

การเตรียมคอนกรีตมวลเบาและมวลรวมเบาจากซีเมนต์มวล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Preparation of Lightweight Concrete and Lightweight Aggregate from Biomass Ash



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Materials Science

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมคอนกรีตมวลเบาและมวลรวมเบาจากขี้เถ้าชีว มวล
โดย	น.ส.อรปิยะ อังอติชาติ
สาขาวิชา	วัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.นิธิวัชร นวอัครฐานันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.นิธิวัชร นวอัครฐานันท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ ธีรภาพิเศษพงษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

อรรปิยะ อังอติชาติ : การเตรียมคอนกรีตมวลเบาและมวลรวมเบาจากขี้เถ้าชีวมวล. (Preparation of Lightweight Concrete and Lightweight Aggregate from Biomass Ash) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.นิธิวัชร นวอักษรฐานันท์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาการเตรียมมวลรวมเบาและคอนกรีตมวลเบาจากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เถ้าลอยจากโรงงานกระดาษ (CPFA1 และ CPFA2) เถ้าลอยกะลาและเปลือกมะพร้าว (CFA) เถ้าขานอ้อย (BA1 และ BA2) เถ้าปาล์มน้ำมัน (PA) เถ้าลอยเศษไม้ (WFA) และเถ้าแกลบ (RA) มวลรวมเบาถูกเตรียมขึ้นจากตัวอย่างเถ้าชีวมวลโดยการร่อนคัดขนาดที่ละเอียดกว่าตะแกรงร่อนเบอร์ 100 เมช (150 ไมครอน) ใช้งานปั่นเม็ดด้วยอัตราส่วนเถ้าและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 90 และ 10 โดยมวล ตามลำดับ มวลรวมที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 4.0 ถึง 16.0 มิลลิเมตร และมีค่าความหนาแน่นรวมระหว่าง 658 ถึง 1,104 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การดูดซึมน้ำของมวลรวมมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 18.46 ถึงร้อยละ 28.99 โดยมวล จากการทดสอบความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวพบว่าเม็ดมวลรวมอายุ 28 วันที่เตรียมขึ้นมีค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวสูงสุดถึง 843.53 นิวตัน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมพบว่าเม็ดมวลรวมจากเถ้า CPFA2 มีค่าความต้านแรงกดแตกที่สูงกว่า ในขณะที่มวลรวมจากเถ้า BA2 และเถ้า WFA มีค่าความต้านแรงกดแตกที่ใกล้เคียงกับเม็ดดินเผาพองตัวที่เป็นวัสดุทางการค้า แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของเม็ดมวลรวมและค่าดัชนีกำลังของเถ้าที่นำมาเป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูป เมื่อนำมวลรวมที่เตรียมได้ไปใช้แทนที่เม็ดดินเผาพองตัวในคอนกรีตพบว่าได้คอนกรีตมวลเบาที่มีความต้านแรงอัดระหว่าง 9.25 ถึง 28.34 เมกะพาสคัล แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการเตรียมเม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าชีวมวลด้วยการใช้งานปั่นเม็ดและความเป็นไปได้ในการนำเม็ดมวลรวมเบาดังกล่าวมาแทนที่เม็ดดินเผาพองตัวในคอนกรีตมวลเบาบางส่วนหรือทั้งหมด

สาขาวิชา วัสดุศาสตร์

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6072890723 : MAJOR MATERIALS SCIENCE

KEYWORD: lightweight aggregate, paper mill fly ash, coconut shell fly ash, bagasse ash, palm oil ash, wood chip fly ash, rice husk ash, cold-bonded pelletization

Ornpiya Aungatichart : Preparation of Lightweight Concrete and Lightweight Aggregate from Biomass Ash. Advisor: Asst. Prof. Dr. THANAKORN WASANAPIARNPONG Co-advisor: Dr. Nithiwach Nawaukkaratharnant

This study investigated the potential of the following biomass ashes as raw materials for artificial aggregates and their application in lightweight concrete: paper mill fly ash (CPFA1 and CPFA2), coconut shell fly ash (CFA), bagasse ash (BA1 and BA2), palm oil ash (PA), wood chip fly ash (WFA), and rice husk ash (RA). Lightweight aggregates were formed by cold bonded pelletization (CBP), using 90 mass% ash (after sieved through 100 mesh or 150 micron) and 10 mass% Portland cement. Bulk densities of the prepared biomass lightweight aggregates ranged from 658 to 1,104 kg/m³ for 4.0 to 16.0 mm pellet size. Water absorption rates were between 18.46 and 28.99%. The maximum single pellet crushing strength of the aggregates was as high as 843.53 N for 28-day aged CPFA1 aggregate. In comparison to the commercial expanded clay aggregate (ECA), CPFA2 aggregate performed better in terms of strength, while BA2 and WFA aggregates were also comparable to ECA. These findings suggested that the strength activity index (SAI) of ashes may have played a role in the contribution of the mechanical properties of aggregates as a pozzolanic material. 28-day compressive strength of cast lightweight concrete substituted with biomass ash aggregate ranged from 9.25 to 28.34 MPa. The results indicated the possibility of both full and partial replacement of ECA in lightweight concrete with CBP biomass ash aggregates.

Field of Study: Materials Science

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทุกท่านดังต่อไปนี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและการสนับสนุนตลอดการทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ได้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้ความกรุณา รวมทั้งสละเวลา อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำและปรึกษา ให้ความรู้ ตลอดจนช่วยปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ดร. นิธิวัชร นวอัครฐานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและปรึกษาตลอดการทำงานวิจัย ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อขอความอนุเคราะห์วัตถุិบบางส่วน ช่วยดำเนินการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุิบบด้วยเทคนิค X-Rays Fluorescence (XRF) และการวัดปริมาณกากค้ำตะแกรง รวมทั้งให้คำแนะนำในการตีพิมพ์ผลงานในวารสารทางวิชาการ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

อาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความเมตตา พี่เจ้าหน้าที่และบุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์และคณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกตลอดการศึกษาทำวิจัย

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) สำหรับการให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย

บริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ แพลนท์ 5 เอ จำกัด บริษัท มหาชัย กรีน เพาเวอร์ จำกัด บริษัท ไทยเคนเปเปอร์ จำกัด (มหาชน) บริษัท มิตรผล ไปโอ-เพาเวอร์ จำกัด บริษัท กลุ่มปาล์มธรรมชาติ จำกัด บริษัท สหกรีน ฟอเรสต์ จำกัด บริษัท ไทยเพิ่มพูนอุตสาหกรรม จำกัด บริษัท นครปฐมไปโอแมส จำกัด และบริษัท ไซมีส อีโกลท์ จำกัด สำหรับการให้ความอนุเคราะห์วัตถุิบบที่ใช้ในงานวิจัย

ครอบครัว เพื่อนฝูง และสัตว์เลี้ยงของผู้เขียนที่ให้ความช่วยเหลือ การสนับสนุน และกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

อรปิยะ อังอติชาติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แก้วชีวมวลในประเทศไทย	3
2.2 การจัดการแก้วชีวมวลโดยการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมคอนกรีต.....	5
2.2.1 การนำแก้วมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน.....	6
2.2.2 การนำแก้วขึ้นรูปเป็นวัสดุมวลรวมเบาเทียม	9
2.3 กรรมวิธีการขึ้นรูปมวลรวมเทียมด้วยงานปั้นเม็ด.....	10
2.4 วัสดุมวลรวมเบาดินเผาพองตัว	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	16
3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
3.1.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี	16

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	17
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	18
3.2.1 การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบ.....	18
3.2.2 การเตรียมตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาโดยการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ดยก และการศึกษาทดสอบสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า.....	20
3.2.2.1 การศึกษาอัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมต่อการเตรียมเม็ดมวลรวมเบา	20
3.2.2.2 การขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบาด้วยงานปั้นเม็ดยก	21
3.2.2.3 การศึกษาและทดสอบสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า.....	22
3.2.3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบาและการศึกษาสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า	25
3.3 แผนผังการทดลอง	27
3.3.1 การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบ.....	27
3.3.2 การทดลองส่วนที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาโดยการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ดยก การศึกษาและทดสอบสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า.....	28
3.3.3 การทดลองส่วนที่ 3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบา การศึกษาและทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	30
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบ	30
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	32
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส.....	33
4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค	35
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ	37

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น.....	41
4.1.6 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีกำลัง.....	41
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเม็ดมวลรวมเบา.....	43
4.2.1 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเฟส.....	45
4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค.....	46
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น.....	50
4.2.4 ผลการวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ.....	52
4.2.5 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว.....	55
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุมวลรวม.....	61
4.3.1 ผลวิเคราะห์ความหนาแน่น.....	61
4.3.2 ผลวิเคราะห์ความต้านแรงอัด.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.1.1 การศึกษาสมบัติของเถ้าชีวมวล.....	65
5.1.2 การเตรียมเม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ โดยใช้งานปั้นเม็ด.....	66
5.1.3 คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ เป็นวัสดุมวลรวม.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	109

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ส่วนผสมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์สำหรับทดสอบหาค่าดัชนีกำลัง	20
ตารางที่ 2 ส่วนผสมในการขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบาเพื่อศึกษาอัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม	21
ตารางที่ 3 สูตรส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาทางการค้าของผนังคอนกรีตมวลเบาสำเร็จรูปที่ใช้เม็ดดินเผาฟองตัวเป็นวัสดุมวลรวม.....	26
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ	33
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ Sieve analysis ของตัวอย่างเถ้าซีเมนต์	38
ตารางที่ 6 ขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ	39

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 การใช้งานเก้าอี้มวลในคอนกรีต.....	6
รูปที่ 2 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Cold bonded pelletization (CBP)	10
รูปที่ 3 ตัวอย่างเม็ดมวลรวมที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Cold bonded pelletization (CBP)	11
รูปที่ 4 เม็ดดินเผาพองตัวซึ่งมีโครงสร้างแบบ core-shell structure.....	11
รูปที่ 5 การใช้ประโยชน์เม็ดดินเผาพองตัวในงานคอนกรีต.....	12
รูปที่ 6 เม็ดมวลรวมเบาขนาดต่าง ๆ จากงานวิจัยของ Tang และคณะ	13
รูปที่ 7 ค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวจากงานวิจัยของ Tang และคณะ.....	14
รูปที่ 8 เม็ดมวลรวมที่ขึ้นรูปแบบ CBP 2 ขั้นตอน.....	14
รูปที่ 9 การดำเนินงานวิจัยทั้ง 3 ส่วน.....	16
รูปที่ 10 ตารางการเผา (firing schedule) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารอนินทรีย์ในตัวอย่างเก้าอี้มวลชนิดต่าง ๆ.....	18
รูปที่ 11 งานปั้นเม็ด.....	21
รูปที่ 12 ตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ด โดยกรรมวิธี Pelletization... ..	22
รูปที่ 13 เครื่อง Universal testing machine (UTM)	24
รูปที่ 14 รูปแบบการทดสอบสมบัติความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว	25
รูปที่ 15 แผนผังการทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ	27
รูปที่ 16 แผนผังการทดลองส่วนที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาโดยการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ด การศึกษาและทดสอบสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า	28
รูปที่ 17 แผนผังการทดลองส่วนที่ 3 การเตรียมตัวอย่างขึ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบา การศึกษาและทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า.....	29

รูปที่ 18 (ก)เม็ดล่อยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA1) (ข)เม็ดล่อยกะลาและเปลือกมะพร้าว (CFA) (ค)เม็ดล่อยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA2) (ง)เม็ดล่อยขี้เถ้า (BA1) (จ)เม็ดล่อยปาล์มน้ำมัน (PA) (ฉ)เม็ดล่อยเศษไม้ (WFA) (ฉ)เม็ดล่อยขี้เถ้า (BA2) และ (ซ)เม็ดล่อย (RA).....	31
รูปที่ 19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุดิบ.....	34
รูปที่ 20 โครงสร้างทางจุลภาคของ (ก)เม็ดล่อย CPFA1 (ข)เม็ดล่อย CFA (ค)เม็ดล่อย CPFA2 (ง)เม็ดล่อย BA1 (จ)เม็ดล่อย PA (ฉ)เม็ดล่อย WFA (ฉ)เม็ดล่อย BA2 และ (ซ)เม็ดล่อย RA	36
รูปที่ 21 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ (Particle size distribution)	40
รูปที่ 22 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมของวัสดุดิบ (Cumulative particle size distribution). 40	
รูปที่ 23 ความหนาแน่น (loose bulk density) ของตัวอย่างเม็ดล่อย.....	41
รูปที่ 24 ค่าดัชนีกำลังของเม็ดล่อย.....	42
รูปที่ 25 ตัวอย่างเม็ดล่อยรวมเบ้าที่เตรียมจาก (ก)เม็ดล่อย CPFA1 (ข)เม็ดล่อย CFA (ค)เม็ดล่อย CPFA2 (ง)เม็ดล่อย BA1 (จ)เม็ดล่อย PA (ฉ)เม็ดล่อย WFA (ฉ)เม็ดล่อย BA2 และ (ซ)เม็ดล่อย RA.....	44
รูปที่ 26 XRD pattern ของเม็ดล่อยรวมเบ้าที่เตรียมจากเม็ดล่อยชนิดต่าง ๆ.....	45
รูปที่ 27 โครงสร้างทางจุลภาคของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของเม็ดล่อยรวมเบ้าที่เตรียมจาก (ก)เม็ดล่อย CPFA1 (ข)เม็ดล่อย CFA (ค)เม็ดล่อย CPFA2 (ง)เม็ดล่อย BA1 (จ)เม็ดล่อย WFA (ฉ)เม็ดล่อย BA2 และ (ซ)เม็ดล่อย RA	47
รูปที่ 28 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของเม็ดล่อยรวมเบ้าที่เตรียมจากเม็ดล่อย CPFA1	48
รูปที่ 29 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของเม็ดล่อยรวมเบ้าที่เตรียมจากเม็ดล่อย CPFA2	48
รูปที่ 30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของเม็ดล่อยรวมเบ้าที่เตรียมจากเม็ดล่อย WFA.....	49
รูปที่ 31 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของเม็ดล่อยรวมเบ้าที่เตรียมจากเม็ดล่อย BA2.....	49
รูปที่ 32 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของเม็ดล่อยรวมเบ้าที่เตรียมจากเม็ดล่อย RA.....	50

รูปที่ 33 ความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเม็ดมวลรวมเบาเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า	51
รูปที่ 34 การดูดซึมน้ำของเม็ดมวลรวมเบาเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า	53
รูปที่ 35 โครงสร้างรูพรุนของเม็ดดินเผาฟองตัว (expanded clay aggregate, ECA).....	54
รูปที่ 36 โครงสร้างรูพรุนของเม็ดมวลรวมเบาที่ขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ด	54
รูปที่ 37 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว (Single pellet crushing strength) ของเม็ดมวลรวมเบาที่มีอายุ 7 วัน เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า	57
รูปที่ 38 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว (Single pellet crushing strength) ของเม็ดมวลรวมเบาที่มีอายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า	57
รูปที่ 39 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบาดินเผาฟองตัว (ECA).....	58
รูปที่ 40 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา CPFA1 ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน	58
รูปที่ 41 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา CPFA2 ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน	58
รูปที่ 42 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา CFA ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน.....	59
รูปที่ 43 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา BA1 ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน.....	59
รูปที่ 44 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา BA2 ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน.....	59
รูปที่ 45 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา PA ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน.....	60
รูปที่ 46 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา WFA ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน	60
รูปที่ 47 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา RA ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน.....	60
รูปที่ 48 ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุมวลรวมเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า.....	62
รูปที่ 49 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 7 และ 28 วัน ที่มีเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุมวลรวมเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า.....	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตร ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งเกิดขึ้นจากกระบวนการทางการเกษตรและการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรมากมาย เช่น เศษไม้ แกลบจากการสีข้าว เศษลำต้น ใบ และขานอ้อยจากการผลิตน้ำตาล เศษเยื่อกระดาษจากการผลิตกระดาษ เศษกะลา กากเฝ้าย และต้นปาล์มน้ำมันจากการผลิตน้ำมันปาล์ม และเศษกะลาและเปลือกมะพร้าวจากการผลิตน้ำมันมะพร้าว เป็นต้น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่าง ๆ เหล่านี้จัดเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่ง และกำลังเป็นที่นิยมในการนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับให้ความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้า โดยกระบวนการเผาเชื้อเพลิงดังกล่าวก่อให้เกิดของเสีย คือ เถ้าชีวมวล ได้แก่ เถ้าเศษไม้ เถ้าแกลบ เถ้าขานอ้อย เถ้าเยื่อกระดาษ เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว ซึ่งมีน้ำหนักเบา ลักษณะเป็นฝุ่นฟุ้งกระจาย มีปริมาณมาก และก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ดังนั้นของเสียประเภทเถ้าชีวมวลเหล่านี้จึงจำเป็นต้องได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมและถูกวิธี หรือนำมาแปรรูปใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

รูปแบบหนึ่งของการจัดการของเสียอุตสาหกรรมประเภทเถ้าคือ การนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุมวลรวมเบาเทียมเพื่อใช้แทนหินในคอนกรีต งานวิจัยที่ได้มีการรายงานไว้ในวรรณกรรมได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าจากอุตสาหกรรมในการขึ้นรูปมวลรวมเบาได้เป็นปริมาณมากถึงอัตราส่วนร้อยละ 95 โดยมวล และไม่จำเป็นต้องมีการบด หรือมีการบดเถ้าเพื่อลดขนาดอนุภาคเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การขึ้นรูปมวลรวมเบาโดยไม่ใช้ความร้อนด้วยการใช้งานปั้นเม็ด คือ กระบวนการที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุผงเป็นเม็ดมวลรวม โดยผงเถ้าจะถูกเติมลงไปในงานปั้นเม็ดซึ่งกำลังหมุนไป จากนั้นวัสดุเชื่อมประสาน เช่น ปูนซีเมนต์และน้ำ รวมทั้งสารเติมแต่งอื่น ๆ จะถูกเติมลงไปในงานที่กำลังหมุนอยู่นี้ ปูนซีเมนต์และน้ำจะทำปฏิกิริยากันกลายเป็นวัสดุเชื่อมประสานทำหน้าที่ยึดจับอนุภาคผงเถ้าให้รวมตัวกันเป็นก้อน และเมื่อกระบวนการดำเนินไปเป็นระยะเวลาหนึ่งจะได้เป็นเม็ดมวลรวม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าสามารถทำการแปรรูปเถ้าอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ ด้วยกระบวนการขึ้นรูปมวลรวมเบาโดยไม่ใช้ความร้อนด้วยการใช้งานปั้นเม็ด เป็นมวลรวมเบาเทียมได้อย่างประสบความสำเร็จจากเถ้าลอยถ่านหิน เถ้าหนักถ่านหิน และเถ้าจากการเผาขยะ ได้เม็ดมวลรวมเบาเทียมที่มีสมบัติ น้ำหนักเบา โดยมีความหนาแน่นต่ำสุด 980 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จัดว่าเป็นมวลรวมเบาที่มีความแข็งแรงสูง โดยมีความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวสูงสุด 650 นิวตัน และเมื่อนำไปใช้เป็นมวลรวมเสริมแรงคอนกรีต

ทำให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา และความต้านแรงอัดปานกลาง เหมาะกับการใช้งานเป็นคอนกรีตมวลเบาแบบไม่รับแรง

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการนี้มาใช้ขึ้นรูปของเสียประเภทเถ้าชีวมวลเป็นมวลรวมเบาสำหรับใช้งานในคอนกรีตมวลเบา รวมทั้งยังไม่มีการศึกษาสมบัติของมวลรวมเบาที่ผลิตจากเถ้าชีวมวลโดยกระบวนการดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เถ้าเฝือกกระดาษ เถ้าเศษไม้ เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย และเถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว มาใช้เป็นวัตถุดิบขึ้นรูปมวลรวมเบาด้วยกระบวนการขึ้นรูปโดยไม่ใช้ความร้อนโดยใช้งานบดเม็ด พร้อมทั้งทำการศึกษาสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับเม็ดมวลรวมเบาดินเผาพองตัวซึ่งเป็นวัสดุทางการค้าที่ใช้เป็นมวลรวมในการผลิตแผ่นผนังคอนกรีตมวลเบาสำเร็จรูปแบบไม่รับแรง รวมทั้งนำเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้จากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ ไปใช้เป็นวัสดุผสมเสริมแรงในคอนกรีตมวลเบา และศึกษาสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่เตรียมโดยการอ้างอิงจากสูตรคอนกรีตที่ใช้ในการผลิตแผ่นผนังคอนกรีตมวลเบาแบบไม่รับแรง เพื่อให้ได้แนวทางในการจัดการกับของเสียอุตสาหกรรมประเภทเถ้าชีวมวล รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียดังกล่าว และได้คอนกรีตมวลเบาที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาผลของเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ ต่อการเตรียมมวลรวมเบา
- 1.2.2 ศึกษาสมบัติของมวลรวมเบาและคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมได้เทียบกับวัสดุทางการค้า

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้คอนกรีตมวลเบาและมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าชีวมวลซึ่งมีความแข็งแรงเทียบเท่าหรือสูงกว่าวัสดุทางการค้า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เถ้าชีวมวลในประเทศไทย

จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) [1] กระทรวงพลังงานได้ให้ความสำคัญต่อการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนดังเช่นการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลต่าง ๆ มีการรายงานในปี พ.ศ. 2557 เชื้อเพลิงชีวมวลถูกจัดเป็นพลังงานทดแทนที่มีสัดส่วนการใช้งานผลิตความร้อนมากที่สุด โดยมีสัดส่วนคิดเป็นร้อยละ 89 ของการผลิตพลังงานความร้อนจากพลังงานทดแทนทั้งหมด และได้มีการรายงานในปี พ.ศ. 2552 ว่าสัดส่วนการใช้งานชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตความร้อนและพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้ารวมทั้งโลกมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 8 – 15 และมีแนวโน้มการใช้งานเติบโตอย่างต่อเนื่อง [2-4]

อย่างไรก็ตาม การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลก่อให้เกิดของเสีย คือ เถ้าชีวมวล (biomass ash) ซึ่งมีน้ำหนักเบา ลักษณะเป็นฝุ่นฟุ้งกระจาย มีปริมาณมาก และก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ในปี พ.ศ. 2555 พบว่า การใช้ชีวมวลประเภท แกลบ ชานอ้อย เศษเยื่อกระดาษ และเศษต้นปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าก่อให้เกิดซีเถ้ารวมกันเป็นปริมาณมากถึง 1.5 ล้านตัน [5] ปัจจุบัน การกำจัดโดยการฝังกลบยังคงเป็นแนวทางหลักในการจัดการกับของเสียประเภทเถ้าชีวมวลทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม การกำจัดของเสียด้วยวิธีการดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะส่งผลเสียในระยะยาวทั้งในทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม [6, 7] ดังนั้นของเสียประเภทเถ้าชีวมวลเหล่านี้จึงจำเป็นต้องได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมและถูกวิธี หรือนำมาแปรรูปใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าเถ้าชีวมวลหลักในประเทศไทยได้แก่ เถ้าแกลบ (rice husk ash) เถ้าชานอ้อย (bagasse ash) เถ้าเยื่อกระดาษ (pulp and paper ash) เถ้าปาล์มน้ำมัน (palm oil ash) เถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว (coconut shell ash) และเถ้าเศษไม้ (wood chip ash) ซึ่งจะได้มีการอธิบายเพิ่มเติมในลำดับต่อไป

เนื่องจากข้าวเป็นหนึ่งในผลผลิตทางเกษตรกรรมที่สำคัญของประเทศไทย แกลบซึ่งมีน้ำหนักร้อยละ 23 โดยมวลของข้าวเปลือกและเป็นเศษเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตข้าว [8] จึงเป็นหนึ่งในชีวมวลหลักที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทย [9] โดยในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีการใช้แกลบเป็นปริมาณมากถึง 6 ล้านตันในการผลิตกระแสไฟฟ้า [10] ก่อให้เกิดของเสียประเภทเถ้าแกลบขึ้น เถ้าแกลบนี้มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกา (SiO_2) ซึ่งอาจพบได้ทั้งในรูปผลึก

(crystalline) ผลึกบางส่วน (partial crystalline) และอสัณฐาน (amorphous) [11, 12] นอกจากนี้ยังอาจมีสารเคมีอื่นปะปนมาเป็นองค์ประกอบรองได้ เช่น CaO MgO K_2O Al_2O_3 Fe_2O_3 หรือ Na_2O [13]

ในปี 2560 ประเทศไทยมีการเก็บเกี่ยวอ้อยเป็นปริมาณ 134.9 ล้านตัน และมีแนวโน้มมากขึ้นมาตลอด 10 ปีที่ผ่านมา [14] เถ้าชานอ้อยเป็นของเสียที่เกิดจากการเผาชานอ้อยหรือกากชานอ้อยที่ได้จากการผลิตน้ำตาล โดยมักถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในโรงงานน้ำตาลเองและบางส่วนขายให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [15] เถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบหลักทางเคมีได้แก่ ซิลิกา และอะลูมินา (Al_2O_3) ประมาณร้อยละ 60 และร้อยละ 9 โดยมวลตามลำดับ มีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหรือ Loss on Ignition (LOI) แตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 0 – 17 โดยมวล [16]

โรงงานผลิตกระดาษมักมีการใช้ของเสียจากกระบวนการผลิต ได้แก่ เปลือกไม้ และเยื่อกระดาษ เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตกระแสไฟฟ้า รวมทั้งพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ ซึ่งก่อให้เกิดของเสียประเภทเถ้าเยื่อกระดาษขึ้น เถ้าชนิดนี้มีองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) และอาจมีองค์ประกอบรองทางเคมีเป็นออกไซด์ของโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น CaO MgO K_2O Na_2O TiO_2 หรือ SO_3 ในปริมาณแตกต่างกันไป [17] มีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบโดยเฉลี่ยร้อยละ 20 – 30 โดยมวล [18-20] โดยทั่วไปเถ้าเยื่อกระดาษมีขนาดอนุภาคประมาณ 150 – 250 ไมครอน [21, 22] ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของเถ้าลอยถ่านหิน [18] เถ้าชนิดนี้ยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเนื่องจากลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน พื้นผิวขรุขระ และความพรุนตัวสูง [23]

เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นของเสียที่เกิดจากการเผาเศษกะลา เส้นใย และทลายของปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในประเทศไทยมีเถ้าปาล์มน้ำมันเกิดขึ้นประมาณ 100,000 ตันต่อปี [24, 25] เถ้าชนิดนี้มีองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ ซิลิกา เป็นปริมาณร้อยละ 50 – 70 โดยมวล [25, 26] มีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 2 – 20 โดยมวล [26] อย่างไรก็ตามค่าปริมาณสารอินทรีย์นี้จะขึ้นกับปัจจัยในกระบวนการเผา เช่น อุณหภูมิ ชนิดเตาเผา เชื้อเพลิงรอง ฯลฯ ซึ่งแต่ละโรงไฟฟ้ามีความแตกต่างกัน โดยทั่วไปเถ้าปาล์มน้ำมันที่ยังไม่ผ่านกระบวนการบดจะมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 100 ไมครอน และมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคขรุขระ และมีรูพรุนแบบเปิด [25]

มะพร้าวเป็นพืชทางการเกษตรที่มีการปลูกทั่วโลกมากกว่า 90 ประเทศ และมีผลผลิตทางเกษตรกรรมเป็นปริมาณมากกว่า 59 ล้านตันต่อปี [27] โดยเศษกะลาและเปลือกมะพร้าวมักถูกกำจัดโดยการนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงก่อให้เกิดของเสียประเภทเถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุอสัณฐานที่มีองค์ประกอบทางเคมีหลักได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา ไอรอนออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์

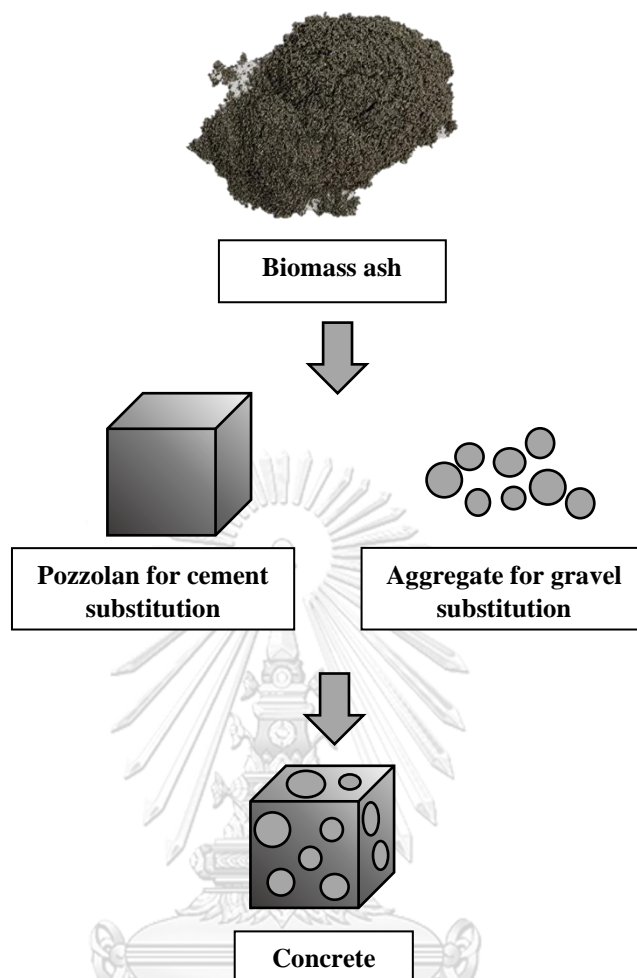
(CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) [27-29] มีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 7 – 10 โดยมวล [29, 30] และขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ประมาณ 71 ไมครอน [28]

อีกหนึ่งในชีวมวลที่นิยมนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าคือ เศษไม้ ซึ่งนำไปสู่การเกิดของเสีย คือ เถ้าเศษไม้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าเถ้าเศษไม้มีองค์ประกอบหลักทางเคมีที่คล้ายกับเถ้าชีวมวลชนิดอื่น คือ ซิลิกา อะลูมินา ไอรอนออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ โดยอาจมีองค์ประกอบทางเคมีรอง เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) เป็นต้น ได้มีการรายงานไว้ในวรรณกรรมว่าเถ้าชนิดนี้มักมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 10 - 30 ไมครอน [31-33]

2.2 การจัดการเถ้าชีวมวลโดยการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมคอนกรีต

เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเถ้าชีวมวล อันได้แก่ เถ้าแกลบ เถ้าชานอ้อย เถ้าเยื่อกระดาษ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว และเถ้าเศษไม้ นั้นแล้ว อาจมีการนำเถ้าชีวมวลไปใช้งานให้เกิดประโยชน์เป็นปุ๋ยหรือเป็นสารเติมแต่งในปุ๋ยเคมีสำหรับการทำเกษตรกรรมได้ อย่างไรก็ตาม ลักษณะการใช้งานดังกล่าวมีความต้องการรองรับปริมาณปุ๋ยเคมีน้อย ไม่เพียงพอต่อปริมาณของเสียประเภทเถ้าชีวมวลที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ในขณะเดียวกัน อุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทยมีการใช้งานคอนกรีตในการก่อสร้างเป็นปริมาณสูงถึง 34 ล้านตันต่อปี [34] แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของอุตสาหกรรมก่อสร้างและความต้องการหรือ Demand ในการจัดการเถ้าชีวมวลอย่างเพียงพอ จะเห็นได้ว่าวิธีการจัดการกับเถ้าชีวมวลอย่างเป็นประโยชน์และเหมาะสมที่สุด คือ การนำมาใช้งานในคอนกรีตในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

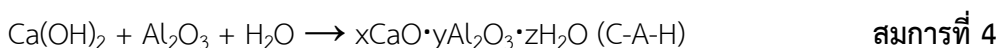
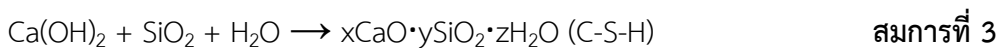
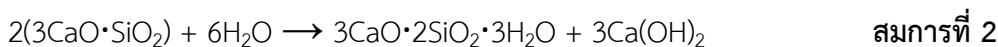
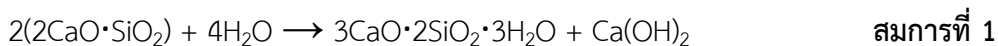
จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า การนำเถ้าซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้งานในคอนกรีตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolan) เพื่อทดแทนปูนซีเมนต์ในคอนกรีต และการนำเถ้ามาขึ้นรูปเป็นวัสดุมวลรวมเบาเทียม (artificial lightweight aggregate) เพื่อใช้แทนหินในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การใช้งานเถ้าชีวมวลในคอนกรีต

2.2.1 การนำเถ้ามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

มาตรฐาน ASTM C 618 ได้ให้คำจำกัดความวัสดุปอซโซลานไว้ว่าเป็นวัสดุที่มี SiO_2 หรือ SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก โดยมีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 70 โดยมวล โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานดังปูนซีเมนต์ แต่เมื่อถูกบดให้มีขนาดอนุภาคละเอียดมากและอยู่ในสถานะที่มีน้ำหรือความชื้น จะสามารถทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ของปูนซีเมนต์ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 ได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ดังสมการที่ 3 และ 4 โดย C-S-H และ C-A-H ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงในระยะยาวให้กับคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความต้านแรงอัด (compressive strength) เพิ่มขึ้น



ปัจจุบันได้มีงานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศทำการศึกษาการนำเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ มาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตมากมาย

การทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดการเถ้ากลบอย่างยั่งยืนได้รายงานว่ เถ้ากลบที่มีความเป็นอสัณฐานมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีต [11] โดยเถ้าที่มีคุณภาพเหมาะสมต่อการใช้งานในคอนกรีตมักต้องมีการคัดขนาด รวมทั้งควบคุมกระบวนการเผาอย่างใกล้ชิดซึ่งสามารถทำได้ยากในเชิงปฏิบัติ [13] จากงานวิจัยที่ทำการศึกษการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีตด้วยเถ้ากลบร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยมวล พบว่าคอนกรีตมีความต้านทานแรงอัดลดลงจากคอนกรีตที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้ากลบในปริมาณดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 8.0 8.0 34.81 และ 40.62 ตามลำดับ และยังพบว่าคอนกรีตยังมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอีกด้วย [35] ในกรณีที่มีการเติมเถ้ากลบมีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตพบว่าจำเป็นต้องมีการบดเถ้ากลบเพื่อลดขนาดอนุภาคให้มีความละเอียดมากเพื่อเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างไรก็ตาม เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้ากลบในปริมาณที่มากเกินไปร้อยละ 10 โดยมวล พบว่าความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลง เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ซึ่งทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำและมีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานหลักนั้นถูกลดลง และถึงแม้เถ้ากลบจะทำปฏิกิริยากับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เกิดเป็น C-S-H และ C-A-H แต่ก็ไม่เพียงพอที่จะชดเชยสารประกอบหลักที่ถูกแทนที่ไป [36]

งานวิจัยที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติปอซโซลานของเถ้าชานอ้อยกับซิลิกาทั้งที่มีรูปผลึกควอตซ์ (quartz) และซิลิกาฟุ้ง (silica fume) ได้รายงานว่ เถ้าชานอ้อยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เหมือนซิลิกา เนื่องจากพบการเกิดเฟสของ C-S-H เมื่อทำการตรวจสอบตัวอย่างด้วย X-Ray Diffraction (XRD) และ Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) แต่มีดัชนีความเป็นปอซโซลานต่ำกว่าซิลิกาฟุ้งเป็นอย่างมาก [37] สำหรับในประเทศไทยได้มีงานวิจัยนำเถ้าชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์ พบว่าเมื่อทำการบดเถ้าชานอ้อยให้มีขนาดอนุภาค 10 ไมครอน สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 20 โดยมวล โดยหากมีการเพิ่มเถ้าเป็นปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 30

โดยมวลจะส่งผลให้ความแข็งแรงของซีเมนต์เพสต์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [38] และเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคของเถ้าขานอ้อยมีความพรุนตัวสูง มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าชนิดนี้ จะมีความต้องการน้ำเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 121 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ในการทดลอง [39]

ได้มีงานวิจัยทำการศึกษาศักยภาพของการนำเถ้าเยื่อกระดาษจากโรงงานผลิตกระดาษไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยนำเถ้าเยื่อกระดาษไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 โดยมวล พบว่า สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ในลักษณะเดียวกันกับเถ้าลอยประเภท C ตามนิยามของ EN 450 แต่ซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมเถ้าชีวมวลเข้าไปจะมีความต้องการน้ำมากกว่าและใช้เวลาในการก่อตัว (setting time) นานกว่าซีเมนต์เพสต์ควบคุม [40] นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณแทนที่ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 20 โดยมวล หากมีการเติมเถ้าเยื่อกระดาษไปในปริมาณที่มากกว่านี้จะส่งผลให้ความต้านแรงอัดของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ลดลง

สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน ได้มีงานวิจัยศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต โดยพบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าซึ่งมีขนาด 183 ไมครอน ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ จำเป็นต้องมีการบดให้มีขนาดละเอียด 15.9 ไมครอน จึงสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ร้อยละ 20 โดยมวล และถ้าหากต้องการใช้ในปริมาณที่มากขึ้นเป็นร้อยละ 30 โดยมวล จำเป็นต้องมีการบดเถ้าให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงถึง 7.4 ไมครอน จึงจะสามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ได้ [25] เมื่อมีการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณเฟสของเจล C-S-H ที่เกิดขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่น ความแข็งแรง และความคงทนเพิ่มขึ้นได้ [41] ข้อเสียเปรียบหนึ่งของเถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าชีวมวลโดยทั่วไป คือ ปริมาณค่า LOI ที่ค่อนข้างสูง [42] ส่งผลให้เมื่อนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตแล้วจะทำให้สมบัติการไหลตัวของเพสต์เปลี่ยนไป และจำเป็นต้องมีการเติมสารเติมแต่งประเภท superplasticizer เพิ่มเติม [43]

ในส่วนของเถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว ได้มีงานวิจัยทำการศึกษาศักยภาพของเถ้าดังกล่าวในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในคอนกรีต โดยพบว่าอัตราส่วนของการทดแทนที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตโครงสร้าง คือ ร้อยละ 5 – 15 โดยมวล นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่าการควบคุมความชื้นน้ำของคอนกรีตมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาณสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว ในขณะที่ความสามารถเทได้ (workability) แปรผกผันกับสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าชีวมวลชนิดดังกล่าว [30] ในขณะที่อีกงานวิจัยหนึ่งได้มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าวสูงถึงร้อยละ 30 โดยมวล สำหรับใช้ในการเตรียมอิฐบล็อกคอนกรีต โดยพบว่าสามารถเตรียมอิฐบล็อกคอนกรีตที่มีความต้านแรงอัดได้ 25.65 เมกะพาสคัล จากการทดแทนปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากะลามะพร้าวขนาดอนุภาค 120 ไมครอน [44]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าในงานวิจัยหนึ่งที่มีการนำเถ้าเศษไม้มาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในคอนกรีตได้มีการรายงานว่าสมบัติความต้านแรงอัดของคอนกรีต

ลดลงมากถึงร้อยละ 70 เมื่อมีการทดแทนปูนซีเมนต์ทั้งหมดด้วยเถ้าชีวมวลชนิดนี้ [32] ในขณะที่อีกงานวิจัยหนึ่งได้มีการรายงานที่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของตัวอย่างคอนกรีตได้โดยทำการชะล้างเถ้าเศษไม้ก่อนการนำมาใช้งาน โดยพบว่าในการนำเถ้าเศษไม้มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในคอนกรีต หากทำการชะล้างเถ้าก่อนจะสามารถเพิ่มค่าความต้านแรงอัดได้สูงสุดถึงร้อยละ 15 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าเศษไม้โดยไม่ผ่านการชะล้างก่อน [31]

