3959	0.9500	28.72	955.94	69.75
4155	0.9498	28.74	958.05	69.74
4352	0.9497	28.74	960.26	69.73
4548	0.9497	28.75	961.47	69.73
4740	0.9496	28.75	962.67	69.72
4937	0.9496	28.75	963.68	69.72

ตารางที่ ค. 2 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P5 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
881	1.4030	0.00	29.80	100.00
1097	1.4010	0.14	33.14	99.84
1317	1.3799	1.65	58.09	98.18
1549	1.2331	12.11	112.55	86.64
1774	1.0641	24.16	192.12	73.35
1989	1.0063	28.27	281.39	68.81
2183	0.9909	29.37	366.34	67.60
2383	0.9810	30.08	448.22	66.81
2586	0.9547	31.96	526.50	64.74
2781	0.9483	32.41	598.15	64.24
2975	0.9436	32.74	656.15	63.88
3169	0.9280	33.86	718.43	62.65
3360	0.9131	34.92	797.49	61.48
3548	0.9102	35.12	865.63	61.25
3739	0.9087	35.23	932.92	61.13
3932	0.9079	35.29	955.45	61.07
4126	0.9075	35.32	958.07	61.03
4323	0.9072	35.34	960.14	61.02
4520	0.9069	35.36	961.18	60.99
4712	0.9068	35.37	962.01	60.98
4906	0.9065	35.39	963.38	60.96
5102	0.9064	35.39	963.72	60.95

ตารางที่ ค. 3 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P10 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
584	1.4814	0.00	29.90	100.00
942	1.4757	0.38	29.80	99.62
1162	1.4719	0.64	37.91	99.36
1384	1.4294	3.51	71.99	96.49
1614	1.2623	14.79	133.72	85.20
1837	1.1480	22.51	219.92	77.48
2043	1.1172	24.58	306.16	75.41
2242	1.1004	25.72	391.71	74.27
2440	1.0831	26.89	470.16	73.10
2642	1.0429	29.60	546.61	70.38
2838	1.0367	30.02	615.83	69.97
3030	1.0298	30.49	674.31	69.50
3226	1.0099	31.83	740.54	68.16
3415	1.0050	32.16	817.16	67.82
3604	1.0023	32.34	885.85	67.64
3796	1.0009	32.44	946.44	67.55
3989	1.0003	32.48	956.38	67.51
4183	0.9999	32.50	957.64	67.48
4382	0.9998	32.51	960.01	67.47
4576	0.9998	32.51	961.90	67.48
4769	0.9995	32.53	962.28	67.45
4966	0.9995	32.53	963.66	67.46

ตารางที่ ค. 4 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P15 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
611	1.5686	0.00	29.89	100.00
955	1.5623	0.40	29.82	99.61
1177	1.5584	0.65	39.10	99.37
1399	1.5102	3.73	74.88	96.42
1629	1.3286	15.30	138.37	85.28
1852	1.1937	23.90	224.98	77.01
2056	1.1576	26.20	309.91	74.80
2255	1.1413	27.24	396.97	73.80
2453	1.1239	28.35	475.94	72.73
2655	1.0893	30.56	552.20	70.61
2850	1.0832	30.95	620.99	70.23
3042	1.0758	31.41	676.68	69.78
3239	1.0526	32.90	745.19	68.35
3427	1.0450	33.38	824.06	67.89
3616	1.0422	33.56	891.03	67.72
3808	1.0410	33.64	948.67	67.65
4000	1.0404	33.67	955.22	67.61
4196	1.0401	33.70	958.21	67.59
4394	1.0399	33.70	960.17	67.58
4587	1.0398	33.71	961.28	67.57
4781	1.0396	33.73	962.74	67.56
4978	1.0396	33.73	963.57	67.56

ตารางที่ ค. 5 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P20 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
750	1.6667	0.00	29.85	100.00
1034	1.6610	0.34	30.62	99.69
1256	1.6457	1.26	48.62	98.85
1482	1.5124	9.26	93.91	91.53
1708	1.3018	21.89	166.11	79.97
1926	1.2218	26.69	255.75	75.58
2127	1.2023	27.86	340.02	74.51
2327	1.1918	28.49	425.87	73.94
2527	1.1604	30.38	503.11	72.21
2724	1.1462	31.23	578.25	71.43
2919	1.1412	31.53	640.30	71.16
3112	1.1268	32.39	698.12	70.37
3307	1.1027	33.84	773.03	69.04
3495	1.0986	34.08	849.81	68.82
3684	1.0962	34.23	914.84	68.69
3876	1.0950	34.30	953.61	68.62
4069	1.0944	34.34	957.35	68.59
4267	1.0941	34.35	959.08	68.57
4463	1.0938	34.37	961.01	68.56
4656	1.0938	34.37	962.34	68.56
4849	1.0933	34.40	963.63	68.53
5046	1.0932	34.41	963.58	68.52

ตารางที่ ค. 6 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M5 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
851	1.4023	0.00	29.83	100.00
1078	1.4009	0.10	32.16	99.90
1300	1.3879	1.03	55.39	98.94
1532	1.2787	8.81	107.65	90.94
1756	1.1340	19.13	185.66	80.34
1972	1.0809	22.92	275.24	76.45
2167	1.0632	24.18	358.03	75.15
2366	1.0526	24.93	441.74	74.38
2572	1.0220	27.12	519.76	72.14
2765	1.0090	28.05	592.68	71.18
2959	1.0043	28.38	651.46	70.84
3152	0.9910	29.33	714.82	69.87
3345	0.9725	30.65	787.84	68.51
3533	0.9691	30.89	861.06	68.26
3724	0.9672	31.03	928.34	68.12
3917	0.9662	31.10	955.03	68.05
4110	0.9658	31.13	957.67	68.02
4306	0.9655	31.15	959.63	68.00
4504	0.9652	31.17	960.96	67.98
4695	0.9651	31.18	962.27	67.97
4890	0.9649	31.20	963.44	67.95
5086	0.9647	31.20	963.95	67.94

ตารางที่ ค. 7 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M10 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
724	1.4815	0.00	29.87	100.00
1019	1.4781	0.23	30.32	99.78
1241	1.4715	0.67	46.79	99.34
1467	1.3856	6.47	90.49	93.65
1693	1.2194	17.69	160.73	82.64
1914	1.1486	22.47	251.14	77.95
2114	1.1275	23.89	334.16	76.56
2313	1.1154	24.71	419.65	75.75
2512	1.0869	26.63	497.64	73.87
2711	1.0656	28.07	573.04	72.46
2906	1.0609	28.39	637.12	72.15
3099	1.0499	29.13	696.06	71.42
3295	1.0282	30.60	769.67	69.98
3482	1.0243	30.86	843.75	69.72
3672	1.0219	31.03	909.03	69.56
3864	1.0207	31.11	953.52	69.48
4056	1.0200	31.15	955.95	69.44
4254	1.0199	31.16	959.22	69.43
4451	1.0196	31.18	960.65	69.41
4643	1.0195	31.19	961.44	69.40
4836	1.0195	31.19	963.21	69.40
5033	1.0192	31.21	963.26	69.38

ตารางที่ ค. 8 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M15 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
636	1.5692	0.00	29.90	100.00
970	1.5640	0.33	29.84	99.69
1190	1.5597	0.61	40.50	99.43
1414	1.5096	3.80	78.64	96.43
1644	1.3305	15.21	143.90	85.70
1867	1.2086	22.98	231.37	78.39
2069	1.1776	24.96	315.64	76.53
2268	1.1628	25.90	402.86	75.65
2467	1.1453	27.01	480.47	74.60
2668	1.1167	28.84	557.25	72.89
2862	1.1116	29.16	624.38	72.58
3055	1.1040	29.65	681.56	72.12
3251	1.0771	31.36	751.31	70.51
3439	1.0694	31.85	828.41	70.05
3629	1.0665	32.04	895.65	69.88
3821	1.0651	32.13	950.25	69.79
4012	1.0645	32.16	956.54	69.76
4210	1.0641	32.19	958.80	69.73
4407	1.0639	32.20	960.13	69.72
4601	1.0637	32.21	962.06	69.71
4792	1.0635	32.23	963.11	69.70
4991	1.0635	32.23	963.37	69.70

ตารางที่ ค. 9 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนัที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง M20 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
549	1.6672	0.00	29.91	100.00
926	1.6627	0.27	29.80	99.77
1145	1.6607	0.39	36.25	99.67
1365	1.6319	2.12	67.87	98.22
1596	1.4851	10.92	127.21	90.84
1820	1.3786	17.31	211.23	85.48
2029	1.3403	19.61	298.63	83.56
2226	1.3186	20.91	383.34	82.46
2423	1.2993	22.07	465.02	81.49
2627	1.2495	25.05	542.08	78.99
2822	1.2402	25.61	612.90	78.52
3015	1.2332	26.03	670.36	78.17
3209	1.2108	27.38	734.11	77.04
3400	1.1991	28.08	815.02	76.45
3588	1.1955	28.29	883.10	76.27
3779	1.1936	28.41	944.16	76.18
3971	1.1931	28.44	956.41	76.15
4167	1.1928	28.46	958.52	76.13
4365	1.1925	28.47	960.19	76.12
4560	1.1925	28.47	961.88	76.12
4752	1.1923	28.49	963.22	76.11
4951	1.1923	28.49	964.03	76.11

ตารางที่ ค. 10 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G5 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
824	1.3989	0.00	29.84	100.00
1063	1.3975	0.10	31.60	99.90
1286	1.3871	0.85	53.95	99.12
1516	1.2909	7.72	103.82	92.00
1741	1.1534	17.55	179.00	81.81
1959	1.0951	21.72	269.89	77.49
2153	1.0749	23.16	351.76	75.99
2354	1.0623	24.06	437.85	75.06
2557	1.0314	26.27	513.50	72.77
2753	1.0137	27.54	588.59	71.46
2947	1.0088	27.88	648.62	71.10
3140	0.9966	28.76	708.91	70.19
3335	0.9811	29.86	786.46	69.04
3521	0.9774	30.13	858.35	68.77
3712	0.9753	30.28	922.64	68.61
3904	0.9743	30.35	955.17	68.54
4099	0.9740	30.37	957.37	68.52
4295	0.9738	30.39	958.75	68.50
4492	0.9736	30.41	960.14	68.48
4684	0.9736	30.41	962.36	68.48
4877	0.9733	30.42	962.51	68.47
5074	0.9733	30.42	963.63	68.47

ตารางที่ ค. 11 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G10 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
785	1.4812	0.00	29.83	100.00
1051	1.4804	0.06	31.11	99.95
1271	1.4715	0.65	51.10	99.39
1501	1.3824	6.67	99.34	93.80
1726	1.2668	14.47	173.61	86.53
1944	1.2156	17.93	262.49	83.32
2141	1.1931	19.45	348.55	81.90
2342	1.1772	20.52	432.64	80.91
2542	1.1384	23.15	508.81	78.47
2740	1.1134	24.83	583.23	76.90
2934	1.1080	25.20	643.50	76.56
3127	1.0961	26.00	704.58	75.81
3321	1.0831	26.88	777.12	74.99
3509	1.0787	27.17	853.68	74.72
3699	1.0767	27.31	917.18	74.59
3891	1.0759	27.36	954.38	74.54
4084	1.0756	27.39	956.42	74.52
4282	1.0753	27.40	959.32	74.51
4478	1.0752	27.41	960.90	74.50
4671	1.0751	27.42	961.40	74.49
4864	1.0748	27.44	963.25	74.48
5062	1.0748	27.43	963.29	74.48

