



## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การใช้ประโยชน์จากเถาขานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง”

โดย

รศ.ดร.สุวิมล อัครพิศิษฐ  
ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์  
ดร.สุธาทิพย์ สิ้นยัง

ตุลาคม 2560

สัญญาเลขที่ RDG5950082

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การใช้ประโยชน์จากถ้ำขานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง”

โดย

รศ.ดร.สุวิมล อัครพิศิษฐ์

ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์

ดร.สุธาทิพย์ สิ้นยัง

ตุลาคม 2560

## บทสรุปผู้บริหาร

การปลูกอ้อยของประเทศไทยมีมากเป็นอันดับสามของโลก เมื่อนำมาทำการผลิตน้ำตาลก็จะมีชานอ้อยเหลือจากกระบวนการผลิตประมาณ 15 ล้านตันต่อปี ส่วนใหญ่ชานอ้อยจะถูกนำมาเป็นเชื้อเพลิงภายในโรงงาน หรือเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดเถ้าชานอ้อยประมาณ 0.4 ล้านตันต่อปี เถ้าชานอ้อยเหล่านี้ถูกกองทิ้งบนลานกว้าง หรือบ่อ ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายและส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมของชุมชนรอบโรงงาน เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีซิลิกาประมาณร้อยละ 50-60 โดยน้ำหนักและอยู่ในรูปซิลิกาผลึก (crystalline silica) ซึ่งไม่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ประกอบกับสีที่ดำ ทำให้ขาดความสนใจในการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวทางในการใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยในงานด้านวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง โดยโครงการนี้ประกอบด้วยแผนงานวิจัยซึ่งทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าชานอ้อยจากแหล่งต่างๆที่มีอายุการเก็บต่างกัน เพื่อให้ได้เถ้าชานอ้อยที่มีสมบัติเหมาะแก่การนำมาใช้ประโยชน์ จากนั้นจึงนำเถ้าชานอ้อยที่เหมาะสมมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง โดยแบ่งเป็น 3 โครงการย่อย

โครงการย่อย 1 ทำการศึกษาผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อยต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 และทำการบ่มที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง หรือที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ให้คอนกรีตมวลเบาที่มีสมบัติเทียบเท่าการบ่มปกติที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน และเมื่อทำการเทียบกับมาตรฐาน มอก. 1505-2541 [43] ที่กำหนดกำลังอัดขั้นต่ำ ในชั้นที่สูงที่สุดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ เท่ากับ 10 MPa พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อยร้อยละ 10 ใช้อุณหภูมิในการอบไอน้ำเพียง 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวอย่างควบคุม (ไม่มีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อย) ต้องใช้อุณหภูมิในการอบไอน้ำถึง 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง นอกจากนี้การนำเถ้าชานอ้อยมาแทนที่ทรายร้อยละ 10 สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เกิดจากขั้นตอนการบดและอบไอน้ำรวมกันได้ถึงร้อยละ 65.54

โครงการย่อย 2 ศึกษาการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยต่อสมบัติของบล็อกประสาน โดยบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยที่ใช้เป็นบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่สามารถใช้ในงานก่อสร้างได้นั้น (กำลังรับแรงอัดที่มีค่ามากกว่า 25 MPa และค่าการดูดซึมน้ำที่ 123.41 - 210.45 kg/m<sup>3</sup>) มีอัตราส่วนดังนี้ บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 และ 1:5 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยเท่ากับ 0 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:7 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยเท่ากับ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก สำหรับต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อย จะมีค่าต่ำกว่าบล็อกประสานปกติ ประมาณร้อยละ 20 - 30

โครงการย่อย 3 ทำการศึกษาสมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผา ร่วมกับเถ้าชานอ้อย ในภาพรวมพบว่าประเด็นปัญหาเรื่องสีดาซึ่งส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพที่ไม่น่าใช้งานของเถ้าชานอ้อยได้หายไปหลังจากกระบวนการเผาพร้อม เนื่องจากการเผาเพื่อสังเคราะห์ปูนเม็ดและปูนซีเมนต์นั้นใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง ส่งผลให้สารอินทรีย์ เช่น คาร์บอน เกิดการสลายตัว ทำให้ตัวอย่างหลังเผาร่วมมีเฉดสีที่สว่างขึ้น และเมื่อพิจารณาประเด็นอุณหภูมิในการเผาร่วม พบว่าตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,350-1,450 องศาเซลเซียส ให้ผลการรับกำลังที่ดีกว่าอุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำเถ้าชานน้อยไปใช้ในการเผาร่วมของกระบวนการผลิตซีเมนต์ ได้แก่ ร้อยละ 0.5 ถึง 1.0 เนื่องจากให้ค่าการพัฒนากำลังอัดที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547 (ไม่น้อยกว่า 28 MPa) สำหรับต้นทุนหลักของการนำเถ้าชานอ้อยไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน ได้แก่ ค่าขนส่งเถ้าชานอ้อยจากแหล่งกำเนิดไปสู่โรงงานผลิต โดยขึ้นอยู่กับระยะทางและรูปแบบการขนส่ง ทางผู้วิจัยเสนอให้มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการนำเถ้าชานอ้อยไปกำจัดหรือนำไปใช้กับโรงงานผลิตขนาดเล็กในพื้นที่แหล่งกำเนิดหรือศึกษารูปแบบการขนส่งที่ให้ปริมาณเยอะที่สุดเพื่อลดต้นทุนในส่วนนี้

## บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าชานอ้อยจากแหล่งต่างๆ พบว่ามีค่า LOI ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดโดย ASTM อย่างไรก็ตามข้อด้อยในเรื่องของสีดํา ทำให้การนำมาใช้ประโยชน์ในวัสดุก่อสร้างมีข้อจำกัด สำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุบดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ ค่า LOI และสีดําของเถ้าชานอ้อยไม่ได้เป็นอุปสรรค เมื่อนำเถ้าชานอ้อยมาแทนที่ทรายในคอนกรีต คอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ และทำการเทียบกับมาตรฐาน มอก. 1505-2541 ที่กำหนดกำลังอัดขั้นต่ำของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ เท่ากับ 10 MPa ผลการทดลองพบว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อย ร้อยละ 10 ใช้อุณหภูมิในการอบไอน้ำ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดเทียบเท่าตัวอย่างควบคุม (ไม่มีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อย) ที่ต้องใช้อุณหภูมิในการอบไอน้ำถึง 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เกิดจากขั้นตอนการอบและอบไอน้ำรวมกันได้ถึงร้อยละ 65.54 สำหรับการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยในบล็อกประสาน พบว่าบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนัก ที่สามารถใช้ในงานก่อสร้างได้นั้น (กำลังรับแรงอัดที่มีค่ามากกว่า 25 MPa และค่าการดูดซึมน้ำที่ 123.41 - 210.45 kg/m<sup>3</sup>) มีอัตราส่วนการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยสูงสุดเท่ากับร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 และ 1:5 โดยที่ส่วนผสมดังกล่าวช่วยลดต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานได้ประมาณร้อยละ 20 - 30 ในขณะที่การศึกษาสมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผาพร้อมกับเถ้าชานอ้อย พบว่าการนำเถ้าชานน้อยไปใช้ในการเผาของกระบวนการผลิตซีเมนต์ร้อยละ 0.5 ถึง 1.0 ที่อุณหภูมิ 1,350-1,450 องศาเซลเซียส ให้ผลการรับกำลังอัดของมอร์ต้าผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547 (ไม่น้อยกว่า 28 MPa)

## Abstract

The study of physical and chemical properties of bagasse from various sources found that loss on ignition (LOI) does not exceed the standard value of ASTM. However, its drawback in black color has made the use of bagasse in construction materials being limited. For the use as alternative raw material in the production of Portland cement, LOI and black color of bagasse do not cause problem. When bagasse was used to replace sand in autoclave aerated concrete (AAC) and compared with the Thai Industrial Standards no. 1505-2541 in which the compressive strength of AAC was controlled at 10 MPa. Results showed that AAC containing 10 wt.% sand replacement by bagasse and autoclaving at 140 °C for 4 hrs gave equivalent compressive strength to that of the control sample (no sand replacement by bagasse) which must be autoclaving at 180 °C for 8 hrs. This has made the energy cost reduced by 65.54% from the process of grinding and autoclaving. For the replacement of lateritic soil by bagasse in interlocking block found that for non-load-bearing interlocking block (strength greater than 25 Mpa and water absorption at 123.41-210.45 kg/m<sup>3</sup>), the maximum lateritic soil replacement by bagasse was 15 wt.% at cement:lateritic soil of 1:3 and 1:5. These mix proportions can reduce the cost of the non-load-bearing interlocking block by 20-30%. Whereas the use of bagasse as alternative raw material in the production of clinkers and Portland cement found that at the replacement percentage of 0.5-1.0 and clinkerization at 1,350-1,450 °C gave the strength of mortar that meets the requirement of Thai Industrial Standards no.15-2547 (strength does not less than 28 MPa.).

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	
บทคัดย่อ (ไทย-อังกฤษ)	
สารบัญ	ก - ข
สารบัญตาราง	ค - ฉ
สารบัญภาพ	ช - ๗

**แผนโครงการการใช้ประโยชน์จากถ้ำซานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง**

**บทที่ 1 บทนำ**

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1 - 2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2

**บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

3

**บทที่ 3 ผลการศึกษาและอภิปรายผล**

4 - 18

**บรรณานุกรม**

บ - 1

**ภาคผนวก**

ก : การจัดอบรมสัมมนาเพื่อเผยแพร่องค์ความรู้	ก-1 - ก-5
ข : แผ่นพับ	ข-1 - ข-2
ค : สรุปข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ	ค-1 - ค-3
ง : ผลกระทบด้านสังคมและชุมชน	ง-1 - ง-2

**โครงการย่อยที่ 1 ผลของการแทนที่ทรายด้วยถ้ำซานอ้อยต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ**

**บทที่ 1 บทนำ**

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1-1 - 1-2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1-2

**บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

1-3 - 1-15

**บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย**

1-16 - 1-22

**บทที่ 4 ผลการทดลอง**

1-23 - 1-40

**บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง**

1-41 - 1-44

**บรรณานุกรม**

บ1-1 - บ1-4

**ภาคผนวก ก**

ก1-1

**ภาคผนวก ข**

ข1-1

สารบัญ

	หน้า
<b>โครงการย่อยที่ 2 การใช้ประโยชน์จากถ้ำซานอ้อยในการผลิตบล็อกประสาน</b>	
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	2-1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2-1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2-2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2-2
<b>บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	2-3 – 2-24
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	2-25 – 2-28
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	2-29 – 2-57
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	2-58 – 2-59
<b>บรรณานุกรม</b>	บ2-1 – บ2-3
ภาคผนวก ก	ก2-1 – ก2-5
ภาคผนวก ข	ข2-1 – ข2-5
ภาคผนวก ค	ค2-1 – ค2-5
ภาคผนวก ง	ง2-1 – ง2-6
<b>โครงการย่อยที่ 3 สมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผา</b>	
<b>ร่วมกับถ้ำซานอ้อย</b>	
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	3-1 – 3-4
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3-4
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3-4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3-4
<b>บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	3-5 – 3-15
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	3-16 – 3-19
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	3-20 – 3-46
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	3-47 – 3-48
<b>บรรณานุกรม</b>	บ3-1 – บ3-3



สารบัญตาราง

แผนโครงการการใช้ประโยชน์จากเก้าชานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง		
ตารางที่		หน้า
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยจากบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด	4
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยจากบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)	6
3.3	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด	9
3.4	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด	11
3.5	สมบัติทางกายภาพของเก้าชานอ้อยของบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด	12
3.6	องค์ประกอบทางเคมีของเก้าชานอ้อยแต่ละแหล่ง	13 – 14
3.7	สมบัติทางกายภาพของเก้าชานอ้อยที่บด และไม่ผ่านการบดของบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด	15

สารบัญตาราง

โครงการย่อยที่ 1 ผลของการแทนที่ทรายด้วยถ้ำขานอ้อยต่อสมบัติของ  
คอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบาแบบไม่มีมวลรวมละเอียดที่ทำมาจากมวลรวมหยาบปกติและมวลเบา	1-3
2.2	ประเภทของมวลรวมน้ำหนักเบา	1-4
2.3	คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบาแบบร่วน	1-6
2.4	สถานะการสังเคราะห์เฟสต่าง ๆ ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และออสซิลานซิลิกา	1-13 – 1-14
3.1	คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	1-16
3.2	อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในปริมาณทั้งหมด 1 กิโลกรัม	1-19
4.1	ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการบดวัตถุดิบ	1-38
4.2	สัดส่วนค่าใช้จ่ายเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยถ้ำขานอ้อยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ	1-39
4.3	ปริมาณการใช้แก๊สในการอบไอน้ำ	1-39
4.4	ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแต่ละอัตราส่วนเปรียบเทียบกับตัวอย่าง	1-40
5.1	สรุปสถานะที่เหมาะสมและการนำไปใช้งานตามมาตรฐาน มอก. 57-2537	1-42

## สารบัญตาราง

โครงการย่อยที่ 2 การใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อยในการผลิตบล็อกประสาน		
ตารางที่		หน้า
2.1	การดูดกลืนน้ำของบล็อกประสาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อุตสาหกรรม 2547)	2-9
2.2	ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2-11
2.3	สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2-11
2.4	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักของปูนเม็ด	2-13
3.1	อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก) ของบล็อกประสาน	2-26
4.1	สมบัติทางกายภาพของเถ้าขานอ้อยและดินลูกรัง	2-31
4.2	การกระจายขนาดอนุภาคของดินลูกรัง	2-33
4.3	ปริมาณที่ใช้ในการบดอัดบล็อกประสาน	2-36
4.4	ค่าความหนาแน่นแห้งของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้า ขานอ้อย	2-42
4.5	ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน อ้อย	2-44
4.6	ลักษณะทางกายภาพของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้า ขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก	2-46
4.7	ลักษณะทางกายภาพของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้า ขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก	2-47
4.8	ลักษณะทางกายภาพของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้า ขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	2-49
4.9	สมบัติทางความร้อนของบล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:3 ที่มีการแทน ที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย	2-52
4.10	ราคาค่าต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานต่อก้อน	2-53 – 2-54
4.11	สมบัติทางวิศวกรรม และการนำไปใช้ประโยชน์ของบล็อกประสานที่มี การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย	2-56

## สารบัญตาราง

โครงการย่อยที่ 3 สมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผา  
ร่วมกับเถ้าชานอ้อย

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของวัตถุดิบบางชนิดในกระบวนการผลิตซีเมนต์	3-6
2.2	สรุปสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3-10
3.1	เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ XRD	3-18
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยโดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)	3-22
4.2	สมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อย	3-24
4.3	ร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกัน	3-28
4.4	ผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสด้วยโปรแกรม TOPAS ที่อุณหภูมิการสังเคราะห์และอัตราส่วนการเผาพร้อมเถ้าชานอ้อยที่แตกต่างกัน	3-34
4.5	สรุปสัดส่วนที่เหมาะสมในการนำเถ้าชานอ้อยมาเป็นวัตถุดิบทดแทนในการเผาร่วมกับวัตถุดิบหลักของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547	3-45

สารบัญญภาพ

แผนโครงการการใช้ประโยชน์จากเก้าชานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง

ภาพที่	หน้า
3.1 สีของเก้าชานอ้อยจากบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด	5
3.2 โครงสร้างผลึกของเก้าชานอ้อยใหม่จากบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด	5
3.3 สถานที่เก็บ และสีของเก้าชานอ้อยใหม่อายุ 1 วัน ของบริษัท เกษตรไทย อินเทอร์เน็ต เซ็นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)	7
3.4 สถานที่เก็บ และสีของเก้าชานอ้อยใหม่อายุ 2 ปี ของบริษัท เกษตรไทย อินเทอร์เน็ต เซ็นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)	8
3.5 โครงสร้างผลึกของเก้าชานอ้อยใหม่และเก้าชานอ้อยเก่าของบริษัท เกษตรไทย อินเทอร์เน็ต เซ็นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)	8
3.6 สีของเก้าชานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด	10
3.7 โครงสร้างผลึกของเก้าชานอ้อยใหม่จากบริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด	10
3.8 สีของเก้าชานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด	11
3.9 โครงสร้างผลึกของเก้าชานอ้อยใหม่จากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด	12
3.10 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเก้าชานอ้อยจากบริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด	13
3.11 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเก้าชานอ้อย ก) เก้าชานอ้อยบด และ ข) เก้าชานอ้อยไม่บด	15 - 16
3.12 โครงสร้างผลึกของเก้าชานอ้อย	16
3.13 โครงสร้างระดับจุลภาคของเก้าชานอ้อย	17

สารบัญภาพ

โครงการย่อยที่ 1 ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยต่อสมบัติของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

ภาพที่	หน้า
2.1 อัตราการพัฒนาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C <sub>3</sub> S	1-10
2.2 อัตราการพัฒนาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C <sub>3</sub> A	1-11
2.3 ความสัมพันธ์ของเฟสต่าง ๆ ของ CSH ภายใต้ไฮโดรเทอร์มอล	1-13
3.1 การกระจายตัวของอนุภาคของทรายและเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบดแล้ว	1-17
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ	1-18
3.3 การทำงานของเครื่อง SEM	1-20
3.4 การติดตั้งในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน	1-21
4.1 ลักษณะโครงสร้างของเถ้าขานอ้อย	1-23
4.2 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาไม่อบไอน้ำที่ปริมาณผลอลูมิเนียมต่าง ๆ กัน	1-24
4.3 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาไม่อบไอน้ำที่ปริมาณภาพอลูมิเนียมต่าง ๆ กัน	1-24
4.4 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่ 7 และ 28 วัน และที่อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง	1-25
4.5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ 7 และ 28 วัน และที่อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง	1-26
4.6 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ 7 และ 28 วัน และที่อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง	1-28
4.7 XRD patterns ของคอนกรีตมวลเบาที่ 28 วัน	1-29
4.8 XRD patterns ของคอนกรีตมวลเบาที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง	1-30
4.9 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาที่อายุการบ่ม 28 วัน (ก) CT, (ข) A10 และ (ค) A50	1-30 – 1-31
4.10 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง(ก) CT, (ข) A10 และ (ค) A50	1-31
4.11 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส	1-32
4.12 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	1-33

สารบัญภาพ

โครงการย่อยที่ 1 ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขาน้อยต่อสมบัติของ  
คอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขาน้อยที่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	1-33
4.14 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส	1-34
4.15 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	1-35
4.16 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	1-35
4.17 XRD patterns ของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 140 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	1-37
4.18 ภาพที่ 4.18 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ, (ก) อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ (ข) อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง	1-37 – 1-38
4.19 ภาพที่ 4.19 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา	1-40

สารบัญภาพ

โครงการย่อยที่ 2 การใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อยในการผลิตบล็อกประสาน

ภาพที่	หน้า
2.1 บล็อกตรงหรือทรงสี่เหลี่ยม	2-3
2.2 บล็อกโค้ง	2-3
2.3 ผลของอัตราส่วนดินต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่อกำลังอัด	2-4
2.4 ผลของปริมาณน้ำที่มีต่อการกระจายตัวของเม็ดดิน	2-5
2.5 เปรียบเทียบการกระจายตัวของเม็ดดิน	2-6
2.6 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ	2-6
2.7 ขั้นตอนในการผสมวัตถุดิบ	2-7
2.8 ขั้นตอนการนำดินที่ผสมแล้วเข้าเครื่องอัด	2-7
2.9 ลักษณะการฝั่งบล็อกประสานในร่ม	2-7
2.10 รูปร่างของ $C_3S$ ซึ่งเป็นผลึก 6 เหลี่ยม และ $C_2S$ เป็นเม็ดกลมสีดำ	2-12
2.11 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2-13
4.1 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าขานอ้อย	2-29
4.2 โครงสร้างผลึกของเถ้าขานอ้อย	2-30
4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของเถ้าขานอ้อย	2-30
4.4 โครงสร้างผลึกของดินลูกรัง	2-32
4.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินลูกรัง	2-32
4.6 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่แตกต่างกัน	2-34
4.7 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย	2-35
4.8 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสาน	2-37
4.9 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	2-38
4.10 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	2-39
4.11 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก	2-40
4.12 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก	2-41



สารบัญภาพ

โครงการย่อยที่ 2 การใช้ประโยชน์จากเถาขานอ้อยในการผลิตบล็อกประสาน  
(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของบล็อกประสานและปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อย	2-41
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งของบล็อกประสานและปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อย	2-43
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานและปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อย	2-45
4.16 โครงสร้างระดับจุลภาคของบล็อกประสานจากดินลูกรังที่อัตราส่วน 1:3 ที่อายุป่ม 28 วัน	2-50
4.17 โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุป่ม 28 วัน	2-51
4.18 ราคาต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานต่อก้อน	2-53
ก การทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลวของดินลูกรัง	ง2-6

## สารบัญภาพ

### โครงการย่อยที่ 3 สมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผา ร่วมกับเถ้าขานอ้อย

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต	3-5
2.2 การเตรียมกองวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	3-7
2.3 การนำกองวัตถุดิบเข้าเผาสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	3-7
2.4 แสดงกระบวนการผลิตโดยทั่วไปและขอบเขตระบบการผลิตซีเมนต์	3-7
2.5 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลัก	3-10
2.6 การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ	3-13
4.1 เถ้าขานอ้อย	3-21
4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของเถ้าขานอ้อยด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)	3-23
4.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเถ้าขานอ้อย	3-24
4.4 ผลการตรวจสอบรูปร่างผลึกของเถ้าขานอ้อยก่อนบด	3-25
4.5 แสดงลักษณะของสัณฐานหลักและเถ้าขานอ้อยก่อนผสม	3-26
4.6 สีของปูนเม็ดที่เผาพร้อมระหว่างเถ้าขานอ้อยร้อยละ 25 โดยน้ำหนักและวัตถุดิบหลักที่อุณหภูมิ 1,250°C	3-26
4.7 สีของปูนเม็ดที่เผาพร้อมระหว่างเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนักและวัตถุดิบหลักที่อุณหภูมิ 1,250°C	3-27
4.8 สีของปูนเม็ดที่เผาพร้อมระหว่างเถ้าขานอ้อยร้อยละ 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนักและวัตถุดิบหลักที่อุณหภูมิ 1,250°C	3-27
4.9 ภาพเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 350 เท่า	3-29
4.10 ภาพแสดงเฟสต่าง ๆ ของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานที่กำลังขยาย 8,000 เท่า	3-29
4.11 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาด้วยเครื่อง XRD โดยเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ	3-30
4.12 การวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD	3-32
4.13 การวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD	3-32

สารบัญภาพ

โครงการย่อยที่ 3 สมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผา  
ร่วมกับเถ้าขาน้อย (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 การวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD	3-33
4.15 การเปรียบเทียบโครงสร้างของปูนเม็ดที่เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยร้อยละ 2.5 และไม่เผาพร้อมกับอุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD	3-33
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าขาน้อยที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน	3-35
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่อัตราส่วนแตกต่างกัน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน	3-36
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่อัตราส่วนแตกต่างกัน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่มที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน	3-37
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่อัตราส่วนแตกต่างกัน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่มที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน	3-38
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ แตกต่างกัน ด้วยกระบวนการเผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่อัตราส่วนแตกต่างกัน	3-39
4.21 การวิเคราะห์สารประกอบซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่ได้เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 1,250 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่ม 25 วัน	3-40
4.22 การวิเคราะห์สารประกอบซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่สัดส่วนแตกต่างกันโดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน	3-41
4.23 การวิเคราะห์สารประกอบซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่สัดส่วนแตกต่างกันโดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน	3-42

สารบัญภาพ

โครงการย่อยที่ 3 สมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผา  
ร่วมกับเถ้าขาน้อย (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.24 การวิเคราะห์สารประกอบซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่ สัดส่วนแตกต่างกันโดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน	3-43
4.25 ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขาน้อยร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ที่ ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน	3-44

**แผนโครงการการใช้ประโยชน์จากถ้ำชานอ้อย  
ในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง**

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยมีพื้นที่ในการปลูกอ้อยเป็นอันดับสามของโลก ซึ่งอ้อยส่วนใหญ่จะถูกนำมาผลิตน้ำตาล โดยประเทศไทยมีโรงงานน้ำตาลอยู่ทั่วประเทศถึง 47 โรงงาน ซึ่งตั้งอยู่ในภาคกลางประมาณ 17 โรงงาน จึงทำให้เกิดขานอ้อยในปริมาณ 15 ล้านตันต่อปี ทั้งนี้แต่ละโรงงานได้มีการนำขานอ้อยที่ได้มาเป็นเชื้อเพลิงภายในโรงงาน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกประมาณ 0.4 ล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ซึ่งทำให้มีก๊าซเรือนกระจกเป็นกากของเสียจำนวนมาก ก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้เกิดจากขานอ้อยส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ซึ่งมีสมบัติเป็นสารอินทรีย์ มีอนุภาคขนาดเล็ก น้ำหนักเบา จึงถูกลมพัดพาหลุดออกจากเตาเผาและถูกดักจับไว้ด้วยถุงกรองฝุ่นเพื่อไม่ให้ก๊าซเหล่านี้หลุดลอยออกสู่บรรยากาศ ก๊าซขนาดเล็กเหล่านี้จึงมักถูกเรียกว่าก๊าซลอย ซึ่งอาจมีสีดำ เทา หรือขาวปนเทาก็ได้แล้วแต่สภาวะในการเผาไหม้ เช่น อุณหภูมิของเตาเผา ระยะเวลาในการเผา และปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าเตาเผา เป็นต้น

การจัดการก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่ของโรงงานจะเป็นการกอบถ่านกว้าง หรือทิ้งลงในหลุมหรือบางโรงงานอาจจะมีเกษตรกรมารับไปปรับสภาพพื้นดินในการเพาะปลูก แต่ปริมาณการนำไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบันยังมีไม่มากนัก จึงทำให้เกิดปัญหาในการกอบเก็บ เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกมีความหนาแน่นต่ำ และมีน้ำหนักเบาสามารถปลิวไปได้ไกลทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่อชุมชนรอบโรงงาน โดยเฉพาะมลพิษทางอากาศ ซึ่งจะก่อความรำคาญและเป็นผลเสียต่อสุขภาพของพนักงานในโรงงาน และคนในชุมชนรอบโรงงาน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความสกปรกไม่น่าดู เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้มีสีดำ

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ได้มีการนำก๊าซเรือนกระจกมาใช้เป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนในงานคอนกรีตหรือทำซิลิกาเจล เนื่องจากจากสมบัติทางเคมีของก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณของอะลูมินา ซิลิกาและเหล็กออกไซด์ประมาณร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก โดยในงานด้านวิศวกรรมโยธา และสิ่งแวดล้อมก๊าซเรือนกระจกถูกนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์ ในการผลิตคอนกรีต คอนกรีตบล็อก อิฐมวลเบา แผ่นผนังเบา เป็นต้น นอกจากนี้ก๊าซเรือนกระจกยังสามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับ เช่น ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ เป็นต้น แต่เนื่องจากการนำขานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงภายในโรงงานมีกระบวนการเผาไหม้ สภาวะในการเผา และระยะเวลาในการเผาที่แตกต่างกัน ทำให้ก๊าซเรือนกระจกของแต่ละโรงงานมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นอุปสรรคในการนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นแผนงานวิจัยนี้มีแนวทางการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการนำขานอ้อยมาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มมาใช้ในการผลิตวัสดุก่อสร้างเช่น คอนกรีตมวลเบา บล็อกประสาน และนำมาใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตปูนซีเมนต์

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมกับงานด้านวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง

- 2) นำเสนอองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในงานวิชาการต่างๆ เพื่อนำไปต่อยอดหรือประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมวัสดุ

### 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ในการดำเนินงานแผนงานวิจัยได้มีการเชิญตัวแทนบริษัทที่สามารถนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้มาเป็นที่ปรึกษาในแผนงานวิจัย และในโครงการย่อย โดยจะเข้ามาร่วมในการดำเนินการจัดทำแผนงานวิจัย และติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการรวมถึงให้ข้อเสนอแนะในการดำเนินการ นอกจากนี้ในการสร้างองค์ความรู้สู่ผู้ประกอบการ ในแผนงานวิจัยได้มีการตั้งเป้าหมายในปีที่สองให้มีการผนวกองค์ความรู้จากโครงการวิจัยย่อย มาทำการถ่ายทอดให้กับผู้ที่จะสามารถนำองค์ความรู้ดังกล่าวไปใช้ในงานต่างๆ ได้ ตั้งแต่บริษัทที่ผลิตเก้าชานอ้อย บริษัทด้านวัสดุก่อสร้าง SME ขนาดกลางและเล็ก รวมถึงผู้ที่มีความสนใจในการจะประกอบธุรกิจดังกล่าวสามารถมาแลกเปลี่ยนเรียนรู้ แสดงความคิดเห็นในการพัฒนางานวิจัยให้ต่อยอดสู่ผู้ใช้งานจริงได้

## บทที่ 2

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของแผนงานวิจัยจะเป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าขานอ้อยดำจากแหล่งต่างๆกันและที่มีอายุการเก็บต่างกัน โดยในแผนงานวิจัยนี้ได้มีการเก็บตัวอย่างเถ้าขานอ้อยจาก 4 แหล่ง ได้แก่ บริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด บริษัท อุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด(มหาชน) และ บริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด ซึ่งแต่ละแหล่งที่ไปเก็บตัวอย่างเถ้าขานอ้อยมีรูปแบบการเผาขานอ้อยในเตาเผาที่ต่างกัน ระยะเวลาในการเผาต่างกัน รวมทั้งอุณหภูมิของเตาเผาที่ต่างกันด้วย จึงสนใจในการเก็บตัวอย่างมาทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

#### 2.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเถ้าขานอ้อย

ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ เหนือสีของเถ้าขานอ้อยโดยทำการเปรียบเทียบกับแถบวัดสี การกระจายขนาดของเถ้าขานอ้อย

#### 2.2 การศึกษาสมบัติทางกายเคมีของเถ้าขานอ้อย

เนื่องจากแผนงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยโครงการย่อย 3 โครงการ โดยแผนงานวิจัยนี้เห็นถึงการใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อย เนื่องจากปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการการนำขานอ้อยไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และเป็นเชื้อเพลิงภายในโรงงานที่จะมีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีการกระจายอยู่ในหลายภูมิภาค โดยโครงการวิจัย 2 โครงการ เป็นการนำเถ้าขานอ้อยมาใช้แทนทรายและปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา และบล็อกประสาน ส่วนอีก 1 โครงการ เป็นการนำเถ้าขานอ้อยมาใช้แทนวัสดุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยทั้ง 3 โครงการวิจัยเป็นการสร้างองค์ความรู้ เพื่อจะนำองค์ความรู้มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเถ้าขานอ้อย



## บทที่ 3

## ผลการศึกษาและอภิปรายผล

## 3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของเถ้าชานอ้อย

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเถ้าชานอ้อย พบว่า เถ้าชานอ้อยส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการนำชานอ้อยที่เหลือจากการผลิตน้ำตาลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งแต่ละโรงงานจะมีเทคโนโลยีในการเผาที่ไม่เหมือนกัน ทำให้สมบัติของเถ้าชานอ้อยมีความแตกต่างกันออกไป ซึ่งในการเผาจะมีตัวแปรหลายตัว ได้แก่ ปริมาณออกซิเจน ความชื้นของชานอ้อย เทคโนโลยีของหม้อต้มไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งในแผนงานวิจัยนี้ได้มีการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับเถ้าชานอ้อยจากแต่ละแหล่งซึ่งทางแผนงานวิจัยได้ติดต่อไป 4 แหล่ง ได้แก่ บริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด บริษัท อุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด(มหาชน) และ บริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด โดยกระบวนการเผาชานอ้อยของแต่ละที่มีรายละเอียด ดังนี้

## 1) บริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด

เถ้าชานอ้อยจากบริษัทน้ำตาลราชบุรี เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาชานอ้อยในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ โดยระบบ Fluidized bed โดยโปรยชานอ้อยจากด้านบน อุณหภูมิในการเผาประมาณ 350-400 องศาเซลเซียส ทำการเผาแต่ละรอบใช้เวลาประมาณ 5 นาที ทั้งนี้ในกระบวนการเผากากอ้อยของโรงงานนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานความร้อนสำหรับการต้มน้ำให้เปลี่ยนเป็นไอน้ำ และนำไอน้ำที่ได้ไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า เถ้าชานอ้อยที่เหลือจากการเผาไหม้จะถูกนำมากองเก็บในบ่อเถ้า ซึ่งอยู่ห่างจากโรงงานประมาณ 200 เมตร ซึ่งเป็นบ่อดิน เปิดไม่มีหลังคา โดยเถ้าชานอ้อยที่ทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นเถ้าใหม่ที่มีอายุประมาณ 3-4 เดือน ในส่วนของเถ้าเก่าไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ เนื่องจากทางบริษัทไม่มีเถ้าเก่าตกค้างให้ทำการศึกษา ดังนั้นในส่วนของบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด จะมีผลการศึกษาเฉพาะเถ้าใหม่เท่านั้น โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิค XRF วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD และปริมาณสารอินทรีย์สะสมหรือค่า LOI จากการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยจากบริษัทน้ำตาลราชบุรี พบว่าองค์ประกอบหลัก ได้แก่  $\text{SiO}_2$   $\text{CaO}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยมีร้อยละ 68.60, 7.85 และ 3.97 ตามลำดับ ซึ่งจากองค์ประกอบดังกล่าวพบว่า  $\text{SiO}_2$  มีปริมาณสูงสุด และเมื่อพิจารณาค่า LOI หรือค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา พบว่ามีค่าเท่ากับ 5.22 ซึ่งนับว่าสูงหากเปรียบเทียบกับวัสดุปอซโซลานประเภทอื่น โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยจากบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด

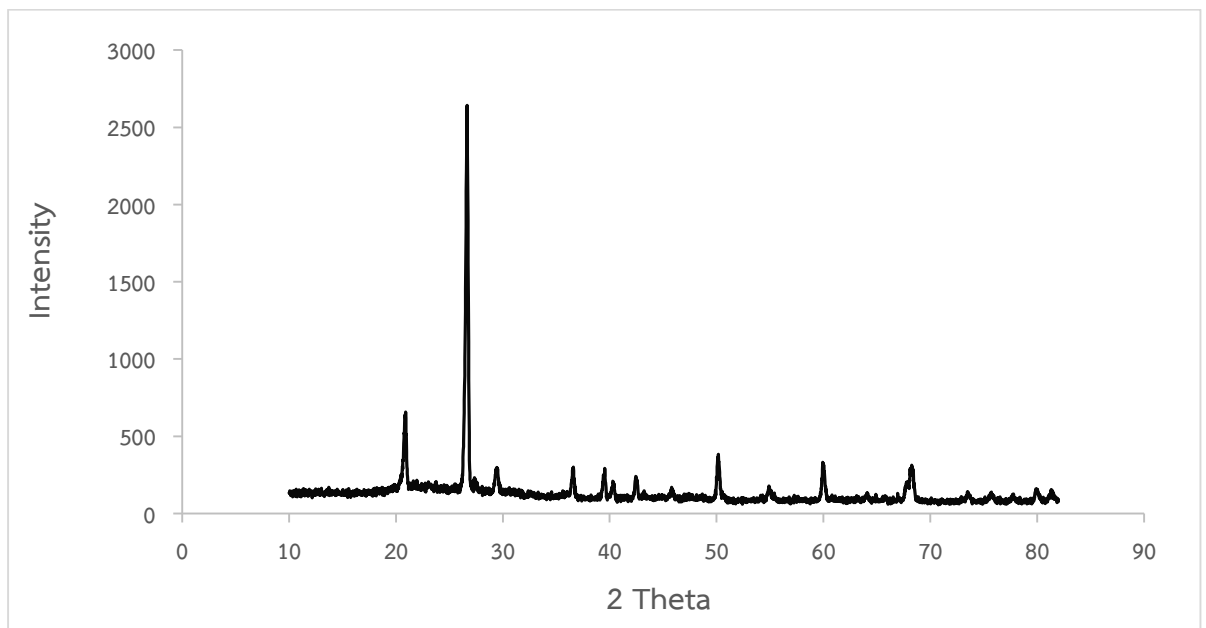
องค์ประกอบ	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Cl	$\text{P}_2\text{O}_5$	MgO	$\text{TiO}_2$	MnO	$\text{SO}_3$	LOI
ร้อยละโดยน้ำหนัก	68.60	1.07	3.92	3.97	7.85	3.16	0.95	1.71	1.69	0.27	0.14	1.44	5.22

ในส่วนของคุณลักษณะของกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตา ได้แก่ สีของตัวอย่างพบว่าเถ้าขาน้อยใหม่ของบริษัทน้ำตาลราชบุรี มีลักษณะสีดำเข้มแสดงดังภาพที่ 3.1 ซึ่งสีดำที่ปรากฏนั้นคาดว่าเกิดจากการบดผสมที่เกิดจากกระบวนการเผาเถ้าขาน้อย โดยผลที่สังเกตได้จากสีสอดคล้องกับผลการทดสอบค่า LOI ที่แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์สะสมมีค่าประมาณ 5.22



ภาพที่ 3.1 สีของเถ้าขาน้อยจากบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด

นอกจากนั้นทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของเถ้าขาน้อยใหม่จากบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด เพื่อศึกษาแนวโน้มในการทำปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างมีลักษณะเป็นพีคแหลมซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นผลึกสัณฐาน มีแนวโน้มในการทำปฏิกิริยาได้ต่ำ จำเป็นต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้ในงานที่ต้องการความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยแสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างผลึกของเถ้าขาน้อยใหม่จากบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด

**2) บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)**

เถ้าชานอ้อยจากบริษัทเกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาชานอ้อยในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ โดยชานอ้อยเคลื่อนตัวอยู่บน travelling grate ในห้องเผาไหม้ ที่มีอุณหภูมิในการเผาประมาณ 700 - 900 องศาเซลเซียส ทำการเผาแต่ละรอบใช้เวลาประมาณ 3 นาที ทั้งนี้ในกระบวนการเผากากอ้อยของโรงงานนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานความร้อนสำหรับการต้มน้ำให้เปลี่ยนเป็นไอน้ำ โดยนำมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล และผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าชานอ้อยที่ผ่านการเผานั้นจะถูกนำมากองทิ้งในลานโล่งแจ้ง และจะมีการขนย้ายไปทำปุ๋ยต่อไป โดยเถ้าชานอ้อยที่ทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นเถ้าใหม่ที่มีอายุประมาณ 1 วัน และเถ้าเก่าอายุประมาณ 2 ปี เนื่องจากทางบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) มีกองเถ้าเก่าที่สามารถนำมาศึกษาได้ จึงได้นำเถ้าเก่าและเถ้าใหม่มาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี สี และลักษณะทางโครงสร้างผลึก

**ตารางที่ 3.2** องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยจากบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

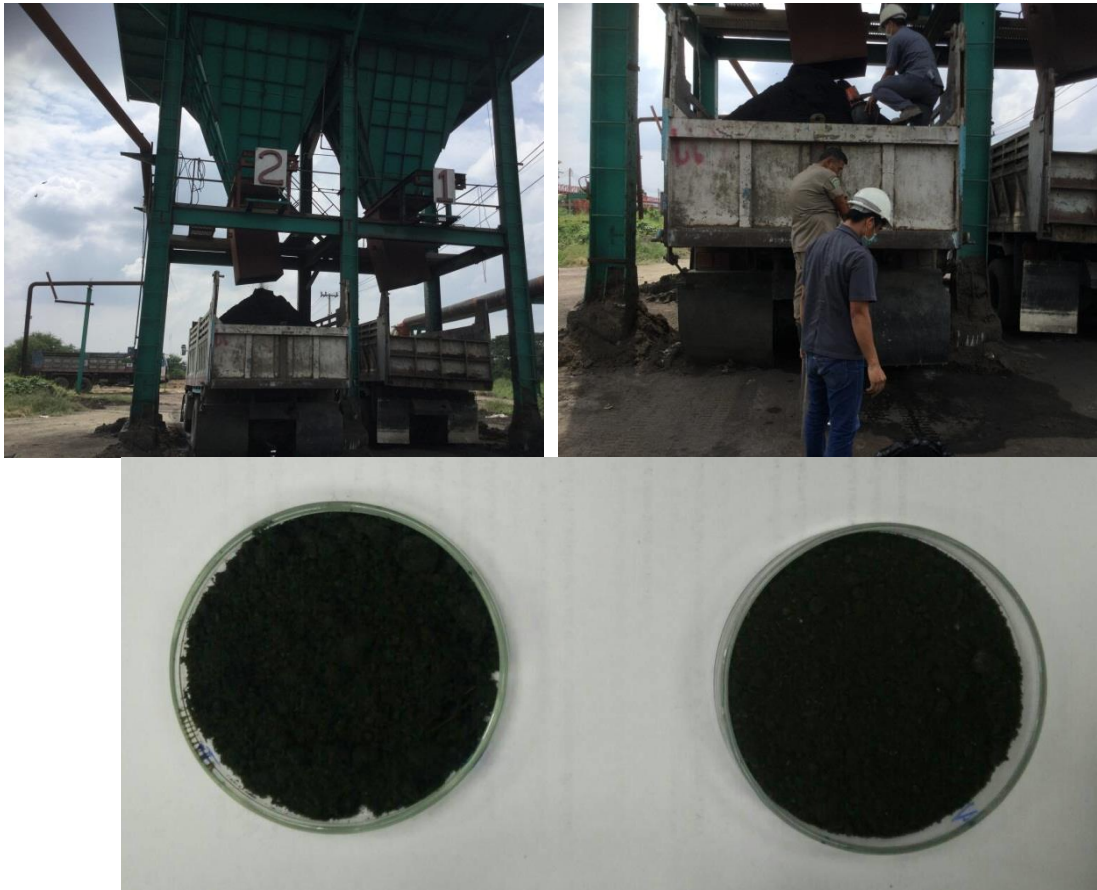
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	เถ้าชานอ้อยใหม่อายุ 1 วัน	เถ้าชานอ้อยเก่าอายุประมาณ 2 ปี
SiO <sub>2</sub>	62.2	67.8
Na <sub>2</sub> O	0.545	0.53
K <sub>2</sub> O	3.70	2.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.32	10.1
CaO	10.6	8.87
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.39	5.73
Cl	0.76	0.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.36	1.11
MgO	1.80	1.30
TiO <sub>2</sub>	0.84	0.84
MnO	0.4	0.30
SO <sub>3</sub>	0.97	0.41
LOI	4.62	5.68

ข้อมูล ณ วันที่ 7/11/59

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยเก่าและใหม่ของบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) พบว่าองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับเถ้าชานอ้อยของบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด ได้แก่ SiO<sub>2</sub> CaO และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยเถ้าชานอ้อยใหม่มีองค์ประกอบดังกล่าวร้อยละ 62.2, 10.6 และ 9.32 และเถ้าชานอ้อยเก่ามีองค์ประกอบดังกล่าวร้อยละ 67.8, 8.87 และ 10.1 ตามลำดับ ซึ่งจากองค์ประกอบดังกล่าวพบว่าทั้งเถ้าชานอ้อยใหม่และเก่ามีปริมาณ SiO<sub>2</sub>

เป็นองค์ประกอบสูงสุด และเมื่อพิจารณาค่า LOI หรือค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา พบว่า เถ้าขาน้อยใหม่และเก่ามีค่าเท่ากับ 4.62 และ 5.68 โดยเถ้าใหม่มีปริมาณค่า LOI น้อยกว่า โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.2

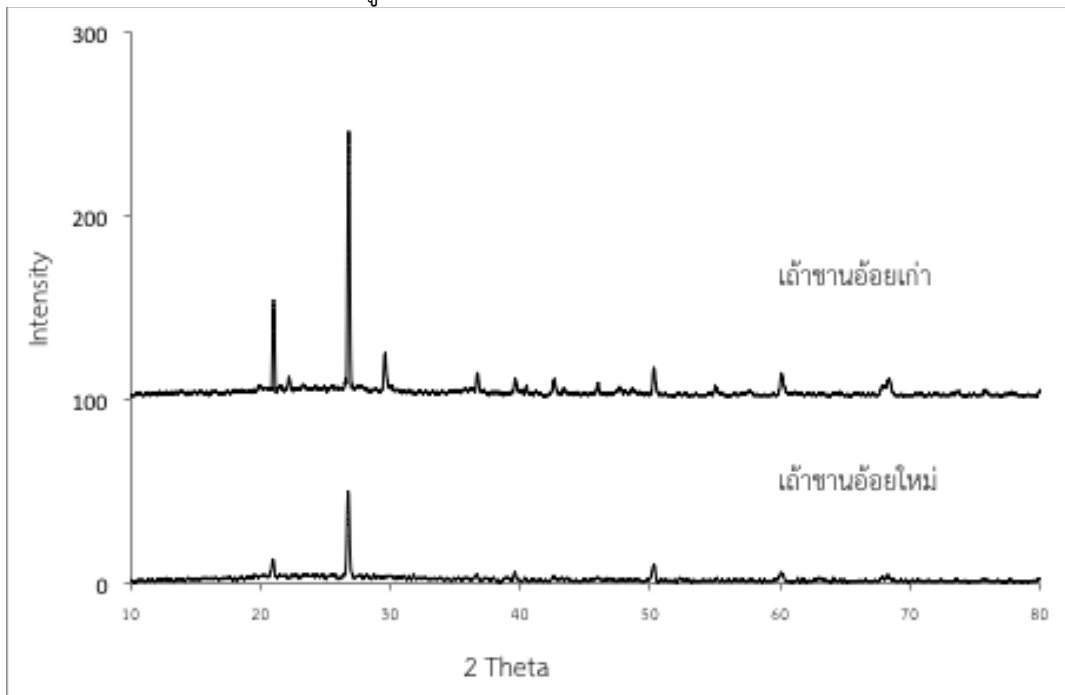
ในส่วนของคุณสมบัติของกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตา ได้แก่ สีของตัวอย่างทางคณะผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างสีของเถ้าใหม่อายุ 1 วัน และสีของเถ้าเก่าอายุประมาณ 2 ปีพบว่าสีที่แตกต่างกัน โดยสีของเถ้าขาน้อยใหม่ของบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) มีลักษณะสีดำเข้มกว่าเถ้าขาน้อยเก่าซึ่งมีสีดำออกเทาแสดงดังภาพที่ 3.3 และ 3.4



ภาพที่ 3.3 สถานที่เก็บ และสีของเถ้าขาน้อยใหม่อายุ 1 วัน ของบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)



ภาพที่ 3.4 สถานที่เก็บและ สีของเถ้าขาน้อยเก่าอายุ 2 ปีของบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างผลึกของเถ้าขาน้อยใหม่และเถ้าขาน้อยเก่าจากบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)

นอกจากนั้นทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของเถ้าขานอ้อยทั้งใหม่และเก่าของบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ซุการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) เพื่อศึกษาแนวโน้มในการทำปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งเถ้าขานอ้อยใหม่และเถ้าขานอ้อยเก่ามีโครงสร้างผลึกลักษณะเป็นพีคแหลมซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นผลึกสัณฐาน มีแนวโน้มในการทำปฏิกิริยาได้ต่ำ จำเป็นต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้ในงานที่ต้องการความไวในการทำปฏิกิริยา โดยหากเปรียบเทียบความเป็นผลึกสัณฐานของเถ้าทั้ง 2 ประเภทพบว่าเถ้าขานอ้อยเก่ามีความเป็นสัณฐานมากกว่าโดยแสดงดังภาพที่ 3.5

### 3) บริษัท อุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด

เถ้าขานอ้อยจากบริษัทเกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ซุการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาขานอ้อยในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ โดยระบบ Fluidized bed โดยโปรยขานอ้อยจากด้านบน อุณหภูมิในการเผาประมาณ 350-500 องศาเซลเซียส ทำการเผาแต่ละรอบใช้เวลาประมาณ 3 นาที ทั้งนี้ในกระบวนการเผากากอ้อยของโรงงานนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานความร้อนสำหรับการต้มน้ำให้เปลี่ยนเป็นไอน้ำ และนำไอน้ำที่ได้ไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าขานอ้อยที่เหลือจากการเผามอบให้เกษตรกรไปใช้ในการเกษตรต่อไป เถ้าขานอ้อยของบริษัท อุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด ที่ทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นเถ้าใหม่ที่มีอายุประมาณ 5-6 เดือน เช่นเดียวกับเถ้าขานอ้อยจากบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด ในส่วนของเถ้าเก่าไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ เนื่องจากทางบริษัทไม่มีเถ้าเก่าตกค้างให้ทำการศึกษา ดังนั้นในส่วนของบริษัท อุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด จะมีผลการศึกษาเฉพาะเถ้าใหม่เท่านั้น โดยในส่วนของเถ้าขานอ้อยใหม่ที่ได้รับจากบริษัททางคณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าขานอ้อยด้วยเทคนิค XRF วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD และปริมาณสารอินทรีย์สะสมหรือค่า LOI เช่นเดียวกับเถ้าที่ได้รับมาจาก 2 บริษัทข้างต้น จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด พบว่าองค์ประกอบหลัก ได้แก่  $\text{SiO}_2$   $\text{CaO}$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$   $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยมีร้อยละ 63.9, 9.32, 5.38, 4.22 และ 3.93 ตามลำดับ ซึ่งจากองค์ประกอบดังกล่าวพบว่า  $\text{SiO}_2$  มีปริมาณสูงสุด และเมื่อพิจารณาค่า LOI หรือค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา พบว่ามีค่าเท่ากับ 4.65 โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด

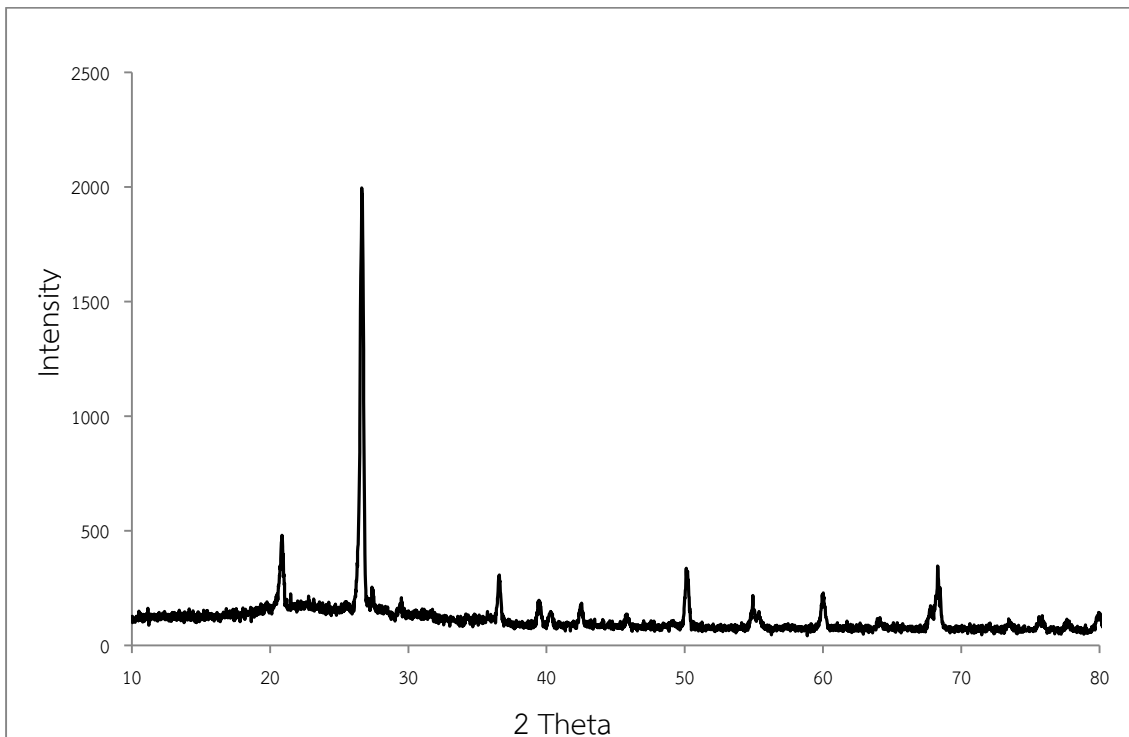
องค์ประกอบ	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>	LOI
ร้อยละ	63.9	2.77	4.2	3.93	9.3	5.38	1.5	1.5	1.9	0.2	0.14	1.1	4.6
โดยน้ำหนัก	9		2		2		4	4	3	7		1	5

ในส่วนของลักษณะของกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตา ได้แก่ สีของตัวอย่างพบว่าเถ้าขานอ้อยใหม่ของบริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด มีลักษณะสีดำเข้มแสดงดังภาพที่ 3.6 ซึ่งสีดำที่ปรากฏนั้นคาดว่าเป็นคาร์บอนสะสมที่เกิดจากกระบวนการเผากากอ้อย โดยผลที่สังเกตได้จากสีสอดคล้องกับผลการทดสอบค่า LOI ที่แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์สะสมโดยมีค่าประมาณ 4.65