จากงานวิจัยข้างต้น เห็นได้ว่าเถ้าชีวมวลมีสมบัติเชิงเคมีเหมาะสมในการนำมาใช้งานเป็นวัสดุปอซโซลาน อย่างไรก็ตาม การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะขึ้นกับขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้า [45-47] โดยเถ้าที่ได้จากการเผาชีวมวลผลิตภัณฑ์ไฟฟ้ามักมีขนาดอนุภาคมากกว่า 100 ไมครอน และจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ จำเป็นต้องมีการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคของเถ้าให้เล็กลงหรือมีการเติมสารเคมีเติมแต่งอื่น ๆ เพิ่มเติม ซึ่งในทางปฏิบัติจริงจะจำเป็นต้องใช้พลังงานและต้นทุนสูง ทำให้ไม่สามารถแข่งขันกับต้นทุนของวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นหรือปูนซีเมนต์ที่มีการใช้งานอยู่แล้วทั่วไปได้ นอกจากนี้ สมบัติทางเคมีของเถ้ายังไม่คงที่ มีความสม่ำเสมอต่างจากเถ้าถ่านหิน เพราะมาจากการเผาพืชผลทางการเกษตรซึ่งมีปริมาณธาตุและองค์ประกอบทางเคมีหลากหลายแตกต่างกันไป ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดพืชพันธุ์ แหล่งที่ปลูก กรรมวิธีการปลูก ฯลฯ ประกอบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีส่วนผสมของเถ้าชีวมวลจะมีความต้องการน้ำมากกว่าซีเมนต์เพสต์ปกติ [25, 48] ส่งผลต่อค่าความต้านแรงอัดของคอนกรีตดังที่ได้กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ มากไปกว่านั้น การทบทวนงานวิจัยในวรรณกรรมยังพบว่าสามารถใช้เถ้าชีวมวลมาทดแทนปูนซีเมนต์ได้สูงสุดเพียงร้อยละ 30 โดยมวลเท่านั้น การใช้เถ้าในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้ความแข็งแรงของมอร์ตาร์และคอนกรีตลดลง [25] ด้วยเหตุนี้การนำเถ้าชีวมวลมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตยังคงมีอุปสรรคในการใช้งานอยู่ ทำให้ไม่สามารถนำแนวทางนี้ไปใช้จัดการกับเถ้าชีวมวลได้จริงในเชิงอุตสาหกรรม

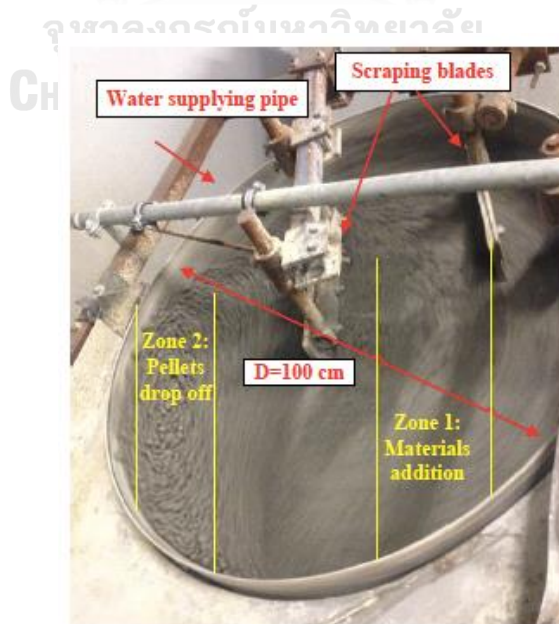
2.2.2 การนำเถ้ามาขึ้นรูปเป็นวัสดุมวลรวมเบาเทียม

อีกหนึ่งรูปแบบการจัดการของเสียอุตสาหกรรมประเภทเถ้าคือ การนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุมวลรวมเบาเทียมเพื่อใช้แทนหินในคอนกรีต โดยงานวิจัยในวรรณกรรมได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าจากอุตสาหกรรมในการขึ้นรูปมวลรวมเบาได้เป็นปริมาณมากถึงร้อยละ 95 โดยมวล [49, 50] ซึ่งมากกว่าการใช้เถ้าเป็นวัสดุปอซโซลาน อีกข้อได้เปรียบของการจัดการเถ้าในลักษณะนี้คือ ไม่จำเป็นต้องมีการบด หรือมีการบดเถ้าเพื่อลดขนาดอนุภาคเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การขึ้นรูปวัสดุมวลรวมเบาโดยมีเถ้าเป็นวัตถุดิบสามารถทำได้โดยการใช้ความร้อนในการขึ้นรูปหรือเผาผนึก [50] และการขึ้นรูปมวลรวมเบาโดยไม่ใช้ความร้อนด้วยการใช้งานบั่นเม็ด หรือ Cold bonded pelletization (CBP) [48, 49] การขึ้นรูปโดยการเผาทำให้ได้เม็ดมวลรวมเบาเทียมที่มีสมบัติ มีน้ำหนักเบา ความ

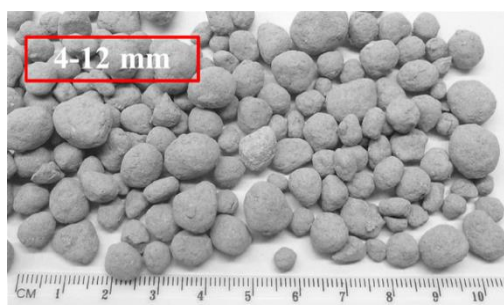
แข็งแรงสูง แต่มีข้อเสียเปรียบคือใช้พลังงานสูง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงตามไปด้วย ในขณะที่เดียวกัน การขึ้นรูปมวลรวมเบาโดยไม่ใช้ความร้อน หรือ Cold bonded pelletization เป็นวิธีการขึ้นรูปมวลรวมเบาที่ใช้พลังงานน้อยกว่าการเผาไหม้ รวมทั้งยังมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า [51] ได้มีการรายงานไว้ในวรรณกรรมว่าสามารถทำการแปรรูปเถ้าอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ ด้วยกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้เทคนิค CBP เป็นมวลรวมเบาเทียมได้อย่างประสบความสำเร็จจากเถ้าลอยถ่านหิน (coal fly ash) [49, 51, 52] เถ้าหนักถ่านหิน (coal bottom ash) [53] และเถ้าจากการเผาขยะ (municipal waste ash) [48, 54] ได้เม็ดมวลรวมเบาเทียมที่มีสมบัติดี น้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง และเมื่อนำไปใช้เป็นมวลรวมเสริมแรงคอนกรีตทำให้ได้คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบา และค่าความต้านแรงอัดปานกลาง [48, 53, 54]

2.3 กรรมวิธีการขึ้นรูปมวลรวมเทียมด้วยงานปั้นเม็ด

การขึ้นรูปมวลรวมเทียมด้วยวิธี Cold bonded pelletization (CBP) โดยการใช้งานปั้นเม็ด คือ กระบวนการที่ใช้ขึ้นรูปวัสดุผงเป็นเม็ดมวลรวมโดยไม่ใช้ความร้อน ในการขึ้นรูปเม็ดมวลรวมด้วยวิธีนี้ ผงเถ้าและวัสดุเชื่อมประสาน เช่น ปูนซีเมนต์ จะถูกเติมลงไปบริเวณ Zone 1: Materials addition ของงานปั้นเม็ดซึ่งวางตัวเป็นมุม 45 องศากับแนวตั้งฉากและกำลังหมุนไป ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นน้ำ รวมทั้งสารเติมแต่งอื่น ๆ จะถูกเติมลงไปในงานที่กำลังหมุนอยู่นี้ ปูนซีเมนต์และน้ำจะทำปฏิกิริยากันกลายเป็นวัสดุเชื่อมประสานทำหน้าที่ยึดจับอนุภาคผงเถ้าให้รวมตัวกันเป็นก้อนในบริเวณ Zone 2: Pellets drop off และเมื่อกระบวนการดำเนินไปได้เป็นเม็ดมวลรวมลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Cold bonded pelletization (CBP) [55]



รูปที่ 3 ตัวอย่างเม็ดมวลรวมที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Cold bonded pelletization (CBP) [54]

2.4 วัสดุมวลรวมเบาดินเผาฟองตัว

มวลรวมดินเผาฟองตัว (expanded clay aggregate) คือ วัสดุมวลรวมเบาที่เตรียมโดยการนำเม็ดดินเหนียวไปเผาในเตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) ณ อุณหภูมิสูงประมาณ 1200°C ขึ้นไป จนเม็ดดินเหนียวเกิดการขยายตัวเนื่องจากเกิดการสลายตัวของแก๊สและสารอนินทรีย์ภายในเนื้อดิน ทำให้มีรูพรุนและโพรงอากาศเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุจำนวนมาก และเมื่อเม็ดดินเผาอุณหภูมิลดลงจะเกิดเปลือกนอกที่มีลักษณะแข็งหุ้มโครงสร้างที่มีรูพรุนข้างในไว้ ได้เม็ดมวลรวมที่มีโครงสร้างลักษณะ core-shell structure ดังแสดงในรูปที่ 4 ด้วยลักษณะโครงสร้างดังกล่าวเม็ดดินเผาฟองตัวจึงมีคุณสมบัติที่ดี ได้แก่ น้ำหนักเบา มีความเป็นฉนวนกันความร้อน และเป็นฉนวนกันเสียง [56] จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของมวลรวมชนิดนี้ คือ ซิลิกา อะลูมินา ไอรอนออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ และอาจพบแอลคาไลน์ปะปนมาบ้างในปริมาณเล็กน้อย [57]

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4 เม็ดดินเผาฟองตัวซึ่งมีโครงสร้างแบบ core-shell structure [58]

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมก่อสร้างมีการนำเม็ดดินเผาฟองตัวมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลายมากมาย โดยใช้เป็นส่วนผสมมวลรวมในผลิตภัณฑ์คอนกรีตมวลเบาต่าง ๆ เพื่อให้ได้วัสดุก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง การดูดซึมน้ำต่ำ และมีความเป็นฉนวนที่ดี ตัวอย่างเช่น คอนกรีตมวลเบา อิฐบล็อกคอนกรีตมวลเบา แผ่นผนังคอนกรีตมวลเบาสำเร็จรูป แผ่นพรีคาสท์คอนกรีต ฯลฯ [56, 58] ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การใช้ประโยชน์เม็ดดินเผาฟองตัวในงานคอนกรีต [56]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการ CBP มาใช้แปรรูปของเสียอุตสาหกรรมประเภทเถ้าเป็นวัสดุมวลรวมสำหรับใช้งานในคอนกรีตอย่างแพร่หลาย งานวิจัยโดย Narattha และคณะ [49] ได้นำเถ้าลอยถ่านหินมาขึ้นรูปเป็นมวลรวมด้วยวิธี CBP โดยมีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน พบว่าสูตร

ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเถ้าลอย:ปูนซีเมนต์ 90:10 ให้เม็ดมวลรวมที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุด คือ ความหนาแน่น 1,765 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จัดว่าเป็นมวลรวมเบา และ มีความต้านแรงกดแตก 557.4 นิวตัน

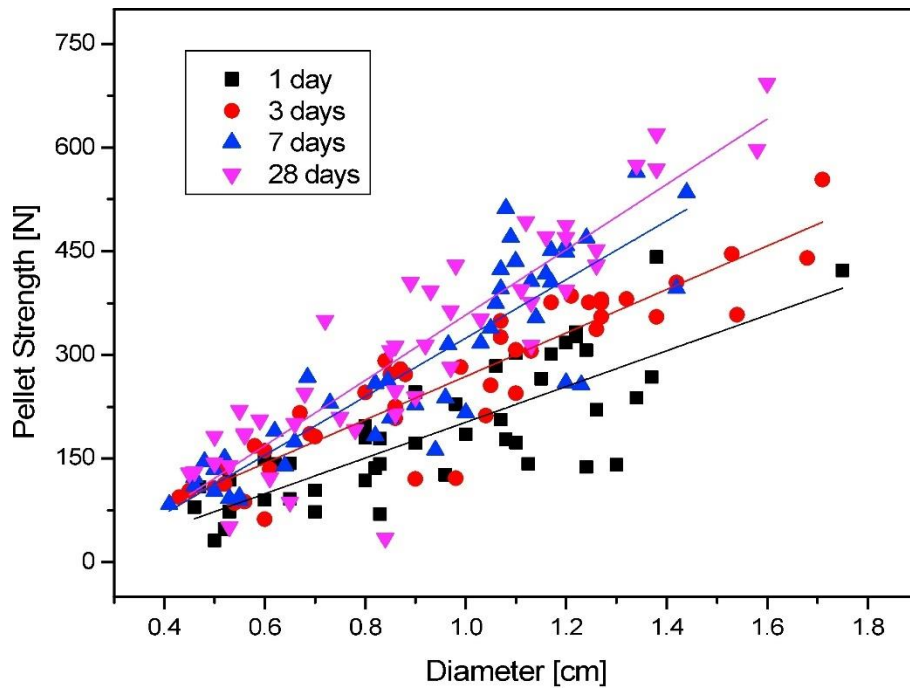
Gesoglu และคณะ [52] ได้ทำการขึ้นรูปมวลรวมเบาที่มีความแข็งแรงสูงสุด 880 นิวตัน จากอัตราส่วนวัตถุดิบเถ้าลอย:ปูนซีเมนต์ 100:10 โดยมวล และยังพบว่าเถ้าลอยที่มีพื้นผิวสัมพัทธ์สูงกว่า และปริมาณ CaO ต่ำกว่าจะทำให้ได้มวลรวมที่มีความแข็งแรงสูงกว่า เนื่องจากจำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมากกว่าในการขึ้นรูป ทำให้ตัวอย่างมีปริมาณน้ำเพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และได้สารผลิตภัณฑ์ C-S-H ซึ่งทำให้มวลรวมมีความแข็งแรงสูงกว่า

Tang และคณะ [48] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปวัสดุมวลรวมเบาจากเถ้าของเสียอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังนี้ เถ้าหนักจากเตาเผาขยะ เถ้าตะกอนกระดาษ เถ้าลอยถ่านหิน และตะกอนมวลรวม โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานด้วยปริมาณร้อยละ 10 โดยมวล พบว่า สามารถขึ้นรูปมวลรวมเบาลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6 มีความหนาแน่นและความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวสูงสุด 980 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 650 นิวตัน ตามลำดับ โดยค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของตัวอย่างเม็ดมวลรวมในงานวิจัยนี้ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 7 จัดว่าเป็นมวลรวมเบาที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมเบาชนิดอื่นที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี CBP เหมือนกัน ทั้งนี้เนื่องจากมีการใช้เถ้าหลายชนิดผสมกันทั้งเถ้าหนักแล้วเถ้าลอย ทำให้วัตถุดิบมีลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคกว้าง เมื่อขึ้นรูปรวมตัวเป็นก้อนมวลรวมแล้วจึงได้มวลรวมที่มีเนื้อแน่น รูพรุนต่ำ และความแข็งแรงสูง

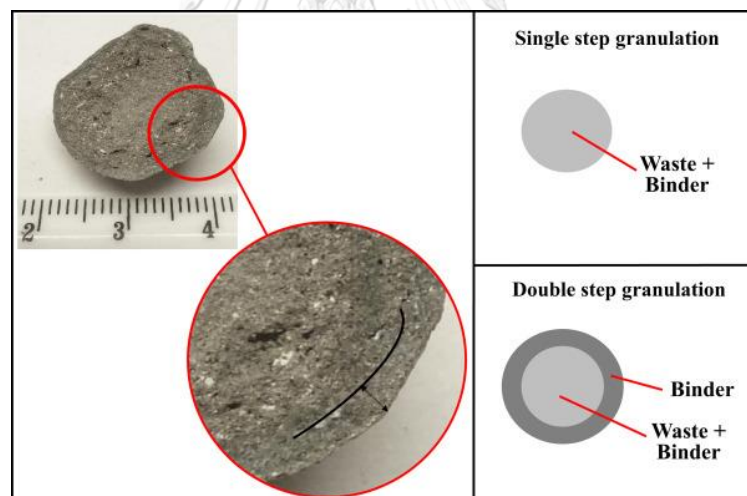
นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยศึกษาการปรับปรุงสมบัติของมวลรวมเบาโดยการขึ้นรูปแบบ CBP 2 ขั้นตอน (double-step CBP) โดย Colangeo และคณะ [54] ได้ทำการขึ้นรูปมวลรวมเบาจากเถ้าลอยจากเตาเผาขยะและปูนซีเมนต์ร้อยละ 70 และ 30 โดยมวล ตามลำดับ และทำการเคลือบเม็ดมวลรวมอีกครั้งด้วยปูนซีเมนต์โดยวิธี CBP เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเม็ดมวลรวม ทำให้ได้เม็ดมวลรวมลักษณะดังแสดงอยู่ในรูปที่ 8 มีค่าความหนาแน่น และความต้านแรงกดแตก 1,100 – 1,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 2 – 6 เมกะพาสคัล ตามลำดับ



รูปที่ 6 เม็ดมวลรวมเบาขนาดต่าง ๆ จากงานวิจัยของ Tang และคณะ [55]



รูปที่ 7 ค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดได้เพียงจากงานวิจัยของ Tang และคณะ [48]



รูปที่ 8 เม็ดมวลรวมที่ขึ้นรูปแบบ CBP 2 ขั้นตอน [54]

นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยศึกษาการนำเม็ดมวลรวมที่มีส่วนผสมของเถ้าอุตสาหกรรมต่าง ๆ และขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี CBP ไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงทดแทนหินในคอนกรีตมวลเบา Tang และคณะ [48] ได้ศึกษาการนำเม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าเตาเผาขยะขนาด 2 – 8 มิลลิเมตร ไปใช้ทดแทนหินควอตซ์เป็นอัตราส่วนร้อยละ 50 และ 100 โดยปริมาตร พบว่าได้คอนกรีตมวลเบาที่มีค่าความต้านแรงกดแตก 37.1 และ 27.7 เมกะพาสคัล ตามลำดับ

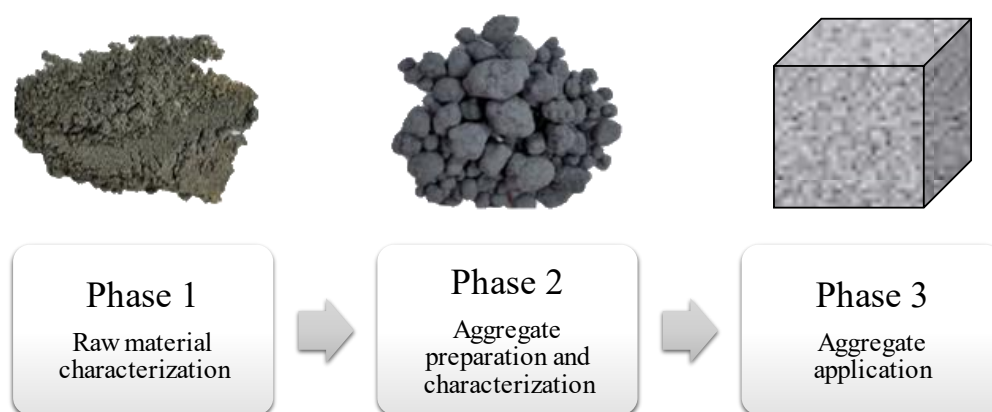
Kim และคณะ [53] ได้รายงานว่าการใช้เม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าหนักถ่านหินส่งผลให้ความแข็งแรงของคอนกรีตในช่วงแรกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตควบคุม โดยค่าความต้านแรงกดแตกของตัวอย่างคอนกรีตผสมเม็ดมวลรวมเบาที่มีอายุ 28 วัน คือ 65 เมกะพาสคัล หากพิจารณาค่าความต้านแรงอัดของตัวอย่างอิฐคอนกรีตทั่วไปซึ่งมีค่าหลากหลายตั้งแต่ 25 – 50 จิกะพาสคัล [54] จะเห็นว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีเม็ดมวลรวมเบา CBP เป็นวัสดุเสริมแรงจะมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่า แต่ค่าความแข็งแรงที่ลดลงนี้อาจถูกมองข้ามไปได้ในกรณีที่ลักษณะการใช้งานที่ไม่จำเป็นต้องมีการรับแรงสูง และคำนึงถึงผลประโยชน์ที่ได้จากการนำของเสียอุตสาหกรรมมาแปรรูปเพิ่มมูลค่า

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการนี้มาใช้ขึ้นรูปเถ้าชีวมวลเป็นมวลรวมเบาสำหรับใช้งานในคอนกรีตมวลเบา รวมทั้งยังไม่มีการศึกษาสมบัติของมวลรวมเบาที่ผลิตจากเถ้าชีวมวลโดยกระบวนการดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เถ้าเยื่อกระดาษ เถ้าเศษไม้ เถ้าแกลบ เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าชานอ้อย และเถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว มาใช้เป็นวัสดุเติมขึ้นรูปมวลรวมเบาด้วยกระบวนการขึ้นรูปโดยไม่ใช้ความร้อนแบบ Cold bonded pelletization (CBP) ศึกษาสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาและคอนกรีตมวลเบาที่ใช่มวลรวมเบาที่เตรียมได้เป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อให้ได้แนวทางในการจัดการกับของเสียอุตสาหกรรมประเภทเถ้าชีวมวล รวมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียดังกล่าว และได้คอนกรีตมวลเบาที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการจัดการของเสียประเภทเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ โดยการนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบสำหรับการเตรียมวัสดุมวลรวมเบาโดยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบ Cold bonded pelletization (CBP) ด้วยงานปั้นเม็ด โดยได้แบ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกัน ได้แก่ การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของวัตถุดิบ การเตรียมตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาและการวิเคราะห์สมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้น และการนำเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้ไปใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตและการวิเคราะห์สมบัติของคอนกรีตมวลเบาดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การดำเนินงานวิจัยทั้ง 3 ส่วน

ในลำดับถัดไปจะกล่าวอธิบายถึงวัตถุดิบ สารเคมี เครื่องมือ อุปกรณ์ รวมถึงวิธีการทดลอง และการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเถ้าชีวมวลที่ทำการศึกษา เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นจากเถ้าชีวมวลดังกล่าว และตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุมวลรวม

3.1 วัตถุดิบ สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- เถ้าลอยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA1, บริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ แพลนท์ 5 เอ จำกัด)

- ถั่วกะลาและเปลือกมะพร้าว (CFA, บริษัท มหาชัย กรีน เพาเวอร์ จำกัด)
- ถั่วลอยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA2, บริษัท ไทยเคนเปเปอร์ จำกัด (มหาชน))
- ถั่วชานอ้อย (BA1, บริษัท มิตรผล ไบโอ-เพาเวอร์ จำกัด)
- ถั่วปาล์มน้ำมัน (PA, บริษัท กลุ่มปาล์มธรรมชาติ จำกัด)
- ถั่วลอยเศษไม้ (WFA, บริษัท สหกรีน ฟอเรสต์ จำกัด)
- ถั่วชานอ้อย (BA2, บริษัท ไทยเพิ่มพูนอุตสาหกรรม จำกัด)
- ถั่วกลบ (RA, บริษัท นครปฐมไบโอแมส จำกัด)
- เม็ดดินเผาพองตัว (ECA, บริษัท ไชมีส อีโคโลยี จำกัด)
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC)
- ทรายละเอียด (sand)
- น้ำประปา (water)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เต้าเผาไฟฟ้า
- เตาอะลูมินา
- เครื่องชั่งตวงวัด 2 และ 4 ตำแหน่ง
- เวอร์เนียร์คาลิเปอร์
- ตะแกรงร่อน (sieve) ขนาดต่าง ๆ ดังนี้ 35 เมช 70 เมช 100 เมช 150 เมช 200 เมช และ 325 เมช
- เต้าอบไฟฟ้า
- กระบอกตวงขนาดต่าง ๆ
- ปีกเกอร์แก้วและพลาสติกขนาดต่าง ๆ
- โกร่งอะลูมินา
- งานปั้นเม็ดมวลรวม (disc pelletizer)
- โม่ผสมคอนกรีต
- ถังพลาสติกมีฝาปิดสำหรับเก็บและบ่มตัวอย่าง
- แม่พิมพ์ลูกบาศก์ขนาด 5.0 ซม. × 5.0 ซม. × 5.0 ซม.
- แผ่นพลาสติกยืดหยุ่นสำหรับห่อตัวอย่างในแม่แบบ
- เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)
- เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)
- เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

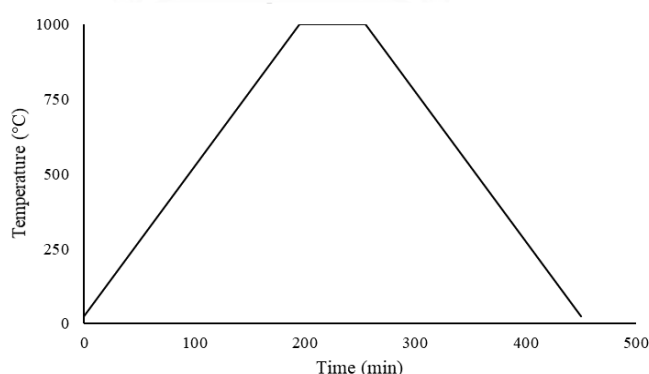
- เครื่อง Laser particle size analyzer
- เครื่อง Universal testing machine (UTM)

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.1 การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ

วัสดุดิบเข้าชีวมวลต่าง ๆ ได้แก่ CPFA1 CFA CPFA2 BA1 PA WFA BA2 และ RA ถูกนำมา ร่อนผ่านตะแกรงร่อน (sieve) ขนาด 100 เมช เพื่อกำจัดเศษอนุภาคขนาดใหญ่ที่ปะปนมา เช่น กิ่งไม้ ใบไม้ เป็นต้น และนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีก่อนนำไปใช้ใน ขั้นตอนต่อไปของการทดลอง รายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer ผลิตโดยบริษัท Philips รุ่น PW2400
- 2) ศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณสารอนินทรีย์ หรือ Loss on Ignition (LOI) โดยวิธีการหาค่า น้ำหนักที่หายไปจากการเผาที่อุณหภูมิ 1000°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5°C/นาที และเวลา ยืนไฟ (soaking time) 60 นาที ดังแสดงในกราฟตารางการเผา (firing schedule) ในรูปที่ 10 และคำนวณค่าความหนาแน่นรวมจากสมการที่ 5



รูปที่ 10 ตารางการเผา (firing schedule) สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารอนินทรีย์ในตัวอย่างเข้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ

$$LOI, \% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

สมการที่ 5

โดย m_1 = มวลเถ้าชีวมวลแห้งก่อนเผา (กรัม)

m_2 = มวลเถ้าชีวมวลหลังเผา (กรัม)

- 3) ศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส โดยวิธี X-Ray Diffractometry (XRD) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น D8 Advanced โดยใช้แหล่งกำเนิด Cu-K α ด้วย 0.02 step size และ 0.5 second step time ทำการศึกษาในช่วง 2Theta 10 – 80 องศา
- 4) ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค โดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV
- 5) ศึกษาและวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวม (loose bulk density) ตามมาตรฐาน ASTM D7481 โดยคำนวณค่าความหนาแน่นรวมจากสมการที่ 6

$$\text{Loose bulk density, } g/cm^3 = \frac{m}{V}$$

สมการที่ 6

โดย m = มวลของตัวอย่างเถ้า (กรัม)

V = ปริมาตรของตัวอย่างเถ้า (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

- 6) ศึกษาและวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคแบบหยาบด้วยวิธี Sieve analysis โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาดต่าง ๆ ดังนี้ 35 70 100 150 200 และ 325 เมช ด้วยวิธีเปียก
- 7) ศึกษาและวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคโดยวิธี Laser scattering ด้วยเครื่อง Laser particle size analyzer ผลิตโดยบริษัท Malvern รุ่น Mastersizer 2000
- 8) ศึกษาและวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic activity) ด้วยการหาค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index, SAI) ตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยค่าดัชนีกำลังนี้คือ อัตราส่วนร้อยละความต้านแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ส่วนผสมปูนซีเมนต์ถูกแทนที่ด้วยวัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 โดยมวลต่อค่าความต้านแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ควบคุม เป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างวัสดุปอซโซลานชนิดนั้น ๆ เมื่อนำมาใช้งานเป็นส่วนผสมกับปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง โดยในการหาค่าดัชนีกำลังของวัสดุดิบเริ่มจากเตรียมตัวอย่างลูกบาศก์ซีเมนต์ที่มีส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในตารางที่ 1

ทำการหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5.0 เซนติเมตร × 5.0 เซนติเมตร × 5.0 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้นต่อสูตรตัวอย่าง หลังทำการถอดแบบและบ่มตัวอย่างไว้เป็นเวลา 28 วัน นำตัวอย่างลูกบาศก์ไปอบ ณ อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นส่วนเกิน ก่อนนำไปทดสอบค่าความต้านแรงอัด สุดท้ายนำค่าความต้านแรงอัดของตัวอย่างมาคำนวณค่าดัชนีกำลังจากสมการที่ 7

ตารางที่ 1 ส่วนผสมตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์สำหรับทดสอบหาค่าดัชนีกำลัง

ตัวอย่าง	PC (กรัม)	ปอชโซลาน (กรัม)	ทราย (กรัม)	w/c
เฟสค์ควบคุม	500	-	1375	0.484
เฟสค์ทดสอบ	400	100	1375	ปรับให้ความชื้นเหลว เท่ากับเฟสค์ควบคุม

$$SAI, \% = \frac{A}{B} \times 100$$

สมการที่ 7

โดย A = ค่าความต้านแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ซีเมนต์ทดสอบที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลาน (เมกะพาสคัล)
 B = ค่าความต้านแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์ซีเมนต์ควบคุม (เมกะพาสคัล)

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาโดยการขึ้นรูปด้วยจานปั่นเม็ด และการศึกษาทดสอบสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า

3.2.2.1 การศึกษาอัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมต่อการเตรียมเม็ดมวลรวมเบา

ทำการศึกษาอัตราส่วนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบาด้วยจานปั่นเม็ดโดยวิธี Pelletization โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ตามอัตราส่วนโดยมวลต่อไปนี้ ร้อยละ 5 10 และ 20 ดังแสดงในตารางที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและความหนาแน่นของเม็ดมวลรวมเบาที่ขึ้นรูปจากอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่าง ๆ เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการเตรียมเม็ดมวลรวมเบาที่สุดสำหรับการทดลองต่อไป

ตารางที่ 2 ส่วนผสมในการขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบาเพื่อศึกษาอัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม

ส่วนผสม	C05	C10	C15	C20
เถ้าชีวมวล (อัตราส่วนร้อยละโดยมวล)	5	10	15	20
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (อัตราส่วนร้อยละโดยมวล)	95	90	85	80

3.2.2.2 การขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบาด้วยงานปั้นเม็ด

ดำเนินการขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบาโดยกรรมวิธี Pelletization ด้วยงานปั้นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เมตร ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 11 และเลือกใช้อัตราส่วนวัสดุเชื่อมประสาน C10 ซึ่งมีปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยมวล เนื่องจากเป็นอัตราส่วนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุเชื่อมประสานในปริมาณที่น้อยที่สุดที่สามารถนำมาใช้ขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบาได้ โดยที่เม็ดมวลรวมเบาที่ได้ยังสามารถคงรูป ไม่แตกสลาย และสามารถนำไปบ่มเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในขั้นตอนต่อไปของการเตรียมตัวอย่างได้



รูปที่ 11 งานปั้นเม็ด

โดยในกระบวนการขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบาด้วยงานปั้นเม็ดนี้เริ่มจากทำการผสมส่วนผสมวัตถุดิบที่เป็นผง อันได้แก่ เถ้าชีวมวล และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้เข้ากันด้วยไม้ผสมคอนกรีตเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำส่วนผสมเดิมลงไปในงานปั้นเม็ดซึ่งวางตัวเป็นมุม 45 องศา กับแนวตั้งฉากและกำลังหมุนไป พร้อมทั้งพ่นน้ำลงไปบนงานที่กำลังหมุนอยู่นี้ในช่วงเวลา 5 นาทีแรกของการหมุนขึ้นรูปเพื่อก่อให้เกิดนิวเคลียสของมวลรวม (aggregate nuclei) และปล่อยให้งานปั้นเม็ดทำการหมุนขึ้นรูปต่อไปเป็นเวลาอีก 10 นาที โดยในช่วงเวลานี้ปูนซีเมนต์และน้ำจะทำปฏิกิริยากันกลายเป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งทำหน้าที่ยึดจับอนุภาคผงเถ้าชีวมวลให้รวมตัวกันเป็นก้อน เกิดการเติบโตของมวลรวม (aggregate growth) และการอัดแน่นของเนื้อมวลรวม (aggregate compaction) ได้เป็นเม็ดวัสดุมวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 12 ทำการแบ่งตัวอย่างเป็นสองกลุ่มตามช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ 4.0 – 8.0 มิลลิเมตร สำหรับเปรียบเทียบสมบัติกับวัสดุทางการค้าและเม็ดมวลรวมเบาจากงานวิจัยอื่นที่มีขนาดอยู่ในช่วงเดียวกัน และ 8.0 – 16.0 มิลลิเมตร สำหรับเปรียบเทียบสมบัติกับเม็ดมวลรวมเบาจากงานวิจัยอื่นที่มีขนาดอยู่ในช่วงเดียวกัน สุดท้ายนำตัวอย่างเม็ดมวลรวมที่เตรียมได้มาทำการบ่มไว้ในบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 100 ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน และทำการบ่มตัวอย่างในน้ำเพื่อให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาเพิ่มความแข็งแรงต่อจนครบ 28 วัน



รูปที่ 12 ตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ด โดยกรรมวิธี Pelletization

3.2.2.3 การศึกษาและทดสอบสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า

นำเม็ดดินเผาพองตัว (expanded clay aggregate) ซึ่งเป็นมวลรวมเบาที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงทางการค้าในการผลิตผนังคอนกรีตมวลเบาสำเร็จรูปแบบไม่รับแรง (non-load-

bearing lightweight concrete wall panel) และตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบา CPFA1 CFA CPFA2 BA1 PA WFA BA2 และ RA ที่ทำการบ่มไว้จนมีอายุครบ 7 วัน และ 28 วัน ไปอบที่ อุณหภูมิ 60°C เพื่อกำจัดความชื้นก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส โดยวิธี X-Ray Diffractometry (XRD) ด้วย เครื่อง X-Ray Diffractometer ผลิตโดยบริษัท Bruker รุ่น D8 Advanced โดยใช้ แหล่งกำเนิด Cu-K α ด้วย 0.02 step size และ step time 0.5 วินาที ทำการตรวจสอบ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในช่วง 2Theta 10 – 80 องศา
- 2) ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค โดยวิธี Scanning Electron Microscopy (SEM) และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบโดยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV
- 3) ศึกษาและวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวม (loose bulk density) และความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) ตามมาตรฐาน ASTM C127 โดยคำนวณค่าความหนาแน่นรวมจากสมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

$$\text{Loose bulk density, kg/m}^3 = \frac{m}{V} \quad \text{สมการที่ 8}$$

โดย m = มวลของตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบา (กิโลกรัม)
 V = ปริมาตรของตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบา (ลูกบาศก์เมตร)

$$\text{Relative density} = \frac{A}{B-C} \quad \text{สมการที่ 9}$$

โดย A = มวลของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งซึ่งในอากาศ (กรัม)
 B = มวลของตัวอย่างที่ดูดซึมน้ำจนอิ่มตัวซึ่งในอากาศ (กรัม)
 C = มวลของตัวอย่างที่ดูดซึมน้ำจนอิ่มตัวซึ่งในน้ำ (กรัม)

- 4) ศึกษาและวิเคราะห์ค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) ตามมาตรฐาน ASTM C 127 โดยคำนวณค่าการดูดซึมน้ำจากสมการที่ 10

$$\text{Water absorption, \%} = \left(\frac{B-A}{A} \right) \times 100$$

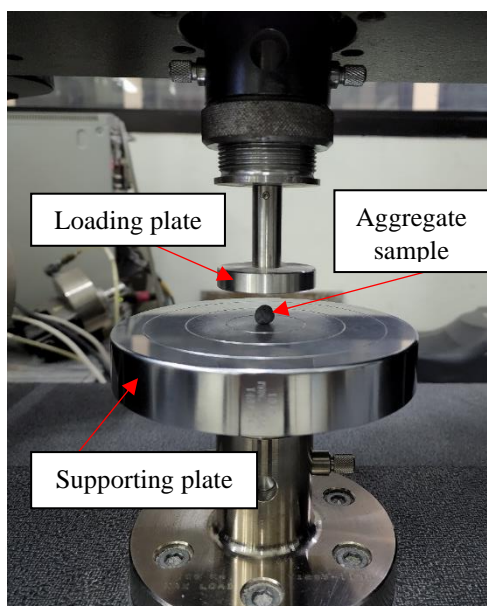
สมการที่ 10

โดย A = มวลของตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งชั่งในอากาศ (กรัม)
 B = มวลของตัวอย่างที่ดูดซึมน้ำจนอิ่มตัวชั่งในอากาศ (กรัม)

- 5) ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว (single pellet crushing strength) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น 5843 ผลิตโดย บริษัท Instron ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 13 อ้างอิงรูปแบบการทดสอบจากงานวิจัยอื่นเกี่ยวกับวัสดุมวลรวมเบาที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีเดียวกัน [48, 52] ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยพิจารณาสมบัติความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวจากค่าแรงกดแตกสูงสุดที่ตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาสามารถรับได้ (maximum load, N)



รูปที่ 13 เครื่อง Universal testing machine (UTM)



รูปที่ 14 รูปแบบการทดสอบสมบัติความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว

3.2.3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบาและการศึกษาสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า

นำเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้ในหัวข้อ 3.2.2 ก่อนหน้านี้มาขึ้นรูปคอนกรีตมวลเบาด้วยวิธีการหล่อ โดยขั้นแรกทำการผสมส่วนผสมอันได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายเม็ดมวลรวมเบาจากถ้ำซีเมนต์ผ่านการบ่มจนมีอายุครบ 28 วัน และน้ำ ให้เข้ากันเป็นเพสต์ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้สูตรส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาทางการค้าของผนังคอนกรีตมวลเบาสำเร็จรูปที่ใช้เม็ดดินเผาพองตัว (ECA) เป็นวัสดุมวลรวม ดังแสดงในตารางที่ 3 ด้วยอัตราส่วนน้ำ:ปูนซีเมนต์ 0.5 กำหนดให้ปริมาตรวัสดุมวลรวมที่เปลี่ยนไปคงที่ 43.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยแต่ละสูตรใช้เม็ดมวลรวมเบาที่แตกต่างกันออกไปเป็นวัสดุเสริมแรง ได้แก่ ECA (ตัวอย่างควบคุม) CPFA1 CFA CPFA2 BA1 PA WFA BA2 และ RA เมื่อได้ซีเมนต์เพสต์ที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงทำการขึ้นรูปหล่อตัวอย่างคอนกรีตในแม่แบบลูกบาศก์ขนาด 5.0 เซนติเมตร × 5.0 เซนติเมตร × 5.0 เซนติเมตร จำนวนสูตรละ 6 ตัวอย่าง ทำการห่อแม่แบบไว้ด้วยแผ่นพลาสติกยึดหยุ่นหลังขึ้นรูปเสร็จเพื่อป้องกันการระเหยของความชื้น และถอดแบบเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบ่มคอนกรีตในน้ำเพื่อให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยา ไฮเดรชันอย่างสมบูรณ์ ณ อุณหภูมิห้องจนมีอายุครบ 7 วัน และ 28 วัน และนำชิ้นตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เพื่อไล่ความชื้นส่วนเกินก่อนนำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาและวิเคราะห์ความหนาแน่น (bulk density) ของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตมวลเบาตามมาตรฐาน ASTM C127 โดยคำนวณค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 11

$$\text{Bulk density, kg/m}^3 = \frac{m}{V} \quad \text{สมการที่ 11}$$

โดย m = มวลของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา (กิโลกรัม)

V = ปริมาตรของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา (ลูกบาศก์เมตร)

- 2) ศึกษาและวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยพิจารณาจากค่าความต้านแรงอัด (compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C109 ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น 5843 ผลิตโดย บริษัท Instron ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยคำนวณค่าความต้านแรงอัดจากสมการที่ 12

$$\text{Compressive strength, MPa} = \frac{F}{A} \quad \text{สมการที่ 12}$$

โดย F = แรงกดสูงสุดที่ชิ้นงานรับได้ก่อนเกิดการแตกหัก (นิวตัน)