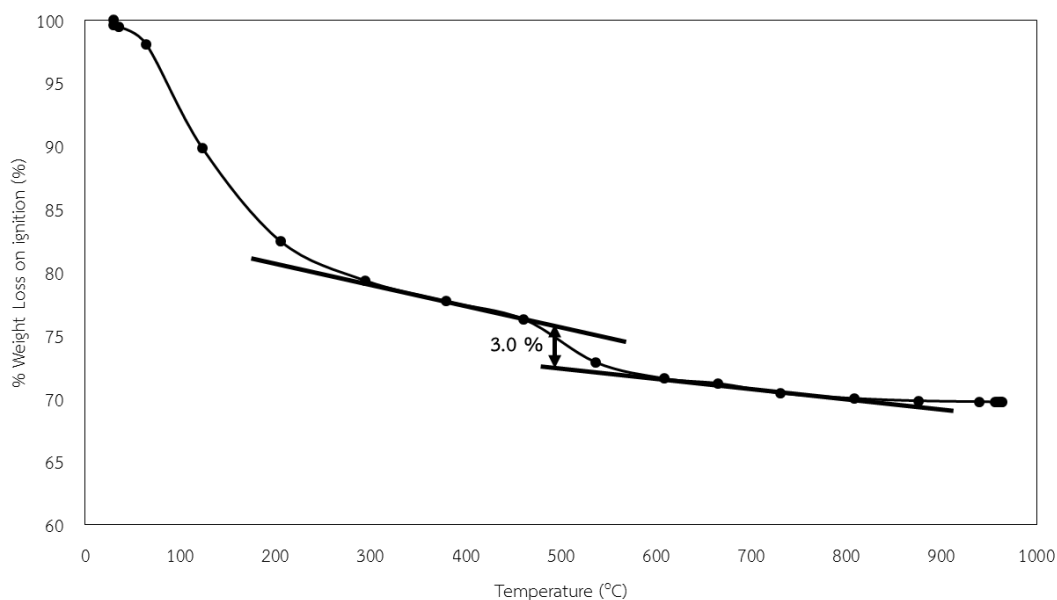
ตารางที่ ค. 12 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G15 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
696	1.5680	0.00	29.88	100.00
1006	1.5658	0.14	30.16	99.88
1226	1.5597	0.53	45.04	99.54
1452	1.4747	5.95	87.15	94.89
1678	1.3481	14.02	155.88	87.95
1901	1.2969	17.29	243.89	85.15
2102	1.2757	18.64	330.84	83.99
2301	1.2610	19.58	416.03	83.18
2498	1.2244	21.91	491.54	81.17
2683	1.2083	22.94	562.62	80.29
2878	1.2006	23.43	628.99	79.87
3070	1.1917	24.00	686.85	79.39
3265	1.1744	25.10	756.22	78.44
3454	1.1692	25.43	833.16	78.15
3645	1.1664	25.61	900.71	78.00
3836	1.1654	25.68	952.01	77.94
4027	1.1649	25.71	956.26	77.91
4225	1.1647	25.72	958.94	77.91
4422	1.1645	25.74	960.20	77.89
4616	1.1643	25.75	962.27	77.88
4807	1.1642	25.75	962.86	77.88
5007	1.1640	25.76	963.98	77.87

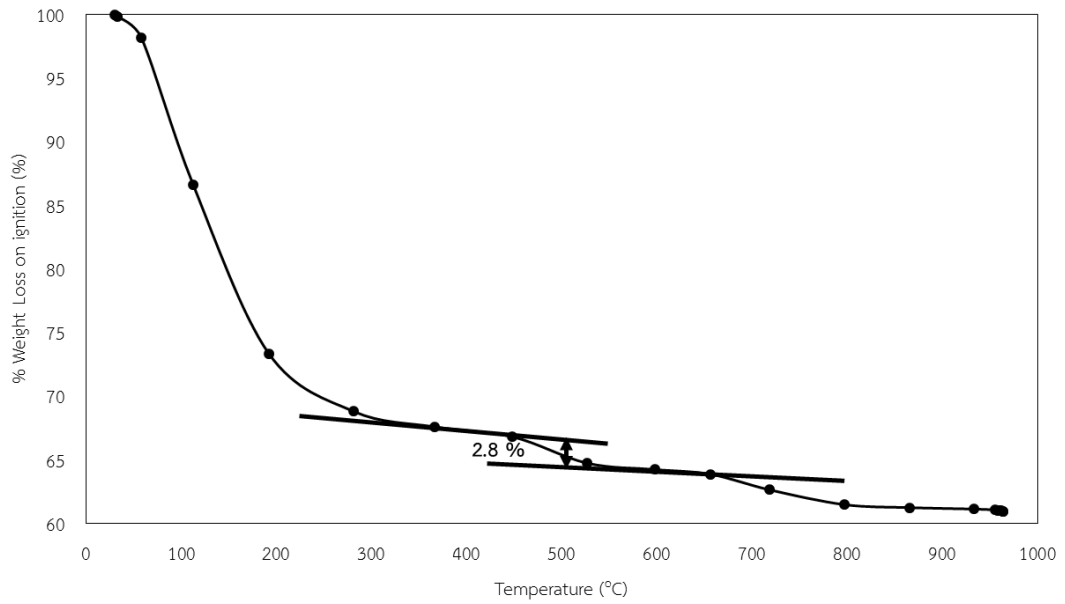
ตารางที่ ค. 13 ผลการวิเคราะห์ร้อยละโดยมวลของน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (% Weight Loss on ignition) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง G20 ที่อายุ 28 วัน

Weight (time)	Weight (data)	% Weight Loss (data)	Furnace Temperature (data)	% Weight Loss on ignition
666	1.6658	0.00	29.89	100.00
987	1.6633	0.15	29.92	99.88
1208	1.6605	0.32	42.95	99.74
1433	1.6092	3.40	82.49	97.23
1661	1.4862	10.78	149.60	91.21
1885	1.4088	15.43	238.10	87.43
2085	1.3793	17.20	323.58	85.98
2285	1.3583	18.46	409.74	84.95
2482	1.3277	20.30	486.85	83.46
2698	1.2761	23.40	567.64	80.93
2894	1.2706	23.73	631.81	80.66
3087	1.2575	24.51	691.17	80.02
3283	1.2383	25.66	764.01	79.09
3470	1.2333	25.96	840.34	78.84
3661	1.2303	26.14	906.00	78.69
3851	1.2288	26.24	952.38	78.62
4044	1.2283	26.27	956.27	78.59
4242	1.2279	26.29	959.11	78.58
4439	1.2275	26.31	960.54	78.56
4631	1.2275	26.31	961.75	78.56
4824	1.2274	26.32	962.83	78.55
5022	1.2270	26.34	963.34	78.53

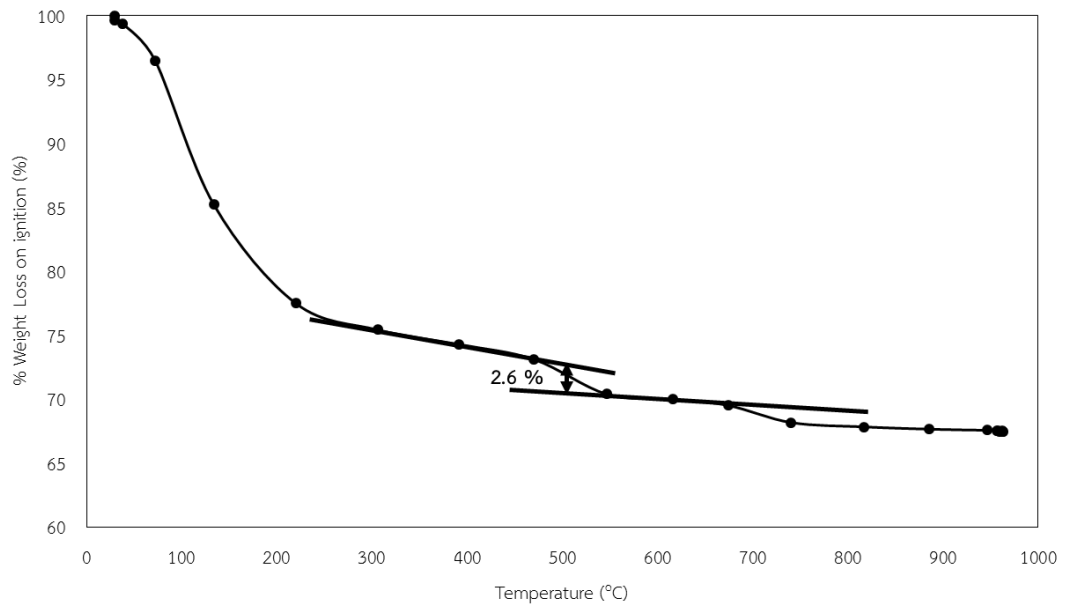
Bhatty, Dollimore, Gamlen, Mangabhai และ Olmez [29] ได้คำนวณหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยการนำข้อมูลมาพล็อตกราฟระหว่าง % Weight Loss on ignition และ อุณหภูมิ โดยกำหนดให้แกน y เป็น % Weight Loss on ignition (%) และแกน x เป็น Temperature ($^{\circ}\text{C}$) จะพบว่ากราฟมีลักษณะเป็นตัวเอส ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยา dehydration เกิดการสลายตัว เนื่องจากไม่ทราบอุณหภูมิที่แน่นอนของการสลายตัว ดังนั้นจึงทำการวาดเส้นขนานระหว่างอุณหภูมิ 300-450 องศาเซลเซียส และ 550-700 องศาเซลเซียส จากนั้น หาผลต่างของเส้นขนานทั้งสองที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (ช่วงกึ่งกลางของการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์) จะสามารถหาปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ที่เหลืออยู่ได้



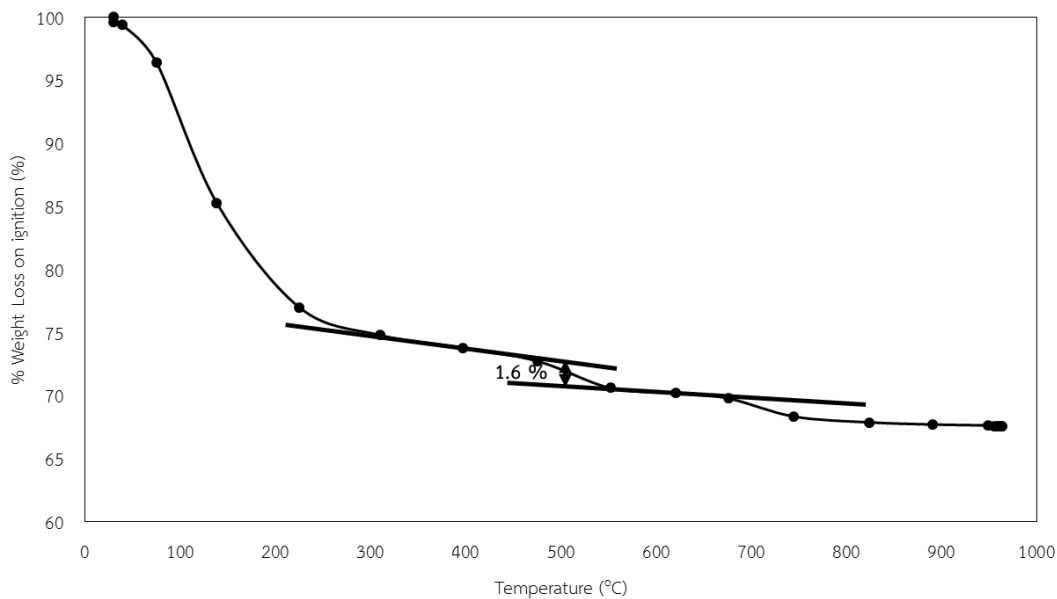
รูปที่ ค. 1 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ตัวอย่าง B ที่อายุ 28 วัน