ภาพที่ 3.6 สีของเถ้าขานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด

นอกจากนั้นทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของเถ้าขานอ้อยใหม่จากบริษัท อุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด เพื่อศึกษาแนวโน้มในการทำปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์พบว่า โครงสร้างมีลักษณะเป็นพีคแหลมซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นผลึกสัณฐาน มีแนวโน้มในการทำปฏิกิริยาได้ ต่ำ จำเป็นต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้ในงานที่ต้องการความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยแสดงดังภาพ ที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 โครงสร้างผลึกของเถ้าขานอ้อยใหม่จากบริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด

#### 4) บริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด

เถ้าขานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาขานอ้อยใน ห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ โดยระบบ Fixed bed โดยโปรยขานอ้อยจากด้านบน อุณหภูมิในการเผา ประมาณ 1000-1,500 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ในกระบวนการเผาขานอ้อยของโรงงานนี้ มีวัตถุประสงค์

เพื่อใช้พลังงานความร้อนสำหรับการต้มน้ำให้เปลี่ยนเป็นไอน้ำ และนำไอน้ำที่ได้ไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยเถ้าขานอ้อยที่เหลือจากการเผาไหม้จะถูกสะสมไว้ที่ไซโลเก็บเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อน หลังจากนั้นพอลเถ้าขานอ้อยเต็มไซโลแล้วจะถูกเป่าให้ตกตะกอนและถูกนำมากองเก็บในบ่อเถ้า ซึ่งเป็นบ่อดินเปิดไม่มีหลังคา เถ้าขานอ้อยของบริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด ที่ทางคณะวิจัยได้ทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นเถ้าเถ้าที่หีบลงไปเรื่อยๆ ที่มีอายุโดยประมาณ 5-6 เดือน

โดยในส่วนของเถ้าขานอ้อยที่ได้รับจากบริษัททางคณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าขานอ้อยด้วยเทคนิค XRF วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD และปริมาณสารอินทรีย์สะสมหรือค่า LOI เช่นเดียวกับเถ้าที่ได้รับมาจาก 3 บริษัทข้างต้น จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด จากตารางที่ 3.4 พบว่าองค์ประกอบหลัก ได้แก่  $\text{SiO}_2$   $\text{CaO}$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$   $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยมีร้อยละ 57.8, 2.91, 1.81, 2.37 และ 3.28 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด

องค์ประกอบ	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Cl	$\text{P}_2\text{O}_5$	MgO	$\text{TiO}_2$	MnO	$\text{SO}_3$	LOI
ร้อยละโดยน้ำหนัก	57.80	0.245	2.37	3.28	2.91	1.81	0.145	1.05	1.40	0.194	-	1.47	4.78

ในส่วนของคุณสมบัติของกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตา ได้แก่ สีของตัวอย่างพบว่าเถ้าขานอ้อยของบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ มีลักษณะเป็น ผงสีเทาเข้มจนถึงดำและมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ซิลิกาในปริมาณสูง สีดำแสดงถึงภาพที่ 3.8 ซึ่งสีดำที่ปรากฏนั้นคาดว่าเป็นคาร์บอนสะสมที่เกิดจากกระบวนการเผาเถ้าขานอ้อย โดยผลที่สังเกตได้จากสีสอดคล้องกับผลการทดสอบค่า LOI ที่แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์สะสมโดยมีค่าประมาณ 4.78

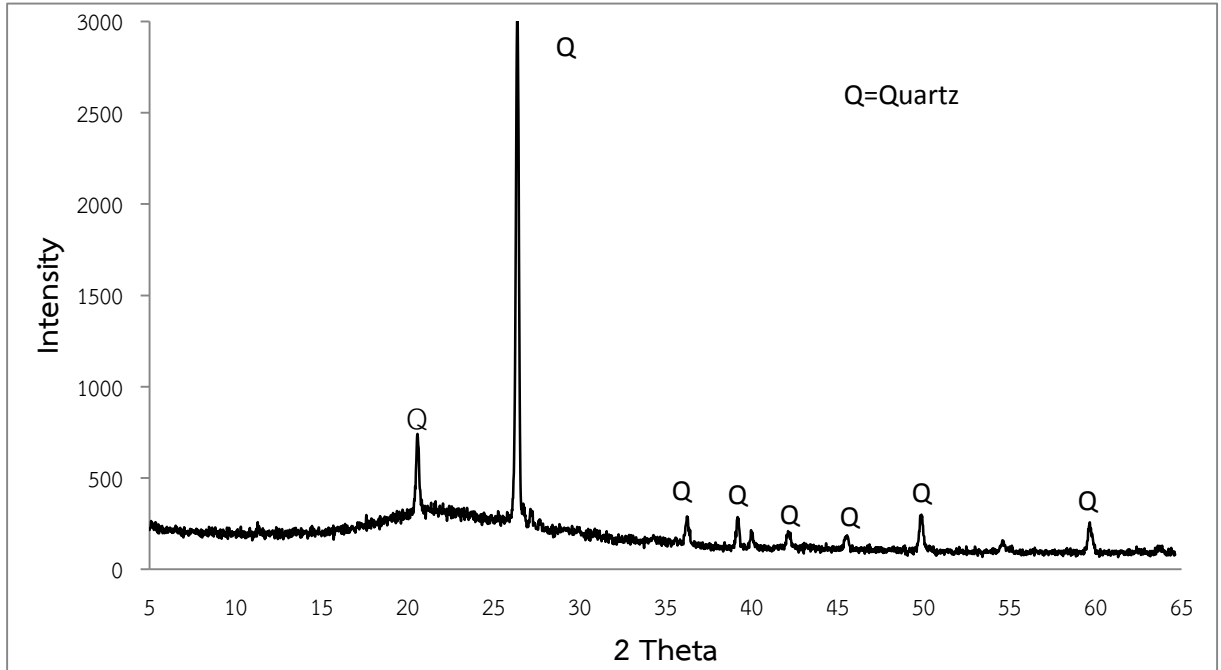


ภาพที่ 3.8 สีของเถ้าขานอ้อยจากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด

นอกจากนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของเถ้าขานอ้อยใหม่จากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด เพื่อศึกษาแนวโน้มในการทำปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์



โครงสร้างพบว่าเถ้าขาน้อยมีโครงสร้างผลึกของ  $\text{SiO}_2$  มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกแบบ Quartz ซึ่งบ่งบอกถึงความเป็นผลึกสัญญาณ เพราะมีลักษณะของพีคแหลม จึงมีแนวโน้มในการทำปฏิกิริยาได้ต่ำ จำเป็นต้องปรับปรุงก่อนนำไปใช้ในงานที่ต้องการเพื่อเพิ่มความไวในการทำปฏิกิริยา โดยแสดงดังภาพที่ 3.9

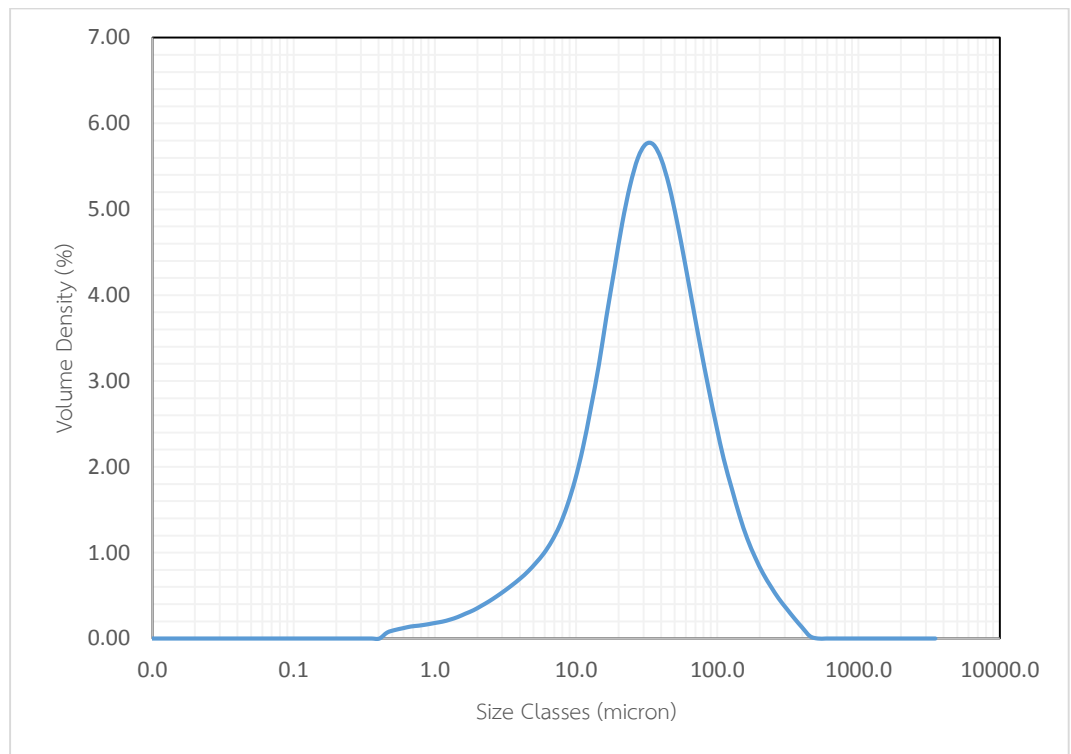


ภาพที่ 3.9 โครงสร้างผลึกของเถ้าขาน้อย จากบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด

นอกจากนี้ยังมีการนำเถ้าขาน้อยไปทำการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดของเถ้าขาน้อยที่ แสดงดังตารางที่ 3.4 และ ภาพที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าจากตารางที่ 3.4 พบว่าค่าเปอร์เซนไทล์ที่ 50 ( $P_{50}$ ) มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 34.20  $\mu\text{m}$  และสังเกตจากลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเถ้าขาน้อยนั้นมีลักษณะการกระจายตัวค่อนข้างแคบส่งผลให้ขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ของเถ้าขาน้อยมีขนาดเล็ก ซึ่งขนาดอนุภาคของเถ้าขาน้อยซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานในการเพิ่มความแข็งแรงเพราะอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากันมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้ค่า Packing density มากและชิ้นงานมีความแข็งแรง เพิ่มขึ้น [1]

ตารางที่ 3.5 สมบัติทางกายภาพของเถ้าขาน้อยของบริษัทอุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด

ขนาดของอนุภาค	เถ้าขาน้อย
$P_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	8.25
$P_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	34.20
$P_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	111.00



ภาพที่ 3.10 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าขานอ้อยจากบริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาล บ้านไร่ จำกัด

จากการศึกษาเถ้าขานอ้อยทั้ง 4 แหล่ง โดยการได้รับการอนุเคราะห์ตัวอย่างสำหรับการศึกษา พบว่าเถ้าขานอ้อยทุกแหล่งมีปริมาณซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบหลัก ไม่ว่าจะเป็นเถ้าขานอ้อยใหม่หรือเถ้าขานอ้อยเก่า ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 55-69 โดยน้ำหนัก โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยแต่ละแหล่ง

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก				
	บริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด	บริษัท อุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด	บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)		บริษัท อุตสาหกรรมบ้านไร่ น้ำตาล
	เถ้าขานอ้อยใหม่ อายุประมาณ 3-4 เดือน	เถ้าขานอ้อยใหม่ อายุประมาณ 3-4 เดือน	เถ้าขานอ้อยใหม่ อายุ 1 วัน	เถ้าขานอ้อยเก่า อายุประมาณ 2 ปี	เถ้าขานอ้อยเก่าอายุประมาณ 5-6 เดือน
SiO <sub>2</sub>	68.60	63.9	62.2	67.8	57.8

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก				
	บริษัท น้ำตาล ราชบุรี จำกัด	บริษัท อุตสาหกรรม มิตรเกษตร จำกัด	บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์ เนชั่นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)		บริษัท อุตสาหกรรม บ้านไร่ น้ำตาล
	เถ้าขาน้อย ใหม่ อายุ ประมาณ 3-4 เดือน	เถ้าขาน้อย ใหม่ อายุ ประมาณ 3-4 เดือน	เถ้าขาน้อย ใหม่ อายุ 1 วัน	เถ้าขาน้อย เก่า อายุประมาณ 2 ปี	เถ้าขาน้อย เก่าอายุ ประมาณ 5-6 เดือน
Na <sub>2</sub> O	1.07	2.77	0.545	0.53	0.245
K <sub>2</sub> O	3.92	4.22	3.70	2.58	2.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97	3.93	9.32	10.1	3.28
CaO	7.85	9.32	10.6	8.87	2.91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	5.38	7.39	5.73	1.81
Cl	0.95	0.83	0.76	0.17	0.145
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.71	1.54	1.36	1.11	1.05
MgO	1.69	1.93	1.80	1.30	1.40
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.27	0.84	0.84	0.194
MnO	0.14	0.14	0.4	0.30	-
SO <sub>3</sub>	1.44	1.11	0.97	0.41	1.47
LOI	5.22	4.65	4.62	5.68	4.78

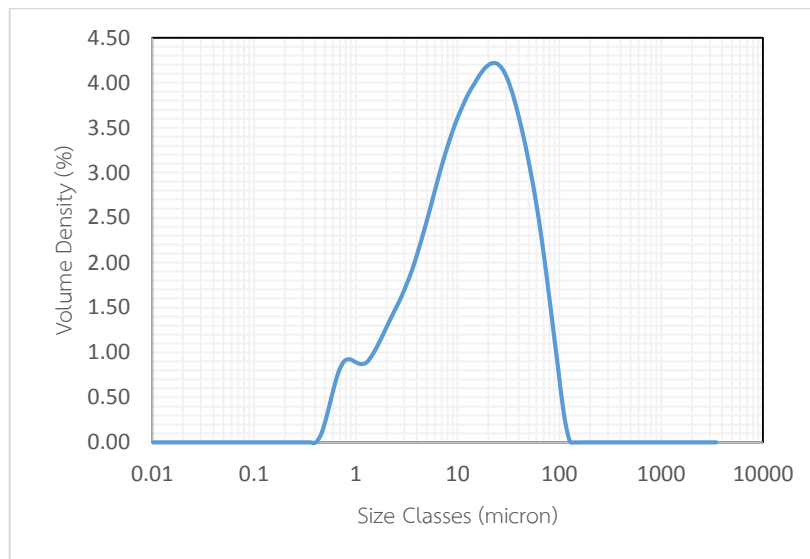
เมื่อพิจารณาลักษณะของสีพบว่าเถ้าขาน้อยใหม่ของแต่ละแหล่งมีสีดำเข้ม ในส่วนของเถ้าขาน้อยเก่าอายุประมาณ 2 ปี ของบริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) มีสีดำน้อย อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าขาน้อยทั้งเก่าและใหม่ ของทุกแหล่งพบว่า มีลักษณะเป็นสัณฐานเหมือนกันทุกแหล่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาศักยภาพของเถ้าขาน้อยเพื่อนำมาศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมก่อสร้างโดยใช้ องค์ประกอบของซิลิกา และค่า LOI เป็นหลัก ซึ่งพบว่าปริมาณซิลิกาของเถ้าขาน้อยจากบริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด มีค่าสูงสุด ทางผู้วิจัยจึงทำการเลือกเถ้าขาน้อยจากแหล่งนี้ในงานวิจัยตลอดโครงการ

เถ้าขาน้อยจากบริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะนำมาใช้อยู่ 2 ลักษณะ คือ เถ้าขาน้อยที่ไม่ผ่านการบด จะนำมาใช้ในโครงการวิจัยย่อยที่ 2 และส่วนเถ้าขาน้อยที่ผ่านการบดจะนำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อนำมาผลิตคอนกรีตมวลเบา และนำมาใช้ในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ โดยจะทำการบดเถ้าขาน้อยให้มีร้อยละคงค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C618 ค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าขาน้อยทั้งสองชนิด แสดงดังตารางที่ 3.6

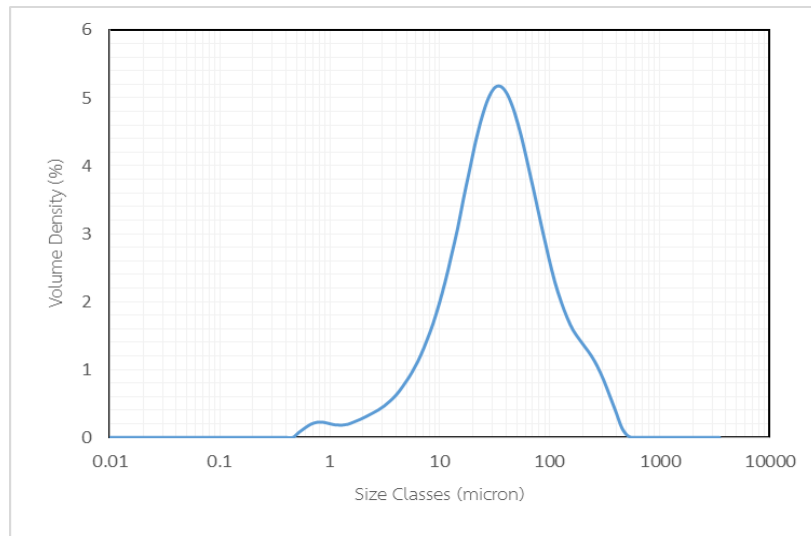
ตารางที่ 3.7 สมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อยที่บด และไม่ผ่านการบดของบริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด

พารามิเตอร์	Ground Bagasse Ash (GBA)	As-received Bagasse Ash (ABA)
Specific gravity	2.35	1.56
Specific Area (m <sup>2</sup> /g)	3.208	1.479

นอกจากนี้ยังมีการนำเถ้าชานอ้อยไปทำการวิเคราะห์หาการกระจายของขนาดของเถ้าชานอ้อยที่ผ่าน และไม่ผ่านการบด แสดงดังภาพที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการบดจะมีปริมาณอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าเถ้าชานอ้อยที่ไม่ผ่านการบด และเมื่อนำมาทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่า โครงสร้างผลึกของเถ้าชานอ้อยส่วนใหญ่มีความเป็นผลึกสูง แต่มีบางส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งโครงสร้างผลึกที่พบคือ ผลึกของซิลิกา ส่วนโครงสร้างระดับจุลภาคของเถ้าชานอ้อย จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมไม่แน่นอน และเมื่อเพิ่มกำลังขยายพบว่า เถ้าชานอ้อยมีความพรุนเนื่องมาจากกระบวนการเผาที่กำจัดสารอินทรีย์ระเหยได้ออกไป ทำให้เกิดช่องว่างที่เถ้าชานอ้อย

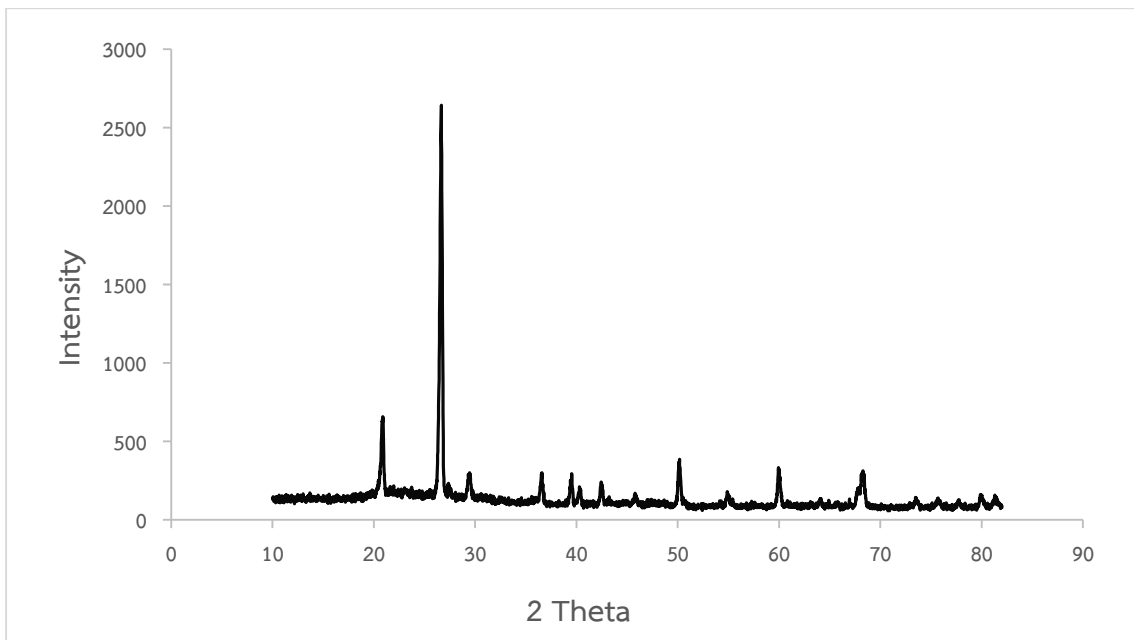


ก) เถ้าชานอ้อยบด

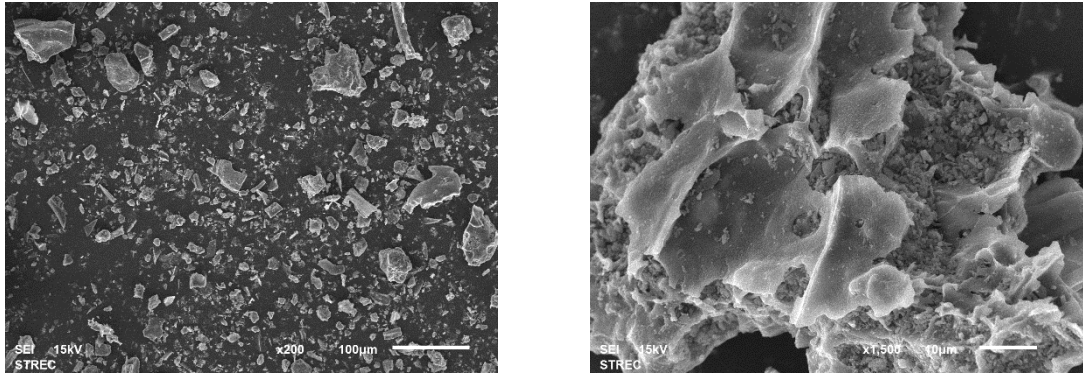


ข) เถ้าชานอ้อยไม่บด

ภาพที่ 3.11 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อย ก) เถ้าชานอ้อยบด และ ข) เถ้าชานอ้อยไม่บด



ภาพที่ 3.12 โครงสร้างผลึกของเถ้าชานอ้อย



ภาพที่ 3.13 โครงสร้างระดับจุลภาคของเถ้าชานอ้อย

### 3.2 เงื่อนไขในการเลือกใช้เถ้าชานอ้อย

จากข้อมูลเบื้องต้นที่ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมจากโรงงานน้ำตาลทั้ง 4 แห่ง ได้แก่ บริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด, บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ซูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน), บริษัทอุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด และ บริษัท อุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่ จำกัด เมื่อนำข้อมูลมาทำการพิจารณาในการนำไปใช้ในการผลิต คอนกรีตมวลเบา บล็อกประสาน และ ปูนซีเมนต์ โดยมีการใช้เถ้าชานอ้อยที่เหลือจากการเผามาเป็นวัตถุดิบ

ในงานคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อย นั้นจะต้องมีการคำนึงถึงค่า LOI ของเถ้าชานอ้อย เนื่องจากค่า LOI ของเถ้าชานอ้อยเป็นตัวชี้วัดถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่ในเถ้าชานอ้อย โดยปกติค่า LOI จะขึ้นกับวิธีการเผา ช่วงเวลาในการเผา และปริมาณออกซิเจนในการเผาที่เหมาะสมจะทำให้สารอินทรีย์ระเหยออกไปหมด ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่า LOI มีค่าต่ำลง ค่า LOI ที่สูงแสดงให้เห็นว่าเถ้าชานอ้อยมีปริมาณสารอินทรีย์เหลืออยู่ ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ และยังส่งผลต่อปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมิเนียมกับปูนขาว ทำให้อัตราการเกิดฟองลดลง ส่งผลต่อปริมาณการใช้ผงอลูมิเนียมที่สูงขึ้น นอกจากนั้นค่า LOI ที่สูงยังทำให้เถ้าชานอ้อยมีสีดำ ซึ่งจะทำให้คอนกรีตมวลเบาเป็นสีดำ

การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยในกระบวนการผลิตบล็อกประสานนั้น จะต้องคำนึงถึงสมบัติของเถ้าชานอ้อย 2 ส่วน คือ ปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ในเถ้าชานอ้อย เนื่องจากนำเถ้าชานอ้อยมาแทนดินลูกรัง ซึ่งมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 90 โดยน้ำหนัก แต่เถ้าชานอ้อยที่มีปริมาณซิลิกอนสูงที่สุด คือ เถ้าชานอ้อยจากบริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด นอกจากนั้นเถ้าชานอ้อยที่นำมาใช้เป็นสีดำ เมื่อนำมาผสมในบล็อกประสานในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้บล็อกประสานจากสีแดงกลายเป็นสีน้ำตาลเข้ม และเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้นเป็น 15-30 โดยน้ำหนัก บล็อกประสานกลายเป็นสีดำ เมื่อนำมาทำกำแพงก็จะทำให้มีสีออกดำเทาเหมือนกำแพงโบราณ

ในการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้แทนวัตถุดิบผลิตปูนซีเมนต์คือ ปริมาณซิลิกอนในเถ้าชานอ้อย ซึ่งเถ้าชานอ้อยที่มีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์สูงสุด ส่วนเรื่องของสีของเถ้าชานอ้อยไม่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์มากนัก เพราะนำไปเผาพร้อมกับวัตถุดิบผลิตปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิสูง จึงเป็นผลทำให้สารอินทรีย์เกิดการสลายไปได้

### 3.3 ปัญหาที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาเรื่องถ้ำซานอ้อยพบว่า ปริมาณถ้ำซานอ้อยที่ผลิตนั้นขาดความต่อเนื่องในการผลิต เนื่องจากแต่ละโรงงานจะมีระยะเวลาในการเปิดหีบอ้อยแค่ประมาณ 4 เดือนเท่านั้น ซึ่งอาจจะมีช่วงละลายน้ำตาลต่ออีกประมาณ 2-3 เดือน ซึ่งจะทำให้มีถ้ำซานอ้อยเกิดแค่ช่วง 6-7 เดือนเท่านั้น จึงทำให้เกิดความต่อเนื่องในการใช้งานในอนาคต นอกจากนี้สถานที่ในการกักเก็บถ้ำซานอ้อยส่วนใหญ่เป็นที่โล่งแจ้งและกองบนพื้นดิน เลยทำให้เกิดการปนเปื้อนสิ่งต่างๆ ได้ง่าย ซึ่งอาจจะมีผลต่อสมบัติของถ้ำซานอ้อย อีกทั้งยังทำให้เกิดความไม่สะดวกในการขนส่ง เนื่องจากวัตถุติดอยู่ไกลจากสถานที่ทำการวิจัยค่อนข้างมาก ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ควรมีการหาแหล่งวัตถุดิบที่ใกล้สถานที่วิจัย เพื่อความสะดวกในการขนส่ง ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัตถุดิบ

### บรรณานุกรม

1. Cordeiro, G.C., R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares and E.M.R. Fairbairn. "Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement & Concrete Composites.** (2008(30)) : 410-41



ภาคผนวก

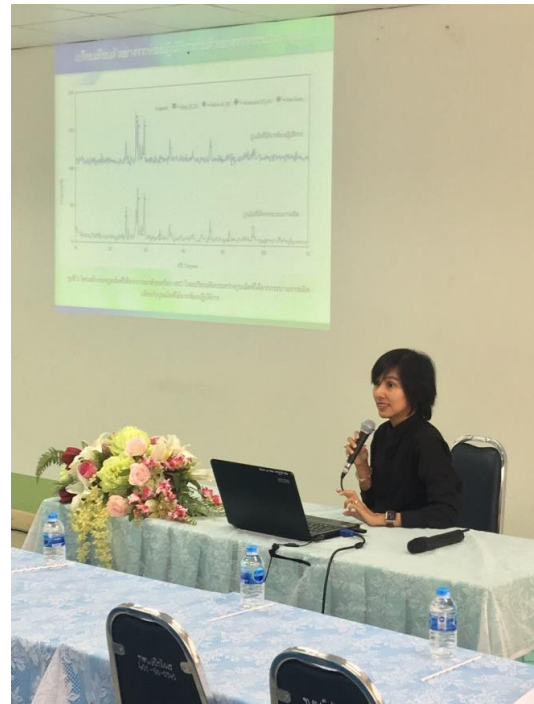
การจัดสัมมนาเพื่อนำผลงานวิจัยไปสู่การใช้ประโยชน์  
ภายใต้การสนับสนุนทุนวิจัยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (วิจัยมุ่งเป้า)  
โครงการใช้ประโยชน์จากเก้าชานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง  
ณ ห้องประชุม ชั้น 2 ที่ว่าการอำเภอเบ็ญไพร

ในวันที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2560 ณ ทางคณะผู้วิจัย ได้แก่ รศ.ดร.สุวิมล อัครพิศิษฐ์ ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภาณุวัฒน์ และ ดร.สุธาทิพย์ สินยัง ร่วมกับ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ได้จัดสัมมนาแนวทางการนำผลงานวิจัยให้กับผู้ประกอบการและผู้สนใจ โดยมีวัตถุประสงค์ในการจัดสัมมนา เพื่อให้ผู้ประกอบการได้รับทราบข้อมูลและนำไปพัฒนาต่อยอดสู่การใช้ประโยชน์ โดยคณะผู้วิจัยได้เรียนเชิญผู้ประกอบการภายในจังหวัดราชบุรี และกาญจนบุรี ซึ่งทำธุรกิจเกี่ยวกับอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล มาร่วมรับฟัง ซึ่งการจัดสัมมนาครั้งนี้มีผู้เข้าร่วมทั้งสิ้น 26 คน โดยในการจัดสัมมนาครั้งนี้ได้รับเกียรติจาก อาจารย์กิตติ ชุณหวงศ์ ผู้ทรงคุณวุฒิจาก สกว. เป็นประธานในการเปิดงาน ในระหว่างการบรรยายได้มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างนักวิจัยและผู้ประกอบการ เพื่อนำมาพัฒนาข้อมูลให้ได้ประโยชน์ยิ่งขึ้น โดยบรรยากาศในการจัดสัมมนาแสดงดังรูป

ประมวลภาพการจัดสัมมนา







**ข้อเสนอแนะโดยรวมจากการจัดสัมมนา มีรายละเอียดพอสังเขป ดังนี้**

- ควรทำการศึกษาปริมาณก๊าซอ้อยที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน พร้อมการบริหารจัดการก๊าซอ้อยของผู้ประกอบในปัจจุบัน เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลการคาดการณ์ปริมาณก๊าซอ้อยที่จะนำมาใช้ในอนาคต จากการสำรวจปริมาณอ้อยที่เข้าโรงงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางนี้

ปี	ปริมาณอ้อย (ตัน)	ปริมาณขานอ้อย (ตัน)	ปริมาณก๊าซอ้อย (ตัน)
2557/2558	105,959,079	31,787,724	5,297,953
2558/2559	94,047,041	28,214,112	4,702,352
2559/2560	92,950,815	27,885,245	4,647,540

หมายเหตุ ปริมาณขานอ้อย เป็นขานอ้อยที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ปริมาณก๊าซอ้อยที่เกิดขึ้นในแต่ละปีขึ้นอยู่กับปริมาณอ้อยที่เข้าสู่โรงงานน้ำตาล ซึ่งโดยส่วนใหญ่ที่โรงงานน้ำตาลบริหารจัดการก๊าซอ้อยคือ ให้เกษตรกรไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน ให้มีความร่วนซุย แต่ในการใช้งานทางโรงงานส่วนใหญ่อาจจะยังไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ต่างกัน ซึ่งอาจจะทำให้ดินเสียคุณภาพ และไม่สามารถปลูกพืชต่อได้ นอกจากนั้นยังมีการนำไปถมที่ ผลิตปุ๋ย ซึ่งการนำก๊าซอ้อยมาใช้ประโยชน์นั้นยังมีปริมาณที่น้อยมาก และยังไม่มีการสร้างมูลค่าอย่างชัดเจน

- ควรจะมีการตรวจสอบปริมาณก๊าซอ้อยที่มีผู้ประกอบการบางรายมีการนำก๊าซอ้อยไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ เช่น ขายให้กับธุรกิจปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดิน เป็นต้น

ข้อมูลเบื้องต้น ที่สามารถตรวจสอบจากโรงงานที่สามารถติดต่อได้โดยตรง มีบริษัท เกษตร ไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ซุการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) ได้มีการจัดตั้งโรงผลิตสารปรับปรุงดิน, บริษัท อุตสาหกรรมมิตรเกษตร จำกัด ได้มีการส่งไปให้ชาวไร่ในการปรับปรุงดิน เป็นต้น

- ควรทำการศึกษาในข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ของการนำผลงานวิจัยทั้ง 3 โครงการย่อยไปใช้ประโยชน์ และวางเป้าหมายของขนาดอุตสาหกรรม หรือขนาดธุรกิจให้ชัดเจน
- ให้กลุ่มวิจัยมองถึงผู้ประกอบการที่จะมาเข้าร่วมทุนในการนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยทั้ง 3 โครงการไปสร้างเป็นธุรกิจ
- กรณีนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์ เช่น การนำไปตกแต่งในโรงแรม หรือคอนโดมิเนียม ปัจจุบันต้นทุนของวัสดุหรือชิ้นงานตกแต่งมีราคาเท่าไร
- ทางผู้แทนจากโรงงาน มีความประสงค์อยากให้ผู้วิจัยถ่ายทอดความรู้ที่ได้ ให้แก่ชาวบ้านในบริเวณรอบโรงงาน เพื่อเป็นการสร้างอาชีพให้กับชาวบ้าน

สรุปภาพรวมในการสัมมนา พบว่าทางผู้ประกอบการได้รับทราบข้อมูล การนำก๊าซอ้อยที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ไปใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง ในรูปแบบต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มศักยภาพการบริหารจัดการกากของเสียที่เกิดขึ้น และสร้างมูลค่าของเสียดังกล่าว รวมถึงการสร้างโอกาสในการพัฒนาของเสียไปเป็นธุรกิจในอนาคต

กำหนดการสัมมนา การใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง

วันจันทร์ที่ 2 ตุลาคม พ.ศ. 2560

เวลา 8.30 – 13.30 น.

ณ ห้องประชุม เทศบาลตำบลเบ็กไพร อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี

---

- 08.30 – 09.00 น. ลงทะเบียนเข้าร่วมการสัมมนา
- 09.00 – 09.45 น. คณะทำงานชี้แจงวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย “การใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง”
- 09.45 – 10.45 น. การใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อย ข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้เถ้าชานอ้อยในงานวัสดุก่อสร้าง และการนำเถ้าชานอ้อยมาใช้แทนทรายในการผลิตคอนกรีตมวลเบา
- 10.45 – 11.00 น. รับประทานอาหารว่าง
- 11.00 – 11.30 น. การนำเถ้าชานอ้อยมาใช้แทนดินในการผลิตบล็อกประสาน
- 11.30 – 12.00 น. การนำเถ้าชานอ้อยมาใช้แทนวัสดุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์
- 12.00 – 13.00 น. รับประทานอาหารกลางวัน
- 13.00 – 13.30 น. สรุปและปิดการสัมมนา

หมายเหตุ : กำหนดการอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม

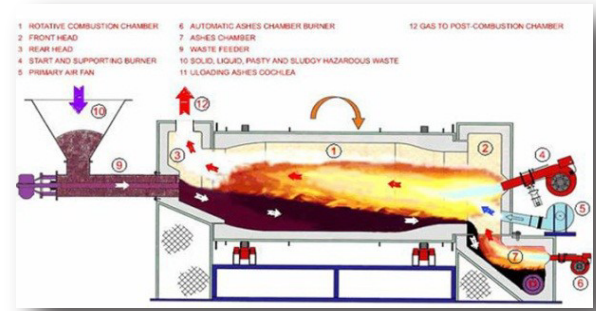
โครงการย่อย 3 การใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง  
ผู้รับผิดชอบโครงการ ดร.สุรชาติพิทย ลินยัง

โครงการย่อย 2 การใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง  
ผู้รับผิดชอบโครงการ ผศ.ดร.รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์



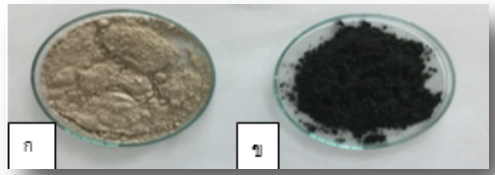
โครงการแผนการใช้ประโยชน์จากเถ้าขานอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง

สนับสนุนการวิจัยโดย  
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย



รูปตัวอย่างส่วนของ rotary kiln ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์  
ที่มา: <http://www.dewomachinery.com/drying-equipment/Lime-Rotary-Kiln.html>

จากประเด็นในเรื่องสีของเถ้าขานอ้อยที่มีความดำสนิท ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการเผาเถ้าขานอ้อยกับวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์



รูปลักษณะของสีวัตถุดิบหลักและเถ้าขานอ้อย  
(ก) สีของวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก่อนเผาเถ้าขานอ้อย และ (ข) เถ้าขานอ้อยก่อนเผาเถ้าขานอ้อย

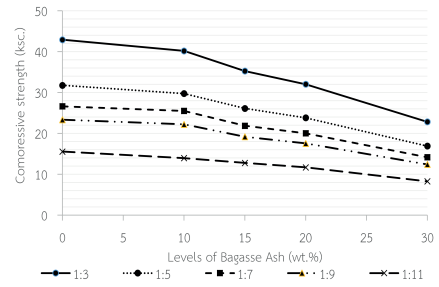
พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำเถ้าขานน้อยไปใช้ในการเผาของกระบวนการผลิตซีเมนต์ คือ ไม่เกิน ร้อยละ 1.0 เนื่องจาก ให้ค่าการพัฒนากำลังอัดที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 โดยให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีอายุในการบ่มที่ระยะเวลา 28 วันไม่น้อยกว่า 28 MPa ส่งผลให้ได้ปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้งานก่อสร้าง



รูปตัวอย่างสีของปูนซีเมนต์สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ



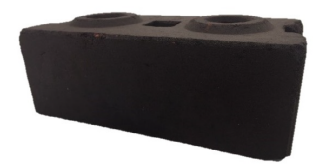
รูปบล็อกประสาน



รูปการพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณ 0-30 โดยน้ำหนัก



รูปบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณ 10 โดยน้ำหนัก



รูปบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณ 30 โดยน้ำหนัก

ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย	อัตราส่วน 1:3					อัตราส่วน 1:5					อัตราส่วน 1:7					อัตราส่วน 1:9					อัตราส่วน 1:11				
	0	10	15	20	30	0	10	15	20	30	0	10	15	20	30	0	10	15	20	30	0	10	15	20	30
บล็อกประสาน ชนิดรับน้ำหนัก ( 7 MPa ) *	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
บล็อกประสาน ชนิดรับน้ำหนัก ( 2.5 MPa ) *	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ค่าการดูดกลืนน้ำ (123.41-210.45 kg/m³) *	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓
งานผนัง Indoor **	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓
งานผนัง Outdoor **	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓

สรุปผลการศึกษา  
อัตราส่วนบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยที่มีสมบัติทางวิศวกรรมเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน และมีที่ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำที่สุด คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:3 และ 1:5 ที่สามารถแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยได้มากถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก(ประมาณร้อยละ 35-40 โดยปริมาตรของบล็อกประสาน)



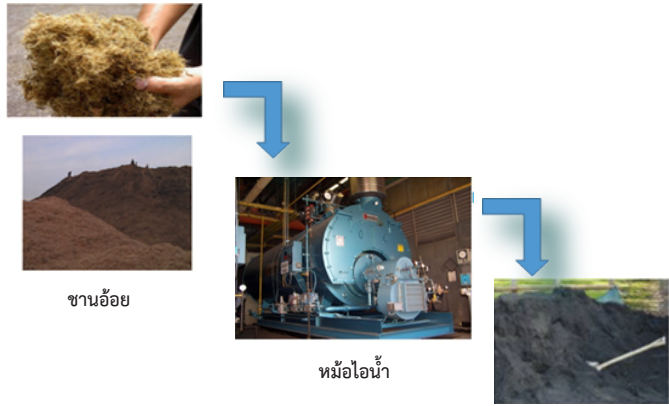
ปัญหา

ผลิตภัณฑ์



คณะผู้วิจัย  
รศ. ดร. สุวิมล อัครพิศิษฐ  
ผศ. ดร. รุ่งโรจน์ ปิยะภานุวัฒน์  
ดร. สุรชาติพิทย ลินยัง

## ที่มาและความสำคัญของโครงการ



### ผลกระทบ

- เกิดฝุ่นละอองของเถ้า
- ทำให้ดินมีความเป็นด่างสูงขึ้น
- ทำให้แหล่งน้ำมีความเป็นด่างสูงขึ้น

## บทคัดย่อภาษาไทย

การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของเถ้าchan ooiจากแหล่งต่างๆ พบว่า มีค่า LOI ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดตาม ASTM แต่สีด้าของเถ้าchan ooiจะส่งผลต่อสีของวัสดุก่อสร้าง

### คอนกรีตมวลเบา

การนำเถ้าchan ooiมาแทนที่ทรายในคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ พบว่า สามารถแทนที่ทรายด้วยเถ้าchan ooiในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในคอนกรีตมวลเบาที่ต้องใช้อุณหภูมิในการอบไอน้ำ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงมีสมบัติตามมาตรฐาน และยังลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เกิดจากขั้นตอนการอบ และอบไอน้ำรวมกันได้ถึงร้อยละ 65.54

### บล็อกประสาน

การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าchan ooiในบล็อกประสาน พบว่า บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 และ 1:5 โดยน้ำหนัก สามารถแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าchan ooiได้สูงสุดร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซึ่งสมบัติที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนักที่สามารถใช้ในงานก่อสร้าง (กำลังรับแรงอัดที่มีค่ามากกว่า 25 MPa และค่าการดูดซึมน้ำที่ 123 - 210 kg/m<sup>3</sup>) และลดต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานได้ ร้อยละ 20 - 30

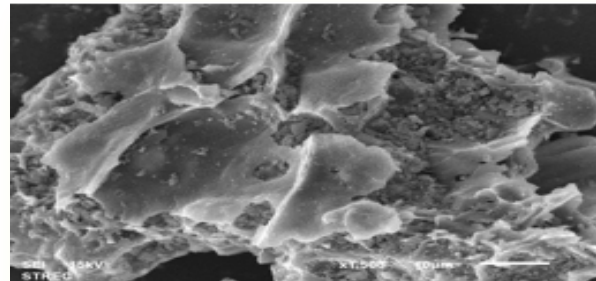
### การผลิตปูนซีเมนต์

การนำเถ้าchan ooiไปใช้ในการเผาพร้อมของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.5 ถึง 1.0 ที่อุณหภูมิ 1,350 - 1,450 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 (ไม่น้อยกว่า 28 MPa)

## โครงการแผนการใช้ประโยชน์จากเถ้าchan ooiในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง

ผู้รับผิดชอบโครงการ รศ. ดร. สุวิมล อัครพิศิษฐ์

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก		
	บริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด	บริษัท อุตสาหกรรม มิตรเกษตร จำกัด	บริษัท เกษตรไทย อินเตอร์เนชั่นแนล ชูการ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)
SiO <sub>2</sub>	68.60	63.9	62.2
Na <sub>2</sub> O	1.07	2.77	0.545
K <sub>2</sub> O	3.92	4.22	3.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97	3.93	9.32
CaO	7.85	9.32	10.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	5.38	7.39
Cl	0.95	0.83	0.76
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.71	1.54	1.36
MgO	1.69	1.93	1.80
TiO <sub>2</sub>	0.27	0.27	0.84
MnO	0.14	0.14	0.4
SO <sub>3</sub>	1.44	1.11	0.97
LOI	5.22	4.65	4.62



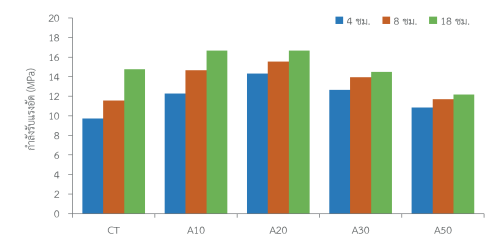
รูปเถ้าchan ooiจาก บริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด

### สรุปผลการศึกษา

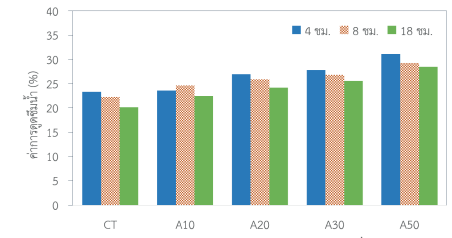
- การแทนที่ทรายด้วยเถ้าchan ooiนั้นจะต้องมีการคำนึงถึงค่า LOI ของเถ้าchan ooi เนื่องจากค่า LOI ของเถ้าchan ooiเป็นตัวชี้วัดถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่ในเถ้าchan ooi
- การแทนที่ทรายด้วยเถ้าchan ooiในคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำและการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าchan ooi ในกระบวนการผลิตบล็อกประสานนั้น จะต้องคำนึงถึงสมบัติของเถ้าchan ooi 2 ส่วน คือปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ในเถ้าchan ooi และสีของเถ้าchan ooi
- ในการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการนำเถ้าchan ooiมาใช้แทนวัตถุดิบผลิตปูนซีเมนต์คือปริมาณซิลิกอนในเถ้าchan ooi

## โครงการย่อย 1 การใช้ประโยชน์จากเถ้าchan ooiในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง

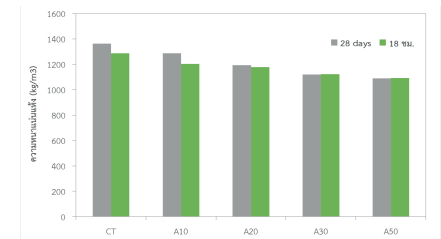
ผู้รับผิดชอบโครงการ รศ. ดร. สุวิมล อัครพิศิษฐ์



รูปการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีการอบและไม้อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส



รูปการลดการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่มีการอบและไม้อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส



ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา ที่มีและไม่มีกรอบไอน้ำ

### สรุปผลการศึกษา

อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ ที่การแทนที่ทรายด้วยเถ้าchan ooiร้อยละ 10 โดยน้ำหนักอุณหภูมิ และระยะเวลาการอบไอน้ำเทียบเท่าการอบปกติ 28 วัน คืออุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.2554 W/mK ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายจากการอบทราย และการอบไอน้ำได้ร้อยละ 65.54 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมและ มอก. 1505-2541



**สรุปข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ**  
**“การใช้ประโยชน์จากเถาขนอ้อยในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง”**  
**รศ.ดร.สุวิมล อัครพิศิษฐ์**

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1. นักวิจัยควรวิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์หลายกรณีเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อใช้เถา 50% ในอิฐมวลเบา	ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติมตามคำแนะนำ โดยทำการวิเคราะห์ทุกอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยเถาจนถึง 50%	<input type="checkbox"/> ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย <input type="checkbox"/> ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็น
2. นักวิจัยควรอธิบายผลกระทบของการดูดซึมน้ำในบล็อกประสานของเถาที่คายออกมาภายหลัง	ได้มีการอธิบายในหัวข้อการดูดซึมน้ำของโครงการย่อยที่ 2	ไม่ได้ และส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว
3. นักวิจัยควรอ้างอิงการใช้อุณหภูมิ 1,250 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ในการเผาพร้อมเถาขนอ้อยกับวัสดุดิบในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์	ได้มีการอ้างอิงในผลการทดลองของโครงการย่อยที่ 3 หัวข้อที่ 3) ผลของเถาขนอ้อยที่มีต่อลักษณะโครงสร้างและเฟสองค์ประกอบของปูนเม็ด โดยก่อนทำการสังเคราะห์ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,250 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส นักวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตจริงกับปูนเม็ดที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง โดยแสดงดังรูปที่ 4.9-4.11	<input type="checkbox"/> นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
4. นักวิจัยควรแบ่งประเภทและให้คำนิยามของเถาขาวและเถาดำให้ชัดเจน	ในงานวิจัยนี้ใช้เถาขนอ้อยที่เกิดจากกระบวนการดักจับฝุ่นในเตาเผา ซึ่งเรียกอีกอย่างว่าเถาลอย ได้มีการอธิบายเพิ่มเติมในส่วนของแผนโครงการ	
5. นักวิจัยควรศึกษาวัฏกรรมการทำความสะอาดตัวเองเพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์	ในส่วนของวัฏกรรมในการทำความสะอาดตนเองทางคณะวิจัยมีแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อการยื่นข้อเสนอทุนวิจัยในปีงบประมาณ 2561	

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
<p>6. นักวิจัยควรระบุผลกระทบทางด้านสังคม และชุมชนเพิ่มเติมในรูปแบบรายงาน</p>	<p>มีการเพิ่มเติมอยู่แนบท้ายโครงการแผน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้</p> <p><u>เชิงปริมาณ</u></p> <p>-ช่วยลดปริมาณก๊าซอ้อยที่ต้องส่งไปกำจัด ณ สถานที่กำจัด หรือกองทิ้งไว้ภายในโรงงาน โดยการนำไปเพิ่มมูลค่าเป็นวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ อิฐมวลเบา บล็อกประสาน และปูนซีเมนต์</p> <p><u>เชิงสิ่งแวดล้อม</u></p> <p>-ช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเกิดจากฝุ่นก๊าซอ้อยที่ส่งผลกระทบต่อชุมชนใกล้เคียงโรงงาน อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล รวมถึงผลกระทบต่อแหล่งน้ำสาธารณะของชุมชนในบริเวณใกล้เคียง เนื่องจากนำก๊าซอ้อยที่เกิดขึ้นไปเพิ่มมูลค่าเป็นวัสดุก่อสร้าง</p> <p><u>เชิงต้นทุน</u></p> <p>-กรณีชาวบ้านหรือผู้ประกอบการรายย่อยต้องการผลิตวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ อิฐมวลเบา และบล็อกประสาน สามารถลงทุนผลิตเองได้ โดยต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าวิธีปกติ</p> <p>-กรณีชาวบ้านต้องการซื้อวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ อิฐมวลเบา บล็อกประสาน และปูนซีเมนต์ สามารถซื้อได้ในราคาที่ต่ำกว่าท้องตลาด เนื่องจากต้นทุนใน</p>	

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
	การผลิตต่ำ <u>เชิงคุณภาพ</u> -เป็นการสร้างรายได้ให้กับชุมชน หรือ ผู้ประกอบการรายย่อยที่สนใจ	
7. นักวิจัยควรจัดนิทรรศการในโอกาสต่างๆ หรือถ่ายทอดองค์ความรู้ให้แก่ผู้ที่มี ส่วนเกี่ยวข้อง เช่น โรงงานน้ำตาลหรือชุมชนรอบโรงงาน โดยการ ประชาสัมพันธ์ หรือทำแผ่นพับเผยแพร่	ได้มีการจัดสัมมนาในวันที่ 2 ตุลาคม 2560 ณ ที่ว่า การตำบลเบิกไพร เวลา 9.00 -12.00 และมีการ เพิ่มข้อมูล พร้อมแผ่นพับในภาคผนวก	
8. ผลงานวิจัยมีแนวโน้มในการนำไปใช้ประโยชน์ได้มาก เช่น การนำไปประยุกต์ ความเป็นผลิตภัณฑ์ของตกแต่ง เช่น แจกัน ของโชว์ การลดต้นทุนในการผลิต บล็อกประสาน และการลดการใช้ปูนซีเมนต์โดยการเผาพร้อมกับเก้าชานอ้อย	นักวิจัยได้มีความพยายามต่อยอดงานวิจัยทั้งในแง่ การขอทุนวิจัยเพื่อนำนวัตกรรมต่างๆ เข้ามาใช้เพื่อ เพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ควบคู่ไปกับการ พยายามนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าวเผยแพร่ ให้กับผู้ที่สนใจทั้งในแง่การจัดสัมมนา และการส่ง แผ่นพับประชาสัมพันธ์ให้กับผู้ประกอบการ เป็นต้น เพื่อให้เกิดประโยชน์ในเชิงการนำไปใช้งานมากที่สุด	

## ผลกระทบทางด้านสังคม และชุมชน

โครงการวิจัยแผน และโครงการย่อยที่ดำเนินการแล้วเสร็จตามวัตถุประสงค์ของโครงการแล้ว นี้ จะสามารถนำมาใช้ในการเพิ่มมูลค่าให้กับเถาขานอ้อย ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งภายในโรงงาน โดยส่วนใหญ่โรงงานจะนำเถาขานอ้อยมาใช้ในการปรับปรุงดิน หรือถมที่ดิน หรือเอาไปใช้ในผลิตรายปรับปรุงดิน แต่ปริมาณการนำไปใช้ประโยชน์ของเถาขานอ้อยยังมีไม่มากนัก ประกอบกับการนำไปแปรรูปนั้น ยังไม่มีมูลค่าสูงขึ้นมากเพียงพอต่อการลงทุน ผลการศึกษาที่ได้จากโครงการวิจัยแผน และโครงการย่อยนั้นสามารถที่จะนำมาพัฒนาต่อยอดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านสังคม และชุมชนได้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