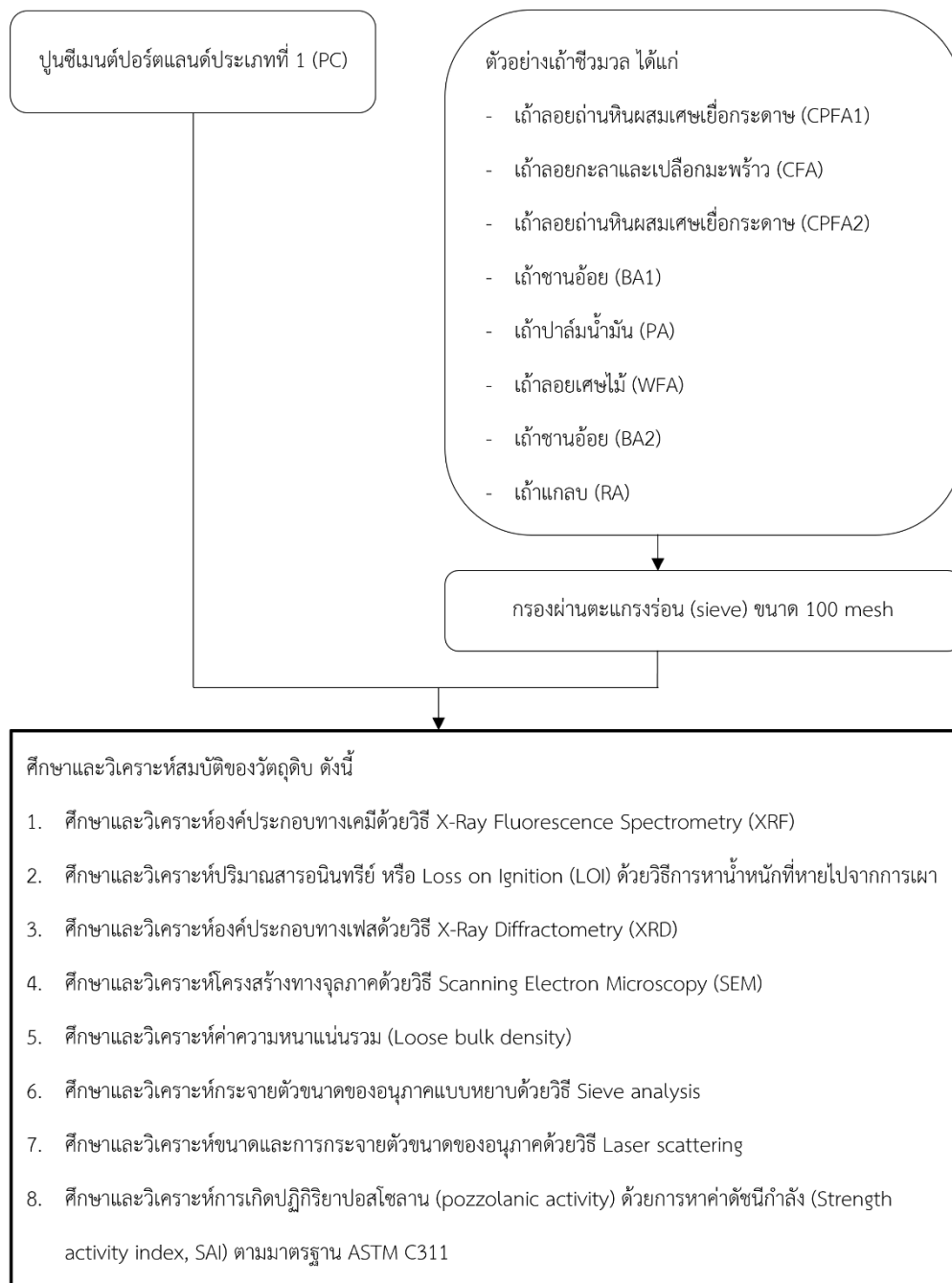
A = พื้นที่ผิวของชิ้นงานที่รับแรงกด (ตารางเมตร)

ตารางที่ 3 สูตรส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาทางการค้าของผนังคอนกรีตมวลเบาสำเร็จรูปที่ใช้เม็ดดินเผาพองตัวเป็นวัสดุมวลรวม

วัตถุดิบ	ปริมาณ		
	กรัม	ร้อยละโดยมวล	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	18.0	18.0	193.0
ทราย	52.0	52.0	557.6
มวลรวม	30.0	30.0	321.7

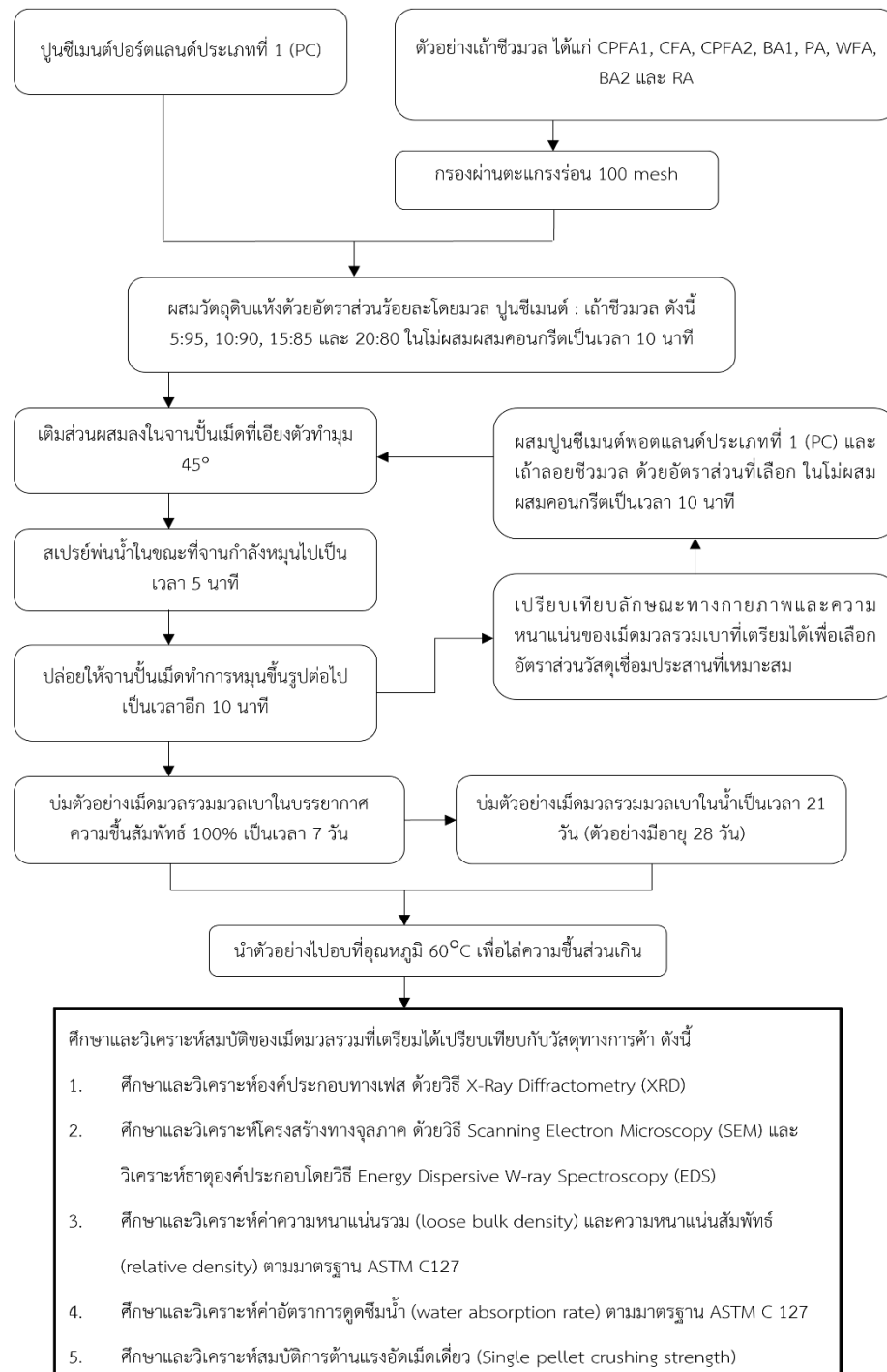
3.3 แผนผังการทดลอง

3.3.1 การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ



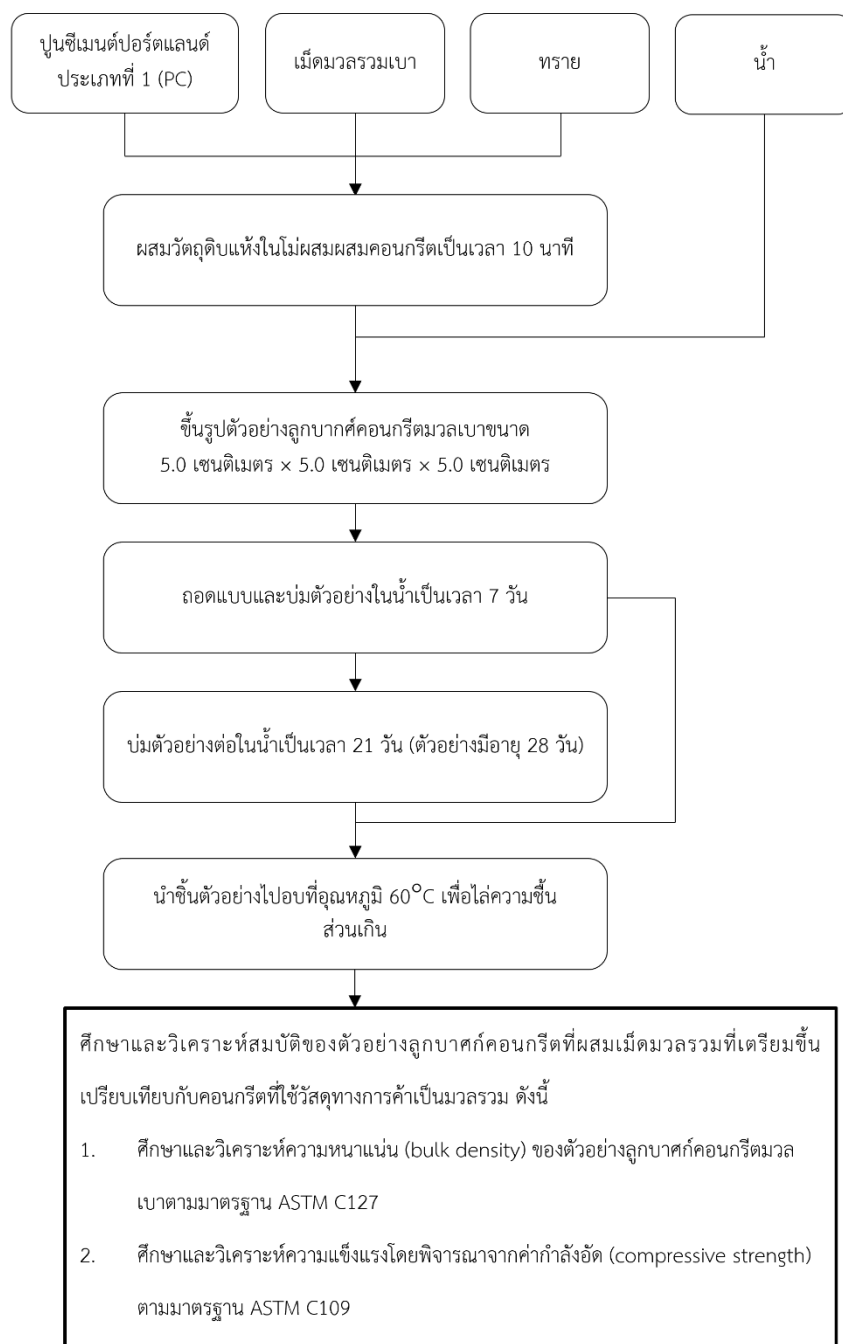
รูปที่ 15 แผนผังการทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ

3.3.2 การทดลองส่วนที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาโดยการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ด การศึกษาและทดสอบสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า



รูปที่ 16 แผนผังการทดลองส่วนที่ 2 การเตรียมตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาโดยการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ด การศึกษาและทดสอบสมบัติของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า

3.3.3 การทดลองส่วนที่ 3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบา การศึกษาและทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า



รูปที่ 17 แผนผังการทดลองส่วนที่ 3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบา การศึกษาและทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า

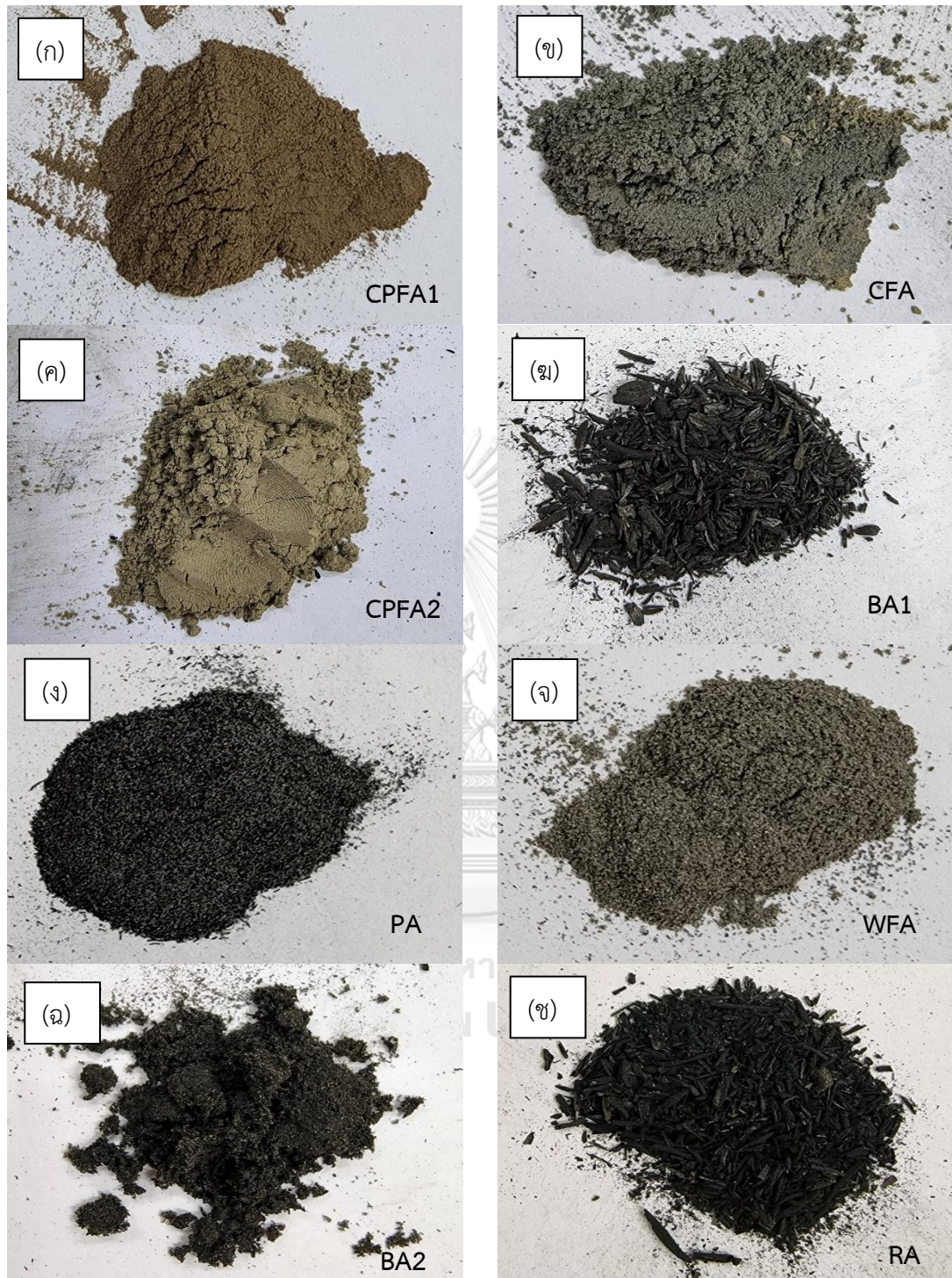
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบ

ตัวอย่างเอ้าที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 8 ตัวอย่าง ได้แก่ เอ้าลอยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA1) จากบริษัท เนชั่นแนล เพาเวอร์ แพลนท์ 5 เอ จำกัด เอ้าลอยกะลาและเปลือกมะพร้าว (CFA) จากบริษัท มหาชัย กรีน เพาเวอร์ จำกัด เอ้าลอยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA2) จากบริษัท ไทยเคนเบเปเปอร์ จำกัด (มหาชน) เอ้าชานอ้อย (BA1) จากบริษัท มิตรผล ไปโอ-เพาเวอร์ จำกัด เอ้าปาล์มน้ำมัน (PA) จากบริษัท กลุ่มปาล์มธรรมชาติ จำกัด เอ้าลอยเศษไม้ (WFA) จาก บริษัท สหกรีน ฟอเรสต์ จำกัด เอ้าชานอ้อย (BA2) จากบริษัท ไทยเพิ่มพูนอุตสาหกรรม จำกัด และเอ้าแกลบ (RA) จากบริษัท นครปฐมไปโอแมส จำกัด โดยลักษณะของตัวอย่างเอ้าแสดงในรูปที่ 18 (ก) – (ข) ตามลำดับ

ในลำดับถัดไปจะเป็นการรายงานและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุดิบต่าง ๆ อันได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี องค์ประกอบทางเฟส โครงสร้างทางจุลภาค ความหนาแน่น ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค และค่าดัชนีกำลังของตัวอย่างเอ้าเหล่านี้ รวมทั้งสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานวิจัยนี้ด้วย



รูปที่ 18 (ก) ถ้ำลอยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA1) (ข) ถ้ำลอยกะลาและเปลือกมะพร้าว (CFA) (ค) ถ้ำลอยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA2) (ง) ถ้ำขานอ้อย (BA1) (จ) ถ้ำปาล์มน้ำมัน (PA) (ฉ) ถ้ำลอยเศษไม้ (WFA) (ฉ) ถ้ำขานอ้อย (BA2) และ (ช) ถ้ำแกลบ (RA)

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) และค่าการสูญเสียน้ำหนักหรือ Loss on Ignition (LOI) โดยการคำนวณน้ำหนักที่หายไปจากการเผา จากผลการวิเคราะห์พบว่า องค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ มีลักษณะคล้ายกัน คือ ประกอบไปด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกา (SiO_2) เป็นส่วนใหญ่ในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ สอดคล้องกับการวิจัยศึกษาก่อนหน้าในงานวิจัยอื่น [17] โดยเถ้าบางชนิด ได้แก่ CPFA1 CPFA2 และ BA1 ยังมีไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลักด้วยเช่นกัน คล้ายกับผลการศึกษารายงานองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าเยื่อกระดาษและเถ้าชานอ้อยที่ได้มีการรายงานไว้แล้ว [17] สำหรับ RA ซึ่งเป็นเถ้าชีวมวลที่ได้จากการเผาไหม้แกลบ พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ ซิลิกา สูงถึงร้อยละ 70.19 โดยมวล ซึ่งเป็นปกติของเถ้าชนิดนี้ [11, 12] และมีออกไซด์อื่น ๆ เช่น แคลเซียมออกไซด์ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) และออกไซด์อื่น ๆ ปะปนมาในปริมาณเล็กน้อย จากตารางจะเห็นว่าเถ้าชีวมวลแต่ละชนิดยกเว้น CPFA2 มีปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบค่อนข้างมาก โดยเถ้า CFA และ PA มีค่าปริมาณสารอินทรีย์ที่คำนวณจากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเป็นปริมาณมากที่สุด คือ ร้อยละ 31.34 โดยมวล และ 27.78 โดยมวล ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของเถ้าชีวมวลต่าง ๆ เหล่านี้มักขึ้นกับปัจจัยในกระบวนการเผาที่แตกต่างกันในแต่ละโรงไฟฟ้า ชีวมวล ในส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (PC) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีส่วนประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา ไอรอนออกไซด์ อะลูมินา และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และมีปริมาณสารอินทรีย์ที่คำนวณจากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเป็นปริมาณร้อยละ 1.40 โดยมวล

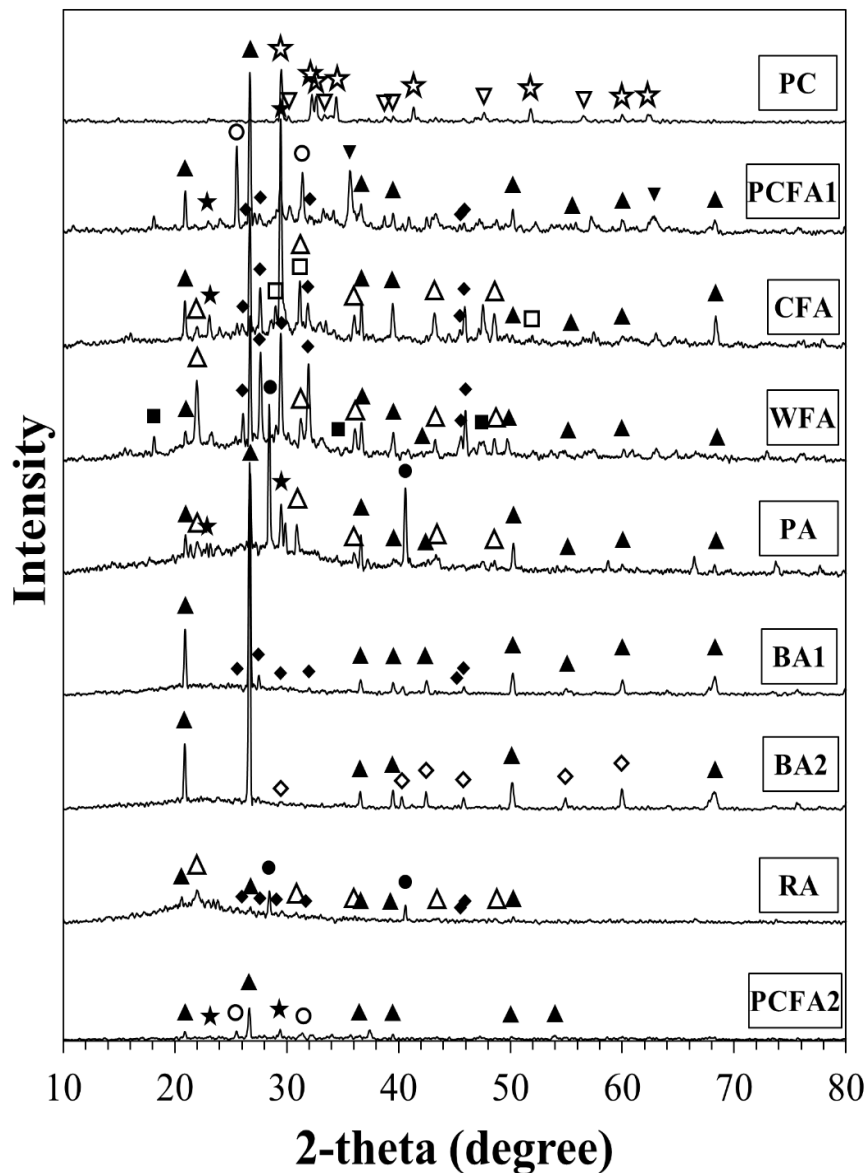
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยมวล)	CPFA 1	CPFA 2	CFA	BA2	BA1	PA	WFA	RA	PC
CaO	24.90	21.31	26.86	4.72	2.50	8.53	24.17	3.43	66.23
SiO ₂	24.90	40.05	23.56	62.28	56.56	29.57	43.59	70.19	16.46
Fe ₂ O ₃	12.40	6.19	1.98	-	3.46	3.66	1.46	0.85	3.15
Al ₂ O ₃	10.15	18.04	1.89	4.93	11.52	1.63	1.43	0.53	4.63
SO ₃	8.60	3.45	0.73	0.41	0.45	3.26	0.76	1.01	4.68
MgO	4.25	3.28	3.94	1.47	1.42	3.61	1.86	0.61	1.89
K ₂ O	2.32	1.00	6.39	4.69	4.38	13.28	5.07	4.63	0.55
P ₂ O ₅	0.47	0.79	1.85	1.89	2.18	3.35	1.83	1.35	0.07
อื่น ๆ	1.61	1.82	0.27	0.10	1.47	5.33	1.96	1.81	0.94
LOI	10.40	4.07	31.34	19.52	17.27	27.78	17.88	15.58	1.40

4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส

จากผลการศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสด้วยเทคนิค X-Ray diffraction (XRD) ของเถ้าชีวมวลดังแสดงในรูปที่ 19 พบว่าตัวอย่างเถ้าชีวมวลส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นผลึก ยกเว้นในกรณีของเถ้าปาล์มน้ำมัน PA และเถ้าแกลบ RA ที่พบว่าเป็นอสัณฐานไม่มีความเป็นผลึก บางส่วนคล้ายกับองค์ประกอบทางเฟสของเถ้าในงานวิจัยอื่น [11, 12] ในส่วนขององค์ประกอบเฟสที่เป็นผลึกของตัวอย่างเถ้าทั้งแปดชนิดพบว่ามีเฟสที่คล้ายกันได้แก่ คริสโตบาไลต์ (SiO₂) ควอตซ์ (SiO₂) แคลไซต์ (CaCO₃) และแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO₃) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเฟสที่พบได้ทั่วไปในเถ้าชีวมวลดังที่ได้มีรายงานไว้ใน การทบทวนวรรณกรรม [11, 12, 17, 25, 26] สำหรับองค์ประกอบทางเฟสอื่น ๆ ที่แตกต่างกันออกไปนั้น เถ้าปาล์ม น้ำมัน PA และเถ้าแกลบ RA มีเกลือซิลิเกต (KCl) ปะปนมา เถ้ากะลาและเปลือกมะพร้าว CFA มีสารประกอบไฮดรอกไซด์แคลเซียมแมกนีเซียมไดซิลิเกต (Ca₂Mg(Si₂O₇)) เถ้าโรงงานกระดาษทั้งสองชนิด CPFA1 และ CPFA2 พบแอนไฮไดรต์ (CaSO₄) หรือแคลเซียมซัลเฟตที่ไม่มีน้ำในโครงสร้าง นอกจากนั้นเถ้า CPFA1 ยังมีแมกนีไทต์ (Fe₂O₃) เป็นองค์ประกอบอีกด้วย โดยคาดว่าแหล่งที่มาของสารประกอบเหล่านี้มีสาเหตุมาจากกระบวนการภายในโรงงานไฟฟ้าเถ้าชีวมวลที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเฟสของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานพบว่ามีผลึกแคลเซียมซิลิเกต (Ca₂SiO₄ และ Ca₃SiO₅) เป็น

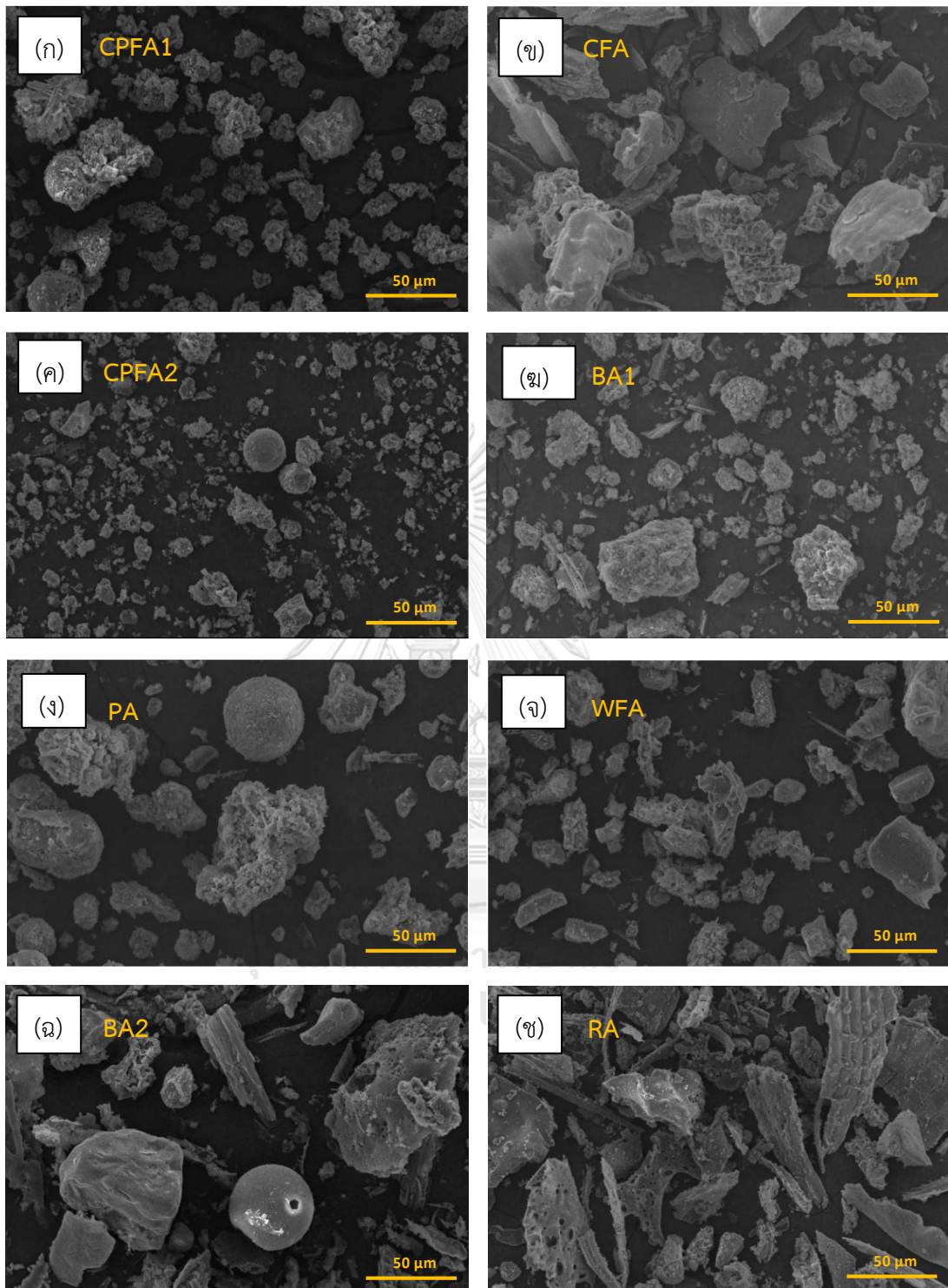
องค์ประกอบหลัก ซึ่งพร้อมทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำเพื่อให้ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำหน้าที่ยึดประสานอนุภาคต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์เข้าด้วยกัน เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสพบว่าสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีซึ่งได้มีการรายงานไว้ในหัวข้อ 4.1.1 อีกด้วย



รูปที่ 19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุดิบ

4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

รูปที่ 20 (ก) – (ข) แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ของแก้ว CPFA1 CFA CPFA2 BA1 PA WFA BA2 และ RA ตามลำดับ ที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยรวมแล้วสามารถสังเกตเห็นได้ว่าตัวอย่างแก้วทั้งแปดชนิดมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคคล้ายกัน คือ มีรูปร่างอนุภาคไม่แน่นอน พื้นผิวของอนุภาคมีลักษณะขรุขระ และมีรูพรุนหลากหลายขนาดในโครงสร้าง ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปสำหรับแก้วซีวมวล เนื่องจากแก้วชนิดนี้มักเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่นำมาจากพืช สามารถพบเห็นอนุภาคของแก้วลอยมีลักษณะกลมได้บ้าง ทั้งนี้เป็นลักษณะรูปร่างธรรมดาที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปของแก้วลอย เกิดจากการที่อนุภาคซึ่งมีน้ำหนักเบาถูกพัดลอยขึ้นขณะเผาไหม้จนทำให้มีรูปร่างเป็นทรงกลม นอกจากนี้จะเห็นว่าอนุภาคขนาดเล็กมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) หรืออาจกระจายตัวเกาะติดอยู่บนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า และยังพบว่าขนาดอนุภาคที่สังเกตได้มีค่าสอดคล้องกับค่า d_{50} ที่ได้จากการศึกษาขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค ซึ่งกล่าวถึงไว้ในหัวข้อที่ 4.1.5



รูปที่ 20 โครงสร้างทางจุลภาคของ (ก)ถ้ำลอย CPFA1 (ข)ถ้ำลอย CFA (ค)ถ้ำลอย CPFA2 (ฅ)ถ้ำ BA1 (ง)ถ้ำ PA (จ)ถ้ำลอย WFA (ฉ)ถ้ำ BA2 และ (ช)ถ้ำ RA

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

เนื่องจากตัวอย่างเถ้าชีวมวลจากโรงไฟฟ้าชีวมวลต่าง ๆ มักมีเศษอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนมา เช่น เศษไม้ เศษชิ้นส่วนพีช เศษทราย เป็นต้น ในการนำไปใช้งานเป็นวัตถุดิบสำหรับเตรียมมวลรวมเบาจึงได้มีการร่อนผงเถ้าผ่านตะแกรงขนาด 100 เมชก่อน ดังนั้นจึงได้แบ่งการศึกษาขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบออกเป็นสองส่วน คือ การศึกษาและรายงานผลขนาดอนุภาคของวัตถุดิบด้วย sieve analysis ในช่วงอนุภาคขนาดใหญ่สำหรับเถ้าที่ยังไม่ได้ผ่านการร่อน และ laser diffraction particle size analysis ในช่วงอนุภาคขนาดเล็กสำหรับเถ้าที่ผ่านการร่อนแล้วพร้อมนำไปใช้ขึ้นรูปเม็ดมวลรวมเบา

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ sieve analysis ของตัวอย่างเถ้าชีวมวลทั้งแปดชนิดที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมเม็ดมวลรวมเบาในงานวิจัยนี้ จากการพิจารณาค่าในตารางดังกล่าวพบว่า ตัวอย่างเถ้าชีวมวลทั้งแปดชนิดมีการกระจายขนาดอนุภาคช่วงขนาดใหญ่ที่แตกต่างกันออกไป โดยพบว่าเถ้า CPFA1 CFA PA WFA และ RA มีเศษอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนมาในปริมาณค่อนข้างมาก ในขณะที่เถ้า CPFA2 และ BA1 มีเศษอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนมาในปริมาณน้อย ส่วนเถ้าชีวมวล BA2 มีการกระจายขนาดอนุภาคในช่วง 45 – 500 ไมครอนที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

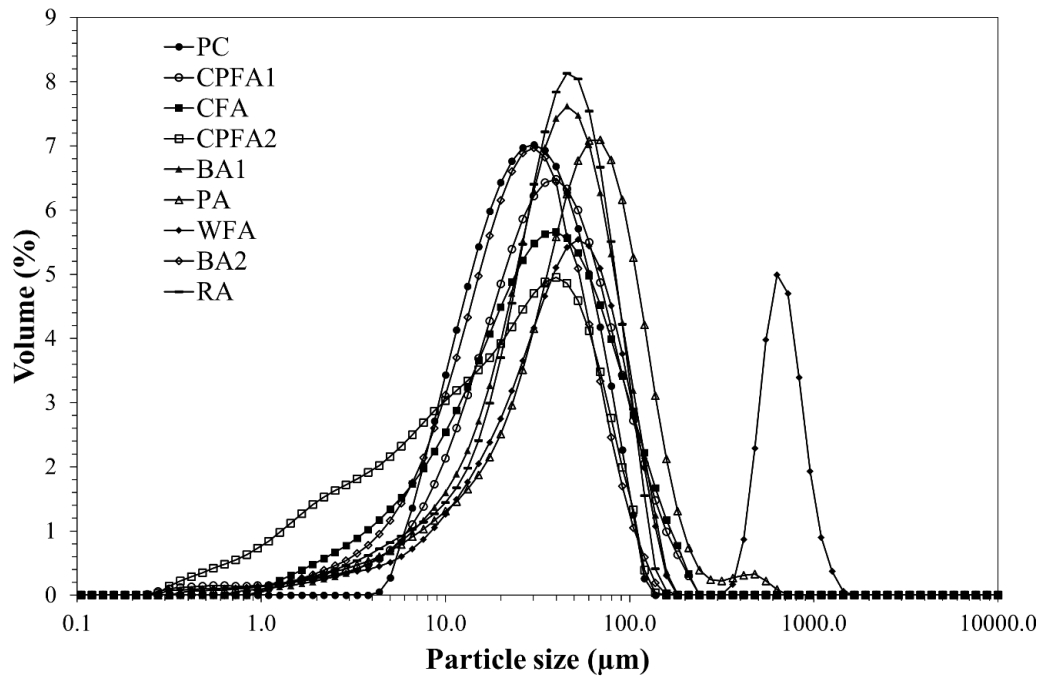
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ Sieve analysis ของตัวอย่างเถ้าชีวมวล

เถ้าชีวมวล	ตะแกรงร่อน (เมช)	pan	325	200	150	100	70	35
	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	-45	+45	+75	+104	+150	+212	+500
CPFA1	กากค้ำตะแกรง	18.32	6.09	3.92	2.69	1.49	3.62	63.86
	กากค้ำตะแกรงสะสม	18.32	24.41	28.34	31.02	32.52	36.14	100.00
CPFA2	กากค้ำตะแกรง	8.02	43.84	38.53	9.43	0.05	0.05	0.07
	กากค้ำตะแกรงสะสม	8.02	51.86	90.39	99.82	99.88	99.93	100.00
CFA	กากค้ำตะแกรง	0.98	5.61	3.90	2.31	1.86	6.53	78.81
	กากค้ำตะแกรงสะสม	0.98	6.59	10.49	12.80	14.66	21.19	100.0
BA1	กากค้ำตะแกรง	18.21	42.48	19.49	5.92	3.47	5.10	5.34
	กากค้ำตะแกรงสะสม	18.21	60.69	80.18	86.09	89.56	94.66	100.00
BA2	กากค้ำตะแกรง	22.20	17.92	11.29	9.81	12.11	13.16	13.51
	กากค้ำตะแกรงสะสม	22.20	40.11	51.41	61.22	73.33	86.49	100.00
PA	กากค้ำตะแกรง	8.48	6.98	7.03	10.44	9.87	26.42	30.79
	กากค้ำตะแกรงสะสม	8.48	15.46	22.48	32.93	42.79	69.21	100.00
WFA	กากค้ำตะแกรง	6.16	3.61	3.96	6.62	6.49	24.42	48.74
	กากค้ำตะแกรงสะสม	6.16	9.77	13.74	20.36	26.85	51.26	100.00
RA	กากค้ำตะแกรง	8.12	10.60	4.75	7.82	5.88	29.93	32.90
	กากค้ำตะแกรงสะสม	8.12	18.72	23.48	31.29	37.17	67.10	100.00

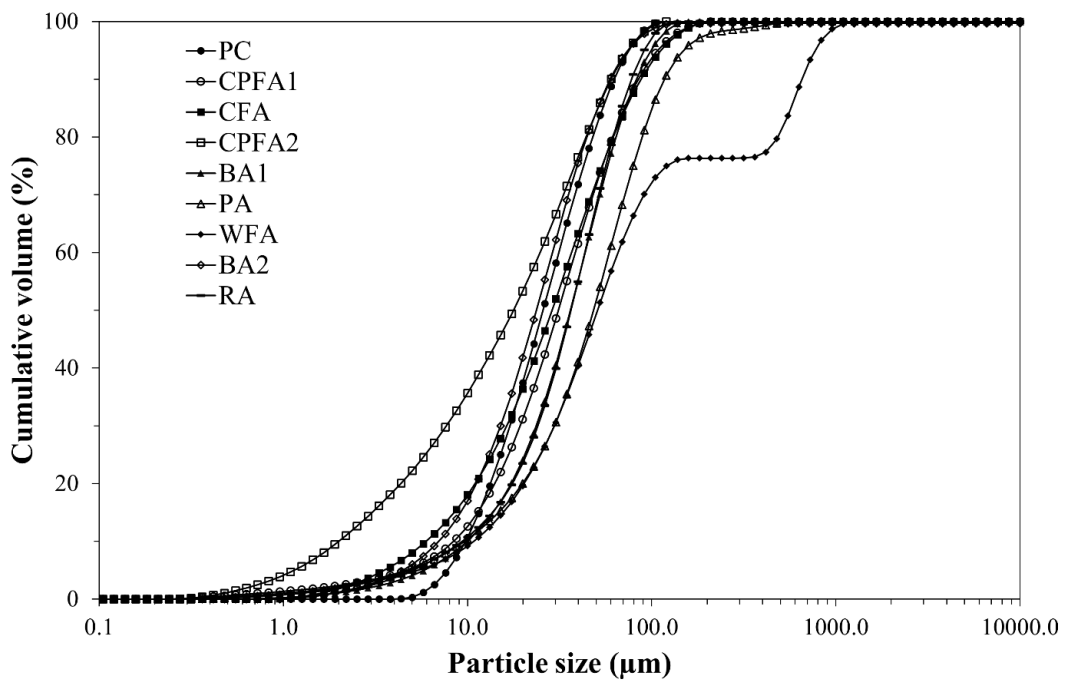
ตารางที่ 6 แสดงขนาดอนุภาคของเก้าอี้มวล์ทั้งแปดชนิดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่นำมาใช้เป็นวัสดุเติมในการเตรียมเม็ดมวลรวมเบาในงานวิจัยนี้ ที่ได้จาก laser particle size analysis รูปที่ 21 และ 22 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุเติม และการกระจายขนาดอนุภาคสะสมของวัสดุเติม ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเก้าอี้มวล์ WFA มีการกระจายขนาดอนุภาคแบบ bimodal particle size distribution อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคในช่วง 1,000 ไมครอน ที่ตรวจพบอาจเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคขนาดเล็กที่จับตัวรวมกัน เนื่องจากไม่มีการสังเกตเห็นอนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวเมื่อทำการศึกษากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในส่วนของ PC และเก้าอี้ชนิดอื่น ๆ พบว่ามีการกระจายขนาดอนุภาคแบบ normal particle size distribution จากข้อมูลข้างต้นโดยรวมแล้วอนุภาคเก้าอี้มวล์ CPFA2 มีขนาดโดยเฉลี่ยเล็กกว่า PC ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน CPFA1 CFA และ BA2 มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับ PC ในขณะที่ WFA มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยใหญ่กว่า PC ประมาณ 2 เท่า นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของเก้าอี้ที่ได้จากการศึกษาด้วยวิธี laser scattering ยังมีความสอดคล้องกับภาพที่เห็นจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แสดงในรูปที่ 20