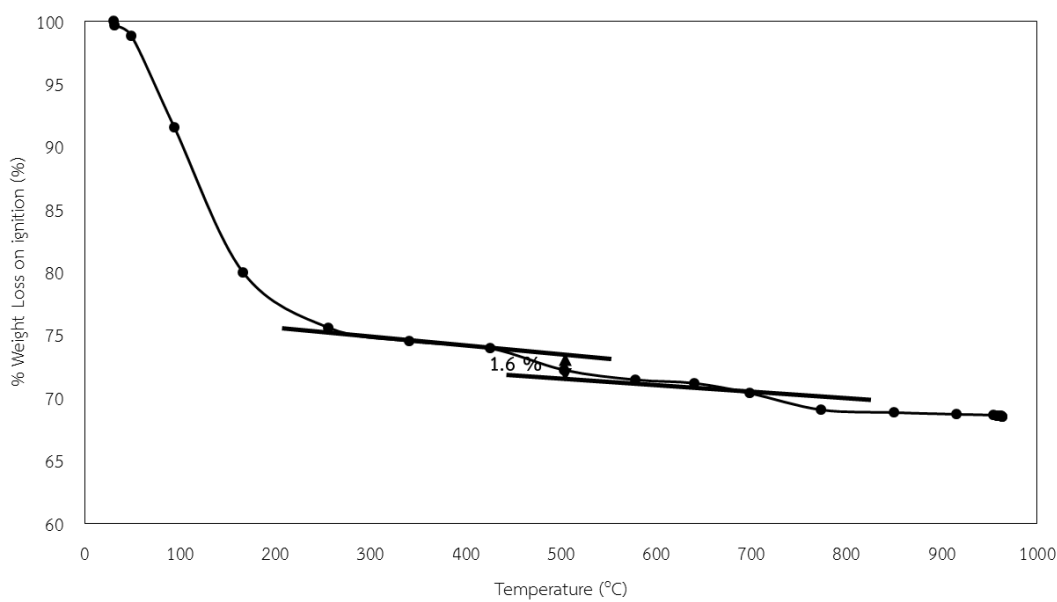
รูปที่ ค. 2 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง P5 ที่อายุ 28 วัน



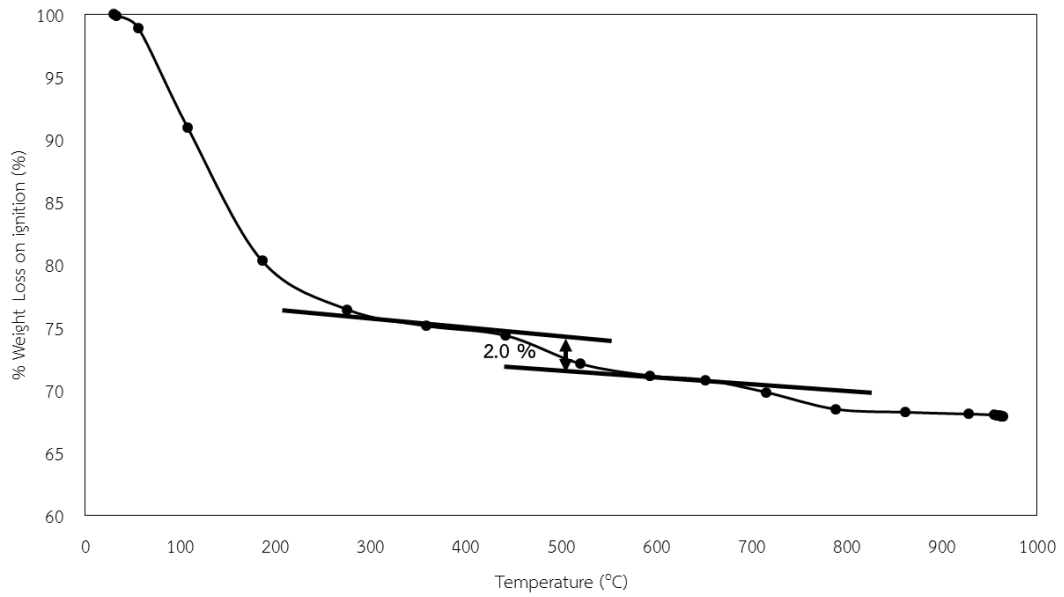
รูปที่ ค. 3 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง P10 ที่อายุ 28 วัน



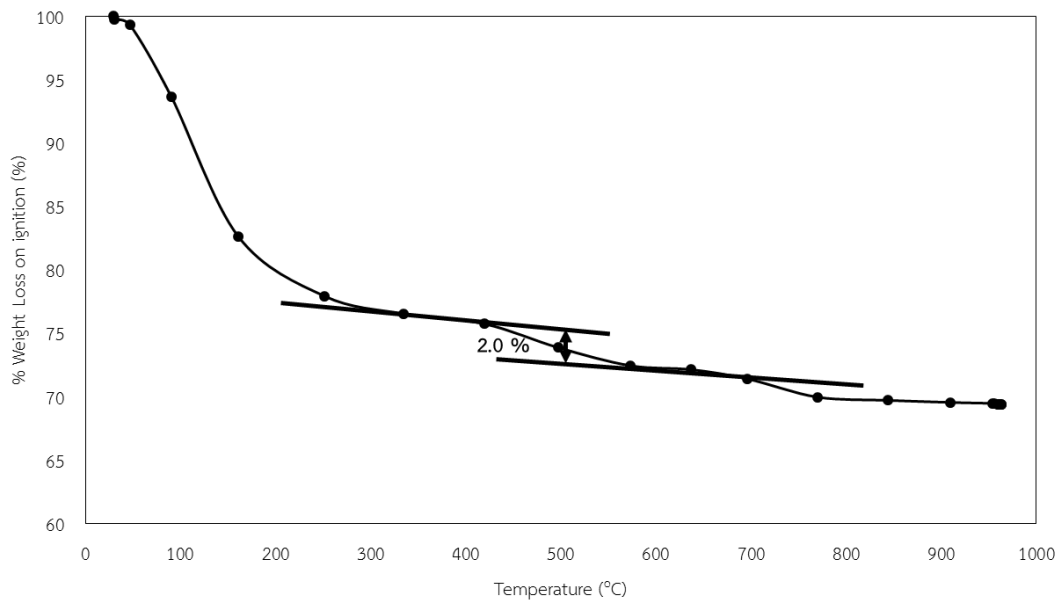
รูปที่ ค. 4 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P15 ที่ อายุ 28 วัน



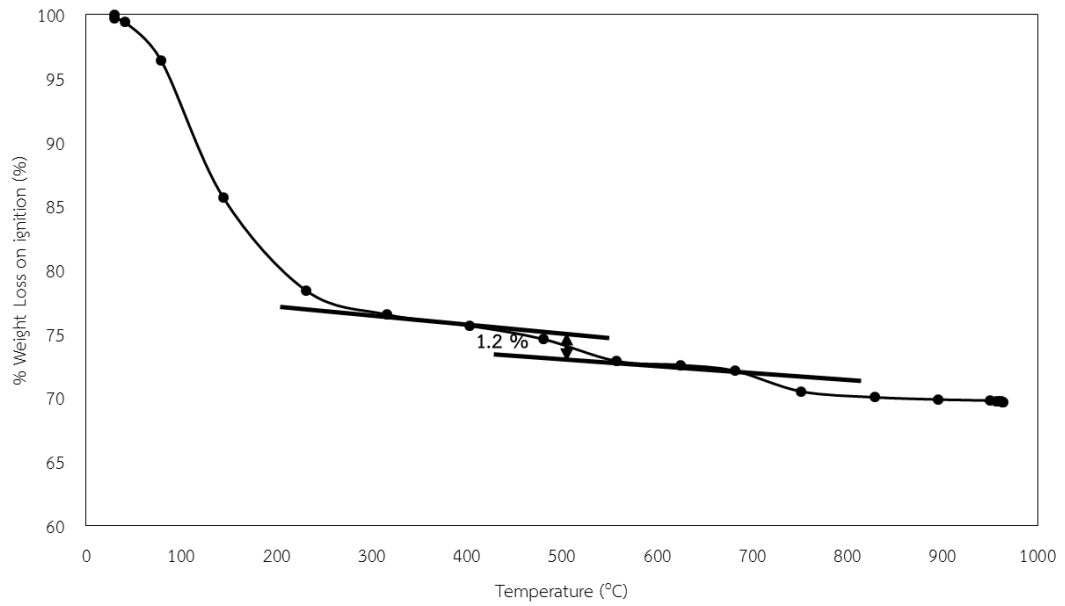
รูปที่ ค. 5 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบตัวอย่าง P20 ที่ อายุ 28 วัน



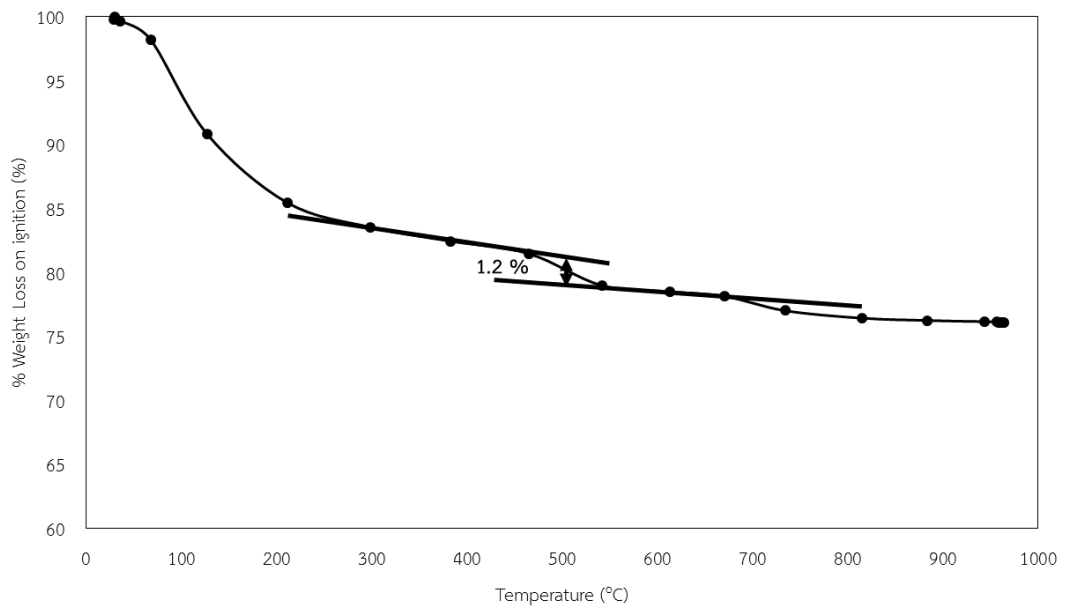
รูปที่ ค. 6 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเก่าแก่แบบตัวอย่าง M5 ที่อายุ 28 วัน