โครงการวิจัยแผน ผลการวิจัยที่ได้คือ ทราบสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถาขานอ้อยของแต่ละโรงงานและที่อายุการเก็บต่างๆกัน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการเก็บเถาขานอ้อยจากโรงงานที่มีเตาเผาต่างชนิดกัน เผาที่สภาวะต่างกัน แต่กลับให้เถาขานอ้อยที่มีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต่างกันเล็กน้อยซึ่งถือว่าไม่นัยสำคัญ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการผลิตวัสดุก่อสร้างได้โดยตรงไม่ว่าจะเป็นการนำมาใช้แทนทรายในคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ บล็อกประสาน หรือเป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งจากการสัมมนากับผู้ประกอบการเมื่อวันที่ 2 ตค 60 นั้น ทำให้ทราบถึงปัญหาในการจัดเก็บเถาขานอ้อยซึ่งในปัจจุบันยังจัดเก็บไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ทำให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมกับชุมชนที่อาศัยโดยรอบโรงงาน เนื่องจากเถาขานอ้อยมีสีดำและเบา จึงถูกพัดพาไปได้ไกล ทำให้พื้นที่โดยรอบแลดูสกปรก นอกจากนี้เถาขานอ้อยที่มีขนาดเล็กยังส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์อีกด้วย ซึ่งปัญหาต่างๆเหล่านี้อาจทำให้เกิดปัญหาสังคมขึ้นได้ เช่นเกิดการทะเลาะวิวาทระหว่างผู้ประกอบการกับชุมชนที่อาศัยโดยรอบ และจากข้อมูลที่ได้รับเพิ่มเติมจากผู้ประกอบการคือเกษตรกรที่อยู่ใกล้เคียงได้มีการนำเถาขานอ้อยไปใช้เป็นสารปรับปรุงดิน เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถาขานอ้อยส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งผลกระทบในระยะยาวคือเถาขานอ้อยจะทำให้ดินเกิดการแข็งตัวและทำให้ดินนั้นไม่เหมาะกับการเพาะปลูกอีกต่อไป

โครงการวิจัยย่อยที่ 1 มีการนำเถาขานอ้อยมาใช้แทนทรายในการผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ และโครงการย่อยที่ 2 เป็นการนำเถาขานอ้อยมาใช้ในการผลิตบล็อกประสานซึ่งทั้งสองโครงการนี้สามารถนำเถาขานอ้อยมาทำการผลิตคอนกรีตมวลเบา และบล็อกประสาน ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้นไม่มีความซับซ้อนมาก ซึ่งสามารถที่จะส่งเสริมให้กับชุมชนรอบโรงงานดำเนินการได้ โดยทางโรงงานอาจจะนำเอามาเป็นกิจกรรมในการสร้างความสัมพันธ์กับทางชุมชนรอบโรงงานได้ และยังเป็น การสร้างอาชีพให้กับชุมชนรอบโรงงาน ซึ่งแนวทางดังกล่าวนี้สามารถลดปริมาณเถาขานอ้อย และผลกระทบต่อชุมชน และยังเป็นการสร้างรายได้ให้กับชุมชนรอบโรงงานอีกทางหนึ่งด้วย หรือทางผู้ประกอบการอาจจะลงทุนทำเองแล้วนำเอาคอนกรีตหรือบล็อกประสานไปบริจาคเพื่อสร้างวัดหรือโรงเรียนในชุมชนก็เป็นการคืนกำไรให้กับสังคมและลดความขัดแย้งกับชุมชนได้เช่นกัน

โครงการวิจัยย่อยที่ 3 เป็นการนำเถาขานอ้อยมาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นี้ถ้ามีการแทนที่ด้วยเถาขานอ้อยในกระบวนการผลิตจะทำให้ลดปริมาณการนำวัตถุดิบจากธรรมชาติมาใช้ในการผลิต นอกจากนั้นถ้าในพื้นที่ของโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใกล้เคียงกับโรงงานผลิต

น้ำตาลที่มีเถ้าขาน้อย ก็จะสามารถลำเลียงมาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ได้ นอกจากนั้นยังเป็นการลดมลพิษทางอากาศ และลดการใช้ประโยชน์จากเถ้าขาน้อยที่ไม่ถูกวิธี

## โครงการย่อยที่ 1

ผลของการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อยต่อ  
สมบัติของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ (Autoclaved aerated concrete) มีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีน้ำหนักที่เบา นำความร้อนต่ำ ทนความร้อนได้สูง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะทำให้เกิดของเสียจากกระบวนการผลิตเพียง 1 ใน 5 ของที่เกิดขึ้นในการผลิตคอนกรีตทั่วไป [1] โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบาจะผลิตจากมวลรวมละเอียด ปูนขาว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ น้ำ และผงอลูมิเนียมสำหรับเป็นสารสร้างรูพรุนภายในคอนกรีต [2] ซึ่งจะนำไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรืออัลคาไลน์ และได้ผลิตผลเป็นก๊าซไฮโดรเจน แล้วเกิดเป็นรูพรุนภายในคอนกรีต [3] หลังจากนั้นคอนกรีตมวลเบาที่จะถูกนำไปอบไอน้ำที่อุณหภูมิในช่วง 180-200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง เพื่อพัฒนากำลังอัด และลดการเกิดการหดตัวแห้ง จากกระบวนการผลิตนี้ทำให้เห็นความเป็นไปได้ในการนำของเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือภาคเกษตรกรรมมาใช้แทนที่มวลรวมละเอียด ปูนขาวหรือปูนซีเมนต์ได้ ซึ่งนอกจากจะเป็นการลดการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมแล้ว อาจส่งผลทำให้เพิ่มคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ หรืออาจส่งผลต่อการลดการใช้พลังงานจากการลดอุณหภูมิหรือระยะเวลาในการอบไอน้ำ [4-8]

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลในประเทศไทย เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการผลิตเป็นอันดับ 5 ของโลก รองจากบราซิล อินเดีย สหภาพยุโรป และจีน ในระหว่างปี 2556-2558 [9] ปัจจุบันได้มีการนำผลพลอยได้จากการผลิต (by-product) หรือขานอ้อยมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล โดยหลังการกระบวนการเผาจะเกิดของเสียหรือเถ้าขานอ้อยจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วเถ้าขานอ้อยที่เกิดขึ้นจะนำไปกำจัดทิ้งในหลุมหรือกองทิ้งไว้ในพื้นที่บริเวณรอบโรงงาน หรือให้ชาวบ้านนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินสำหรับทำเกษตรกรรม ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้ แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าขานอ้อย ประกอบไปด้วย ซิลิกาไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และไอรอนออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จึงมีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุปอซโซลานได้เป็นอย่างดี และสามารถใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้าง เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดและยังช่วยประหยัดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการลดของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการนำเถ้าขานอ้อยที่เกิดจากการนำขานอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ โดยนำเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นฝุ่นขนาดเล็กและมีสีดำนามาแทนที่ทราย ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 – 50 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบจากการอบและไม่อบไอน้ำ และอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบไอน้ำ ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกลและโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำและไม่อบไอน้ำ

#### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยต่อกำลังอัด และความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

- 2) เพื่อศึกษาผลกระทบของการอบ และไม้ออบไอน้ำ ต่อกำลังอัด และความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบา
- 3) เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และระยะเวลาการอบไอน้ำ ต่อกำลังอัด ความหนาแน่นแห้ง และโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาผลของน้ำที่อบไอน้ำต่อสมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาที่ระดับการแทนที่ทรายร้อยละ 10 20 30 และ 50 โดยน้ำหนัก
- 2) ศึกษาผลของการบ่มคอนกรีตมวล 2 แบบ คือ บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 และ 28 วัน และบ่มด้วยการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 8 และ 18 ชั่วโมง
- 3) ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่นแห้ง การดูดซึมน้ำ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนและโครงสร้างระดับจุลภาค เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คอนกรีตมวลเบา (Lightweight Concrete)

คอนกรีตมวลเบาหมายถึงคอนกรีตที่มีความหนาแน่นกว่าคอนกรีตทั่วไป หรือประมาณ 2200-2500 กก.ต่อลบ.ม. โดยให้มิกำลังอัดตั้งแต่ 1-60 เมกะปาสคาล และการนำความร้อน 0.2-1.0 วัตต์ต่อ.-เคลวิน [10] การผลิตคอนกรีตมวลเบา มีหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับเทคนิคและวิธีการผลิต โดยจะกล่าวดังต่อไปนี้

#### 2.1.1 คอนกรีตมวลเบาแบบไม่มีมวลรวมละเอียด (No-Fine Concrete, NFC)

คอนกรีตมวลเบาแบบไม่มีมวลรวมละเอียดจะประกอบไปด้วยปูนซีเมนต์ น้ำ และมวลรวมหยาบ แต่จะไม่มีมวลรวมละเอียด หลังจากผสมแล้วนั้นมวลรวมหยาบแต่ละก้อนจะถูกเคลือบด้วยเลเยอร์ของซีเมนต์เพสต์ (ประมาณ 1.3 มม.) ทำให้มีการเชื่อมต่อระหว่างจุดต่อจุดด้วยกันของมวลรวมหยาบ ทำให้เกิดรูพรุนภายในคอนกรีต และทำให้ลดความหนาแน่น กำลังอัด และการหดตัว ในส่วนความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและการบดของมวลรวมหยาบ ความหนาแน่นที่น้อยที่สุดได้จากมวลรวมหยาบที่มีขนาดเดียวกัน โดยขนาดมวลรวมหยาบใหญ่ที่สุดที่นำมาชะประมาณ 7-75 มม. แต่โดยทั่วไปจะใช้อยู่ที่ 10-20 มม. นอกจากนี้มวลรวมหยาบควรจะมีไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุอื่นๆ ขนาดต้องใหญ่กว่า 5 มม. (เป็นแผ่นและยาว) และควรจะสะอาดเพื่อการยึดเกาะติดที่ดีกับซีเมนต์เพสต์ [11] มวลรวมหยาบที่ดีควรจะเป็นกรวดหรือที่มีลักษณะแข็ง ถ้ามีการบดหรือทุบ มวลรวมหยาบต้องไม่มีเหลี่ยมมุมแหลม ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมของมวลรวมหยาบมวลเบาต่อปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 3-8 จะทำให้สามารถลดความหนาแน่นได้ถึง 800-1400 กก.ต่อลบ.ม. ในขณะที่มวลรวมหยาบปกติจะใช้อัตราส่วนมวลรวมหยาบต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 6-10 และมีความหนาแน่นเท่ากับ 1200-1900 กก.ต่อลบ.ม. [11] ซึ่งแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบาแบบไม่มีมวลรวมละเอียดที่ทำมาจากมวลรวมหยาบปกติและมวลเบา [11]

รายการ	มวลรวมหยาบปกติ	มวลรวมหยาบมวลเบา
อัตราส่วนมวลรวม/ปูนซีเมนต์ (โดยน้ำหนัก)	6-10	3-8
อัตราส่วนน้ำ/ปูนซีเมนต์ (โดยน้ำหนัก)	0.38-0.45	0.38-0.45
ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)	1200-1900	800-1400
กำลังอัดแบบลูกบาศก์ (เมกะปาสคาล)	3-7	3-7

#### 2.1.2 คอนกรีตมวลเบาแบบใช้มวลรวมน้ำหนักเบา (Lightweight Aggregate Concrete)

คอนกรีตมวลเบาแบบใช้มวลรวมน้ำหนักเบาถูกจัดแบ่งไว้ 3 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ประเภทของมวลรวมน้ำหนักเบา [11]

คุณสมบัติ	ประเภท		
	I โครงสร้าง	II โครงสร้าง/ฉนวน	III ฉนวน
กำลังอัด (เมกะปาสคาล)	>15	>3.5	>0.5
การนำความร้อน (วัตต์/ม.-เคลวิน)	-	<0.75	<0.30
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1600-2000	<1600	<<1450

ในส่วนของประเภทที่ I ระบุไว้ว่าให้มีความหนาแน่นแห้งไม่เกิน 2000 กก./ลบ.ม. แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นแห้งที่กำหนดนี้อาจแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ อาทิเช่น ในประเทศออสเตรเลีย คอนกรีตคอนกรีตมวลเบาแบบใช้มวลรวมน้ำหนักเบาประเภทที่ I จะผลิตจากมวลรวมหยาบน้ำหนักเบาและมวลรวมละเอียดแบบปกติ ซึ่งจะทำให้ได้คอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 1800 กก./ลบ.ม. ในนอร์เวย์ ใช้มวลรวมชนิดต่างๆ ผสมกันทำให้ได้ความหนาแน่นแห้ง 1200-2000 กก./ลบ.ม. และกำลังอัดน้อยกว่า 85 เมกะปาสคาล และในสหรัฐอเมริกา คอนกรีตมวลเบาแบบใช้มวลรวมน้ำหนักเบาประเภทที่ I จะกำหนดให้มีความหนาแน่นแห้งไม่เกิน 1800 กก./ลบ.ม. นอกจากนี้มวลรวมน้ำหนักเบายังคงแบ่งออกเป็นหลายประเภท ดังนี้

- มวลรวมจากธรรมชาติ

มวลรวมจากธรรมชาติที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาใช้มวลรวมน้ำหนักเบาที่นิยมใช้กัน ได้แก่ หินพัมมิส (pumice) หินสกอเรีย (scoria) และหินไดอะตอมไมต์ (diatomite) โดยทั่วไปหินพัมมิสถูกผลิตโดยการขุดขึ้นมา แล้วหลังจากนั้นจะถูกนำไปบด และล้างให้สะอาดให้สิ่งสกปรกที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 1/8 นิ้ว ออกไป โดยหินพัมมิสที่ใช้จะมีขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว แต่ค้ำตะแกรงเบอร์ 1/8 นิ้ว สีหินพัมมิสจะมีสีขาว หรือเทาจนไปถึงสีเหลือง และมีลักษณะเป็นรูพรุนแต่แข็งแรง หินพัมมิสประกอบไปด้วยก้อนแก้วที่เป็นกรด ผสมกับชิ้นส่วนของแร่โรโอไลต์ เพอร์ไลต์ ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ และฮอว์นเบลนด์

หินสกอเรีย ผลิตจากหินภูเขาไฟที่ไม่มีการปนเปื้อน ซึ่งจะทำให้มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมและแข็ง มีสีแดงถึงดำ นอกจากนี้ยังมีราคาถูกและให้กำลังอัดที่สูงเช่นเดียวกับหินพัมมิส

หินไดอะตอมไมต์ มีลักษณะเป็นรูพรุน และเปราะบาง สามารถแตกหรือหักเพียงใช้แค่นิ้วเท่านั้น มีสีขาวและเหลี่ยมมุม

- มวลรวมจากผลพลอยได้ในโรงงานอุตสาหกรรม

มวลรวมน้ำหนักเบาที่ได้เป็นผลพลอยได้ของโรงงานอุตสาหกรรมที่นำมาใช้กัน ประกอบไปด้วย เถ้าถ่านหิน (cinders) ตะกรันเหล็กเบา (expanded blast-furnace slag) และรวมไปถึงตะกรันจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ (other slags) และเถ้าลอย (fly ash) ซึ่งเถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิสูง แต่ยังไม่ค่อยเป็นที่นิยมมาใช้ เพราะมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งค่อนข้างสูง

ในส่วนของตะกรันเหล็กนั้นมีการนำมาใช้ในงานก่อสร้างมากกว่า 25 ล้านตันต่อปี แต่ที่เป็นตะกรันเหล็กเบาที่มีการใช้เพียง 3 ล้านตันต่อปีเท่านั้น องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันจะประกอบไปด้วยซิลิเกต อลูมิโนซิลิเกตของปูนขาว และอื่นๆ ที่เกิดจากการหลอมเหล็ก โดยตะกรันเบาเกิดจากกระบวนการที่นำตะกรันที่หลอมเหลวไปสัมผัสกับน้ำ จากนั้นจะถูกนำไปบดและจัดเก็บไว้ สีของ

ตะกัณฑ์เหล็กเบาจะมีสีเทาอ่อนหรือสีครีม แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดที่ต้องถูกผลิตจากกระบวนการหลอมเหล็กเท่านั้น

มวลรวมเถ้าลอยจะผลิตโดยพ่นเถ้าลอยกับน้ำลงไปเครื่องขึ้นรูป ซึ่งขนาดของมวลรวมเถ้าลอยที่ออกมาจะขึ้นอยู่กับความเร็วของเครื่องขึ้นรูป แต่อย่างไรก็ตามเถ้าลอยยังมีปัญหาตรงที่มีคาร์บอนปนเปื้อนอยู่มาก ดังนั้นจึงต้องมีการเผาอีกครั้ง

- มวลรวมที่ผลิตขึ้นมา

หนึ่งในวิธีการผลิตมวลรวมเบาคือการทำให้ขยายหรือเรียกอีกอย่างว่า boating method ซึ่งคิดค้นโดย Stephen J. Hayde ในปี 1917 [10] ในการทำเริ่มจากการนำส่วนผสมของการผลิต ซึ่งประกอบไปด้วยดินเหนียว หินดินดาน หรืออื่น ๆ บรรจุลงส่วนบนเตาเผาแบบหมุน หลังจากนั้นวัตถุดิบส่วนผสมจะค่อย ๆ ไหลไปเรื่อย ๆ พร้อมกับการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1800-2200 องศาฟาเรนไฮต์ โดยในช่วงอุณหภูมินี้ส่วนผสมจะเกิดก๊าซและเกิดการขยายตัวต่อมา หลังจากที่เผาเสร็จมวลรวมจะพักให้เย็นและนำไปบดเพื่อคัดขนาด และจัดเก็บ ถ้าวัตถุดิบที่การคัดขนาดมาแล้ว ในส่วนของการบดอาจไม่ต้องมีก็ได้

มวลรวมเบาที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีนี้มีความสามารถในการไปใช้เป็นวัตถุดิบในส่วนผสมของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี และให้กำลังอัดสูง ดังนั้นจึงทำให้มวลรวมเบาชนิดนี้ประมาณร้อยละ 75-85 มักถูกนำไปทำคอนกรีตมวลเบาโครงสร้าง สีของมวลรวมเบาชนิดนี้จะมีสีเทาหรือส้มหม่น จนไปถึงสีชมพู

### 2.1.3 คอนกรีตมวลเบาแบบรูพรุน (Aerated Concrete)

คอนกรีตมวลเบาชนิดนี้ถูกผลิตโดยการสร้างหรือการนำก๊าซให้เกิดภายในเนื้อคอนกรีตในช่วงพลาสติก ซึ่งมีขั้นตอนการทำทุกอย่าง ไปอยู่สองวิธีคือ

หนึ่งคือการใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้นสร้างฟองอากาศภายในคอนกรีต โดยสารเคมีที่มักใช้กันคือ ผงอลูมิเนียม ที่จะไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) หรือต่างอื่นๆ (Alkalis) แล้วผลิตได้เป็นก๊าซไฮโดรเจน สารเคมีอื่นๆ ที่อาจจะมีการนำมาใช้ได้แก่ผงสังกะสีและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide)

ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือการนำฟองใส่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต ซึ่งฟองนี้จะถูกทำขึ้นมาจากสารสกัดโปรตีนหรือสบู่มากกว่า แต่ไม่ใช่เป็นการกระตุ้นโดยสารเคมี แต่การผสมฟองเข้าไปกับเนื้อคอนกรีตเลย [12] แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของคอนกรีตมวลเบาแบบรูพรุน คือการหดตัวและการนำความชื้นที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาชนิดอื่น แต่สามารถปรับปรุงข้อเสียนี้นี้ด้วยการนำไปอบไอน้ำ โดยยังสามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดได้เป็นอย่างดีอีกด้วย โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบาแบบรูพรุนมักนำไปทำเป็นฉนวนกันความร้อน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ

#### 2.1.3.1 คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบรูพรุน

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบาแบบรูพรุน ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดของคุณสมบัติต่าง ๆ

ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบาแบบรูพรุน [11]

ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	กำลังอัด (เมกะ ปาสคาล)	กำลังดัด (เมกะ ปาสคาล)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (ความชื้นร้อยละ 3) (วัตต์/ม.เคล วิน)
450	3.2	0.65	0.12
525	4.0	0.75	0.14
600	4.5	0.85	0.16
675	6.3	1.00	0.18
750	7.5	1.25	0.20

- ความหนาแน่น

โดยทั่วไปความหนาแน่นของคอนกรีตรูพรุนจะอยู่ในช่วง 300-1800 กก./ลบ.ม. [13] ขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการทำ นอกจากนี้โครงสร้างของรูพรุน ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุน ล้วนมีผลกระทบต่อความหนาแน่นของคอนกรีตรูพรุนเป็นอย่างมาก ซึ่งเคยมีการรายงานว่าขนาดรูพรุนที่ใหญ่ สามารถลดความหนาแน่นของคอนกรีตรูพรุนได้

- กำลังอัด

ในส่วนของกำลังอัดนั้น โครงสร้างของรูพรุน รวมไปถึงปริมาณและการกระจายตัวของรูพรุน มีผลเป็นอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีตรูพรุน เช่นเดียวกับความหนาแน่น ซึ่งเมื่อความหนาแน่นลดลง กำลังอัดของคอนกรีตรูพรุนมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน [13]

- การหดตัวแห้ง

การหดตัวแห้งของคอนกรีตเกิดจากการสูญเสียน้ำออกไปจากตัวคอนกรีต ซึ่งในคอนกรีตรูพรุนเป็นตัวแปรสำคัญเพราะมีปริมาณรูพรุนที่สูงถึงร้อยละ 40-80 และพื้นที่ผิวรูพรุนเฉพาะประมาณ 30 ตร.ม./ก. การหดตัวแห้งนั้นขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น การหดตัวเพิ่มขึ้น รูพรุนมีขนาดเล็ก

- ค่าดูดซึมน้ำและรูพรุน

คอนกรีตรูพรุนนั้นมีความสัมพันธ์กับน้ำ การระเหยของน้ำ และโครงสร้างรูพรุนเป็นอย่างมาก ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับกลไกการถ่ายเทความชื้น การถ่ายเทของไอน้ำสามารถระบุงจากค่าการซึมผ่านของไอน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้น ส่วนการถ่ายเทของความชื้นและการถ่ายของน้ำในรูพรุนสามารถวิเคราะห์ได้โดยวิเคราะห์ได้จากค่าการดูดซึมน้ำ

- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่น ความชื้น ปริมาณของรูพรุน รวมไปถึงคุณสมบัติของแคลเซไฮดรอกไซด์ที่นำมาใช้ผลิต โดยขนาดรูพรุนที่เล็กเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อน แต่อย่างก็ดีถ้าความชื้นเพิ่มขึ้นเพียงแค่อ้อยู่ที่ 1 ก็จะสามารถเพิ่มค่าการนำความร้อนได้ถึงร้อยละ 42 [13] ซึ่งคุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบก่อสร้าง

- ความทนทานต่อไฟ

คอนกรีตรูพรุนมีความสามารถในการทนไฟค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป เนื่องจากลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน และรวมไปถึงการที่มีรูพรุนเยอะทำให้มีช่องว่างของอากาศป้องกันการแพร่ของไฟได้

## 2.2 การบ่มคอนกรีต

การบ่มคอนกรีตเป็นการควบคุมและป้องกันไม่ให้น้ำในคอนกรีตสูญเสียออกอย่างรวดเร็วเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการหดตัวแห้ง และทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตดำเนินต่อไปอย่างสมบูรณ์ วิธีการบ่มที่ใช้อยู่ทั่วไปแบ่งเป็นหลักๆ ได้ 3 ประเภท คือ

### 2.2.1 การบ่มโดยการเพิ่มความชื้นให้คอนกรีต

การบ่มโดยลักษณะนี้จะเป็นการเพิ่มความชื้นให้กับผิวคอนกรีตโดยตรง เพื่อทดแทนการระเหยของน้ำออกไป การบ่มลักษณะนี้สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. การชังหรือหล่อหน้า เป็นการทานบักกั้นน้ำไม่ให้น้ำไหลออกมา มักจะใช้งานกับงานทางระดับ เช่น ถนน หรือพื้น เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำบ่ออาจจะเป็นดินเหนียว หรืออิฐก็ได้ ข้อควรระวังวิธีนี้ก็คือ ต้องระวังอย่าให้ทานบัก และหลังจากบ่มเสร็จแล้วอาจต้องทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีต
2. การฉีบน้ำหรือรดน้ำ เป็นการฉีบน้ำให้ผิวคอนกรีตเปียกอยู่เสมอ วิธีนี้ใช้งานได้กับคอนกรีตทั้งแนวตั้งและแนวนอน หรือแนวเอียง ข้อควรระวังคือต้องฉีบน้ำให้ทั่วถึงทุกส่วนของคอนกรีต และแรงดันน้ำต้องไม่แรงจนเกินไป จนทำให้ผิวหน้าคอนกรีตพัง วิธีนี้ทำให้สิ้นเปลืองน้ำ และต้องอาศัยแรงดันน้ำพอสมควร
3. การคลุมด้วยวัสดุเปียก เป็นวิธีที่นิยมกันมาก เพราะทั้งสะดวก รวดเร็วและประหยัด วัสดุที่นำมาใช้คลุมอาจเป็น กระสอบ ผ้าใบ หรือวัสดุอื่นที่อมน้ำ ข้อระวังคือวัสดุที่คลุมต้องเปียกชุ่มอยู่เสมอ การคลุมต้องคลุมให้ทั่วถึง นอกจากนี้วัสดุที่คลุมต้องไม่เป็นภัยต่อคอนกรีต

### 2.2.2 การบ่มโดยการป้องกันการเสียน้ำจากคอนกรีต

วิธีการนี้จะเป็นการผนึกคอนกรีต ไม่ให้น้ำในคอนกรีตระเหยออกไป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. การบ่มในแบบหล่อ แบบหล่อไม้ที่เปียก และแบบหล่อเหล็กสามารถป้องกันการสูญเสียได้เป็นอย่างดี วิธีนี้จัดเป็นวิธีที่ง่าย เพราะแค่เพียงทิ้งแบบหล่อไว้ให้นานที่สุด กับคอยดูแลผิวด้านบนคอนกรีตให้มีน้ำอยู่เสมอก็พอ
2. การใช้กระดาษกันซึม วิธีนี้จะเป็นการนำเอากระดาษกันซึมาปิดทับที่ผิวของคอนกรีต เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน วิธีนี้นิยมใช้กับคอนกรีตในแนวระดับ ส่วนประกอบของกระดาษกันซึมจะประกอบไปด้วยกระดาษเหนียวสองชั้นเชื่อมด้วยยางมะตอย และเสริมความเหนียวด้วยใยแก้ว มีคุณลักษณะที่ยึดหดตัวไม่มากนักทั้งในสภาพเปียกและแห้ง ข้อควรระวัง คือ ในช่วงรอยต่อต้องผนึกให้แน่นด้วยกาว และระวังกระดาษชำรุด ฉีก ขาดด้วย
3. การใช้พลาสติกคลุม วิธีการนี้จะคล้ายกับการใช้กระดาษกันซึม แต่แผ่นพลาสติกจะเบากว่า จึงสะดวกกับการนำมาใช้งานมากกว่า สามารถใช้ได้กับงานโครงสร้างทุกชนิด ข้อควรระวังจะเป็นเช่นเดียวกับกระดาษกันซึม คือระวังชำรุด ฉีกขาด และเนื่องจากมีน้ำหนักเบา จึงควรพึงระวังการหลุด ปลิวอีกด้วย
4. การใช้สารเคมีเคลือบคอนกรีต เป็นการพ่นสารเคมีให้เป็นเยื่อบางๆ เคลือบที่ผิวของคอนกรีต เพื่อป้องกันการระเหย แต่การใช้วิธีนี้มีข้อเสียตรงที่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ถึงแม้ว่าจะมีความรวดเร็วในการทำก็ตาม ดังนั้นจึงเหมาะกับงานที่บ่มได้ลำบาก การพ่นสารเคมีต้องพ่นในระหว่างที่คอนกรีตยังขึ้นๆ อยู่ นอกจากนี้ข้อเสียอีกข้อของการใช้สารเคมีคือ จะไปทำ

ให้การเชื่อมต่อระหว่างคอนกรีตเก่า กับคอนกรีตใหม่เสียไป ดังนั้นไม่ควรใช้กับงานที่มีการเทต่อเติม และไม่ควรให้สัมผัสกับน้ำในช่วงระยะเวลาในการบ่ม เพราะจะทำให้สารเคมีนั้นหลุดออกไปได้

## 2.2.3 การบ่มด้วยอุณหภูมิสูง

### 2.2.3.1 การบ่มไอน้ำความดันต่ำ

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตสามารถเร่งได้โดยใช้ความร้อน การใช้ความเร่งคอนกรีตที่นิยมใช้กัน ได้แก่ การบ่มไอน้ำ หรือการบ่มไอน้ำความดันต่ำ (low pressure steam curing) เป็นการบ่มไอน้ำที่ความดันปกติที่ความร้อนไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ซึ่งไอน้ำที่ความดันปกติจะขึ้นและใช้บ่มคอนกรีตเช่นเดียวกับการบ่มปกติ วิธีการนี้นิยมใช้กับการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป เพราะสามารถถอดแบบและเคลื่อนย้ายคอนกรีตได้ในเวลาอันสั้น ทำให้สามารถผลิตคอนกรีตได้เร็วขึ้น การบ่มโดยใช้วิธีนี้จะใช้ห้องบ่มไอน้ำหรืออุโมงค์โดยลำเลียงผลิตภัณฑ์คอนกรีตเข้าไปภายในด้วยสายพาน หรืออาจใช้พลาสติกคลุมผลิตภัณฑ์คอนกรีตและป้อนไอน้ำใต้แผ่นพลาสติก การบ่มไอน้ำสามารถใช้กับคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมวัสดุผสมโซโซลาน แต่ไม่ใช้กับปูนซีเมนต์อลูมินาเนื่องจากการบ่มด้วยความร้อนและชั้นสูงมีผลทางด้านลบต่อคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ดังกล่าว

### 2.2.3.2 การบ่มไอน้ำความดันสูง

การเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มให้สูงขึ้นสามารถทำได้โดยการบ่มไอน้ำและแรงดันเข้าช่วย ซึ่งต้องใช้ภาชนะที่แข็งแรงและสามารถปิดได้สนิทเรียกว่าอโตคลอว์ (autoclave) การบ่มไอน้ำความดันสูง (high pressure steam curing หรือ autoclaving) จะใช้อุณหภูมิประมาณ 160-220 องศาเซลเซียส ที่ความดันประมาณ 6-20 เท่าของบรรยากาศ นิยมใช้กับคอนกรีตสำเร็จรูปและผลิตภัณฑ์คอนกรีตบางชนิด เช่น ผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ใยหิน และอิฐทรายปูนขาว โดยอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นจะทำให้ผลิตผลไฮเดรชันส่วนมากอยู่ในรูปของผลึกที่เล็กมาก เป็นผลให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนไปในทางที่ดีขึ้นเป็นส่วนใหญ่ คือ

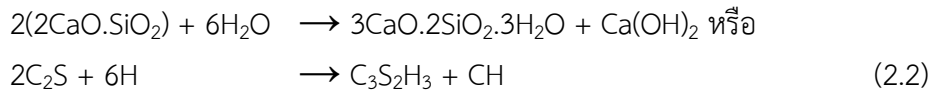
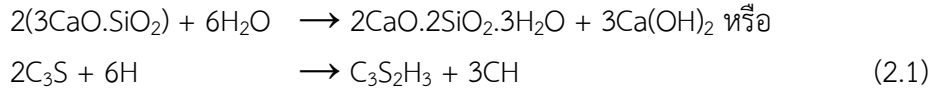
- กำลังของคอนกรีตที่อายุ 24 ชั่วโมง เทียบเท่ากับคอนกรีตที่บ่มด้วยวิธีธรรมดาที่อายุ 28 วัน
- มีความคงทนเพิ่มขึ้น โดยทนทานต่อการทำลายของซัลเฟตและสารเคมี และยังลดรอยการเกิดคราบเกลือ
- การหดตัวแห้ง และการคืบลดลงมาก และคอนกรีตที่ได้จากการบ่มจะมีความชื้นต่ำ

## 2.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ที่ทำให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ [14] ผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีค่าการละลายที่ต่ำ และแข็งตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำ [12] ซึ่งปฏิกิริยานี้จะอธิบายจากผลผลิตของปฏิกิริยา คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate, CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (calcium aluminate hydrate, CAH) ดังนี้

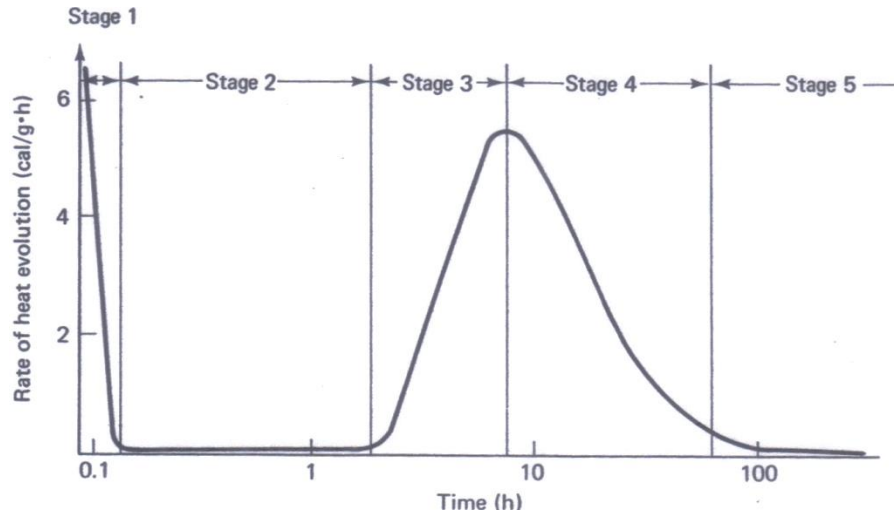
### 2.3.1 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือตัวย่อคือ CSH จะได้จากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตทั้งสองชนิด คือ ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) และ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) โดยแสดงให้เห็นในสมการที่ 2.1 และ 2.2



จากสมการแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาของทั้ง  $C_2S$  และ  $C_3S$  มีความคล้ายคลึงกัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อระยะเวลาสามารถอธิบายได้โดยใช้ calorimetric curve ดังแสดงในภาพที่ 2.1 เป็นการวัดความร้อนที่เกิดขึ้นตามระยะเวลา (ใช้  $C_3S$  เนื่องจากง่ายต่อการวัด) ในขั้นที่ 1 ความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 15 นาที ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า การเพิ่มขึ้นของความร้อนอย่างรวดเร็ว (rapid evolution of heat) ในขั้นที่ 2 หรือช่วงหยุดนิ่ง (domain period) ปฏิกิริยาจะอยู่ในสภาพพลาสติกเป็นเวลาหลายชั่วโมง หลังจากนั้น 2 ถึง 4 ชั่วโมง  $C_3S$  จะเริ่มทำปฏิกิริยาอีกครั้ง ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเร่ง (acceleration period) และขั้นสุดท้ายในขั้นที่ 4 หลังจากผ่านไป 4 ถึง 8 ชั่วโมง คอนกรีตจะเริ่มแข็ง และปฏิกิริยาเริ่มช้าลงจนเข้าสู่ steady state ในขั้นที่ 5 ภายใน 12 ถึง 24 ชั่วโมง

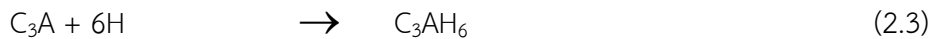
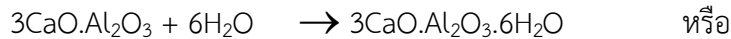
เมื่อ  $C_3S$  สัมผัสกับน้ำ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และไฮดรอกไซด์ไอออนจะสร้างขึ้นอย่างรวดเร็ว และพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นเกิน 12 ภายในไม่กี่นาที เรียกปฏิกิริยานี้ว่าไฮโดรไลซิส ซึ่งจะเริ่มเกิดอย่างรวดเร็วและจะช้าลงเร็วเช่นกัน แต่จะทำปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ ผ่านช่วง domain period ไป ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะช้าลงเมื่อปริมาณของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มมากขึ้นจนเลยจุด critical ผลผลิตของไฮเดรชัน คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide, CH) และ CSH นั้นเริ่มเป็นผลึกจากสารละลาย หลังจากนั้น  $C_3S$  จะเริ่มทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนผิวของ  $C_3S$  ซึ่งครอบคลุมด้วย CSH เมื่อเวลานานขึ้นความหนาของ CSH ที่คลุมจะเริ่มหนาขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดยากขึ้น แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันยังดำเนินต่อไป ในส่วนของ  $C_2S$  มีลักษณะคล้ายกัน แต่จะทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่า  $C_3S$  มาก



ภาพที่ 2.1 อัตราการพัฒนาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3S$  [15]

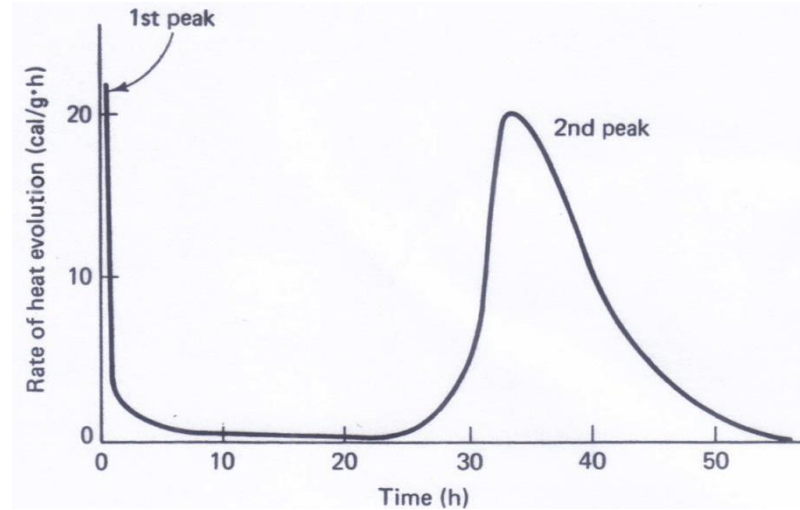
### 2.3.2 แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH)

สมการที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  กับน้ำ ที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วมาก ทำให้ต้องมีการเติมยิปซัม เพื่อชะลอการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ ดังแสดงในสมการที่ 2.4



ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  น้ำและยิปซัม สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง แสดงในภาพที่ 2.2 ในช่วงที่ 1 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นทันทีและได้ผลิตผลเป็นแคลเซียมซัลโฟลูมิโนไฮเดรต ( $\overline{C_6ASH}_2$ ) หรือ ettringite เป็นผลึกคล้ายเข็ม และสร้างตัวรอบๆ  $C_3A$  ทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันทำได้ยากขึ้น ในช่วงที่ 2 ปฏิกิริยาจะช้าลง และจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเป็นเวลาหลายชั่วโมง เมื่อซัลเฟตอิออนทำปฏิกิริยาจนเต็มที ettringite จะทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  แล้วได้เป็น แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ,  $\overline{C_4ASH}_{12}$ ) ซึ่งจะมีซัลเฟตน้อยกว่า ettringite ในช่วงนี้นั้นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตสามารถทำปฏิกิริยากับ ettringite ได้อีกถ้ามีปริมาณของซัลเฟตเพิ่มขึ้น เพราะ ettringite มีปริมาตรที่ใหญ่กว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต และปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ถึงการแตกตัวของคอนกรีตจากซัลเฟต





ภาพที่ 2.2 อัตราการพัฒนาร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  [15]

ในขณะที่  $C_4AF$  จะมีปฏิกิริยาไฮเดรชันคล้ายๆ กับ  $C_3A$  แต่ความเร็วในการทำปฏิกิริยาจะช้ากว่า และมีความร้อนจากปฏิกิริยานี้น้อยกว่า ไฮดรอกไซด์จะทำหน้าที่เช่นเดียวกับอลูมินาในขณะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยได้ผลผลิตคือ  $C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32}$  ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ ettringite และสามารถกลายเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต เช่นเดียวกัน แต่  $C_4AF$  สามารถทนต่อซัลเฟต เป็นเพราะอาจเกิดจากที่ไฮดรอกไซด์ไปแทนที่อยู่ในโครงสร้างของ  $C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32}$  แล้วไปขัดขวางต่อการทำปฏิกิริยาย้อนกลับไปเป็น ettringite อีกครั้ง

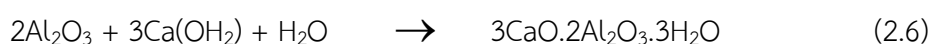
## 2.4 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

### 2.4.1 ความหมายของวัสดุปอซโซลาน

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น เป็นต้น จากมาตรฐาน ASTM C618 [16] ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมาก และมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน

### 2.4.2 ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolan Reaction)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ ปฏิกิริยาของซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) และ/หรืออลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต และได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ตามสมการที่ 2.5 และ 2.6



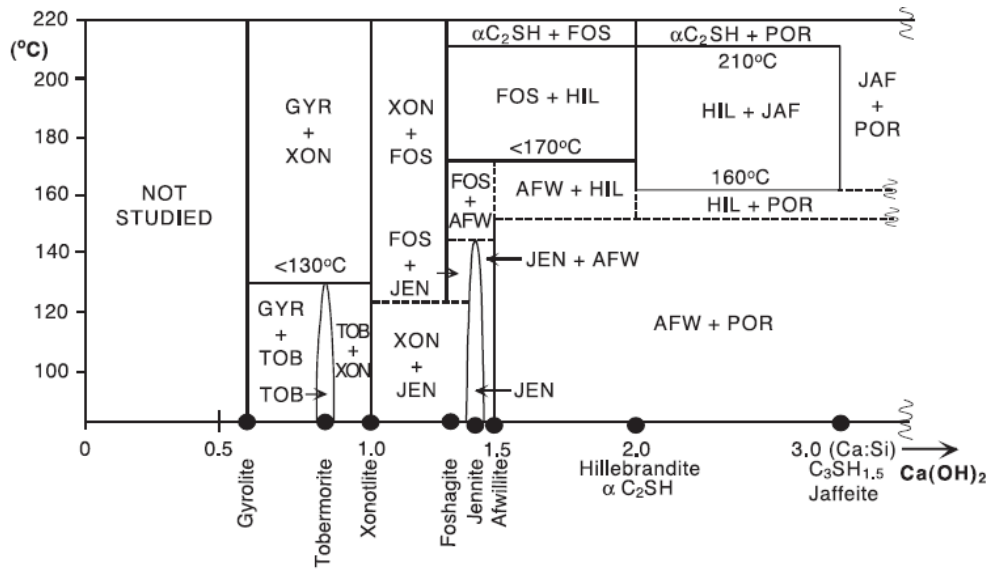
### 2.4.3 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีวัสดุปอซโซลาน

กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต และวัสดุปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) จะละลายออกจากสารประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกตอย่างอิสระในของเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากวัสดุปอซโซลาน โดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับไว้ที่ผิวของอนุภาคของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ตกตะกอนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีค่าอัตราส่วนของ Ca/Si ที่สูง แต่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะมีค่าอัตราส่วนของ Ca/Si ที่ต่ำกว่า และรูพรุนที่สูง โดยปกติวัสดุปอซโซลานเมื่อสัมผัสกับน้ำ จะมีประจุบวก ที่เกิดจากแรงดึงดูดของไฮโดรเนียมไอออน ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) โซเดียมไอออน ( $\text{Na}^+$ ) และโพแทสเซียมไอออน ( $\text{K}^+$ ) ซึ่งการละลายของโซเดียมไอออน และโพแทสเซียมไอออนมากขึ้น จะทำให้เป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) และทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตในที่สุด

### 2.5 การเปลี่ยนแปลงเฟสของระบบ $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$

ในวัสดุปูนซีเมนต์ CSH มักจะถูกพิจารณาเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้มากจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{C}_2\text{S}$  และ  $\text{C}_3\text{S}$  กับน้ำ ในการบ่มที่อุณหภูมิปกติ เนื่องจาก CSH เป็นผลิตภัณฑ์หลักในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต แต่อย่างไรก็ตาม CSH นั้นยังคงแบ่งได้อีกหลายประเภทซึ่งขึ้นอยู่กับ Ca/Si ratio ในช่วง 0.8-2.0 [17] และลักษณะในการบ่ม โดยมีการรายงานว่ารูปแบบของผลึก CSH มากกว่า 30 รูปแบบ [18] อาทิเช่น CSH(I) CSH(II) Jennite และ 1.4 nm tobermorite เป็นต้น ในส่วนของ 1.4 nm tobermorite สามารถเปลี่ยนรูปกลายเป็น 1.1 nm tobermorite เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 80-100 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นไปถึง 300 องศาเซลเซียส ภายในไม่กี่ชั่วโมง จะกลายเป็น 0.9 nm tobermorite [19] แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่รู้กันดีว่าผลิตภัณฑ์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นอยู่ในรูปของอสัณฐานและไม่เสถียรที่ทุกๆ อุณหภูมิ ภายใต้การบ่มด้วยการอบไอน้ำ CSH ที่กึ่งเสถียร กลายเป็นผลึกอย่างรวดเร็ว อาทิเช่น 1.1 nm tobermorite ( $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) และ xonotlite ( $\text{Ca}_6(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{OH})_2$ )

กลไกของระบบ  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ภายใต้ไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal) นั้นได้มีการระบุไว้โดย Taylor [20] ว่าถ้าขาดซิลิกาที่มีความว่องไวหรือมีปริมาณของทรายทำให้ Ca/Si ratio นั้นมากกว่า 2.0 และส่งผลให้ CSH จะกลายเป็น  $\alpha\text{-C}_2\text{S}$  ไฮเดรต ที่อุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส ซึ่งผลึกนี้มีความแน่นและเป็นแผ่น แต่มีลักษณะเป็นรูพรุนและเปราะบาง แต่ถ้าในระบบมีทรายปริมาณมากหรือมีวัสดุปอซโซลาน แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะถูกใช้ไป แล้ว  $\alpha\text{-C}_2\text{S}$  ไฮเดรต จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดผลึกของ CSH ที่มี Ca/Si ratio ที่ต่ำ ในส่วนของเฟสอื่นๆ ที่เกิดภายใต้ไฮโดรเทอร์มอลได้มีการระบุไว้โดย Hong and Glasser (2004) [17] แสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งได้มีการสังเคราะห์เฟสต่างๆ นี้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์และอสัณฐานซิลิกา ในสภาพต่างๆ โดยสรุปในตารางที่ 2.6



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของเฟสต่างๆ ของ CSH ภายใต้ไฮโดรเทอร์มอล [17]

จากรูปจะเห็นได้ว่า tobermorite จะเสถียรที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และจะเริ่มไม่เสถียรที่อุณหภูมิมากกว่า 130 องศาเซลเซียส และจะกลายเป็น xonotlite ซึ่งเฟสของ xonotlite จะเปราะกว่า tobermorite แต่อย่างไรก็ตาม tobermorite ก็สามารถสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่าที่กล่าวข้างต้น ยกตัวอย่าง ในการอบไอน้ำให้ได้เฟส tobermorite ในเชิงพาณิชย์ จะผลิตที่อุณหภูมิในช่วง 160-180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมและวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต ถ้าอุณหภูมิหรือเวลาในการอบไอน้ำมากกว่าจุดสูงสุดของแต่ละส่วนผสม ก็จะทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง นอกจากนี้ Taylor [20] ยังบอกอีกว่าภายใต้ไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ไม่ได้เกิดเพียงแค่ 1.1 nm tobermorite หรือ  $\alpha$ -C<sub>2</sub>S ไฮเดรต แต่ยังสามารถเกิดเฟสอื่นได้อีกด้วย คือ truscottite gyrolite xonotlite hillebrandite และ jaffeite ซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนผสม ในจำนวนเฟสทั้งหมดที่กล่าวมานี้มีเพียง xonotlite ที่เกิดขึ้นได้จากส่วนผสมที่มีซิลิกาจากควอร์ต ซึ่งมีคุณสมบัติการต้านทานความร้อนได้เป็นอย่างดี เหมาะกับนำไปทำเป็นฉนวน ถ้าใช้เป็นอสัณฐานซิลิกา จะเกิดเป็น gyrolite ตามด้วย truscottite ที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ 1.1 nm tobermorite จะเกิดที่ Ca/Si ratio เท่ากัน 0.8-1.0

ตารางที่ 2.4 สภาวะการสังเคราะห์เฟสต่างๆ ด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และอสัณฐานซิลิกา [17]

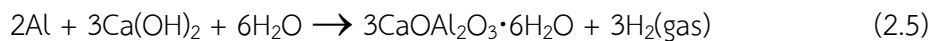
เฟส/สูตรทางเคมี	Ca/Si ratio	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (days)	ความดัน
1.1 nm tobermorite/ Ca <sub>5</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>16</sub> )(OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	~0.83	140	90	Saturated steam
Xonotlite/ Ca <sub>5</sub> (Si <sub>6</sub> O <sub>17</sub> )(OH) <sub>2</sub>	1.0	200	90	Saturated steam
Foshagite/ Ca <sub>4</sub> (Si <sub>3</sub> O <sub>9</sub> )(OH) <sub>2</sub>	1.33	180	56	Saturated steam
Jennite/ Ca <sub>9</sub> H <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>18</sub> (OH) <sub>8</sub> ·6H <sub>2</sub> O	1.45	85	540	-

Afwillite/ Ca <sub>3</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	1.5	85	240	-
Hillebrandite/ Ca <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>	2.0	180	56	Saturated steam
α-C <sub>2</sub> S hydrate/ Ca <sub>2</sub> (HSiO <sub>4</sub> )OH	2.0	170	35	Saturated steam
Tricalcium silicate hydrate/ Ca <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) <sub>6</sub>	3.0	200	28	Saturated steam

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 คอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ (Autoclaved Aerated Concrete)

ปัจจุบันคอนกรีตมวลเบาสามารถผลิตได้จากหลายวิธี เช่น ใช้วัสดุหนักเบาเป็นมวลรวม หรือ การไม่ใช้มวลรวมละเอียด เป็นต้น วิธีหนึ่งที่มีความนิยมอย่างมากคือ คอนกรีตมวลเบารูพรุน (aerated concrete) เนื่องจากทำได้ง่ายและรวดเร็ว [21] โดยทั่วไปคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้จะสารเป็นตัวกระตุ้นสร้างฟองภายในเนื้อคอนกรีต อาทิเช่น ผงอลูมิเนียม สังกะสี และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งมีการผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ. 1930 ที่ประเทศสวีเดน [12] หลังจากนั้นจึงมีการนำวิธีผลิตคอนกรีตมวลเบาชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายงาน เช่น คอนกรีตบล็อก พื้นและผนัง [22] แต่อย่างไรก็ตามสารกระตุ้นฟองที่มักนำมาใช้กันคือผงอลูมิเนียม สมการการเกิดฟองภายในคอนกรีตแสดงไว้ในสมการที่ 2.5



จากสมการจะเห็นได้ว่าโลหะอลูมิเนียมจะไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แล้วเกิดเป็น CAH และไฮโดรเจนก๊าซ ซึ่งไฮโดรเจนก๊าซนี้จะลอยออกสู่อากาศภายนอก ทำให้ภายในคอนกรีตเกิดเป็นรูพรุนขึ้น และส่งผลให้ลดความหนาแน่นลง อยู่ในช่วง 400-800 กก./ลบ.ม. [3] การนำความร้อนต่ำ และสามารถต้านทานความร้อนได้สูง นอกจากนี้ยังคงสามารถลดการใช้วัสดุธรรมชาติและเหมาะกับการนำของเสียมาใช้ เช่น เถ้าลอย เป็นต้น [13] แต่อย่างไรก็ตามคอนกรีตมวลเบารูพรุนยังคงมีข้อเสีย คือ มีกำลังอัดต่ำ ความชื้นและการหดตัวสูง เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ซึ่งข้อเสียที่เกิดขึ้นนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการนำคอนกรีตมวลเบาไปอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14-18 ชั่วโมง [17] แต่ในความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิหรือเวลาที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุและสัดส่วนที่นำมาใช้การผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ ซึ่งนี่เป็นโอกาสที่ทำให้สามารถนำของเสียมาใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบาได้

### 2.6.2 การนำของเสียมาใช้ในการทำคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

การนำของเสียที่เกิดจากการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เถ้าลอย ซิลิกาฟุ้ง และตะกรันเตาถลุงเหล็ก มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์หรือเป็นตัวผสมเพิ่มในการผลิตคอนกรีตสำเร็จผ่านมาแล้วหลายปี ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น เช่น กำลังอัดสูงขึ้น และการซึมผ่านของน้ำลดลง เป็นต้น ในส่วนของคอนกรีตมวลเบาที่มีการผลิตเช่นเดียวกันกับคอนกรีตทั่วไป แต่วัตถุประสงค์ของการนำของเสียมาใช้ในการผลิตมวลเบา คือ ต้องการที่จะลดความหนาแน่น พร้อมกับกับลดของเสียที่จะออกไปสู่สิ่งแวดล้อม ลดค่าใช้จ่าย และลดการใช้วัสดุจากธรรมชาติและพลังงาน [13] ดังนั้นของเสีย