ตารางที่ 6 ขนาดอนุภาคของวัสดุเติม

วัสดุเติม	PC	CPFA1	CPFA2	CFA	BA1	BA2	PA	WFA	RA
ขนาดอนุภาค (d_{50} , μm)	29.51	31.13	17.78	28.77	36.26	27.17	55.50	58.32	41.92



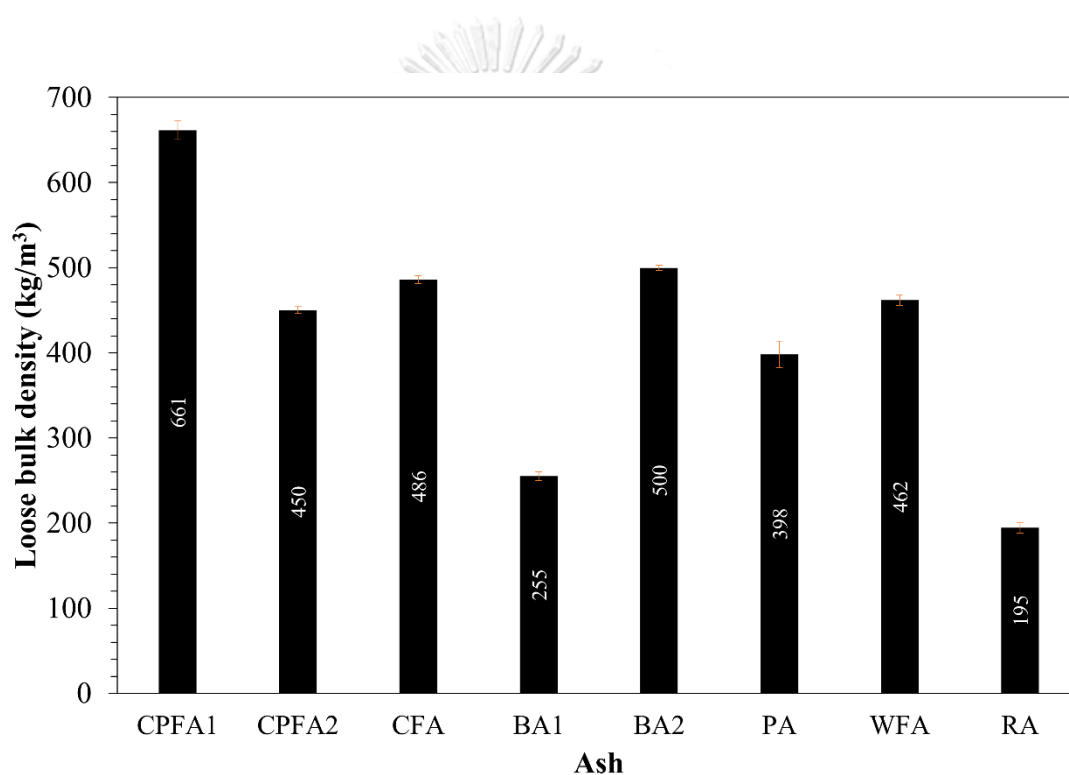
รูปที่ 21 การกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุดิบ (Particle size distribution)



รูปที่ 22 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมของวัสดุดิบ (Cumulative particle size distribution)

4.1.5 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น

จากผลการวิเคราะห์สมบัติความหนาแน่นรวม (loose bulk density) ของตัวอย่างเถ้าชีวมวลดังแสดงในรูปที่ 23 พบว่า ตัวอย่างเถ้าชีวมวลมีความหนาแน่นแตกต่างกันไปอยู่ในช่วงค่าความหนาแน่น 195 – 661 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยรวมแล้วพบว่าเถ้าที่มีค่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยน้อยกว่า กล่าวคือมีขนาดละเอียดมากกว่า ดังเช่น CPFA1 CPFA2 หรือ BA2 จะมีแนวโน้มที่มีความหนาแน่นรวมมากกว่า ในขณะที่ตัวอย่างเถ้าที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่า พบว่ามีลักษณะเป็นผงหยาบและฟุ้ง ดังเช่น BA1 หรือ RA และมีแนวโน้มที่มีค่าความหนาแน่นรวมที่ต่ำกว่า

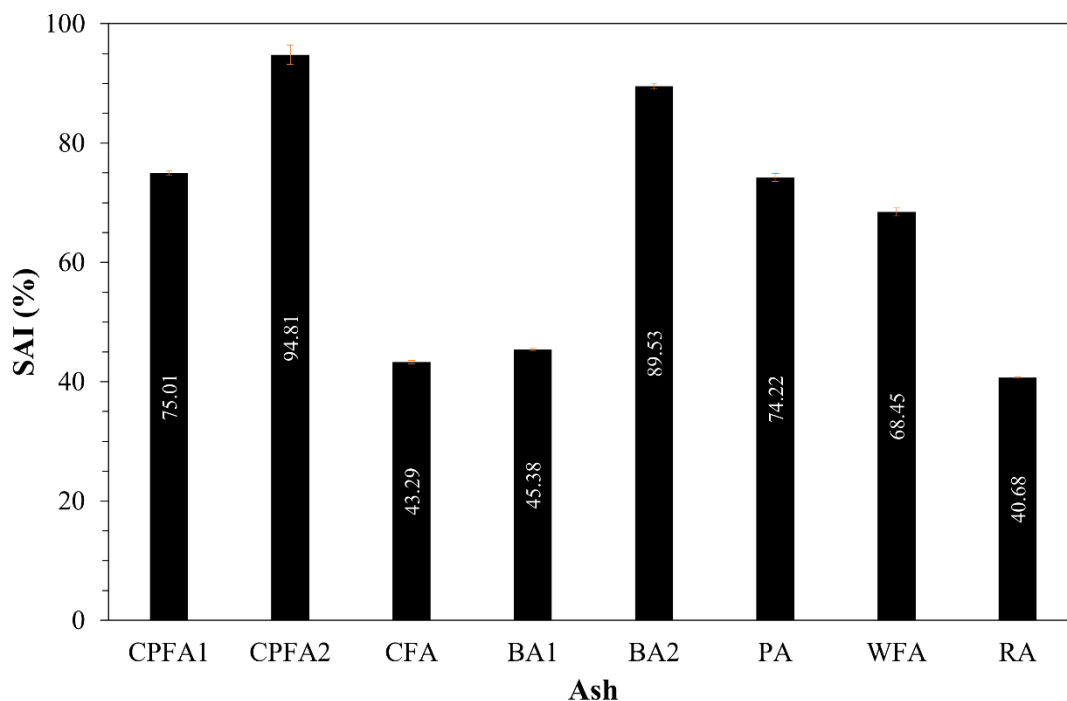


รูปที่ 23 ความหนาแน่น (loose bulk density) ของตัวอย่างเถ้าชีวมวล

4.1.6 ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีกำลัง

ค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index, SAI) ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic activity) ของเถ้าชีวมวลทั้งแปดชนิดที่ทำการศึกษาโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM C311 แสดงอยู่ในรูปที่ 24 จากกราฟดังกล่าวพบว่า เถ้า CPFA2 และ BA2 มีค่าดัชนีกำลังสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 94.81 และ 89.53 ตามลำดับ แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในระดับที่ใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นตัวแปรควบคุม ส่วนเถ้าลอย CPFA1 PA และ WFA มีระดับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานรองลงมาอยู่ในช่วงร้อยละ

68.45 – 75.01 และพบว่าถ้า CFA BA1 และ RA มีค่าดัชนีกำลังต่ำที่สุด คือ อยู่ระหว่าง ร้อยละ 40.68 – 43.29



รูปที่ 24 ค่าดัชนีกำลังของเถ้าชีวมวล

ทั้งนี้ค่าดัชนีกำลังที่แตกต่างกันของเถ้าชีวมวลแต่ละชนิดมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย เช่น ขนาดอนุภาค องค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น [59] เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้า ดังที่ได้มีการกล่าวถึงในหัวข้อ 4.1.1 ก่อนหน้านี้ พบว่า CPFA2 และ BA2 มี SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในปริมาณร้อยละโดยมวลที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าชนิดอื่นในงานวิจัยนี้ และเมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคของวัสดุบดตั้งที่ได้มีการกล่าวถึงในหัวข้อ 4.1.5 พบว่าเถ้าทั้งสองชนิดนี้ มีความละเอียดสูง มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าชนิดอื่น จึงทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่า ส่งผลให้ค่าดัชนีกำลังสูงกว่า สำหรับกรณีของเถ้าลอย CPFA1 ซึ่งมีปริมาณร้อยละโดยมวลของ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมทั้งขนาดอนุภาคอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าชนิดอื่น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าดัชนีกำลังของ CPFA1 ไม่ได้สูงมากดัง CPFA2 หรือ BA2 ในขณะเดียวกันเถ้า PA และ WFA ถึงแม้จะมี SiO_2 ในสัดส่วนร้อยละโดยมวลที่ค่อนข้างสูง แต่มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เป็นองค์ประกอบทางเคมีในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ รวมทั้งเถ้ามีลักษณะหยาบ มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับเถ้า

ชนิดอื่นในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะ WFA ที่อาจมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคขนาดเล็กเมื่อพิจารณาการกระจายขนาดอนุภาค ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าสองชนิดนี้อาจไม่สมบูรณ์เท่าไรนัก ซีเมนต์เพสต์ไม่สามารถพัฒนาความแข็งแรงได้เต็มที่เมื่อเปรียบเทียบกับ CPFA2 และ BA2 ซึ่งมีค่าดัชนีกำลังที่สูงกว่า ส่วนเถ้าลอย CFA ถึงแม้ว่าจะมีขนาดอนุภาคเล็กใกล้เคียงกับ PC มีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี แต่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ต่ำ ส่งผลให้ค่าดัชนีกำลังของ CFA ไม่ได้สูงมากดังแสดงในรูปที่ 24 และในทางตรงกันข้าม กรณีของเถ้า BA1 ที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน คือมีสัดส่วนของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ที่สูง แต่เถ้าชนิดนี้กลับมีขนาดอนุภาคที่ไม่ได้ละเอียดมากเมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคดังที่ได้มีการอธิบายไปก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 4.1.4 ทำให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของซีเมนต์เพสต์ที่มี BA1 เป็นส่วนผสมไม่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าชนิดอื่นเป็นส่วนผสม และสุดท้ายสำหรับเถ้า RA ที่แม้ว่าจะมีปริมาณ SiO_2 มาก แต่ขาด Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ในองค์ประกอบทางเคมี รวมทั้งตัวเถ้าชนิดนี้เองมีความหยาบสูงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเถ้าชนิดอื่น ขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ จึงทำให้อาจเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในซีเมนต์เพสต์ได้ไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถพัฒนาความแข็งแรงได้เต็มที่ ส่งผลให้ค่าดัชนีกำลังของเถ้าชนิดนี้ต่ำ

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเม็ดมวลรวมเบา

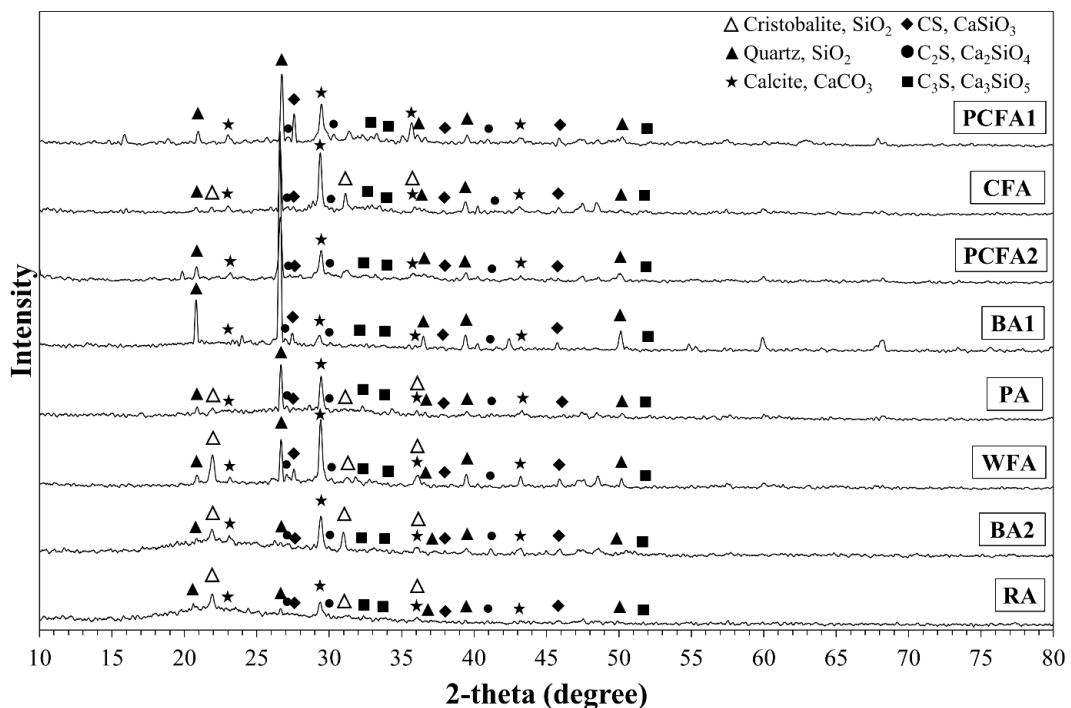
ตัวอย่างมวลรวมที่ถูกเตรียมขึ้นจากเถ้าชีวมวลด้วยกรรมวิธี cold-bonded pelletization (CBP) แสดงในรูปที่ 25 (ก) – (ข) โดยเม็ดมวลรวมเบาที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 4.0 – 16.0 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถเทียบได้กับมวลรวมเบาจากเถ้าชนิดอื่นที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคเดียวกันในวรรณกรรม [48, 49, 52, 60] ลำดับถัดไปจะเป็นการรายงานและวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบา อันได้แก่ องค์ประกอบทางเฟส โครงสร้างทางจุลภาค ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว



รูปที่ 25 ตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจาก (ก)เม็ดลอย CPFA1 (ข)เม็ดลอย CFA (ค)เม็ดลอย CPFA2 (ง)เม็ด BA1 (จ)เม็ด PA (จ)เม็ดลอย WFA (ฉ)เม็ด BA2 และ (ช)เม็ด RA

4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส

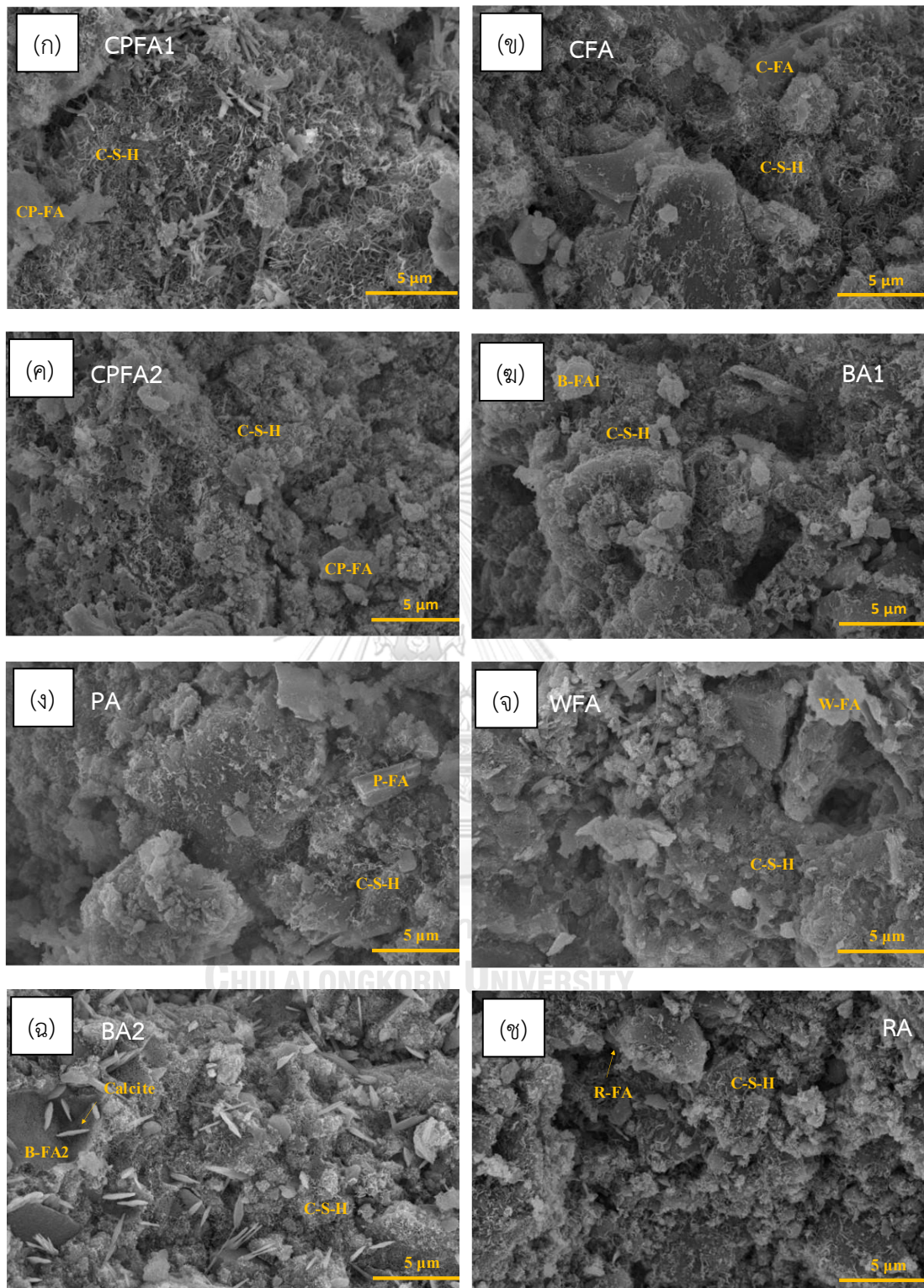
รูปที่ 26 แสดง XRD pattern ของตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าชีวมวลต่าง ๆ ทั้งแปดชนิด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเม็ดมวลรวมเบาพบว่า มีองค์ประกอบทางเฟสที่เป็นผลึกคล้ายกัน ได้แก่ คริสโตบาไลต์ (SiO_2) ควอตซ์ (SiO_2) แคลไซต์ (CaCO_3) และสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3 Ca_2SiO_4 และ Ca_3SiO_5) ในระดับความเข้มข้นของพีคที่แตกต่างกัน โดยเฟสของผลึกคริสโตบาไลต์ ควอตซ์ และแคลไซต์ที่พบมีที่มาจากองค์ประกอบทางเคมีของตัวเถ้าเองดังที่ได้มีรายงานไว้แล้วก่อนหน้านี้ ส่วนเฟสของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต CS C_2S และ C_3S เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นก่อน ก่อให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน รวมทั้งเพิ่มความแข็งแรงในระยะยาวให้กับเนื้อเมทริกซ์ของวัสดุเม็ดมวลรวมเบา นอกจากนี้ผลที่ได้จากการศึกษาองค์ประกอบทางเฟสของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นยังมีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ดังจะได้อธิบายเพิ่มเติมในลำดับถัดไป



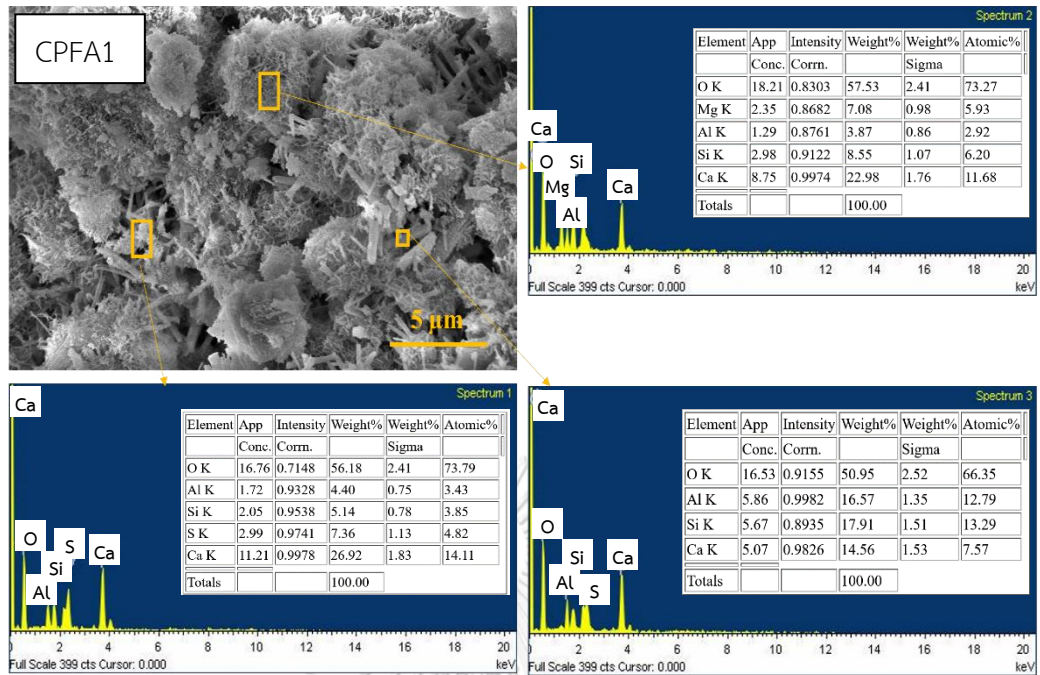
รูปที่ 26 XRD pattern ของมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ

4.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

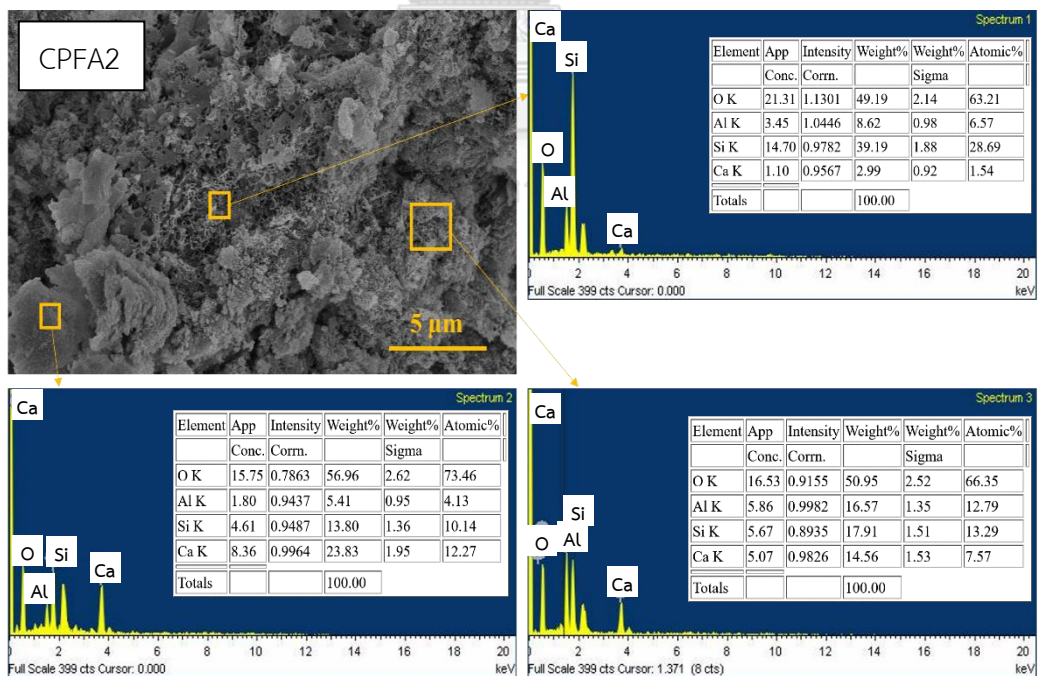
รูปที่ 27 (ก) – (ข) แสดงภาพโครงสร้างทางจุลภาคกำลังขยาย 5000 เท่าของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้า CPFA1 CFA CPFA2 BA1 PA WFA BA2 และ RA ตามลำดับ จากภาพสามารถสังเกตเห็นว่าเม็ดมวลรวมเบา มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคคล้ายกัน คือ เป็นโครงสร้างแบบหลายเฟส (multiphase microstructure) ที่ประกอบไปด้วยอนุภาคของเถ้าชนิดนั้น ๆ กระจายตัวอยู่ทั่วเมทริกซ์ (matrix) โดยตัวอนุภาคเถ้านี้ถูกเชื่อมประสานเข้าด้วยกันด้วยเฟสของเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate gel, C-S-H gel) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการเชื่อมประสานอนุภาคเถ้าเข้าด้วยกันของเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนี้ช่วยปิดช่องว่างระหว่างอนุภาค ลดขนาดโพรงและรูพรุนในเมทริกซ์ นำไปสู่การลดลงของรูพรุนในโครงสร้าง (pore refinement) และส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนาความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมเบา นอกจากนี้ในกรณีของมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้า BA2 ยังพบผลึกของแคลไซต์ที่ปะปนมากับเถ้ากระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 27(ฉ) เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคประกอบกับสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้า CPFA1 CPFA2 WFA BA2 และ RA ดังแสดงในรูปที่ 28 – 32 โดยรวมแล้วพบว่าผลที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคพื้นผิวแตกหักของตัวอย่างมวลรวมเบา มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาองค์ประกอบทางเฟสของเม็ดมวลรวมเบา ดังที่ได้มีการกล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้า รวมทั้งยืนยันสมมติฐานการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการเตรียมเม็ดมวลรวมเบาและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของอนุภาคเถ้า



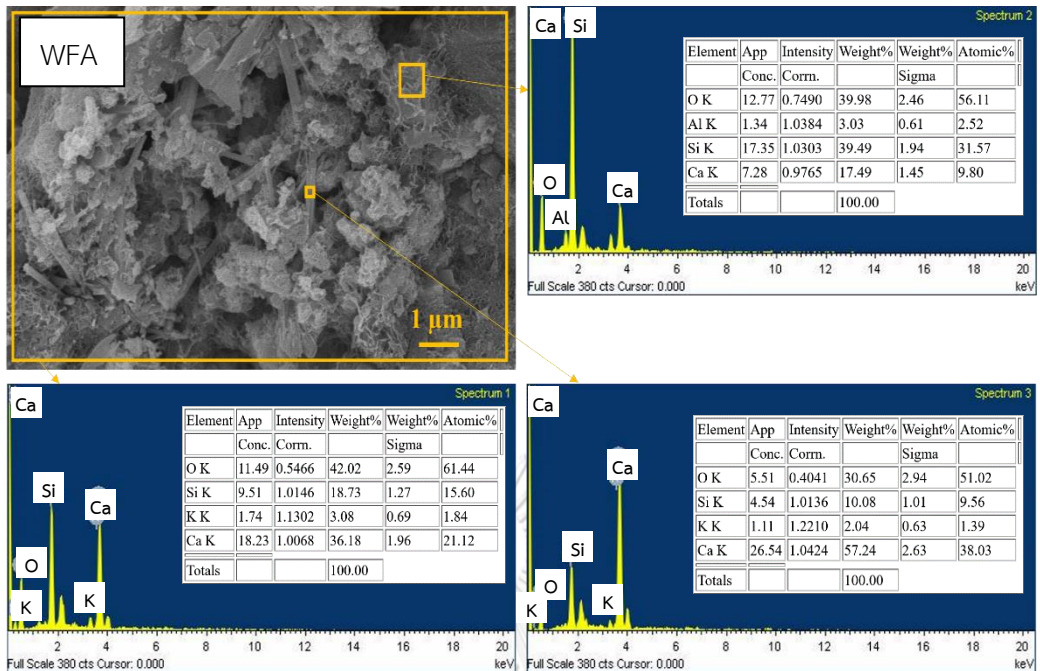
รูปที่ 27 โครงสร้างทางจุลภาคของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของมวลรวมเบาที่เตรียมจาก (ก) ใ้ลย CPFA1 (ข) ใ้ลย CFA (ค) ใ้ลย CPFA2 (ง) ใ้ลย BA1 (จ) ใ้ลย PA (ฉ) ใ้ลย WFA (ฉ) ใ้ลย BA2 และ (ข) ใ้ลย RA



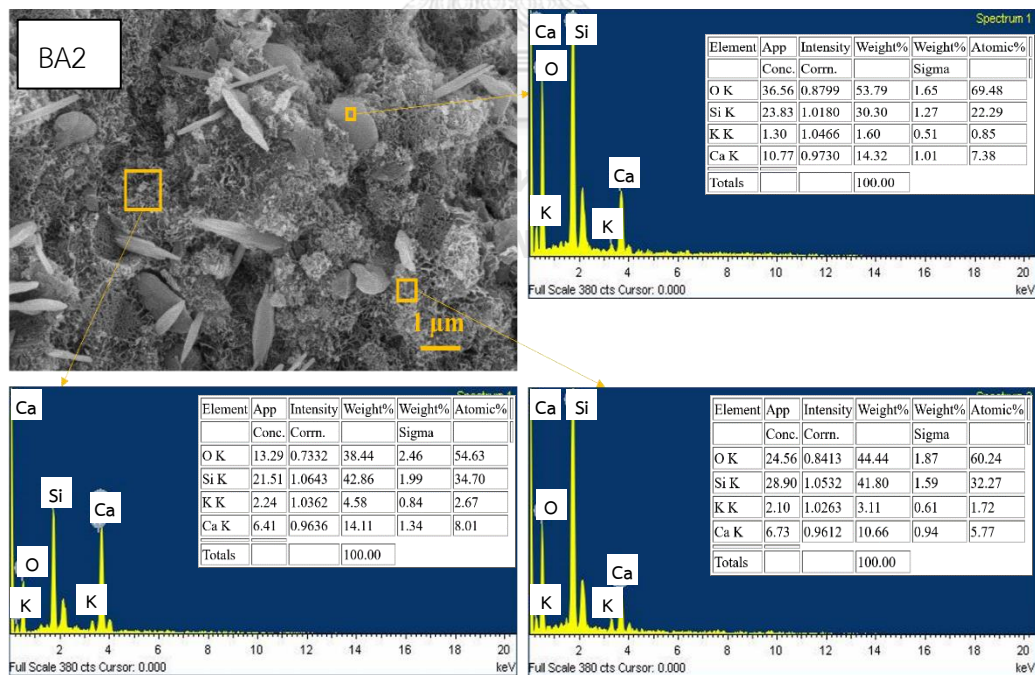
รูปที่ 28 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าลอย CPFA1



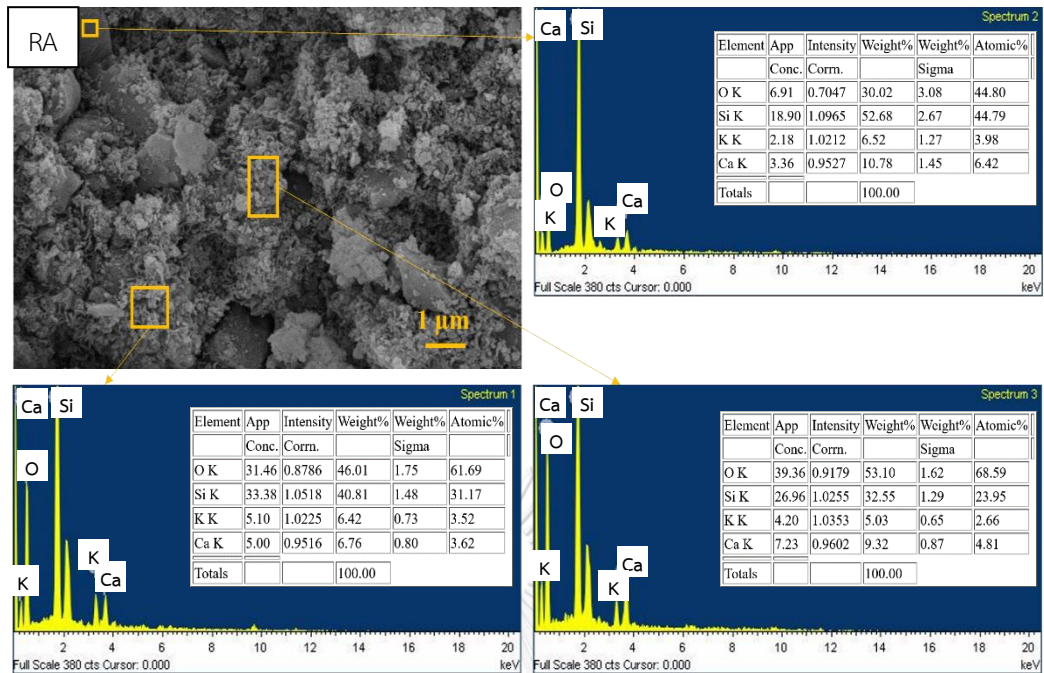
รูปที่ 29 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าลอย CPFA2



รูปที่ 30 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าลอย WFA



รูปที่ 31 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้า BA2

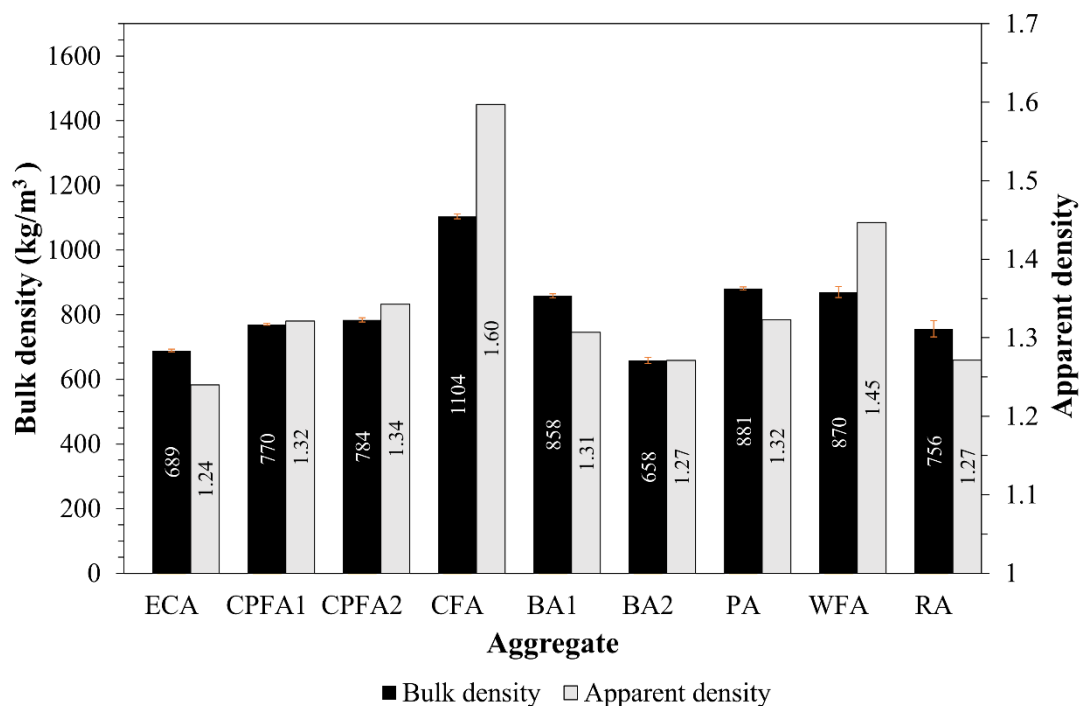


รูปที่ 32 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของภาคตัดขวางพื้นผิวแตกหัก (fracture surface) ของมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้า RA

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่น

รูปที่ 33 แสดงความหนาแน่นรวม (bulk density) และความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) ของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นในช่วงขนาด 4.0 – 8.0 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับเม็ดมวลรวมเบาดินเผาพองตัว (expanded clay aggregate, ECA) ในช่วงขนาดเดียวกัน โดย ECA เป็นวัสดุทางการค้าที่ใช้เป็นมวลรวมสำหรับทดแทนหินในการผลิตคอนกรีตมวลเบา จากกราฟจะเห็นได้ว่ามวลรวมเบาที่เตรียมได้จากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ มีค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์แตกต่างกันไปอยู่ช่วง 658 – 1,104 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 1.27 – 1.60 ตามลำดับ แม้จะเป็นเถ้าจากเชื้อเพลิงชนิดเดียวกันอย่างเช่น BA1 และ BA2 ที่ต่างเป็นเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าชานอ้อยด้วยกันแต่พบว่าตัวอย่างมวลรวมเบาทั้งสองชนิดมีค่าความหนาแน่นที่แตกต่างกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ ECA ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 689 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าตัวอย่างมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้า BA2 มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับวัสดุทางการค้า ECA มากที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาอื่น ๆ มีความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุทางการค้า เนื่องจากวัสดุประเภท ECA มักมีช่องว่างขนาดใหญ่และรูพรุนเป็นองค์ประกอบในเนื้อวัสดุจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเม็ดมวลรวมเบาทั้งแปดชนิดที่เตรียมขึ้นมาในงานวิจัยนี้มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า 1,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจึง

จัดประเภทวัสดุได้ว่าเป็นเม็ดมวลรวมเบา (lightweight aggregate) ตามมาตรฐาน EN 12620-1



รูปที่ 33 ความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของเม็ดมวลรวมเบาเปรียบเทียบกับวัสดุทางการ