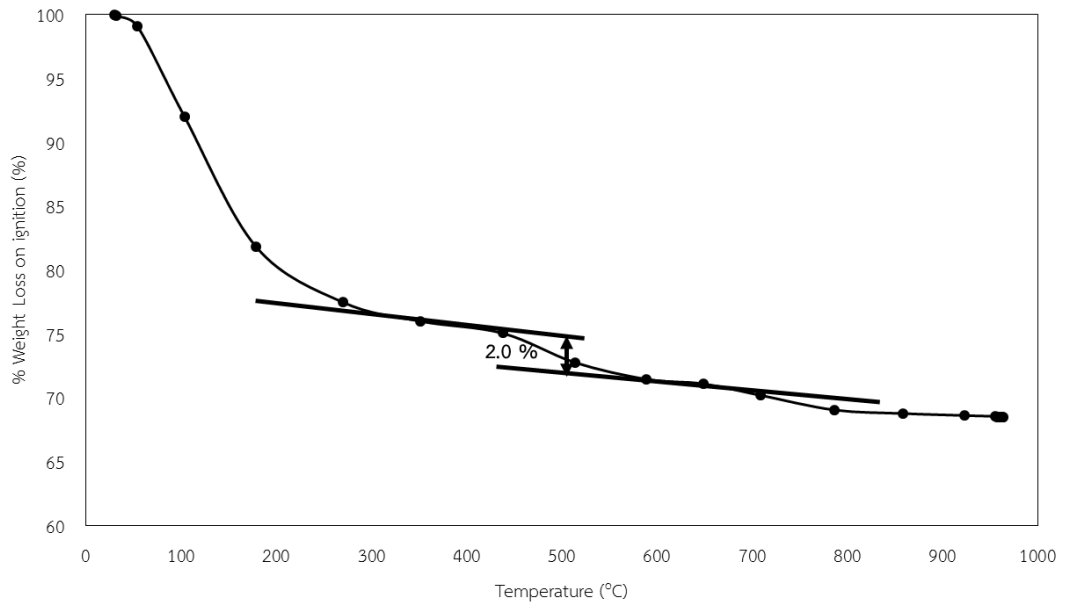
รูปที่ ค. 7 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเก่าแก่แบบตัวอย่าง M10 ที่อายุ 28 วัน



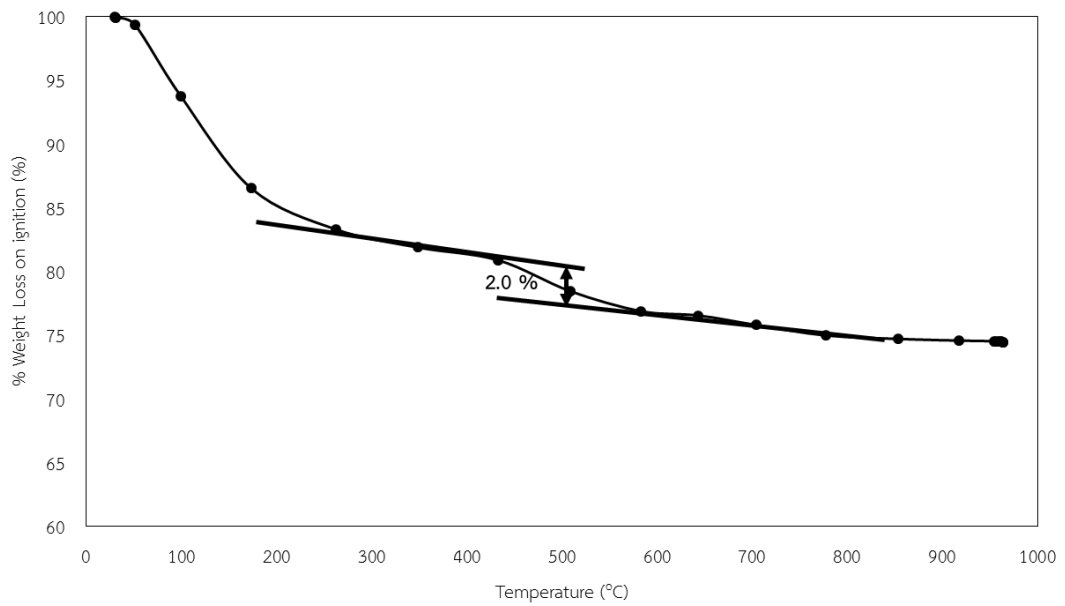
รูปที่ ค. 8 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง M15 ที่ อายุ 28 วัน



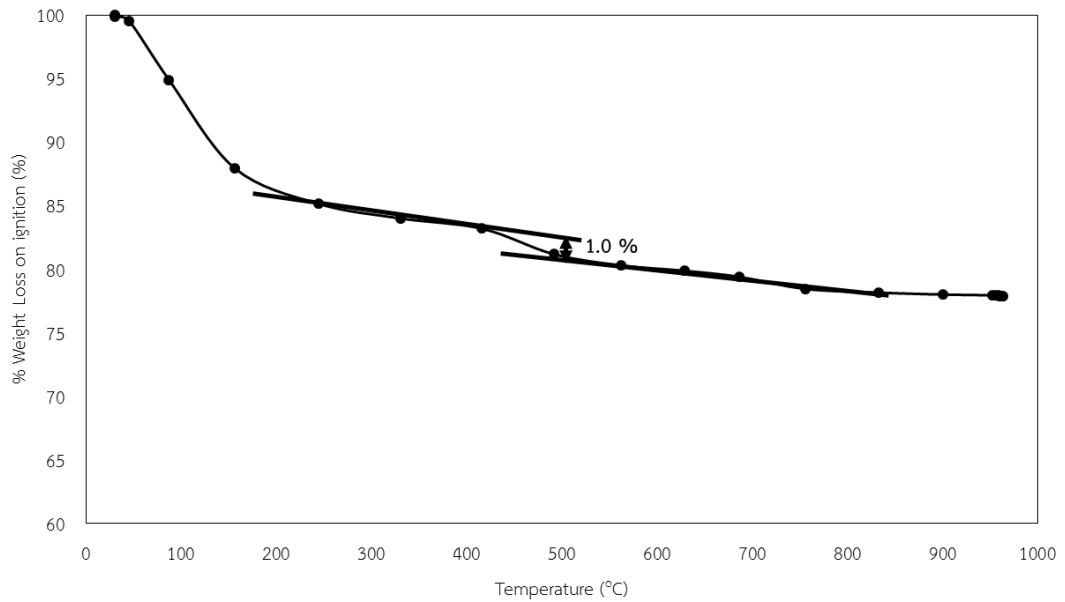
รูปที่ ค. 9 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง M20 ที่ อายุ 28 วัน



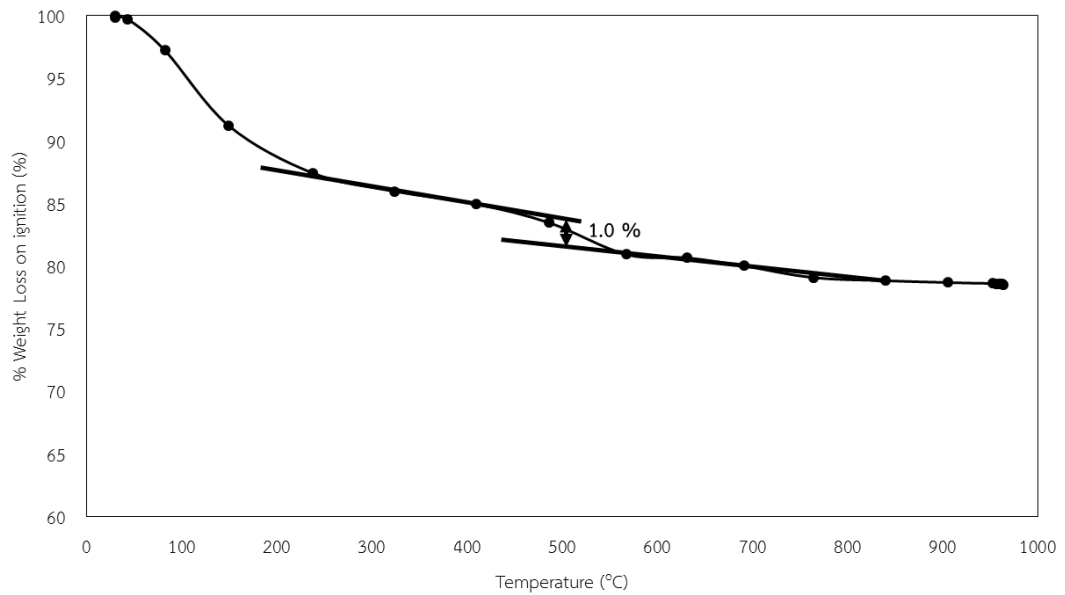
รูปที่ ค. 10 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง G5 ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ ค. 11 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง G10 ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ ค. 12 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง G15 ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ ค. 13 ปริมาณร้อยละแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมวลของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตัวอย่าง G20 ที่อายุ 28 วัน

ภาคผนวก ง.

ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก โดยใช้เข็มแบบไวแคต
(มอก. 15 เล่ม 9-2518) [17]

ตารางที่ ง. 1 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวและผลการคำนวณระยะเวลาก่อตัวของตัวอย่าง
ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

ตัวอย่าง	ชนิดของ เถ้าแกลบ	ระยะเวลา	ระยะเวลา	จำนวนน้ำที่	ผลการ	ผลการ
		ก่อตัว เริ่มต้น (นาที)	ก่อตัว สุดท้าย (นาที)	เหมาะสม เพื่อให้ได้ ความชื้น เหลวปกติ (%)	คำนวณ ระยะเวลาก่อ ตัวเริ่มต้น (นาที) จาก สมการที่ 22	คำนวณ ระยะเวลาก่อ ตัวสุดท้าย (นาที) จาก สมการที่ 23
P5	เถ้าแกลบ ดั้งเดิม	143	170	26.1	141	180
	(Pristine RHA)	146	170			
		146	170			
P10	เถ้าแกลบ ดั้งเดิม	150	200	27.2	150	187
	(Pristine RHA)	154	200			
		146	200			
P15	เถ้าแกลบ ดั้งเดิม	179	215	28.7	169	216
	(Pristine RHA)	176	215			
		179	215			
P20	เถ้าแกลบ ดั้งเดิม	180	230	30.1	184	236
	(Pristine RHA)	177	230			
		183	230			

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวและผลการคำนวณระยะเวลาก่อตัวของตัวอย่าง

ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ชนิดของเถ้า แกลบ	ระยะเวลา	ระยะเวลา	จำนวนน้ำที่	ผลการ	ผลการ
		ก่อตัว เริ่มต้น (นาทีก)	ก่อตัว สุดท้าย (นาทีก)	เหมาะสม เพื่อให้ได้ ความชื้น เหลือปกติ (%)	คำนวณ ระยะเวลา ก่อตัวเริ่มต้น (นาทีก) จาก สมการที่ 22	คำนวณ ระยะเวลา ก่อตัวสุดท้าย (นาทีก) จาก สมการที่ 23
M5	เถ้าแกลบ	127	165			
	ผสม(Mixed RHA)	133	165	25.7	132	164
		130	165			
M10	เถ้าแกลบ	139	180			
	ผสม (Mixed RHA)	138	180	26.5	144	185
		137	180			
M15	เถ้าแกลบ	142	200			
	ผสม (Mixed RHA)	146	200	26.8	150	196
		147	200			
M20	เถ้าแกลบ	153	215			
	ผสม (Ground RHA)	158	215	27.2	157	208
		154	215			
G5	เถ้าแกลบ	126	160			
	บดละเอียด (Ground RHA)	121	160	25.4	127	161
		125	160			