จะนำมาใช้ในคอนกรีตมวลเบาจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือน้ำหนักเบากว่าวัสดุดิบ อาทิเช่น ทราย หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Kurama และคณะ (2009) ได้ศึกษาผลกระทบของเถ้าหนักในการทำคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ พบว่าความสามารถในการทำปฏิกิริยาของซิลิกาในเถ้าหนักที่ว่องไว ทำให้เพิ่มความสามารถในการกลายเป็นผลึก tobermorite ได้ และส่งผลให้พัฒนากำลังอัดแต่ความหนาแน่นต่ำได้ ส่วนของ Karakurt และคณะ (2004) พบว่า การใช้ซีไอโลสต์ขนาดใหญ่ (0.5-1.0 มม.) แทนที่ทรายจนถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทำให้พัฒนากำลังอัดได้เป็นอย่างดี และการใช้ซีไอโลสต์ขนาดเล็ก (100 ไมครอน) มีความต้องการน้ำในการผสมมากกว่าซีไอโลสต์ขนาดใหญ่ ในขณะที่ Mostafa (2005) ใช้ตะกรันเตาถลุงเย็นในอากาศ (air-cooled slag) แทนที่ทรายและปูนขาว และพบว่าการใช้ตะกรันสามารถลดเวลาในการอบไอน้ำได้ โดยกำลังอัดที่สูงที่สุดได้มาจากส่วนผสมที่มีตะกรันร้อยละ 50 แทนที่ทราย ผสมกับอัตราส่วนปูนขาวที่ต่ำร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก Wongkeo และ Chaipanich (2010) ศึกษาผลกระทบของการใช้เถ้าหนักและซิลิกาฟูมในการผลิตคอนกรีตมวลเบา และสรุปได้ว่าคอนกรีตมวลเบาที่ใช้ของเสียทั้งสองชนิดนี้สามารถพัฒนากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตมวลเบาควบคุมทั้งที่บ่มธรรมดา 28 วัน และบ่มด้วยการอบไอน้ำ ในขณะที่ Holt และ Raivio (2005) พบว่าการใช้ gasification residues ที่มีปริมาณออกซิเจนสูง จะทำให้ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำต่ำลงได้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในงานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จากบริษัทปูนซีเมนต์ไทย โดยคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง X-ray fluorescence (XRF; WDXRF PW2400)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบ

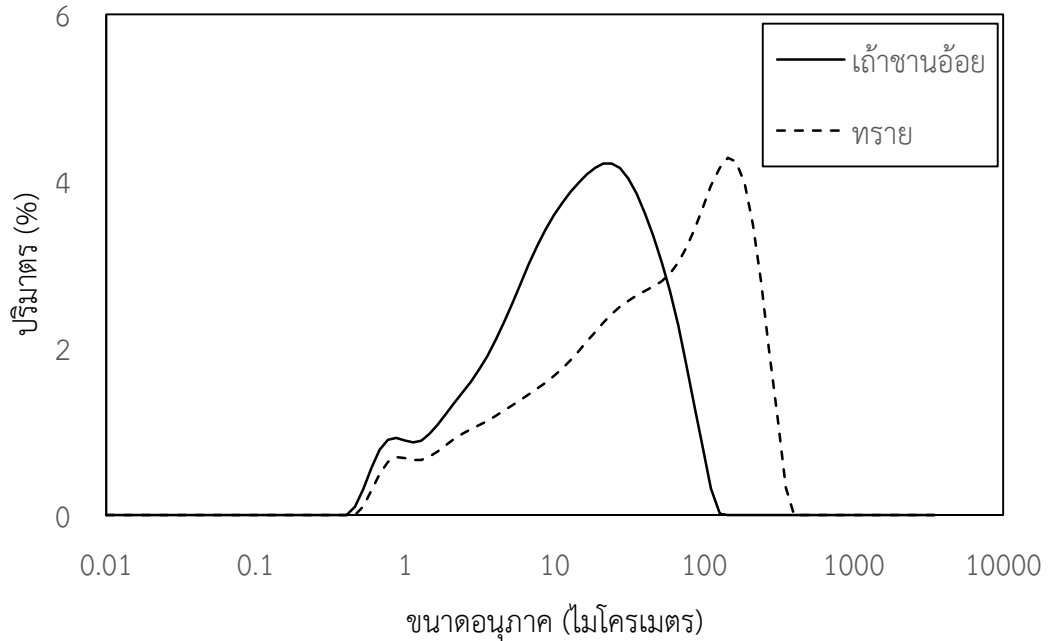
Parameters	OPC	BA	Quick lime	River sand
CaO	66.20	7.85	94.7	-
SiO <sub>2</sub>	21.11	68.60	0.89	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.65	3.97	0.11	-
Na <sub>2</sub> O	0.20	1.07	-	-
Fe <sub>2</sub> O	3.22	3.16	0.10	-
MgO	0.79	1.69	2.61	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	1.71	0.02	-
K <sub>2</sub> O	0.75	3.92	0.01	-
TiO <sub>2</sub>	-	0.27	2.34	-
MnO	-	0.14	-	-
SO <sub>3</sub>	3.01	1.44	-	-
Cl <sup>-</sup>	-	0.95	-	-
LOI (%)	1.69	5.22	-	-
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.35	2.34	2.58
คั่งค้างบนตะแกรง เบอร์ 325 (%)	14	21.8	-	-
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	-	21.81	-	76.70
พื้นที่ผิว (มม. <sup>2</sup> /ก.)	-	24.91	-	-

หมายเหตุ: OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

BA = เถ้าขาน้อย

##### 3.1.2 ททราย

ทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นทรายแม่น้ำ และใช้เป็นมวลรวมละเอียด โดยทรายจะมีการเตรียมโดยการนำไปบดด้วยเครื่อง ball mill ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใกล้ 100 ไมครอน คุณสมบัติทางกายภาพและการกระจายตัวของอนุภาคของทรายระบุไว้ในตารางที่ 3.1 และภาพที่ 3.1 ตามลำดับ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของทรายวิเคราะห์โดยใช้มาตรฐานของ ASTM C128 [23]



ภาพที่ 3.1 การกระจายตัวของอนุภาคของทรายและเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบดแล้ว

### 3.1.3 ปูนขาว

ปูนขาวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นปูนร้อน (quick lime, CaO) ซึ่งได้มาจากโรงงาน Golden Lime Public Company Limited คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของปูนร้อนแสดงในตารางที่ 3.1

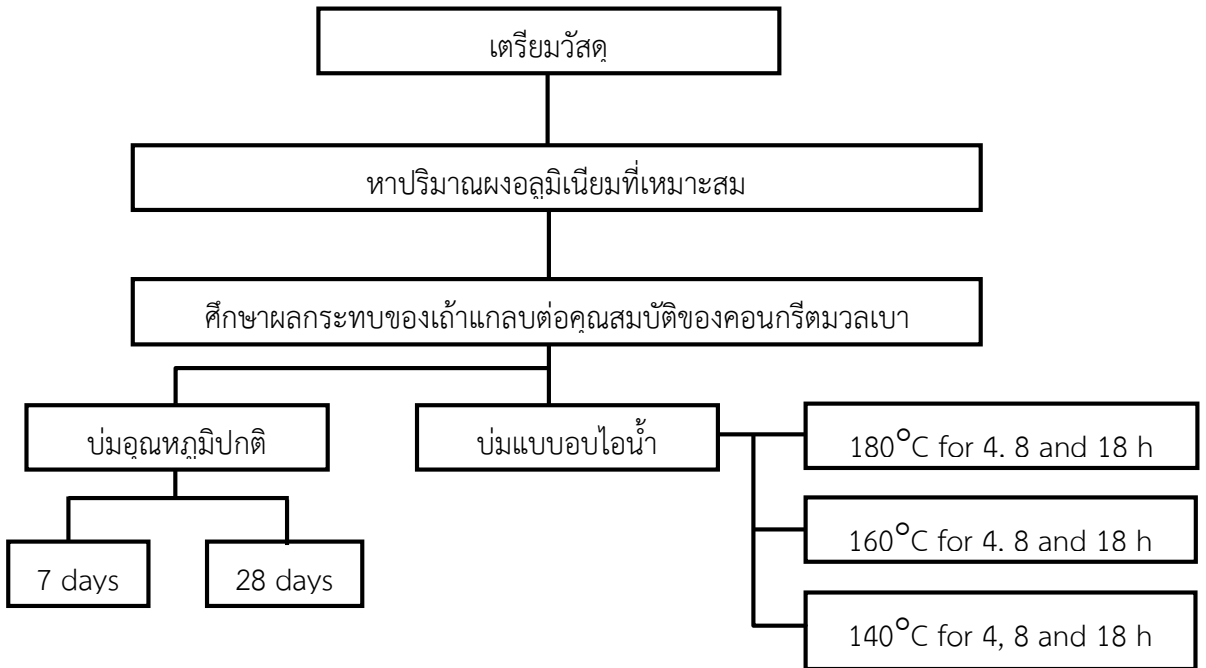
### 3.1.4 ผงอลูมิเนียม

ผงอลูมิเนียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นผงอลูมิเนียมแลปเกรด ยี่ห้อ HIMEDIA ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพของผงอลูมิเนียม มีความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99 และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย,  $d_{50}$  ที่ 34 ไมครอน

### 3.1.5 เถ้าขานอ้อย

เถ้าขานอ้อยในงานวิจัยนี้ได้รับมาจากโรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง ตำบลท่าผา อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี การเตรียมเถ้าขานอ้อยจะเริ่มจากอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เถ้าขานอ้อยแห้ง หลังจากนั้นนำไปบดด้วยเครื่อง ball mill ด้วยลูกเหล็ก 63 ลูก เป็นน้ำหนัก 4.6 กก. เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้ได้เถ้าขานอ้อยที่มีขนาดอนุภาคคงค้างบนตะแกรง 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C618 [16] คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากลบแสดงในตารางที่ 3.1 และการกระจายตัวของอนุภาคและลักษณะความเป็นผลึกของเถ้าขานอ้อย ซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Particle size distribution แสดงในภาพที่ 3.1 โดยเถ้าขานอ้อยหลังจากการบดจะนำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

### 3.3 การเตรียมตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนผสมของวัสดุที่เริ่มต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสาน (Water/Binder ratio, W/B ratio) แต่ละอัตราส่วนผสมหาได้จากวิธี flow table method ตามมาตรฐานของ ASTM C109 [24] ในการเตรียมตัวอย่างเริ่มต้นจากคำนวณปริมาณวัสดุเริ่มต้นให้พอสำหรับหล่อตัวอย่าง 6 ก้อน และชั่งน้ำหนัก หลังจากน้ำหนักส่วนผสมที่เป็นของแข็งในแต่ละอัตราส่วนผสม อาทิเช่น ปูนซีเมนต์ ปูนขาว ททราย เถ้าขาน้อย และผงอลูมิเนียม นำมาใส่ลงในหม้อของ Horbart Mixer แล้วเปิดเครื่องด้วยความเร็วกวนที่เบอร์ 1 เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นเติมน้ำลงไปและกวนด้วยความเร็วเดิมอีก 1 นาที ปิดเครื่องและเกลี่ยให้ตัวอย่างลงไปอยู่ตรงกลางของหม้อ เปิดเครื่องอีกครั้งด้วยความเร็วกวนเบอร์ 2 เป็นเวลา 30 วินาที ปิดเครื่องแล้วเทตัวอย่างลงในแบบเหล็กขนาด 5×5×5 ลบ.ซม. และตั้งทิ้งไว้จนปฏิบัติการสร้างฟองสิ้นสุด เป็นระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นส่วนขยายออกมาเกินแบบหล่อจะถูกตัดด้วยเอ็น

ในตัวอย่างที่บ่มอุณหภูมิปกติ ตัวอย่างจะบ่มในแบบหล่อเหล็กเป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นจะถอดออกจากแบบ แล้วนำไปบ่มในน้ำต่อเป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน ในส่วนของตัวอย่างที่อบไอน้ำ จะมีการอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างสามารถคงรูปได้ จึงถอดออกจากแบบ แล้วนำไปอบไอน้ำที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน ดังที่แสดงในภาพที่ 3.4 ในการอบไอน้ำ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นโดยใช้อัตรา 15 องศาเซลเซียสต่อ 10 นาที จนไปถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และคงที่อุณหภูมินั้นๆ ตามระยะเวลาที่กำหนด โดยให้ความความคาดเคลื่อนเท่ากับ ±5 องศาเซลเซียส หลังจากสิ้นสุดการอบไอน้ำ จะทิ้งให้เย็นจนอุณหภูมิในเครื่องอบไอน้ำเหลือ 50 องศาเซลเซียส จึงเอาออกจากเครื่องอบไอน้ำ



หลังจากการบ่มเสร็จแล้ว สำหรับการทดสอบกำลังอัด ตัวอย่างจะถูกอบในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำที่เป็นส่วนเกินในก้อนตัวอย่างออกไป ในส่วนของการทดสอบหาความหนาแน่น ตัวอย่างจะอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เช่นกัน

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในปริมาณทั้งหมด 1 กิโลกรัม

Mixture	OPC (กรัม)	Lime (กรัม)	Sand (กรัม)	BA (กรัม)	Al/B (ร้อยละ)	W/B (ร้อยละ)
CT	450	50	500	-	0.7	0.64
A10	450	50	450	50	0.7	0.68
A20	450	50	400	100	0.7	0.72
A30	450	50	350	150	0.7	0.73
A50	450	50	250	250	0.7	0.86

หมายเหตุ: OPC = ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Sand = ทรายแม่น้ำ

BA = เถ้าขาน้อย

Al = ปริมาณผงอลูมิเนียม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

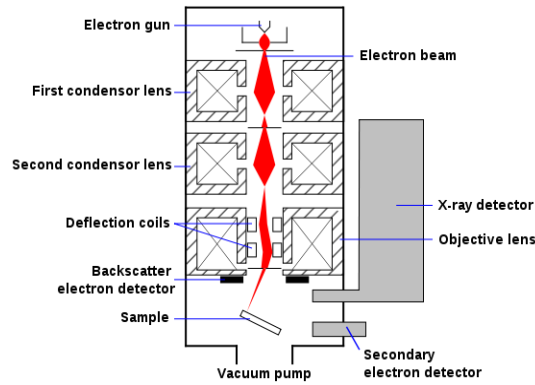
W/B = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และปูนขาว)

### 3.4 การวิเคราะห์ระดับจุลภาค

โครงสร้างในระดับจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างในงานวิจัยนี้ทั้งบ่มที่อุณหภูมิปกติและที่อบไอน้ำวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD; Miniflex using Cu K $\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) at a voltage of 40 kV and 40 mA) ที่ step size 0.02 องศา scan rate 3 องศาต่อนาที และสแกนในช่วง 10 ถึง 60 องศา Scanning electron spectrometry (SEM, JEOL-JSM-6400) โดยที่ตัวอย่างเคลือบด้วยทอง และ energy dispersive X-ray spectrometry (EDX) โดย XRD วิเคราะห์ความเป็นผลึกและองค์ประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นของตัวอย่าง ในส่วน SEM จะเป็นการถ่ายภาพของพื้นผิวของตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น โดยจะวิเคราะห์ร่วมกับ EDX เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของผลึก

#### 3.4.1 Scanning Electron Spectrometry (SEM)

หลักการการทำงานของ SEM จะเป็นการใช้อิเล็กตรอนเป็นลำแสงส่องกราดเพื่อถ่ายภาพ โดยสามารถถ่ายภาพได้ตั้งแต่กำลังขยาย 10 ถึง 1000000 เท่า และมีความคมชัดสูง (5 นาโนเมตร) โดย SEM สามารถใช้ร่วมกับเครื่องมือหรือเทคนิคอื่นๆ ได้ อาทิเช่น EDS และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) เพื่อมาองค์ประกอบในตัวอย่าง ลักษณะการทำงานของเครื่อง SEM แสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.3 การทำงานของเครื่อง SEM [25]

โดยทั่วไปลำแสงของอิเล็กตรอนของเครื่อง SEM จะถูกปล่อยมาจากปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ผ่านช่องที่เป็นสุญญากาศ โดยการเร่งความต่างศักย์จาก 0-30 กิโลโวลต์ ลำแสงจะถูกกำจัดวงในการฉาย โดยใช้เลนส์ (condenser lenses) 1 หรือ 2 อัน ให้แต่ละจุดมีขนาด 0.4-5 นาโนเมตร และผ่าน deflection coil เพื่อการหักเหของลำแสงในแกน x และ y ทำให้มีการส่องกราดในพื้นที่ผิวของตัวอย่าง หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งเข้ามาสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อแปลผลให้กลายเป็นรูปภาพ

### 3.4.2 X-ray Diffractometer (XRD)

XRD เป็นเทคนิคเบื้องต้นในการระบุเฟสของผลึกต่างๆ ที่เกิดขึ้น และสามารถบอกถึงรายละเอียดของ unit cell dimensions หลักการของ XRD นั้นสร้างขึ้นมาจากกฎของ Bragg's Law ดังแสดงในสมการที่ 3.1 เมื่อรังสี X ฉายไปโดนอะตอมด้วยคลื่นความถี่ที่คงที่ มุมตกกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับ lattice spacing ของในแต่ละผลึก หลังจากนั้นมุมตกกระทบของรังสี X จะถูกบันทึกวิเคราะห์และแปลผลออกมาสู่คอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้เทคนิค XRD ใช้สำหรับวิเคราะห์เฟสของผลึกต่างๆ ที่เกิดขึ้นในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งจะวิเคราะห์ในรูปแบบของผง

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

(3.1)

ซึ่ง d คือ ระยะห่างของเลเยอร์อะตอมในผลึก

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสี X

n คือ เลขจำนวนเต็ม

## 3.5 การวิเคราะห์ทางกายภาพและเชิงกล

### 3.5.1 กำลังอัด

ในงานทางด้านคอนกรีต กำลังอัดนั้นถือได้ว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างมาก เพราะว่าการกำลังอัดของคอนกรีตเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีต ถึงแม้ว่าในคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำจะไม่ต้องการกำลังอัดที่สูงมากนัก แต่ก็ยังถือว่าการกำลังอัดเป็นตัวแปรที่สำคัญเช่นเดิม ในงานวิจัยนี้กำลังอัดจะใช้ตัวอย่างที่มีขนาด 5×5×5 ลบ.ซม. จำนวน 5 ตัวอย่าง ในแต่ละอัตราส่วนผสม แต่ละวิธีการบ่มและระยะเวลา ซึ่งจะใช้หลักการตามมาตรฐานของ ASTM C109 [24] โดย

ผลการทดสอบจะมีการระบุใช้หน่วยอย่างน้อย 0.1 เมกะปาสคาล และใช้ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิด ร้อยละ 10

### 3.5.2 ความหนาแน่นแห้งและการดูดซึมน้ำ

ความหนาแน่นแห้งจะมีการทดสอบทั้งในการบ่มแบบอุณหภูมิปกติและอบไอน้ำและทดสอบ จำนวน 5 ตัวอย่าง ในแต่ละอัตราส่วนผสม แต่ละวิธีการบ่มและระยะเวลาเช่นเดียวกับการทดสอบ กำลังอัด ความหนาแน่นแห้งนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 ซึ่งตัวอย่างที่แห้งจะถูกอบในเตา อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่แห้งไปแช่น้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าให้ผิวแห้ง และชั่งน้ำหนัก โดยการดูดซึมน้ำสามารถ คำนวณได้ตามสมการที่ 3.3

$$\text{ความหนาแน่นแห้ง} = (\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่แห้ง}) / (\text{ปริมาตรของตัวอย่างที่แห้ง}) \quad (3.2)$$

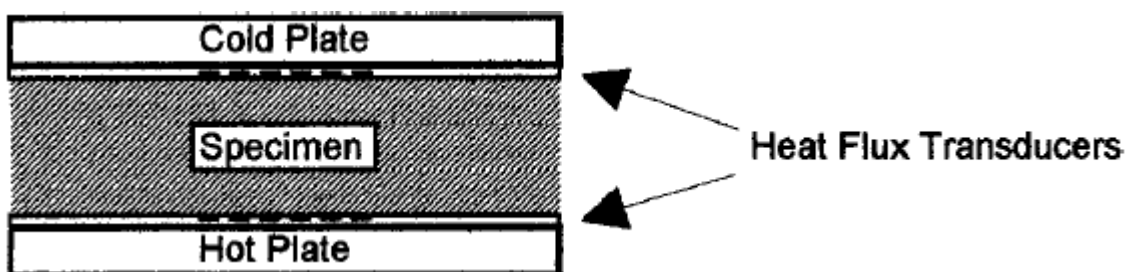
$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = 100 \times (B - A) / A \quad (3.3)$$

โดย A คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)

B คือ น้ำหนักตัวอย่างอิมตัวผิวแห้ง (กรัม)

### 3.5.3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นการวัดเพื่อบ่งบอกถึงการถ่ายเทความร้อนของวัสดุหรือ ส่วนประกอบนั้นๆ ในงานวิจัยนี้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะวิเคราะห์โดยใช้ Heat Flow Meter Method ตามมาตรฐานของ ASTM C518 [26] ซึ่งใช้ตัวอย่างขนาด 30×30×5 ลบ.ซม. ขั้นตอนการติดตั้งเพื่อการวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแสดงในภาพที่ 3.4 วิธีนี้จะเป็นการวัด การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นซึ่งตั้งอยู่ระหว่างแผ่นควบคุมอุณหภูมิทั้งสอง แผ่น ซึ่งทั้งสองแผ่นจะมีอุณหภูมิที่ต่างกัน หลังจากนั้น heat flux transducer ที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายของ แต่ละแผ่นควบคุมอุณหภูมิจะแปลผลการถ่ายเทความร้อนนี้ให้กลายเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้ว ส่งไปเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลในคอมพิวเตอร์ ผ่านซอฟต์แวร์ที่สร้างมาจากกฎของ Fourier's Law ที่ เกี่ยวกับการนำความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 3.3



ภาพที่ 3.4 การติดตั้งในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$$\lambda = \frac{l_s \times [(k_1 + (k_2 \times \bar{T})) + ((k_3 \times (k_4 \times \bar{T})) \times \text{HFM} + ((k_5 + (k_6 \times \bar{T})) \times \text{HFM}^2)]}{dT} \quad (3.3)$$

ซึ่ง  $\lambda$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (วัตต์/ม.เคลวิน)

$l_s$  คือ ความหนาของตัวอย่าง (ม.)

$dT$  คือ ค่าแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของทั้งสองด้านของตัวอย่าง ( $T_1-T_2$ , องศาเซลเซียส)

$\bar{T}$  คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ  $((T_1+T_2)/2)$ , องศาเซลเซียส

HFM คือ ค่าการอ่านของ heat flow meter (มิลลิวัตต์)

$k_1$  คือ -21.2814

$k_2$  คือ 0.4101

$k_3$  คือ 4.9286

$k_4$  คือ 0.0048

$k_5$  คือ 0.0301

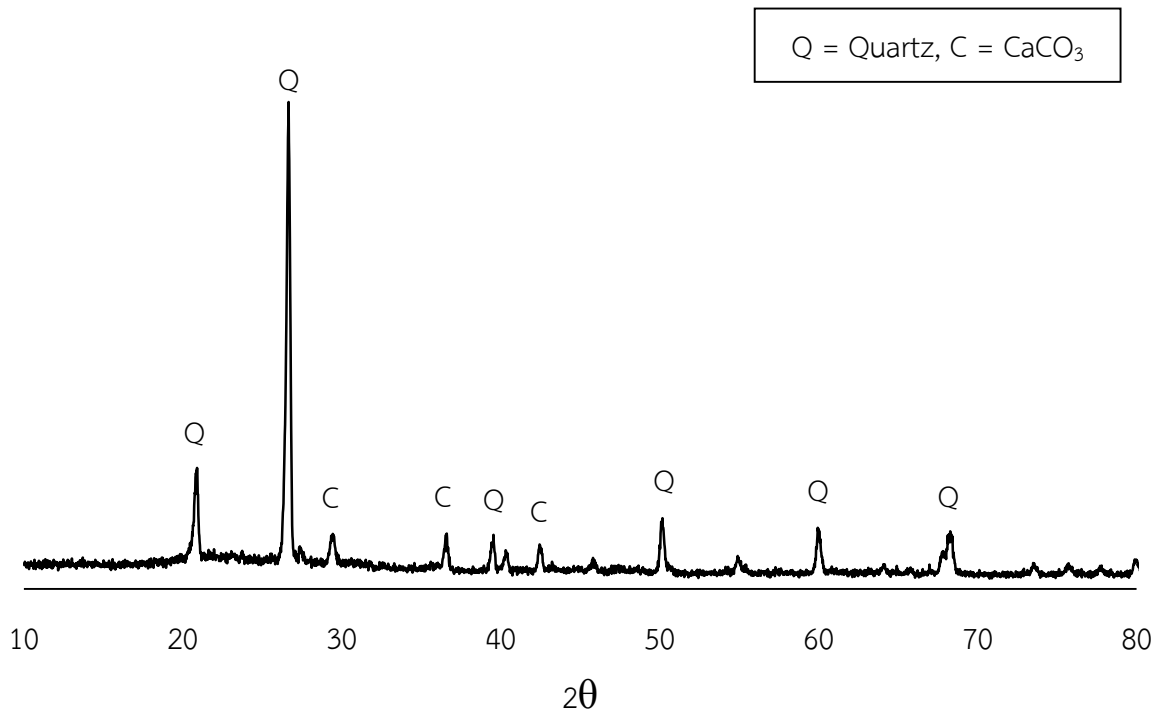
$k_6$  คือ 0.0002

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะโครงสร้างของเถ้าขาน้อย

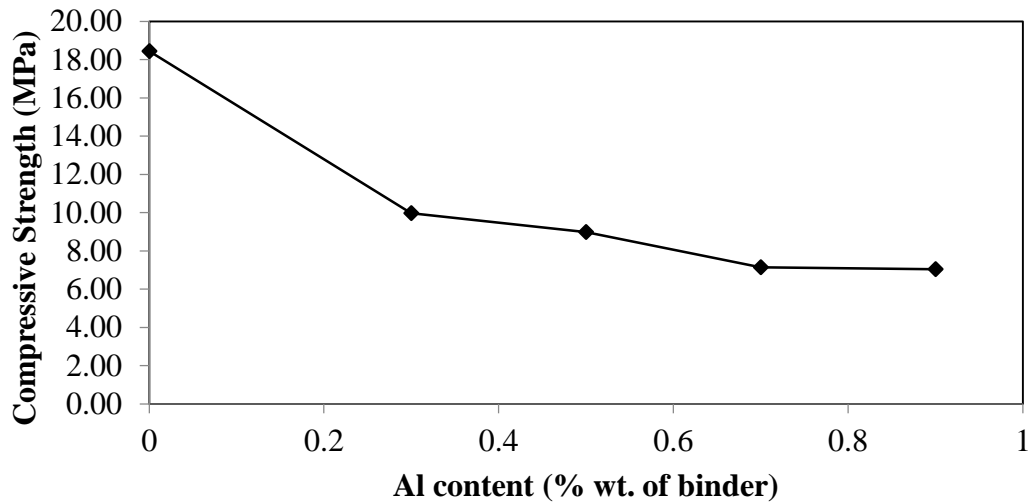
ตารางที่ 3.1 แสดงถึงคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขาน้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าขาน้อย คือ ซิลิกา (68.60%) แคลเซียมออกไซด์ (7.85%) และอลูมินาออกไซด์ (3.97%) และมีค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) สูงถึง 5.22% โดยค่า LOI จะสามารถบอกถึงปริมาณคาร์บอนที่ยังหลงเหลืออยู่ เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่ลักษณะโครงสร้างของเถ้าขาน้อยที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ที่พบควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 20.8 26.6 29.4 39.4 50.1 59.9 และ 68.4 และแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) หรือ Calcite ที่ตำแหน่ง 36.5 และ 42.4 โดย Calcite เกิดจากกระบวนการดักจับฝุ่นด้วยน้ำ (Waste Scrubber) ที่ผสมปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ทำให้เมื่อเจอกับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จึงเปลี่ยนไปเป็น Calcite ยึดติดอยู่ที่ผิวของเถ้าขาน้อย



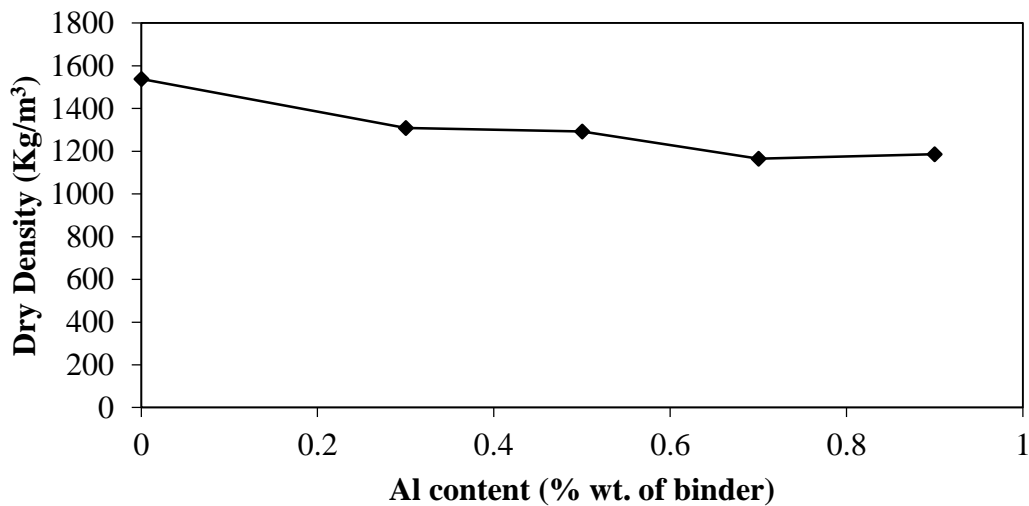
ภาพที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างของเถ้าขาน้อย

#### 4.2 การศึกษาผลกระทบของผงอลูมิเนียมต่อกำลังอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาแบบไม่อบไอน้ำ

ในการศึกษานี้เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณผงอลูมิเนียมที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดสอบต่อไป โดยใช้ผงอลูมิเนียมเท่ากับร้อยละ 0 0.3 0.5 0.7 และ 0.9 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และปูนขาว) และบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน แล้วนำมาทดสอบกำลังอัดและความหนาแน่นแห้ง ซึ่งผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

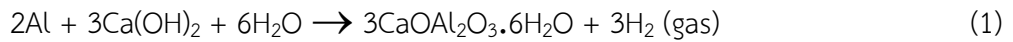


ภาพที่ 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาไม่อบไอน้ำที่ปริมาณผงอลูมิเนียมต่างๆ กัน



ภาพที่ 4.3 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาไม่อบไอน้ำที่ปริมาณผงอลูมิเนียมต่างๆ กัน

จากภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการเติมผงอลูมิเนียมลงในส่วนผสม ส่งผลให้กำลังอัดและความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าลดลง เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของผงอลูมิเนียมจนถึงร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก การเพิ่มอัตราส่วนของผงอลูมิเนียมมากกว่าร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก กำลังอัดและความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะอลูมิเนียมในผงอลูมิเนียม ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือต่าง แล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจน ตามสมการที่ 1 ทำให้เกิดรูพรุนภายในคอนกรีต [27] ถึงแม้ว่าการใช้ผงอลูมิเนียมจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้น ซึ่งเป็นที่รู้กันดีว่าเป็นแก๊สที่ติดไฟได้ง่าย แต่ทว่าปริมาณผงอลูมิเนียมที่เติมเพื่อให้เกิดฟองใช้ปริมาณที่น้อยมาก จึงเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ไม่เพียงพอต่อการลุกติดไฟได้ ประกอบกับแก๊สที่เกิดขึ้นจะค่อยๆ ปลดปล่อยออกมาจากเนื้อคอนกรีต จึงทำให้กระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาด้วยการใช้ผงอลูมิเนียมจึงไม่เป็นอันตราย



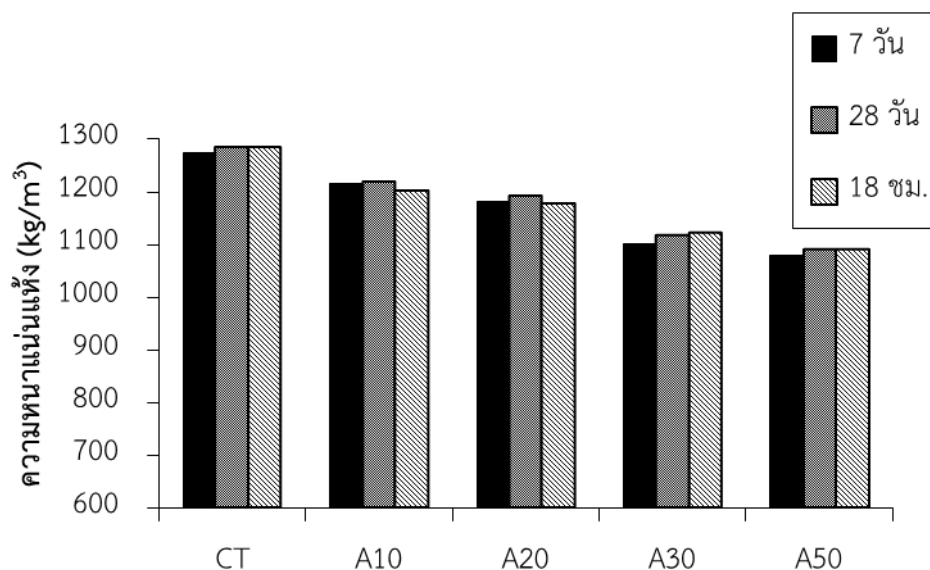
จากผลกำลังอัดและความหนาแน่นแห้งของการทดสอบนี้ สรุปได้ว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของการเติมผงอลูมิเนียม เท่ากับ ร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยอัตราส่วนของผงอลูมิเนียมนี้จะนำไปใช้ในอัตราส่วนผสมของการศึกษาการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขาน้อยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาทั้งอบไอน้ำและไม่อบไอน้ำ

#### 4.3 การศึกษาผลกระทบบของเถ้าขาน้อยต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาอบและไม่อบไอน้ำ

ในการศึกษานี้จะนำเถ้าขาน้อยมาแทนที่ทรายที่อัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบบของการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชม. เปรียบเทียบกับที่ไม่อบไอน้ำ เป็นระยะเวลา 7 และ 28 วัน โดยผลจากการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 ความหนาแน่นแห้ง และการดูดซึมน้ำ

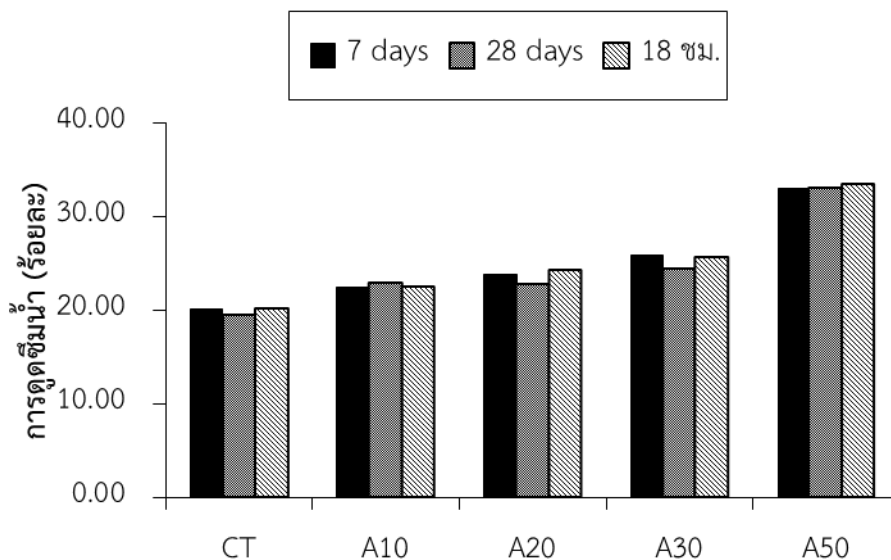
ภาพที่ 4.4 แสดงความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาทั้งอบไอน้ำและไม่อบไอน้ำ ที่การอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง พบว่าความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขาน้อย โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่าง CT จะมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 6.53 8.34 12.71 และ 15.22 ของตัวอย่าง A10 A20 A30 และ A50 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าขาน้อย (2.35) มีค่าน้อยกว่าทราย (2.58) ทำให้เมื่อมีการแทนที่ทราย จะส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ สอดคล้องกับงานวิจัยของวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าการใช้วัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมหรือการเกษตรที่มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าทรายในการผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ จะสามารถลดความหนาแน่นแห้งหรือทำให้มีน้ำหนักเบาลงได้ [3, 28-30]



ภาพที่ 4.4 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่ 7 และ 28 วัน และที่อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

ส่วนคอนกรีตมวลเบาที่ไม่อบไอน้ำ พบว่าความหนาแน่นแห้งยังคงลดลงตามอัตราการแทนที่ทรายด้วยถ้ำซานอ้อยเช่นเดียวกับคอนกรีตมวลเบาที่อบไอน้ำ แต่จากการทดลองยังพบอีกว่าตัวอย่างที่บ่มที่อายุ 7 วัน จะมีค่าความหนาแน่นแห้งน้อยกว่าอายุการบ่มที่ 28 วัน ในทุกอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยถ้ำซานอ้อย ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญต่อการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต โดยผลผลิตของปฏิกิริยาจะได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตหรือ CSH ซึ่ง CSH นี้จะเติบโตและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาในการบ่ม และจะไปช่วยลดรูพรุนในคอนกรีตให้ลดลงด้วย [20, 31] ดังนั้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวจึงส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่ไม่อบไอน้ำ จึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการบ่มเพิ่มจาก 7 วัน ไปเป็น 28 วัน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ พบว่ามีค่าความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับที่คอนกรีตมวลเบาที่ไม่อบไอน้ำ ที่ 28 วัน เนื่องจากการอบไอน้ำจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เร็วยิ่งขึ้น จึงทำให้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาภายในไม่กี่ชั่วโมง และเทียบเท่ากับการบ่มคอนกรีตแบบทั่วไปที่อายุ 28 วัน [20]

การดูดซึมน้ำนั้นปกติแล้วจะแปรผกผันกับความหนาแน่นแห้ง กล่าวคือหากความหนาแน่นแห้งมีค่ามาก การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลง หรือในทางกลับกันหากความหนาแน่นแห้งมีค่าน้อย การดูดซึมน้ำจะมีค่าลดลง จากผลความหนาแน่นแห้งชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าลดลงตามอัตราการแทนที่ทรายด้วยถ้ำซานอ้อย แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปลี่ยนวิธีการบ่ม ดังนั้นผลการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยถ้ำซานอ้อยเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของถ้ำซานอ้อยที่มีรูพรุน และความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าทราย ทำให้การขยายตัวของคอนกรีตในช่วงการปฏิกิริยาการสร้างฟองเกิดได้ดีกว่า จึงเกิดรูพรุนภายในคอนกรีตมากกว่าตัวอย่างที่ใช้เพียงทรายอย่างเดียว [28] ในงานวิจัยนี้การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาทั้งอบและไม่อบไอน้ำ มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 19.38 – 33.47



ภาพที่ 4.5 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาที่ 7 และ 28 วัน และที่อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

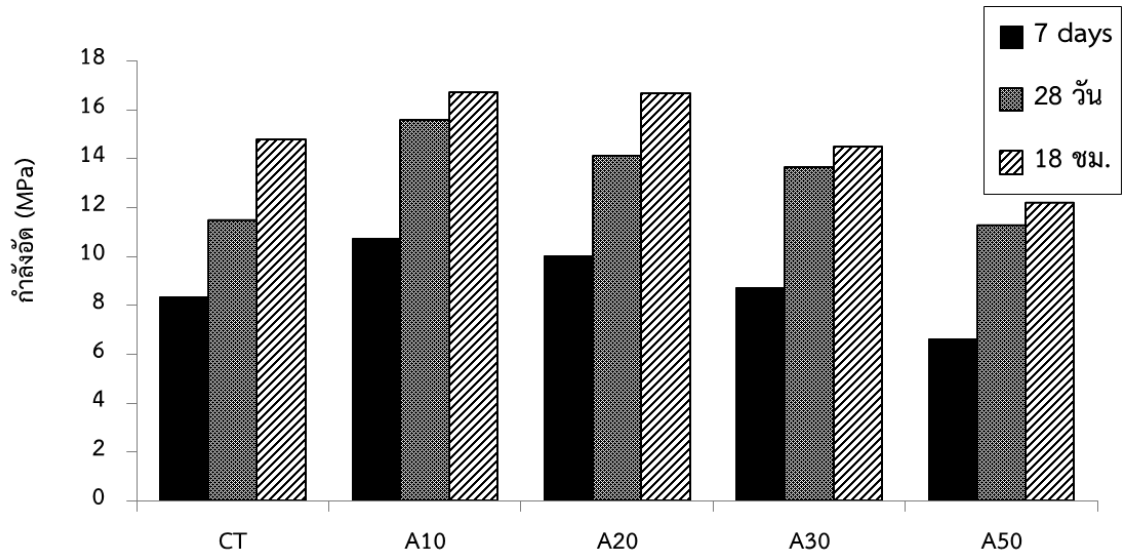


### 4.3.2 กำลังอัด

กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาทั้งอบและไม่อบไอน้ำ แสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ไม่อบไอน้ำจะมีกำลังเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อย เมื่อมีระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต CSH (ผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน) จะเป็นตัวแปรหลักในการให้กำลังแก่คอนกรีต โดย CSH จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม [32, 33] โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตที่อายุ 28 วันจะมีกำลังอัด ประมาณร้อยละ 70-80 ซึ่งอายุการบ่มที่มากกว่านี้ กำลังอัดของคอนกรีตยังคงมีการพัฒนาไปเรื่อยๆ หากมีน้ำไปทำปฏิกิริยาต่อ แต่จะมีการพัฒนาที่ช้ามาก ดังนั้นจึงถือว่าที่ 28 วัน เป็นกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต [33]

ในการบ่มด้วยการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชม. พบว่าสามารถพัฒนากำลังอัดให้มีค่ามากกว่าการบ่มแบบไม่อบน้ำที่อายุ 28 วัน ในทุกอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อย ในการบ่มด้วยไอน้ำนี้จะไปทำการกระตุ้นให้เกิดผลิตผล CSH ได้เร็วขึ้น และเปลี่ยน CSH ที่อยู่ในรูปอสัณฐานให้กลายเป็นในรูปแบบผลึก ในการเปลี่ยนไปเป็นในรูปแบบผลึกนี้จะสามารถอยู่ในหลากหลายโครงสร้างทางเคมี เช่น xonotlite ( $\text{Ca}_6(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{OH})_2$ ) jennite ( $\text{Ca}_9\text{SiO}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) และ tobermorite ( $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) การที่จะเปลี่ยนไปอยู่ในโครงสร้างต่างๆ นี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ Ca/Si ratio และระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบไอน้ำ ในกลุ่มผลึกเหล่านี้ tobermorite เป็นผลึกที่ให้กำลังอัดสูงที่สุด โดยจะเกิดขึ้นด้วย 3 ขั้นตอน คือ 1. เกิดอสัณฐาน CSH ในช่วงต้นของปฏิกิริยา 2. ซิลิกาอ็อนจะละลายออกมาจากวัสดุซิลิกา เช่น ทราย เป็นต้น ไปทำปฏิกิริยากับ CSH แล้วเริ่มเปลี่ยนรูปไปเป็น tobermorite และ 3. tobermorite กลายเป็นรูปผลึก และซิลิกาอ็อนละลายออกมาน้อยลง [34] จากทฤษฎีดังกล่าวจึงส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่หลังจากการอบไอน้ำมีความแข็งแรงขึ้นภายในระยะเวลาไม่กี่ชั่วโมง และมีกำลังอัดมากกว่าการไม่อบไอน้ำที่ 28 วัน

การแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อยส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการแทนที่ถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก การแทนที่ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงทั้งการอบและไม่อบไอน้ำ เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 68.60 ตามด้วยแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 7.85 อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 3.97 และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 3.16 ซึ่งตามมาตรฐานของ ASTM C618 กำหนดให้วัสดุปอซโซลาน class F จะต้องมีส่วนประกอบรวมของซิลิกาออกไซด์ อลูมินาออกไซด์และเฟอร์ริกออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 [16] ทำให้เถ้าชานอ้อยที่ใช้ในงานวิจัยนี้จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน class F ดังนั้นเมื่อมีการนำไปแทนที่ทรายในการทำคอนกรีตมวลเบา จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานนอกเหนือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นไปด้วย [35] จึงทำให้คอนกรีตมวลเบาที่มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าชานอ้อย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการแทนที่ทรายที่มากขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจำเป็นต้องใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ที่เป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นเดียวกับกับ CSH [32, 33] จึงทำให้เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าชานอ้อยที่ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา แล้วหลงเหลือเถ้าชานอ้อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาไว้ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ในงานวิจัยนี้กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาของตัวอย่าง CT A10 A20 A30 และ A50 มีค่าเท่ากับ 11.47 15.57 14.11 13.65 และ 11.24 MPa สำหรับที่อายุการบ่ม 28 วัน และเท่ากับ 14.77 16.68 16.65 14.49 และ 12.18 MPa สำหรับที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ตามลำดับ

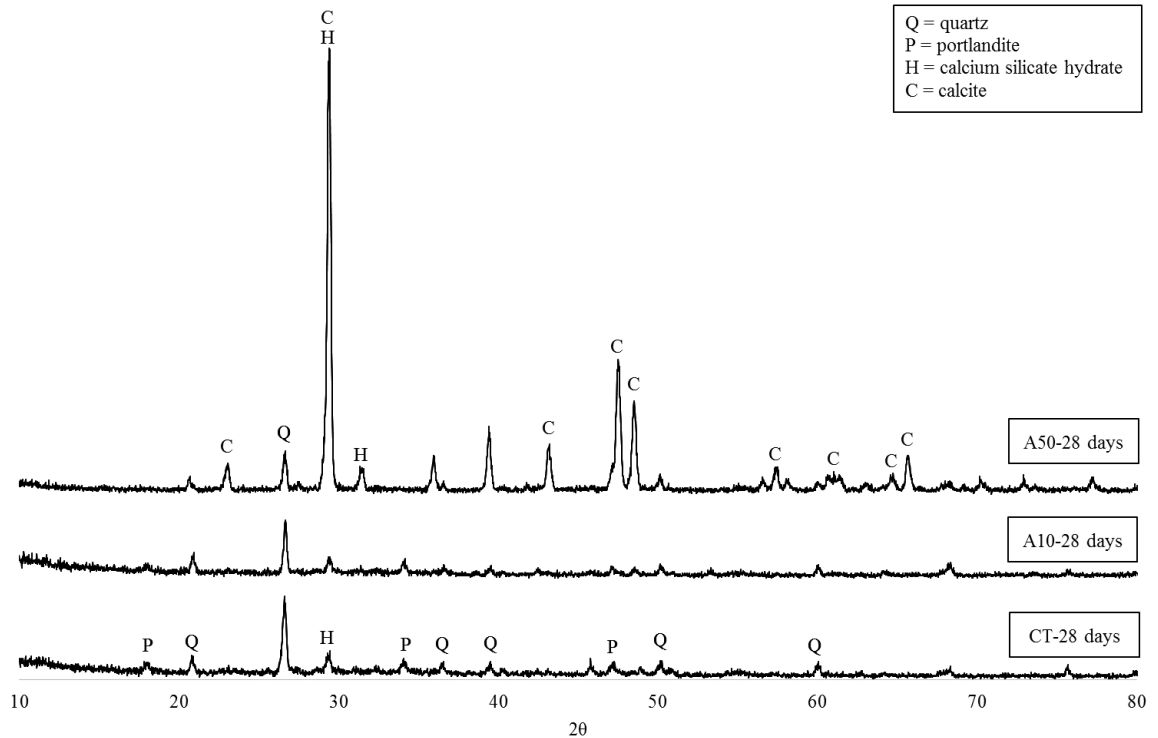


ภาพที่ 4.6 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ 7 และ 28 วัน และที่อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

#### 4.3.3 โครงสร้างทางจุลภาค

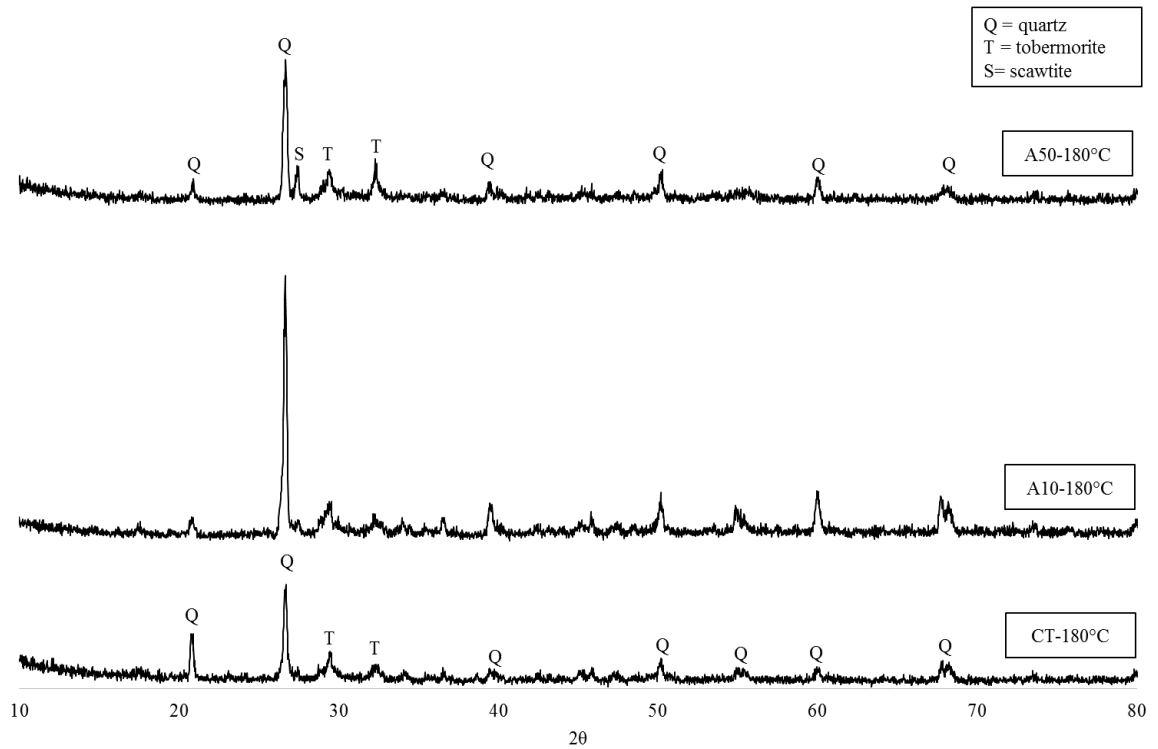
ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของผลกระทบการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยในการผลิตคอนกรีตมวลเบา ทำการศึกษาที่ตัวอย่าง CT A10 และ A50 ที่ 28 วัน และที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง และทำการทดสอบด้วยเทคนิค XRD และ SEM

ภาพที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งพบว่าที่การบ่มในน้ำที่ 28 วัน (ภาพที่ 4.7) ของตัวอย่าง CT ปรากฏพีคของ Quartz (JCPDS file No. 46-1025), Portlandite (JCPDS file No. 44-1481) และ Calcium Silicate Hydrate (JCPDS file No. 33-0306) หรือ CSH เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อย พีคของ Portlandite หรือ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  กลับมีค่าลดลงจนเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าขานอ้อยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ในระบบ และได้ผลผลิตเป็น CSH [36-38] ทำให้สามารถเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณมากขึ้น จะพบพีคของ Calcite (JCPDS file No. 05-0586) เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในตำแหน่ง  $2\theta$  ที่  $23.06^\circ$   $29.36^\circ$   $43.2^\circ$   $47.44^\circ$   $47.5^\circ$   $57.48^\circ$   $61.26^\circ$  และ  $65.62^\circ$  เพราะโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าขานอ้อยประกอบไปด้วย Quartz และ Calcite เป็นองค์ประกอบหลัก จึงทำให้เมื่อมีการใช้ในปริมาณมากขึ้น จึงปรากฏพีคของ Calcite อย่างชัดเจน โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาบ่งชี้ไว้ว่า Calcite นั้นให้กำลังอัดที่น้อยกว่า CSH [33] ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นี้สอดคล้องกับผลของกำลังอัดที่พบว่ากำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยไม่เกินอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก แต่ถ้าแทนที่ทรายในปริมาณที่มากกว่านั้น จะส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง



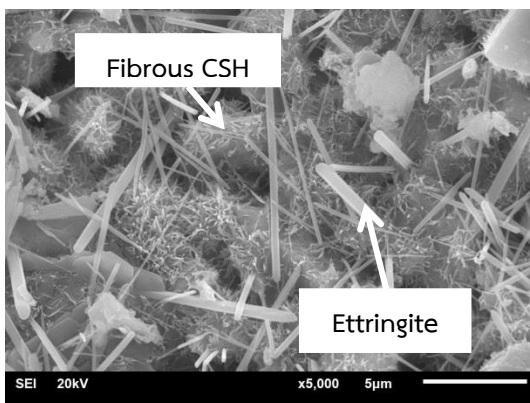
ภาพที่ 4.7 XRD patterns ของคอนกรีตมวลเบาที่ 28 วัน

การนำคอนกรีตมวลเบาไปอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง พบว่าโครงสร้างหลักของตัวอย่าง CT ยังคงเป็นพีคของ Quartz (ภาพที่ 4.8) แต่ไม่พบพีคของ Portlandite และ CSH กลับปรากฏพีคของ Tobermorite (JCPDS file No. 19-1364) ในระบบของ  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ภายใต้ Hydrothermal Treatment พบว่า amorphous CSH ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิปกติจะเปลี่ยนไปเป็น crystalline CSH ซึ่งมีชื่อเรียกหลากหลาย ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแต่ละตัว และในแต่ละตัวจะเกิดขึ้นที่ Ca/Si ratio และอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ในจำนวนนี้ Tobermorite เป็นผลึกที่มีแข็งแรงมากที่สุด โดยจะเกิดขึ้นที่ Ca/Si ratio ที่ 0.8-1.0 และที่อุณหภูมิ 140-200 องศาเซลเซียส [18, 39, 40] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่า CSH ที่เกิด ณ ที่อุณหภูมิปกตินั้น เปลี่ยนเป็นไป tobermorite ในขณะที่เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อย ยังคงพบพีคของ Quartz และ Tobermorite เช่นเดียวกับตัวอย่าง CT แต่เมื่อมีการแทนที่ไปถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ปรากฏพีคของ Scawtite (JCPDS file No. 42-1436) ที่ตำแหน่ง  $2\theta \approx 27^\circ$  อย่างชัดเจน โดยปกติแล้ว scawtite จะเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มี  $\text{CO}_2$  อยู่ในระบบ และที่อุณหภูมิสูง [33] ซึ่งเถ้าขานอ้อยในงานวิจัยนี้มี Calcite หรือ  $\text{CaCO}_3$  เป็นองค์ประกอบหลักร่วมด้วย จึงทำให้การที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยที่อัตราสูงๆ (ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้ amorphous CSH กลายเป็น Scawtite แทนที่จะไปเป็น Tobermorite จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาลดต่ำลง

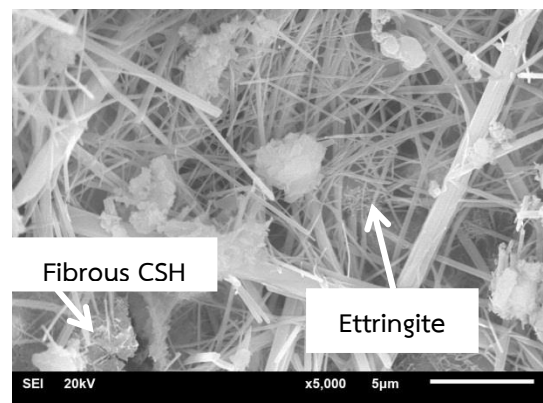


ภาพที่ 4.8 XRD patterns ของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

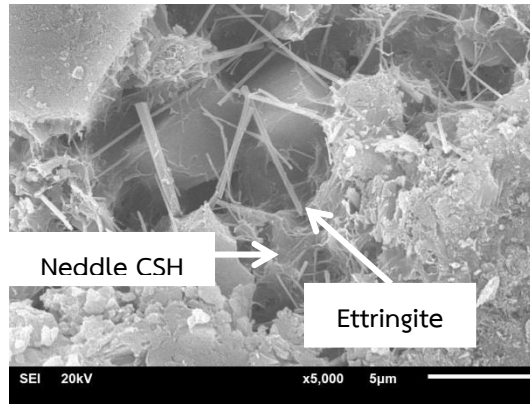
ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าที่ตัวอย่าง CT ที่ 28 วัน (ภาพที่ 4.9ก) ปรากฏ fibrous CSH และ Ettringite บนพื้นผิวของตัวอย่าง โดย Ettringite เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาระหว่าง  $C_3A$  กับยิปซัม ( $CaSO_4$ ) เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขาน้อยยังคงพบ CSH และ Ettringite เช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม (ภาพที่ 4.9ข-ค) แต่อย่างไรก็ตามการนำคอนกรีตมวลเบาไปอบไอน้ำ ทำให้ CSH กลายเป็น plate-like tobermorite ในทุกตัวอย่าง (ภาพที่ 4.10ก-ค) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์เทคนิค SEM นี้ยืนยันผลเป็นไปในทิศทางเดียวกับการวิเคราะห์ XRD



(ก)

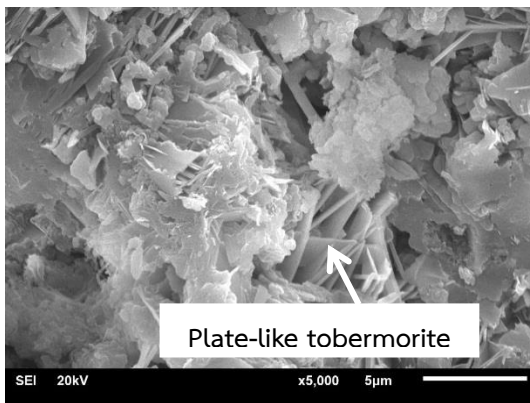


(ข)

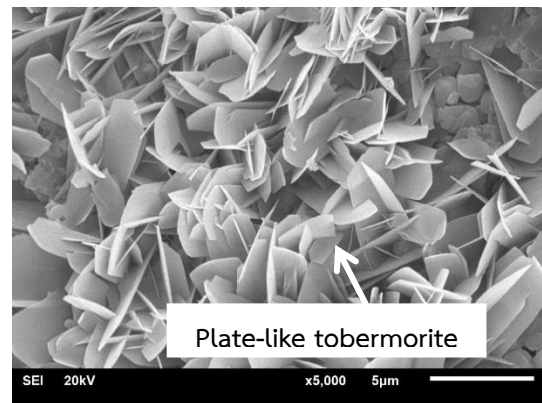


(ค)

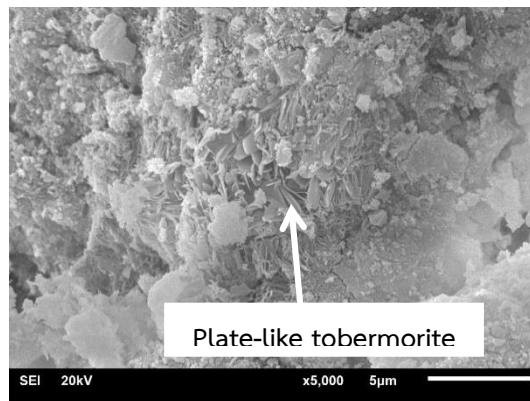
ภาพที่ 4.9 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาที่อายุการบ่ม 28 วัน, (ก) CT, (ข) A10 และ (ค) A50



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.10 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง, (ก) CT, (ข) A10 และ (ค) A50

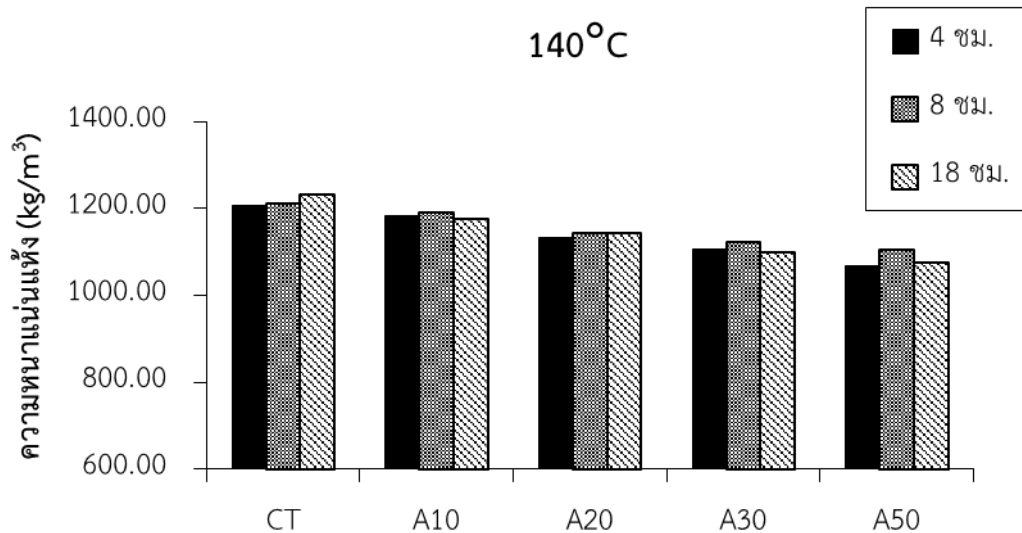
#### 4.4 การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบไอน้ำต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขาน้อย

คอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำในงานวิจัยนี้ จะเตรียมที่อุณหภูมิ 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 8 และ 18 ชม. และนำไปทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่นแห้ง การดูดซึมน้ำ โครงสร้างทางจุลภาคและสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งผลจากการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

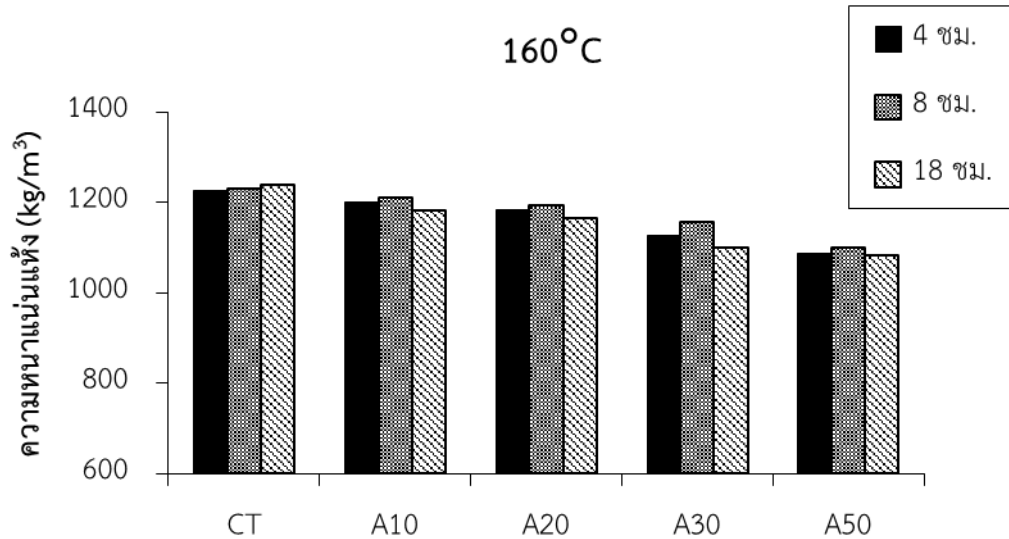
#### 4.4.1 ความหนาแน่นแห้ง และการดูดซึมน้ำ

ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แสดงในภาพที่ 4.11-4.13 ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส พบว่าความหนาแน่นแห้งมีค่าลดลง ตามอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าขานอ้อยเช่นเดียวกันกับคอนกรีตมวลเบาที่ไม่อบไอน้ำ (ภาพที่ 4.11) แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระยะเวลาการอบไอน้ำหรือการเพิ่มอุณหภูมิการอบไอน้ำไปเป็น 160 หรือ 180 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.12-4.13) นั้นส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปไว้ว่าความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารก่อฟอง วัสดุและอัตราส่วนที่ใช้ [13, 28] ส่วนการอบไอน้ำนั้นไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อความหนาแน่นแห้ง เนื่องจากข้อดีของการอบไอน้ำนอกจากจะสามารถพัฒนากำลังอัดในเวลาอันสั้นแล้ว ยังสามารถลดการหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) อีกด้วย ทำให้ก้อนคอนกรีตมวลเบาหลังอบไอน้ำมีลักษณะแข็งทันทึ่และมีเสถียรภาพ [28] ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยในงานวิจัยนี้เท่ากับ  $1,253.39 \pm 22.56$   $1,197.74 \pm 15.52$   $1,169.64 \pm 24.21$   $1,125.44 \pm 21.95$  และ  $1,093.72 \pm 18.16$  กก./ลบ.ม. สำหรับตัวอย่าง CT A10 A20 A30 A40 และ A50 ตามลำดับ

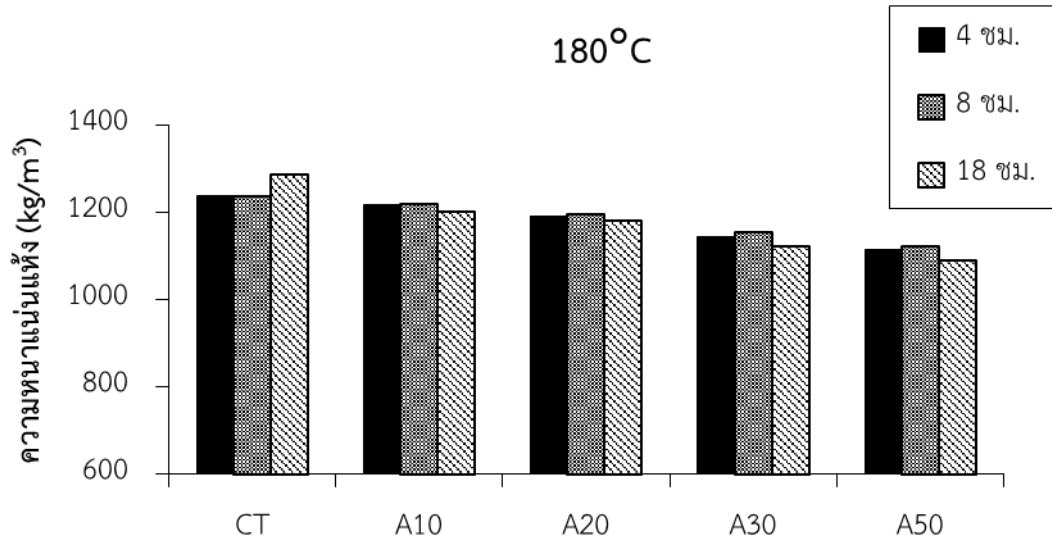
ในส่วนของร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ นั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับความหนาแน่นแห้ง คือ มีค่าคงที่แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ หรือระยะเวลาในการอบไอน้ำ แต่อย่างไรก็ตามค่าร้อยละการดูดซึมน้ำนั้น จะแปรผกผันกับความหนาแน่นแห้งเสมอ กล่าวคือหากความหนาแน่นแห้งมีค่ามาก ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำจะน้อย แต่ทว่าหากค่าความหนาแน่นแห้งน้อย ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำก็จะมาก [7] ในงานวิจัยนี้ร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 20.15-37.98



ภาพที่ 4.11 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.12 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.13 ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

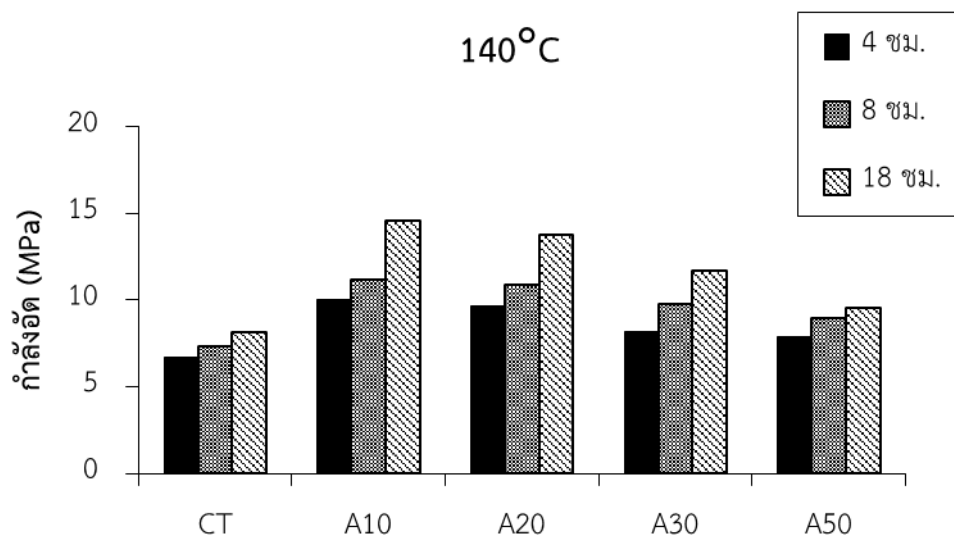
#### 4.4.2 กำลั้งอัด

กำลั้งอัดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 140-180 องศาเซลเซียส แสดงในภาพที่ 4.14-4.16 ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.14) พบว่ากำลั้งอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีค่าเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาการอบไอน้ำในทุกอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อย แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเพิ่มกำลั้งอัดจากที่เวลา 8 ชั่วโมง ไปเป็น 18 ชม. แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 มีการพัฒนากำลั้งอัดที่สูงที่สุด (ร้อยละ 10.63 30.26 25.85 19.22 และ 6.59 สำหรับ CT A10 A20 A30 และ A50 ตามลำดับ) เนื่องจากที่อัตราส่วนผสมดังกล่าวมีความเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานดีที่สุด ดังแสดงให้เห็นในกำลั้งอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่เมื่อมีการ

แทนที่ที่มากขึ้นจะทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะมาทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ จึงทำให้เหลือเถ้าขานอ้อยไม่ทำปฏิกิริยาอยู่ในระบบ และส่งผลให้กำลังอัดลดต่ำลง

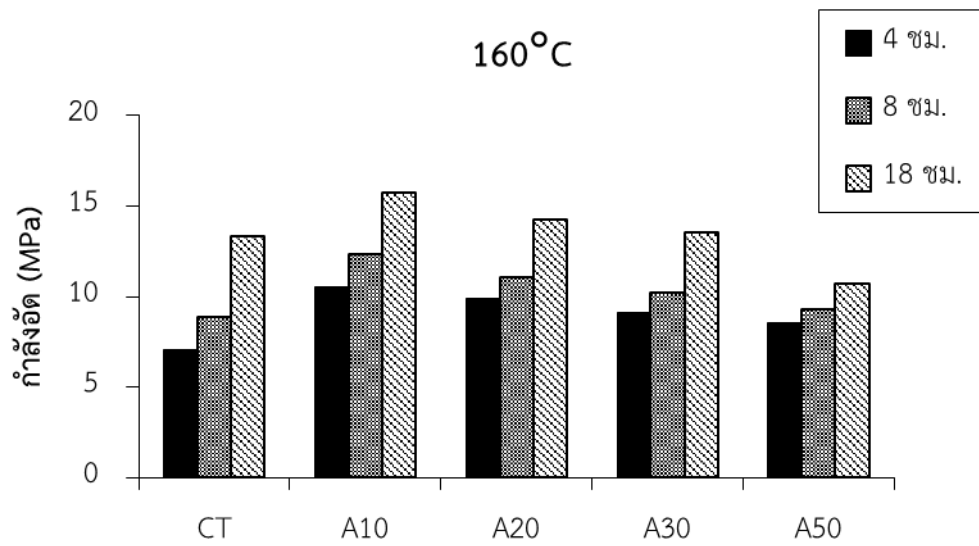
ในขณะที่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการอบไอน้ำไปเป็น 160 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.15) กลับพบว่าอัตราการเพิ่มกำลังอัดจาก 8 ชั่วโมง ไปเป็น 18 ชั่วโมง ของตัวอย่าง CT มีค่าสูงที่สุด (ร้อยละ 50.28 27.53 28.80 32.39 และ 15.09 สำหรับ CT A10 A20 A30 และ A50 ตามลำดับ) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า tobermorite (เฟสที่ให้กำลังอัดได้ดี) จะเกิดเมื่อมี Ca/Si ratio เท่ากับ 0.8-1.0 ซึ่งในตัวอย่าง CT ใช้วัสดุซิลิกา คือ ทรายที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออยู่ในสภาวะอบไอน้ำ ซิลิกาอ็อนจะละลายออกจากทราย เพื่อมาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือกับ CSH จึงทำให้มีการพัฒนากำลังอัดภายในระยะเวลาอันสั้น [41, 42] โดยจากหลักการเทอร์โมไดนามิกส์ บอกไว้ว่า เอนทัลปี ( $\Delta H$ ) จะผันแปรตามอุณหภูมิและความดัน ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ส่งผลให้การละลายของซิลิกาอ็อนมีมากขึ้น ในส่วนของเถ้าขานอ้อยที่เป็นวัสดุปอซโซลาน จึงทำให้สามารถปลดปล่อยซิลิกาอ็อนได้ง่ายกว่าทราย และมีการพัฒนากำลังอัดในอัตราที่น้อยกว่าตัวอย่าง CT ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

ในการเพิ่มอุณหภูมิการอบไอน้ำไปเป็น 180 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.16) พบว่ากำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 4 ชั่วโมงแรก และมีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการอบไอน้ำ ซึ่งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาได้สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาเดียวกัน โดยกำลังอัดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 14.77 16.68 15.64 14.49 และ 12.18 MPa สำหรับตัวอย่าง CT A10 A20 A30 และ A50 ตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสม คือ ที่การแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 1505-2541 [43] พบว่ากำลังอัดนั้นผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่ความหนาแน่นแห้งนั้นเกินเกณฑ์มาตรฐาน จึงเหมาะกับการนำไปใช้ไปเป็นวัสดุที่ต้องรับแรงได้ปานกลาง เนื่องจากสามารถมีค่ากำลังอัดสูงกว่าในมาตรฐาน (10 MPa) ค่อนข้างมาก หรือนำไปเป็นคอนกรีตบล็อกแบบรับน้ำหนัก ตามมาตรฐาน มอก. 57-2537 [44] ชั้นก ที่กำหนดกำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 11 MPa และความหนาแน่นต่ำกว่า 1680 กก./ลบ.ม. และการดูดกลืนน้ำไม่เกิน 240 กก./ลบ.ม. โดยชั้นมาตรฐานนี้สามารถนำไปเป็นกำแพงฐานราก และกำแพงชั้นฐาน แต่อาจต้องมีการทาน้ำยากันซึมที่ผิวของกำแพงด้วย

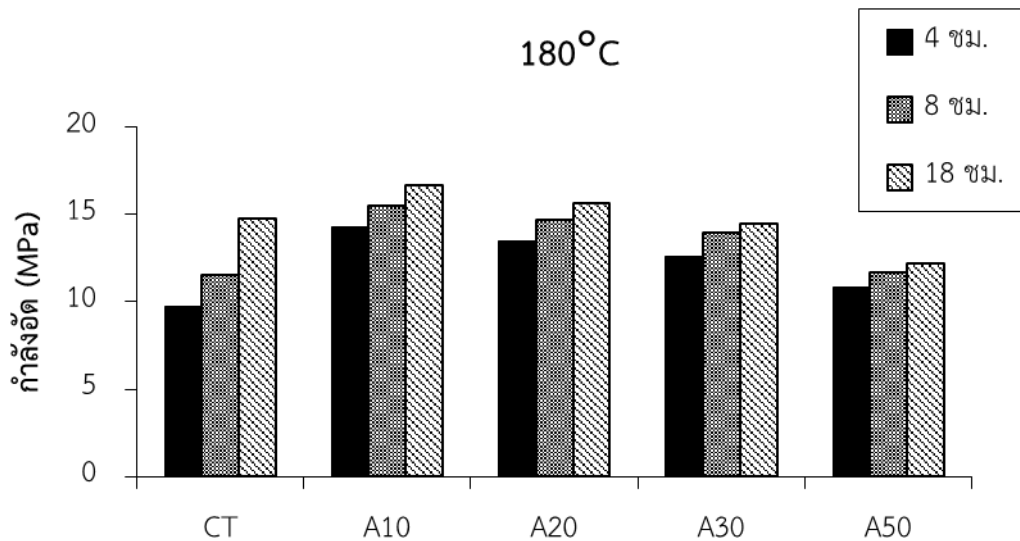


ภาพที่ 4.14 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส





ภาพที่ 4.15 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.16 กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

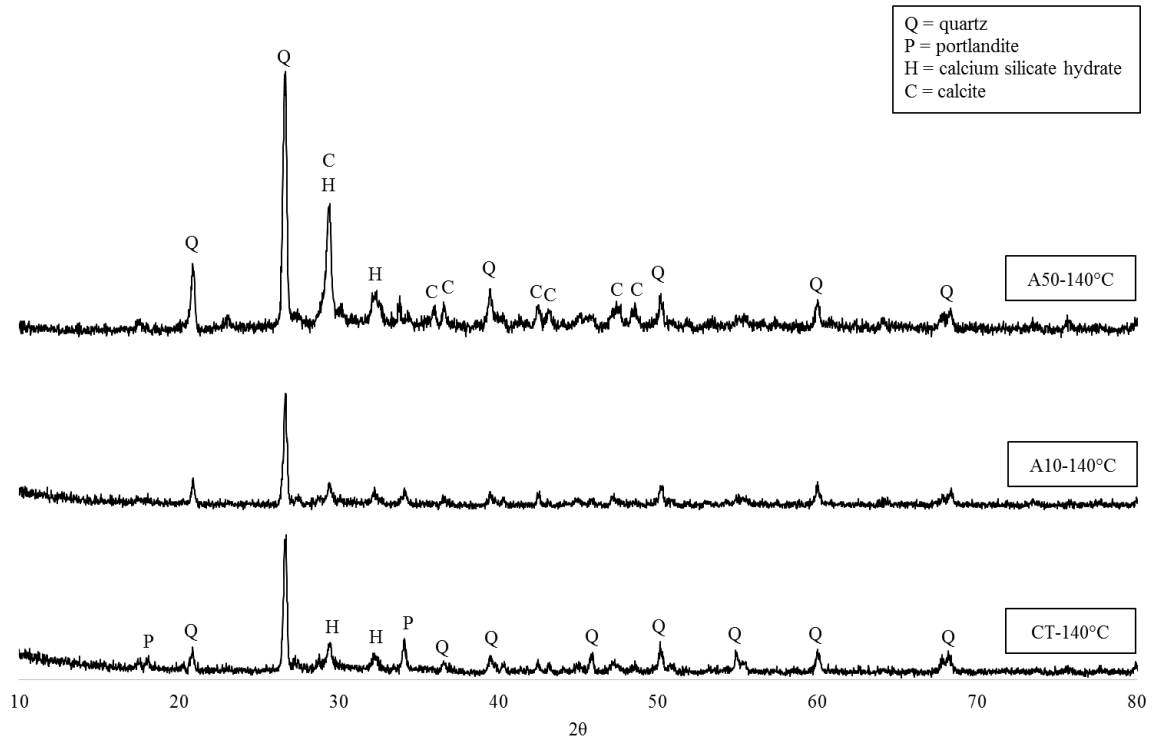
#### 4.4.3 โครงสร้างทางจุลภาค

ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบไอน้ำต่อโครงสร้างทางจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาทั้งที่ผสมและไม่ผสมเถ้าขาน้อย จะทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่ตัวอย่าง CT A10 และ A50 จากภาพที่ 4.17 แสดง XRD pattern ของคอนกรีตมวลเบาที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าทุกตัวอย่างเกิดพีคเช่นเดียวกับที่ 28 วัน คือ พบพีคของ Quartz Portlandite และ CSH ในตัวอย่าง CT เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขาน้อย พีคของ Portlandite นั้นหายไป แต่เมื่อมีการแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้พบพีคของ Calcite อย่างไม่เห็นได้ชัด จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ยังไม่

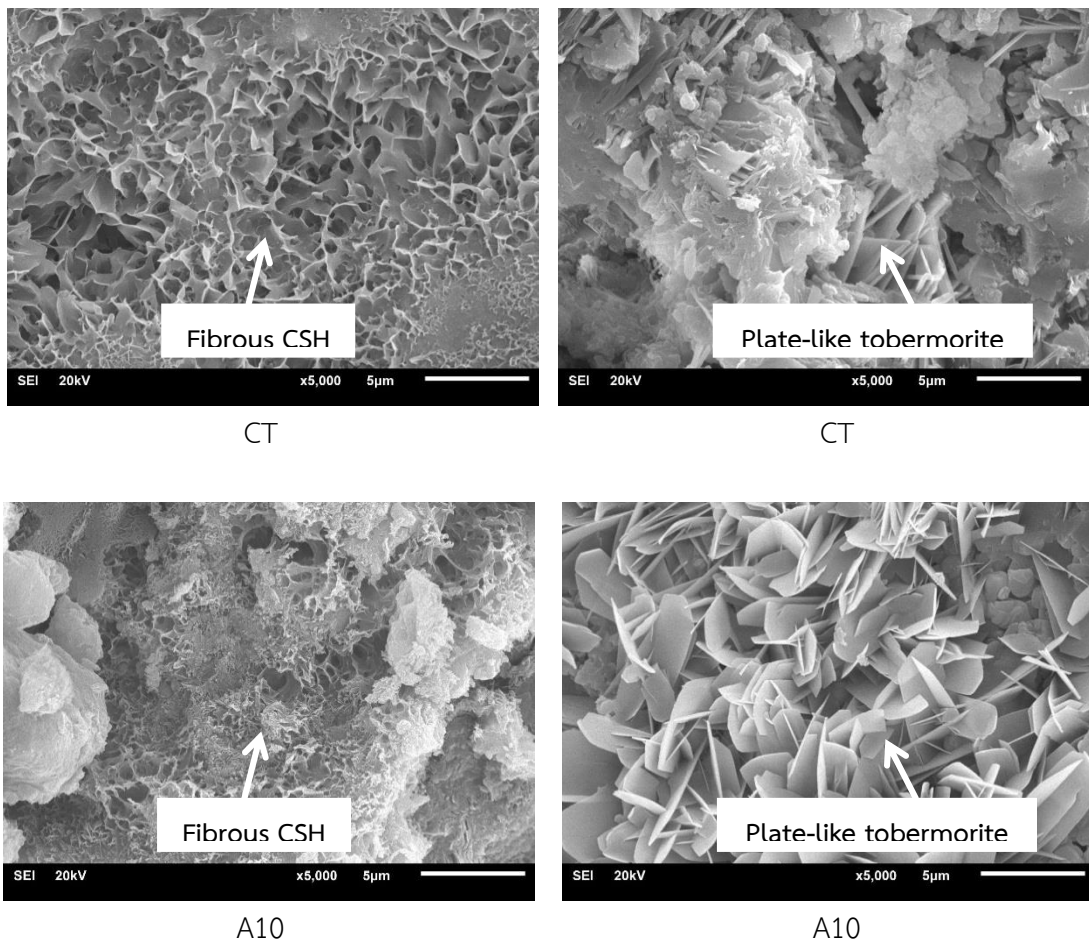
เพียงพอต่อการละลายซิลิกาอ็อนจากทรายหรือเถ้าขานอ้อย เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนจาก amorphous CSH ไปเป็น Tobermorite

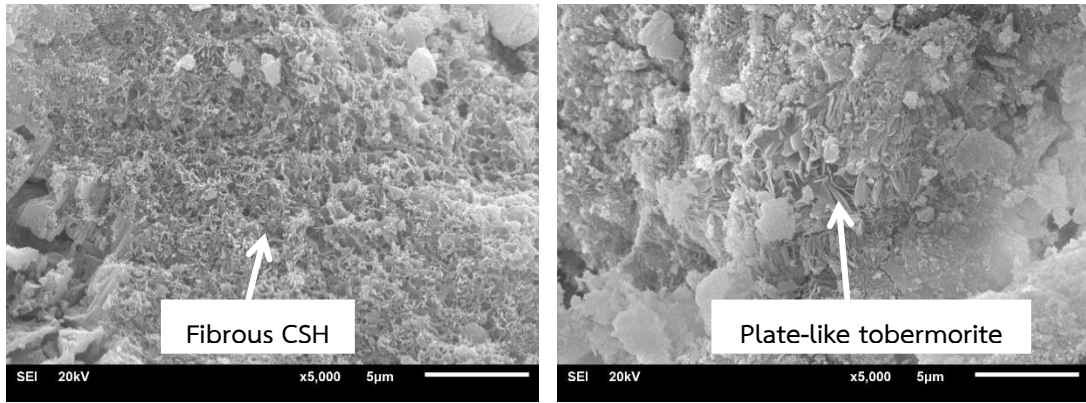
แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาไปเป็น 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.8 พบว่าพีคของ CSH กลายไปเป็น Tobermorite พีค และ Calcite เปลี่ยนไปเป็น Scawtite สอดคล้องกับผล SEM (ภาพที่ 4.18) ที่พบ Fibrous CSH บนพื้นผิว ในทุกตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ภาพที่ 4.18ก) เปลี่ยนไปเป็น Plate-like tobermorite เมื่ออุณหภูมิในการอบไอน้ำเพิ่มขึ้นไปเป็น 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ในทุกตัวอย่างเช่นเดียวกัน (ภาพที่ 4.18ข)

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาการอบไอน้ำมีผลต่อการละลายของซิลิกาอ็อน และการเกิด Tobermorite ซึ่งส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา นอกจากนี้ยังพบอีกว่าสามารถเปลี่ยนเฟสจาก Calcite ไปเป็น Scawtite เนื่องจากภายใต้สภาวะการอบไอน้ำ นอกจากจะสามารถละลายซิลิกาอ็อนได้แล้ว ยังส่งผลต่อการละลายออกมาของแคลเซียมอ็อนอีกด้วย จากงานวิจัยของ Yoshimora et. al. (2004) [45] ที่สังเคราะห์ Hydroxypatite (HAp) จาก Calcite ภายใต้การอบไอน้ำ พบว่าภายใต้การอบไอน้ำแคลเซียมอ็อนจะละลายออกมา ทำให้ไปทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตอ็อนในระบบ และตกตะกอนได้ไปเป็น HAp โดยในปฏิกิริยายังได้ผลผลิตเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้การปรากฏพีค Calcite ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ของตัวอย่าง A50 เพราะอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบไอน้ำไม่เพียงพอต่อการไปทำการละลายแคลเซียมอ็อนจาก Calcite แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาขึ้นไป (180°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง) แคลเซียมอ็อนจะถูกละลายออกมา และสามารถไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาอ็อน ทำให้สามารถเปลี่ยนไปเป็น CSH หรือ Tobermorite ได้ แต่อย่างไรก็ตามคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นผลผลิต ก็สามารถไปทำปฏิกิริยากับเฟสของ CSH ที่มีอยู่ในระบบและเกิดไปเป็น Scawtite อีก สอดคล้องกับผลกำลังอัดที่เมื่อมีการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณมากกว่าร้อยละ 10 จะส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง



ภาพที่ 4.17 XRD patterns ของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง





A50

(ก)

A50

(ข)

ภาพที่ 4.18 ภาพ SEM ของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ, (ก) อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ (ข) อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

#### 4.5 การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำเถ้าขานอ้อยไปเป็นวัสดุในการผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

การศึกษาคู่มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การบดวัตถุดิบ (ทรายและเถ้าขานอ้อย) และการอบไอน้ำ โดยมีแหล่งพลังงานเป็นไฟฟ้าและแก๊สหุงต้มตามลำดับ ในการบดวัตถุดิบใช้เครื่อง Ball mill ที่มีขนาดมอเตอร์เท่ากับ 7.5 hp หรือ 5.5 KW ซึ่งทราย 1 กิโลกรัม ต้องใช้เวลาในการบดเท่ากับ 2.5 ชั่วโมง ขณะที่เถ้าขานอ้อยใช้เวลาเพียง 0.7 ชั่วโมง หรือ ประมาณ 40 นาที เพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ส่งผลให้มีการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 13.75 และ 3.67 KWh สำหรับทรายและเถ้าขานอ้อย ตามลำดับ เมื่อนำค่าไฟฟ้าในปัจจุบันที่อัตราหน่วยที่ 1-150 ต่อเดือนมาคำนวณ (1.8047 บาท) พบว่าการใช้เถ้าขานอ้อยสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้ร้อยละ 73.52 สมมติมีการใช้แทนที่ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้สัดส่วนผสมที่ดีที่สุด คือ A10 หรือการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายส่วนนี้ลงไปได้ร้อยละ 7.35 ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการบดวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	ระยะเวลาในการบดต่อวัตถุดิบ 1 กก. (ชั่วโมง)	ปริมาณไฟฟ้า (KWh)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ราคาวัสดุต่อ 1 กก. (บาท)	ราคารวม (บาท)
ทราย	2.5	13.75	24.81	0.16*	24.97
เถ้าขานอ้อย	0.7	3.67	6.61	-	6.61

หมายเหตุ \* ราคาอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้

**ตารางที่ 4.2** สัดส่วนค่าใช้จ่ายเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยในการผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ

ร้อยละการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อย	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง (ร้อยละ)
10	7.35
20	14.71
30	22.06
40	29.41
50	36.76
75	55.15
100	73.53

ในการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการอบไอน้ำในงานวิจัยนี้จะคำนวณเมื่อระบบมีการดำเนินการเป็นแบบกะ (Batch) ซึ่งในการเดินระบบจริงในอุตสาหกรรมก็ดำเนินการเป็นแบบกะเช่นเดียวกัน โดยอัตราปริมาณแก๊สในการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนไปถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เท่ากับ 0.9 กก./ชม. และสำหรับในการควบคุมอุณหภูมิ เท่ากับ 0.25 กก./ชม. ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิจะใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิแตกต่างกันไป โดยที่ 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 2.5 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ จึงทำให้ปริมาณการใช้แก๊สแสดงดังในตารางที่ 4.3 จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นว่าการอบไอน้ำสามารถพัฒนากำลังอัดให้เทียบเท่ากับการบ่มปกติที่อายุ 28 วัน ผลจากกำลังอัดแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบไอน้ำที่ทำให้กำลังอัดเทียบเท่ากับการบ่มปกติที่ 28 วัน ได้แก่ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และมีปริมาณการใช้แก๊ส เท่ากับ 18.25 และ 6.7 ตามลำดับ ดังนั้นอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

นอกจากนี้หากเทียบกับมาตรฐาน มอก. 1505-2541 [43] ที่กำหนดกำลังอัดขั้นต่ำ ในชั้นที่สูงที่สุดของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ เท่ากับ 10 MPa พบว่าตัวอย่าง CT ที่เป็นตัวอย่างควบคุม ต้องใช้อุณหภูมิถึง 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อผ่านเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว แต่เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อย สามารถทำให้การอบไอน้ำมีระยะเวลาและอุณหภูมิที่ต่ำลงได้ โดยสถานะที่เหมาะสมของตัวอย่าง A10 เท่ากับ 140°C เวลา 4 ชม. ส่วน A20 A30 และ A50 เท่ากับ 180°C เวลา 4 ชม. ส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้ทั้งหมด (ค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบและการอบไอน้ำ) เท่ากับ ร้อยละ 65.56 59.49 66.84 และ 81.54 สำหรับ A10 A20 A30 และ A50 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.3** ปริมาณการใช้แก๊สในการอบไอน้ำ

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณการใช้แก๊ส (กก.)		
	4 ชม.	8 ชม.	18 ชม.
140	2.8	5.8	17.8
160	3.25	6.25	18.25
180	3.7	6.7	18.7

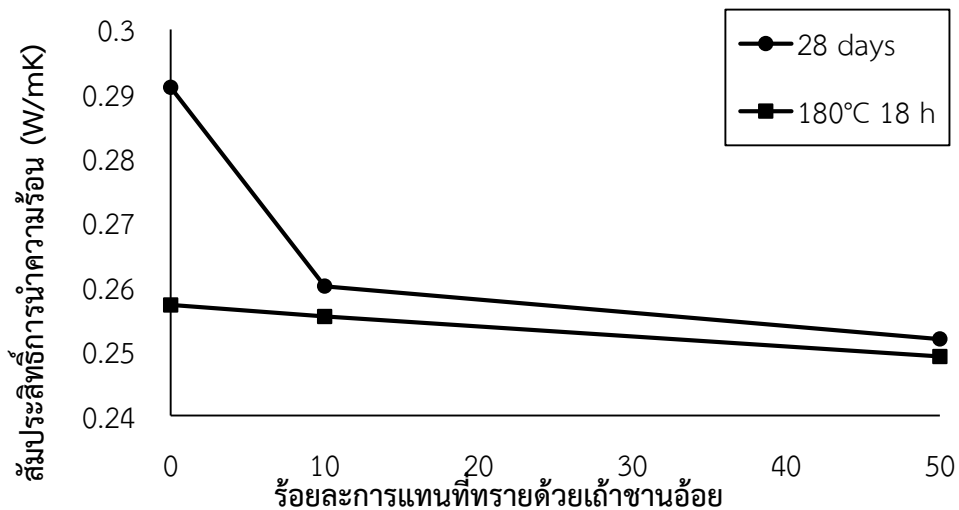
ตารางที่ 4.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแต่ละอัตราส่วนเปรียบเทียบกับตัวอย่าง CT

ตัวอย่าง	กำลังอัด (MPa)	สถานะที่เหมาะสม	ต้นทุนด้านพลังงาน (ร้อยละ)*
CT	11.56	180°C เวลา 8 ชม.	100.00
A10	10.05	140°C เวลา 4 ชม.	65.56
A20	13.46	180°C เวลา 4 ชม.	59.49
A30	12.64	180°C เวลา 4 ชม.	66.84
A50	10.86	180°C เวลา 4 ชม.	81.54

หมายเหตุ \*รวมค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัสดุดิบและการอบไอน้ำ

#### 4.6 ศึกษาเรื่องสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาโดยทั่วไปแล้วจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความชื้น และวัสดุที่ใช้ในการผลิต ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบที่ตัวอย่าง CT A10 และ A50 ที่อายุการบ่ม 28 วัน และที่อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 1 จากผลการทดสอบพบว่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาลดลง เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขาน้อย และใช้วิธีการอบไอน้ำ สอดคล้องกับผลความหนาแน่นแห้ง ที่พบว่ามีค่าลดลง เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขาน้อย และการอบไอน้ำ โดยเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่าง A10 และ A50 กับตัวอย่าง CT จะพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง เท่ากับร้อยละ 10.62 และ 13.44 สำหรับบ่มที่อายุ 28 วัน และร้อยละ 0.70 และ 3.11 สำหรับการอบไอน้ำที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.19 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบา

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยที่เป็นของเสีย มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในงานวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง ซึ่งได้นำมาเป็นวัสดุแทนที่ทรายในการผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ โดยผลจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเติมผงอลูมิเนียมสังผลโดยตรงต่อกำลังอัด และความหนาแน่นแห้ง ซึ่งปริมาณผงอลูมิเนียมที่เหมาะสม เท่ากับ 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน
- 2) กำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาจะแปรผันตามอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบไอน้ำ แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นแห้ง
- 3) การอบไอน้ำสามารถช่วยลดระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตมวลเบา จากการบ่มในอุณหภูมิปกติ 28 วัน ลดลงเหลือเพียง 18 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และ 8 ชั่วโมง สำหรับ 180 องศาเซลเซียส
- 4) การแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยไม่เกินร้อยละ 10 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงสุด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าขานอ้อยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่หลงเหลืออยู่ในระบบ และได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แต่อย่างไรก็ตามการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยเกินร้อยละ 10 ส่งผลให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีปริมาณ LOI ค่อนข้างสูง และมี  $\text{CaCO}_3$  เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเมื่อนำไปผลิตคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ จะส่งผลให้  $\text{CaCO}_3$  ละลาย และไปทำปฏิกิริยากับ CSH เปลี่ยนไปเป็น Scawtite ที่เป็นเฟสที่ทำให้กำลังอัดต่ำกว่า Tobermorite จึงทำให้กำลังอัดลดต่ำลง เมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณมาก
- 5) การเพิ่มอุณหภูมิจาก 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ไปเป็น 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง สามารถทำให้ fibrous CSH เปลี่ยนกลายเป็น Tobermorite ที่มีลักษณะเป็นผลึกที่แข็งแรง จึงทำให้กำลังอัดสูงขึ้น
- 6) อัตราส่วนที่เหมาะสมคือ ที่การแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 และอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบไอน้ำเทียบเท่าการบ่มปกติ 28 วัน ได้แก่ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- 7) การใช้เถ้าขานอ้อยแทนที่ทรายอัตราร้อยละ 50 สามารถลดค่าใช้จ่ายทั้งจากการบดและการอบไอน้ำได้ถึงร้อยละ 81.54 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมและ มอก. 1505-2541

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 10 สามารถนำไปใช้เป็นคอนกรีตบล็อกแบบรับน้ำหนักในงานกำแพงฐานราก แต่อาจต้องมีการทาน้ำยากันซึม เนื่องจากมีรูพรุนค่อนข้างมาก
- 2) เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำประกอบไปด้วยรูพรุนจำนวนมาก ดังนั้นค่าความชื้น หรือตัวแปรอื่นๆ เช่น ค่าการซึมผ่านของน้ำ การดูดซับน้ำ เป็นต้น ควรจะนำมาทดสอบร่วมด้วย

- 3) งานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการนำใช้วัสดุหรือของเสียเพียงชนิดเดียวในการทำคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาที่เกี่ยวกับการนำของเสียหลายชนิดมาผสมกันเพื่อใช้ในการทำคอนกรีตมวลเบา เพื่อลดข้อด้อย และเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ ให้กับคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำให้ดียิ่งขึ้น
- 4) เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำที่ผสมเถ้าขานอ้อยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนค่อนข้างมาก (ทั้งภายในและภายนอก) ดังนั้นหากมีการนำไปใช้งานกับวัสดุที่อาจมีการสัมผัสกับน้ำอย่างต่อเนื่อง จะต้องมีการเคลือบหรือฉาบ ด้วยน้ำยากันซึมหรือน้ำปูนหรือซีเมนต์เพสต์เพื่อปิดรูพรุนบนผิวหน้าของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ก่อนนำไปใช้งานจริง

### 5.3 แนวทางในการเลือกสัดส่วนและสภาวะอบไอน้ำที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

ในการเลือกสัดส่วนและสภาวะอบไอน้ำที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ นั้นจะดูได้จากพารามิเตอร์หลักๆ ได้แก่ ความหนาแน่นแห้งและกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัว จะแปรผันตรงกัน นอกจากนี้ควรดูอัตราการดูดซึมน้ำประกอบด้วย เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาที่มีอัตราการดูดซึมน้ำค่อนข้างสูง ถ้าหากนำไปใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูง ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง และมีการยืดหดตัวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการฉาบหรือเคลือบคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำด้วยน้ำปูน หรือน้ำยากันซึม หรือซีเมนต์เพสต์ เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำจากผิวคอนกรีตมวลเบา ไปยังภายในคอนกรีตมวลเบา ในส่วนของงานวิจัยนี้จากผลการวัดค่ากำลังอัด ความหนาแน่นแห้ง และการดูดซึมน้ำ พบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยเถ้าขานอ้อยในทุกอัตราส่วน ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งลดลง เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ มอก. 1505-2541 ที่เป็นมาตรฐานคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ พบว่าทุกอัตราส่วนสามารถพัฒนากำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (10 MPa) แต่อย่างไรก็ตามความหนาแน่นแห้งยังคงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานคอนกรีตบล็อกแบบรับน้ำหนัก (มอก. 57-2537) รวมทั้งวิเคราะห์ถึงต้นทุนในการผลิตร่วมกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปสภาวะที่เหมาะสมและการนำไปใช้งานตามมาตรฐาน มอก. 57-2537

ตัวอย่าง	สภาวะที่เหมาะสม	การนำไปใช้งาน*
A10	140°C เวลา 4 ชม.	กำแพงฐานรากและกำแพงชั้นฐาน
A20	180°C เวลา 4 ชม.	กำแพงภายนอก (เหนือระดับดิน) และกำแพงภายใน
A30	180°C เวลา 4 ชม.	กำแพงภายนอก (เหนือระดับดิน) และกำแพงภายใน
A50	180°C เวลา 4 ชม.	กำแพงภายนอก (เหนือระดับดิน) และกำแพงภายใน

หมายเหตุ \*การนำไปใช้งานควรมีการเคลือบผิว เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำ

เนื่องจากตัวคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำผสมเถ้าขานอ้อยมีความแข็งแรง และมีน้ำหนักเบา จึงสามารถพัฒนาไปทำผลิตภัณฑ์จำพวกแจกัน หรือกระถางต้นไม้ ทดแทนเครื่องปั้นดินเผา และเซรามิกที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการผลิต ดังแสดงในหัวข้อต่อไป



#### 5.4 งานที่จะดำเนินการในอนาคต

จากข้อเสนอแนะของกรรมการประเมินโครงการที่อยากให้มีการนำเถ้าขานอ้อยไปทำเป็นผลิตภัณฑ์อย่างอื่นนอกเหนือจากเป็นวัสดุก่อสร้าง โดยทางกรรมการเสนอว่าเนื่องจากคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำเป็นวัสดุพูนที่มีน้ำหนักเบา จึงนำที่จะนำไปประยุกต์ทำเป็นผลิตภัณฑ์ของตกแต่ง เช่น แจกัน ของโชว์ เป็นต้น เพื่อลดภาระบรรทุกของอาคารสูงต่างๆ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้นำข้อเสนอแนะของกรรมการประเมินไปดำเนินการต่อไปโดยไปติดต่อหาคนออกแบบชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้น ทำการขึ้นรูปชิ้นงาน และลงสีชิ้น (ยังไม่ได้เคลือบผิวชิ้นงาน)งานดังรูป





## บรรณานุกรม

1. Advanced Building Organization. *Advanced Building Technologies-Autoclaved Aerated Concrete*. 1999; Available from: <http://www.advancedbuildings.org/aercon.html>.
2. Kurama, H., Topcu, I.B. and Karakurt, C., *Properties of the Autoclaved Aerated Concrete Produced from Coal Bottom Ash*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. 209: p. 767-773.
3. Mostafa, N.Y., *Influence of Air-Cooled Slag in Physicochemical Properties of Autoclaved Aerated Concrete*. Cement and Concrete Research, 2005. 35: p. 1349-1357.
4. Karakurt, C., Kurama, H. and Topcu, L.B., *Utilization of Natural Zeolite in Aerated Concrete Production*. Cement and concrete Composites, 2010. 32: p. 1-8.
5. Narayanan, N., *Microstructural Investigations on Aerated Concrete*. Cement and Concrete Research, 2000. 30: p. 457-464.
6. Narayanan, N.a.R., K., *Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review*. Cement and Concrete Research, 2000. 22: p. 321-329.
7. Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Pimraksa, K. and Chaipanich, A., *Compressive Strength, Flexural Strength and Thermal Conductivity of Autoclaved Concrete Block Made Using Bottom Ash as Cement Replacement Materials*. Material and Design, 2012. 35: p. 434-439.
8. Wongkeo, W.a.C., A., *Compressive Strength, Microstructure and Thermal Analysis of Autoclaved and Cured Structural Lightweight Concrete Made with Coal Bottom Ash and Silica Fume*. Material Science and Engineering A, 2010. 527: p. 3576-3684.
9. Dhanushkodi, K. *Top 10 Largest Countries in the World Sugar Producing (As On FY-2014-2015)*. 2016; Available from: <http://www.beeculture.com/catch-the-buzz-top-10-largest-sugar-producing-countries-in-the-world/>.
10. Portland Cement Association, *Special Concrete and Concrete Production*. 1975, New York: John Wiley & Sons, Inc.
11. Newman, J. and B.S. Choo, *Advance Concrete Technology: Process*. 2003, Burlington: Butterworth-Heinemann.
12. Neville, A.M., *Properties of Concrete*. Second Edition ed. 1973, London: Pitman Publishing Limited.
13. Narayanan, N. and K. Ramamurthy, *Structure and properties of aerated concrete: a review*. Cement and Concrete Research, 2000. 22: p. 321-329.

14. Troxell, G.E., H.E. Davis, and J.W. Kelly, *Composition and Properties of Concrete*. Second Edition ed. 1968, New York: McGraw-Hill, Inc.
15. Miness, S., J.F. Young, and D. Darwin, *Concrete*. 2002, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
16. American Society for testing and Materials, *ASTM C618 - 99 in Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*. 2000, Annual Book of ASTM Standards: Philadelphia.
17. Hong, S.-Y. and F.P. Glasser, *Phase relationship in CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system to 200°C at saturated steam pressure*. Cement and Concrete Research, 2004. 34: p. 1529-1534.
18. Shaw, S., S.M. Clark, and C.M.B. Henderson, *Hydrothermal formation of the calcium silicate hydrates, tobermorite (Ca<sub>5</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub>(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O) and xonotlite (Ca<sub>6</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>17</sub>(OH)<sub>2</sub>): an in situ synchrotron study*. Chemical Geology, 2000. 167: p. 129-140.
19. Reinik, J., et al., *Hydrothermal alkaline treatment of oil shale ash for synthesis of tobermorites*. Fuel, 2007. 86(5-6): p. 669-676.
20. Taylor, H.F.W., *Cement Chemistry*. second ed. ed. 1997, London: Thomas Telford Publishing.
21. Aguilar, R.A., O.B. Diaz, and J.I.E. Garcia, *Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates*. Construction and Building Materials, 2010. 24: p. 1166-1175.
22. Holt, E., *Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete*. Cement and Concrete Research, 2005. 35: p. 796-802.
23. American Society for testing and Materials, *ASTM C128 in Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*. 2007, Annual Book of ASTM Standards: Philadelphia.
24. American Society for testing and Materials, *ASTM C109 in Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. 2000, Annual Book of ASTM Standards: Philadelphia.
25. Wikipedia. *Scanning Electron Microscope*. 2011; Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_electron\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope).
26. American Society for testing and Materials, *ASTM C518, in Standard Test Method for Steady State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*. 2010, Annual Book of ASTM Standards: Philadelphia.