ค่า

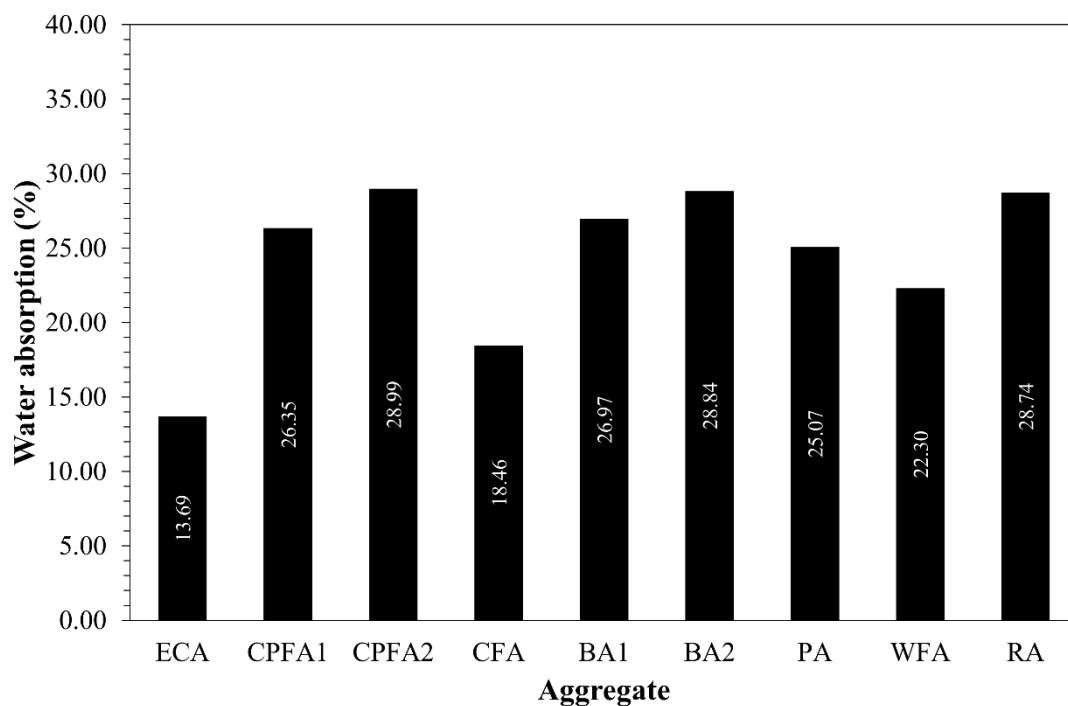
จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์สมบัติความหนาแน่นของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากถ้ำชีวมวลด้วยกรรมวิธี CBP เปรียบเทียบกับมวลรวมในงานวิจัยอื่นที่เตรียมขึ้นจากถ้ำชนิดอื่นด้วยกรรมวิธีเดียวกัน พบว่าตัวอย่างมวลรวมเบาในงานวิจัยนี้มีความหนาแน่นที่ค่อนข้างดี กล่าวคือมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับมวลรวมเบาชนิดอื่นที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น ความหนาแน่นต่ำกว่าเม็ดมวลรวมเบาจากถ้ำลอยถ่านหินซึ่งมีความหนาแน่น 1,765 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากงานวิจัยของ Narattha และ Chaipanich [49] ซึ่งมากกว่าร้อยละ 50 ยิ่งไปกว่านั้นตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาทุกชนิดที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ยกเว้นเม็ดมวลรวมเบา CFA มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่ามวลรวมเบาจากถ้ำหน้าโรงไฟฟ้าชยะเทศบาลซึ่งมีความหนาแน่น 980 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจากงานวิจัยของ Tang และคณะ [48] และตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นส่วนใหญ่ ได้แก่ CPFA1 CPFA2 BA2 และ RA มีความหนาแน่นที่ต่ำกว่ามวลรวมเบาจากถ้ำสามชนิดซึ่งมีความหนาแน่น 850 – 970 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากงานวิจัยของ Chi และคณะ [61] เป็นต้น ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าความหนาแน่นของมวลรวมในงานวิจัยนี้ที่ต่ำกว่าอาจเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุดิบในการขึ้นรูปเตรียมเม็ดมวลรวมเบา ส่วนหนึ่งเพราะเถ้าชีวมวลมักมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเถ้าชนิดอื่น นอกจากนี้ยังอาจมีสาเหตุมาจากรูปร่างอนุภาคที่ไม่แน่นอนของตัวเถ้าชีวมวลเอง รวมทั้งโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วยรูพรุน ดังที่ได้มีการรายงานในหัวข้อที่ 4.1.3 ก่อนหน้านี้

4.2.4 ผลการวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ

รูปที่ 34 แสดงค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นในช่วงขนาด 4.0 – 8.0 มิลลิเมตร และได้ผ่านการบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า ECA ที่มีขนาดอยู่ในช่วงเดียวกัน เมื่อพิจารณากราฟดังกล่าวจะเห็นได้ว่าตัวอย่างมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นจากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ มีค่าการดูดซึมน้ำที่แตกต่างกันออกไปอยู่ในช่วงร้อยละ 18.46 – 28.99 โดยตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบา CFA มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าตัวอย่างอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด คือ ร้อยละ 18.46 ในขณะที่ตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบา CPFA2 BA2 และ RA มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุดในบรรดาตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ คือ ร้อยละ 28.99 28.84 และ 28.74 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้พบว่าการดูดซึมน้ำของมวลรวมเบาที่มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับสมบัติความหนาแน่นของมวลรวมเบาซึ่งได้มีการรายงานไว้ในหัวข้อ 4.2.3 มวลรวมเบาที่มีความหนาแน่นต่ำดังเช่น BA2 หรือ RA จะมีแนวโน้มที่จะมีค่าการดูดซึมน้ำสูง ในทางกลับกันมวลรวมเบาที่มีความหนาแน่นสูงดังเช่น CFA หรือ PA จะมีแนวโน้มที่จะมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี CBP โดยการใช้งานปั้นเม็ด ผงเถ้าที่สามารถรวมตัวอัดกันได้ดีกว่าจะมีแนวโน้มเกิดเป็นเม็ดมวลรวมเบาที่มีเนื้อแน่น ความเป็นไปได้ที่จะเกิดโพรงหรือรูพรุนแบบเปิดในโครงสร้างน้อย เม็ดมวลรวมเบาลักษณะนี้จึงมีความหนาแน่นสูงกว่าและมีความพรุนตัวต่ำกว่า ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นสูงและร้อยละการดูดซึมน้ำต่ำ ในขณะที่เดียวกันเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากผงเถ้าที่มีความสามารถในการรวมตัวอัดกันต่ำระหว่างการผลิตขึ้นรูปบนงานปั้นเม็ด อนุภาคเกาะกันไม่ดีแม้ว่าจะมีวัสดุเชื่อมประสานในปริมาณเท่ากันกับเม็ดมวลรวมเบาสูตรอื่น เนื้อวัสดุที่ได้ไม่แน่น อาจมีโพรงขนาดใหญ่เกิดขึ้นหรือปริมาณรูพรุนเปิดมากกว่า ส่งผลให้เม็ดมวลรวมเบาที่ได้มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าและการดูดซึมน้ำสูงกว่านั่นเอง โดยทั่วไปแล้วการดูดซึมน้ำแสดงถึงความพรุนตัวของมวลรวมจะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความหนาแน่นและความแข็งแรงของวัสดุ จากการศึกษาค้นคว้าสมบัติการดูดซึมน้ำของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นมี

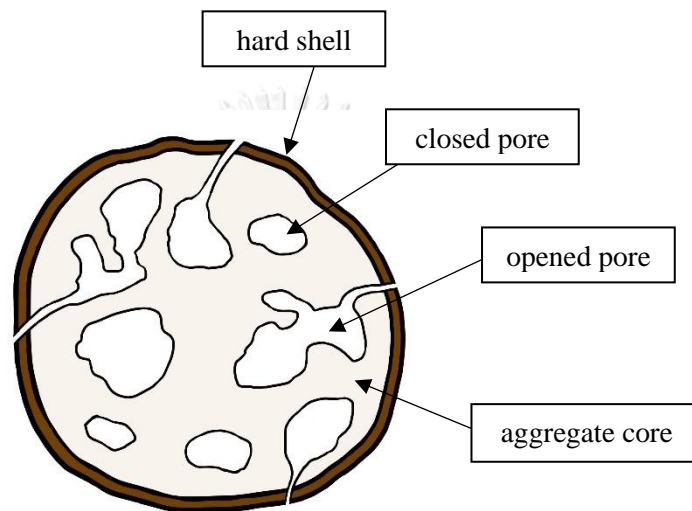
สัดส่วนแปรผกผันกันกับความหนาแน่นและความต้านแรงกดแตกของมวลรวม ดังจะได้อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อถัดไป



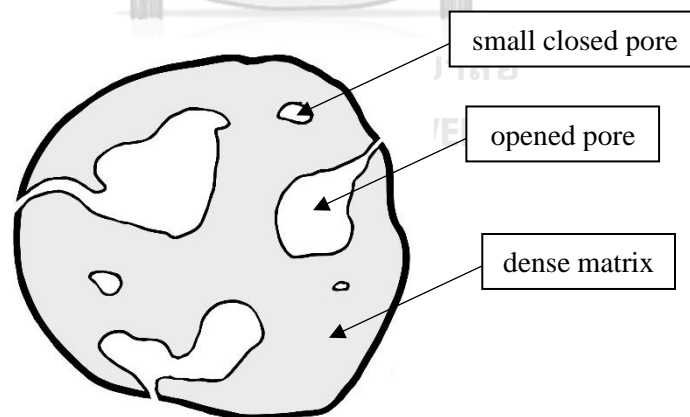
รูปที่ 34 การดูดซึมน้ำของเม็ดมวลรวมเบาเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า

เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า ECA ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 13.69 พบว่าเม็ดมวลรวมเบาที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค CBP โดยการใช้งานปั้นเม็ดมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าตัวอย่างมวลรวมเบาควบคุมทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากโดยพื้นฐานแล้วมวลรวมเบา CBP และ ECA เป็นวัสดุคนละชนิดกัน ส่งผลให้มีพฤติกรรมหรือกลไกการดูดซึมน้ำที่แตกต่างกัน สำหรับ ECA ซึ่งเป็นเม็ดดินเผาที่พอองตัวเมื่อได้รับความร้อนระหว่างกระบวนการผลิต เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดเปลือกหุ้มซึ่งมีลักษณะแข็ง ช่วยชะลอการดูดซึมน้ำของมวลรวม ประกอบกับลักษณะรูพรุนของวัสดุชนิดนี้มีทั้งรูพรุนแบบเปิด (opened pore) และรูพรุนแบบปิด (closed pore) ดังแสดงในรูปที่ 35 โดยที่รูพรุนแบบปิดมีส่วนทำให้ค่าดูดซึมน้ำของวัสดุชนิดนี้ต่ำกว่า เนื่องจากน้ำสามารถเข้าไปในรูพรุนดังกล่าวได้ในอัตราที่ช้ากว่ารูพรุนแบบเปิด ในขณะที่เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นจากกระบวนการ CBP นั้นเป็นวัสดุที่มีเนื้อเดียวกันตลอดทั้งเม็ด ไม่ได้มีเปลือกแข็งหุ้ม เพราะในกระบวนการขึ้นรูปเกิดจากการสะสมและพอกพูนของอนุภาคเถ้าซึ่งถูกเชื่อมประสานเข้าด้วยกันด้วยปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ ส่งผลให้รูพรุนในเนื้อวัสดุชนิดนี้มีลักษณะเป็นรูพรุน

แบบเปิดเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 36 ถึงแม้ว่ามวลรวมชนิดนี้จะมีเนื้อแน่น แต่ด้วยลักษณะโครงสร้างของรูพรุนดังกล่าวทำให้วัสดุมวลรวมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ CBP โดยใช้จานปั่นเม็ดมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า ECA อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดซึมน้ำของ ECA จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากท้ายที่สุดแล้วน้ำจะสามารถซึมเข้าไปเติมเต็มรูพรุนแบบปิดภายในโครงสร้างของเม็ดมวลรวมได้ เพียงแต่อาจใช้เวลานานได้ถึง 15 เดือนจนกว่าเม็ดดินเผาพองจะดูดซึมน้ำจนเกิดการอิมตัว [58]



รูปที่ 35 โครงสร้างรูพรุนของเม็ดดินเผาพองตัว (expanded clay aggregate, ECA)



รูปที่ 36 โครงสร้างรูพรุนของเม็ดมวลรวมเบาที่ขึ้นรูปด้วยจานปั่นเม็ด

เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุมวลรวมเบาอื่น ๆ ในวรรณกรรมที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยกรรมวิธี CBP เหมือนกันโดยใช้วัตถุดิบชนิดอื่นที่แตกต่างกันออกไป อันได้แก่ เม็ดมวลรวมเบาจากถ้ำลอยถ่านหินซึ่งมีการดูดซึมน้ำร้อยละ 21.2 [62] และเม็ดมวลรวมเบาจากหินฝุ่นซึ่งมีการดูดซึมน้ำ

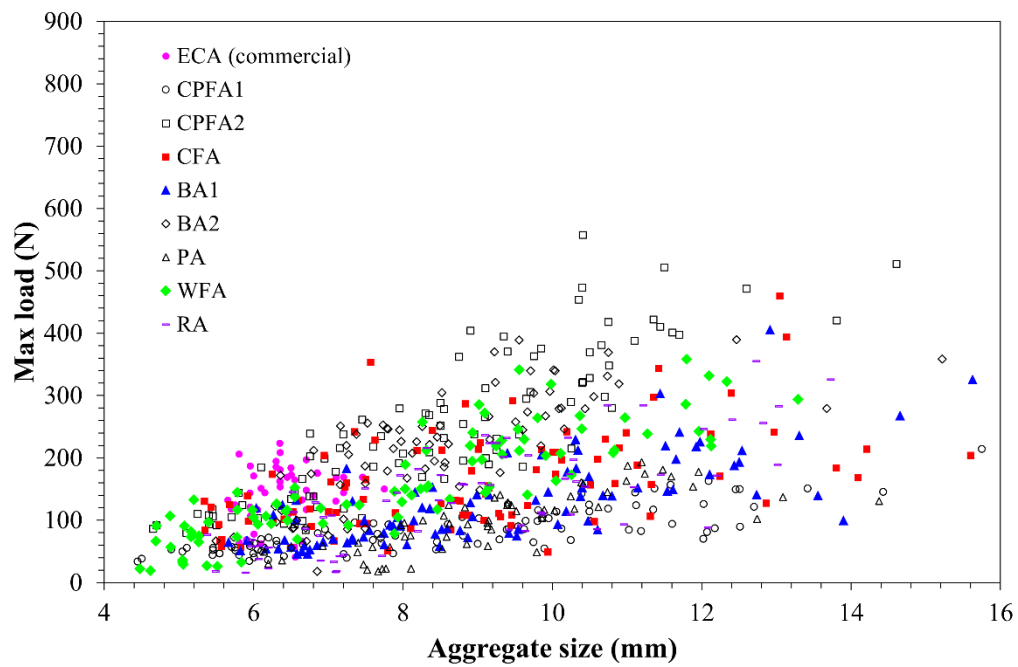
ร้อยละ 18.7 - 21.2 [63] พบว่าเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าลอยกะลาและเปลือกมะพร้าว (CFA) มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่า ในขณะที่เม็ดมวลรวมเบาชนิดอื่นในงานวิจัยนี้มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าเม็ดมวลรวมเบาที่ถูกรายงานไว้ในงานวิจัยอื่น

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว

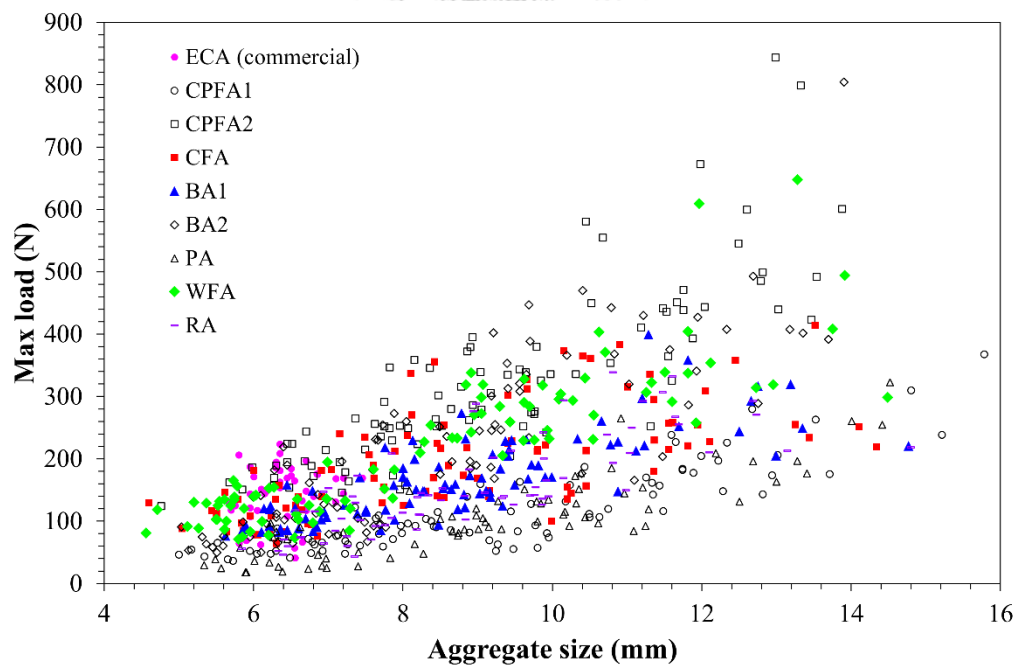
รูปที่ 37 และ 38 แสดงความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว (Single pellet crushing strength) ของเม็ดมวลรวมเบาที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่รูปที่ 39 แสดงความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดดินเผาพองตัวซึ่งเป็นวัสดุทางการค้าที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างควบคุมในงานวิจัยนี้ และรูปที่ 40 - 47 แสดงการพัฒนาความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน จากผลการทดลองพบว่าแรงกดแตกสูงสุดที่ตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาสามารถรับได้มีค่าแตกต่างกันไป แต่สำหรับเม็ดมวลรวมเบาทุกชนิดค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวจะแปรผันตรงกันขนาดของเม็ด กล่าวคือ หากเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดมีขนาดใหญ่ ค่าแรงกดแตกสูงสุดที่ตัวอย่างเม็ดยุคนั้นสามารถรับได้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงตาม ไม่ว่าจะเป็นตัวอย่างเม็ดที่เตรียมมาจากเถ้าชนิดไหนก็ตาม ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของเม็ดมวลรวมชนิดอื่นที่ได้มีการรายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [48, 49] โดยสำหรับเม็ดมวลรวมที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 4.0 - 16.0 มิลลิเมตร พบว่ามีค่าแรงกดแตกสูงสุดที่รับได้อยู่ในช่วง 20 - 850 นิวตัน นอกจากนี้ยังสามารถเห็นได้ว่าสมบัติความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นโดยรวมเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 วันเป็น 28 วัน เนื่องจากมีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุเชื่อมประสานในการขึ้นรูปเม็ด จึงมีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อวัสดุ ดังอธิบายไว้ในหัวข้อผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสในหัวข้อ 4.2.1 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคในหัวข้อ 4.2.2 ก่อนหน้านี้ ซึ่งการพัฒนาความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมจากการบ่มนี้สอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมในงานวิจัยอื่น [48, 49, 52, 60] อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้พบว่าความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมที่เตรียมขึ้นไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นมากเมื่อผ่านการบ่มจนครบ 28 วัน กล่าวคือสมบัติเชิงกลของเม็ดที่มีอายุ 7 วันนั้นค่อนข้างดี แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเม็ดมวลรวมเบาที่สามารถนำไปใช้งานเป็นมวลรวมในคอนกรีตได้ตั้งแต่อายุ 7 วันหลังการขึ้นรูป ช่วยประหยัดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาได้

เมื่อพิจารณาความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของตัวอย่างมวลรวมเบาอายุ 28 วัน ทั้งแปดชนิดเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า ECA พบว่า ตัวอย่างมวลรวม CPFA2 มีค่าความต้านแรงกด

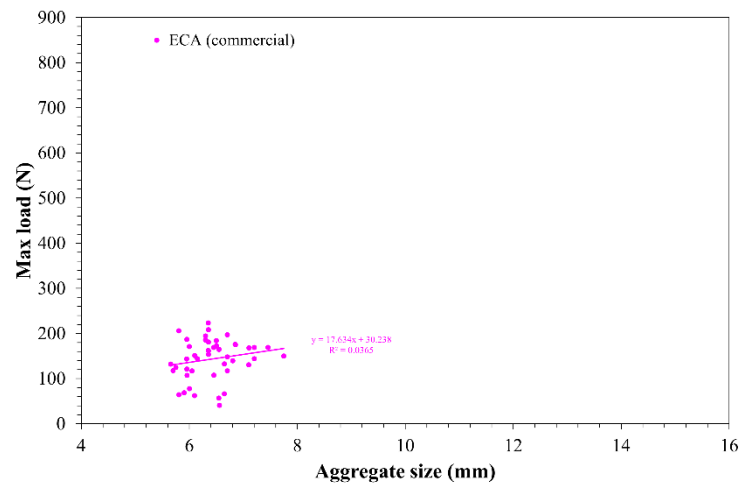
แตกที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากแก้ว CPFA2 มีค่าดัชนีกำลังซึ่งแสดงถึงระดับการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานสูง รวมทั้งยังมีซิลิกา อะลูมินา และไอรอนออกไซด์เป็นองค์ประกอบทางเคมีในปริมาณที่มากกว่าแก้วชนิดอื่น จึงเป็นไปได้ว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มเติมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ช่วยลดความพรุนตัวในเนื้อวัสดุ รวมทั้งเพิ่มความแข็งแรงระยะยาวให้กับเม็ดมวลรวมเบา [64] สำหรับเม็ดมวลรวมเบา BA2 และ WFA ซึ่งมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ECA สืบเนื่องมาจากแก้ว BA2 และ WFA มีค่าดัชนีกำลังที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแก้วชนิดอื่น อีกทั้งยังมีองค์ประกอบทางเคมีที่ซิลิกา และอะลูมินาค่อนข้างสูงอีกด้วย มากไปกว่านั้น แก้วลอย WFA ยังมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบที่ค่อนข้างมากดังที่ได้มีการรายงานในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งแคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนตที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเมทริกซ์และส่งเสริมสมบัติเชิงกลของเม็ดมวลรวมเบา ในลักษณะที่คล้ายกัน เมื่อพิจารณาเม็ดมวลรวมเบา CFA และ BA1 พบว่ามีค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวที่คล้ายกัน และต่ำกว่า ECA เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากแก้ว CFA และ BA1 มีค่าดัชนีกำลังที่ใกล้เคียงกัน แต่แก้ว CFA มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบในปริมาณที่มากกว่า BA1 จึงสามารถเกิดเฟสของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้เหมือนกับกรณีของเม็ดมวลรวมเบา WFA สำหรับเม็ดมวลรวมเบา CPFA1 PA และ RA พบว่ามีความแข็งแรงต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ECA ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่ามีสาเหตุมาจากระดับการเกิดปฏิกิริยาของแก้ว RA และ CPFA1 ที่น้อยกว่าแก้วชนิดอื่น เมื่ออ้างอิงจากค่าดัชนีกำลังของแก้วทั้งสองชนิด และสำหรับแก้ว PA ถึงแม้ว่าจะมีค่าดัชนีกำลังสูง เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีที่มีโปแตสเซียมออกไซด์อยู่ในปริมาณที่มีนัยสำคัญ มีส่วนขัดขวางการพัฒนาความแข็งแรงของปูนซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน [65] อีกทั้งยังมีสารอินทรีย์ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ทั้งสองปัจจัยนี้จึงมีส่วนส่งผลให้เม็ดมวลรวมเบา PA มีค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวที่ต่ำ



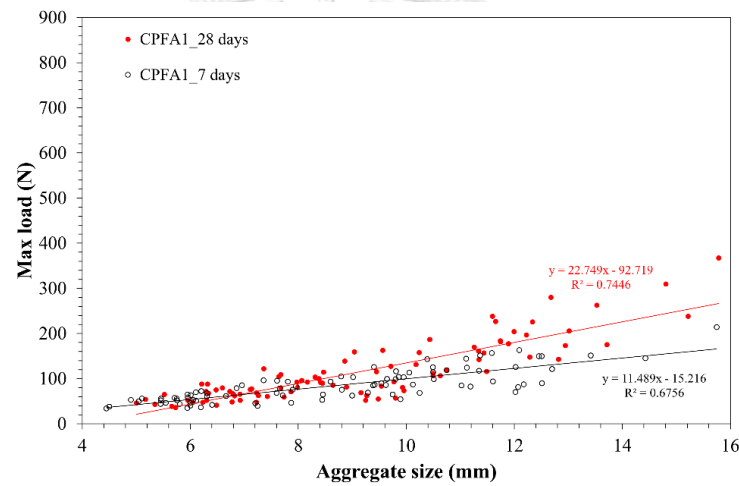
รูปที่ 37 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว (Single pellet crushing strength) ของเม็ดมวลรวมเบาที่มีอายุ 7 วัน เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า



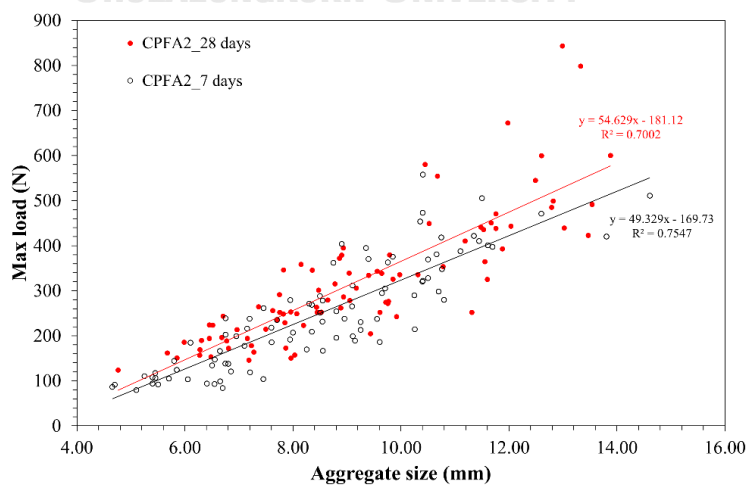
รูปที่ 38 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยว (Single pellet crushing strength) ของเม็ดมวลรวมเบาที่มีอายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า



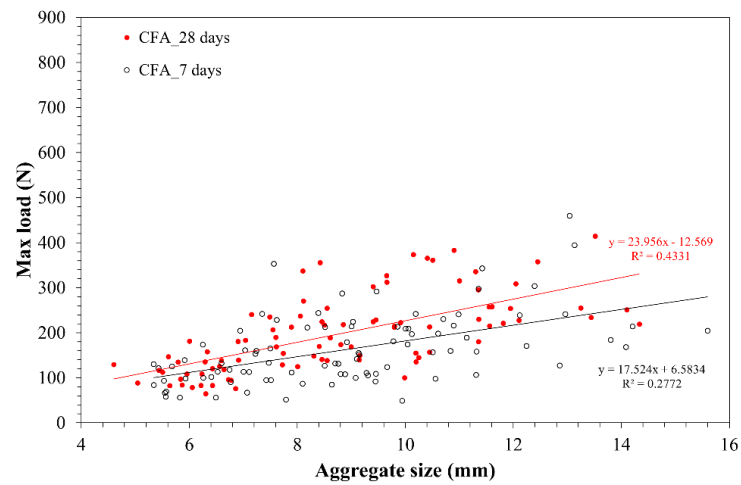
รูปที่ 39 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบาดินเผาพองตัว (ECA)



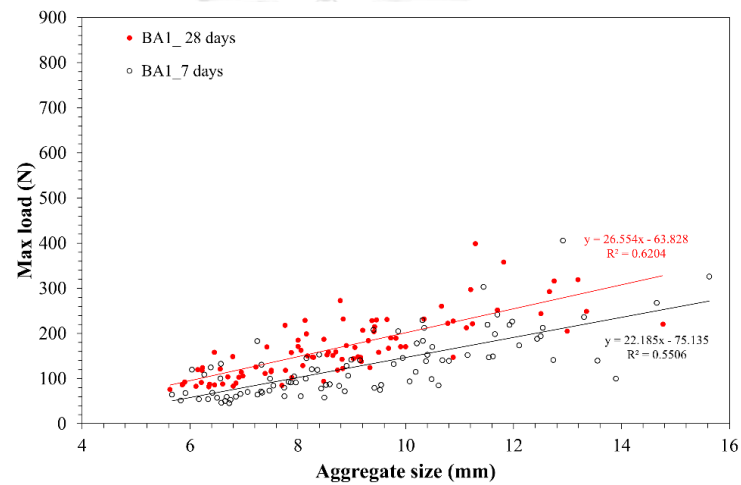
รูปที่ 40 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา CPFA1 ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน



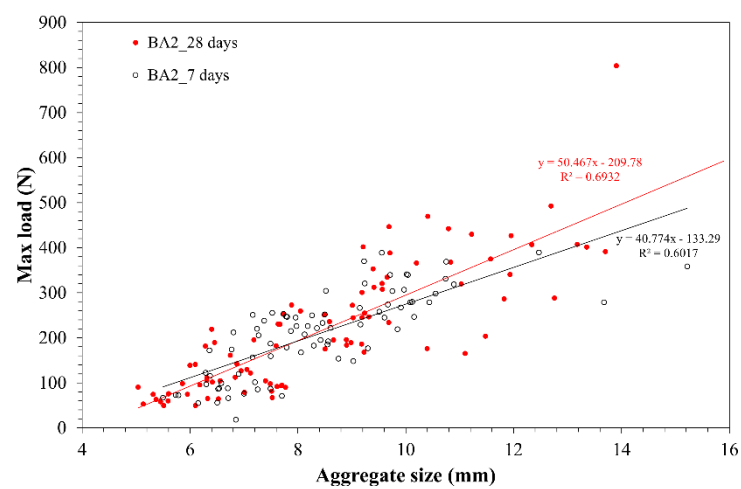
รูปที่ 41 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา CPFA2 ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน



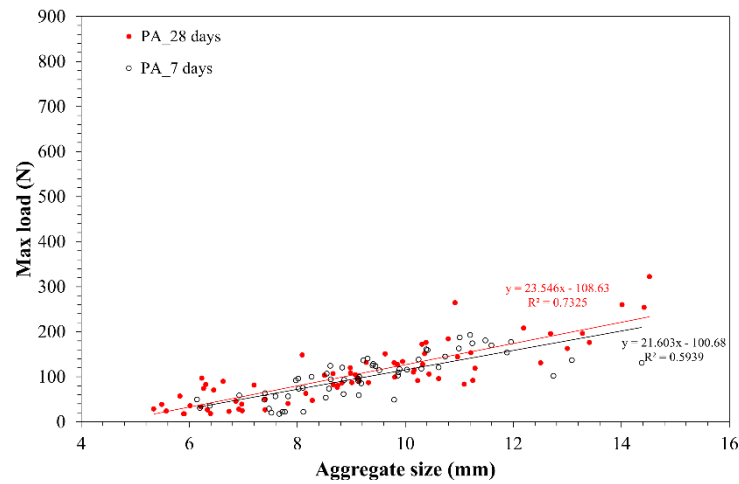
รูปที่ 42 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา CFA ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน



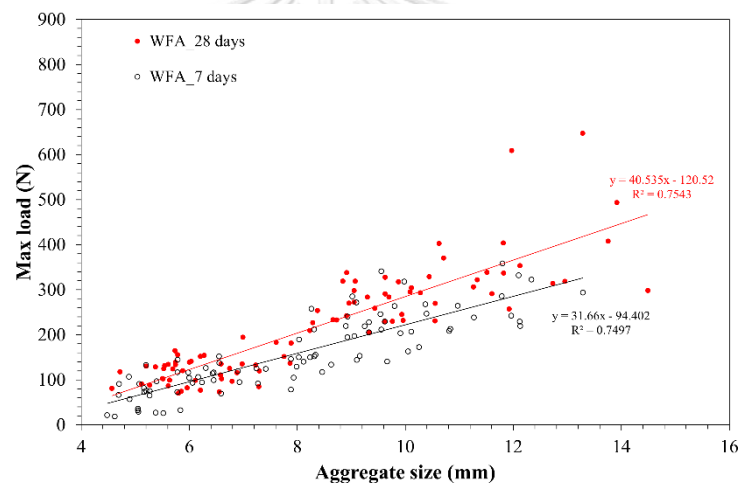
รูปที่ 43 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา BA1 ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน



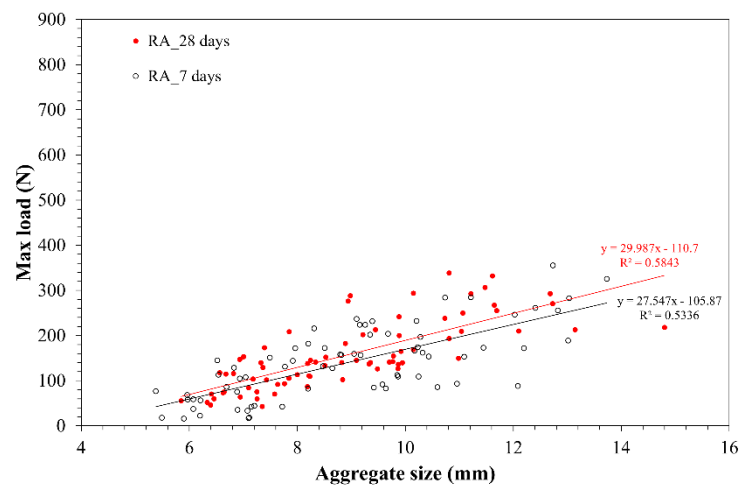
รูปที่ 44 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา BA2 ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน



รูปที่ 45 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา PA ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน



รูปที่ 46 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา WFA ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน



รูปที่ 47 ความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของเม็ดมวลรวมเบา RA ที่มีอายุ 7 วัน และ 28 วัน

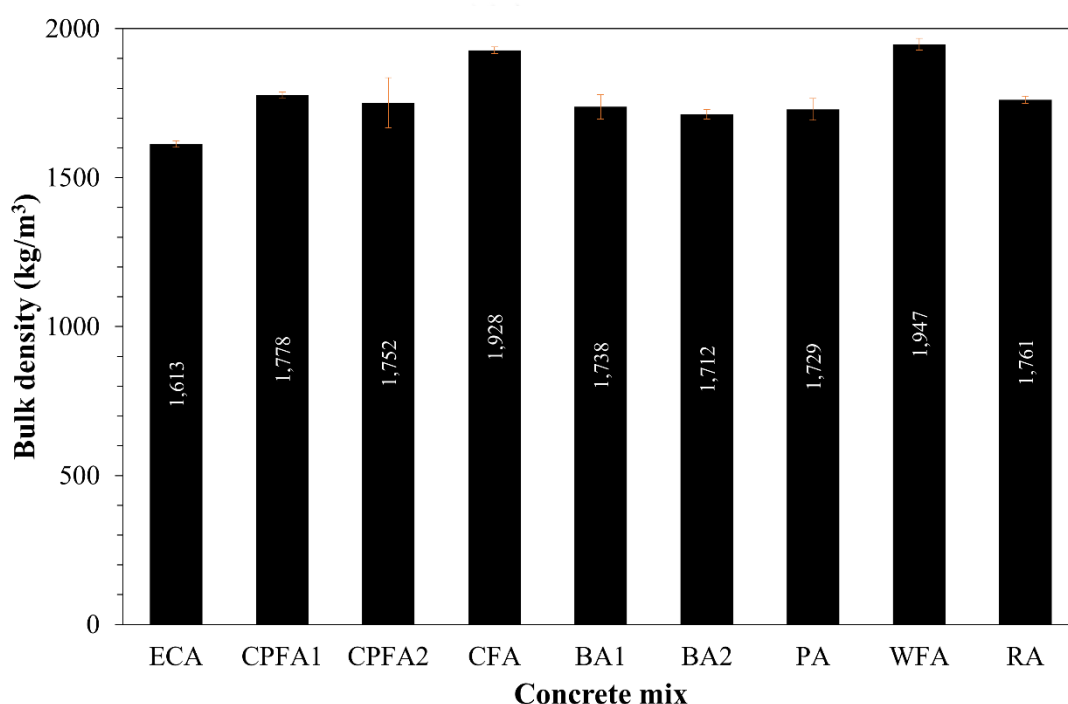
จากการทบทวนวรรณกรรมมีการกล่าวถึงสมบัติเชิงกลของเม็ดมวลรวมเบาที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค CBP โดยใช้งานปั้นเม็ดไว้ว่า ความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมนั้นขึ้นกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานเป็นอย่างมาก กล่าวคือ ความแข็งแรงเกือบทั้งหมดของมวลรวมนั้นมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [48, 60] อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยปัจจุบันซึ่งได้มีการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุเชื่อมประสานในสัดส่วนร้อยละโดยมวลเท่ากันกับงานวิจัยดังกล่าว แต่กลับพบว่าความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมในงานวิจัยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกตัวอย่างเช่น เม็ดมวลรวมเบา CPFA2 และ PA ที่พบว่าการต้านทานแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของมวลรวมสองชนิดนี้มีค่าแตกต่างกันเกินสองเท่าตัว เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาหลาย ๆ ชนิดที่เตรียมขึ้นมีความแข็งแรงสูงกว่าเม็ดมวลรวมจากเก้าชนิดอื่นที่ได้มีการรายงานไว้ในวรรณกรรม เช่น มวลรวมจากเก้าโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่มีความต้านแรงกดแตกสูงสุด 310 นิวตัน [52] หรือมวลรวมจากเก้าหนักโรงไฟฟ้าขยะเทศบาลที่มีความต้านแรงกดแตกสูงสุด 650 นิวตัน [48] เป็นต้น จึงสันนิษฐานได้ว่า นอกเหนือจากปริมาณวัสดุเชื่อมประสานแล้ว ชนิดของเก้ารวมถึงสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเก้าที่นำมาใช้ขึ้นรูปนั้นมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาความแข็งแรงของเม็ดมวลรวม โดยเก้าที่มีค่าดัชนีกำลังสูง มีซิลิกา อะลูมินาซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มความแข็งแรงระยะยาวให้กับวัสดุได้ มีแคลเซียมออกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงในช่วงต้นได้ มีสารอินทรีย์ซึ่งเป็นจุดอ่อนส่งผลทางด้านลบต่อสมบัติเชิงกลในปริมาณต่ำ หรือเก้าที่มีขนาดอนุภาคละเอียดเหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ด สามารถอัดและเกาะตัวรวมกลุ่มกันได้ดี ทำให้มีโพรงหรือรูพรุนในโครงสร้างต่ำ เก้าที่มีลักษณะดังกล่าวเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นมวลรวมแล้วจะมีแนวโน้มช่วยส่งเสริมพัฒนาความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุมวลรวม

4.3.1 ผลวิเคราะห์ความหนาแน่น

กราฟแท่งในรูปที่ 48 แสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 5.0 ซม. × 5.0 ซม. × 5.0 ซม. ที่เตรียมขึ้นโดยใช้เม็ดมวลรวมเบาเป็นวัสดุมวลรวมเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาดินเผาพองตัวเป็นวัสดุมวลรวม เมื่อพิจารณาข้อมูลดังกล่าวพบว่า ลูกบาศก์คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบาจากเก้า CPFA1 CPFA2 BA1 PA BA2 และ RA มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันกับตัวอย่างควบคุมซึ่งมีความหนาแน่น 1,613 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยตัวอย่างคอนกรีตกลุ่มดังกล่าวมีน้ำหนักมากกว่าตัวอย่างควบคุมเล็กน้อยประมาณร้อยละ 6 – 10 ในขณะที่ลูกบาศก์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบา

จากเค้า CFA และ WFA มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณร้อยละ 20 นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบายังมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับความหนาแน่นของเม็ดมวลรวมเบาซึ่งได้มีการรายงานผลไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3 ก่อนหน้านี้ ยกตัวอย่างเช่น เม็ดมวลรวมเบาที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า ได้แก่ BA2 หรือ ECA เมื่อนำมาผสมเป็นมวลรวมเบาในคอนกรีตจะมีแนวโน้มที่ได้คอนกรีตที่ได้ความหนาแน่นต่ำกว่า และในทางกลับกัน เม็ดมวลรวมเบาที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ได้แก่ CFA หรือ WFA ECA เมื่อนำมาผสมเป็นมวลรวมเบาในคอนกรีตจะมีแนวโน้มที่ได้คอนกรีตที่ได้ความหนาแน่นสูงกว่า เป็นต้น