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบระยะเวลาก่อตัวและผลการคำนวณระยะเวลาก่อตัวของตัวอย่าง

ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ชนิดของเถ้า แกลบ	ระยะเวลา	ระยะเวลา	จำนวนน้ำที่	ผลการ	ผลการ
		ก่อตัว เริ่มต้น (นาที)	ก่อตัว สุดท้าย (นาที)	เหมาะสม เพื่อให้ได้ ความชื้น เหลวปกติ (%)	คำนวณ ระยะเวลา ก่อตัวเริ่มต้น (นาที) จาก สมการที่ 22	คำนวณ ระยะเวลา ก่อตัวสุดท้าย (นาที) จาก สมการที่ 23
G10	เถ้าแกลบ	132	165			
	บดละเอียด	139	165	25.7	135	178
	(Ground RHA)	137	165			
G15	เถ้าแกลบ	146	190			
	บดละเอียด	143	190	25.9	138	183
	(Ground RHA)	146	190			
G20	เถ้าแกลบ	145	205			
	บดละเอียด	147	205	26.1	146	200
	(Ground RHA)	149	205			

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

Factorial Fit: Initial setting time versus C₃A (%), Blaine of RHA (cm²/g), Normal consistency (%)

Estimated Effects and Coefficients for Initial setting time (min) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE	Coef	T	P
Constant		154.173		2.008	76.76	0.000
C ₃ A (%)	-17.383	-8.692		2.528	-3.44	0.002
Blaine of RHA (cm ² /g)	-8.673	-4.336		2.169	-2.00	0.054

Normal consistency (%) 34.197 17.099 3.836 4.46 0.000
 S = 5.46507 PRESS = 1181.06
 R-Sq = 90.05% R-Sq (pred) = 87.71% R-Sq (adj) = 89.12%

Analysis of Variance for Initial setting time (min) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	8653.0	8653.0	2884.34	96.57	0.000
Residual Error	32	955.7	955.7	29.87		
Lack of Fit	8	791.7	791.7	98.97	14.48	0.000
Pure Error	24	164.0	164.0	6.83		
Total	35	9608.8				

Estimated Coefficients for Initial setting time (min) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	73.7834
C ₃ A (%)	-28.0378
Blaine of RHA (cm ² /g)	-0.00496994
Normal consistency (%)	7.27600

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของระยะเวลาที่ตัวสุดท้ายของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

Factorial Fit: Final setting time versus C₃A (%), Blaine of RHA (cm²/g), Normal consistency (%)

Estimated Effects and Coefficients for Final setting time (min) (coded units)

Term	Effect	Coef	SE	Coef	T	P
Constant		195.63	3.231	60.54	0.000	
C ₃ A (%)	-42.01	-21.01	4.067	-5.16	0.000	
Blaine of RHA (cm ² /g)		-12.75		-6.37	3.490	-1.83 0.077
Normal consistency (%)	26.96		13.48		6.172	2.18 0.036

S = 8.79274 PRESS = 3066.12

R-Sq = 86.04% R-Sq (pred) = 82.70% R-Sq (adj) = 84.73%

Analysis of Variance for Final setting time (min) (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	15245	15245	5081.59	65.73	0.000
Residual Error	32	2474	2474	77.31		
Lack of Fit	8	2474	2474	309.25		
Pure Error	24	0	0	0.00		
Total	35	17719				

Estimated Coefficients for Final setting time (min) using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	310.125
C ₃ A (%)	-67.7633
Blaine of RHA (cm ² /g)	-0.00730511
Normal consistency (%)	5.73616

ภาคผนวก จ.

ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก
(มอก. 15 เล่ม 12-2532) [19]

ตารางที่ จ. 1 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบที่ช่วงอายุ 1 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 1 วัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ย (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)
B	144	139	140	141 ± 5
P5	133	136	127	132 ± 9
P10	128	127	132	129 ± 5
P15	115	117	116	116 ± 2
P20	100	107	102	103 ± 7
M5	137	140	134	137 ± 6
M10	130	135	131	132 ± 5
M15	125	129	127	127 ± 4
M20	108	116	118	114 ± 11
G5	140	138	136	138 ± 4
G10	143	138	142	141 ± 5
G15	135	136	134	135 ± 2
G20	132	125	133	130 ± 9

ตารางที่ จ. 2 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 3 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 3 วัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ย (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)
B	259	256	256	257 ± 3
P5	227	224	236	229 ± 12
P10	215	213	217	215 ± 4
P15	200	203	203	202 ± 3
P20	187	179	180	182 ± 9
M5	244	239	237	240 ± 7
M10	233	235	228	232 ± 7
M15	223	227	225	225 ± 4
M20	206	209	209	208 ± 3
G5	244	245	240	243 ± 5
G10	245	247	243	245 ± 4
G15	242	246	244	244 ± 4
G20	237	240	240	239 ± 3

ตารางที่ จ. 3 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 7 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 7 วัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ย (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)
B	318	312	306	312 ± 12
P5	290	293	284	289 ± 9
P10	267	265	269	267 ± 4
P15	237	232	236	235 ± 5
P20	235	232	232	233 ± 3
M5	300	297	300	299 ± 3
M10	286	289	286	287 ± 3
M15	307	302	297	302 ± 10
M20	306	299	307	304 ± 9
G5	312	313	308	311 ± 5
G10	300	306	300	302 ± 7
G15	312	316	314	314 ± 4
G20	318	313	311	314 ± 7

ตารางที่ จ. 4 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ช่วงอายุ 28 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังอัดมอร์ตาร์ที่ช่วงอายุ 28 วัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ย (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)
B	415	428	441	428 ± 26
P5	382	392	402	392 ± 20
P10	358	365	372	365 ± 14
P15	322	327	317	322 ± 10
P20	260	252	244	252 ± 16
M5	412	400	388	400 ± 24
M10	434	429	424	429 ± 10
M15	435	431	433	433 ± 4
M20	437	423	430	430 ± 14
G5	410	419	401	410 ± 18
G10	426	446	436	436 ± 20
G15	429	451	440	440 ± 22
G20	427	455	441	441 ± 28

ภาคผนวก ฉ.

ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จ
ตามมาตรฐาน ASTM C192 Standard Method of Making and Curing
Concrete Test Specimens in the Laboratory [18]

ตารางที่ ฉ. 1 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมแก้ว
 แกลบที่ช่วงอายุ 3 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จที่ช่วงอายุ 3 วัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ย (กิโลกรัม/ ตาราง เซนติเมตร)
B	254	276	292	274 ± 38
P5	270	280	275	275 ± 10
P10	266	255	247	256 ± 19
P15	230	220	219	223 ± 12
P20	203	212	209	208 ± 9
M5	265	284	237	262 ± 47
M10	273	277	272	274 ± 5
M15	263	226	243	244 ± 37
M20	263	223	240	242 ± 40
G5	273	292	287	284 ± 20
G10	275	266	278	273 ± 12
G15	264	249	273	262 ± 24
G20	237	230	244	237 ± 14

ตารางที่ ๑. 2 ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมเถ้า
แกลบที่ช่วงอายุ 7 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จที่ช่วงอายุ 7 วัน (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)				ค่าเฉลี่ย (กิโลกรัม/ ตาราง เซนติเมตร)
B	334	339	335	335	336 ± 5
P5	321	345	360	360	342 ± 39
P10	321	341	331	331	331 ± 20
P15	271	303	290	290	288 ± 32
P20	276	248	292	292	272 ± 45
M5	330	316	350	350	332 ± 34
M10	312	309	315	315	312 ± 6
M15	315	295	323	323	311 ± 29
M20	243	243	255	255	247 ± 14
G5	352	368	375	375	365 ± 24
G10	324	342	351	351	339 ± 27
G15	331	330	335	335	332 ± 5
G20	309	315	303	303	309 ± 12

ตารางที่ ๓. ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของคอนกรีตผสมเสร็จของตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมแก้ว
 แกลบที่ช่วงอายุ 28 วัน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังอัดคอนกรีตผสมเสร็จที่ช่วงอายุ 28 วัน (กิโลกรัม/ตาราง เซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ย (กิโลกรัม/ ตาราง เซนติเมตร)
B	400	412	388	400 ± 24
P5	442	433	418	431 ± 24
P10	445	435	428	436 ± 17
P15	417	403	404	408 ± 16
P20	400	407	381	396 ± 27
M5	428	437	416	427 ± 21
M10	463	452	441	452 ± 22
M15	460	446	432	446 ± 28
M20	399	435	423	419 ± 37
G5	451	487	478	472 ± 37
G10	468	485	493	482 ± 26
G15	482	489	475	482 ± 14
G20	445	455	429	443 ± 26

ภาคผนวก ข.

การคำนวณตัวประกอบการปรับแก้

วิธีการคำนวณตัวประกอบปรับแก้ (Corrective factor ; C) เพื่อใช้ในการปรับค่าที่ได้จากการคำนวณให้ได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ตัวอย่างเช่น ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตั้งเดิมร้อยละ 5 โดยมีมวล คือการผสมปูนซีเมนต์สัดส่วนร้อยละ 95 โดยมีมวล ที่มีค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ 3,382 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และ เถ้ากลบสัดส่วนร้อยละ 5 โดยมีมวล ที่มีค่าความละเอียดของเถ้ากลบ 3,196 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม สามารถคำนวณค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตั้งเดิมร้อยละ 5 โดยมีมวล ได้ดังนี้

ความละเอียดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตั้งเดิมร้อยละ 5 โดยมีมวล = $0.95 \times$ ค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ + $0.05 \times$ ค่าความละเอียดของเถ้ากลบ

ความละเอียดของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตั้งเดิมร้อยละ 5 โดยมีมวล = $0.95 \times 3,382 + 0.05 \times 3,196 = 3,373$ ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

ดังนั้นปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตั้งเดิมร้อยละ 5 โดยมีมวล ควรมีค่าที่ได้จากการคำนวณคือ 3,373 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม แต่จากผลการทดสอบพบว่า ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบตั้งเดิมร้อยละ 5 โดยมีมวล มีค่าความละเอียด 3,318 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ดังนั้นค่าตัวประกอบการปรับแก้ (C) จึงมีค่าเท่ากับ ค่าความละเอียดจากการทดสอบ / ค่าความละเอียดจากการคำนวณ = $3,318/3,373 = 0.983$

จากการคำนวณตัวประกอบการปรับแก้ของการวิเคราะห์และทดสอบพบว่า เป็นไปตามตารางที่ ข.1 อย่างไรก็ตามตัวประกอบการปรับแก้ตามตาราง พบว่าค่าที่ได้ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการปรับแก้ค่าได้เนื่องจาก ตัวประกอบการปรับแก้แต่ละตัวยังมีค่าที่ไม่คงที่และไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งอาจจะมีปัจจัยหลายอย่างเกี่ยวข้องเช่นการเตรียมตัวอย่าง, ความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ เป็นต้น ดังนั้นหากต้องการที่ได้ค่าตัวประกอบการปรับแก้ควรทำการวิเคราะห์และทดสอบซ้ำหลายๆครั้งเพื่อตัดปัจจัยในเรื่องดังกล่าว โดยนำค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากรที่สนใจเป็นตัวแทนในการคำนวณ จึงสามารถคำนวณค่าตัวประกอบการปรับแก้ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