27. Cabrillac, R., et al., *Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity*. Construction and Building Materials, 2006. 20: p. 286-295.
28. Kunchariyakun, K., S. Asavapisit, and K. Sombatsompop, *Properties of autoclaved aerated concrete incorporating rice husk ash as partial replacement for fine aggregate*. Cement and Concrete Composites, 2015. 55: p. 11-16.
29. Kurama, H., İ.B. Topçu, and C. Karakurt, *Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. 209(2): p. 767-773.
30. Karakurt, C., H. Kurama, and L.B. Topcu, *Utilization of natural zeolite in aerated concrete production*. Cement and concrete Composites, 2010. 32: p. 1-8.
31. Jaturapitakkul, C. and W. Tangchirapat, *Use of pozzolanic materials in construction*. second ed. ed. 2009, Bangkok: Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
32. Chindaprasirt, P. and C. Jaturapitakkul, *Cement, Pozzolan and Concrete*. 5 ed. 2551, Bangkok: Thai Concrete Association.
33. Kurdowski, W., *Cement and Concrete Chemistry*. 2014, Springer: Netherlands.
34. Houston, J.H., R.S. Maxwell, and S.A. Carrill, *Transformation of meta-stable calcim silicate hydrates to tobermorite: reaction kinetics and molecular structure from XRD and NMR spectroscopy*. Geochemical transaction, 2009. 10: p. 1.
35. Chindaprasirt, P. and S. Rukzon, *Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar*. Construction and Building Materials, 2008. 22: p. 1601-1606.
36. Bui, P.T., et al., *A study on pozzolanic reaction of fly ash cement paste activated by an injection of alkali solution*. Construction and Building Materials, 2015. 94: p. 28-34.
37. Villar-Cociña, E., et al., *Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model*. Cement and Concrete Research, 2003. 33(4): p. 517-524.
38. Van, V.-T.-A., et al., *Pozzolanic reactivity of mesoporous amorphous rice husk ash in portlandite solution*. Construction and Building Materials, 2014. 59: p. 111-119.
39. Kikuma, J., et al., *In Situ Time-Resolved X-Ray Diffraction of Tobermorite Formation Process Under Autoclave Condition*. Journal of the American Ceramic Society, 2010. 93(9): p. 2667-2674.

40. Misuda, T., K. Sasaki, and H. Ishida, *Phase evolution during autoclaving process of aerated concrete*. Journal of the American Ceramic Society, 1992. 75: p. 1858-1863.
41. Isu, N., H. Ishida, and T. Mitsuda, *Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (I) tobermorite formation*. Cement and Concrete Research, 1995. 25: p. 243-248.
42. Isu, N., et al., *Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (II) fracture toughness, strength and micropore*. Cement and Concrete Research, 1995. 25: p. 249-254.
43. Thai Industrail Standards Institute (TISI), มอก. 1505-2541: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. 1998: ประเทศไทย.
44. Thai Industrail Standards Institute (TISI), มอก. 57-2530: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกแบบรับน้ำหนัก. 1987: ประเทศไทย.
45. Yoshimura, M., et al., *Hydrothermal conversion of calcite crystals to hydroxyapatite*. Materials Science and Engineering: C, 2004. 24(4): p. 521-525.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ

ตารางที่ ก-1 มาตรฐานคอนกรีตอุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ  
[43]

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงอัด (นิวัตน์ต่อตารางมิลลิเมตร)		ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด		
2	2.5	2.0	0.4	0.31 – 0.40
			0.5	0.41 – 0.50
4	5.0	4.0	0.6	0.51 -0.60
			0.7	0.61 – 0.70
			0.8	0.71 – 0.80
6	7.5	6.0	0.7	0.61 – 0.70
			0.8	0.71 – 0.80
8	10.0	8.0	0.8	0.71 – 0.80
			0.9	0.81 – 0.90
			1.0	0.91 – 1.00



**ภาคผนวก ข**  
**มาตรฐานคอนกรีตมวลลึกลับแบบรับน้ำหนัก**

**ตารางที่ ข-1** มาตรฐานคอนกรีตอุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตลึกลับแบบรับน้ำหนัก [44]

ชั้น คุณภาพ	กำลังอัด ต่ำสุด (MPa)	การดูดกลืนน้ำสูงสุด (กก./ลบ.ม.)					
		ความหนาแน่นแห้ง (กก./ลบ.ม.)					
		≤1680	1681- 1760	1761- 1840	1841- 1920	1921- 2009	≥2000
ก	11	240	224	208	192	176	160
ข	-	288	272	256	240	224	208
ค	-	-	-	-	-	-	-

**ตารางที่ ข-2** วัตถุประสงค์ในการใช้คอนกรีตลึกลับชั้นคุณภาพต่างๆ

ลักษณะของกำแพง	ป้องกันผิว	ไม่ป้องกันผิว
กำแพงฐานราก และกำแพงชั้น ฐาน	ชั้นคุณภาพ ก และ ข	ชั้นคุณภาพ ก*
กำแพงภายนอก (เหนือระดับ ดิน)	ทุกชั้นคุณภาพ	ชั้นคุณภาพ ก*
กำแพงภายใน	ทุกชั้นคุณภาพ	ทุกชั้นคุณภาพ

หมายเหตุ \*ควรทาผิวด้านนอกของกำแพงด้วยน้ำยากันซึม

โครงการย่อยที่ 2  
การใช้ประโยชน์จากถ้ำชานอ้อยในการผลิต  
บล็อกประสาน

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1. ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ประเทศไทยมีพื้นที่ในการปลูกอ้อยเป็นอันดับสามของโลก ซึ่งอ้อยส่วนใหญ่จะถูกนำมาผลิตน้ำตาล โดยเฉพาะในพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี มีโรงงานน้ำตาลประมาณ 8 – 10 โรงงาน ซึ่งแต่ละโรงมีกำลังการผลิตมากกว่า 10,000 ตันต่อปี จึงทำให้มีขานอ้อยในปริมาณมาก โดยในแต่ละโรงงานได้มีการนำขานอ้อยที่ได้มาเป็นเชื้อเพลิงภายในโรงงาน เป็นผลให้เกิดเถ้าขานอ้อยเป็นจำนวนมาก ซึ่งการกองเก็บของโรงงานส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะกองบนลานกว้าง หรือทิ้งลงในหลุม หรือบางโรงงานอาจจะมีเกษตรกรมารับไปปรับสภาพพื้นดินในการเพาะปลูก แต่ปริมาณการนำไปใช้ประโยชน์ในปัจจุบันยังมีไม่มากนัก จึงทำให้เกิดปัญหาในการกองเก็บ และก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่อชุมชนรอบโรงงาน โดยเฉพาะมลพิษทางอากาศประเภทฝุ่น ซึ่งจะก่อความรำคาญและเป็นผลเสียต่อสุขภาพของพนักงานในโรงงาน และคนในชุมชนรอบโรงงาน จากสมบัติทางเคมีของเถ้าขานอ้อยที่มีปริมาณของอะลูมินา ซิลิกาและเหล็กออกไซด์ประมาณร้อยละ 60 - 70 โดยน้ำหนัก จึงทำให้มีการนำเถ้าขานอ้อยมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต โดยนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วน

บล็อกประสานเป็นวัสดุก่อสร้างอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจและถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนในการผลิตต่ำ และสามารถผลิตได้จากวัสดุที่มีในท้องถิ่น เช่น ดินลูกรัง หินฝุ่น ททราย หรือวัสดุเหลือทิ้ง บล็อกประสานผลิตจากปูนซีเมนต์ และมวลรวมซึ่งส่วนใหญ่ใช้ดินลูกรังที่ต้องมีสมบัติเฉพาะนั้นคือ ต้องเป็นดินที่มีความเหนียว และมีความละเอียดสูงจึงจะสามารถขึ้นรูปแล้วมีรูปร่างที่สวยงามปัจจุบันบล็อกประสานจะใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุยึดประสาน โดยส่วนใหญ่จะใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินในการผลิตตั้งแต่อัตราส่วน 1:1 ถึง 1:12 โดยปริมาณดินที่เพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนจะมีค่ากำลังอัด และต้นทุนในการผลิตลดลง แต่บล็อกประสานที่ได้อาจจะไม่สามารถไปใช้ในงานที่ต้องรับกำลังสูงได้ ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาหาวัสดุที่เป็นของเสียจากการเกษตร และอุตสาหกรรมมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งสามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ และลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้อีกทางหนึ่ง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะนำของเสียจากโรงงานน้ำตาล นั่นคือ เถ้าขานอ้อย มาใช้แทนดินลูกรังบางส่วนในการผลิตบล็อกประสาน เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตบล็อกประสาน และยังเป็นเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าขานอ้อย นอกจากนี้ยังเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น โดยทำการศึกษาสมบัติด้านกำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ โดยเปรียบเทียบกับบล็อกประสานที่ขายในท้องตลาด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยต่อสมบัติของบล็อกประสาน

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีของเถ้าขาน้อย และดินลูกรัง ด้วยเทคนิค X-ray diffraction และ X-ray fluorescence นอกจากนั้นทำการทดสอบสมบัติเบื้องต้นของดินในด้านขีดจำกัดเหลว, พลาสติก, การหดตัว และการกระจายตัวของเม็ดดิน เป็นต้น
- 2) ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่อัตราส่วน 1:3, 1:5, 1:7 และ 1:9 และทำการแปรเปลี่ยนปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสม โดยเอาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดของเป็นเกณฑ์ จากนั้นทำการขึ้นรูป และนำไปทำการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป กำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ
- 3) เลือกอัตราส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดจากอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำเท่ากับ 1:3, 1:5, 1:7 และ 1:9 อย่างละอัตราส่วน มาทำการแทนที่ที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของดินลูกรัง จากนั้นนำไปทำการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป กำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ

### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นแนวทางในการผลิตบล็อกประสานซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าขาน้อยที่ถูกกองทิ้งรอการฝังกลบ และเป็นการลดต้นทุนในการผลิตบล็อกประสาน
- 2) ลดปริมาณเถ้าขาน้อยที่เหลือจากการใช้ขาน้อยเชื้อเพลิงในหม้อต้ม ซึ่งเป็นในกระบวนการกองเก็บจะก่อให้เกิดฝุ่น และก่อความรำคาญให้กับชุมชนรอบโรงงาน
- 3) สามารถส่งเสริม และพัฒนาอาชีพให้แก่คนในชุมชนรอบโรงงาน ที่สามารถนำเอาองค์ความรู้ในการผลิตบล็อกประสาน และเถ้าขาน้อยจากโรงงานมาเป็นการสร้างอาชีพให้กับคนในชุมชนรอบโรงงาน

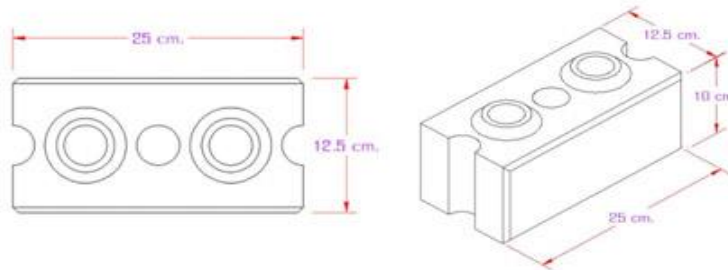
## บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บล็อกประสาน คือ วัสดุที่รับน้ำหนักที่ได้ทำการพัฒนารูปแบบให้มีรู และเดือยบนตัวบล็อก เพื่อให้สะดวกในการก่อสร้าง โดยเน้นการใช้วัตถุดิบในพื้นที่ ได้แก่ ดินลูกรัง หินฝุ่น ทราย หรือวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ที่มีความเหมาะสมนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม อัดเป็นก้อนด้วยเครื่องอัดแล้วนำมาบ่ม ให้บล็อกแข็งตัวประมาณ 7 วันจะได้คอนกรีตบล็อกที่มีความแข็งแรง มีรูปลักษณะพิเศษที่สามารถใช้ในการก่อสร้างอาคารต่างๆ หรือก่อเป็นถังเก็บน้ำได้อย่างรวดเร็ว สวยงาม และประหยัดกว่างานก่อสร้างทั่วไป

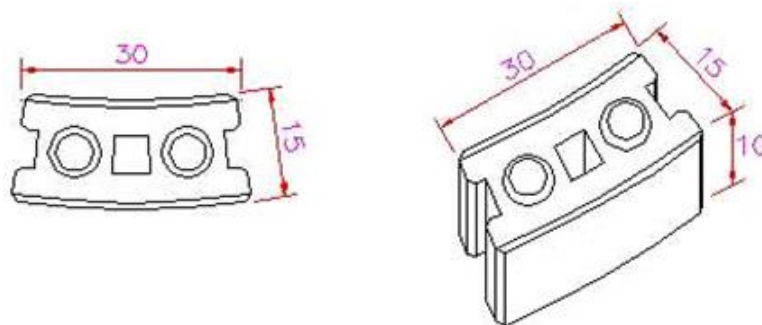
#### 2.1.1 ประเภทของบล็อกประสาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท เพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน

- 1) บล็อกตรงหรือทรงสี่เหลี่ยมใช้สำหรับก่อสร้างอาคาร



ภาพที่ 2.1 บล็อกตรงหรือทรงสี่เหลี่ยม (วุฒินัย กกก้าแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

- 2) บล็อกโค้งใช้สำหรับก่อสร้างถังเก็บน้ำ



ภาพที่ 2.2 บล็อกโค้ง (วุฒินัย กกก้าแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

#### 2.1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตบล็อกประสาน

- 1) ดิน

การเลือกดินที่มีคุณภาพดี จะคัดเลือกตามลักษณะการแบ่งชั้นคุณภาพดินสำหรับการทำถนน (ASTM D3282 Standard Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes) คือ มีฝุ่นดินน้อย มีมวลละเอียดแข็งตั้งแต่ร้อยละ 65 ขึ้นไป โดยน้ำหนัก เนื่องจากดินแต่ละแหล่งจะมีสมบัติต่างๆ ที่ไม่เหมือนกัน ดินบางประเภทเหมาะสมต่อการ

ใช้งาน แต่บางประเภทที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน ถ้านำมาใช้จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงหรือเมื่อผลิตออกมาแล้วจะได้บล็อกที่ไม่แข็งแรง และดินที่เลือกใช้ส่วนใหญ่ คือ ดินลูกรัง

## 2) ปูนซีเมนต์

ในการผลิตบล็อกประสาน ปูนซีเมนต์ที่ใช้จะต้องเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เลือกใช้ยี่ห้อใดก็ได้ตามความสะดวก แต่ต้องเป็นปูนโครงสร้างและได้รับมาตรฐาน มอก. สาเหตุที่เลือกใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 นั้น เพราะความคุ้มค่าต่อราคาสูงสุด สามารถผลิตบล็อกให้ได้กำลังตามมาตรฐาน โดยใช้ปูนซีเมนต์ไม่มากเกินไป และที่สำคัญ คือ สะดวก สามารถหาได้ทุกที่ทั่วประเทศไทย การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 จะให้ก้อนบล็อกประสานมีความแข็งแรง ทนการกัดกร่อนของน้ำได้ดี และไม่ควรรูปปูนซีเมนต์ผสม (ปูนก่อฉาบ) ซึ่งจะทำให้คุณภาพต่ำกว่า ทำให้ต้องใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จำนวน 2 เท่า เพื่อให้ได้คุณภาพเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ต้นทุนสูงขึ้น ปูนซีเมนต์ที่เลือกใช้ควรเป็นปูนใหม่ สด หีบห่อไม่แตกร้าว เมื่อแกะออกมาปูนซีเมนต์ยังเป็นผงดีไม่จับตัวเป็นก้อนแข็ง และอย่าลืมตรวจสอบวันผลิตข้างถุง อย่าให้ผลิตมานานมากเพราะปูนซีเมนต์อาจเสื่อมสภาพได้ การวางเก็บควรวางเป็นชั้นๆ ในที่อากาศถ่ายเทได้ ไม่ถูกลม ฝน แสงแดดจัดๆ และในการผลิตควรนำปูนซีเมนต์เก่ามาใช้ก่อนเมื่อหมดจึงนำปูนซีเมนต์ใหม่เข้ามาใช้หมุนเวียนไปเรื่อยๆ

อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบในการผลิตบล็อกประสาน หาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยส่วนใหญ่ แนะนำให้ผลิตที่อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมประมาณ 1 : 6 ถึง 1 : 7 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของมวลรวมเป็นหลัก แต่อาจปรับส่วนด้วยตนเองได้ โดยการผสมปูนซีเมนต์กับวัตถุดิบในอัตราส่วนที่ต่างกันไป เช่น ผลิตบล็อกด้วยอัตราส่วน 1 : 6, 1 : 7, 1 : 8 และ 1 : 9 จำนวนสูตรละ 3 ก้อน แล้วส่งตัวอย่างทดสอบความต้านทานแรงอัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่ใช้ และความต้านทานแรงอัดที่ได้ดังภาพ



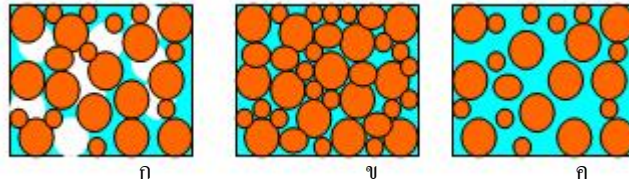
ภาพที่ 2.3 ผลของอัตราส่วนดินต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่อกำลังอัด (วุฒินัย กกก้าแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

จากภาพที่ 2.3 ในแกนตั้งเป็นกำลังอัด แกนนอนเป็นอัตราส่วนของดินที่ผสมต่อปูนซีเมนต์ 1 ส่วน โดยกำลังตามมาตรฐานจะอยู่ประมาณ 7 เมกะพาสคัล (ประมาณ 70 กก./ซม.) ดังนั้นอัตราส่วนดินที่แนะนำจึงอยู่ในช่วงประมาณ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อดิน 6 - 8 ส่วน โดยอัตราส่วนที่น้อยกว่านี้ถึงแม้กำลังจะดีขึ้น แต่ในแง่การลงทุนจะไม่คุ้มเนื่องจากต้องเปลืองปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น

มาก และในอัตราส่วนดินที่มากเกินไปก็อาจจะทำให้กำลังไม่ได้ตามมาตรฐาน โดยสังเกตได้จากค่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินที่ประมาณ 1 : 8 ขึ้นไปกำลังมีแนวโน้มที่จะลดลงต่ำกว่า 7 เมกะปาสคัล (ประมาณ 70 กก./ซม.) แต่ทั้งนี้ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดิน จะเป็นเท่าไรขึ้นอยู่กับแหล่งดินที่นำมาใช้ ดังนั้น เมื่อผลิตแล้วต้องทดสอบด้านกำลังอัดด้วยว่าได้เท่าไร เพื่อจะได้ทราบถึงปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ควรใช้ เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองเกินไป หรือกำลังไม่ได้มาตรฐาน

### 3) น้ำสะอาด

น้ำที่ใช้ผสมมีหน้าที่หลัก คือ เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ นอกจากนี้หน้าที่หลักที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ น้ำจะเป็นเสมือนสารหล่อลื่นทำให้แรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินลดลง ทำให้การบดอัดดินลงในเครื่องอัดทำได้ง่ายขึ้น จากรูปด้านบนจะแสดงให้เห็นถึงจุดที่มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด โดยในแกนตั้งจะเป็นความหนาแน่นของดิน และแกนนอนเป็นปริมาณน้ำ ปริมาณน้ำที่ดีที่สุดคือ จุดที่โค้งขึ้นเปลี่ยนกลับเป็นโค้งลงคือมีน้ำหนักรวมมากที่สุด ซึ่งก็คือ ดินมีความแน่นมากที่สุด ผลที่ได้คือกำลังก็จะสูงสุดด้วย



ภาพที่ 2.4 ผลของปริมาณน้ำที่มีต่อการกระจายตัวของเม็ดดิน

(วุฒินัย กกกำแพง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

จากภาพที่ 2.4 (ก) คือ ปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปก่อนที่จะถึงจุดที่เป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสม การเรียงตัวของเม็ดดินในกรณีนี้จะไม่แน่นมาก เพราะแรงเสียดทานระหว่างเม็ดดินมีมากทำให้การบดอัดดินทำได้ยาก เมื่อทำได้ยากทำให้มีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมาก เมื่อบดอัดลงในเครื่องอัดทำให้บล็อกที่ผลิตได้มีช่องว่างมากทำให้กำลังต่ำลง จากภาพที่ 2.4 (ข) เป็นกรณีที่มีปริมาณน้ำพอดีคือ มีปริมาณน้ำคลุกเคล้าในวัตถุบอย่างทั่วถึง ทำให้การบดอัดดินทำได้ง่ายเพราะมีแรงเสียดทานต่ำในกรณีนี้ช่องว่างทั้งหมดจะถูกแทนที่ด้วยน้ำซึ่งถือว่าเป็นกรณีที่มีการบดอัดทำได้แน่นมากที่สุด ทำให้บล็อกที่ผลิตได้มีช่องว่างน้อยที่สุดจึงทำให้มีความแข็งแรงมาก

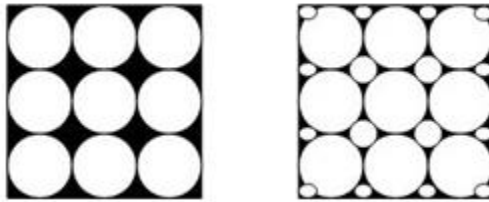
จากภาพที่ 2.4 (ค) เป็นกรณีที่มีปริมาณน้ำมากเกินไปเมื่อมีน้ำมากเกินไปให้น้ำเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดดินทำให้เม็ดดินแยกตัวออกจากกัน เมื่อบดอัดดินลงในเครื่องอัดทำให้น้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดดินถูกบีบออกมา เมื่ออัดก้อนบล็อกทำให้น้ำส่วนเกินถูกบีบออกมาจึงมีน้ำเยิ้มออกมาเมื่ออัดก้อนบล็อก และบล็อกจะมีความแข็งแรงต่ำจึงมองเห็นก้อนบล็อกอ่อนตัวเมื่อยกออกมาจากเครื่องอัด การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมต้องหาทุกครั้งที่เปลี่ยนแหล่งดินเพราะดินแต่ละชนิดต้องการปริมาณน้ำไม่เท่ากัน แต่ถ้าใช้แหล่งดินเดิมอนุโลมให้ใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่เคยหาไว้ก่อนได้ แต่วัตถุดิบที่ใช้ต้องอยู่ในสภาพที่แห้ง เพราะถ้าวัตถุดิบเปียกปริมาณน้ำที่เติมจะไม่เท่าเดิมโดยจะต้องหักน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ในมวลดินออกไปซึ่งหาได้ยาก ดังนั้นการใช้วัตถุดิบที่แห้งจะเหมาะสมกว่า

### 4) ทรายละเอียด หินฝุ่น

จะใช้ในกรณีที่ ดินที่เป็นแหล่งวัตถุดิบมีสภาพไม่เหมาะสมและต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำมาผลิต เพื่อปรับสัดส่วนขนาดละเอียดใหม่ให้มีความเหมาะสม วัสดุที่นำมาใช้ผสมเพื่อปรับขนาด

คละ ต้องทราบแหล่งของวัตถุดิบที่แน่นอน เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละที่คุณสมบัติจะแตกต่างกัน ทำให้เกิดความแปรปรวนได้ถ้าใช้จากคนละแหล่ง

ดินที่มีขนาดคละดี คือ จะมีสัดส่วนของดินขนาดเม็ดใหญ่ ขนาดเม็ดกลางและขนาดเม็ดเล็กปนกันอยู่อย่างเหมาะสมเม็ดดินที่มีขนาดเล็กก็จะเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างเม็ดใหญ่ ทำให้เกิดความแน่น และความแข็งแรงตามมา ลองเปรียบเทียบง่าย ๆ กับการนำลูกปิงปองวางเรียงในกล่องจะเห็นได้ว่าจะมีช่องว่างระหว่างเม็ดลูกปิงปองอยู่มาก แต่ถ้าเราหาลูกปิงปองซึ่งมีขนาดเล็กๆ เพิ่มลงไป ช่องว่างก็จะลดลงเนื่องจากลูกปิงปองเม็ดเล็กจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างลูกปิงปองเม็ดใหญ่



ภาพที่ 2.5 เปรียบเทียบการกระจายตัวของเม็ดดิน (วุฒินัย กกกำแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

จากภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า เปรียบด้านซ้ายคือ ดินที่การกระจายตัวไม่ดี ด้านขวาคือดินที่มีเม็ดดินขนาดต่างๆ ปนกันอยู่ ช่องว่างในภาพด้านขวาจะมีน้อยกว่ามากเมื่อปริมาตรเท่ากัน แต่น้ำหนักต่อก้อนสูงกว่า แสดงว่ามีความหนาแน่นสูงกว่า ซึ่งผลคือกำลังก็จะสูงกว่าด้วย

### 2.1.3 ขั้นตอนการทำลื้อคประสาน

- 1) ทดสอบแหล่งดินเพื่อหาแหล่งที่เหมาะสมที่สุด และกำหนดส่วนผสมที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ (วุฒินัย กกกำแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

- 2) เตรียมวัตถุดิบ ถ้ามีความชื้นมากควรนำไปตากให้แห้งและกองเก็บวัตถุดิบในที่ร่มให้มากเพียงพอที่จะทำการผลิตตลอดเวลา หากดินเป็นก้อนหรือมีมวลหยาบน้อย ควรร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 - 4 มม. ไม่ควรใช้ตาละเอียดมากเกินไป เพราะจะทำให้ได้แต่เนื้อฝุ่นดิน ทำให้บล็อคไม่มีความแข็งแรง ถ้าเนื้อดินมีก้อนใหญ่หรือมวลหยาบมาก ควรใช้เครื่องบดร่อน แล้วกองเก็บในที่ร่มเพื่อรอผลิต





ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนในการผสมวัสดุดิบ (วุฒินัย กกกำแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

3) ในการผสมควรผสมดินแห้งหรือมวลรวมกับซีเมนต์ให้เข้ากันก่อน แล้วค่อยๆ เติมน้ำโดยใช้ฝักบัว หรือหัวฉีดพ่นให้เป็นละอองกว้าง น้ำที่ใช้ควรเป็นน้ำสะอาด ใช้ผสมหลังจากผสมดินและซีเมนต์เข้าด้วยกันแล้วในปริมาณที่เหมาะสม โดยใช้ปริมาณน้ำที่ดีที่สุด



ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการนำดินที่ผสมแล้วเข้าเครื่องอัด (วุฒินัย กกกำแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

4) หลังจากนั้นจึงนำดินที่ผสมแล้วเข้าเครื่องอัด โดยตวงวัดหน่วยเป็นน้ำหนัก เติมส่วนผสมลงในแบบอัดโดยใช้น้ำหนักมากที่สุดที่สามารถทำงานได้สะดวก ควรใช้ส่วนผสมให้หมดภายใน 30 นาที หลังจากผสมน้ำ เพื่อป้องกันปูนก่อตัวก่อนอัดขึ้นรูป

5) บล็อกประสานที่อัดเป็นก้อนแล้ว ควรผึ่งในที่ร่มอย่างน้อย 1 วัน จึงเริ่มบ่มจนอายุครบ 7 วัน



ภาพที่ 2.9 ลักษณะการผึ่งบล็อกประสานในที่ร่ม (วุฒินัย กกกำแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป.)

#### 2.1.4 วิธีการบ่ม

หลังจากนำบล็อกออกจากเครื่องอัดแล้วนำมาจัดเรียงในที่ร่มจนมีอายุครบ 1 วัน เริ่มบ่มโดยการรดน้ำด้วยฝักบัวหรือฉีดพ่นเป็นละอองให้ชุ่ม แล้วคลุมด้วยผ้าพลาสติกไม่ให้ไอน้ำระเหยออกทิ้งไว้อีก 9 วัน จนมีอายุครบ 7 วัน จนมีความแข็งแรงพร้อมส่งออกจำหน่ายหรือใช้งานได้ ไม่ควรเคลื่อนย้ายก่อนกำหนดเพราะจะทำให้ก้อนบิ่น หรือเกิดการแตกร้าวได้ง่าย การบ่มไม่ควรให้น้ำมากเกินไป เพราะอาจทำให้มีปัญหาคราบขาวได้ ควรบ่มด้วยปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ คือเพียงพอให้ความชื้นก็เพียงพอ

#### 2.1.5 การทดสอบ

เป็นการทดสอบเพื่อกำหนดสูตรส่วนผสมโดยละเอียด โดยการกำหนดสัดส่วนปูนที่ใช้ในการผลิตตามหลักสถิติ เพื่อให้ได้สัดส่วนที่ใช้ปูนน้อยที่สุด ด้วยการปรับอัตราส่วนผสมที่ใช้ในการผสม และนำมาหาค่าความต้านทานแรงอัด ซึ่งจะทำให้ทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างปูนที่ใช้และความต้านทานแรงอัด และกำหนดสัดส่วนปูนให้ได้ค่าความต้านทานแรงอัดที่ประมาณ 70 + ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน กิโลกรัม/ตร.ซม. เมื่อไว้เพื่อความสบายใจของผู้ใช้ และปริมาณการขายในอนาคต

**2.1.6 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอิฐบล็อกประสาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอุตสาหกรรม. 2547)**

- 1) **ขอบข่าย** มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมเฉพาะอิฐบล็อกประสานที่มีดินลูกรังและปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบหลัก
- 2) **บทนิยาม** ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ มีดังต่อไปนี้
  - อิฐบล็อกประสาน หมายถึง อิฐบล็อกที่ได้จากการนำดินลูกรัง ผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม อาจผสมวัสดุอื่นๆ เช่น หินฝุ่น ทราย กวนให้เข้ากัน เทลงในแบบพิมพ์ที่มีการออกแบบให้มีรูร่อง และเตื่อย อัดเป็นก้อน แล้วบ่มให้แข็งตัว
  - อิฐบล็อกประสาน ชนิดรับน้ำหนัก หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ใช้ก่อเพื่อรับน้ำหนักโครงสร้างอาคารได้ เช่น ก่อเสา ก่อผนัง
  - อิฐบล็อกประสาน ชนิดไม่รับน้ำหนัก หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ใช้ก่อผนังกันห้องหรือก่อส่วนอื่นภายในอาคารที่ไม่ใช่ส่วนที่ต้องรับน้ำหนักโครงสร้างอาคาร
- 3) **ชนิด** อิฐบล็อกประสาน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ
  - ชนิดรับน้ำหนัก
  - ชนิดไม่รับน้ำหนัก
- 4) **คุณลักษณะที่ต้องการ**
  - ลักษณะทั่วไปต้องไม่มีรอยแตกหรือร้าว อาจบิ่นได้เล็กน้อย
  - มิติต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ที่ฉลาก โดยแต่ละมิติมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 2$  มิลลิเมตร
  - ความต้านแรงอัด
    - ชนิดรับน้ำหนัก ค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 7.0 เมกะพาสคัล
    - ชนิดไม่รับน้ำหนัก ค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะพาสคัล
  - การดูดกลืนน้ำ (เฉพาะชนิดรับน้ำหนัก) ต้องเป็นไปตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การดุดกลืนน้ำของบล็อกประสาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอุตสาหกรรม. 2547)

น้ำหนักอิฐบล็อกประสานเมื่ออบแห้ง (กิโลกรัม)	การดุดกลืนน้ำสูงสุดเฉลี่ยจาก อิฐบล็อกประสาน 5 ก้อน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
1,680 และน้อยกว่า	288
1,681 – 1,760	272
1,761 – 1,840	256
1,841 – 1,920	240
1,921 – 2,000	224
มากกว่า 2,000	208

5) การบรรจุ หากมีการบรรจุ ให้บรรจุอิฐบล็อกประสานในภาชนะบรรจุที่สามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอิฐบล็อกประสานได้

6) เครื่องหมายและฉลาก ที่ฉลากหรือภาชนะบรรจุอิฐบล็อกประสาน อย่างน้อยต้องมีเลขอักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

(1) ชื่อผลิตภัณฑ์

(2) มิติ

(3) เดือน ปีที่ทำ

(4) ข้อเสนอแนะในการใช้และการดูแลรักษา

(5) ชื่อผู้ทำ หรือสถานที่ทำ พร้อมสถานที่ตั้ง หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียนในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

#### 7) การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

- รุ่น ในที่นี้ หมายถึง อิฐบล็อกประสานที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

- การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

a. การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบลักษณะทั่วไป มิติ การบรรจุ และ เครื่องหมายและฉลากให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 5 ตัวอย่าง เมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4.1 ข้อ 4.2 ข้อ 5. และข้อ 6. จึงจะถือว่าอิฐบล็อกประสานรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

b. การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบความต้านแรงอัด ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบ ตามข้อ 1.1 แล้ว จำนวน 5 ตัวอย่าง เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4.3 จึงจะถือว่า อิฐบล็อกประสานรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

c. การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบการดุดกลืนน้ำ ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 5 ตัวอย่าง เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4.4 จึงจะถือว่าอิฐบล็อกประสานรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

- เกณฑ์ตัดสินตัวอย่างอิฐบล็อกประสานต้องเป็นไปตามข้อ 1.1 ข้อ 1.2 และข้อทุกข้อ จึงจะถือว่า อิฐบล็อกประสานรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้

#### 8) การทดสอบ

- การทดสอบลักษณะทั่วไป การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลากให้ตรวจพินิจ  
 - การทดสอบมิติให้ใช้เครื่องวัดที่เหมาะสม  
 - การทดสอบความต้านทานแรงอัดและการดูดกลืนน้ำให้ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก มาตรฐานเลขที่ มอก. 57 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักมาตรฐานเลขที่ มอก. 58

#### 2.1.7 ข้อดีของอาคารที่สร้างด้วยบล็อกประสาน

- 1) ใช้วัสดุที่หาได้ในท้องถิ่น มีความแข็งแรง ทนทาน
- 2) ก่อสร้างง่าย รวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้ทั้งเสา ไม้แบบ และการฉาบปูน
- 3) ประหยัดราคาในการก่อสร้าง เพราะลดเวลา และค่าแรงงานในการก่อสร้าง
- 4) มีความสวยงามตามธรรมชาติ โดยไม่ต้องทาสี
- 5) สร้างงานและอาชีพเสริมให้แก่ประชาชนทั้งในเมือง และชนบท
- 6) ช่วยอนุรักษ์ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยลดการตัดไม้ทำลายป่า เพื่อนำมาใช้ในการก่อสร้าง

#### 2.1.8 ปูนซีเมนต์ (ปริญญา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

ปูนซีเมนต์เป็นคำที่มาจากภาษาละติน หมายถึง สารที่สามารถยึดหรือประสานของแข็งหรือมวลรวม เช่น หินหรือกรวด และทราย ให้แข็งติดเป็นชิ้นเดียวกัน นิยมใช้ในงานก่อสร้างเป็นหลัก โดยมีการนำปูนซีเมนต์ไปใช้งาน ทั้งในรูปของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต โดยซีเมนต์เพสต์คือ ส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ และอาจมีสารผสมเพิ่มหรือน้ำยาผสมคอนกรีตด้วย มอร์ตาร์คือ ส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์กับทราย และคอนกรีต คือ ส่วนผสมของมอร์ตาร์กับหินหรือกรวด

#### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์

เมื่อทำการปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จะถูกขับออกจากหินปูนหรือดินสอพองเหลือเพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3 เกิดจากการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียม (จากหินปูนหรือดินสอพอง) กับซิลิกา อลูมินา และเหล็ก (จากหินดำหรือดินเหนียวหรือดินดาน)

ขั้นตอนที่ 4 เกิดการรวมตัวของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยกระบวนการตกผลึก เมื่อมีการทำให้เย็นลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

- ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

- ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
<b>ออกไซด์หลัก</b>	
CaO	60 - 67
SiO <sub>2</sub>	17 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 - 6.0
<b>ออกไซด์รอง</b>	
MgO	0.1 5.5
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0.5 - 1.3
TiO <sub>2</sub>	0.1 0.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1 0.2
SO <sub>3</sub>	1 - 3

ออกไซด์หลักจะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญ 4 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

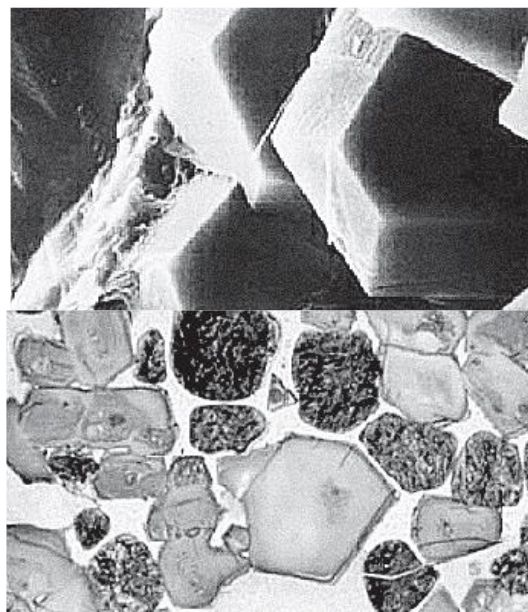
ชื่อสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	3CaO•SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Aluminate)	2CaO•SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	3CaO•Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	4CaO•Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> •Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

## 2.2.2 สมบัติของสารประกอบหลัก

คุณสมบัติของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด มีผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนี้

### 2.2.2.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ หรือ Alite)

$C_3S$  เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีอ่อนกว่า  $C_2S$  ดังแสดงในภาพที่ 2.1 คุณสมบัติของ  $C_3S$  จะเหมือนกับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวและการแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก ดังแสดงในภาพ 2.2 โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดในช่วงแรกของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปอร์เซ็นต์ของ  $C_3S$  เพิ่มขึ้นโดยปริมาณยิปซัมจะมีผลต่อกำลังของ  $C_3S$  ด้วย ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี  $C_3S$  อยู่ประมาณ 50-70% ดังแสดงในตารางที่ 2.3



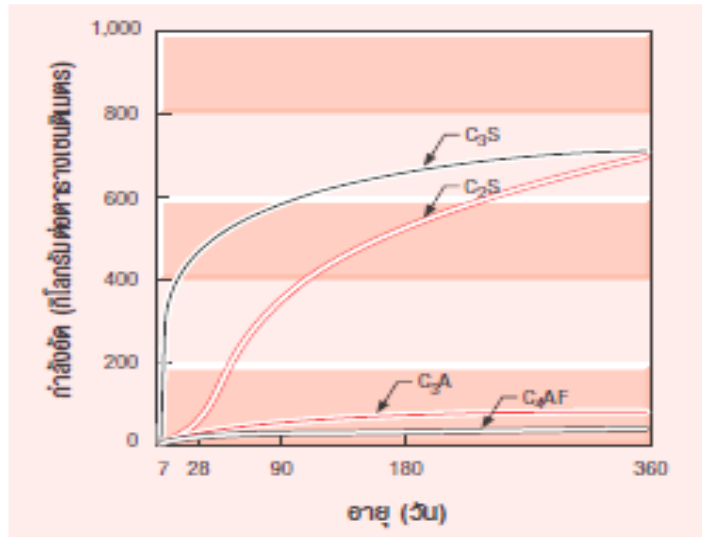
(a)

(b)

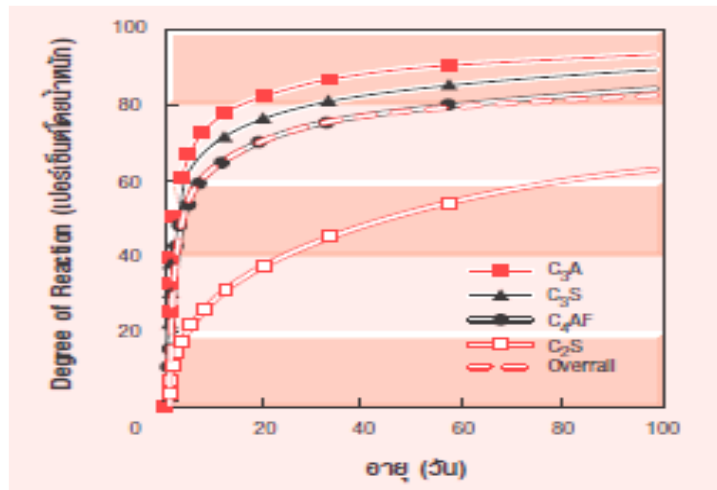
ภาพที่ 2.10 รูปร่างของ  $C_3S$  ซึ่งเป็นผลึก 6 เหลี่ยม และ  $C_3S$  เป็นเม็ดกลมสีดำ (ปริณูญา และชัย จาตุ-รพิทักษ์กุล, 2551)

a) ผลึก  $C_3S$  (Alite) ในรูปเม็ดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้เครื่อง Scanning Elcctron (SEM) (ขยาย 3,000 เท่า)

b) ส่วนประกอบของปูนเม็ด ประกอบด้วย  $C_3S$  (Alite) ซึ่งมีสีอ่อนกว่าและรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ส่วนผลึกที่มีลักษณะกลมและมีสีทึบ คือ  $C_2S$  (Beline) (ขยาย 4,000 เท่า)



a)



b)

ภาพที่ 2.11 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  
 a) กำลังอัดของสารประกอบหลัก และ b) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน  
 (ปริญา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

ตารางที่ 2.4 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบหลักของปูนเม็ด  
 (ปริญา และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551)

สารประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์ของปูนเม็ด)
C <sub>3</sub> S (Alite)	50-70
C <sub>2</sub> S (Beline)	15-30
C <sub>3</sub> A	5-10
C <sub>4</sub> AF (Celite)	5-15

### 2.2.2.2 ไตคัลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S หรือ Beline)

C<sub>2</sub>S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C<sub>2</sub>S มีอยู่หลายรูป แต่มีเพียง βC<sub>2</sub>S เท่านั้นที่มีความเสถียร ณ อุณหภูมิทั่วไป βC<sub>2</sub>S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวและเกิดความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวแล้วจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆในช่วงแรก และกำลังอัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีอายุมากกว่า 7 วัน แต่ในระยะยาวได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C<sub>2</sub>S ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>2</sub>S อยู่ประมาณร้อยละ 15-30

### 2.2.2.3 ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (C<sub>3</sub>A)

C<sub>3</sub>A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันทีก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนสูงในช่วงแรก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงไปในช่วงขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่หน่วงการก่อตัวเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของ C<sub>3</sub>A และจะพัฒนากำลังอัดในช่วง 1-2 วัน แต่มีค่ากำลังค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>3</sub>A อยู่ประมาณร้อยละ 5-10 นอกจากนี้ยังพบว่า ปูนซีเมนต์ที่มี C<sub>3</sub>A ต่ำกว่า จะสามารถทนทานต่อซัลเฟตได้ดีกว่า

### 2.2.2.4 เตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C<sub>4</sub>AF หรือ Celite)

C<sub>4</sub>AF เป็นสารประกอบที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีสารประกอบแร่เหล็กและอลูมิเนียม เพื่อลดอุณหภูมิของปูนซีเมนต์และจะมีผลต่อสีของปูนซีเมนต์ โดยทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา C<sub>4</sub>AF มีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วและก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม ค่ากำลังอัดของ C<sub>4</sub>AF มีค่าต่ำและไม่แน่นอน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C<sub>4</sub>AF อยู่ประมาณร้อยละ 5-15

## 2.2.3 สมบัติของสารประกอบรอง

### 2.2.3.1 ยิปซัม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate หรือ CaSO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O)

ยิปซัมเป็นหนึ่งในสามรูปแบบของสารประกอบคัลเซียมซัลเฟต ได้แก่

- ยิปซัม ชัม (Gypsum หรือ Calcium Sulphate หรือ CaSO<sub>4</sub>•2H<sub>2</sub>O)
- Anhydrite (หรือ Anhydrous Calcium Sulphate หรือ CaSO<sub>4</sub>)
- Plaster หรือ Hemihydrate (หรือ plaster of paris หรือ Bassanite หรือ Calcium Sulphate Hemihydrate หรือ CaSO<sub>4</sub>•0.5H<sub>2</sub>O)

โดยจะมีการเติมยิปซัมในระหว่างการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำปฏิกิริยากับ C<sub>3</sub>A เป็น Ettringite (Calcium Trisulphoaluminate) เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C<sub>3</sub>A หรือเป็นการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ถ้าไม่ได้เติมยิปซัม ปูนซีเมนต์จะเกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสม เพื่อให้ปูนซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงสุด และเกิดการหดน้อยที่สุดโดยปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- ปริมาณอัลคาไลออกไซด์ ได้แก่ Na<sub>2</sub>O และ K<sub>2</sub>O
- ปริมาณ C<sub>3</sub>A
- ความละเอียด (Fineness) ของปูนซีเมนต์



นอกจากนี้จะต้องมีการควบคุมปริมาณยิปซัมที่ใส่ไม่ให้มากเกินไป เพราะอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากปริมาตรที่เพิ่มขึ้นจากการเกิด Ettringite มากเกินไป

### 2.2.3.2 Free Line (CaO)

Free Line สามารถเกิดได้ 2 กรณี ได้แก่

- เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป แต่ทำปฏิกิริยากับ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ได้หมด

- เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณ CaO มากเกินไป CaO มากเกินไปแต่ทำปฏิกิริยากับ ออกไซด์ต่างๆ ไม่สมบูรณ์ Free Line จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆหลังจากที่ปูนซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดการขยายปริมาตร ที่อาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวและเสียหายได้ โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ความไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime (Unsoundness Due to Lime)”

นอกจากปริมาณ CaO ที่มีผลต่อความไม่อยู่ตัวแล้ว ขนาดของอนุภาคและการกระจายตัวของปูนซีเมนต์ก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลเช่นกัน

### 2.2.3.3 แมกนีเซียมออกไซด์ หรือแมกนีเซียม (Magnesium Oxide หรือ Magnesia หรือ MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์โดยปกติจะมี  $\text{MgCO}_3$  เมื่อเผาจะเกิดการแยกตัวเป็น MgO และ  $\text{CO}_2$  แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเหลวเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปผลึก Periclase ( $\text{MgO}$ ) ซึ่งเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชัน จะเหมือนกับ CaO คือ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness) และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้ การขยายตัวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์
- ขนาดของ MgO

ความไม่อยู่ตัวของ MgO จะขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก เพราะถ้าผลึกมีขนาดเล็ก ปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วที่อุณหภูมิปกติ MgO จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ช้ามากโดยใช้เวลานานเป็นปีๆ ดังนั้น การทดสอบการขยายตัวในช่วงเวลาสั้นๆ จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้จึงได้นำวิธีการของ Autoclave มาใช้ในการทดสอบการขยายตัว อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดค่าการขยายตัว อีกทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถวัดค่าการขยายตัวรวมอันเกิดจาก CaO และ MgO ได้อีกด้วย

### 2.2.3.4 อัลคาไลออกไซด์ (Alkali Oxides หรือ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ )

อัลคาไลออกไซด์ ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไลหรือต่างในปูนซีเมนต์มาผสมเป็นคอนกรีต จะทำให้เกิด “ปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม (Alkali – Aggregate Reaction หรือ AAR)” ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยาอัลคาไล ควรเลือกใช้ปูนที่มีอัลคาไลต่ำ กล่าวคือ ปริมาณอัลคาไลในปูนซีเมนต์ หรือ Total Alkalis (หรือ  $\text{Eq.Na}_2\text{O}$ ) จะต้องไม่เกิน 0.6% โดยสามารถคำนวณหาค่า Total Alkalis ได้จากสูตร

$$\text{Total Alkalis} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658(\text{K}_2\text{O})$$

## 2.2.4 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทของปูนซีเมนต์ตามลักษณะการใช้งาน แบ่งออก 3 กลุ่ม หลักๆได้แก่

- ปูนซีเมนต์สำหรับงานโครงสร้างและงานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีต เช่น ปูนตราช้าง, ปูนตราช้างรับกำลังอัดเร็ว, ปูนตราช้างทนซัลเฟตสูง, ปูนตราช้างทนน้ำเค็ม ดินเค็ม , และปูนตราช้างงานหล่อ เป็นต้น
- ปูนซีเมนต์สำหรับงานก่อ งานฉาบ เช่น ปูนตราเสือ , ปูนตราแรด , และปูนตราเสือพลัส เป็นต้น
- ปูนซีเมนต์สำหรับงานพิเศษ เช่น ปูนตราช้างชุดเจาะน้ำมัน, ปูนซีเมนต์ขาวตราช้างเผือก และปูนซีเมนต์ขาวตราเสือ เป็นต้น

ตามมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของประเทศไทย คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ มอก. 15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ด้วยกัน ได้แก่

1. ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา
2. ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง
3. ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดสูง
4. ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ
5. ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตสูง

มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของสหรัฐอเมริกา คือ ASTM C 150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 8 ประเภท ซึ่งนอกจากประกอบด้วยปูนซีเมนต์ทั้ง 5 ประเภท ข้างต้นแล้ว ยังมีประเภทกระจายกักฟองอากาศอีก 3 ประเภท ได้แก่ ประเภท 1A , ประเภท 2A , และประเภท 3A

### 2.1.9 มวลรวมละเอียด

มวลรวม คือ วัสดุที่ใช้สำหรับผสมกับซีเมนต์เพสต์ทำให้ผลผลิตที่ได้ออกมาเป็น คอนกรีต มวลรวมที่ใช้มากที่สุดคือ หิน และทรายคอนกรีตทั่วไปจะมีหินและทรายผสมอยู่ประมาณ 70% - 80% ของปริมาตรคอนกรีต คุณภาพหินและทรายที่ใช้ต้องพิจารณาอย่างพิถีพิถันเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นอย่างมาก

### ประเภทของมวลรวม

#### แบ่งตามแหล่งกำเนิด

- 1) จากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตาม
- 2) ธรรมชาติ ได้แก่ หินย่อย (Crushed Stone) กรวดแม่น้ำ (Pebble) และทราย(Sand)
- 3) ที่มนุษย์ทำขึ้น (Artificial Aggregate) ได้แก่ ดินเหนียวเผา (Burnt Clay)

#### แบ่งตามน้ำหนัก

1) มวลรวมน้ำหนักเบา (Light Weight Agg.) ความหนาแน่น 300 - 1,100 กก/ม<sup>3</sup> ที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น Diatomite, Pumice, Scoria, Volcanic Cinder, Tuff มีการเผาวัสดุธรรมชาติจนขยายตัวเนื่องจากก๊าซที่ดันออกมา เช่น การเผาดินเหนียว (clay) , ดินดาน (shale) , หินชนวน

- 2) มวลรวมน้ำหนักปกติ (Normal Weight Agg.)
  - ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับอาคารคอนกรีตทั่วไป
  - ความหนาแน่น 1,500 – 1,800 กก./ม<sup>3</sup> และความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.5 - 2.8
  - ได้แก่ หินปูน หินแกรนิต หินทราย ทรายบก ทรายแม่น้ำ
- 3) มวลรวมน้ำหนักมาก (Heavy Weight Agg.)
  - ใช้ในการผลิตคอนกรีตสำหรับอาคารป้องกันการแพร่กระจายกัมมันตภาพรังสี เช่น เตาปฏิกรณ์ปรมาณู
  - ใช้หินธรรมชาติและความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 4 ขึ้นไป เช่น Barite, Hematite, Magnetite, Limonite
  - ความหนาแน่น 2,400 - 3,100 กก/ม<sup>3</sup>

### 2.1.10 ลักษณะของดินลูกรัง

Sivarajaisinghan and Alexander and Cady ได้ให้คำจำกัดความดินลูกรังว่าเป็นแร่ธาตุที่สลายตัวมานาน ส่วนมากประกอบไปด้วย Secondary oxide of iron หรือลูมินัม (Aluminum) หรือทั้งสองอย่าง ซึ่งเกือบจะไม่เป็นต่าง และส่วนมากประกอบด้วย Silica แต่อาจจะมีแร่ Quartz และแร่ Kaolinite เป็นจำนวนมากได้ มีลักษณะแข็งหรืออาจจะแข็งเมื่อเปียกและแห้ง มีสีของ Oxide คือ สีน้ำตาลหรือสีแดง หรือสีน้ำตาลแดง

**ความหมายของดินลูกรัง หรือดินปนกรวด (skeletal soils)** ตามระบบอนุกรมวิธานดินกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา หมายถึง ดินซึ่งมีส่วนชั้นหยาบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร มากกว่าร้อยละ 35 โดยปริมาตร และมีอนุภาคดินที่พอจะแทรกอยู่ในช่องว่างที่มีขนาดโตกว่า 1 มิลลิเมตร ภายในชั้นควบคุมชั้นวงศ์ดินจากคำนิยามของกองสำรวจดิน กรมพัฒนาที่ดิน หมายถึง เศษส่วนหินและ/หรือก้อนกรวด