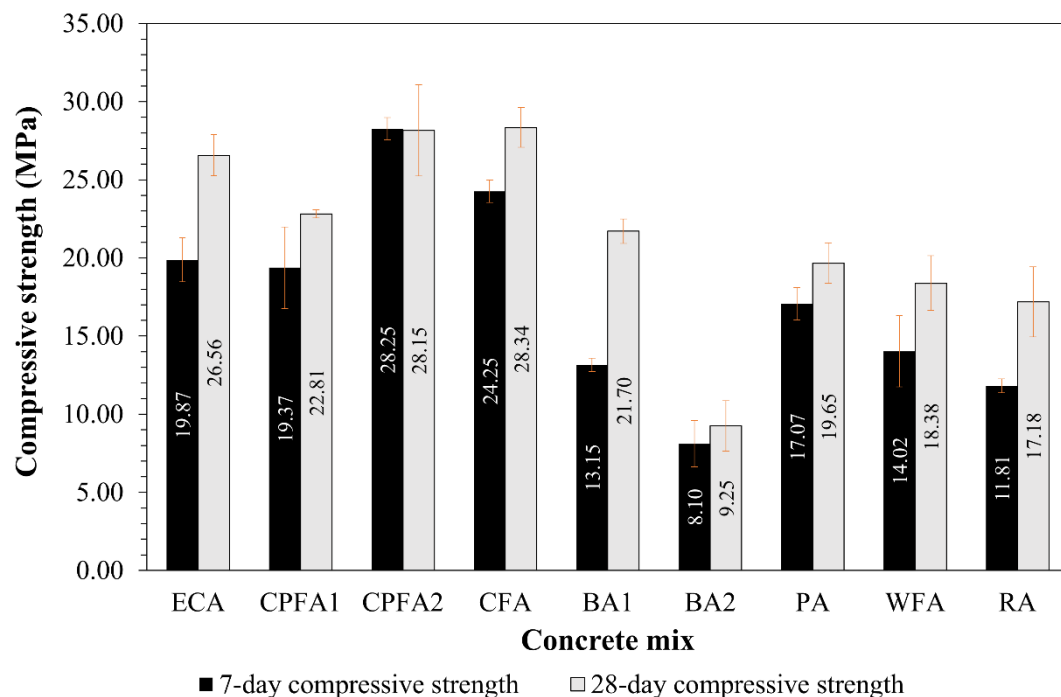


รูปที่ 48 ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุมวลรวมเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า

4.3.2 ผลวิเคราะห์ความต้านแรงอัด

กราฟแท่งในรูปที่ 49 แสดงความต้านแรงอัด (compressive strength) ของคอนกรีตที่มีเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากเถ้าชีวมวลทั้งแปดชนิดเป็นวัสดุมวลรวม จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าคอนกรีตมีความต้านแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปกติของวัสดุประเภทคอนกรีตที่จะมีการพัฒนาความแข็งแรงเพิ่มขึ้นในช่วง 28 หลังจากทำการผสมซีเมนต์เพสต์และขึ้นรูปตัวอย่าง ดังแสดงในกราฟ ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ผ่านการบ่มครบ 28 วันมีค่าความต้านแรงอัดมากกว่าคอนกรีตที่อายุ 7 วันประมาณร้อยละ 15 ยกเว้นในกรณีของคอนกรีตสูตร

ที่มีส่วนผสมเม็ดมวลรวมเบา BA1 WFA และ RA พบว่ามีการพัฒนาความแข็งแรงจากการบ่มเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 65 31 และ 45 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม พบว่ามีเพียงคอนกรีตที่มีส่วนผสมมวลรวมเบา CFA และ CPFA2 ที่มีสมบัติความต้านแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสม ECA ซึ่งค่อนข้างขัดแย้งกับแนวโน้มความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมเบาซึ่งแสดงด้วยค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวซึ่งได้มีการรายงานไว้ในหัวข้อ 4.2.5 ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ว่าปัจจัยอื่นนอกเหนือจากความแข็งแรงของวัสดุมวลรวม เช่น การดูดซึมน้ำ อาจส่งผลต่อการพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีตมวลเบาได้ ในกรณีที่เม็ดมวลรวมเบาที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงดังเช่นเม็ดมวลรวมเบา BA2 ถึงแม้ว่าสมบัติความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของตัวอย่างมวลรวมชนิดนี้จะค่อนข้างดี แต่เนื่องจากตัวเม็ดมวลรวมเบาเองอาจไปแย่งน้ำในส่วนผสมคอนกรีตส่งผลให้ปูนซีเมนต์ไม่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างเต็มที่เนื่องจากน้ำในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ สุดท้ายจึงส่งผลด้านลบต่อการพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีตในที่สุด



รูปที่ 49 ความต้านแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาอายุ 7 และ 28 วัน ที่มีเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุมวลรวมเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า

นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวม CFA และ CPFA2 ยังมีค่าความต้านแรงอัดที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาจากงานวิจัยอื่นที่มีการแทนที่หินด้วยวัสดุมวลรวมที่ขึ้นรูป

ด้วยเทคนิคเดียวกัน ในเงื่อนไขอัตราส่วนการทดแทนมวลรวมที่คล้ายกัน แต่ในงานวิจัยอื่นมีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่าในสูตรคอนกรีต ดังเช่น คอนกรีตมวลเบาในงานวิจัยของ Tang และคณะ [48] (27.7 เมกะพาสคัล) งานวิจัยของ Ferone และคณะ [66] (20 – 28 เมกะพาสคัล) งานวิจัยของ Güneysi และคณะ [62] (21 เมกะพาสคัล) เป็นต้น จากการทบทวนวรรณกรรมได้มีการรายงานไว้ว่า การทดแทนวัสดุมวลรวมจำพวกหินด้วยเม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าลอยที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี CBP นั้นสามารถทำได้ [62, 67] แต่มีข้อเสียเปรียบหลักคือความแข็งแรงของคอนกรีตที่ลดลง [54, 63] อย่างไรก็ตามผลความต้านแรงอัดของคอนกรีตสูตรต่าง ๆ ที่ได้มีการใช้เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ทดแทนวัสดุมวลรวมได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าชีวมวลบางตัวอันได้แก่ CFA และ CPFA2 ทดแทนมวลรวมเบาประเภทดินเผาของตัวทั้งหมดได้ โดยที่ความแข็งแรงของคอนกรีตไม่ลดลง แต่กลับเพิ่มขึ้นและสำหรับเม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าชนิดอื่น อันได้แก่ CPFA1 BA1 PA WFA CPFA2 และ RA สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมเบาในคอนกรีตมวลเบาได้ แต่หากต้องการคงไว้ซึ่งความแข็งแรงในระดับเท่าเดิม อาจจำเป็นต้องมีการปรับสัดส่วนการทดแทนมวลรวมในคอนกรีต ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการจัดการของเสียประเภทเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ โดยนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบสำหรับการเตรียมวัสดุมวลรวมเบาโดยกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบ Cold bonded pelletization (CBP) ด้วยงานปั้นเม็ด โดยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

5.1.1 การศึกษาสมบัติของเถ้าชีวมวล

- เถ้าลอยถ่านหินผสมเศษเยื่อกระดาษ (CPFA1 และ CPFA2) เถ้าลอยกะลาและเปลือกมะพร้าว (CFA) เถ้าขานอ้อย (BA1 และ BA2) เถ้าปาล์มน้ำมัน (PA) และเถ้าลอยเศษไม้ (WFA) มีองค์ประกอบหลักทางเคมีที่คล้ายกัน คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) ไอรอนออกไซด์ (Fe₂O₃) และอะลูมินา (Al₂O₃) ในขณะที่เถ้าแกลบ (RA) มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกา สูงถึงร้อยละ 70.19 โดยมวล และมีออกไซด์อื่น ๆ เช่น แคลเซียมออกไซด์ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P₂O₅) ปะปนมาในปริมาณเล็กน้อย เถ้าชีวมวลทั้ง 8 ชนิด มีปริมาณสารอนินทรีย์ที่คำนวณจากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาอยู่ในช่วงร้อยละ 4.07 – 31.34 โดยมวล เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเฟสพบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี เถ้าชีวมวลมีองค์ประกอบเฟสที่เป็นผลึกที่คล้ายกันได้แก่ คริสโตบาไลต์ (SiO₂) ควอตซ์ (SiO₂) แคลไซต์ (CaCO₃) และแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO₃) สำหรับองค์ประกอบทางเฟสอื่น ๆ ที่พบในตัวอย่างเถ้าชีวมวลที่แตกต่างกันออกไปนั้นมีที่มาจากกระบวนการภายในโรงงานไฟฟ้าเถ้าชีวมวลซึ่งแตกต่างกันออกไปจากโรงงานหนึ่งไปยังอีกโรงงาน
- ตัวอย่างเถ้าชีวมวลทั้ง 8 ชนิดมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคคล้ายกัน คือ มีรูปร่างอนุภาคไม่แน่นอน พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ และมีรูพรุนหลากหลายขนาดภายในโครงสร้าง ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปสำหรับเถ้าชีวมวลเนื่องจากเถ้าชนิดนี้เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่นำมาจากพืช จากการศึกษาการกระจายตัวขนาดอนุภาคพบว่า ตัวอย่างเถ้าชีวมวลมีการกระจายตัวขนาดอนุภาคแบบ monodisperse particle size distribution โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย d₅₀ อยู่ระหว่าง 17.779 – 58.323 ไมครอน โดยรวมแล้วพบว่าเถ้าที่มีขนาดละเอียดมากกว่า ดังเช่น CPFA1 CPFA2 หรือ BA2 จะมีแนวโน้มที่มีความหนาแน่นรวมมากกว่า ในขณะที่ตัวอย่างเถ้าที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่า มีลักษณะเป็นผงหยาบและ

ในขณะที่ตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาอื่น ๆ มีความหนาแน่นสูงกว่าเนื่องจากวัสดุประเภท ECA มักมีช่องว่างขนาดใหญ่และรูพรุนเป็นองค์ประกอบในเนื้อวัสดุจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมในงานวิจัยอื่นที่เตรียมขึ้นจากเก้าชนิดอื่นด้วยกรรมวิธีเดียวกัน พบว่าตัวอย่างมวลรวมเบาในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติความหนาแน่นที่ค่อนข้างดี มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับมวลรวมเบาอื่นที่มีขนาดใกล้เคียงกัน เนื่องจากเก้าชีวมวลมีความหนาแน่นที่ต่ำ มีรูปร่างอนุภาคที่ไม่แน่นอนและโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบไปด้วยรูพรุนเป็นส่วนใหญ่

- มวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นมีค่าการดูดซึมน้ำที่แตกต่างกันออกไปอยู่ในช่วงร้อยละ 18.46 – 28.99 โดยมวล โดยมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของมวลรวมเบา เนื่องจากในการขึ้นรูปโดยใช้งานปั้นเม็ด ผงเก้าที่สามารถรวมตัวอัดกันได้ดีกว่าจะมีแนวโน้มเกิดเป็นเม็ดมวลรวมเบาที่มีเนื้อแน่น มีโพรงหรือรูพรุนแบบเปิดในโครงสร้างน้อย ส่งผลให้เม็ดมวลรวมเบาที่ได้มีค่าความหนาแน่นสูงและร้อยละการดูดซึมน้ำต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทางการค้า ECA ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 13.69 พบว่าเม็ดมวลรวมเบาที่มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าตัวอย่างมวลรวมเบาควบคุมทั้งหมด เนื่องจากมวลรวมเบา CBP และ ECA เป็นวัสดุคนละชนิดกัน มีโครงสร้างรูพรุนในเนื้อวัสดุแตกต่างกัน ส่งผลให้มีพฤติกรรมหรือกลไกการดูดซึมน้ำที่แตกต่างกัน สูดท้ายเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุมวลรวมเบาอื่น ๆ ในวรรณกรรมที่ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธี CBP เหมือนกันโดยใช้วัตถุดิบชนิดอื่นที่แตกต่างกันออกไป พบว่าเม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมจากเก้าชีวมวลและเปลือกมะพร้าวมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่า ในขณะที่เม็ดมวลรวมเบาชนิดอื่นในงานวิจัยนี้มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าเม็ดมวลรวมเบาที่ถูกรายงานไว้ในงานวิจัยอื่น
- เม็ดมวลรวมเบาจากเก้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ ที่มีอายุ 28 วัน มีค่าความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวสูงสุดที่รับได้อยู่ในช่วง 20 – 850 นิวตัน โดยสมบัติการต้านแรงอันเม็ดเดี่ยวของมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นโดยรวมเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 วันเป็น 28 วัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเก้าชีวมวลตามลำดับ เมื่อพิจารณาความต้านแรงกดแตกเม็ดเดี่ยวของตัวอย่างมวลรวมทั้งหมดเปรียบกับ ECA พบว่า มวลรวม CPFA2 มีค่าความต้านแรงกดแตกที่สูงกว่า ในขณะที่ BA2 และ WFA มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับ ECA โดยมีสาเหตุมาจากองค์ประกอบทางเคมีและค่าดัชนีกำลังของเก้าชนิดดังกล่าว และยังพบว่าตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบาหลาย ๆ ชนิดที่เตรียมขึ้นมีความแข็งแรงสูงกว่าเม็ดมวลรวมจากเก้าชนิดอื่นที่ได้มีการรายงานไว้ในวรรณกรรม
- นอกเหนือจากปริมาณวัสดุเชื่อมประสานแล้ว ชนิดของเก้ารวมถึงสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเก้าที่นำมาใช้ขึ้นรูปนั้นมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาความแข็งแรงของเม็ดมวลรวมเบา โดยเก้าที่มีค่าดัชนีกำลังสูง มีซิลิกา อะลูมินาซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่ม

ความแข็งแรงระยะยาวให้กับวัสดุได้ มีแคลเซียมออกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงในช่วงต้นได้ มีสารอินทรีย์ซึ่งเป็นจุดอ่อนส่งผลทางด้านลบต่อสมบัติเชิงกลในปริมาณต่ำ หรือถ้าที่มีขนาดอนุภาคละเอียดเหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยงานปั้นเม็ด สามารถอัดและเกาะตัวรวมกลุ่มกันได้ดี ทำให้มีโพรงหรือรูพรุนในโครงสร้างต่ำ ถ้าที่มีลักษณะดังกล่าวเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นมวลรวมแล้วจะมีแนวโน้มช่วยส่งเสริมพัฒนาความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

5.1.3 คอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ เป็นวัสดุมวลรวม

- ลูกบาศก์คอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของเม็ดมวลรวมเบาจากเถ้า CPFA1 CPFA2 BA1 PA BA2 และ RA มีความหนาแน่นมากกว่าตัวอย่างควบคุม ECA เล็กน้อยประมาณร้อยละ 6 – 10 ในขณะที่คอนกรีต CFA และ WFA มีค่าความหนาแน่นสูงกว่า ECA ประมาณร้อยละ 20 โดยความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา มีความสัมพันธ์แปรผันตรงกันกับความหนาแน่นของเม็ดมวลรวมเบา
- ตัวอย่างคอนกรีตที่มีอายุ 28 วันมีค่าความต้านแรงอัดอยู่ในช่วง 9.25 – 28.34 เมกะพาสคัล โดยตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ผ่านการบ่มครบ 28 วันมีค่าความต้านแรงอัดมากกว่าคอนกรีตที่อายุ 7 วันประมาณร้อยละ 15 ยกเว้นในกรณีของคอนกรีตสูตรที่มีส่วนผสมเม็ดมวลรวมเบา BA1 WFA และ RA พบว่ามีการพัฒนาความแข็งแรงจากการบ่มเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 65 31 และ 45 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม พบว่ามีเพียงคอนกรีตที่ผสมเม็ดมวลรวมเบา CFA และ CPFA2 ที่มีสมบัติความต้านแรงอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสม ECA โดยสันนิษฐานว่าการดูดซึมน้ำอาจส่งผลต่อการพัฒนาความแข็งแรงของคอนกรีตมวลเบาได้ นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบาที่ใช้มวลรวม CFA และ CPFA2 ยังมีค่าความต้านแรงอัดที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาจากงานวิจัยอื่นที่มีการแทนที่หินด้วยวัสดุมวลรวมที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคเดียวกัน ในเงื่อนไขอัตราส่วนการทดแทนมวลรวมที่คล้ายกัน แต่ในงานวิจัยอื่นมีการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากกว่าในสูตรคอนกรีต
- สามารถใช้เม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าชีวมวล CFA และ CPFA2 ทดแทน ECA ทั้งหมดได้โดยที่ความแข็งแรงของคอนกรีตไม่ลดลง แต่กลับเพิ่มขึ้น และสำหรับเม็ดมวลรวมเบาจากเถ้าชนิดอื่น อันได้แก่ CPFA1 BA1 PA WFA CPFA2 และ RA สามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมเบาในคอนกรีตมวลเบาได้เพียงบางส่วน เนื่องจากทำให้ความต้านแรงอัดลดลงเมื่อทำการทดแทนร้อยละ 100 โดยปริมาตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ทำการปรับสัดส่วนการทดแทนมวลรวม CPFA1 BA1 PA WFA CPFA2 และ RA ในคอนกรีต เพื่อหาสัดส่วนการทดแทนมวลรวม ECA ด้วยมวลรวมจากเถ้าชีวมวลชนิดต่าง ๆ ดังกล่าวที่เหมาะสม โดยไม่ทำให้ค่าความต้านแรงอัดของคอนกรีตลดลง
- 2) ทำการศึกษาความเป็นไปได้ (feasibility study) ของการนำเถ้าชีวมวลเบาจากเถ้าชีวมวลไปใช้ทดแทน ECA ในการผลิตแผ่นผนังคอนกรีตมวลเบา โดยคำนึงถึงเครื่องจักรในการผลิตระดับนำร่อง (pilot scale) และระดับอุตสาหกรรม (industrial scale) รวมถึงต้นทุนการผลิต และปัจจัยอื่น ๆ



บรรณานุกรม

1. Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, *Alternative Energy Development Plan: AEDP2015*, Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, Editor. 2015, Ministry of Energy: Bangkok.
2. Heinimö, J. and M. Junginger, *Production and trading of biomass for energy – An overview of the global status*. Biomass and Bioenergy, 2009. **33**(9): p. 1310-1320.
3. Saidur, R., et al., *A review on biomass as a fuel for boilers*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(5): p. 2262-2289.
4. Zhang, L., C. Xu, and P. Champagne, *Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass*. Energy Conversion and Management, 2010. **51**(5): p. 969-982.
5. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, *เถ้าชีวมวลจากโรงงานอุตสาหกรรม: ปัญหา ข้อจำกัด และการนำไปใช้งาน*. วารสารคอนกรีต, 2012(17): p. 14-23.
6. Cheah, C.B. and M. Ramli, *The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview*. Resources, Conservation and Recycling, 2011. **55**(7): p. 669-685.
7. Tarelho, L.A.C., et al., *Characteristics, management, and applications of ashes from thermochemical conversion of biomass to energy*. 2012.
8. Prasertsan, S. and B. Sajjakulnukit, *Biomass and biogas energy in Thailand: Potential, opportunity and barriers*. Renewable Energy, 2006. **31**(5): p. 599-610.
9. Sajjakulnukit, B., et al., *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in Thailand*. Biomass and Bioenergy, 2005. **29**(3): p. 214-224.
10. Commission, E.R., *SPP/VSP Database*. 2015, Energy Regulatory Commission: Bangkok.
11. Prasara-A, J. and S.H. Gheewala, *Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: A review*. Journal of Cleaner Production, 2017. **167**: p. 1020-1028.

12. Pode, R., *Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **53**: p. 1468-1485.
13. PK Mehta, I.N. *Role of rice-husk ash and silica fume in sustainable development*. in *International symposium on concrete technology for sustainable development in the twenty first century*. 1999. Hyderabad.
14. กลุ่มเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กองยุทธศาสตร์และแผนงาน สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, รายงานการผลิตอ้อยของประเทศไทย ประจำปีการผลิต 2560/61. 2018, กระทรวงอุตสาหกรรม: กรุงเทพมหานคร.
15. กองนโยบายอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย, สรุปสถานการณ์อ้อยและน้ำตาลทรายของประเทศไทย ประจำปีการผลิต 2547. 2004, กระทรวงอุตสาหกรรม: กรุงเทพมหานคร.
16. Payá, J., et al., *17 - Bagasse ash*, in *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, R. Siddique and P. Cachim, Editors. 2018, Woodhead Publishing. p. 559-598.
17. Cherian, C. and S. Siddiqua, *Pulp and Paper Mill Fly Ash: A Review*. Sustainability, 2019. **11**(16).
18. Naik T, K.R., *A new source of pozzolanic material*. Concrete International, 2003. **25**(12): p. 55-62.
19. V Malhotra, A.R., *Fly Ash in Concrete* 1994, Ottawa: CANMET Natural Resources Canada
20. Serafimova, E., et al., *Study on the characteristics of waste wood ash*. Journal of University of Chemical Technology and Metallurgy, 2011. **46**: p. 31-34.
21. Etiégni, L. and A.G. Campbell, *Physical and chemical characteristics of wood ash*. Bioresource Technology, 1991. **37**(2): p. 173-178.
22. Sivasundaram, M., *Glass ceramics from pulp and paper waste ash*. 2000, McGill University: Montreal.
23. Pöykiö, R., et al., *Leachability of metals in fly ash from a pulp and paper mill complex and environmental risk characterisation for eco-efficient utilization of the fly ash as a fertilizer*. Chemical Speciation & Bioavailability, 2005. **17**(1): p. 1-9.

24. Chindaprasirt, P., S. Homwuttiwong, and C. Jaturapitakkul, *Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(7): p. 1492-1499.
25. Tangchirapat, W., et al., *Use of waste ash from palm oil industry in concrete*. Waste Management, 2007. **27**(1): p. 81-88.
26. Hamada, H.M., et al., *The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete*. Construction and Building Materials, 2018. **175**: p. 26-40.
27. Hassan, H.S., et al., *Fabrication and characterization of thermally-insulating coconut ash-based geopolymer foam*. Waste Management, 2018. **80**: p. 235-240.
28. Kolappan, S., et al., *Experimental investigation on stir casted hybrid composite AA7068 with SiC and coconut shell fly ash*. Materials Today: Proceedings, 2022.
29. Herring, T.C., T. Nyomboi, and J.N. Thuo, *Ductility and cracking behavior of reinforced coconut shell concrete beams incorporated with coconut shell ash*. Results in Engineering, 2022. **14**: p. 100401.
30. Joshua, O., et al., *Data on the pozzolanic activity in coconut shell ash (CSA) for use in sustainable construction*. Data in Brief, 2018. **18**: p. 1142-1145.
31. Sigvardsen, N.M., M.R. Geiker, and L.M. Ottosen, *Phase development and mechanical response of low-level cement replacements with wood ash and washed wood ash*. Construction and Building Materials, 2021. **269**: p. 121234.
32. Sigvardsen, N.M., M.R. Geiker, and L.M. Ottosen, *Reaction mechanisms of wood ash for use as a partial cement replacement*. Construction and Building Materials, 2021. **286**: p. 122889.
33. Pavliková, M., et al., *Valorization of wood chips ash as an eco-friendly mineral admixture in mortar mix design*. Waste Management, 2018. **80**: p. 89-100.
34. Thailand, B.o., *Bank of Thailand (Statistical Data) EC_EI_016_S2 Private Investment Indicators*. 2019, Bank of Thailand: Bangkok.
35. Kaarthik Krishna, N., S. Sandeep, and K.M. Mini. *Study on concrete with partial replacement of cement by rice husk ash*. in *Materials Science and Engineering Conference Series*. 2016.

36. Kamaruddin, K., et al., *Effects of Silica in Rice Husk Ash (RHA) in producing High Strength Concrete*. 2012.
37. Soares, M., et al., *Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂*. *Cement and Concrete Composites*, 2016. **71**: p. 20-25.
38. Chusilp, N., C. Jaturapitakkul, and K. Kiattikomol, *Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete*. *Construction and Building Materials*, 2009. **23**(11): p. 3352-3358.
39. ณพวงศธร ลิขิตศรีไพบุลย์, การพัฒนาเถ้าขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลาน. 2005, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี: กรุงเทพมหานคร.
40. Rajamma, R., et al., *Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials*. *Journal of Hazardous Materials*, 2009. **172**(2): p. 1049-1060.
41. Pliya, P. and D. Cree, *Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar*. *Construction and Building Materials*, 2015. **95**: p. 1-9.
42. Mo, K.H., et al., *Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete*. *Construction and Building Materials*, 2017. **139**: p. 403-418.
43. Ul Islam, M.M., et al., *Durability properties of sustainable concrete containing high volume palm oil waste materials*. *Journal of Cleaner Production*, 2016. **137**: p. 167-177.
44. Kumar, M. and M. Rajesh, *Analysis the effect of coconut shell ash powder on cement block*. *Materials Today: Proceedings*, 2021.
45. Kroehong, W., et al., *Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste*. *Construction and Building Materials*, 2011. **25**(11): p. 4095-4104.
46. Cordeiro, G.C., et al., *Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars*. *Cement and Concrete Composites*, 2008. **30**(5): p. 410-418.
47. Tarelho, L.A.C., et al., *Characteristics of distinct ash flows in a biomass thermal power plant with bubbling fluidised bed combustor*. *Energy*, 2015. **90**.

48. Tang, P., M.V.A. Florea, and H.J.H. Brouwers, *Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash*. Journal of Cleaner Production, 2017. **165**: p. 1371-1384.
49. Narattha, C. and A. Chaipanich, *Phase characterizations, physical properties and strength of environment-friendly cold-bonded fly ash lightweight aggregates*. Journal of Cleaner Production, 2018. **171**: p. 1094-1100.
50. Lyra, G.P., et al., *Reuse of sugarcane bagasse ash to produce a lightweight aggregate using microwave oven sintering*. Construction and Building Materials, 2019. **222**: p. 222-228.
51. Gesoğlu, M., E. Güneyisi, and H.Ö. Öz, *Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag*. Materials and Structures, 2012. **45**(10): p. 1535-1546.
52. Gesoğlu, M., T. Özturan, and E. Güneyisi, *Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates*. Construction and Building Materials, 2007. **21**(9): p. 1869-1878.
53. Kim, H.K., K.A. Ha, and H.K. Lee, *Internal-curing efficiency of cold-bonded coal bottom ash aggregate for high-strength mortar*. Construction and Building Materials, 2016. **126**: p. 1-8.
54. Colangelo, F., F. Messina, and R. Cioffi, *Recycling of MSWI fly ash by means of cementitious double step cold bonding pelletization: Technological assessment for the production of lightweight artificial aggregates*. Journal of Hazardous Materials, 2015. **299**: p. 181-191.
55. Tang, P., *Municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash - from waste to value: characterization, treatments and application*. 2017, Technische Universiteit Eindhoven: Eindhoven. p. 197.
56. Rashad, A.M., *Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview*. Construction and Building Materials, 2018. **170**: p. 757-775.
57. Alexander, M., *Engineering and transport properties of the interfacial transition zone in cementitious composites*. Vol. 20. 1999: Rilem Publications.
58. Roces, E., et al., *Lightweight expanded clay aggregate properties based on laboratory testing*. Construction and Building Materials, 2021. **313**: p. 125486.

59. Patil, C., et al., *Pozzolonic activity and strength activity index of bagasse ash and fly ash blended cement mortar*. *Materials Today: Proceedings*, 2021. **42**: p. 1456-1461.
60. Gesoğlu, M., et al., *Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete*. *Journal of Hazardous Materials*, 2012. **235-236**: p. 352-358.
61. Chi, J.M., et al., *Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 2003. **25**(2): p. 197-205.
62. Güneyisi, E., et al., *Utilization of cold bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars*. *Construction and Building Materials*, 2015. **74**: p. 9-16.
63. Thomas, J. and B. Harilal, *Properties of cold bonded quarry dust coarse aggregates and its use in concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 2015. **62**: p. 67-75.
64. Sun, Y., et al., *Thermal conductivity and mechanical properties of porous concrete materials*. *Materials Letters*, 2017. **209**: p. 349-352.
65. Li, Z., K. Afshinnia, and P.R. Rangaraju, *Effect of alkali content of cement on properties of high performance cementitious mortar*. *Construction and Building Materials*, 2016. **102**: p. 631-639.
66. Ferone, C., et al., *Coal Combustion Wastes Reuse in Low Energy Artificial Aggregates Manufacturing*. *Materials*, 2013. **6**(11): p. 5000-5015.
67. Gesoğlu, M., T. Özturan, and E. Güneyisi, *Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes*. *Cement and Concrete Composites*, 2006. **28**(7): p. 598-605.

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของคริสโตบาไลต์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-076-0935

Pattern: PDF 01-076-0935 Radiation: 1.54060 Quality: Indexed

Formula		SiO2		d		2θ		I		h		k		l	
Name		Silicon Oxide		4.04740	21.943	999	1	0	1	1.18969	80.704	4	4	1	1
Name (mineral)				3.52047	25.278	8	1	1	0	1.18614	80.995	13	3	2	3
Name (common)		cristobalite		3.14056	28.396	89	1	1	1	1.17912	81.579	13	2	1	5
Status		Alternate		2.84960	31.366	110	1	0	2	1.17349	82.055	4	3	3	0
Ambient		No: High/Low Temperature		2.48935	36.051	137	2	0	0	1.17178	82.200	4	4	0	2
				2.47315	36.295	45	1	1	2	1.16670	82.636	8	3	1	4
				2.34356	38.378	1	2	0	1	1.15711	83.474	4	3	3	1
				2.22654	40.481	1	2	1	0	1.14062	84.960	2	4	1	2
Lattice:		Tetragonal		2.12039	42.604	29	2	1	1	1.12823	86.118	1	1	0	6
S.G.:		P41212 (92)		2.10046	43.028	2	1	0	3	1.11181	87.710	5	3	3	2
				2.02370	44.747	23	2	0	2	1.10033	88.864	15	1	1	6
				1.93528	46.910	50	1	1	3	1.09926	89.973	12	4	2	1
				1.87475	48.520	52	2	1	2	1.09645	89.262	4	4	0	3
				1.76024	51.903	5	2	2	0	1.09090	89.839	2	2	2	5
				1.73755	52.632	8	0	0	4	1.08104	90.886	4	3	2	4
				1.70536	53.671	1	2	2	1	1.07079	92.006	1	4	1	3
				1.69592	54.028	25	2	0	3	1.06562	92.583	1	3	0	5
				1.64051	56.010	5	1	0	4	1.06020	93.198	5	4	2	2
				1.61419	57.006	37	3	0	1	1.05023	94.354	1	2	0	6
				1.60534	57.349	13	2	1	3	1.04685	94.754	2	3	3	3
				1.57440	58.585	4	3	1	0	1.04202	95.333	4	3	1	5
				1.57028	58.753	4	2	2	2	1.02762	97.111	1	2	1	6
				1.55811	59.258	1	1	1	4	1.01185	99.154	1	4	0	4
				1.53550	60.220	26	3	1	1	1.00343	100.290	4	4	2	3
				1.49756	61.911	30	3	0	2	0.99574	101.356	4	4	3	0
				1.43409	64.978	24	3	1	2	0.99198	101.945	10	4	1	4
				1.42480	65.454	15	2	0	4	0.98568	102.795	4	4	3	1
				1.40157	66.679	15	2	2	3	0.97964	103.684	2	3	2	5
				1.38084	67.814	1	3	2	0	0.97640	104.169	1	5	1	0
				1.36981	68.436	23	2	1	4	0.97371	104.576	2	1	0	7
				1.35437	69.326	12	3	2	1	0.97248	104.764	2	3	3	4
				1.34913	69.634	7	3	0	3	0.96691	105.625	4	5	1	1
				1.33884	70.248	19	1	0	5	0.96691	105.625	4	2	2	6
				1.30217	72.534	21	3	1	3	0.95722	107.168	5	5	0	2
				1.29291	73.138	1	1	1	5	0.94987	108.379	2	3	0	6
				1.28325	73.779	21	3	2	2	0.94000	110.062	1	5	1	2
				1.24468	76.468	1	4	0	0	0.93737	110.524	1	4	2	4
				1.23658	77.061	8	2	2	4	0.93304	111.296	2	3	1	6
				1.22518	77.912	12	4	0	1	0.92727	112.346	2	4	0	5
				1.21365	78.795	1	2	0	5	0.92452	112.855	1	5	2	0
				1.20751	79.274	15	4	1	0	0.92224	113.284	2	2	0	7
				1.20011	79.861	1	3	0	4	0.91645	114.392	1	5	2	1
ANX: AX2															
Analysis: O2 Si1															
Formula from original source: Si O2															
ICSD Collection Code: 34927															
Calculated Pattern Original Remarks: Metastable up to 500 K (2nd ref. , Tomaszewski), above Fd3-m. Cell from 3rd ref. (Wong-Ng et al , National Bureau of Standards): 4.9732(4), 6.9236(8) at 298 K															
Sample Source or Locality: Specimen from Ellora Caves, India															
Temperature of Data Collection: 301 K															
Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension															
Wyckoff Sequence: b a(P41212)															
Unit Cell Data Source: Single Crystal															
Primary Reference															
Publication: Calculated from ICSD using POWD-12++															
Publication: Phase Transitions															
Detail: volume 38, page 127 (1992)															
Authors: Peacor, D.R.															
Publication: Powder Diffr.															
Detail: volume 3, page 246 (1988)															
Authors: Peacor, D.R.															
Publication: Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem.															
Detail: volume 138, page 274 (1973)															
Radiation: CuKα1		Filter: Not specified													
Wavelength: 1.54060		d-spacing:													
SS/FOM: F(30)= 999.9(0.0001, 30)															

ตารางที่ ก-2 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของควอตซ์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-085-0798

Pattern: PDF 01-085-0798 Radiation: 1.54060 Quality: Blank

Formula		SiO2		d	2θ	I fix	h	k	l
Name		Silicon Oxide		4.25565	20.857	112	1	0	0
Name (mineral)		Quartz, syn		3.34363	26.639	999	0	1	1
Name (common)				2.45700	36.542	78	1	1	0
Status		Alternate		2.28136	39.467	80	1	0	2
Ambient		Yes		2.23674	40.289	19	1	1	1
				2.12782	42.448	26	2	0	0
				1.97992	45.792	15	0	2	1
				1.81797	50.139	132	1	1	2
Lattice:		Hexagonal		1.80167	50.624	2	0	0	3
S.G.:		P3221 (154)		1.67181	54.672	32	0	2	2
		Mol. weight = 60.08		1.65911	55.328	13	0	1	3
		Volume [CD] = 113.03		1.60848	57.227	8	2	1	0
		Dx = 2.65		1.54167	59.954	78	2	1	1
		Dm =		1.45291	64.035	19	1	1	3
		V/cor = 3.330		1.41855	65.779	2	3	0	0
a = 4.91400	Z = 3			1.38219	67.739	30	1	2	2
c = 5.40500				1.37499	68.142	57	2	0	3
a/b = 1.00000				1.37208	68.307	30	0	3	1
c/b = 1.09992				1.28789	73.469	13	1	0	4
				1.25603	75.654	24	0	3	2
				1.22850	77.662	13	2	2	0
				1.19988	79.879	20	2	1	3
				1.19795	80.034	13	2	2	1
ANX: AX2				1.18401	81.172	18	1	1	4
Analysis: O2 Si1				1.18030	81.480	25	3	1	0
Formula from original source: Si O2				1.15313	83.827	10	1	3	1
ICSD Collection Code: 27834				1.14068	84.955	4	2	0	4
Calculated Pattern Original Remarks: Stable up to 846 K, above P6222, above 1143 K. Tridymite is stable.				1.11837	87.066	1	2	2	2
Significant Warning: 15%<R factor (for powder)				1.11454	87.440	1	0	3	3
Wyckoff Sequence: c a(P3221)				1.08164	90.822	13	1	3	2
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction				1.06391	92.776	1	4	0	0
				1.04773	94.650	10	0	1	5
				1.04388	95.109	8	0	4	1
				1.03462	96.237	13	2	1	4
				1.01500	98.737	4	2	2	3
				0.98947	102.247	5	1	1	5
				0.98947	102.247	5	0	4	2
Primary Reference				0.98730	102.559	8	1	3	3
Publication: Calculated from ICSD using POWD-12++				0.97841	103.868	4	0	3	4
Publication: J. Appl. Crystallogr.				0.97631	104.182	4	3	2	0
Detail: volume 10, page 262 (1977)				0.96376	106.120	1	0	2	5
Authors: Young, R.A., Mackie, P.E., von Dreele, R.B.				0.96076	106.596	10	2	3	1
				0.92866	112.090	1	4	1	0
				0.91823	114.048	5	3	2	2
				0.91611	114.458	7	0	4	3
Radiation: CuKα1		Filter: Not specified		0.91525	114.625	8	1	4	1
Wavelength: 1.54060		d-spacing:		0.90899	115.866	4	2	2	4
SS/FOM: F(30)= 999.9(0.0001, 30)				0.90083	117.541	1	0	0	6
				0.89721	118.309	8	1	2	5
				0.88893	120.119	4	1	3	4
				0.88130	121.864	1	1	0	6
				0.87825	122.585	5	1	4	2
				0.85980	127.249	2	0	3	5
				0.85838	127.633	1	3	2	3
				0.85113	129.655	1	5	0	0
				0.84578	131.221	2	1	1	6

ตารางที่ ก-3 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของแคลไซต์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-072-1652

Pattern: PDF 01-072-1652 Radiation: 1.54060 Quality: Star (*)

Formula		CaCO ₃		d		2θ		I		h		k		l	
Name		Calcium Carbonate		3.85229	23.069	94	0	1	2	0.98673	102.209	4	3	2	1
Name (mineral)		Calcite		3.03034	29.452	999	1	0	4	0.98474	102.932	13	2	3	2
Name (common)				2.93367	31.547	21	0	0	6	0.97961	103.688	2	1	3	10
Status		Alternate		2.49500	35.966	137	1	1	0	0.97457	104.446	10	1	2	14
Ambient		Yes		2.28351	39.429	193	1	1	3	0.96550	105.846	8	3	2	4
				2.09415	43.164	157	2	0	2	0.96307	106.229	19	0	4	8
				1.92614	47.146	62	0	2	4	0.95355	107.767	4	0	2	16
				1.90710	47.646	192	0	1	8	0.95178	108.060	4	2	3	5
Lattice:		Rhombo.H.axes		1.87258	48.580	207	1	1	6	0.94715	108.835	1	3	1	11
S.G.:		R-3c (167)		1.62588	56.659	37	2	1	1	0.94302	109.540	16	4	1	0
				1.60402	57.401	94	1	2	2	0.93629	110.715	8	2	2	12
				1.58215	58.270	10	1	0	10	0.93023	111.803	1	4	1	3
				1.52466	60.693	50	2	1	4	0.91789	114.113	4	3	2	7
				1.51517	61.114	20	2	0	8	0.91185	115.294	1	4	0	10
				1.50610	61.521	28	1	1	9	0.89846	118.042	7	2	3	8
				1.47231	63.093	24	1	2	5	0.88477	118.833	7	1	4	6
				1.44049	64.654	62	3	0	0	0.89072	119.722	8	2	1	16
				1.41683	65.869	35	0	0	12	0.88337	121.384	8	1	1	18
				1.35539	69.267	13	2	1	7	0.88337	121.384	8	1	3	13
				1.33615	70.410	20	0	2	10	0.85986	127.234	2	5	0	2
				1.29507	72.996	25	1	2	8	0.85644	128.164	8	3	2	10
				1.28410	73.722	5	3	0	6	0.85293	129.144	4	1	2	17
				1.24750	76.264	12	2	2	0	0.85293	129.144	4	3	1	14
				1.23204	77.397	18	1	1	12	0.84696	130.869	7	0	5	4
				1.21833	78.434	1	2	2	3	0.84374	131.836	1	4	1	9
				1.19559	80.224	1	1	3	1	0.83891	133.334	1	2	2	15
				1.18682	80.939	4	3	1	2	0.83411	134.885	8	0	1	20
				1.17788	81.683	24	2	1	10	0.83411	134.885	8	2	3	11
				1.16914	82.426	4	0	1	14	0.83167	135.704	4	3	3	0
				1.15357	83.788	42	1	3	4	0.82285	138.824	1	3	3	3
				1.14175	84.856	19	2	2	6	0.81574	141.572	1	2	4	1
				1.13039	85.914	1	3	1	5	0.81294	142.722	8	4	2	2
				1.12266	86.650	5	1	2	11	0.80719	145.224	1	0	4	14
				1.07482	91.562	1	1	3	7	0.80201	147.669	5	2	4	4
				1.07175	91.900	1	0	4	2	0.80062	148.363	5	5	0	8
				1.05867	93.373	8	2	0	14	0.79801	149.715	8	3	3	6
				1.04707	94.728	26	4	0	4						
				1.04398	95.097	29	3	1	8						
				1.03189	96.575	15	1	0	16						
				1.03189	96.575	15	1	1	15						
				1.02090	97.969	4	2	1	13						
				1.01011	99.386	25	0	3	12						
ANX: ABX3															
Analysis: C1 Ca1 O3															
Formula from original source: Ca (C O3)															
ICSD Collection Code: 18166															
Wyckoff Sequence: e b a(R3-CH)															
Unit Cell Data Source: Single Crystal															
Primary Reference															
Publication: Calculated from ICSD using POWD-12++															
Publication: Acta Crystallogr.															
Detail: volume 18, page 689 (1965)															
Authors: Chessin, H., Hamilton, W.C., Post, B.															
Radiation: CuKα1															
Wavelength: 1.54060															
SS/FOM: F(30)= 999.9(0.0001, 30)															
Filter: Not specified															
d-spacing:															