ตารางที่ ข. 1 ตัวประกอบการปรับแก้ค่าของผลการวิเคราะห์และทดสอบ

ตัวประกอบการปรับแก้ค่าของผลการวิเคราะห์และทดสอบ	P5	P10	P15	P20	M5
ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ	0.99	1.00	1.00	0.98	0.99
องค์ประกอบทางเคมี SiO ₂	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00
องค์ประกอบทางเคมี CaO	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00
Loss on Ignition	0.99	1.00	1.01	1.01	1.00
Alite (C ₃ S)	0.98	1.01	1.04	1.04	0.99
Alum (C ₃ A)	0.94	0.99	0.96	0.97	0.97
Amorphous	1.12	1.02	0.93	0.90	1.01
ค่าความละเอียด (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	0.98	0.98	0.98	0.96	0.99
ร้อยละโดยปริมาตรของอนุภาคค้ำตะแกรง 30 ไมครอน	1.00	1.01	1.01	0.98	1.00

ตารางที่ ข. 1 ตัวประกอบการปรับแก้ค่าของผลการวิเคราะห์และทดสอบ (ต่อ)

ตัวประกอบการปรับแก้ค่า ของผลการวิเคราะห์และ ทดสอบ	M15	M20	G5	G10	G15	G20	ค่าเฉลี่ย
ความถ่วงจำเพาะของ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	0.98	0.99
องค์ประกอบทางเคมี SiO ₂	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00
องค์ประกอบทางเคมี CaO	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
Loss on Ignition	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Alite (C ₃ S)	1.04	1.06	0.98	1.00	1.03	1.00	1.01
Alum (C ₃ A)	0.98	1.00	0.95	0.94	0.98	0.97	0.97
Amorphous	0.84	0.90	0.92	0.83	0.83	1.02	0.94
ค่าความละเอียด (ตาราง เซนติเมตรต่อกรัม)	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	0.99
ร้อยละโดยปริมาตรของ อนุภาคค้ำตะแกรง 30 ไมครอน	0.97	0.96	0.99	0.99	0.97	0.97	0.98

ภาคผนวก ข.

สมมุติฐานและวิธีการการคำนวณหาร้อยละของไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ของปูนซีเมนต์

สมมุติฐานในการคำนวณคำนวณหาร้อยละของไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตร
แคลเซียมอะลูมิเนต และเทตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ของปูนซีเมนต์ ดังนี้

1. มีการเกิดสภาวะสมดุลทางเคมี
2. Fe_2O_3 ทำปฏิกิริยากับ Al_2O_3 และ CaO ได้ $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ (C_4AF)

$$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$$
3. Al_2O_3 ที่เหลือจากการเกิด C_4AF จะทำปฏิกิริยากับ CaO ได้ $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$

$$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$$
4. SO_3 ทำปฏิกิริยากับรวมตัวกับ CaO ได้ CaSO_4

$$\text{CaO} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{CaSO}_4$$
5. CaO ที่เหลือจากข้างต้นทำปฏิกิริยากับ Silica ได้ Ca_2SiO_4 (C_2S) ก่อน และจากนั้น CaO ที่เหลือ
จะทำปฏิกิริยากับ Ca_2SiO_4 (C_2S) ได้ Ca_3SiO_5 (C_3S)

$$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4$$
 (C_2S)

$$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{CaO} \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5$$
 (C_3S)
6. การเกิดปฏิกิริยาไม่นับอิทธิพลของ Minor Element ต่าง ๆ เช่น Alkali, Mg, Ti, Mn, Cr, P ฯลฯ

คำนวณน้ำหนักมวลโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\text{CaO} = 40 + 16 = 56$$

$$\text{SiO}_2 = 28 + 16 \times 2 = 60$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 27 \times 2 + 16 \times 3 = 102$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 56 \times 2 + 16 \times 3 = 160$$

$$\text{SO}_3 = 32 + 16 \times 3 = 80$$

$$\text{CaSO}_4 = 40 + 32 + 16 \times 4 = 136$$

$$\text{Ca}_3\text{SiO}_5 = 40 \times 3 + 28 + 16 \times 5 = 228$$

$$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 = 40 \times 2 + 28 + 16 \times 4 = 172$$

$$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = 40 \times 3 + 27 \times 2 + 16 \times 6 = 270$$

$$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10} = 40 \times 4 + 27 \times 2 + 56 \times 2 + 16 \times 10 = 486$$

วิธีการการคำนวณหาร้อยละของไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต และเททระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ ของปูนซีเมนต์ เพื่อพิสูจน์สมการดังนี้

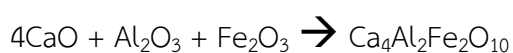
$$\text{ไตรแคลเซียมซิลิเกต} = (4.071 \times \text{ร้อยละ CaO}) - (7.600 \times \text{ร้อยละของ SiO}_2) - (6.718 \times \text{ร้อยละ Al}_2\text{O}_3) - (1.430 \times \text{ร้อยละของ Fe}_2\text{O}_3) - (2.852 \times \text{ร้อยละ SO}_3) \dots(\text{ซ.1})$$

$$\text{ไตรแคลเซียมซิลิเกต} = (2.867 \times \text{ร้อยละของ SiO}_2) - (0.7544 \times \text{ร้อยละของ } 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) \dots(\text{ซ.2})$$

$$\text{ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต} = (2.650 \times \text{ร้อยละ Al}_2\text{O}_3) - (1.692 \times \text{ร้อยละของ Fe}_2\text{O}_3) \dots(\text{ซ.3})$$

$$\text{เททระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์} = 3.043 \times \text{ร้อยละของ Fe}_2\text{O}_3 \dots(\text{ซ.4})$$

จากการเกิดปฏิกิริยา Fe_2O_3 กับ Al_2O_3 และ CaO ได้ $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$



$$\%CaO / (4 \times 56) = \%Al_2O_3 / 102 = \%Fe_2O_3 / 160 = \%Ca_4Al_2Fe_2O_{10} / 486$$

$$\%Ca_4Al_2Fe_2O_{10} = 486/160 \times \%Fe_2O_3 = 3.043 \times \%Fe_2O_3$$

∴ เทพระแคลเซียมอะลูมิเนียมเฟอร์ไรต์ = $3.043 \times$ ร้อยละของ Fe_2O_3 ... (ซ.1)

$$\%Al_2O_3 / 102 = \%Fe_2O_3 / 160$$

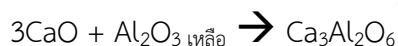
$$\%Al_2O_3 = 102/160 \times \%Fe_2O_3 = 0.63 \times \%Fe_2O_3$$

$$\%CaO / (4 \times 56) = \%Fe_2O_3 / 160$$

$$\%CaO = 224/160 \times \%Fe_2O_3 = 1.4 \times \%Fe_2O_3$$

$$\text{ดังนั้น } \%Al_2O_3 \text{ เหลือ} = \%Al_2O_3 - 0.63 \times \%Fe_2O_3$$

จาก Al_2O_3 ที่เหลือจากการเกิด C_4AF จะทำปฏิกิริยากับ CaO ได้ $Ca_3Al_2O_6$



$$CaO / 168 = (\%Al_2O_3 - 0.63 \times \%Fe_2O_3) / 102 = \%Ca_3Al_2O_6 / 270$$

$$\%Ca_3Al_2O_6 = 270/102 (\%Al_2O_3 - 0.63 \times \%Fe_2O_3) = 2.650 \times \%Al_2O_3 - 1.692 \times \%Fe_2O_3$$

∴ ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต = $(2.650 \times$ ร้อยละ $Al_2O_3) - (1.692 \times$ ร้อยละของ $Fe_2O_3)$... (ซ.2)

$$\%CaO / 168 = (\%Al_2O_3 - 0.63 \times \%Fe_2O_3) / 102$$

$$\%CaO = 168/102 (\%Al_2O_3 - 0.63 \times \%Fe_2O_3)$$

$$\%CaO = 1.647 \times \%Al_2O_3 - 1.04 \times \%Fe_2O_3$$

จาก CaO ที่เหลือจากข้างต้นทำปฏิกิริยากับ Silica ได้ Ca_2SiO_4 (C_2S) ก่อน และจากนั้น CaO ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ Ca_2SiO_4 (C_2S) ได้ Ca_3SiO_5 (C_3S)



$$\%CaO / 112 = \%SiO_2 / 60 = \% Ca_2SiO_4 \text{ เกิดขึ้น} / 172$$

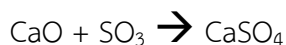
$$\% Ca_2SiO_4 \text{ เกิดขึ้น} / 172 = \%SiO_2 / 60$$

$$\% Ca_2SiO_4 \text{ เกิดขึ้น} = 172/60 \times \%SiO_2 = 2.867 \times \%SiO_2$$

$$\%CaO / 112 = \%SiO_2 / 60$$

$$\%CaO = 112 / 60 \times \%SiO_2 = 1.87 \times \%SiO_2$$

จาก SO_3 ทำปฏิกิริยากับรวมตัวกับ CaO ได้ $CaSO_4$



$$\%CaO / 56 = \%SO_3 / 80 = \%CaSO_4 / 136$$

$$\%CaO = 56 / 80 \times \%SO_3 = 0.7 \times \%SO_3$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } \%CaO_{\text{เหลือ}} = \%CaO - 1.4 \times \%Fe_2O_3 - (1.647 \times \%Al_2O_3 - 1.04 \times \%Fe_2O_3) - 1.87 \times \%SiO_2 - 0.7 \times \%SO_3$$

$$\therefore \%CaO_{\text{เหลือ}} = \%CaO - 0.36 \times \%Fe_2O_3 - 1.647 \times \%Al_2O_3 - 1.87 \times \%SiO_2 - 0.7 \times \%SO_3$$



$$Ca_3SiO_5 (C_3S) / 228 = Ca_2SiO_4 \text{ ที่ใช้} / 172 = (\%CaO - 0.36 \times \%Fe_2O_3 - 1.647 \times \%Al_2O_3 - 1.87 \times \%SiO_2 - 0.7 \times \%SO_3) / 56$$

$$Ca_3SiO_5 (C_3S) = 228/56 (\%CaO - 0.36 \times \%Fe_2O_3 - 1.647 \times \%Al_2O_3 - 1.87 \times \%SiO_2 - 0.7 \times \%SO_3)$$

$$C_3S = 4.071 \times \%CaO - 1.430 \times \%Fe_2O_3 - 6.718 \times \%Al_2O_3 - 7.600 \times \%SiO_2 - 2.852 \times \%SO_3$$

$$\therefore \text{ไตรแคลเซียมซิลิเกต} = (4.071 \times \text{ร้อยละ CaO}) - (7.600 \times \text{ร้อยละของ SiO}_2) - (6.718 \times \text{ร้อยละ Al}_2\text{O}_3) - (1.430 \times \text{ร้อยละของ Fe}_2\text{O}_3) - (2.852 \times \text{ร้อยละ SO}_3) \dots \text{(ซ.3)}$$

$$Ca_3SiO_5 / 228 = Ca_2SiO_4 \text{ ที่ใช้} / 172$$

$$Ca_2SiO_4 \text{ ที่ใช้} = 172 / 228 \times Ca_3SiO_5 = 0.7544 \times Ca_3SiO_5$$

$$\text{ดังนั้น } Ca_2SiO_4 = Ca_2SiO_4 \text{ เกิดขึ้น} - Ca_2SiO_4 \text{ ที่ใช้} = 2.867 \times \%SiO_2 - 0.7544 \times Ca_3SiO_5$$

$$\therefore \text{ไดแคลเซียมซิลิเกต} = (2.867 \times \text{ร้อยละของ } SiO_2) - (0.7544 \times \text{ร้อยละของ } 3CaO.SiO_2) \dots (\text{ซ.4})$$



ภาคผนวก ญ.