**ลักษณะของดินลูกรัง** จัดอยู่ในประเภท skeletal soil ได้แก่ ดินที่มีเศษหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร หรือใหญ่กว่าอยู่ในดินเป็นปริมาณร้อยละ 35 หรือมากกว่าโดยปริมาตร ที่มีความลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตร จากผิวดิน เป็นได้ทั้ง ดินทราย (sandy - skeletal) ดินร่วน (loamy - skeletal) และดินเหนียว (clay skeletal) เปิดได้ทุกสภาพพื้นที่ (landform)

ดินลูกรัง (lateritic soil) จัดอยู่ในกลุ่มดิน skeletal soil หรือดินต้นเป็นดินที่มีชั้นศิลาแลง (laterite) เกิดขึ้นในหน้าตัด ดินซึ่งแสดงให้เห็นว่า ขบวนการสลายตัวผุพัง ต่างๆ เกือบสิ้นสุดแล้ว ธาตุอาหารพืชในวัตถุต้นกำเนิดเดิมถูกชะล้าง ออกไปจากดินหรืออยู่ในรูปที่พืช ไม่อาจนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยทั่วไปดินลูกรังแยกได้เป็น 2 ชนิด ที่พบในชั้นของดิน ที่สามารถแยกได้ชัดเจนคือ ประเภทดินลูกรังร่วน หรือเป็นก้อนเกาะเป็นแผ่นแน่นที่บ ลูกรังร่วน โดยปกติแล้วจะมีขนาดแตกต่างกันมากตั้งแต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ถึง 4.5 เซนติเมตร รายละเอียดทั้ง 2 แบบสามารถแยกได้ ดังนี้ คือ แบบแรกเมื่อใช้มือบิออกจะเห็นลักษณะ Concentric lamination characteristics แต่แบบที่ 2 จะไม่เห็น โดยทางปฏิบัติ แบบแรก เรียกว่า true laterite หรือ ground water laterite ส่วนแบบหลังเรียกว่า pseudo laterite โดยทั่วไปจะพบ laterite ทั้ง 2 แบบปะปนในชั้นดินเสมอ

แต่จะมีชนิดหนึ่งชนิดใดมากกว่ากันขึ้นอยู่กับลักษณะและ/ หรือบริเวณที่อยู่ในดิน เช่น pseudo มักจะพบที่ส่วนบนสุดของที่ลาดเอียง มีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ปกติแล้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 เซนติเมตร แบบที่ 2 ของหินลูกรัง เป็นชนิดแผ่นแน่นทึบ แต่ถ้าแบ่งย่อยต่อไปจะแยกได้ชัดว่ามี 3 ชนิด คือ แบบ Honey comb ซึ่งเป็นแบบที่ลูกรังร่วนเกาะกันแน่นหรือก้อนหินกรวดมายึด กันมากกว่าจะเป็น Laterite การเกิดของหินเหล่านี้แต่ละรูปแบบ ยังไม่แน่นอนนักเชื่อว่า Honey comb เกิดขึ้นมาจากแร่ธาตุที่มีเหล็กผสมอยู่มากหรือ Plinthite ถูกยกขึ้นบนผิวดิน และนักวิทยาศาสตร์อื่นๆ ได้อธิบายเพิ่มเติมว่า plinthite สามารถที่จะแข็งตัวได้ อาจเกิดสภาพแห้งและเปียกสลับกันในช่วงเวลา พอสมควรทั้งๆที่ไม่ต้องถูกอากาศ จากลักษณะรูปร่างดังกล่าวจึงไม่น่าสงสัยเลยว่า สำหรับอีก 2 ชนิด ต้องเกิดจากการเชื่อมติดกันของลูกรังร่วนและกรวดหินมากกว่า การเชื่อม ของหินลูกรัง โดยธาตุเหล็กอย่างไรก็ตาม สภาพแวดล้อมทางกายภาพที่จะอำนวยให้เกิดเหตุการณ์เหล่านั้น ยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ โดยธรรมชาติดินลูกรังชนิดที่เป็นแผ่นเกาะกันแน่น จะพบในชั้นของดินในรูปแบบหักหรือแตก หรือแบบที่เป็นชั้นหรือหินเป็นแผ่นต่อเนื่องกัน ดังนั้นแผ่นแข็งที่มีขนาดแตกต่างกันไป ตั้งแต่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 - 3 เมตร ถึง 1-2 กิโลเมตร

โดยทั่วไปมักจะพบชนิดของหินลูกรังที่มีระดับความลึกที่แน่นอน บางสภาพภูมิประเทศที่ซึ่งชั้นหินหลวมเกิดโดยตรง จากชั้นหินดินดานล่าง ซึ่งเป็นวัฏธรรมาชาติ บางแห่งวัฏธรรมาชาติกำเนิดดินลูกรัง จะพบในชั้นหินของลูกรัง ลักษณะของชั้นดินจะผันแปรไปตามลักษณะของภูมิประเทศชั้นของหินลูกรังที่พบในดิน ประกอบด้วย ดินชั้นบน และชั้นหินของลูกรัง และ Mottle pallid zone ชั้นของการสลายตัวของหินชั้นล่าง และชั้นของหินที่รองรับตามลำดับ ความหนาแน่นของชั้นหินเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนของสัณฐานธรณี

สำหรับในประเทศไทย ดินลูกรังเป็นดินที่มีปัญหาในเชิงเกษตรกรรมชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีที่ไม่เหมาะสมเป็นดินตื้น มีชนิดสวหนอย่อมขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 35 โดยปริมาตร ปะปนอยู่กับเนื้อดินละเอียด ภายในระดับความลึก 50 เซนติเมตร จากผิวดิน ชั้นสวหนอยาบเหล่านี้ ได้แก่ ก้อนกรวด (gravel) หินมนเล็ก (cobble) ลูกรังหรือหินเหล็ก (ironstone) และเศษหินที่ยังไม่สลายตัว unweathered rock fragments ตามระบบอนุกรมวิธานดิน (Soil Taxonomy) ดินปนกรวดหรือดินลูกรังในประเทศไทย จำแนกได้ 4 อันดับ คือ Entisols. Inceptisols. Alfisols และ Ultisols อยู่ในอันดับย่อย Orthents. Aquepts. Tropepts Ustalfs. apuults. Udults และ Ustrults ดินปนกรวดที่มีศาลาแลงในหน้าตัดดินมี 3 อันดับ คือ Inceptisols. Alfisols และ Ultisols ในอันดับย่อย Aquepts ; Tropept. Ustalfs. Aquults. Udults และ Ustults

ประเทศไทยมีพื้นที่ดินลูกรังประมาณ 68,765 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 13.4 ของพื้นที่ทั้งประเทศ พบแพร่กระจายอยู่ทั่วประเทศ ในบริเวณตะพักลำน้ำ ที่ลาดเชิงเขา เนินตะกอนรูปพัดต่อเนื่อง (coalescing fans) พื้นที่เหลือค้ำจากการชะล้างหน้าดิน (erosion surfaces) เนินเขาและภูเขา พื้นที่ส่วนใหญ่ของดินนี้อยู่ทางตอนเหนือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตอนกลางของภาคเหนือ และภาคตะวันออก และพบเล็กน้อยในภาคกลางและภาคใต้

ดินลูกรัง สามารถเกิดจากวัตถุต้นกำเนิดได้แตกต่างกันในช่วงกว้างมากตั้งแต่หินอัคนีทั้งที่เป็นกรดหรือเป็นด่าง วัสดุตะกอนของหินดินดานควอร์ตไซต์ จากชนิดของกรดที่พบและวัตถุต้นกำเนิด จะเห็นว่า ดินปนกรวดที่มีกรวดเป็นศิลาแลง หรือลูกรังและเศษหิน สามารถเกิดได้จากการสลายตัวผุพังอยู่กับที่ของหินพื้น (residuum) หรือเกิดจากการทับถมของหินตาดเชิงเขา (Colluvium) หรือการชะล้างแบบแน่น (shcctwah) บนพื้น

ผิวเหลือค้างจากการชะล้าง จะเป็นพื้นผิวหน้าที่เกิดจากการกักร่อน (plation surface) หรือพื้นที่เกือบราบ (peneplain) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่หินพื้นเป็นหินตะกอนเนื้อละเอียด จะเป็น สภาพที่เหมาะสมต่อการพัฒนา การของศิลาแลงในรูปแบบต่างๆมากส่วนดินที่มีหินมน เล็ก จะเกิดการทับถมของลำน้ำบริเวณส่วนบนของหุบเขา ตะพักลำน้ำ และเนินตะกอนรูปพัด (Vijanrsom,1984)

การแพร่กระจายของดินลูกรัง หรือดินปนกรวด (Skeletal soils) ในประเทศไทยมีประมาณ 52 ล้านไร่ จำนวน 8 กลุ่มชุดดิน ดังนี้

### (1) กลุ่มชุดดินที่ 25

ดินบนเป็นดินร่วนปนทราย ส่วนดินล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนกรวด หรือลูกรังเป็นปริมาณมากมีสีน้ำตาลอ่อนถึงสีเทา ลบจุดประสีน้ำตาลปนเหลือง หรือสีแดง ปะปนใต้ชั้นลูกรัง อาจพบชั้นดินเหนียวที่มีศิลาแลงอ่อนปะปน พบในสภาพค่อนข้างราบเรียบ มีการระบายน้ำค่อนข้างเร็ว มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 4.5 - 5.5 ส่วนใหญ่ใช้ทำนามีปัญหาเรื่องปริมาณก้อนกรวดหรือลูกรัง ได้แก่ ชุดดินอื่น กันตัง พยอม งาม ทุ่งด้าย ม่วงค่อม สะท้อน และย่านตาขาว

### (2) กลุ่มชุดดินที่ 37

ดินบนเป็นดินทรายปนดินร่วน ส่วนดินล่างเป็นดินเหนียว หรือดินเหนียวปนเศษหิน ดินบนเป็นสีน้ำตาล ดินล่างสีน้ำตาลปนเทาบางแห่งมีจุดประสีแดง และมีศิลาแลงอ่อนปะปนอยู่มาก พบบริเวณพื้นที่ตอนที่เป็นรูปคลื่น ลอนลาด มีการระบายน้ำดีปานกลาง มีค่าเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 4.5 - 5.5 ส่วนใหญ่เป็นป่าเต็งรัง ป่าละเมาะ และปลูกพืชไร่ จะมีปัญหาสำหรับพืชไร่บางชนิดในช่วงฤดูฝน ดินเปียกและเกินไปได้แก่ ชุดดินนาคุ บ่อไทย และทับเสลา

### (3) กลุ่มชุดดินที่ 45

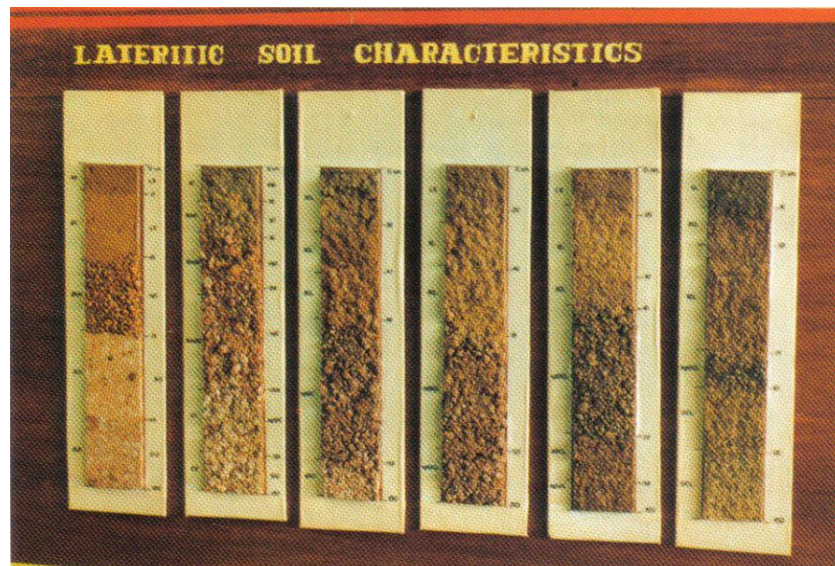
เป็นพวกดินร่วนเหนียวที่มีก้อนกรวดหรือลูกรังปะปนเป็นปริมาณมาก มีสีน้ำตาลหรือน้ำตาลปนแดง พบในเขตฝนตกชุก พื้นที่ดินมีลักษณะลูกคลื่นจนถึงเขา เป็นดินตื้น มีการระบายน้ำดี มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 4.5 - 5.5 ส่วนใหญ่ใช้ปลูกยางพารา หรือไม้ผลบางชนิดจะมีปัญหาเรื่องปริมาณก้อนกรวดหรือลูกรัง และเกิดกักร่อนผิวหน้าดิน ได้แก่ ชุดดิน ชุมพร หาดใหญ่ คลองชาก เขาขาด ท่าฉาง หนองคล้าและยะลา

#### (4) กลุ่มชุดดินที่ 46

เป็นพวกดินร่วนเหนียวปนกรวดหรือลูกรังปะปนเป็นปริมาณมาก มีสีน้ำตาล สีเหลือง สีแดง พบบริเวณพื้นที่ดอน มีลักษณะเป็นลูกคลื่นเป็นดินตื้น มีการระบายน้ำดี มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ประมาณ 5.0 - 6.0 ปัจจุบันใช้ปลูกพืชไร่ บางชนิด จะมีปัญหาเรื่องปริมาณก้อนกรวดหรือลูกรัง และการกัดกร่อนผิวหน้าดิน บางแห่งเป็นป่าเต็งรัง ได้แก่ ชุดดินเชียงคาน กบินทร์บุรี สุรินทร์ และโป่งตอง

#### (5) กลุ่มชุดดินที่ 47

เป็นดินร่วนที่มีเศษหินปะปนมาก พบชั้นหินตื้นกว่า 50 เซนติเมตร สีดินเป็นสีน้ำตาล สีเหลืองหรือแดง มีสภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาดถึงเนินเขา มีการระบายน้ำดี มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 5.5 - 7.0 ส่วนใหญ่เป็นป่าเบญจพรรณและป่าเต็งรังบางแห่งทำไร่เลื่อนลอยปัญหาของความรุนแรงของการกัดกร่อนผิวหน้าดินได้แก่ ชุดดินลี่ มวกเหล็ก โคกปรือ นครสวรรค์



ลักษณะดินลูกรังของประเทศไทย

#### (6) กลุ่มชุดดินที่ 48

ดินเป็นดินร่วนปนทราย ส่วนดินล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย หรือเศษหินสีดินเป็นสีน้ำตาล หรือสีเหลืองปนแดง พบบริเวณพื้นที่ลูกคลื่นจนถึงเชิงเขา เป็นดินตื้น มีความเป็นกรดเป็นด่าง ประมาณ 5.6 - 6.0 ส่วนใหญ่เป็นป่าเบญจพรรณและป่าเต็งรัง บางแห่งใช้ปลูกพืชไร่บางชนิด และไม้โตเร็ว จะมีปัญหาเรื่องความรุนแรงของการกัดกร่อนผิวหน้าดิน ได้แก่ ชุดดินท่ายาง แม่ริม พะเยา น้ำซุน และนาเฉลียง

#### (7) กลุ่มชุดดินที่ 49

ดินบนเป็นดินร่วนปนทราย ส่วนดินล่างเป็นดินเหนียวปนลูกรังหรือเศษหิน สีดินเป็นสีน้ำตาล หรือสีเหลืองปนแดง เป็นดินตื้นมีกัศโลงกระจายอยู่ทั่วไป การระบายน้ำดี มีค่าความเป็นกรดเป็น

ต่างประมาณ 5.6 - 6.0 ส่วนใหญ่เป็นป่าเต็งบางแห่งใช้ปลูกพืชไร่หรือไม้โตเร็วจะมีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนผิวหน้าดิน ได้แก่ ชุดดินโพนพิสัย บรปือ และสกลนคร

### (8) กลุ่มชุดดินที่ 51

เป็นพวกดินร่วนปนเศษหิน สีดินเป็นสีน้ำตาลหรือสีแดงปนเหลือง จะพบพื้นหินภายในระยะ 50 เซนติเมตร จากผิวดิน บริเวณเขตฝนตกชุก ลักษณะพื้นที่ลาดเชิงเขาหรือเนินเขาต่างๆ เป็นดินตื้น มีการระบายน้ำดี มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 5.0 ถึง 5.5 ส่วนใหญ่เป็นป่าดิบชื้น มีบางแห่งใช้ปลูกยางพารา จะมีปัญหาเรื่องดินตื้น และความรุนแรงของ การกัดกร่อน ผิวหน้าดิน ได้แก่ ชุดดิน ห้วยยอด ระนอง และยี่หื้อ (เล็ก และสุนันท์, 2535)

### สภาพปัญหาดินลูกรัง

แม้ว่าดินลูกรังเหล่านี้ ได้ถูกจัดไว้เป็นดินที่มีปัญหาชนิดหนึ่ง แต่ดินเหล่านี้เป็นดินที่พอจะนำมาใช้ในการเกษตรได้ พื้นที่มากกว่าครึ่งของดินเหล่านี้ได้ถูกแผ้วถาง เพื่อการปลูกพืชไร่หลายชนิด อย่างไรก็ตามการใช้พื้นที่ขึ้นอยู่กับภูมิศาสตร์ และสัณฐานธรณีของพื้นที่ ยกตัวอย่างเช่น นาข้าวจะปลูกในพื้นที่ดินลูกรังที่น้ำท่วมถึงจัดอยู่ใน great groups plinthaquults ไม่ผลบางชนิดปลูกในที่ระบายน้ำได้ดี ที่เหลือปลูกพืชไร่ เช่น มันสำปะหลัง พืชตระกูลถั่ว ข้าวฟ่าง อ้อยและทุ่งหญ้า อย่างไรก็ตามผลผลิตของพืชเหล่านี้ลดลงเรื่อยๆ หลังจากปลูกพืชติดต่อกันหลายๆปี ดังนั้นพื้นที่ส่วนใหญ่ ที่ปลูกพืชไร่เหล่านี้ก็จะทิ้งไว้ว่างเปล่า เป็นป่าละเมาะและมีวัชพืชและยารธรรมชาติขึ้น ผลผลิตของพืชที่ปลูกในดิน skeletal ขึ้นอยู่กับการจัดการดินซึ่งได้ผลผลิตน้อยกว่าในสภาพการจัดการดินทั่วไป เช่น ผลผลิตของข้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย ปอกระเจา จะให้ผลผลิตได้ถึง 9.38 8.13 11.88 31.25 8.13 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ ผลผลิตที่ได้น้อยเป็นผลมาจากสภาพปัญหาของดินลูกรังโดยตรง เพราะเป็นดินที่เกิดจากหินลูกรัง (พิชัย, 2531) จากข้อจำกัดดังกล่าวข้างต้น ดินลูกรังเป็นด้านๆ

### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตบล็อกประสานมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีการพัฒนาทั้งวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต กรรมวิธีการผลิต หรือจะเป็นรูปแบบของบล็อกประสานซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำวัสดุที่มีสมบัติเป็นวัสดุพอลิโพรพิลีนมาใช้แทนปูนซีเมนต์ เช่น แก้วลอย กะลาปาล์ม แก้วเคลือบ ตะกอนประปา เป็นต้น มาใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วน กล้าณรงค์ และคณะ, (2553) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่มีการใช้ดินในมหาวิทยาลัยขอนแก่นผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และแก้วลอย โดยออกแบบอัตราส่วนผสมเพื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 7 เพิ่มแก้วลอยร้อยละ 2 , 3 และ 4 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 6 เพิ่มแก้วลอยร้อยละ 2 , 3 , 4 และ 5 และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ร้อยละ 5 เพิ่มแก้วลอยร้อยละ 2 , 3 , 4 , 5 และ 6 นำไปอัดขึ้นรูปให้ได้ขนาด 12.5 x 25 x 10 เซนติเมตร และบ่มตัวอย่างให้อายุการบ่ม 7 , 14 และ 35 วัน จากนั้น ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่อายุ 7 , 14 และ 35 วัน และทำการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังรับแรงอัดของบล็อกประสานจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการบ่ม เนื่องจากระยะเวลาการบ่มที่เวลานานส่งผลให้ปูนซีเมนต์และแก้วลอยทำปฏิกิริยากับน้ำได้สมบูรณ์ และกำลังรับแรงอัดจะแปรผัน

ตามอัตราส่วนของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย เพราะเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานจึงทำให้บล็อกประสานมีกำลังรับแรงอัดมากขึ้น

จรรยา เจริญเนตรสกุล, (2557) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าปาล์มนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและนำกะลาปาล์มนำมาแทนที่ดินลูกรังบางส่วน เพื่อผลิตเป็นอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าและกะลาปาล์ม และเปรียบเทียบสมบัติกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มและแทนที่ดินลูกรังด้วยกะลาปาล์มในอัตราส่วนร้อยละ 5 : 5, 10 : 10, 15 : 15, 20 : 20, 25 : 25, 30 : 30, 35 : 35 และ 40 : 40 บ่มในอากาศ 28 วัน นำมาทดสอบการดูดกลืนน้ำและทดสอบการรับแรงอัด พบว่า การเพิ่มปริมาณของเถ้าปาล์มและกะลาปาล์มจะทำให้อิฐบล็อกประสานมีอัตราการดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น และอิฐบล็อกประสานที่ผสมเถ้าปาล์มและกะลาปาล์ม ในอัตราส่วนผสมร้อยละที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานลดลง และเมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 พบว่า ค่าการรับแรงอัดของอิฐบล็อกประสานผสมเถ้าปาล์มและกะลาปาล์ม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน 602/2547 ชนิดไม่รับน้ำหนัก นอกจากปาล์มแล้วยังมีการนำเถ้ากะลามะพร้าวมาใช้ในการผลิตบล็อกประสาน โดยการนำมาใช้ทดแทนมวลรวมละเอียด ผลการศึกษาพบว่า การผสมเถ้ากะลามะพร้าว จะใช้ปริมาณน้ำในการผสมตามปริมาณการใช้เถ้ากะลามะพร้าว โดยจะใช้ น้ำมากขึ้นตามปริมาณของกะลามะพร้าวที่เพิ่มขึ้นเพื่อคงความชื้นของมวลรวมในทุก ๆ ส่วนผสม (สุบรรณ ตาคาวัน และคณะ, 2558)

นพพล เสงี่ยมศักดิ์ และคณะ, (2550) ได้ทำการศึกษาการนำตะกอนน้ำประปาจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนมาใช้เป็นส่วนผสมในบล็อกประสาน โดยใช้ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ : ตะกอน : ดินแดง ที่แตกต่างกันทั้งหมด 18 ส่วนผสม พบว่า เมื่อปริมาณของตะกอนเพิ่มขึ้น มีผลทำให้กำลังอัดของบล็อกประสานมีค่าลดลง เนื่องจากตะกอนมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมาก และมีการจับตัวกันเป็นก้อนเมื่อผสมกับน้ำ ซึ่งไปกีดขวางการกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง และส่วนผสมที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ตะกอน : ดินแดง เท่ากับ 1 : 3 : 1 จะเป็นส่วนผสมที่มีตะกอนน้ำประปาเพียงส่วนผสมเดียวเท่านั้นที่มีกำลังผ่านตามมาตรฐานบล็อกประสาน วว. (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย) นอกจากนั้นรัชณี คงเมือง, (2554) ได้ทำการศึกษาการผลิตบล็อกประสานโดยใช้กากตะกอนจากกระบวนการทำน้ำเกลือให้บริสุทธิ์ของโรงงานเหมืองแร่เกลือหิน จังหวัดนครราชสีมา โดยมีอัตราส่วนผสมของบล็อกประสานที่ผลิตจากกากตะกอนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 5 10 15 20 40 และ 60 โดยน้ำหนัก และมีระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน แล้วนำไปทดสอบหาลำดับรับแรงอัดและร้อยละการดูดกลืนน้ำตามมาตรฐาน มอก.109 พบว่า บล็อกประสานในอัตราการแทนที่ร้อยละ 0 - 40 โดยน้ำหนักให้กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่า 2.5 เมกะพาสคัล และมีร้อยละการดูดกลืนน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 8.40 - 12.63 ซึ่งผ่านมาตรฐาน มอก.2538 และ มพช.602 ชนิดไม่รับน้ำหนัก เหมาะสำหรับก่อผนัง กำแพง กั้นห้อง ที่ไม่ต้องรองรับน้ำหนักโครงสร้าง และพบอีกว่า การเพิ่มปริมาณตะกอนมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง แต่ร้อยละการดูดกลืนน้ำไม่แตกต่างกัน และเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตกับบล็อกทั่วไปพบว่า อัตราการแทนที่สูงสุดร้อยละ 40 สามารถลดต้นทุนลงได้ถึงร้อยละ 17.48



วราธร แก้วแสง, (2554) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินขาวผสมสารโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ด้วยกลวิธีโพลีเมอร์ไรเซชันในการผลิตอิฐบล็อกประสาน โดยกำหนดอัตราส่วนสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 โดยน้ำหนักดินขาว และทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดและการดูดกลืนน้ำ ระบุตามวิธีทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วิธีการชักตัวอย่างและการทดสอบวัสดุก่อซึ่งทำด้วยคอนกรีต มอก.109-2517 พบว่า ค่ากำลังรับต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนค่าการดูดกลืนน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และเมื่อนำค่ากำลังรับต้านทานแรงอัดมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก มอก. 57-2530 ชั้นคุณภาพที่ระบุเกณฑ์กำลังต้านทานแรงอัดตามมาตรฐานไว้ไม่น้อยกว่า 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่า อัตราส่วนสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 4, 6 และ 8 ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์ มอก. ที่อายุการบ่มที่ 14 วัน ไปแล้ว โดยที่อัตราส่วนสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 8 ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 113.87 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่วนค่าการดูดกลืนน้ำของอิฐบล็อกประสานดินขาวผสมสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 6 ขึ้นไป ผ่านเกณฑ์ชั้นคุณภาพเช่นเดียวกัน จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาการผลิตอิฐบล็อกประสานจากดินขาวผสมสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อเป็นวัสดุทดแทนในอนาคต

สมคณ เกียรติก้อง, (2556) ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ดินเซรามิก และเศษใบไม้ ในการทำบล็อกลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ซม. โดยได้ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำและหาความหนาแน่นหลังจากแช่บล็อกคอนกรีตในน้ำ 4 วัน และทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของดินเซรามิกมากขึ้นจะทำให้บล็อกคอนกรีตมีความหนาแน่นและกำลังอัดลดลง โดยบล็อกคอนกรีตที่ทำจากสูตร 3 (อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ดินเซรามิก : เศษใบไม้ เท่ากับ 1.00 : 0.50 : 0.03) มีความหนาแน่นเฉลี่ย 1,040.20 กก./ม.3 และกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 11.09 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าสูตรอื่น ส่วนการดูดซึมน้ำ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของดินเซรามิกมากขึ้นจะทำให้บล็อกคอนกรีตดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น และบล็อกคอนกรีตที่ทำจากสูตร 2 (อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ดินเซรามิก : เศษใบไม้ เท่ากับ 1.00 : 1.00 : 0.03) มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าสูตรอื่น จากผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า ดินเซรามิกไม่เหมาะสมเป็นส่วนผสมสำหรับทำบล็อกคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่เหมาะกับงานตกแต่ง เช่น อิฐทางเท้า และผนังกระเบื้อง

สำเร็จ สารมาคม, (2556) ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตบล็อกประสานที่ใช้ในงานโครงสร้างไม่รับแรงแบกทาน โดยเลือกใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ : ดิน เท่ากับ 1 : 6 และ 1 : 8 พบว่า บล็อกประสานที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยให้ค่าความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณเถ้าลอย โดยอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับร้อยละ 30 และกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และหากพิจารณากำลังรับแรงอัดที่เท่ากับ 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินที่เหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับผลิตบล็อกประสานในงานโครงสร้างไม่รับแรงแบกทาน คือ 1 : 8 พบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อเถ้าลอยที่เหมาะสมเท่ากับ 92 : 8, 87 : 13 และ 60 : 40 ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ด้วยต้นทุนการผลิตต่อหน่วยเท่ากับ 1.90, 1.85 และ 1.58 บาท ตามลำดับ

นอกจากเถ้าลอย ดินตะกอนประปา ป่าลมน้ำมัน แล้วยังมีการใช้ของเสียจากอุตสาหกรรม วชิระ แสงรัมย์, (2555) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เเยื่อกระดาษเหลือทิ้งในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อลดความหนาแน่นของวัสดุ และลดค่าการนำความร้อน ผลการศึกษา พบว่า การเพิ่มส่วนผสมของเยื่อกระดาษเหลือทิ้งช่วยลดน้ำหนักและลดความหนาแน่นของวัสดุได้ดี และอัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ : ทราย : ผงสี : เยื่อกระดาษ เท่ากับ 1:5:0.02:0.3 โดยบล็อกที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้มีค่าการนำความร้อนลดลงร้อยละ 34 น้ำหนักลดลงร้อยละ 22.5 และมีสีแดงที่เข้มกว่า และจากงานวิจัยของอมเรศ บกสุวรรณ และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาการใช้เศษหินภูเขาไฟ (หินบะซอลต์เนื้อโพรงชาย) สำหรับพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน พบว่า บล็อกประสานจากเศษหินภูเขาไฟ มีความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัดลดลง เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของเศษหินภูเขาไฟ เนื่องจากลักษณะของหินบะซอลต์ที่มีค่าความพรุนสูงจะทำให้มีช่องว่างสำหรับอากาศและการดูดซึมน้ำมาก และทำให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง และจากผลการศึกษาของณิชาดา สถาปัตยกรรม และคณะ, 2557 อธิบายไว้ว่า เมื่อทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนเคมีมากขึ้นทำให้ความสามารถในการยึดเหนี่ยวกันของอนุภาคดินด้วยปูนซีเมนต์ลดลง เนื่องจากกากตะกอนเคมีมีอนุภาคละเอียดจึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของบล็อกประสานจากกากตะกอนเคมีมีค่าลดลง

วัสดุต่างๆมาใช้ผสมแทนปูนซีเมนต์เป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ทางหนึ่ง แต่วัสดุบางชนิดที่ผสมในปริมาณมากจะลดการกำลังอัดลง แต่อาจจะเพิ่มความสามารถในด้านต่างๆ เช่น ความหนาแน่น การนำความร้อน เป็นต้น การพัฒนาสมบัติของบล็อกประสานทำได้อีกโดยการเติมสารต่างๆ เช่น การเติมยิปซั่ม จากงานวิจัยของ วุฒินัย กกกำแหง และวิทยา วุฒิจำนง (2550) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ยิปซั่มในการผลิตบล็อกประสาน พบว่า การผสมยิปซั่มลงในมวลรวมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่ากำลังอัดของบล็อกประสานได้ดีที่สุดโดยเมื่อเปรียบเทียบกับที่กำลังอัดเดียวกัน และสามารถประหยัดปูนซีเมนต์ลงได้ประมาณร้อยละ 10 คิดเป็นมูลค่าต่อก้อนประมาณ 0.20 บาท หรือประมาณร้อยละ 5 ของราคามวลรวม ซึ่งในอุตสาหกรรมบล็อกประสานที่มีกำลังการผลิตสูงๆ จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มาก รวมทั้งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์แทนการนำไปทิ้ง

## บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.1.1 ดินลูกรัง

ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานราชบุรีบล็อกดินซีเมนต์ อำเภอมือง จังหวัดราชบุรี

#### 3.1.2 เถ้าขาน้อย

เถ้าขาน้อย โดยการนำเถ้าขาน้อยที่ได้จากบริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด เป็นเถ้าจากหม้อต้มไอน้ำที่ใช้ขาน้อยเป็นเชื้อเพลิงในการต้มให้ความร้อน เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิตน้ำตาล

#### 3.1.3 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ที่เลือกใช้เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราช้าง

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องอัดบล็อกประสาน
- 2) เครื่องบดย่อยขนาด (Los Angeles Abrasion Machine)
- 3) ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์หาขนาดคละของเม็ดดิน (Sieve Analysis)
- 4) ชุดทดสอบการบดอัดดินแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction Test)
- 5) เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machine)
- 6) อุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ ถังหัวปูน จอบ - พลั่ว บัวรดน้ำ และกระบะผสมปูน

### 3.3 การเตรียมตัวอย่าง

#### 3.3.1 การเตรียมวัสดุ

การเตรียมเถ้าขาน้อย โดยการนำเถ้าขาน้อย มาทำตากแห้งและนำมาทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ส่วนดินลูกรังมาจากในอำเภอบางท่อม จังหวัดสระบุรี โดยนำมาทำการทดสอบสมบัติพื้นฐานของดิน เช่น ชีตจำกัดเหลว ชีตจำกัดพลาสติก ร้อยละการหดตัว และปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินลูกรังจากวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน

#### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ทำการผสม Binder (OPC : Soil) และดินลูกรังในอัตราส่วน 1:3 , 1:5 , 1:7, 1:9 และ 1:11 โดยใช้ปริมาณน้ำจากการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของดินลูกรัง โดยปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมได้มาจากการหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดปูนซีเมนต์ผสมดินลูกรังในอัตราส่วนดังกล่าวข้างต้น จากนั้นทำการขึ้นรูปบล็อกประสานด้วยเครื่องอัดบล็อก จากนั้นนำไปทำการบ่มที่ระยะเวลา 7

14 และ 28 วัน โดยทำการทดสอบกำลังอัด และความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง อัตราส่วนผสมบล็อคประสานแสดงดังตารางที่ 3.1

จากตารางที่ 3.1 นำอัตราส่วนของบล็อคมาทำการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ จากนั้นนำไปทำการบ่มที่ระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน โดยทำการทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง การทดสอบการซึมน้ำ และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของบล็อคประสาน

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสม (โดยน้ำหนัก) ของบล็อคประสาน

ตัวอย่าง	อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียด (โดยน้ำหนัก)	ปริมาณน้ำที่ใช้ (ร้อยละ)
	ปูนซีเมนต์ : ดินลูกรัง : เถ้าขาน้อย	
1:3	1 : 3 : 0	13
1:5	1 : 5 : 0	14.5
1:7	1 : 7 : 0	15
1:9	1 : 9 : 0	16
1:11	1 : 11 : 0	17

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### 3.4.1 การหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content ; OMC)

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมบล็อคประสานในอัตราส่วนที่แสดงดังตารางที่ 3.1 ได้จากการประยุกต์การทดสอบการบดอัดด้วยวิธี Standard Proctor Test โดยการนำดินตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ขนาดตะแกรง 4.75 มม.) ชั่งตัวอย่างดิน 4 กิโลกรัม แล้วนำไปผสมกับน้ำในอัตราส่วนร้อยละ 3 – 4 โดยน้ำหนัก คลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากัน ทำการแบ่งปริมาณดินให้ได้ทั้งหมด 3 ส่วน ใส่ลงไปในโมลและอัดดินในแต่ละชั้นด้วยค้อนปอนด์ ขนาด 5.5 โมล จำนวน 25 ครั้ง ทั้งหมด 3 ชั้น จากนั้นนำโมลไปชั่งน้ำหนัก พร้อมทำการตั้งตัวอย่างให้ได้น้ำหนัก 100 กรัม และนำตัวอย่างดังกล่าวไปอบและชั่งน้ำหนัก และทำการคำนวณหาปริมาณความชื้นต่อไป

#### 3.4.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัดบล็อคประสาน

โดยการนำตัวอย่างบล็อคประสานที่ผสมตามอัตราส่วนที่แสดงดังตารางที่ 1 ที่ขึ้นรูปแล้วมาทำการบ่มโดยการควบคุมการระเหยน้ำตามอายุการบ่มที่ 3 7 14 และ 28 วัน นำตัวอย่างที่จะนำไปทำการทดสอบมาทำการชั่งน้ำหนัก และวัดขนาดบล็อคประสาน จากนั้นนำตัวอย่างไปกดในเครื่อง

Universal Testing Machine (UTM) จนตัวอย่างวิบัติ และทำการคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดบล็อกประสานตามมาตรฐาน ASTM C31 (2015)

#### จากสูตรการคำนวณ

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

เมื่อ	$\sigma$	คือ	กำลังรับแรงอัด	มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
	P	คือ	แรงที่กระทำสูงสุด	มีหน่วยเป็น กิโลกรัม
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัด	มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

#### 3.4.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

โดยการนำตัวอย่างบล็อกประสานทั้งหมด 6 ชุด ชุดละ 3 ตัวอย่าง ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำหนักของตัวอย่างคงที่ ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนักบันทึกค่า ค่าที่ได้เป็นน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า ค่าที่ได้เป็นน้ำหนักอิ่มน้ำ และทำการคำนวณหาการดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C642-13

#### จากสูตรการคำนวณ

$$M = \frac{W1 - W2}{W3}$$

เมื่อ	M	คือ	อัตราการดูดซึมน้ำ	มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	W1	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่น้ำ	มีหน่วยเป็น กิโลกรัม
	W2	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่น้ำ	มีหน่วยเป็น กิโลกรัม
	W3	คือ	ปริมาตรของตัวอย่าง	มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 3.4.4 การทดสอบการนำความร้อน

สมบัติการนำความร้อน ด้วยเครื่องมือ Hot Disk Thermal Constant Analyzer (Hot Disk AB) ทำการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมจากสมบัติด้านกำลังอัด และค่าความหนาแน่นของบล็อกประสานที่มีขนาดตัวอย่างขนาด 25 x 10 x 2 เซนติเมตร ที่ผ่านการขึ้นรูปทำการทดสอบหาสมบัติการนำความร้อน โดยใช้เทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ก้อน ต่อชุดการทดลอง

### 3.5 การคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตบล็อกประสาน

ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตบล็อกประสาน ประกอบด้วย 1) ต้นทุนคงที่ หมายถึง เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ เช่น เครื่องอัดบล็อกประสานแบบมือโยก ตะแกรงร่อนแบบมาตรฐาน เบอร์ 4 (ขนาด 4.75 มม.) จอบ พลั่ว บัวรดน้ำ 2) ต้นทุนแปรผัน หมายถึง วัสดุต่างๆ ประกอบด้วย ดินลูกรัง ค่าขนส่งกากเหลือทิ้ง ปูนซีเมนต์ และแรงงานคน และทำการคำนวณหาจุดคุ้มทุนหรือการหาจำนวนบล็อกที่ผลิตได้ก็ก่อนถึงจะคุ้มทุน ได้จากสมการ

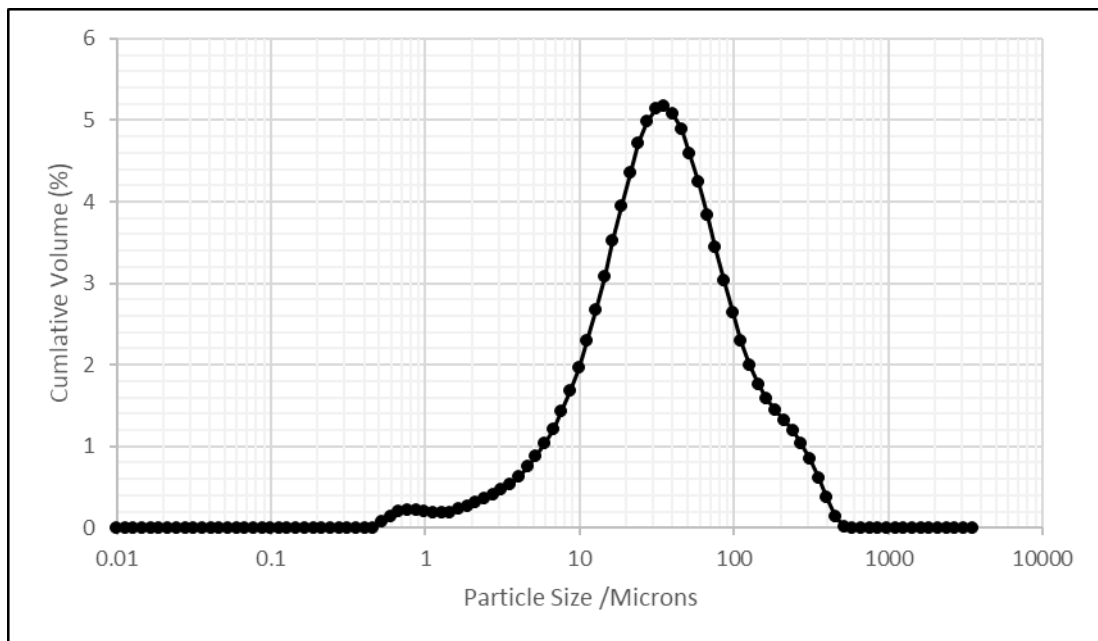
จากสูตร	$PX = F + VX$
เมื่อ	$P =$ ขายบล็อก 1 ก้อน (ราคา 6 บาท) $X =$ จำนวนบล็อกที่ผลิตได้ (ต้องการรู้) $F =$ ต้นทุนคงที่ $V =$ ต้นทุนแปรผัน (ต่อการผลิตบล็อก 1 ก้อน)

## บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล

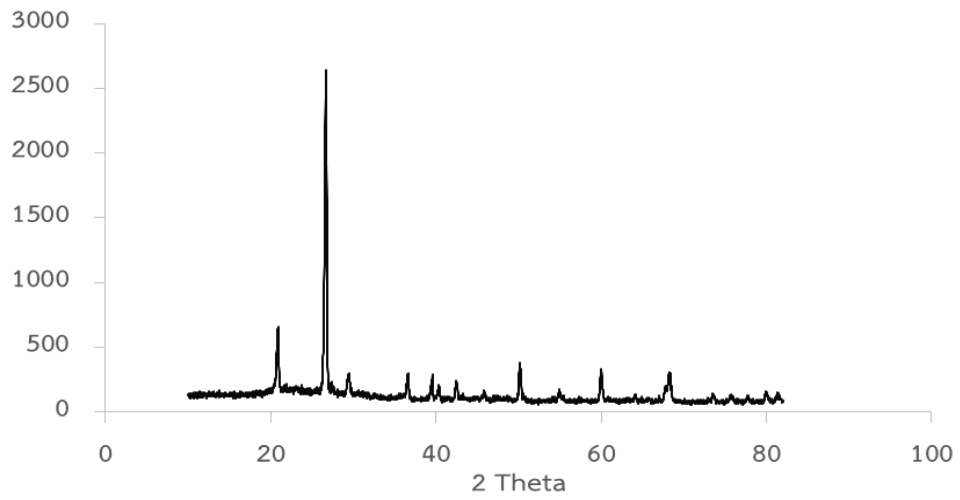
### 4.1 การศึกษาสมบัติของวัสดุ

#### 4.1.1 เถ้าชานอ้อย

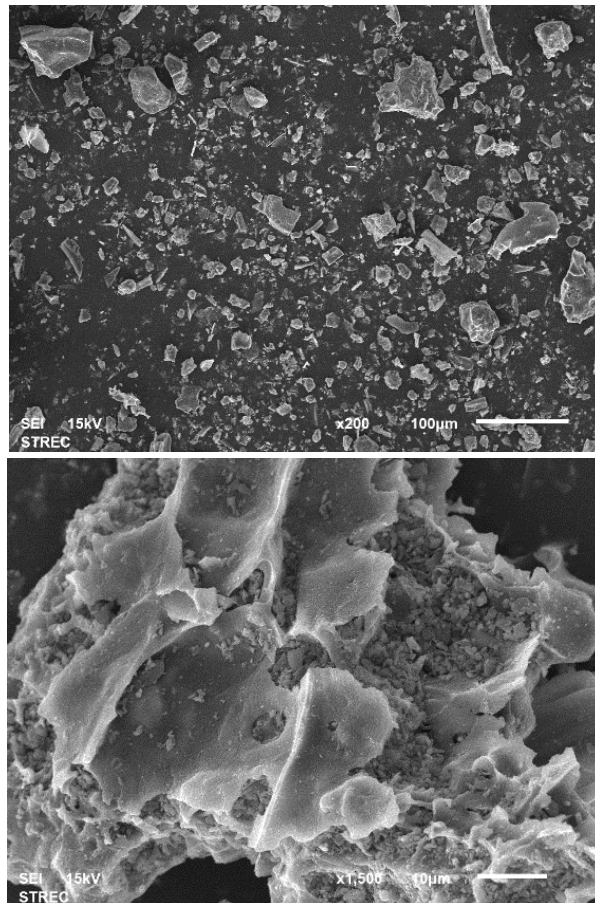
เถ้าชานอ้อยที่นำมาใช้ในงานวิจัยได้จากบริษัท น้ำตาลราชบุรี จำกัด โดยนำมาทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของเถ้าชานอ้อย โดยมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  มากกว่าร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.56 และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ  $1.479 \text{ m}^2/\text{g}$  โดยขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 10 – 100 ไมครอน (ภาพที่ 4.1) และมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นผลึกของ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.2 และจากภาพที่ 4.3 แสดงโครงสร้างระดับจุลภาคของเถ้าชานอ้อยพบว่า มีความพรุนบริเวณผิวของอนุภาค



ภาพที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อย



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างผลึกของเถ้าขาน้อย



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างระดับจุลภาคของเถ้าขาน้อย



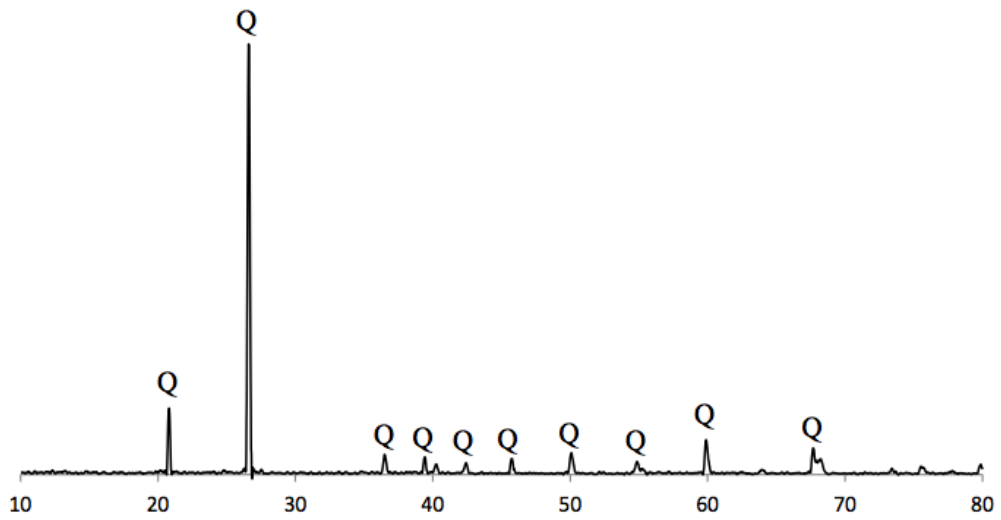
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าขานอ้อยและดินลูกรัง

สารประกอบ	เถ้าขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ดินลูกรัง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	68.60	90.49
Na <sub>2</sub> O	1.07	0.03
K <sub>2</sub> O	3.92	0.44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97	6.22
CaO	7.85	0.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	1.25
Cl	0.95	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.71	0.0323
MgO	1.69	0.20
TiO <sub>2</sub>	0.27	-
MnO	0.14	-
SO <sub>3</sub>	1.44	0.0438
LOI	5.22	
Specific gravity	1.56	2.78

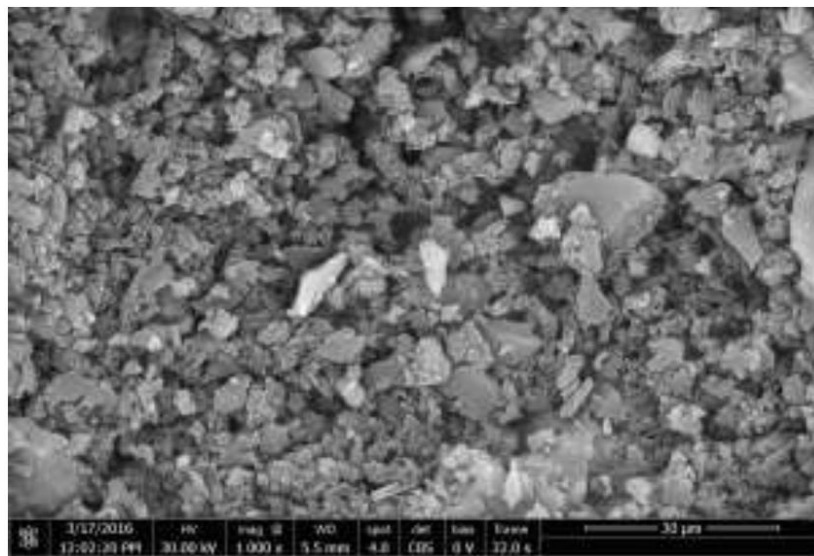
#### 4.1.2 ดินลูกรัง

ดินลูกรังที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากบ่อดินที่จังหวัดราชบุรี ซึ่งต้องนำมาทำการตากแห้งด้วยอากาศ จากนั้นนำไปทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ โดยทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ดินลูกรังมีซิลิกอนออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เท่ากับร้อยละ 90.49 โดยน้ำหนัก และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เท่ากับร้อยละ 6.22 โดยน้ำหนัก เป็นองค์ประกอบหลัก และทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) พบลักษณะโครงสร้างผลึกของควอตซ์ (Quartz : SiO<sub>2</sub>) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.4 นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์

โครงสร้างระดับจุลภาคของดินลูกรังด้วยเทคนิค SEM จากภาพที่ 4.5 พบว่า โครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นเม็ด และมีช่องว่าง และการกระจายตัวของดินลูกรังแสดงดังตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.4 โครงสร้างผลึกของดินลูกรัง



ภาพที่ 4.5 โครงสร้างระดับจุลภาคของดินลูกรัง

ตารางที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของดินลูกรัง

เบอร์ตะแกรง	ร้อยละของน้ำหนักที่ค้างสะสมตะแกรง	
	ดินลูกรัง	เถ้าขาน้อย
No.4 (4.75 มม.)	0.00	0.00
No.10 (2 มม.)	2.09	0.00
No.40 (0.425 มม.)	15.90	10.23
No.100 (0.15 มม.)	90.38	30.34
No.200 (0.075 มม.)	96.40	98.56
$C_u$	2	2
$C_c$	1	1
LL (wt.%)	14.08	-
PL (wt.%)	12.36	-

หมายเหตุ  $C_u$  : ค่าแสดงการกระจายตัวของเม็ดดิน  
 $C_c$  : ค่าแสดงขนาดคละของเม็ดดิน

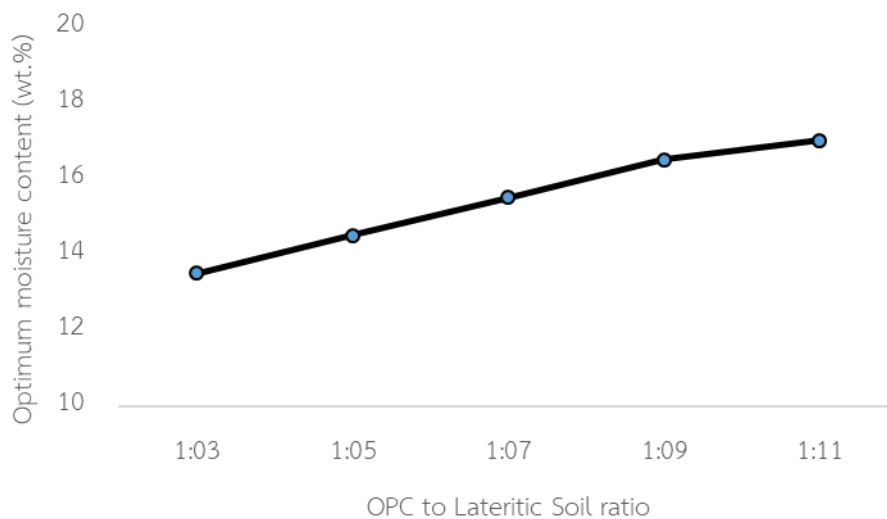
นอกจากนั้นยังทำการทดสอบหาปริมาณน้ำที่ขีดจำกัดเหลวแสดงดังภาพที่ 4.6 โดยมีค่าขีดจำกัดเหลวจะสามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่ทำดินไหลมาชนกันเป็นระยะ 1 เซนติเมตร แล้วเครื่องเคาะได้จำนวน 25 ครั้ง ซึ่งจากภาพที่ 4.6 ค่าปริมาณน้ำที่ขีดจำกัดเหลวมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.08 ส่วนปริมาณน้ำที่ขีดจำกัดพลาสติกมีค่าเท่ากับร้อยละ 12.36 ซึ่งเป็นลักษณะของดินลูกรังที่มีความเหนียวที่สามารถนำมาใช้ผลิตบล็อกประสานได้