ตารางที่ ก-5 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของคิลโซไนต์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-020-0235

Pattern: PDF 00-020-0235 Radiation: 1.54060 Quality: Blank

Formula		Ca ₃ Si ₂ O ₇		d	2θ	I fix	h	k	l
Name		Calcium Silicate		5.72000	15.479	10	2	0	0
Name (mineral)		Kilchoanite, syn		5.08000	17.443	35	2	0	2
Name (common)				4.64000	19.112	10	1	1	0
Status		Deleted		4.27000	20.786	10	1	1	2
Ambient		Yes		4.17000	21.290	35	0	1	3
				3.97000	22.376	35	2	0	4
				3.75000	23.707	35	2	1	1
				3.67000	24.232	10	0	0	6
				3.55000	25.064	80	1	1	4
				3.37000	26.426	20	2	1	3
				3.09000	28.871	20	2	0	6
				3.05000	29.258	100	3	1	0
				2.94300	30.347	20	3	1	2
				2.88000	31.027	100	1	1	6
				2.77100	32.280	20	4	0	2
				2.74900	32.546	10	0	0	8
				2.66900	33.550	100	0	1	7
				2.54000	35.308	35	0	2	0
				2.47700	36.237	35	0	2	2
				2.46600	36.404	35	1	2	1
				2.42100	37.105	35	2	1	7
				2.36000	38.101	50	4	1	3
				2.25900	39.875	10	4	0	6
				2.20800	40.836	5	0	1	9
				2.16900	41.604	5	4	1	5
				2.14100	42.174	5	2	2	4
				2.08900	43.276	10	0	2	6
				2.05500	44.029	5	2	1	9
				2.04000	44.370	5	3	1	8
				1.98900	45.571	20	1	1	10
				1.96500	46.159	65	2	2	6
				1.94900	46.560	20	5	1	4
				1.90100	47.808	35	4	2	0
				1.87400	48.541	20	6	0	2
				1.86800	48.707	10	0	2	8
				1.83500	49.642	10	0	0	12
				1.81300	50.286	20	5	1	6
				1.80200	50.614	40	6	0	4
				1.79900	50.705	10			
				1.78600	51.100	20	3	1	10
				1.77600	51.409	20	6	1	1
				1.74500	52.391	35	4	1	9
				1.68800	54.302	35	6	0	6
				1.67500	54.759	10	1	3	0
				1.66000	55.296	5	5	1	8
				1.62000	56.783	5	2	3	1
				1.60400	57.402	5	1	3	4
				1.59600	57.716	5	2	2	10
				1.57100	58.724	20	3	1	12
				1.55300	59.472	20	7	1	0
				1.54900	59.642	10	3	3	0
				1.54300	59.897	5	2	1	13
				1.52700	60.590	20	1	3	6
				1.49200	62.167	20	0	3	7
				1.47600	62.917	10	6	2	4
				1.45700	63.834	10	4	3	1
				1.44100	64.628	20	6	1	9
				1.42800	65.289	10	8	0	0
				1.40800	66.335	10	6	2	6

Lattice:		Orthorhombic	Mol. weight =	288.4
S.G.:		Imam (74)	Volume [CD] =	1275.91
			Dx =	
			Dm =	
			I/ICor =	-1.000
a =	11.42000	Z = 8		
b =	5.09000			
c =	21.95000			
a/b =	2.24361			
c/b =	4.31238			
Deleted Or Rejected By: Deleted by 00-029-0370				
General Comments: Impurity				
Synthetic, formed from "8-Ca2 Si4 O" + quartz with Ca: Si=1.5 to 1.75 at 180-600 C, various pressures (10-700 K bars), 1-14 days				
Warning: One or more lines are unindexed				
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction				
Primary Reference				
Publication: J. Chem. Soc. A				
Detail: volume 7, page 1052 (1967)				
Authors: Speakman, Taylor, Bennett, Gard.				
Publication: Nature (London)				
Detail: volume 189, page 743 (1961)				
Authors: Agrell, Gay.				
Radiation:	CuKα	Filter:	M	
Wavelength:	1.54060	d-spacing:		
SS/FOM:	F(30)= 10.4(0.0544, 53)			

ตารางที่ ก-6 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-072-0156

Pattern: PDF 01-072-0156 Radiation: 1.54060 Quality: Star (*)

Formula		Ca(OH) ₂		d	2θ	I fix	h	k	l
Name	Calcium Hydroxide			4.89500	18.108	662	0	0	1
Name (mineral)	Portlandite, syn			3.10496	28.729	185	1	0	0
Name (common)				2.62197	34.170	999	0	1	1
Status	Alternate			2.44750	36.689	7	0	0	2
Ambient	Yes			1.92214	47.250	404	0	1	2
				1.79265	50.897	269	1	1	0
				1.68332	54.466	147	1	1	1
				1.63167	56.340	12	0	0	3
Lattice:	Hexagonal	Mol. weight =	74.09	1.55248	59.494	21	2	0	0
S.G.:	P-3m1 (164)	Volume [CD] =	54.49	1.47984	62.736	102	2	0	1
		Dx =	2.26	1.44438	64.459	94	1	0	3
		Dm =		1.31098	71.970	74	2	0	2
		I/cor =	3.480	1.22375	78.020	12	0	0	4
a =	3.58530			1.20667	79.341	19	1	1	3
c =	4.89500	Z =	1	1.17357	82.048	15	2	1	0
a/b =	1.00000			1.14122	84.905	62	1	2	1
c/b =	1.36530			1.13851	85.155	13	1	0	4
				1.12472	86.453	30	0	2	3
				1.05820	93.427	59	1	2	2
				1.03499	96.191	21	3	0	0
				1.01260	99.055	19	0	3	1
				1.01070	99.307	30	1	1	4
ANX: AX2				0.97900	103.779	4	0	0	5
Analysis: H2 Ca1 O2				0.96107	106.548	8	0	2	4
Formula from original source: Ca (O H)2				0.95273	107.903	35	2	1	3
ICSD Collection Code: 15471				0.93369	111.179	8	0	1	5
Calculated Pattern Original Remarks: z(H) from NMR-data: .437(2) (2nd ref., Henderson & Gutowsky). For neutron data cf. 34241				0.89632	118.498	15	2	2	0
Wyckoff Sequence: d a(P3-M1)				0.88167	121.780	13	2	2	1
Unit Cell Data Source: Single Crystal				0.87399	123.614	8	3	0	3
				0.86116	126.886	8	3	1	0
				0.85922	127.406	15	1	1	5
				0.84814	130.523	28	3	1	1
				0.84702	130.851	13	2	1	4
				0.84166	132.473	4	2	2	2
				0.82810	136.933	8	2	0	5
				0.81583	141.535	1	0	0	6
				0.81234	142.971	33	3	1	2
Primary Reference									
Publication: Calculated from ICSD using POWD-12++									
Publication: Acta Crystallogr.									
Detail: volume 14, page 950 (1961)									
Authors: Petch, H.E.									
Publication: Am. Mineral.									
Detail: volume 47, page 1231 (1962)									
Authors: Petch, H.E.									
Radiation:	CuKα1	Filter:	Not specified						
Wavelength:	1.54060	d-spacing:							
SS/FOM:	F(30)= 999.9(0.0001, 32)								

ตารางที่ ก-7 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของโดแคลเซียมแมกนีเซียมไดซิลิเกต จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-076-0841

Pattern: PDF 01-076-0841 Radiation: 1.54060 Quality: Blank

Formula		Ca ₂ Mg(Si ₂ O ₇)		d	2θ	I	h	k	l	d	2θ	I	h	k	l
Name		Calcium Magnesium Silicate		5.50766	16.079	91	1	1	0	1.48161	62.652	13	3	3	2
Name (mineral)		Akermanite		5.01800	17.660	21	0	0	1	1.46134	63.622	21	5	1	1
Name (common)				4.21837	21.043	60	1	0	1	1.44638	64.359	7	5	2	0
Status		Alternate		3.89450	22.816	25	2	0	0	1.42951	65.206	43	2	2	3
Ambient		Yes		3.70932	23.971	112	1	1	1	1.42961	65.206	43	4	2	2
				3.48335	25.552	35	2	1	0	1.40612	66.435	20	3	0	3
				3.07662	28.999	213	2	0	1	1.36980	67.318	89	5	2	1
				2.86148	31.233	999	2	1	1	1.36376	67.652	8	3	1	3
				2.75383	32.487	37	2	2	0	1.37691	68.034	28	4	4	0
				2.50900	35.759	21	0	0	2	1.33580	70.432	7	5	3	0
				2.46310	36.448	160	3	1	0	1.32783	70.918	13	4	4	1
				2.41418	37.214	62	2	2	1	1.32345	71.188	15	3	2	3
				2.38816	37.634	62	1	0	2	1.32345	71.188	15	4	3	2
				2.30596	39.029	80	3	0	1	1.30475	72.368	4	5	1	2
				2.28325	39.433	28	1	1	2	1.29817	72.794	30	6	0	0
				2.21109	40.777	19	3	1	1	1.29085	73.273	4	5	3	1
				2.16028	41.780	1	3	2	0	1.28050	73.964	7	6	1	0
				2.10919	42.841	8	2	0	2	1.26882	74.760	4	4	0	3
				2.03587	44.465	123	2	1	2	1.25450	75.763	18	0	0	4
				1.98422	45.687	25	3	2	1	1.25232	75.918	47	5	2	2
				1.94725	46.605	64	4	0	0	1.25232	75.918	47	4	1	3
				1.88911	48.128	55	4	1	0	1.24074	76.755	12	6	1	1
				1.85466	49.080	30	2	2	2	1.23644	77.071	18	3	3	3
				1.83588	49.616	98	3	3	0	1.23155	77.434	1	6	2	0
				1.81536	50.216	7	4	0	1	1.22317	78.064	1	1	1	4
				1.80422	50.547	4	3	0	2	1.21644	78.579	1	5	4	0
				1.76797	51.659	79	4	1	1	1.20709	79.307	10	4	2	3
				1.75768	51.984	183	3	1	2	1.20709	79.307	10	4	4	2
				1.74167	52.498	59	4	2	0	1.19605	80.187	16	6	2	1
				1.72412	53.074	32	3	3	1	1.18220	81.322	21	5	4	1
				1.67267	54.841	10	0	0	3	1.18029	81.481	7	2	1	4
				1.64538	55.830	8	4	2	1	1.17910	81.581	8	5	3	2
				1.63707	56.138	24	1	0	3	1.16112	83.121	4	6	3	0
				1.63707	56.138	24	3	2	2	1.15298	83.840	15	6	0	2
				1.60049	57.539	15	1	1	3	1.14162	84.868	10	2	2	4
				1.56780	59.271	1	4	3	0	1.13998	85.019	13	5	0	3
				1.53691	60.159	13	4	0	2	1.13123	85.834	4	6	3	1
				1.53691	60.159	13	2	0	3	1.12956	85.992	13	3	0	4
				1.52795	60.596	2	5	1	0	1.12796	86.144	19	5	1	3
				1.50784	61.443	55	4	1	2	1.11786	87.115	13	3	1	4
				1.50784	61.443	55	2	1	3	1.10555	88.335	8	6	2	2
				1.48776	62.364	7	5	0	1	1.10153	88.742	8	7	1	0
Lattice:		Tetragonal		Mol. weight =		272.63									
S.G.:		P-421m (113)		Volume [CD] =		304.43									
				Dx =		2.97									
				Dm =											
				I/Icor =		2.580									
a =		7.78900		Z =		2									
c =		5.01800													
a/b =		1.00000													
c/b =		0.64424													
ANX: AB2C2X7															
Analysis: Ca ₂ Mg ₁ O ₇ Si ₂															
Formula from original source: Ca ₂ Mg (Si ₂ O ₇)															
ICSD Collection Code: 34805															
Calculated Pattern Original Remarks: AE: Ca: 6p2c (or 8ap) O8; Si: 4t O4; Mg: 4t O4; O1: 4t Ca ₂ Si ₂ ; O2: 4t Ca ₃ Si; O3: 4t Ca ₂ Mg Si															
Alias type names: Ca ₂ ZnSi ₂ O ₇ , mellite, hardystone															
Sample Source or Locality: Specimen from Capo di Bove, Italy															
Significant Warning: 12%<R factor (for single crystal)															
Wyckoff Sequence: f e ₃ c a (P4-21M)															
Unit Cell Data Source: Single Crystal															
Primary Reference															
Publication: Calculated from ICSD using POWD-12++															
Publication: Am. Mineral.															
Detail: volume 38, page 643 (1953)															
Authors: Smith, J.V.															
Radiation:		CuKα1		Filter:		Not specified									
Wavelength:		1.54060		d-spacing:											
SS/FOM:		F(30)= 999.9(0.0000, 30)													

ตารางที่ ก-8 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของแอนไฮไดรต์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-074-2421

Pattern: PDF 01-074-2421 Radiation: 1.54060 Quality: Blank

Formula		Ca(SO ₄)		d		2θ		I		h		k		l	
Name		Calcium Sulfate		4.64494	19.092	2	1	0	1	1.31685	71.600	45	4	2	2
Name (mineral)		Anhydrite		3.86697	22.980	55	1	1	1	1.31208	71.901	2	3	4	1
Name (common)		calcium sulfate(VI)		3.49000	25.502	999	0	0	2	1.29428	73.048	15	4	3	0
Status		Alternate		3.49000	25.502	999	0	2	0	1.28899	73.396	1	3	3	3
Ambient		Yes		3.11500	28.634	28	2	0	0	1.27295	74.476	52	2	5	0
				2.84459	31.423	393	2	1	0	1.27295	74.476	52	2	3	4
				2.79018	32.052	38	1	2	1	1.26748	74.853	2	1	2	5
				2.46603	36.404	79	0	2	2	1.23302	77.324	10	0	4	4
Lattice:		Orthorhombic		2.32247	38.741	220	2	2	0	1.22656	77.808	1	5	0	1
S.G.:		Bbmm (63)		2.32247	38.741	220	2	0	2	1.21330	78.822	37	4	3	2
				2.20369	40.920	227	2	1	2	1.20805	79.232	2	5	1	1
				2.17688	41.447	69	1	0	3	1.19649	80.151	19	2	5	2
				2.08028	43.467	73	1	3	1	1.17436	81.981	4	1	3	5
				2.08028	43.467	73	1	1	3	1.17436	81.981	4	1	5	3
				1.99021	45.541	50	3	0	1	1.16333	82.928	21	0	6	0
				1.93349	46.956	37	2	2	2	1.16167	83.073	28	4	0	4
				1.91393	47.465	2	3	1	1	1.16167	83.073	28	0	0	6
				1.86408	48.816	160	2	3	0	1.15741	83.447	8	3	0	5
				1.84703	49.297	33	1	2	3	1.15741	83.447	8	5	2	1
				1.74500	52.391	69	0	4	0	1.14549	84.515	10	2	4	4
				1.74250	52.472	71	0	0	4	1.14549	84.515	10	4	1	4
				1.72885	52.918	4	3	2	1	1.12848	86.094	1	1	6	1
				1.64372	55.891	145	2	3	2	1.10348	88.544	19	0	6	2
				1.63353	56.271	4	1	4	1	1.10232	88.661	47	4	4	2
				1.58961	57.970	29	1	3	3	1.10232	88.661	47	4	2	4
				1.58899	59.221	30	0	2	4	1.09806	89.097	4	3	2	5
				1.58899	59.221	30	4	0	0	1.09806	89.097	4	5	0	3
				1.54831	59.671	1	3	0	3	1.08981	89.954	1	2	6	0
				1.52074	60.896	31	2	0	4	1.08844	90.098	1	2	0	6
				1.52074	60.896	31	4	1	0	1.08502	90.460	1	5	1	3
				1.51157	61.275	12	3	3	1	1.08502	90.460	1	5	3	1
				1.51157	61.275	12	3	1	3	1.07545	91.493	18	2	1	6
				1.48588	62.452	52	2	1	4	1.07287	91.776	1	1	4	5
				1.42195	65.602	28	4	2	0	1.04744	94.684	1	5	2	3
				1.42195	65.602	28	4	0	2	1.04014	95.561	13	2	6	2
				1.41529	65.950	10	3	2	3	1.03902	95.697	20	4	3	4
				1.39334	67.125	28	2	2	4	1.03902	95.697	20	6	0	0
				1.39334	67.125	28	4	1	2	1.03628	96.032	2	3	5	3
				1.36155	68.909	8	1	4	3	1.03628	96.032	2	3	3	5
				1.36155	68.909	8	1	0	5	1.02840	97.012	12	2	5	4
				1.33693	70.363	1	1	5	1	1.02703	97.185	2	6	1	0
				1.33524	70.466	1	1	1	5	1.02601	97.315	4	1	6	3
ANX: ABX4															
Analysis: Ca1 O4 S1															
Formula from original source: Ca (S O4)															
ICSD Collection Code: 28546															
Calculated Pattern Original Remarks: Cell from 3rd ref. (Swanson et al)															
): 6.238, 6.991, 6.996 at 299 K															
Sample Source or Locality: Specimen unknown															
Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. 10%<R factor<15% (for powder)															
Significant Warning: Reported displacement parameters on non H atoms are outside the range 0.001<U<0.1. Ueq=0.012 used in the calculation															
Wyckoff Sequence: g f c2 (BMM)															
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction															
Primary Reference															
Publication: Calculated from ICSD using POWD-12++															
Publication: Kristallografiya															
Detail: volume 7, page 690 (1962)															
Authors: Hoehne, E.															
Publication: Natl. Bur. Stand. (U. S.), Circ. 539															
Detail: volume 539, page 61 (1953)															
Authors: Hoehne, E.															
Publication: Sov. Phys. Crystallogr. (Engl. Transl.)															
Detail: volume 7, page 559 (1962)															
Radiation: CuKα1		Filter: Not specified													
Wavelength: 1.54060		d-spacing:													
SS/FOM: F(30)= 90.5(0.0081, 41)															

ตารางที่ ก-9 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของแมกกาไมท์ จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-039-1346

Pattern: PDF 00-039-1346 Radiation: 1.54060 Quality: Star (*)

Formula		Fe ₂ O ₃		d	2θ	I	h	k	l
Name		Iron Oxide		5.91800	14.958	5	1	1	0
Name (mineral)		Maghemite-C, syn		4.82200	18.384	4	1	1	1
Name (common)				3.74000	23.772	5	2	1	0
Status		Primary		3.41100	26.103	5	2	1	1
Ambient		Yes		2.95300	30.241	35	2	2	0
				2.78400	32.125	2	2	2	1
				2.64350	33.883	2	3	1	0
				2.51770	35.631	100	3	1	1
Lattice:		Cubic		2.41190	37.250	3	2	2	2
S.G.:		P4132 (213)		2.31630	38.848	1	3	2	0
		Mol. weight = 159.69		2.23200	40.378	1	3	2	1
		Volume [CD] = 582.5		2.08860	43.285	16	4	0	0
		Dx =		2.02550	44.705	1	4	1	0
		Dm = 4.9		1.96850	46.072	1	3	3	0
		V/cor = 1.400		1.82240	50.008	2	4	2	1
a = 8.35150		Z = 11		1.70450	53.734	10	4	2	2
a/b = 1.00000				1.67030	54.926	1	4	3	0
c/b = 1.00000				1.63790	56.107	1	5	1	0
				1.60730	57.273	24	5	1	1
				1.55070	59.570	1	5	2	0
				1.52480	60.687	2	5	2	1
				1.47580	62.927	34	4	4	0
				1.45370	63.996	1	4	4	1
				1.43220	65.074	1	5	3	0
				1.39190	67.203	1	4	4	2
				1.37300	68.255	1	6	1	0
				1.35470	69.307	1	6	1	1
				1.32040	71.378	3	6	2	0
				1.30420	72.403	1	5	4	0
				1.27300	74.473	5	5	3	3
				1.25900	75.445	2	6	2	2
				1.24500	76.445	1	6	3	0
				1.23140	77.445	1	6	3	1
				1.20530	79.449	1	4	4	4
				1.19310	80.426	1	6	3	2
				1.18100	81.422	1	7	1	0
				1.13650	85.341	1	7	2	1
				1.11590	87.307	2	6	4	2
				1.09660	89.247	1	7	3	0
				1.08720	90.229	8	7	3	1
				1.04390	95.107	3	8	0	0
Additional Patterns: To replace 00-004-0755 and 00-024-0081									
General Comments: Pattern reviewed by Syvinski, W., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA, ICDD Grant-in-Aid (1990). Agrees well with experimental pattern. Additional weak reflections (indicated by brackets) were observed									
Optical Data Specimen location: Optical data on specimen from Iron Mountain, Shasta County, California, USA									
Sample Preparation: Space group dependent upon preparation (Bernal et al.)									
Sample Source or Locality: Sample from Control Data as used in hard disks									
Unit Cell Data Source: Single Crystal									
Primary Reference									
Publication: ICDD Grant-in-Aid									
Authors: Schulz, D., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA.									
Publication: Rock Forming Minerals									
Detail: volume 5, page 73 (1961)									
Authors: Deer, W., Howie, R., Zussman, J.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume 180, page 645 (1957)									
Authors: Bernal, J., Dasgupta, D., Mackay, A.									
Publication: Nature (London)									
Detail: volume									

ตารางที่ ก-10 (ต่อ) ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของแคลเซียมซัลไฟเกต จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 01-089-6463

d	2θ	I	h	k	l	d	2θ	I	h	k	l	d	2θ	I	h	k	l
1.64480	55.851	1	-2	4	1	1.40598	66.443	60	2	4	3	1.25457	75.758	57	3	5	1
1.63568	56.190	10	0	0	6	1.40237	66.636	50	4	4	1	1.25191	75.947	55	-3	5	3
1.63568	56.190	10	-5	3	1	1.39528	67.019	50	-6	2	6	1.25191	75.947	55	-9	1	1
1.61948	56.803	109	0	4	2	1.39121	67.241	18	-7	1	6	1.24885	76.167	33	-6	4	4
1.61948	56.803	109	6	2	0	1.37851	67.945	32	8	0	0	1.24885	76.167	33	-1	1	8
1.60880	57.215	68	-6	2	4	1.37851	67.945	32	5	1	4	1.24467	76.469	47	-9	1	5
1.60195	57.482	8	4	2	3	1.37322	68.242	12	-4	4	4	1.24467	76.469	47	4	4	3
1.60195	57.482	8	-5	3	3	1.36996	68.427	2	-2	2	7	1.23785	76.967	15	5	1	5
1.59671	57.688	15	1	3	4	1.36996	68.427	2	-1	3	6	1.23785	76.967	15	1	5	3
1.58826	58.024	7	2	4	1	1.36367	68.787	4	-4	2	7	1.23260	77.355	1	7	1	3
1.58826	58.024	7	5	3	0	1.36197	68.885	2	1	5	0	1.22676	77.793	64	0	0	8
1.58177	58.285	15	-5	1	6	1.35857	69.082	8	-7	3	2	1.22676	77.793	64	-8	2	6
1.57570	58.532	10	-7	1	4	1.35857	69.082	8	-1	5	1	1.22074	78.249	4	-5	3	7
1.57171	58.695	5	4	0	4	1.35387	69.356	4	-8	2	2	1.21725	78.517	19	8	2	1
1.55937	59.205	5	-2	2	6	1.34090	70.124	8	1	5	1	1.21725	78.517	19	8	0	2
1.54520	59.803	37	6	0	2	1.33927	70.222	7	-7	3	1	1.20879	79.174	7	-4	4	6
1.54520	59.803	37	3	3	3	1.33701	70.358	5	7	1	2	1.20626	79.373	28	9	1	0
1.53531	60.228	55	7	1	0	1.32872	70.863	12	-1	5	2	1.20626	79.373	28	3	5	2
1.53531	60.228	55	-3	3	5	1.32872	70.863	12	4	4	2	1.20330	79.607	8	-3	5	4
1.52726	60.579	30	-4	2	6	1.32687	70.977	13	-8	2	1	1.20000	79.870	7	-6	4	5
1.52726	60.579	30	-6	0	6	1.32504	71.090	8	-5	3	6	1.19571	80.214	8	-9	1	6
1.50664	61.497	19	5	3	1	1.32147	71.311	2	-7	3	4	1.19571	80.214	8	2	4	5
1.50664	61.497	19	2	4	2	1.32147	71.311	2	2	2	6	1.18865	80.789	25	6	2	4
1.50176	61.719	15	2	2	5	1.31466	71.738	16	-8	0	6	1.18595	81.011	13	-5	5	2
1.50176	61.719	15	1	1	6	1.30241	72.519	25	5	3	3	1.18385	81.185	32	-7	1	8
1.48211	62.629	109	3	1	5	1.30241	72.519	25	3	1	6	1.18385	81.185	32	0	4	6
1.48211	62.629	109	-4	4	1	1.29785	72.814	35	6	2	3	1.17808	81.667	8	-10	0	4
1.47850	62.894	91	0	2	6	1.29785	72.814	35	0	2	7	1.17808	81.667	8	2	2	7
1.47650	62.894	91	-4	4	2	1.29428	73.048	35	-4	4	5	1.17524	81.906	29	-6	2	8
1.47341	63.041	23	-8	0	2	1.29428	73.048	35	-6	4	2	1.17098	82.268	8	-10	0	2
1.46906	63.249	85	-3	1	7	1.29206	73.194	35	-9	1	3	1.17098	82.268	8	7	3	2
1.45661	63.853	13	4	4	0	1.29206	73.194	35	-3	1	8						
1.44627	64.364	25	-8	0	4	1.28789	73.469	13	-8	2	5						
1.43680	64.840	45	-2	4	4	1.28199	73.863	4	-6	4	3						
1.43680	64.840	45	-4	4	3	1.28199	73.863	4	-6	2	7						
1.43295	65.036	10	2	0	6	1.27781	74.145	10	1	3	6						
1.43027	65.173	8	-5	3	5	1.27781	74.145	10	-1	5	3						
1.42893	65.241	8	4	2	4	1.27081	74.623	12	-7	3	5						
1.42512	65.438	10	1	3	5	1.26711	74.878	4	-5	1	8						
1.42512	65.438	10	-1	1	7	1.26711	74.878	4	6	0	4						
1.41023	66.217	64	6	2	2	1.26479	75.039	4	3	3	5						
1.40598	66.443	60	0	4	4	1.25457	75.758	57	6	4	0						

ตารางที่ ก-11 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของไดแคลเซียมซิลิเกต จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-031-0302

Pattern: PDF 00-031-0302 Radiation: 1.54060 Quality: Low Precision

Formula		Ca ₂ SiO ₄		d	2θ	I	h	k	l
Name		Calcium Silicate		6.31000	14.024	5			
Name (mineral)				4.81000	18.431	30			
Name (common)				4.37000	20.305	5			
Status		Primary		4.34000	20.447	5			
Ambient		Yes		4.17000	21.290	10			
				4.07000	21.820	5			
				3.97800	22.331	10			
				3.77800	23.529	5			
Lattice:		Mol. weight = 172.24		3.41100	26.103	60			
		Volume [CD] =		3.32200	26.815	100			
		Dx =		3.15600	28.254	30			
		Dm =		3.02100	29.545	10			
		I/ cor = -1.000		3.00400	29.716	60			
				2.93600	30.421	50			
				2.89500	30.862	5			
				2.86900	31.149	5			
				2.83900	31.487	5			
				2.77500	32.232	10			
				2.75900	32.424	10			
				2.73700	32.692	40			
				2.67100	33.524	20			
				2.58800	34.632	5			
				2.43600	36.868	10			
				2.30200	39.099	5			
				2.28800	39.348	5			
				2.24200	40.190	50			
				2.16500	41.685	10			
				2.15100	41.969	10			
				2.01900	44.856	5			
				1.98200	45.741	10			
				1.96600	46.134	10			
				1.91200	47.516	20			
				1.87800	48.431	40			
				1.83600	49.613	30			
Additional Patterns: See 00-031-0297									
General Comments: Called Y phase, and found metastable in the "Li ₂ O"-CaO-"SiO ₂ " system									
Reason O Quality Was Assigned: O assigned because of questionable composition and lack of indexing									
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction									
Primary Reference									
Publication: J. Am. Ceram. Soc.									
Detail: volume 61, page 152 (1978)									
Authors: West, A.									
Radiation: CuKα		Filter: Not specified							
Wavelength: 1.54060		d-spacing:							
SS/FOM:									

ตารางที่ ก-12 ค่า 2-theta, intensity และ hkl ของไตรแคลเซียมซิลิเกต จาก JCPDS International Center for Diffraction Data (PCPDFWIN) หมายเลข JCPDS 00-001-1024

Pattern: PDF 00-001-1024 Radiation: 1.54060 Quality: Low Precision

Formula		Ca ₃ SiO ₅		d	2θ	I fix	h	k	l
Name		Calcium Silicate Oxide		3.02000	29.555	44			
Name (mineral)				2.75000	32.533	100			
Name (common)				2.61000	34.331	75			
Status		Deleted		2.30000	39.134	8			
Ambient		Yes		2.18000	41.385	50			
				1.98000	45.790	5			
				1.92000	47.306	10			
				1.81000	50.375	3			
Lattice:		Mol. weight = 228.32		1.76000	51.911	38			
		Volume [CD] =		1.63000	56.403	31			
		Dx =		1.54000	60.026	10			
		Dm =		1.48000	62.728	31			
		I/ICor = -1.000		1.44000	64.678	20			
				1.38000	67.861	18			
				1.20000	79.870	8			
				1.16000	83.219	3			
				1.13000	85.950	3			
				1.09000	89.934	5			
Deleted Or Rejected By: Delete: Berry Parcel of October 29, 1957 Melting Point: 2173 K Structures: Reference reports monoclinic Warning: Unindexed pattern									
Primary Reference Publication: Anal. Chem. Detail: volume 10, page 475 (1938) Authors: Hanawalt, J., et al.									
Radiation:		MoKα1							
Wavelength:		1.54060							
SS/FOM:									
Filter:		F							
d-spacing:									

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข ข้อมูลดิบที่ใช้ในการคำนวณความหนาแน่นรวม (loose bulk density) ของตัวอย่างถั่ว
ซีมวล

Sample	Mass (g)	Density* (kg/m ³)	Mass (g)	Density* (kg/m ³)	Mass (g)	Density* (kg/m ³)	Average (kg/m ³)	sd
CPFA1	33.02	660.4	32.54	650.8	33.63	672.6	661.3	10.93
CFA	24.25	485.0	24.10	482.0	24.55	491.0	486.0	4.58
CPFA2	22.28	445.6	22.68	453.6	22.54	450.8	450.0	4.06
BA1	12.55	251.0	12.65	253.0	13.05	261.0	255.0	5.29
PA	20.77	415.4	19.22	384.4	19.73	394.6	398.1	15.80
WFA	22.75	455.0	23.20	464.0	23.35	467.0	462.0	6.24
BA2	25.10	502.0	24.80	496.0	25.05	501.0	499.7	3.21
RA	9.95	199.0	9.36	187.2	9.87	197.4	194.5	6.40

*volume = 50.0 ml

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค-1 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างแก้ว CPFA1 ที่ผ่านการร่อนตะแกรง 100 เมช

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.17	11.482	3.12	120.226	1.48	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.19	13.183	3.69	138.038	0.99	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.22	15.136	4.27	158.489	0.63	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.25	17.378	4.85	181.970	0.30	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.28	19.953	5.39	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.28	22.909	5.86	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.01	2.512	0.32	26.303	6.22	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.06	2.884	0.36	30.200	6.43	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.10	3.311	0.41	34.674	6.48	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.12	3.802	0.48	39.811	6.48	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.13	4.365	0.57	45.709	6.33	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.14	5.012	0.70	52.481	6.00	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.15	5.754	0.87	60.256	5.50	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.15	6.607	1.10	69.183	4.87	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.14	7.586	1.38	79.433	4.17	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.14	8.710	1.73	91.201	3.43	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.15	10.000	2.13	104.713	2.72	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.15	11.482	2.60	120.226	2.05	1258.925	0.00		

ตารางที่ ค-2 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างแก้ว CFA ที่ผ่านการร่อนตะแกรง 100 เมช

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.17	11.482	3.12	120.226	1.48	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.19	13.183	3.69	138.038	0.99	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.22	15.136	4.27	158.489	0.63	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.25	17.378	4.85	181.970	0.30	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.28	19.953	5.39	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.28	22.909	5.86	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.01	2.512	0.32	26.303	6.22	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.06	2.884	0.36	30.200	6.43	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.10	3.311	0.41	34.674	6.43	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.12	3.802	0.48	39.811	6.48	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.13	4.365	0.57	45.709	6.33	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.14	5.012	0.70	52.481	6.00	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.15	5.754	0.87	60.256	5.50	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.14	6.607	1.10	69.183	4.87	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.14	7.586	1.38	79.433	4.17	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.14	8.710	1.73	91.201	3.43	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.15	10.000	2.13	104.713	2.72	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.15	11.482	2.60	120.226	2.05	1258.925	0.00		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-3 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างแก้ว CPFA2 ที่ผ่านการร่อนตะแกรง 100 เมช

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.98	11.482	3.34	120.226	0.04	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.12	13.183	3.51	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.27	15.136	3.70	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.41	17.378	3.92	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.53	19.953	4.18	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.63	22.909	4.45	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	1.63	26.303	4.45	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.03	2.884	1.72	30.200	4.70	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.14	3.311	1.81	34.674	4.88	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.22	3.802	1.91	39.811	4.95	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.29	4.365	2.02	45.709	4.86	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.35	5.012	2.16	52.481	4.59	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.42	5.754	2.32	60.256	4.12	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.48	6.607	2.50	69.183	3.48	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.55	7.586	2.69	79.433	2.76	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.63	8.710	2.87	91.201	1.99	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.73	10.000	3.03	104.713	1.33	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.84	11.482	3.19	120.226	0.39	1258.925	0.00		

ตารางที่ ค-4 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างแก้ว BA1 ที่ผ่านการร่อนตะแกรง 100 เมช

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.13	11.482	2.25	120.226	1.25	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.15	13.183	2.71	138.038	0.36	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.18	15.136	3.27	158.489	0.01	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.21	17.378	3.95	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.25	19.953	4.71	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.29	22.909	5.52	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.34	26.303	6.30	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.41	30.200	6.97	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.49	34.674	7.43	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.58	39.811	7.62	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.70	45.709	7.48	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.84	52.481	7.02	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.01	5.754	0.99	60.256	6.27	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.05	6.607	1.17	69.183	5.32	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.08	7.586	1.37	79.433	4.25	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.09	8.710	1.60	91.201	3.19	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.11	10.000	1.89	104.713	2.17	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.11	11.482	1.89	120.226		1258.925	0.00		

ตารางที่ ค-5 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างแก้ว PA ที่ผ่านการร่อนตะแกรง 100 เมช

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.15	11.482	1.46	120.226	4.21	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.18	13.183	1.65	138.038	3.11	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.21	15.136	1.87	158.489	2.12	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.25	17.378	2.15	181.970	1.31	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.29	19.953	2.51	208.930	0.74	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.33	22.909	2.96	239.883	0.39	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.37	26.303	3.51	275.423	0.24	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.41	30.200	4.15	316.228	0.22	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.47	34.674	4.86	363.078	0.27	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.04	3.802	0.53	39.811	5.58	416.869	0.31	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.07	4.365	0.60	45.709	6.25	478.630	0.33	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.07	5.012	0.69	52.481	6.77	549.541	0.22	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.08	5.754	0.79	60.256	7.08	630.957	0.09	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.08	6.607	0.91	69.183	7.09	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.10	7.586	1.03	79.433	6.78	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.11	8.710	1.16	91.201	6.16	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.13	10.000	1.31	104.713	5.26	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.13	11.482	1.31	120.226		1258.925	0.00		

ตารางที่ ค-6 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างแก้ว WFA ที่ผ่านการร่อนตะแกรง 100 เมช

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.16	11.482	1.49	120.226	1.98	1258.925	0.37
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.18	13.183	1.76	138.038	1.07	1445.440	0.06
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.21	15.136	2.05	158.489	0.30	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.24	17.378	2.38	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.27	19.953	2.75	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.29	22.909	3.18	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.32	26.303	3.65	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.01	2.884	0.34	30.200	4.16	316.228	0.01	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.08	3.311	0.37	34.674	4.66	363.078	0.17	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.08	3.802	0.40	39.811	5.10	416.869	0.87	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.09	4.365	0.45	45.709	5.42	478.630	2.29	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.10	5.012	0.51	52.481	5.54	549.541	3.98	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.10	5.754	0.60	60.256	5.44	630.957	4.99	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.11	6.607	0.72	69.183	5.09	724.436	4.70	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.11	7.586	0.87	79.433	4.51	831.764	3.39	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.12	8.710	1.05	91.201	3.76	954.993	1.93	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.14	10.000	1.26	104.713	2.88	1096.478	0.90		
0.105	0.00	1.096	0.14	11.482	1.26	120.226		1258.925			

ตารางที่ ค-7 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างแก้ว BA2 ที่ผ่านการร่อนตะแกรง 100 เมช

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.09	11.482	3.70	120.226	0.59	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.15	13.183	4.33	138.038	0.19	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.21	15.136	4.97	158.489	0.01	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.26	17.378	5.60	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.32	19.953	6.15	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.39	22.909	6.60	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.46	26.303	6.89	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.54	30.200	6.97	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.65	34.674	6.44	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.78	39.811	5.85	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.95	45.709	5.09	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	1.16	52.481	4.22	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	1.43	60.256	3.33	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	1.75	69.183	2.46	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	2.14	79.433	1.70	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	2.60	91.201	1.05	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.02	10.000	3.12	104.713		1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

ตารางที่ ค-8 ขนาดอนุภาคของตัวอย่างแก้ว RA ที่ผ่านการร่อนตะแกรง 100 เมช

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.10	11.482	1.67	120.226	1.55	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.16	13.183	1.98	138.038	0.41	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.20	15.136	2.41	158.489	0.07	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.25	17.378	2.99	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.29	19.953	3.70	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.34	22.909	4.55	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.40	26.303	5.47	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.46	30.200	6.40	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.54	34.674	7.22	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.62	39.811	7.84	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.72	45.709	8.13	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.82	52.481	8.04	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	0.92	60.256	7.54	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	1.03	69.183	6.67	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.00	7.586	1.14	79.433	5.51	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.00	8.710	1.27	91.201	4.22	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.03	10.000	1.44	104.713		1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 สูตรส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบสมบัติค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index) ของตัวอย่างแก้วซีมวอล

Mix	Portland cement (g)	Sand (g)	Water (g)	Ash (g)
control	500	1375	300	-
CPFA1	400	1375	338	100
CFA	400	1375	401	100
CPFA2	400	1375	325	100
BA1	400	1375	423	100
PA	400	1375	344	100
WFA	400	1375	376	100
BA2	400	1375	380	100
RA	400	1375	450	100

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลดิบที่ใช้ในการคำนวณค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index) ของตัวอย่างแก้วซีมวอล

Mix	W (cm)	L (cm)	Area (cm ²)	Max load (ton)	Compressive strength (MPa)	Average (MPa)	sd	SAI
control	5.08	5.03	25.55	7.78	29.84	28.72	1.36	-
	5.07	5.01	25.40	7.544	29.11			
	5.07	5.02	25.45	7.066	27.21			
CPFA1	5.07	4.99	25.30	5.535	21.44	21.54	0.38	75.01
	5.00	5.01	25.05	5.424	21.22			
	5.00	5.02	25.10	5.624	21.96			
CFA	5.02	4.99	25.05	3.201	12.52	12.43	0.28	43.29
	4.99	5.01	25.00	3.091	12.12			
	4.98	4.99	24.85	3.21	12.66			

CPFA2	5.00	4.99	24.95	7.399	29.06	27.23	1.63	94.81
	5.08	5.00	25.40	6.727	25.95			
	5.04	5.01	25.25	6.869	26.66			
BA1	5.00	5.00	25.00	3.305	12.96	13.03	0.17	45.38
	5.00	5.00	25.00	3.294	12.91			
	4.98	5.11	25.45	3.435	13.23			
PA	5.00	5.10	25.50	5.499	21.13	21.31	0.68	74.22
	4.99	5.09	25.40	5.376	20.74			
	5.01	5.09	25.50	5.741	22.06			
WFA	4.99	4.97	24.80	5.068	20.03	19.66	0.66	68.45
	5.00	5.00	25.00	4.820	18.89			
	4.99	5.01	25.00	5.114	20.05			
BA2	4.99	5.07	25.30	6.552	25.38	25.71	0.49	89.53
	5.01	5.05	25.30	6.782	26.27			
	5.01	5.04	25.25	6.566	25.48			
RA	4.99	5.01	25.00	2.998	11.75	11.68	0.11	40.68
	5.00	5.04	25.20	2.972	11.56			
	5.00	4.99	24.95	2.987	11.73			