บทความงานวิจัยการใช้เถ้าแกลบผสมปูนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตในงานสัมมนาเชิงวิชาการ



A new strategy to improve quality of ready mixed concrete using rice husk ash.

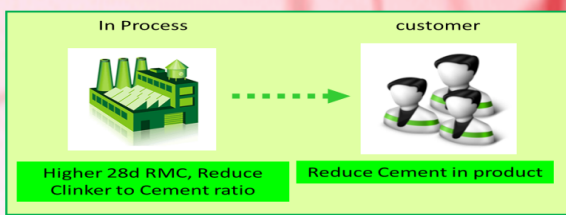
Panupong Pongpitakul^{1,*}, Sakprayut Sinthupinyo², and Tawatchai Charinpanitkul¹
¹Center of Excellence in Particle Technology, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Payathai Rd., Patumwan, Bangkok, 10330, Thailand
²Siam Research and Innovation Co.,Ltd. 51 Moo 8, Tubkwang, Kaeng Khoi, Saraburi, 18260, Thailand

How to use the rice husk?
 • Rice husk fuel is supplied to conveyor for boiler by loader from indoor and/or outdoor storage area during day time, as a boiler fuel supply system.
 • The impact of environmental problems, from the pile to keep the rice husk ash removal



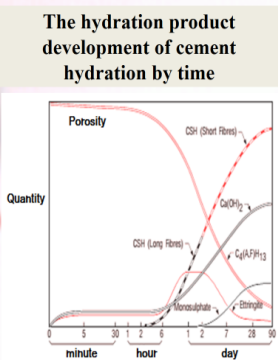
- Rice is a crop of Thailand for a long time.
- Thailand is the world's largest rice exporter.

Rice Husk
 • 36-39% Cellulose
 • 31-34% Lignin
 • 15-19% Silica

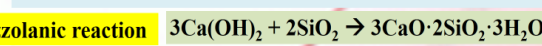
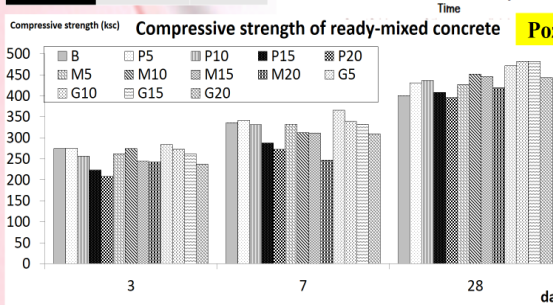


XRF

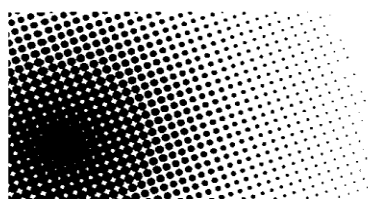
Percentage	Cement Blank	Pristine RHA
SiO ₂	19.70	85.44
Al ₂ O ₃	4.73	0.30
Fe ₂ O ₃	3.05	0.12
CaO	64.74	0.70
MgO	2.06	0.04
K ₂ O	0.83	1.62
Na ₂ O	0.00	0.00
Other	4.89	11.78



The best early compressive strength of ready-mixed concrete samples incubated for 3 and 7 days were achieved when the percentages of cement replaced by 5% rice husk ash (RHA) was used. It decreased appreciably as the percentage of RHA increased. The sample of G5 exhibited the highest strength because of its surface area and the amount of clinker content that was larger than others.
 According to the late compressive strength of ready-mixed concrete incubated for 28 days, the sample of G10 and G15 exhibited higher strength than other samples. This result would be attributed to the amorphous silica content of the RHA and surface area which were of the most important constituents of Pozzolanic Cement.

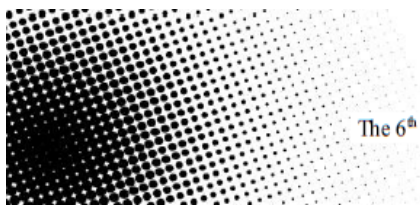


Conclusions: Using RHA can improve 28-day compressive strength of concrete approximately to 82 ksc due to the pozzolanic reaction by mixing with 10-15 percent by weight of Ground RHA.
 Higher environmental friendliness and reduce carbon dioxide emissions in the cement burning process.



Content

Topic G: Chemical Engineering		Page
ID 101	A potential of <i>Rhodotorula graminis</i> TISTR 5124 on synthesis Polyhydroxyalkanoate (PHA) on optimization of nutrients	197
ID 108	Production of reducing sugars from hydrolysis of Napier grass by acid and alkaline	198
ID 109	Biodiesel production from unrefined <i>Krating</i> (<i>Calophyllum inophyllum</i>) seed oil using supercritical methanol	199
ID 110	Biodegradable Poly(lactic acid)/Perkalite clay nanocomposites: Gas barrier properties	200
ID 114	The effect of epoxy-functionalized chain extender on crystal growth and morphology of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV)	201
ID 115	Utilization of Kelut's volcanic ash as the aggregate mixture of concrete brick	202
ID 119	Preparation and characterization of properties of acrylonitrile butadiene styrene waste plastic blended with virgin styrene butadiene rubber	203
ID 124	Optimization of PEM fuel cell performance by examining proper catalyst ink ingredients from various solvents and Nafion for MEA fabrication	204
ID 125	A new strategy to improve quality of ready mixed concrete using rice husk ash	205
ID 134	Microwave Assisted Extraction of Barakol from <i>Senna siamea</i>	206
ID 155	Hybrid neural network modeling and optimization of an anaerobic digestion of shrimp culture pond sediments in biogas production process	207
ID 157	Exploitation of three phase partitioning to concentrate and purify inulinase from <i>Kluyveromyces marxianus</i> DBKKU-Y-103	208
ID 191	Preparation of graphite oxide using modified Tours Method by using raw graphite powder from jewelry industry waste	209
ID 196	Effect of bio-fibrils incorporating with TiO ₂ on the properties of natural rubber foam	210



The 6th KKU International Engineering Conference 2016 (KKU-IENC 2016)
 “Engineering and Technological for Better Living”
 Khon Kaen, Thailand, August 3-5, 2016

Topic G: Chemical Engineering

ID 125

A new strategy to improve quality of ready mixed concrete using rice husk ash

Panupong Pongpitakul^{1,*}, Sakprayut Sinthupinyo², and Tawatchai Charinpanitkul¹

¹Center of Excellence in Particle Technology, Department of Chemical Engineering,
 Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Payathai Rd.,
 Patumwan, Bangkok, 10330, Thailand

²Siam Research and Innovation Co.,Ltd. 51 Moo 8, Tubkwang, Kaeng Khoi, Saraburi, 18260,
 Thailand

*Corresponding author. Tel.: +66-87506-0100, Email address: panuppon@scg.co.th

Keywords: Rice husk ash, Cement, Pozzolanic reaction, Amorphous silica

Abstract. Quality improvement of ready mixed concrete would be achieved by control of surface properties of its constituents, which are cement and additives. Rice husk ash (RHA) which is solid waste received from rice husk fire combustion process would help improve such cement properties and reduce environmental burden due to land-filling. A new strategy to improve quality of ready mixed cement has been experimentally explored using ground RHA as an additive to mix with cement. Because of amorphous silica within ground RHA which could involve with the pozzolanic reaction, control of particle size distribution of RHA and weight ratio of RHA to cement would lead to quality improvement of ready mixed concrete. In this work, particle size distribution of RHA is represented by the fineness of RHA which is set from 3,200 to 5,100 cm²/g. Meanwhile, the mixing ratio of RHA to cement is set from 5 percent to 20 percent by weight. It was found that the RHA fineness and the mixing ratio of RHA to cement could affect the 3, 7 and 28-day compressive strength of the ready-mixed concrete. RHA with a fineness of 5,100 cm²/g could provide the highest compressive strength with the 10-15 percent of RHA is mixed with cement.



A new strategy to improve quality of ready mixed concrete using rice husk ash
Panupong Pongpitakkul¹, Sakprayut Sinthupinyo², and Tawatchai Charinpanitkul¹

¹Center of Excellence in Particle Technology, Department of Chemical Engineering,
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Payathai Rd., Patumwan, Bangkok, 10330,
Thailand

²Siam Research and Innovation Co.,Ltd. 51 Moo 8, Tubkwang, Kaeng Khoi, Saraburi, 18260,
Thailand

*Corresponding author. Tel.: 66-87506-0100, Email address: panuppon@scg.co.th

Abstract

Quality improvement of ready mixed concrete would be achieved by control of surface properties of its constituents, which are cement and additives. Rice husk ash (RHA) which is solid waste received from rice husk fire combustion process would help improve such cement properties and reduce environmental burden due to land-filling. A new strategy to improve quality of ready mixed cement has been experimentally explored using ground RHA as an additive to mix with cement. Because of amorphous silica within ground RHA which could involve with the pozzolanic reaction, control of particle size distribution of RHA and weight ratio of RHA to cement would lead to quality improvement of ready mixed concrete. In this work, particle size distribution of RHA is represented by the fineness of RHA which is set from 3,200 to 5,100 cm²/g. Meanwhile, the mixing ratio of RHA to cement is set from 5 percent to 20 percent by weight. It was found that the RHA fineness and the mixing ratio of RHA to cement could affect the 3, 7 and 28-day compressive strength of the ready-mixed concrete. RHA with a fineness of 5,100 cm²/g could provide the highest compressive strength with the 10-15 percent of RHA is mixed with cement.

Keywords: Rice husk ash, Cement, Pozzolanic reaction, Amorphous silica

1. Introduction

Nowadays, the environment is significantly affected by the growth of the industry. To raise awareness of environmental issues, leading companies in Thailand provide a policy that focuses on improving manufacturing processes, efficiently using natural resources, and reducing waste in



the production process that regarded as a social responsibility. Thailand is an agricultural country which could produce many agricultural products, especially rice. Therefore, Thailand has been the world's largest rice exporter for a long period. Consequently, there is a lot of waste material left behind after rice harvest such as rice husks. In addition, the rice milling process provides rice husks around 5 million tons in each year. Each ton of milled rice contains the rice husks around 200 kilograms. Currently, the method used to get rid of rice husk is to apply it as fuel in the large and medium scale manufacturing industries that use heat to produce steam. If the rice husk is burned, its ash will be about 20 percent of the weight of rice husk or about 40 kilograms [1]. Some researchers have proposed a variety of usage of RHA remaining from the manufacturing process. Meanwhile it is well recognized that Rice husk ash or RHA received from rice husk fire combustion process would help improve such cement properties and reduce environmental burden due to land-filling. A new possible strategy to use RHA as an additive to mix with cement would provide an impact on the environment by reducing its amount instead of burning. The rice husk ash has high silica content and is suitable for agricultural development of pozzolanic material. It is used as an ingredient in concrete to help improve properties and quality of the concrete surface, reduce production costs and add value to functional cement. This approach provides leadership in the manufacturing industry and protects the environment, both within the industry and sustainable communities.