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง ข้อมูลดิบที่ใช้ในการคำนวณความหนาแน่น (bulk density) ของตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบา

Aggregate	Mass (g)	Density* (g/cm ³)	Mass (g)	Density* (g/cm ³)	Mass (g)	Density* (g/cm ³)	Mass (g)	Density* (g/cm ³)	Mass (g)	Density* (g/cm ³)	Average (kg/m ³)	σ
ECA	690	0.690	695	0.695	690	0.690	685	0.685	685	0.685	689	3.74
CPFA1	770	0.770	770	0.770	774	0.774	766	0.766	768	0.768	770	2.65
CFA	1100	1.100	1105	1.105	1095	1.095	1105	1.105	1115	1.115	1104	6.63
CPFA2	780	0.780	794	0.794	788	0.788	778	0.778	780	0.780	784	6.07
BA1	860	0.860	865	0.865	860	0.860	855	0.855	850	0.850	858	5.10
PA	880	0.880	875	0.875	880	0.880	885	0.885	885	0.885	881	3.74
WFA	888	0.888	851	0.851	853	0.853	877	0.877	880	0.880	870	15.01
BA2	651	0.651	661	0.661	674	0.674	652	0.652	654	0.654	658	8.44
RA	759	0.759	756	0.756	722	0.722	792	0.792	751	0.751	756	22.36

*volume = 1000 ml



ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ ข้อมูลดิบที่ใช้ในการคำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) และการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของตัวอย่างเม็ดมวลรวมเบา

Aggregate	Mass _{dry} (g)	Mass _{saturated} (g)	Mass _{in water} (g)	Water absorption (%)	Relative density
ECA	98.30	111.76	32.418	13.69	1.24
CPFA1	100.55	127.04	50.935	26.35	1.32
CFA	100.47	119.02	56.115	18.46	1.60
CPFA2	100.38	129.48	54.717	28.99	1.34
BA1	100.57	127.69	50.734	26.97	1.31
PA	100.6	125.82	49.78	25.07	1.32
WFA	100.99	123.51	53.717	22.30	1.45
BA2	100.35	129.29	50.332	28.84	1.27
RA	100.26	129.07	50.215	28.74	1.27

ภาคผนวก ฉ

ตารางที่ ฉ-1 ค่าแรงกดแตกสูงสุดที่ตัวอย่างควบคุม ECA ขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร สามารถรับได้

No.	Maximum load (N)	Diameter (mm)
1	132.88	6.65
2	169.12	6.45
3	172.57	6.50
4	117.45	6.05
5	168.22	7.10
6	175.17	6.85
7	169.35	7.46
8	162.72	6.35
9	66.65	6.65
10	57.18	6.55
11	153.67	6.35
12	62.40	6.09
13	184.04	6.50
14	40.84	6.56
15	139.81	6.80
16	144.50	7.20
17	148.39	6.70
18	150.34	7.75
19	121.55	5.95
20	64.30	5.81
21	68.89	5.90
22	171.26	6.00
23	181.13	6.35
24	143.98	5.95
25	223.82	6.35
26	194.76	6.30

27	117.11	6.70
28	132.13	5.65
29	175.98	6.85
30	197.16	6.70
31	107.17	5.95
32	107.87	6.45
33	185.64	6.30
34	124.86	5.75
35	118.03	5.70
36	144.25	6.15
37	78.12	6.00
38	169.42	7.20
39	206.09	5.80
40	164.64	6.55
41	151.31	6.10
42	187.36	5.95
43	130.88	7.10
44	161.49	6.35
45	208.81	6.35

ตารางที่ ฉ-2 ค่าแรงกดแตกสูงสุดที่ตัวอย่างเม็ดมวลเบาอายุ 7 วัน ขนาด 4 - 16 มิลลิเมตร แต่ละชนิดสามารถรับได้

No.	CPFA1		CFA		CPFA2		BA1		PA		WFA		BA2		RA	
	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)
1	145.44	14.43	170.59	12.24	470.99	12.60	325.89	15.63	130.78	14.38	358.35	11.80	358.28	15.22	188.85	13.02
2	103.37	9.02	238.66	12.12	421.84	11.35	100.05	13.90	137.12	13.09	267.59	10.37	278.94	13.68	282.73	13.03
3	87.28	12.18	459.5	13.04	380.78	10.66	268.03	14.65	102.21	12.74	212.82	10.83	389.22	12.47	246.44	12.03
4	214.12	15.75	241.44	12.96	214.68	10.26	226.26	11.97	177.29	11.96	238.32	11.27	369.08	10.75	255.6	12.82
5	144.33	11.11	127.2	12.86	505.69	11.50	405.72	12.91	174.51	11.24	341.15	9.56	219.19	9.85	171.7	12.20
6	118.78	10.75	168.29	14.09	363.08	9.76	149.35	11.62	181.04	11.48	227.96	9.32	278.72	10.44	355.17	12.73
7	126	12.03	183.96	13.80	328.04	10.50	212.29	12.54	187.41	11.01	285.46	9.02	341.07	10.02	325.57	13.73

8	125.31	10.49	394.18	13.14	397.46	11.70	188.12	12.43	192.9	11.20	229.37	12.12	278.67	10.09	261.1	12.41
9	94.09	11.60	213.87	14.21	410.39	11.45	219.64	11.52	169.84	11.59	219.28	12.13	303.79	9.75	109.14	10.25
10	114.15	10.50	204.31	15.60	400.9	11.61	236.19	13.30	154.04	11.88	293.79	13.29	331.2	10.74	153.2	11.09
11	99.24	9.64	303.87	12.39	319.98	10.40	173.66	12.10	159.16	10.41	285.72	11.79	339.39	10.04	172.84	11.45
12	82.51	11.19	197.83	10.61	369.64	10.50	193.88	12.50	163.06	10.99	242.52	11.96	320.86	9.24	284.33	11.21
13	103.35	9.95	297.62	11.36	387.82	11.10	139.9	13.55	144.8	10.74	331.98	12.10	244.74	9.60	112.73	9.85
14	149.76	12.45	157.95	11.32	322.21	10.41	198.31	11.65	116.07	10.03	322.4	12.33	318.48	10.89	153.45	10.43
15	149.83	12.51	240.67	10.99	418.02	10.75	218.8	11.93	128.45	9.40	163.29	10.05	298.25	10.56	82.71	9.64
16	86.86	10.12	159.49	10.84	298.28	10.70	229.43	10.31	103.05	9.86	246.67	10.39	389.02	9.55	196.65	10.28
17	70.3	12.02	106.43	11.31	420.43	13.81	170.17	10.49	114.49	9.52	172.52	10.25	273.56	9.67	232.26	10.21
18	86.23	9.41	343.2	11.42	370.39	9.40	183.84	10.32	138.39	10.24	245.79	9.54	306.44	9.97	162.18	10.32
19	81.2	12.07	216.18	10.90	305.41	9.71	303.16	11.44	124.03	9.45	264.55	10.97	304.36	8.52	84.91	9.42
20	98.82	10.51	230.28	10.70	403.93	8.90	241.76	11.70	140.57	9.30	229.65	9.62	176.46	9.30	284.09	10.74
21	54.54	9.89	209.03	10.01	237.25	9.56	141.32	12.74	118.13	10.29	318.26	9.98	370.09	9.22	88.28	12.09
22	151.1	11.37	213.4	9.85	311.62	9.10	205.19	9.86	121.2	10.62	203.55	9.91	246.17	10.16	93.02	10.96
23	151.17	13.42	188.89	11.14	254.26	8.80	138.63	10.38	58.98	9.14	211.93	8.31	257.6	9.51	159.49	9.05
24	156.96	11.58	108.82	9.46	361.98	8.75	147.41	11.54	160.98	10.39	218.86	9.25	225.96	8.18	236.52	9.10
25	143.21	10.39	98.03	10.56	213	9.25	74.75	9.52	136.22	9.22	211.5	9.56	229.31	9.16	174.1	10.23
26	124.23	11.12	156.84	10.51	237.98	8.96	140.5	10.68	116.75	9.89	207	10.11	153.94	8.75	91.55	9.58
27	84.89	11.02	208.92	10.06	230.65	9.26	178.14	10.20	95.5	9.13	150.23	8.03	221.36	8.35	203.75	9.68
28	116.32	9.81	181.02	9.78	265.06	9.10	139.12	10.80	124.7	9.39	205.6	9.33	266.13	9.15	223.96	9.26
29	163.01	12.09	99.73	9.08	348.04	10.76	84.78	10.61	85.41	9.18	271.93	9.09	339.65	9.71	109.31	9.87
30	117.26	11.35	224.68	9.03	510.91	14.61	152.82	10.40	110.19	9.87	140.74	9.66	279.85	10.12	231.77	9.39
31	85.72	9.62	291.96	9.47	294.53	9.65	114.82	10.19	48.91	9.79	194.56	8.93	207.29	8.13	85.52	10.60
32	69.11	9.29	243.79	8.39	186.16	9.61	212.41	10.34	107.17	8.54	144.43	9.10	182.62	8.30	166.48	10.17
33	104.97	8.79	141.82	9.10	375.36	9.85	99.1	10.48	120.57	8.83	117.48	8.46	185.28	8.55	156.49	9.17
34	98.79	9.80	131.98	8.70	557.65	10.41	208.06	9.40	94.47	8.62	197.06	9.06	214.85	7.87	223.68	9.15
35	93.44	8.60	91.74	9.45	279.95	10.80	140.71	9.15	99.79	9.15	153.33	9.16	222.19	8.61	157.86	8.79
36	125.6	9.40	179.22	8.92	473.06	10.40	93.97	10.07	90.33	9.13	263.91	9.80	244.93	7.96	172.18	7.96
37	62.3	9.00	105.42	9.31	209.01	8.35	152.1	11.14	73.45	8.58	257.7	8.26	267.36	9.91	181.76	8.20
38	90.01	9.54	155.26	9.14	195.41	8.81	85.77	9.54	124.6	8.61	140.06	8.11	233.06	8.46	172.67	8.51
39	85.06	9.39	123.93	9.67	394.72	9.35	145.89	9.94	93.23	8.87	219.43	8.90	148.43	9.03	201.61	9.35
40	121.5	12.70	152.37	9.15	453.76	10.36	79.4	9.42	99.76	8.27	155.47	8.34	250.07	8.26	215.85	8.31
41	68.42	10.25	213.92	9.01	289.49	10.25	87.5	8.59	56.58	7.59	208.34	10.81	246.51	7.80	156.78	8.82
42	64.87	9.75	108.3	8.80	166.52	8.55	132.07	9.78	53.63	8.53	133.82	8.63	251.61	8.50	131.9	8.47
43	89.73	12.51	48.87	9.94	251.46	8.50	58.27	8.49	91.86	7.97	129.18	7.99	194.81	8.42	82.31	8.20
44	113.48	10.05	197.04	10.12	234.83	7.70	72.23	8.87	95.84	8.02	240.41	8.93	192.19	8.56	127.38	8.65
45	103.74	9.86	131.33	8.76	288.06	8.50	73.63	7.47	61.55	8.85	189.38	8.03	226.11	7.97	151.18	7.49
46	65.08	8.45	107.8	8.88	279.04	7.95	83.84	8.77	22.38	7.77	91.69	7.27	219.78	7.24	58.83	6.08
47	53.14	8.44	110.84	9.28	206.98	8.00	153.17	8.39	22.23	8.11	150.18	8.24	156.92	7.16	130.92	7.77
48	75.45	8.80	212.39	8.52	231.67	8.55	120.89	8.25	58.74	6.93	152.02	8.32	159.16	7.49	75.22	6.89
49	68.4	7.60	242.13	10.19	169.61	8.26	106.44	8.93	20.43	7.52	137.53	6.55	167.61	8.06	144.16	7.92
50	75.35	7.89	174.18	10.04	189.28	9.15	128.17	8.90	63.66	7.40	124.32	7.42	186.85	7.49	128.74	6.83

51	83.51	7.96	287.15	8.83	199.28	9.11	99.99	8.15	73.79	8.02	99.36	6.45	178.7	7.79	17.01	7.10
52	63.02	7.71	87.05	8.10	278.29	8.55	105.06	7.93	56.75	7.83	116.55	6.45	255.52	7.52	42.57	7.72
53	78.26	7.66	159.8	7.24	117.47	5.45	119.57	8.36	48.91	7.39	146.39	7.88	251.01	7.16	42.16	7.15
54	40.48	6.01	84.97	8.64	86.35	4.65	141.5	8.99	49.46	6.14	78.55	7.88	252.65	7.73	107.53	7.04
55	79.02	6.86	126.61	8.50	91.55	4.70	61.08	8.05	30.46	6.20	69.48	6.59	85.5	7.25	86.38	6.69
56	96.41	7.36	241.78	7.35	79.59	5.10	132.54	6.57	75.74	8.10	125.23	7.24	71.24	7.70	104.65	6.94
57	42.17	6.40	113.05	7.11	93.9	5.40	183.29	7.24	29.04	7.47	94.95	6.93	174.21	6.77	44.41	7.20
58	63.47	6.01	51.44	7.79	91.76	5.50	78.16	8.43	21.97	7.72	104.22	6.00	211.8	6.80	113.14	6.54
59	56.07	5.75	133.13	7.47	137.98	6.80	91.34	7.87	35.45	6.38	119.2	6.90	86.78	7.49	35.45	6.89
60	93.26	7.81	204.34	6.94	166.3	6.65	86.06	8.52	17.78	7.67	114.29	6.43	205.4	7.27	18.26	7.11
61	45.61	7.20	211.51	8.19	238.76	6.75	60.02	6.85	71.2	6.21	94.28	6.23	115.44	6.37	33.41	7.08
62	57.25	5.71	153.26	7.23	177.72	7.10	91.57	7.96	59.27	6.22	116.5	5.98	119.62	6.90	17.75	5.49
63	44.18	5.81	67.13	7.07	118.67	7.21	130.99	7.32	44.51	6.87	106.5	6.16	87.88	6.54	37.63	6.07
64	46.59	5.55	113.17	7.00	216.09	7.15	68.88	7.34	33.49	6.47	26.04	5.52	75.74	7.00	15.84	5.90
65	36.44	6.19	94.76	7.42	104.98	5.70	80.06	7.75	63.45	7.27	81.97	5.16	237.82	7.37	56.23	6.21
66	95.37	7.61	132.26	6.60	138.35	6.75	71.46	7.32	56.25	6.67	32.6	5.83	18.05	6.85	145.16	6.52
67	69.87	6.10	113.29	6.52	94.05	6.41	99.75	7.48	26.12	6.94	93.35	6.06	247.24	7.78	68.39	5.96
68	85.45	6.96	94.84	7.51	103.72	7.45	100.43	6.56	44.93	6.42	126.4	6.31	172.04	6.36	58.44	5.97
69	52.93	6.05	130.29	5.34	110.22	5.25	145.27	8.16	20.35	6.32	104.74	7.93	66.9	5.50	76.77	5.38
70	52.07	5.45	353.04	7.56	144.15	5.80	64.38	7.25	24.38	6.86	72.86	5.78	99.61	6.58	22.63	6.20
71	67.44	6.31	165.07	7.50	92.93	6.55	70.55	7.07	25.85	6.30	132.64	5.20	86.49	6.52	108.91	5.37
72	53.12	4.90	139.17	5.91	98.72	6.65	66	6.93	17.46	5.94	76.22	5.20	66.07	6.71	56.89	5.73
73	50.92	6.11	98.22	5.93	134.11	6.50	60.82	7.75	53.67	6.44	26.99	5.38	72.8	5.73	66.49	5.98
74	44.08	5.45	99.98	6.26	185.75	7.61	45.8	6.73	32.67	6.33	144.92	5.78	96.98	6.30	44.14	5.24
75	51.99	5.75	56.22	6.49	106.24	5.45	84.49	7.55	38.33	5.99	75.01	5.27	55.82	6.51	53.24	5.33
76	55.85	5.46	83.85	5.34	124.15	5.85	50.66	6.65	31.21	6.44	32.43	5.05	72.73	5.78	27.31	5.50
77	50	5.05	121.51	5.43	120.87	6.85	59.54	6.68	17.62	5.79	36.23	5.05	87.7	6.70	17.5	5.12
78	46.59	6.00	125.33	5.68	103.27	6.05	68.45	6.41	64.6	6.40	116.75	5.78	101.48	7.21	52.38	7.46
79	46.57	5.54	58.08	5.56	147.24	6.55	54.61	6.17	39.63	6.57	91.1	5.07	122.37	6.29	17.5	5.12
80	38.14	4.50	55.94	5.83	199.08	6.95	46.58	6.58	27.82	6.61	106.66	4.88	55.26	6.15	43.17	6.20
81	33.83	4.45	69.71	5.57	268.77	8.35	124.82	6.39	51.3	6.31	64.83	5.26	44.83	6.34	97.66	5.93
82	55.85	5.10	93.47	5.53	217.73	7.60	57.74	6.50	17.03	5.75	97.08	5.39	57.87	6.12	111.8	7.67
83	58.69	5.95	161.09	7.03	271.51	8.30	108.71	6.26	24.84	6.21	73.66	5.16	62.53	5.74	98	8.02
84	61.28	6.66	228.43	7.62	202.33	6.75	52.95	6.75	20.58	6.35	29.09	5.06	72.07	6.00	49.85	5.55
85	60.92	6.31	112.02	7.89	191.38	7.95	119.8	6.04	17.54	6.49	91.03	4.70	151.15	6.17	26.33	4.70
86	64.71	5.95	90.61	6.77	108.08	5.40	54.48	6.33	44.02	5.79	18.92	4.62	53.57	5.52	59.46	5.61
87	46.65	7.87	173.52	6.25	84.13	6.70	64.76	5.67	17.53	5.44	57.12	4.89	63.08	5.90	41.37	4.71
88	39.57	7.25	117.9	6.75	237.98	7.20	51.67	5.82	22.96	5.52	66.5	4.69	52.79	5.22	27.15	5.32
89	34.94	5.94	101.83	6.41	261.31	7.45	67.78	5.91	16.17	5.35	21.88	4.48	60.75	5.33	49.58	5.29
90	72.47	6.20	66.66	5.55	184.7	6.10	92.84	7.83	30.91	6.24	152.3	6.55	36.59	4.52	27.31	5.00

ตารางที่ ฉ-3 ค่าแรงกดแตกสูงสุดที่ตัวอย่างเม็ดมวลเบาอายุ 28 วัน ขนาด 4 – 16 มิลลิเมตร แต่ละชนิด สามารถรับได้

No.	CPFA1		CFA		CPFA2		BA1		PA		WFA		BA2		RA	
	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)	Maximum load (N)	diameter (mm)
1	131.73	10.18	233.95	13.44	422.91	13.47	244.23	12.50	322.67	14.52	298.27	14.49	401.69	13.35	218.28	14.80
2	115.95	11.48	258.02	11.61	491.98	13.54	220.83	14.77	254.49	14.42	404.31	11.81	288.58	12.75	200.27	9.89
3	92.93	9.77	414.29	13.51	441.61	11.48	205.37	12.99	260.34	14.01	257.72	11.92	407.7	13.18	292.59	11.21
4	80.47	9.93	335.96	11.30	485.43	12.79	316.53	12.75	208.71	12.19	306.5	11.26	492.98	12.69	255.47	11.69
5	62.7	9.27	254.26	11.95	672.47	11.98	319.57	13.19	176.4	13.41	609.11	11.97	391.74	13.70	332.3	11.61
6	69.13	9.16	308.79	12.05	843.53	12.99	358.28	11.81	196.55	13.28	408.28	13.75	804.08	13.90	212.94	13.14
7	162.95	9.56	227.68	12.10	798.64	13.32	248.97	13.35	163.13	13.00	493.86	13.91	407.29	12.34	210.27	12.10
8	57.3	9.80	251.34	14.10	325.32	11.60	293.18	12.66	195.85	12.69	314.16	12.73	340.64	11.93	270.9	12.73
9	143.17	12.82	219.34	14.33	470.84	11.76	399.1	11.29	264.81	10.92	337.52	11.82	426.98	11.95	292.99	12.68
10	142.46	11.34	254.95	13.25	436.05	11.53	212.64	11.12	83.94	11.09	647.9	13.28	375.17	11.57	238.67	10.73
11	170.09	11.26	213.4	10.45	335.72	10.31	260.39	10.66	131.3	12.50	318.82	12.95	165.33	11.10	209.53	11.04
12	238.45	11.59	221.28	11.81	242.41	9.92	252.3	11.69	92.31	11.24	231.37	10.55	429.82	11.22	267.33	11.65
13	204.36	11.99	215.01	11.56	378.99	8.90	222.5	10.78	184.75	10.79	353.96	12.12	368.22	10.83	249.79	11.06
14	183.97	11.74	365.46	10.41	372.09	8.86	297.47	11.20	127.88	10.32	291.6	11.60	334.92	9.65	165.31	9.92
15	157.89	10.24	357.62	12.45	204.67	9.43	221.87	11.23	153.85	11.21	338.89	11.51	203.59	11.47	293.78	10.15
16	106.41	10.63	135.57	10.20	325.93	9.85	227.59	10.88	91.94	10.23	322.42	11.33	286.4	11.82	306.94	11.48
17	106.36	10.50	295.39	11.35	229.34	7.85	232.33	10.34	119.04	11.29	403.15	10.62	319.67	11.03	212.94	9.45
18	157	11.43	315.45	11.00	274.36	9.72	170.88	9.99	115.21	10.17	327.96	9.62	308	9.56	338.8	10.81
19	148.08	12.28	383.34	10.90	353.76	10.78	228.86	9.37	176.74	10.38	318.11	9.87	168.3	9.22	136.09	9.87
20	262.77	13.52	257.73	11.55	286.3	8.93	207.34	9.20	151.27	9.63	284.1	9.29	442.27	10.79	168.99	10.15
21	206.12	13.02	156.79	10.45	278.6	9.05	204.28	9.41	99.53	9.80	270.08	10.55	366.31	10.19	137.27	9.33
22	226.98	11.65	229.98	11.36	334.45	9.40	190.57	9.72	144.37	10.96	329.3	10.44	234.05	9.68	126.73	9.86
23	225.77	12.34	326.91	9.65	271.84	9.75	147.66	10.88	151.55	10.36	259.05	9.43	446.9	9.68	141.14	9.70
24	279.97	12.67	180.13	11.35	301.5	8.47	158.5	9.49	172.54	10.30	293.46	10.28	246.39	9.31	149.69	10.99
25	181.88	11.74	361.36	10.51	252.65	8.52	158.92	8.56	110.75	10.15	229.25	9.61	300.79	9.19	193.5	10.81
26	197.03	12.22	145.11	10.25	339.25	9.04	144.63	9.03	98.82	9.10	319.17	9.07	320.62	9.56	138.51	8.19
27	238.13	15.22	154.98	10.19	315.61	8.78	230.03	9.45	106.03	10.44	295.52	10.09	235.99	8.58	242.16	9.88
28	309.71	14.80	312.61	9.66	252.19	9.61	167.59	9.68	131.62	9.79	270.62	8.95	186.51	9.18	154.61	9.78
29	367.65	15.78	373.45	10.15	343.52	9.56	146.99	9.16	96.4	10.61	231.93	9.96	176.43	10.39	276.39	8.94
30	175.62	13.71	214.78	9.80	262.12	8.88	273.14	8.78	86.8	8.82	290.73	9.62	469.92	10.40	140.09	9.35
31	173.56	12.94	222.77	9.91	410.68	11.19	169.28	9.06	127.86	9.85	370.82	10.71	388.67	9.70	110.13	8.23
32	177.54	11.89	212.36	9.79	364.52	11.55	124.47	9.33	134.41	9.95	230.19	9.76	184.08	8.90	139.76	9.95
33	127.38	9.71	100.18	9.99	443.52	12.04	230.98	9.65	87.23	9.32	304.18	10.11	353.19	9.39	126.36	9.48
34	73.85	9.95	149.32	9.15	379.79	9.79	184.15	9.30	148.39	8.09	338.09	8.91	402.14	9.21	142.24	9.77
35	119.65	10.75	337.39	8.10	338.74	9.64	170.89	9.90	120.27	8.98	242.6	8.91	312.56	9.41	288.41	8.98

36	187.05	10.43	228.74	9.45	252.1	11.31	229.39	8.13	108.94	8.98	245.55	9.93	254.92	9.23	201.94	9.21
37	159.63	9.04	173.97	8.80	438.35	11.76	232.27	8.84	76.7	8.74	284.01	9.69	244.75	9.02	140.54	8.82
38	111.53	10.49	189.06	8.61	393.2	11.88	215.21	9.42	104.57	9.07	319.12	8.84	251.16	8.49	102.43	8.84
39	52.31	9.24	218.32	8.85	580.67	10.45	142.85	8.82	103.77	8.50	298.34	9.05	259.64	8.05	182.86	8.89
40	139.17	8.86	148.34	8.30	499.09	12.82	148.56	9.11	90.62	9.15	233.58	8.66	245.14	9.19	141.43	8.34
41	83.51	9.54	217.34	8.50	600.41	13.88	151.36	8.64	132.3	9.27	205.16	9.33	272.64	9.01	145.12	8.24
42	115.53	9.44	169.73	8.41	599.8	12.60	94.21	8.48	87.28	9.01	209.57	8.23	195.32	8.66	145.41	9.09
43	55	9.48	169.04	9.00	439.35	13.02	138.15	9.18	83.02	8.66	272.67	9.05	189.35	8.98	133.54	8.51
44	81.91	8.89	138.31	8.55	276.27	9.77	187.43	8.48	107.1	8.66	227.26	8.28	195.7	8.90	110.66	8.21
45	161.4	11.34	302.54	9.40	335.85	9.97	173.29	8.90	81.04	8.74	233.08	8.73	175.21	8.50	152.43	8.53
46	80.56	7.98	139.79	9.14	449.21	10.52	159.23	8.70	38.79	5.49	85.01	7.29	81.5	7.51	103.93	7.18
47	100.26	8.38	254.72	8.55	545.02	12.49	122.35	8.83	29.08	5.34	254.12	8.37	272.97	7.88	208.42	7.85
48	95.95	8.06	224.48	8.46	554.64	10.68	119.16	8.73	24.34	5.57	136.92	7.86	92.26	7.61	147.24	6.93
49	91.67	8.41	125.2	8.00	451.08	11.67	150.56	8.17	17.98	5.89	151.9	7.75	90.03	7.77	139.73	7.32
50	92.75	7.97	224.87	9.40	305.73	9.17	189.77	9.81	57.43	5.82	183.47	7.61	127.11	6.94	153.26	7.00
51	59.15	7.73	140.77	8.45	157.54	8.03	218.34	7.76	18.58	6.39	194.82	6.99	93.73	7.69	113.43	8.00
52	60.56	7.42	212.51	7.89	345.54	8.36	163.02	8.06	63.18	8.16	120.27	7.29	98.09	7.49	115.1	6.68
53	62.88	7.26	270.32	8.11	346.4	7.82	185.42	8.00	23.47	6.73	132.84	7.23	67.11	7.52	105.34	7.85
54	47.93	7.22	355.67	8.42	291.32	7.75	171.41	8.00	90.07	6.62	152.58	6.20	230.07	7.66	75.48	7.25
55	47.88	6.04	154.63	7.74	263.66	8.44	152.74	8.54	97.04	6.23	182	7.88	230.88	7.63	52.21	6.33
56	52.28	6.92	237.38	8.06	236.06	7.70	118.38	7.77	24.85	6.98	110.93	6.57	254.21	7.73	64.27	6.94
57	48.93	6.77	189.97	7.60	395.08	8.93	115.34	7.50	26.75	6.33	135.45	6.58	104.76	7.40	70.76	7.58
58	65.71	6.92	206.65	7.55	252.89	7.96	128.93	8.09	81.93	7.20	135.68	6.98	111.56	6.31	86.76	8.18
59	66.52	6.79	75.98	6.85	164.03	7.27	111.84	7.39	47.82	8.27	102.77	6.60	101.96	6.41	129.35	7.36
60	62	6.82	169.04	7.61	213.97	6.96	147.7	8.29	70.58	6.45	115.97	6.88	142.36	6.86	173.22	7.39
61	47.83	6.23	240.79	7.15	188.7	6.77	199.44	8.16	39.65	6.97	77.31	6.20	138.77	5.99	84.54	7.09
62	52.35	6.30	129.21	7.72	156.79	6.27	148.12	8.27	83.07	6.30	97.38	6.79	122.09	7.12	117.66	6.56
63	41.28	6.49	181.09	6.90	178.45	7.23	102.53	7.89	33.62	6.21	82.74	5.96	161.34	6.74	93.58	7.76
64	75.06	6.48	157.76	6.33	243.78	6.70	126	7.22	28.52	6.91	141.7	6.03	182.35	7.59	101.77	7.43
65	68.45	7.23	135.5	6.29	150.7	7.96	85.22	7.70	27.08	7.40	125.35	6.74	195.9	7.18	74.78	6.64
66	121.95	7.36	183.18	7.04	124.02	4.76	83.78	6.80	50.32	7.40	120.52	5.87	112.58	6.83	115.68	6.82
67	71.68	6.29	83.04	6.43	150.72	5.85	90.19	6.85	36.05	6.01	99.16	6.11	219.01	6.40	92.05	7.64
68	77.89	7.13	64.52	6.30	161.97	5.67	157.73	7.87	74.41	6.26	74.97	5.85	95.4	7.70	60.3	7.25
69	79.48	6.59	94.73	6.77	153.62	6.48	170.32	7.42	45.82	6.86	156.1	5.78	130.02	7.05	43.24	7.35
70	54.09	5.17	138.59	6.59	224.17	6.45	118.48	7.50	40.88	7.83	102.53	5.51	78.97	7.01	46.2	6.39
71	38.9	5.65	139.4	6.91	186.02	5.98	106.19	6.98	18.05	5.90	134.24	5.74	182.07	6.28	73.76	6.63
72	43.48	5.34	125.71	6.56	189.68	6.30	114.77	6.95	30.18	5.20	138.96	5.74	65.3	6.32	59.89	6.46
73	46.13	5.00	235.16	7.49	223.83	6.51	82.21	6.35	20.52	5.14	131.92	5.54	64.81	6.52	70.62	6.41
74	36.02	5.72	120.7	6.43	264.6	7.36	102.9	6.90	26.66	8.00	70.7	5.80	95.82	6.18	55.56	5.85
75	67.69	6.33	84.25	5.87	172.61	6.80	91.68	6.21	34.33	6.06	130.43	5.20	104.61	6.56	60.65	5.41
76	88.1	6.21	108.75	5.95	255.93	7.62	85.98	6.45	52.19	7.05	129.04	5.37	63.08	5.37	65.91	5.48
77	88.32	6.32	118.35	6.64	252.17	8.45	158.33	6.45	51.27	5.73	154.45	6.27	106.11	6.31	41.61	5.38
78	51.99	5.95	83.41	6.22	214.77	7.50	87.94	6.60	17.96	5.89	124.63	5.69	75.71	5.60	54.43	5.05

79	64.97	5.52	108.79	6.23	251.96	7.75	148.77	6.79	57.44	7.23	118.15	4.71	189.81	6.45	47.97	5.51
80	92.64	8.17	181.29	6.00	249	8.07	121.44	6.56	36.22	7.20	165.09	5.73	58.26	5.45	122.88	5.68
81	114.79	8.47	96.13	6.72	172.88	7.87	104.2	6.70	41.92	8.55	139.66	6.00	98.89	5.86	35.85	5.97
82	109.09	7.67	78.51	6.05	279.7	8.64	83.15	6.11	44.09	6.43	91.36	5.11	49.66	6.10	53.5	5.88
83	104.83	7.64	97.03	5.84	358.77	8.15	87.67	6.36	17.63	6.70	125.02	5.52	60.12	5.59	35.27	5.30
84	71.37	7.86	116.82	5.44	146.2	7.18	120.11	6.14	29.7	6.03	103.04	5.50	74.73	5.95	51.65	5.35
85	85.57	8.64	134.77	5.79	169.34	6.27	124.55	6.23	47.62	7.14	87.15	5.61	49.99	5.51	50.65	5.77
86	90.15	8.45	146.89	5.61	194.28	6.45	118.74	6.22	17.57	6.62	134.59	5.61	74.65	5.31	39.59	5.13
87	79.58	7.68	82.76	5.64	194.45	7.15	87.5	5.87	23.09	5.85	99.89	5.63	90.5	5.03	51.86	4.99
88	76.17	7.11	129.4	4.60	248.68	7.82	92.6	5.90	25.05	6.66	81.05	4.56	140.81	6.09	54.4	5.24
89	71.86	6.73	88.56	5.04	223.4	8.19	76.22	5.62	18.43	6.78	88.49	5.26	53.11	5.13	38.72	5.96
90	103.5	8.31	112.66	5.50	196.21	6.68	86.63	5.85	29.2	6.04	73.49	6.55	76.34	5.60	52.36	5.36



ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข ข้อมูลดิบที่ใช้ในการคำนวณความหนาแน่น (bulk density) ของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุมวลรวม

Sample	No.	W (cm)	L (cm)	H (cm)	Volume (cm ³)	Mass (g)	Bulk density (g/cm ³)	Average (kg/m ³)	sd
ECA	1	5.10	5.00	5.00	127.50	207.00	1.62	1613	11.0
	2	5.08	5.01	4.99	127.00	205.00	1.61		
	3	5.07	5.01	4.99	126.75	203.00	1.60		
CPFA1	1	5.10	5.02	5.00	128.01	229.00	1.79	1778	9.6
	2	5.13	5.03	5.01	129.28	229.00	1.77		
	3	5.13	5.00	4.99	127.99	227.00	1.77		
CFA	1	5.10	5.04	5.08	130.58	253.00	1.94	1928	11.5
	2	5.15	5.01	5.08	131.07	251.00	1.91		
	3	5.14	5.01	5.07	130.56	252.00	1.93		
CPFA1	1	5.06	5.04	5.02	128.02	226.00	1.77	1752	84.4
	2	5.04	5.01	4.96	125.24	229.00	1.83		
	3	5.07	5.02	4.99	127.00	211.00	1.66		
BA1	1	5.08	5.04	5.02	128.53	221.00	1.72	1738	40.2
	2	5.07	5.02	5.00	127.26	227.00	1.78		
	3	5.10	5.01	4.99	127.50	218.00	1.71		
PA	1	5.11	5.01	5.12	131.08	222.00	1.69	1729	36.4
	2	5.11	5.00	5.01	128.01	221.00	1.73		
	3	5.12	5.00	5.02	128.51	227.00	1.77		
WFA	1	5.00	5.01	4.99	125.00	246.01	1.97	1947	20.1
	2	5.00	5.02	5.08	127.51	245.84	1.93		
	3	5.00	5.01	5.00	125.25	243.68	1.95		
BA2	1	5.00	5.08	5.02	127.51	220.10	1.73	1712	16.3
	2	5.00	5.01	5.03	126.00	213.51	1.69		
	3	5.00	5.05	5.02	126.76	217.61	1.72		
RA	1	5.00	5.04	5.00	126.00	220.98	1.75	1761	12.1
	2	5.00	5.00	5.01	125.25	222.31	1.77		
	3	5.00	5.01	5.00	125.25	219.71	1.75		

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข ข้อมูลดิบที่ใช้ในการคำนวณความต้านแรงอัด (compressive strength) ของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เม็ดมวลรวมเบาที่เตรียมขึ้นเป็นวัสดุมวลรวม

Concrete	Day	W (cm)	L (cm)	Area (cm ²)	Max load (ton)	Compressive strength (MPa)	Average (MPa)	sd
ECA	7	5.03	4.97	25.00	4.831	18.94	19.87	1.41
		4.99	5.01	24.98	4.889	19.18		
		5.11	4.94	25.26	5.539	21.49		
	28	5.10	5.00	25.48	7.252	27.90	26.56	1.30
		5.08	5.01	25.40	6.556	25.29		
		5.07	5.01	25.35	6.855	26.50		
CPFA1	7	5.01	5.01	25.12	5.247	20.47	19.37	2.61
		4.97	5.05	25.09	4.195	16.39		
		5.14	4.90	25.17	5.460	21.26		
	28	5.10	5.02	25.58	5.895	22.59	22.81	0.27
		5.13	5.03	25.75	6.073	23.11		
		5.13	5.00	25.65	5.953	22.74		
CFA	7	5.17	5.07	26.19	6.409	23.98	24.25	0.72
		5.12	5.02	25.68	6.212	23.71		
		5.15	5.01	25.80	6.6	25.07		
	28	5.10	5.04	25.65	7.652	29.23	28.34	1.26
		5.15	5.01	25.75	7.066	26.89		
		5.14	5.01	25.73	7.583	28.89		
CPFA2	7	5.06	4.99	25.20	7.415	28.84	28.25	0.71
		5.06	5.06	25.60	7.173	27.46		
		5.11	5.01	25.58	7.428	28.46		
	28	5.06	5.04	25.45	7.943	30.58	28.15	2.92
		5.04	5.01	25.20	7.445	28.95		
		5.07	5.02	25.45	6.472	24.92		
BA1	7	5.06	5.01	25.33	3.516	13.61	13.15	0.43
		5.05	5.02	25.33	3.293	12.74		
		5.04	5.02	25.25	3.379	13.11		
	28	5.08	5.04	25.58	5.889	22.56	21.70	0.78

		5.07	5.02	25.43	5.58	21.51		
		5.10	5.01	25.55	5.486	21.04		
PA	7	5.05	5.11	25.81	4.482	17.02	17.07	1.02
		5.09	5.08	25.86	4.24	16.07		
		5.10	5.10	25.98	4.801	18.11		
	28	5.11	5.01	25.58	5.106	19.56	19.65	1.30
		5.11	5.00	25.55	4.797	18.40		
		5.12	5.00	25.55	5.475	21.00		
WFA	7	5.01	4.99	25.00	3.931	15.41	14.02	2.28
		5.02	5.08	25.50	3.973	15.27		
		5.05	5.02	25.35	2.947	11.39		
	28	5.11	5.01	25.60	4.473	17.12	18.38	1.75
		5.08	5.01	25.45	5.293	20.38		
		5.06	5.00	25.30	4.554	17.64		
BA2	7	5.08	5.02	25.50	2.55	9.80	8.10	1.48
		5.01	5.03	25.20	1.825	7.10		
		5.05	5.02	25.35	1.916	7.41		
	28	4.95	5.03	24.90	2.784	10.96	9.25	1.61
		5.05	5.00	25.25	1.997	7.75		
		5.01	5.03	25.20	2.324	9.04		
RA	7	5.04	5.00	25.20	2.92	11.36	11.81	0.44
		5.00	5.01	25.05	3.13	12.24		
		5.01	5.00	25.05	3.02	11.83		
	28	5.00	5.08	25.40	4.886	18.85	17.18	2.25
		5.08	5.01	25.45	3.798	14.62		
		5.03	5.03	25.30	4.663	18.06		



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวอรปิยะ อังอติชาติ
วัน เดือน ปี เกิด	28 ตุลาคม 2536
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	B.Sc. (Materials Science, first class honour), Chulalongkorn University M.Sc. (Materials Science and Engineering, distinction), Imperial College London
ที่อยู่ปัจจุบัน	335/14 ถนนศรีนครินทร์ แขวงหนองบอน เขตประเวศ กทม. 10250
ผลงานตีพิมพ์	การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง “Preparation of Lightweight Concrete and Lightweight Aggregate from Bagasse Ash and Coconut Shell Ash” ในการประชุมทางวิชาการ Smart Materials and Nanotechnology (SMARTMAT@2020) ระหว่างวันที่ 1 - 4 ธันวาคม พ.ศ. 2563 ณ สวนนงนุช พัทยา และได้รับการตีพิมพ์ผลงานแบบ Journal ของ Suranaree Journal of Science and Technology (SJST) เรื่อง “PREPARATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE AND LIGHTWEIGHT AGGREGATE FROM BAGASSE ASH AND COCONUT SHELL ASH” ได้รับการตอบรับเพื่อตีพิมพ์ผลงานแบบ Journal ของ Materials Letters เรื่อง “The potential use of cold-bonded lightweight aggregate derived from various types of biomass fly ash for preparation of lightweight concrete”