2. Materials and methods

2.1 Material

The cement used in the experiment was Portland cement type 1 with specific areas (fineness) of $3,410 \text{ cm}^2/\text{g}$ obtained from the Siam Cement (Thung Song Plant) Co., Ltd. This cement is produced under TIS.15, Volume 1-2555 [2]. Rice husk ash (RHA) the fineness of $3,200 \text{ cm}^2/\text{g}$. Limestone with assorted sizes was used for concrete testing with regard to the qualifying standard of ASTM C33-97 [3]. Also, sand with assorted sizes was collected from the Tapi river for the concrete testing with regard to the same standard. A concrete additive type D was supplied from the W.R. Grace (Thailand) Co., Ltd.



2.2 Preparation Method

The RHA with a fineness of $3,200\text{ cm}^2/\text{g}$ was ground in a ball mill to improve its texture for 2 hours until the fineness of $5,100\text{ cm}^2/\text{g}$ was achieved. Pristine RHA and ground RHA were mixed with a weight ratio of 50:50. Then, the pristine RHA, ground RHA, and mixed RHA were further mixed again with the weight fraction in a range of 5, 10, 15 and 20 percent in order to prepare standard samples with designated composition as summarized in Table 1. To physicochemical analyses, mineralogical analysis was subjected to X-Ray Fluorescence (XRF) and X-Ray Diffraction (XRD). Specific surface area of each sample was analyzed by Blaine's air permeability apparatus [4]. The compressive strength of each ready-mixed concrete sample prepared in 3, 7 and 28 days was conducted based on ASTM C192 standard [5].

Table 1 Weight fraction of cement and RHA in each typical sample

Sample	Cement: RHA Ratio	Type of RHA	Sample	Cement: RHA Ratio	Type of RHA
B (blank)	100:0	None	M15	85:15	Mixed RHA
P5	95:5	Pristine RHA	M20	80:20	Mixed RHA
P10	90:10	Pristine RHA	G5	95:5	Ground RHA
P15	85:15	Pristine RHA	G10	90:10	Ground RHA
P20	80:20	Pristine RHA	G15	85:15	Ground RHA
M5	95:5	Mixed RHA	G20	80:20	Ground RHA
M10	90:10	Mixed RHA			

3. Results

Because of amorphous silica within ground RHA which could involve with the pozzolanic reaction, analyses of its microscopic properties would be essential for its strategic usage. First, XRF analytical results of typical samples of cement and pristine RHA were conducted and summarized in Table 2. It could be clearly observed that the main constituent of cement and RHA is silica with a percentage of 19.70 and 85.44, respectively. In addition, XRD analyses of the mixture of RHA to cement within a range of 5 to 20 percent by weight as shown in Table 1 were



also conducted. In the RHA contents, amorphous silica RHA structure was reached to 96.96 percent by weight. The percent crystalline was shown in Table 2.

Table 2 XRD analytical results of each sample

Sample	Alite	Belite	Alum	Ferrite	FCaO	Amorphous	Other
B	64.04	9.00	4.22	13.27	0.53	0.00	8.94
P5	59.86	8.24	3.77	12.70	0.55	5.41	9.47
P10	58.20	7.32	3.75	11.16	0.33	9.87	9.37
P15	56.88	5.95	3.46	10.48	0.33	13.51	9.39
P20	53.12	6.76	3.27	9.70	0.22	17.53	9.40
M5	59.99	8.47	3.89	12.42	0.26	4.91	10.06
M10	57.37	8.46	3.65	11.25	0.39	9.08	9.80
M15	56.74	6.95	3.52	10.51	0.24	12.16	9.88
M20	54.33	5.45	3.37	9.99	0.21	17.53	9.12
G5	59.47	9.02	3.80	12.56	0.45	4.45	10.25
G10	57.91	8.72	3.57	11.80	0.29	8.03	9.68
G15	56.02	7.76	3.51	10.53	0.30	12.05	9.83
G20	51.23	6.01	3.28	9.79	0.25	19.86	9.58

Table 3 XRF analytical results of cement and RHA

Percentage	Cement Blank	Pristine RHA
SiO ₂	19.70	85.44
Al ₂ O ₃	4.73	0.30
Fe ₂ O ₃	3.05	0.12
CaO	64.74	0.70
MgO	2.06	0.04
K ₂ O	0.83	1.62
Na ₂ O	0.00	0.00
Other	4.89	11.78

The XRF analytical results of each sample summarized in Table 3 suggest the composition, contents of cement and pristine RHA. Meanwhile, the results of compressive strength of ready-mixed concrete incubated for 3, 7 and 28 days based on ASTM C192 were shown in Figure 1, respectively.

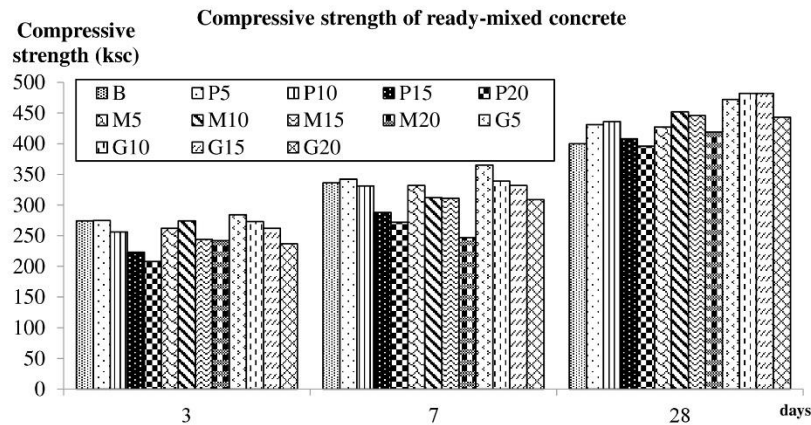


Figure 1 Compressive strength of ready-mixed concrete (3, 7 and 28 days)

4. Discussion

The main factors of the compressive strength of ready-mixed concrete incubated for 3, 7 and 28 days would rely on the value of specific surface area (cm^2/g) and content of SiO_2 . The best early compressive strength of ready-mixed concrete samples incubated for 3 and 7 days were achieved when the percentages of cement replaced by 5% rice husk ash (RHA) was used. It decreased appreciably as the percentage of RHA increased. The sample of G5 exhibited the highest strength because of its surface area and the amount of clinker content that was larger than others as shown in Table 2. This result would suggest that the pozzolanic reaction contributed by the ground RHA was more enhanced. Furthermore, an increase in the amount of RHA would reduce the amount of Alite in cement, resulting in the reduction of compressive strength because the Alite is a phase contributing to the early compressive strength. In Figure 2, it is found that by-product $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was likely to occur in the early compressive strength. Similarly, the pozzolanic reaction was also likely to occur as well as the reduction of $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

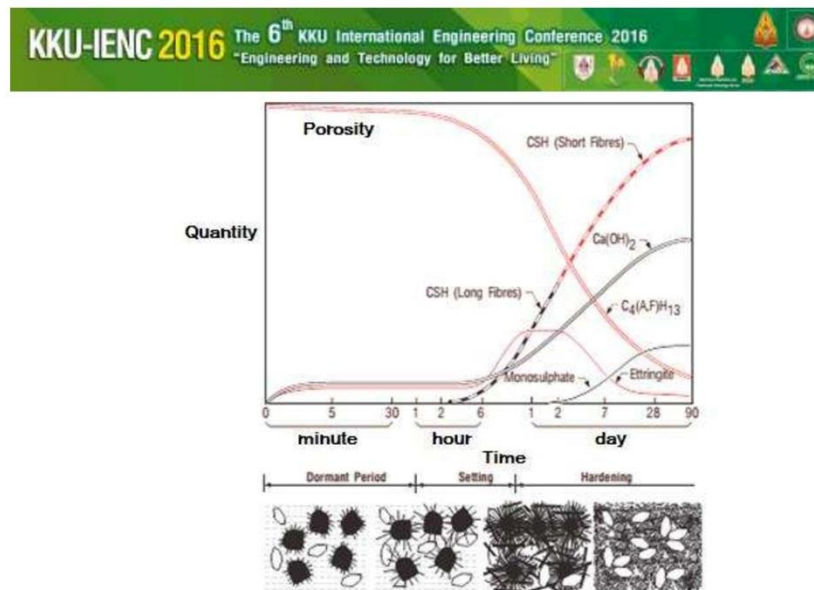


Figure 2 The hydration product development of cement hydration by time [6]

According to the late compressive strength of ready-mixed concrete incubated for 28 days, the sample of G10 and G15 exhibited higher strength than other samples. This result would be attributed to the amorphous silica content of the RHA and surface area which were of the most important constituents of Pozzolanic Cement as shown in Table 2. Due to an increase in the late-stage of the by-product Ca(OH)_2 as shown in Figure 2, the pozzolanic reaction with the amorphous SiO_2 content existing in RHA would result in calcium silicate hydrate (CSH), which is a phase contributing to the higher compression strength.

5. Conclusions

The ready mixed concrete quality can be improved by mixing with 10-15 percent by weight of RHA. The use of RHA with the fineness of $5100 \text{ cm}^2/\text{g}$ could increase the 28-day compressive strength of concrete approximately to 82 ksc due to the pozzolanic reaction. The improvement of concrete quality to enhance the properties and qualities of the concrete surface, minimize production expenses, and increase the value of high value-added products were experimentally



confirmed. As a result, the mixing of RHA, with control of the RHA fineness and mixing ratio between RHA and cement could benefit in production, and environment.

6. Acknowledgements

Technical support of Mr. Kamol Bangyeekhun, Promote Production Manager, SCG Cement (Thung Song) Co.,Ltd. and staff members of Department of Physic Testing & Chemical and X-ray Analysis in SCG Cement (Thung Song) Co.,Ltd. was gratefully acknowledged.

7. References

- [1] Luh BS, Rice: Production and Utilization, Avi Publishing Company, Westport, Connecticut; 1979.
- [2] Thai Industrial standard Institute, TIS 15 Part 1-2555 (2012): Portland cement Part 1 Specification, Bangkok: Ministry of Industry; 2012.
- [3] American Society for Testing and Materials, ASTM C33-01: Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia; 2001. p. 10-17.
- [4] Thai Industrial standard Institute, TIS 15-2521 (1978): Portland cement Part 6 Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, Bangkok: Ministry of Industry; 1998.
- [5] American Society for Testing and Materials, ASTM C192/C192 M-00: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia; 2001. p. 120-127.
- [6] The Siam Cement Group: Cement and Applications 1st Edition; 2005.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาณุพงศ์ พงษ์พิทักษ์กุล เกิดเมื่อวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2533 เข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอัสสัมชัญธนบุรี สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 ทำงานตำแหน่งวิศวกรส่วนส่งเสริมการผลิต บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (ทุ่งสง) จำกัด ในปี พ.ศ. 2556-2558 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต นอกเวลาราชการ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 และทำงานตำแหน่งวิศวกรกระบวนการผลิตวีซีเอ็ม 1 บริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) ในปี พ.ศ. 2559