#### 4.2 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผสม

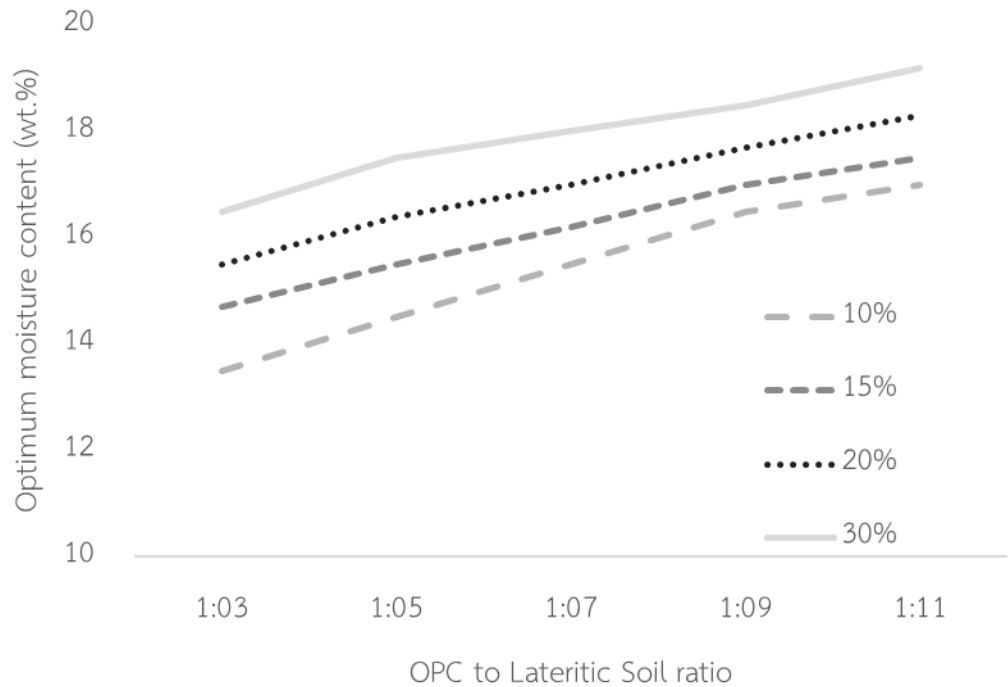
ในการเตรียมบล็อกประสานจะใช้ปริมาณน้ำในการผสมจากการประยุกต์ใช้วิธีการหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 1557-12) โดยปริมาณน้ำที่ใช้จะนำมาผสมในการขึ้นรูปบล็อกประสานโดยดินลูกรังที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปจะต้องมีความชื้นไม่เกินความชื้นปกติในอากาศ (ประมาณร้อยละ 10 – 15 โดยน้ำหนัก) โดยจะนำปูนซีเมนต์ ดินลูกรัง และเถ้าขาน้อยมาผสมในกะบะพลาสติก จากนั้นนำทำการผสมน้ำและทำการคลุกเคล้าให้เข้ากันโดยทั่ว จากนั้นนำตัวอย่างที่ผสมเทใส่แบบหล่อ และทำการอัดโดยเครื่องขึ้นรูปบล็อกประสานด้วยมือ โดยจะทำการบดอัดตัวอย่างให้ได้ขนาดความสูงเท่ากับ  $10 \pm 0.5$  เซนติเมตร จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทำการบดด้วยการคลุกกระสอบทรายโดยให้กระสอบทรายมีความชื้นตลอดเวลา เป็นเวลา 7 วัน เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำที่จะใช้ในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ จากนั้นทำการพรมน้ำให้ตัวอย่างมีความชื้น และทำการแลบด้วยแผ่นพลาสติกบางใส เพื่อ

ป้องกันการสูญเสียน้ำ และทำการแกะตัวอย่างมาทำการตากแห้งเป็นเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทำการทดสอบกำลังอัดต่อไป

ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการขึ้นรูปตัวอย่างที่ได้มาจากการประยุกต์ใช้วิธีการหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) ตามมาตรฐาน ASTM D 1557-12) ของแต่ละอัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2 เมื่อทำการพิจารณาบล็อกประสานที่ยังไม่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยพบว่า ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรัง (2.78) มีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ (3.15) จึงทำให้อัตราส่วนผสมซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการตรวจโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก มีปริมาตรของส่วนผสมเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดหรือขึ้นรูปเพิ่มขึ้นตาม โดยที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:3 มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดเท่ากับร้อยละ 13.50 โดยน้ำหนัก และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 17.00 โดยน้ำหนัก เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเพิ่มเป็น 1:11 ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.7 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย

จากภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับร้อยละของการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในบล็อกประสาน โดยปริมาณที่ใช้ในการผสมที่ได้จากการประยุกต์วิธีการบดอัดดินแบบมาตรฐานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย โดยบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังทุกอัตราส่วนผสมที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการบดอัดของบล็อกประสานไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีปริมาณเถ้าขานอ้อยไม่มากนัก จึงทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมยังเพียงพอต่อการบดอัด และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยจากร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 15 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ค่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดบล็อกประสานมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสังเกตจากการผสมแต่ละครั้งเมื่อปริมาณเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณวัสดุที่เหลือจากการผสมบล็อกประสานมากกว่าอัตราส่วนที่มีการแทนที่ดินลูกรังที่ต่ำกว่า โดยค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง 1:3 มีค่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.50 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 16.50 โดยน้ำหนัก เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเถ้าขานอ้อยจาก 0 และ 10 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเถ้าขานอ้อยมีค่าต่ำกว่าดินลูกรังจึงทำให้ปริมาตรของวัสดุผสมผลิตบล็อกประสานมีปริมาตรเพิ่มขึ้น

บล็อกประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย มีค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.8 บล็อกประสานที่มีอัตราส่วน

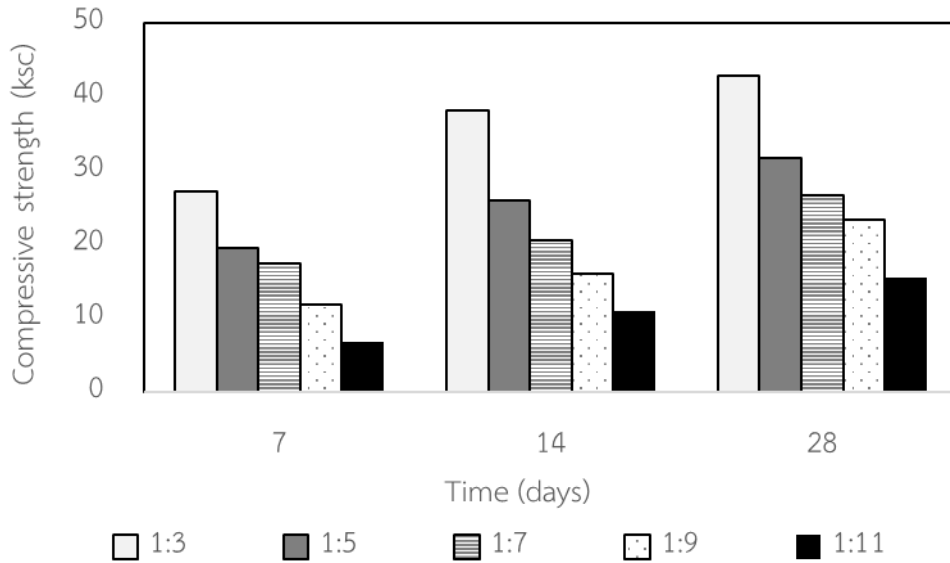
ปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:5 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 14.50 เป็น 17.50 โดยน้ำหนัก และเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังจาก 1:5 เป็น 1:7 1:9 และ 1:11 และมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยมีค่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดมีเพิ่มขึ้น เหมือนกับบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 โดยที่บล็อกประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:11 จะมีค่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการบดอัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17.00 เป็นร้อยละ 19.20 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเพิ่มจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.3 ปริมาณที่ใช้ในการบดอัดบล็อกประสาน

อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง	ปริมาณร้อยละการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	0	10	15	20	30
1:3	13.50	13.50	14.70	15.50	16.50
1:5	14.50	14.50	15.50	16.40	17.50
1:7	15.50	15.50	16.20	17.00	18.30
1:9	16.5	16.50	17.00	17.70	18.50
1:11	17.00	17.00	17.50	18.30	19.20

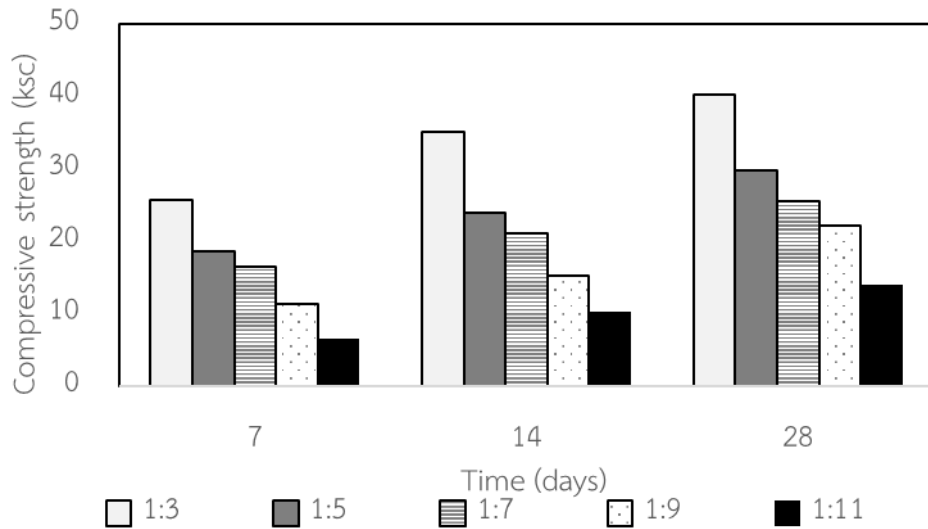
#### 4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย

หลังจากทำการอัดขึ้นรูปบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 จะทำการบ่มบล็อกประสานเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน โดยในช่วง 7 วันแรกจะทำการบ่มโดยการคลุมผ้ากระสอบที่เปียกหมาด เพื่อให้บล็อกประสานมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการพัฒนาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก และหลังจาก 14 วัน จะทำการบ่มตัวอย่างด้วยการห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติก เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ โดยค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 แสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสาน

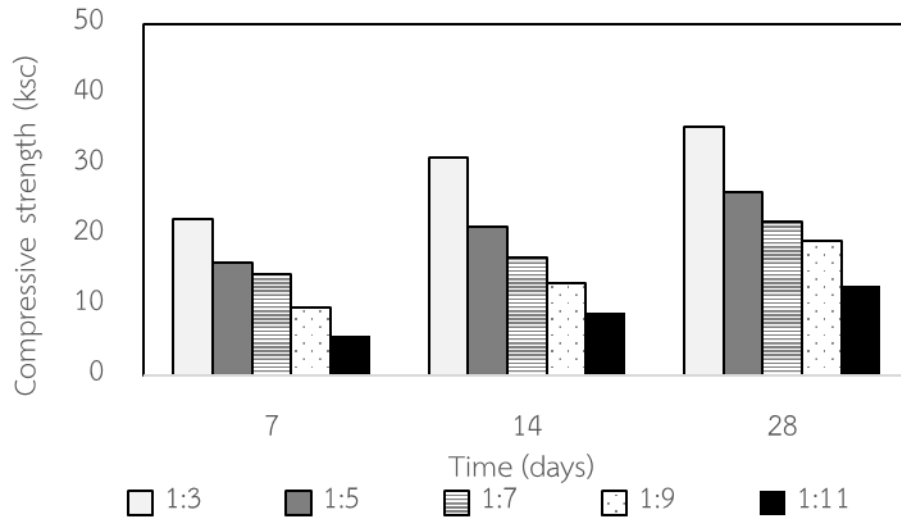
จากภาพที่ 4.8 ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานทุกอัตราส่วนผสม มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่ผสมและที่คลุมด้วยผ้ากระสอบในการบ่ม 7 วันแรก สามารถใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ที่มีสมบัติในการยึดประสานทำให้ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น โดยบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 มีค่ากำลังอัดที่ 7 วัน เท่ากับ 27.2 ksc. และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 42.9 ksc. เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 7 วันเป็น 28 วัน โดยที่บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 จะมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่เพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่า โดยบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:11 มีค่ากำลังอัดที่ 7 และ 28 วัน เท่ากับ 6.9 และ 15.6 ksc.



ภาพที่ 4.9 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

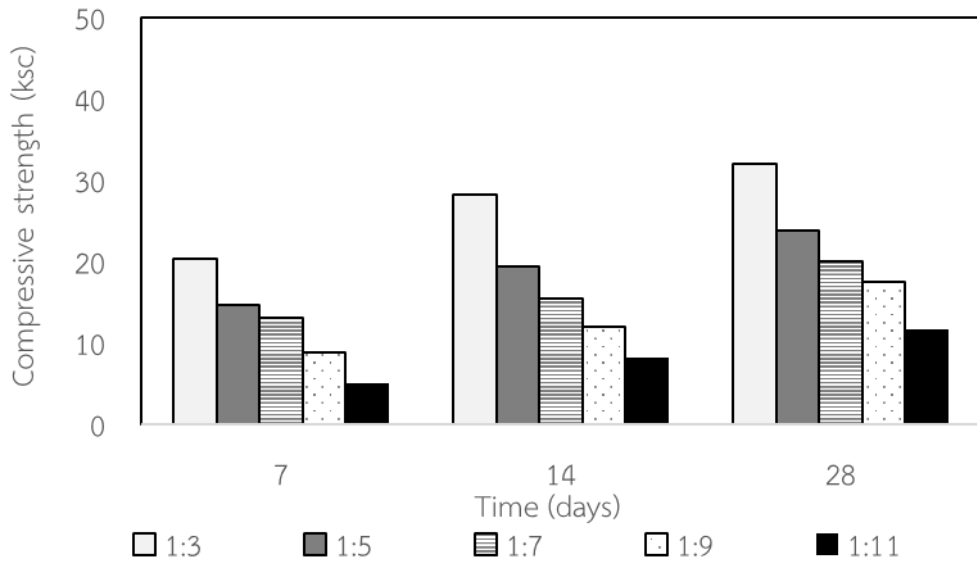
เมื่อมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานมีค่าลดลงทุกอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.9 ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 มีค่าเท่ากับ 25.8 และ 40.2 ksc. ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าบล็อกประสานที่ไม่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อย เนื่องจากการผสมเถ้าขาน้อยทำให้ปริมาตรของวัสดุรวม ซึ่งหมายถึงดินลูกรัง และเถ้าขาน้อยมีปริมาตรมากกว่าการไม่ผสม ทำให้ปูนซีเมนต์ที่เป็นวัสดุยึดประสานอาจจะไม่สามารถกระจายครอบคลุมได้ทั้งหมด จึงเป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลง โดยที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 เมื่อมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะมีค่ากำลังอัดลดลงเหมือนอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 ซึ่งอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับที่ 1:11 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 6.5 และ 13.9 ksc. ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งค่ากำลังอัดที่ 28 วันของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับที่ 1:11 มีค่าต่ำกว่า 25 ksc. ซึ่งมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชุมชนบล็อกประสาน (มผช.602/2547) ชนิดไม่รับน้ำหนัก





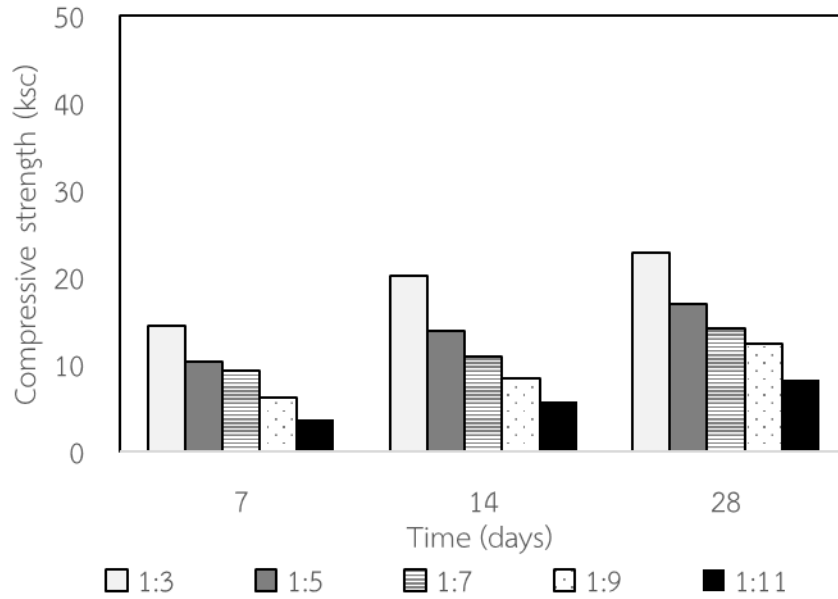
ภาพที่ 4.10 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

จากภาพที่ 4.10 แสดงการพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานมีค่าต่ำกว่าบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก โดยทุกอัตราส่วนค่ากำลังอัดจะลดลงประมาณร้อยละ 10 – 20 โดยน้ำหนัก โดยบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:7 1:9 และ 1:11 ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐาน โดยมีค่าเท่ากับ 21.9 19.2 และ 12.8 ksc. ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเป็นปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานมีค่าลดลง เมื่อปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.11 ที่อายุ 28 วัน ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 มีค่าเท่ากับ 32.8 ksc. และที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชุมชนบล็อกประสาน โดยทั้ง 4 อัตราส่วน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 23.8 20.0 17.6 และ 11.7 ksc. ตามลำดับ

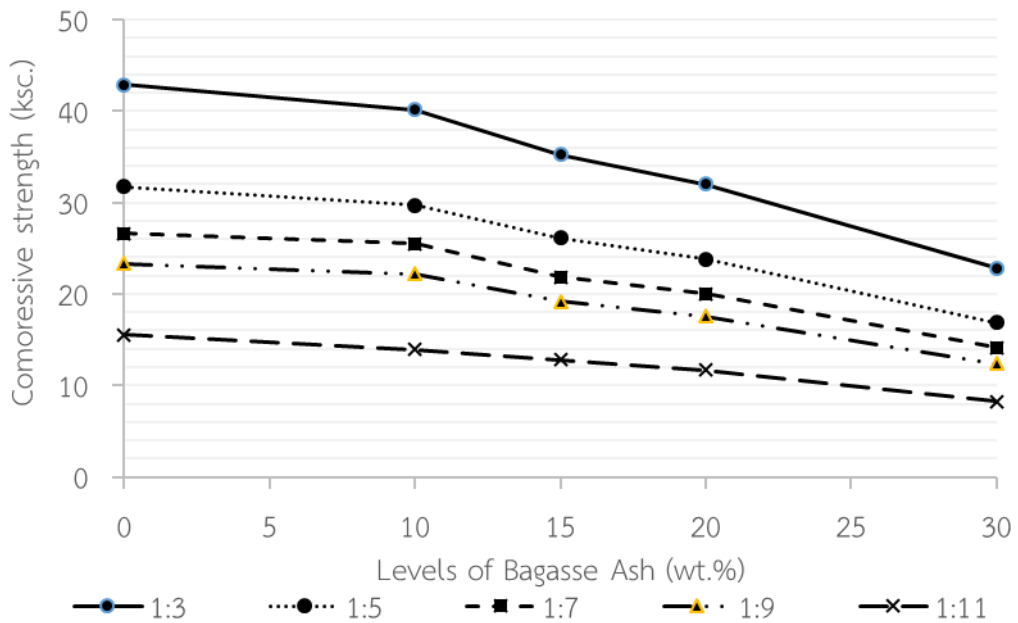


ภาพที่ 4.11 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบกำลังอัดพบว่า ร้อยละปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดต่ำกว่า 25 ksc. เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าขาน้อยทำให้ปริมาตรของมวลรวมในบล็อกประสานมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งเถ้าขาน้อยยังมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าดินลูกรังถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จึงทำให้มีอัตราส่วนปริมาตรของมวลรวมต่อปริมาตรของวัสดุยึดประสาน (ปูนซีเมนต์) ลดลง เป็นผลทำให้ปูนซีเมนต์ไม่สามารถครอบคลุมและยึดเกาะดินลูกรังและเถ้าขาน้อยทั้งหมด เป็นผลทำให้ค่ากำลังอัดลดลง นอกจากนี้เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเพิ่มขึ้น ยิ่งเป็นสาเหตุให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง ทำให้ค่ากำลังอัดลดลงอีกทางหนึ่งด้วย และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า 25 ksc. ซึ่งไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 การพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของบล็อกประสานและปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อย

จากภาพที่ 4.13 พบว่า ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานมีค่าลดลง ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง และปริมาณการแทนที่ดินลูกรังที่แทนที่ด้วยเถ้าขาน้อยที่เพิ่ม เนื่องจากเถ้าขาน้อยมีความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าดินลูกรัง จึงทำให้การตวงวัดโดยน้ำหนัก เป็นผลทำให้ปริมาตรของมวลรวมเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเถ้าขาน้อยเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ปูนซีเมนต์ไม่

สามารถแทรกได้ทุกพื้นที่ นอกจากนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง และปริมาณเถ้าขาน้อยเพิ่มขึ้น ก็ยังเป็นสาเหตุของการเกิดช่องว่างภายในบล็อคประสานอีกประการหนึ่ง และที่สำคัญเถ้าขาน้อยเป็นสารอินทรีย์ที่ผ่านการเผามาแล้วก็ยังไม่สามารถไล่คาร์บอนไปได้หมด ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่ากำลังอัดของบล็อคประสานมีค่าลดลง

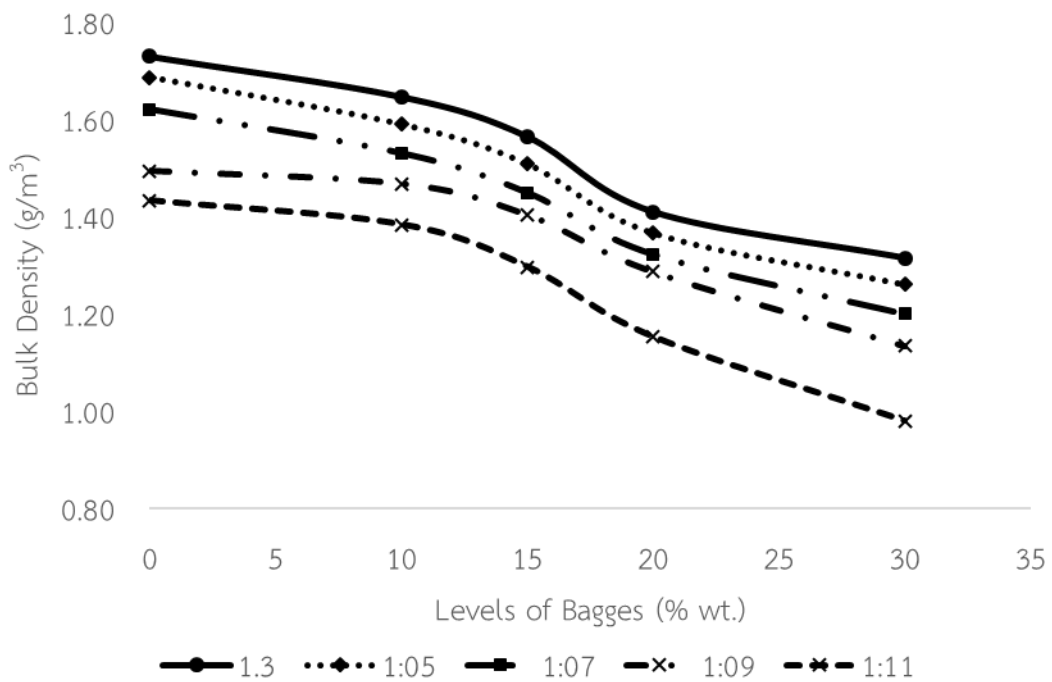
#### 4.4 ค่าความหนาแน่นของบล็อคประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อย

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาแน่นแห้งของบล็อคประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อย

ค่าความหนาแน่นแห้งของบล็อคประสาน ( $\text{g/m}^3$ )					
อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง	ปริมาณร้อยละการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	0	10	15	20	30
1:3	1.73	1.65	1.57	1.41	1.32
1:5	1.69	1.59	1.51	1.37	1.26
1:7	1.62	1.53	1.45	1.32	1.20
1:9	1.50	1.47	1.40	1.29	1.14
1:11	1.43	1.38	1.30	1.15	0.98

จากตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหนาแน่นของบล็อคประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง และการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อย ค่าความหนาแน่นของบล็อคประสานมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของดินลูกรังที่มีค่าเท่ากับ 2.78 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ซึ่งมีค่า 3.15 จึงทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง ประกอบกับเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณดินลูกรังเพิ่ม ยิ่งทำให้น้ำหนักของบล็อคประสานมีค่าลดลง โดยบล็อคประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:3 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.73 1.69 1.62 1.50 และ 1.43  $\text{g/m}^3$  ตามลำดับ โดยเมื่อบล็อคประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:11 มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าบล็อคประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:3 เท่ากับร้อยละ 23.5

เมื่อมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในบล็อคประสานในปริมาณร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.13 โดยที่ บล็อคประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:3 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 การแทนที่ดินลูกรัง ด้วยเถ้าขานอ้อยในบล็อคประสานในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 28 วัน มีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 1.65 1.59 1.53 1.47 และ 1.38  $\text{g/m}^3$  โดยค่าความหนาแน่นของบล็อคประสานที่มีการแทน ที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 2-6 และเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ดินลูกรังด้วย เถ้าขานอ้อยในบล็อคประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:3 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 จะมีค่า ความหนาแน่นลดลงประมาณร้อยละ 10 และเพิ่มขึ้นเป็นประมาณร้อยละ 20 และ 25 เมื่อร้อยละ การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในบล็อคประสานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ค่า ความหนาแน่นที่ลดลงของบล็อคประสานมีความสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัด ซึ่งความหนาแน่น ของบล็อคประสานที่ลดลงทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าลดลงด้วย



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งของบล็อคประสานและปริมาณการแทน ที่ดินลูกรัง ด้วยเถ้าขานอ้อย

#### 4.5 ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อคประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย

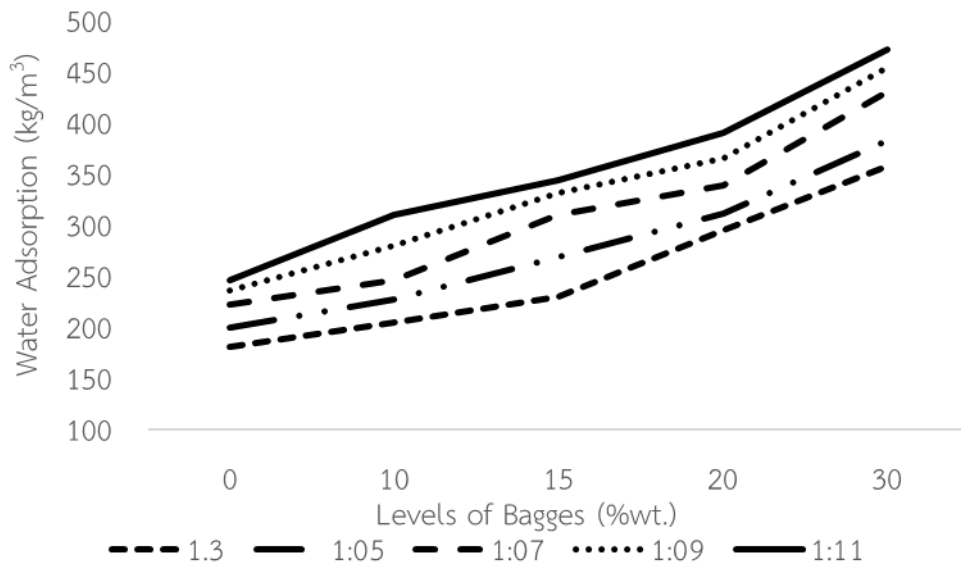
จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อคประสานมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง และมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น โดย บล็อคประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:3 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 มีค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับ 181 199 222 235 และ 246  $\text{kg/m}^3$  ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงเนื่องมาจากปริมาณดินลูกรัง

ที่เพิ่มขึ้น มีการดูดซับน้ำได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ เนื่องจากเมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติในการยึดประสานและมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำ ซึ่งเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง ค่าการดูดซึมน้ำก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังจาก 1:3 เป็น 1:11 เป็นผลทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจาก 181 เป็น 246  $\text{kg/m}^3$  ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 35

เมื่อมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย พบว่าค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของบล็อกประสาน แสดงให้เห็นว่า บล็อกประสานที่มีค่าความหนาแน่นลดลง จะมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากบล็อกประสานมวลรวมที่มีน้ำหนักเบา จะมีช่องว่างหรืออนุภาคของเถ้าขานอ้อยมีความพรุนมากกว่าดินลูกรัง เป็นผลทำให้มีน้ำหนักเบา และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย ค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยจะมีความหนาแน่นต่ำ แสดงให้เห็นว่าในบล็อกประสานอาจจะจะมีช่องว่างในปริมาณที่สูงจึงทำให้มีการดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้น หรืออาจจะเป็นผลมาจากเถ้าขานอ้อยที่เป็นวัตถุที่ผ่านการเผาไหม้ ซึ่งโดยปกติวัสดุอินทรีย์ที่ผ่านการเผาไหม้ที่เกาะจะถูกความร้อนไล่ออกไปทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เถ้าขานอ้อยมีความสามารถในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น โดยที่บล็อกประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังจาก 1:3 จะมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 181  $\text{kg/m}^3$  และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 357  $\text{kg/m}^3$  เมื่อมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และบล็อกประสานที่มีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังจาก 1:11 ไม่มีและมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 246 และ 471  $\text{kg/m}^3$  ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย

ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสาน ( $\text{kg/m}^3$ )					
อัตราส่วนผสม ปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง	ปริมาณร้อยละการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	0	10	15	20	30
1:3	181	204	230	295	357
1:5	199	226	268	311	382
1:7	222	245	310	338	430
1:9	235	279	331	365	455
1:11	246	310	343	390	471

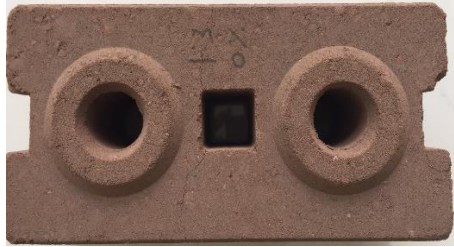







ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานและปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย เถ้าชานอ้อย

#### 4.6 ลักษณะทางกายภาพของบล็อกประสาน

กากแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยในการผลิตบล็อกประสานจะมีผลต่อการขึ้นรูปของบล็อกประสานเป็นหลัก เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีความหนาแน่นต่ำ และมีพื้นที่ผิวมาก เป็นผลทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยสังเกตได้จากการผสมถ้าอัตราส่วนที่มีเถ้าชานอ้อยมาก จะใช้น้ำในการผสมเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้การขึ้นรูปมีปัญหา เนื่องจากปริมาณน้ำที่เกาะที่ผิวของเถ้าชานอ้อยจะมีมาก ซึ่งเมื่อทำการขึ้นรูป น้ำจะถูกบีบออกมา ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำที่มีการผสมปูนซีเมนต์ไหลออกมาด้วย ส่งผลให้ความสามารถในการยึดประสานลดลง ลักษณะทางการภาพของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าชานอ้อยแสดงดังตารางที่ 4.6 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.6 ลักษณะทางการภาพของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก


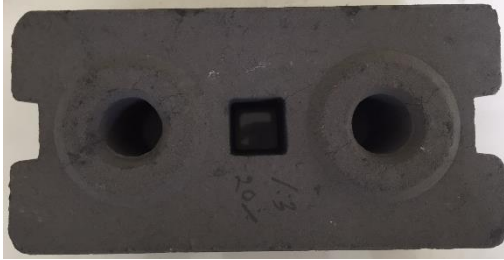




ลักษณะทางกายภาพ	ปริมาณการแทนที่ของเถ้าขานอ้อย	
	0 wt. %	10 wt. %
ด้านบน		
ด้านข้าง		
ด้านข้าง		

จากตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของบล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก ลักษณะของบล็อกประสานที่ไม่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยจะมีลักษณะออกเป็นสีแดง ซึ่งสีดังกล่าวมาจากสีของดินลูกรัง ลักษณะของการขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของดินลูกรังที่นำมาผสม ซึ่งถ้าใช้ดินลูกรังที่นำมาผสมมีความละเอียด (ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50) ส่วนบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่าบล็อกประสานที่ผสมเถ้าขานอ้อยมีสีเปลี่ยนจากสีแดงอมน้ำตาลเป็นสีออกน้ำตาลเข้มขึ้น เนื่องจากสีของเถ้าขานอ้อยที่ผสม ส่วนพื้นผิวของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะมีผิวที่เนียนกว่าบล็อกประสานที่ไม่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย เนื่องจากเถ้าขานอ้อยที่ผสมส่วนใหญ่มีความละเอียดมากกว่าดินลูกรัง เมื่อทำการผสมจะทำให้การกระจายตัวของ



อนุภาคของดินลูกรังผสมเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีอนุภาคที่มีขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผิวของบล็อกประสานมีความเนียนเรียบ

ตารางที่ 4.7 ลักษณะทางการภาพของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก




ลักษณะทางกายภาพ	ปริมาณการแทนที่ของเถ้าขานอ้อย	
	15 wt.%	20 wt.%
ด้านบน		
ด้านข้าง		
ด้านข้าง		

ลักษณะทางกายภาพของบล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.7 บล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนักจะมีผิวที่เนียนเรียบและมีความละเอียดสวยแต่เนื่องจากปริมาณเถ้าขานอ้อยที่แทนที่ดินลูกรังในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ประกอบกับความถ่วงจำเพาะของเถ้าขานอ้อยมีค่าต่ำกว่าดินลูกรังทำให้การผสมเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าเทียบเท่า เท่ากับร้อยละ 30 และ 40 โดยปริมาตร ซึ่งทำให้สีของบล็อกประสานยิ่งออกเป็นสีดำมากขึ้น นอกจากนั้นปริมาตรของเถ้าขานอ้อยที่ผสมมีปริมาณมากทำให้ปูนซีเมนต์ที่ผสมในบล็อกประสานไม่สามารถกระจายได้ทั่วถึง ทำให้เมื่อทำการเคลื่อนย้าย หรือนำมา

ทำการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมทำให้บล็อกประสานเกิดการแตกร้าวได้ง่าย และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเป็นปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ( 60 โดยปริมาตรของบล็อกประสาน ) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.8 บล็อกประสานมีสีดำ ซึ่งเกิดจากเถ้าขานอ้อยการผสมเถ้าขานอ้อยนอกจากนั้นในการผสมเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก การขึ้นรูปบล็อกประสานนั้นจะเกิดการแตกร้าวได้ง่าย เมื่อทำการเคลื่อนย้ายจะเกิดการแตก และหลุดร่อนได้ง่าย ทำให้บล็อกประสานไม่มีความแข็งแรง

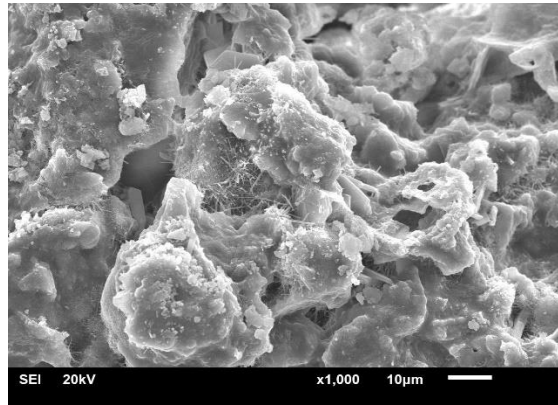
บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:5 1:7 1:9 และ 1:11 โดยน้ำหนัก ที่มีและไม่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนัก มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับบล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก แต่อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่เพิ่มขึ้นนั้น ทำให้ปริมาณวัสดุเฉื่อย (ดินลูกรังและเถ้าขานอ้อย) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอัตราส่วนที่มีปริมาณเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมลดลง ส่งผลให้การกระจายตัวของปูนซีเมนต์ในบล็อกประสานไม่ทั่วถึง ทำให้ความแข็งแรงของบล็อกประสานลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของบล็อกประสานข้างต้น นอกจากนี้บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง 1:11 โดยน้ำหนัก ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณที่สูง ลักษณะทางการภาพของบล็อกประสานมีผิวเรียบ แต่ไม่เกาะกันเนื่องจากไม่มีปูนซีเมนต์ที่เป็นวัสดุยึดประสานกระจายอยู่ ประกอบกับการผสมเถ้าขานอ้อยในปริมาณที่สูงทำให้ความต้องการน้ำในการผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำดังกล่าวถูกดูดซับที่เถ้าขานอ้อย เมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น น้ำจะเกิดการระเหยทำให้เกิดช่องว่าง เป็นผลทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง และมีค่ากำลังอัดลดลงไปด้วย

ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางการภาพของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

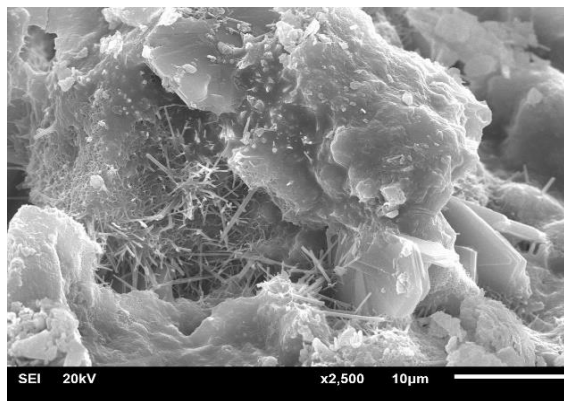
	ปริมาณการแทนที่ของเถ้าขาน้อย
ลักษณะทางกายภาพ	30 wt.%
ด้านบน	
ด้านข้าง	
ด้านข้าง	

#### 4.7 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค

ในการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และบล็อกประสานที่มีการแทนที่เถ้าขาน้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงรายละเอียดดังภาพที่ 4.16 และ 4.17



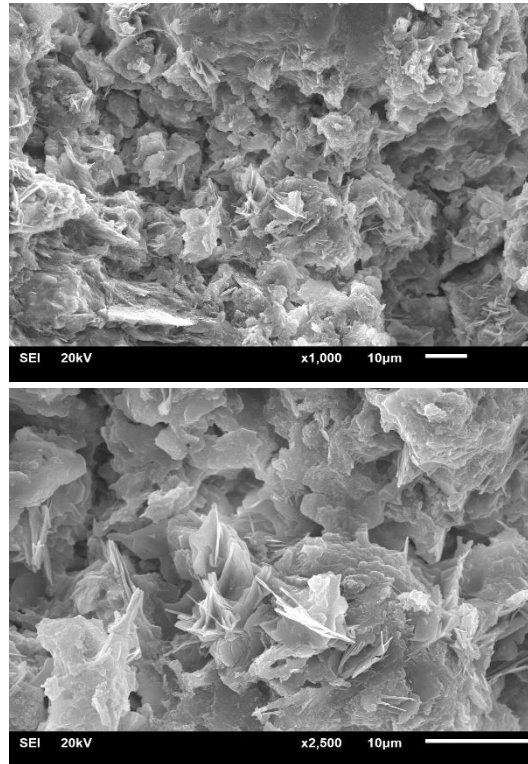
(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.16 โครงสร้างระดับจุลภาคของบล็อกประสานจากดินลูกรังที่อัตราส่วน 1:3 ที่อายุบ่ม 28 วัน

จากภาพที่ 4.16 (ก) ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกำลังขยาย 1,000 เท่า ของบล็อกประสานจากดินลูกรังที่อัตราส่วน 1:3 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า โครงสร้างภายในมีลักษณะยึดเกาะกันเป็นแผ่นหนา ซึ่งเกิดจากการบดอัด และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 2,500 เท่า (ภาพที่ 4.16 ข) พบว่า โครงสร้างภายในเกิดลักษณะรูปร่างเป็นแท่งๆ คล้ายเข็มที่เรียกว่า needle-like CSH และยังพบลักษณะโครงสร้างผลึกของควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ )



(ก)

(ข)

**ภาพที่ 4.17** โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุปฏุม 28 วัน

จากภาพที่ 4.17 (ก) ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกำลังขยายเท่ากับ 1,000 เท่า ของตัวอย่างบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อายุปฏุม 28 วัน พบว่า โครงสร้างภายในมีลักษณะยึดเกาะเป็นแผ่น และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเท่ากับ 2,500 เท่า (ภาพที่ 17 (ข)) พบว่า โครงสร้างภายในมีความพรุน ซึ่งทำให้บล็อกประสานมีความต้องการน้ำมากกว่าการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 10 15 และ 20 โดยน้ำหนักแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยทำให้โครงสร้างบล็อกประสานมีความพรุน ซึ่งน่าจะสามารเพิ่มสมบัติทางด้านความร้อนของบล็อกประสานได้ดีขึ้น

#### 4.8 การทดสอบค่าการนำความร้อนของบล็อกประสาน

การหาสมบัติการนำความร้อนของบล็อกประสานใช้เครื่องมือ Hot Disk Thermal Constant Analyzer (Hot Disk AB) ทำการเลือกอัตราส่วนที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่า 25 ksc. และมีประมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยสูงสุด นั่นคือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังของบล็อกประสานที่ 1:3 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมตัวอย่าง

ขนาด 25 x 10 x 2 เซนติเมตร ที่ผ่านการขึ้นรูปทำการทดสอบหาสมบัติการนำความร้อน โดยใช้เทคนิค Thermal Constant Analysis (TCA) โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ก้อนต่อชุดการทดลอง ซึ่งค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนของบล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:3 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย

ตัวอย่าง	ค่าการนำความร้อน (วัตต์/เมตร. เคลวิน)	ค่าการกระจายความร้อน (มม. <sup>2</sup> / วินาที)
1:3	0.7646	0.4548
1:3 + 10wt.% BBA	0.6455	0.4235
1:3 + 15wt.% BBA	0.6032	0.3983
1:3 + 20wt.% BBA	0.5647	0.3543
1:3 + 30wt.% BBA *	0.5135	0.3134

หมายเหตุ \* ตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดไม่เกิน 25 ksc.

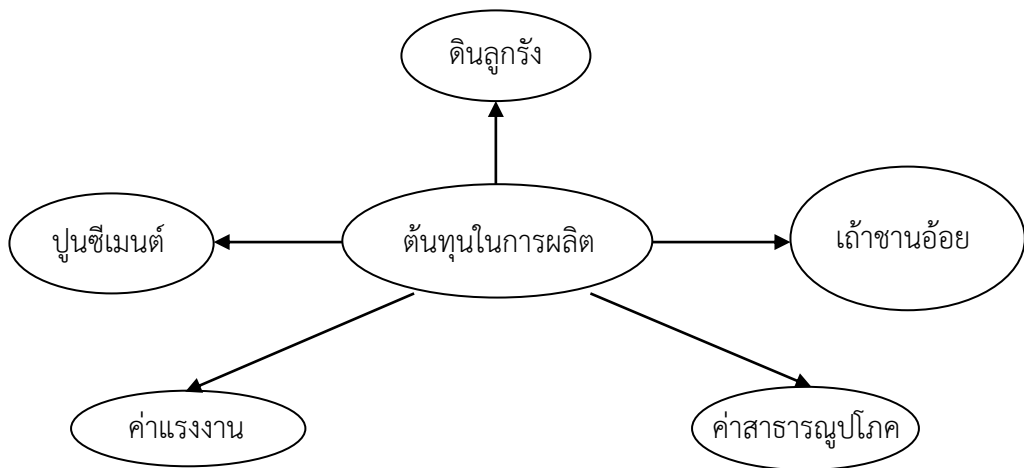
จากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อน และค่าการกระจายความร้อนของบล็อกประสานที่ผ่านการทดสอบมีค่าลดลง เมื่อปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น โดยบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง เท่ากับ 1:3 มีค่าการนำความร้อนและค่าการกระจายความร้อนเท่ากับ 0.7646 วัตต์/เมตร. เคลวิน และ 0.4548 มม.<sup>2</sup>/ วินาที และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.5135 วัตต์/เมตร. เคลวิน และ 0.3134 มม.<sup>2</sup>/ วินาที สาเหตุเนื่องมาจากการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย ทำให้ค่าความหนาแน่นของบล็อกประสานมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในบล็อกประสานมีความพรุนเพิ่มขึ้น เพราะเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนทำให้สารอินทรีย์ระเหยออกไป ทำให้โครงสร้างของเถ้าขานอ้อยมีรูพรุน และมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าดินลูกรัง จึงเป็นผลทำให้ค่าความหนาแน่นของบล็อกประสานลดลง ทำให้การนำความร้อน และค่าการกระจายความร้อนลดลง

นอกจากนั้นการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการน้ำในการขึ้นรูปบล็อกประสานเพิ่มขึ้น เพราะเถ้าขานอ้อยมีความพรุนมากกว่าดินลูกรังทำให้ดูดซับน้ำมากกว่าดินลูกรัง เมื่อทำการขึ้นรูปทำให้น้ำที่ซึ่กก็จะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นน้ำเกิดการระเหย ทำให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างของบล็อกประสาน เป็นผลทำให้เกิดความพรุนมากขึ้น ทำให้สมบัติในการนำความร้อนดีขึ้น แต่ค่ากำลังอัด และค่าความหนาแน่นมีค่าลดลง

## 4.9 การคิดคำนวณต้นทุนในการผลิต

### 4.7.1 การคิดค่าใช้จ่ายในการผลิตบล็อกประสาน

ต้นทุนในการผลิตบล็อกประสาน จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) ประกอบด้วย เครื่องอัดบล็อกประสาน อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ เช่น จอบ เสียม พลั่ว บัวรดน้ำ เป็นต้น ซึ่งต้นทุนคงที่จะขึ้นอยู่กับราคาตามท้องตลาด และต้นทุนแปรผัน (Variable Cost) ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ดินลูกรัง ถ้ำขานอ้อย ค่าแรงงาน และค่าสาธารณูปโภค เป็นต้น (ภาพที่ 4.18)



ภาพที่ 4.18 ต้นทุนในการผลิตบล็อกประสาน

ตารางที่ 4.10 ราคาต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานต่อก้อน

อัตราส่วนผสม	ค่าวัตถุดิบ			ค่าใช้จ่าย			รวม (บาท)
	ปูนซีเมนต์ (บาท)	ดินลูกรัง (บาท)	ถ้ำขานอ้อย (บาท)	ค่าแรงงาน (บาท)	ค่าไฟฟ้า (บาท)	ค่าน้ำประปา (บาท)	
C 1:3	3.10	1.20	0.00	1.2	0.043	0.021	5.56
C 1:5	2.43	1.28	0.00	1.2	0.043	0.021	4.98
C 1:7	1.82	1.35	0.00	1.2	0.043	0.021	4.43
C 1:9	1.45	1.39	0.00	1.2	0.043	0.021	4.10
C 1:11	1.02	1.46	0.00	1.2	0.043	0.021	3.74
<b>การแทนที่ดินลูกรังด้วยถ้ำขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก</b>							
C 1:3	3.1	1.08	0	1.2	0.043	0.021	5.44
C 1:5	2.43	1.152	0	1.2	0.043	0.021	4.85

อัตราส่วนผสม	ค่าวัสดุดิบ			ค่าใช้จ่าย			รวม (บาท)
	ปูนซีเมนต์ (บาท)	ดินลูกรัง (บาท)	เถ้าขานอ้อย (บาท)	ค่าแรงงาน (บาท)	ค่าไฟฟ้า (บาท)	ค่าน้ำประปา (บาท)	
C 1:7	1.82	1.215	0	1.2	0.043	0.021	4.30
C 1:9	1.45	1.251	0	1.2	0.043	0.021	3.97
C 1:11	1.02	1.314	0	1.2	0.043	0.021	3.60
<b>การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก</b>							
C 1:3	3.1	1.02	0	1.2	0.043	0.021	5.38
C 1:5	2.43	1.088	0	1.2	0.043	0.021	4.78
C 1:7	1.82	1.1475	0	1.2	0.043	0.021	4.23
C 1:9	1.45	1.1815	0	1.2	0.043	0.021	3.90
C 1:11	1.02	1.241	0	1.2	0.043	0.021	3.53
<b>การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก</b>							
C 1:3	3.1	0.9	0	1.2	0.043	0.021	5.26
C 1:5	2.43	0.96	0	1.2	0.043	0.021	4.65
C 1:7	1.82	1.0125	0	1.2	0.043	0.021	4.10
C 1:9	1.45	1.0425	0	1.2	0.043	0.021	3.76
C 1:11	1.02	1.095	0	1.2	0.043	0.021	3.38
<b>การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก</b>							
C 1:3	3.1	0.66	0	1.2	0.043	0.021	5.02
C 1:5	2.43	0.704	0	1.2	0.043	0.021	4.40
C 1:7	1.82	0.7425	0	1.2	0.043	0.021	3.83
C 1:9	1.45	0.7645	0	1.2	0.043	0.021	3.48
C 1:11	1.02	0.803	0	1.2	0.043	0.021	3.09

จากตารางที่ 4.10 ราคาต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย ในปริมาณร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยมีสมมติฐานที่จะผลิตบล็อกประสานในโรงงานหรือบริเวณโรงงานที่เถ้าขานอ้อยสามารถนำมาใช้ในการผลิตบล็อกประสานได้ง่าย พบว่าค่าแรงงาน ค่าไฟฟ้า และค่าน้ำประปา เป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่จะมีค่าวัสดุดิบที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งของวัสดุดิบ และปริมาณการซื้อในแต่ละครั้ง โดยต้นทุนของบล็อกประสานจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:3 มีค่าต้นทุนเท่ากับ 5.56 บาท และที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:11 มีค่า



ต้นทุนเท่ากับ 3.74 บาท ซึ่งค่าต้นทุนของปูนซีเมนต์จะมีค่าสูงกว่าวัสดุอื่นๆ ซึ่งก็เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้บล็อกประสานมีความแข็งแรง เมื่อเทียบกับราคาในท้องตลาดซึ่งขายอยู่ที่ 8-10 บาท (ซึ่งใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังที่ 1:9 โดยน้ำหนัก) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากท้องตลาดประมาณ 2-3 บาท เนื่องจากในโรงงานอาจจะใช้เครื่องจักรที่มีราคาแพงในการขึ้นรูป ซึ่งสามารถผลิตได้ในปริมาณที่สูง ทำให้ต้องมีค่าต้นทุนของเครื่องจักรเพิ่มขึ้น

เมื่อมีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่า ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อบล็อกประสานเท่ากับ 1:3 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยมีต้นทุนในการผลิตเท่ากับ 5.44 5.38 5.26 และ 5.02 บาท ซึ่งทุ้อัตราส่วนต้นทุนจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่า 25 ksc. และมีการแทนที่เถ้าขานอ้อยสูงสุดคือ คืออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าต้นทุนเท่ากับ 5.26 บาท ซึ่งถ้านำมาขายในท้องตลาดจะมีผลกำไรเท่ากับ 2.74 บาทต่อก้อน ผลกำไรขึ้นอยู่กับปริมาณการซื้อวัสดุในแต่ละรอบ ถ้ามีการซื้อในปริมาณที่มากก็จะมีต้นทุนในการผลิตน้อย

#### 4.10 การตัดแยกสมบัติของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย

จากผลการศึกษาสมบัติของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยสามารถที่จะตัดแยกบล็อกประสานออกตามสมบัติทางวิศวกรรมในด้านกำลังอัด และการดูดซึมน้ำ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางวิศวกรรม และการนำไปใช้ประโยชน์ของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย

ปริมาณการแทนที่ดิน ลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย	อัตราส่วน 1:3					อัตราส่วน 1:5					อัตราส่วน 1:7				อัตราส่วน 1:9				อัตราส่วน 1:11			
	0	10	15	20	30	0	10	15	20	30	0	10	15	20	0	10	15	20	0	10	15	20
บล็อกประสาน ชนิดรับ น้ำหนัก ( 7 MPa) *	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
บล็อกประสาน ชนิดรับไม่ น้ำหนัก ( 2.5 MPa) *	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x
ค่าการดูดกลืนน้ำ (123.41-210.45 kg/m <sup>3</sup> ) *	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x	✓	x	x	x
งานผนัง Indoor **	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x
งานผนัง Outdoor **	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x	✓	x	x	x	✓	x	x	x

หมายเหตุ \* มาตรฐานอ้างอิงจาก มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อิฐบล็อกประสาน (มพข.๖๐๒/๒๕๔๗)

\*\* ผนัง Indoor วัตน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากการตากแดด ฝน ลม ทิ้งไว้ 60 วัน แล้ววัดค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่มีค่ามากกว่า ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

\*\* ผนัง Outdoor วัตน้ำหนักที่สูญเสียไปเนื่องจากการตากแดด ฝน ลม ทิ้งไว้ 60 วัน แล้ววัดค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่มีค่าน้อยกว่า ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

จากตารางที่ 4.11 แสดงการคัดเลือกบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 10 15 20 และ 30 โดยน้ำหนัก โดยแบ่งแยกบล็อกประสานแต่ละอัตราส่วนตามการนำไปใช้ประโยชน์ โดยแบ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อีฐบล็อกประสาน (มผช.๖๐๒/๒๕๔๗) ออกเป็น บล็อกประสานชนิดแบบรับน้ำหนัก ซึ่งต้องมีค่ากำลังอัดไม่ต่ำกว่า 7 MPa ซึ่งบล็อกประสานทุกอัตราส่วนมีค่ากำลังอัดต่ำกว่า 7 MPa และยิ่งเพิ่มปริมาณเถ้าขานอ้อย ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง ทำให้ทุกอัตราส่วนผสมของบล็อกประสานไม่สามารถนำมาใช้ในรูปแบบของผนังบล็อกประสานที่รับน้ำหนักได้ เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานมีค่าสูงกว่า 2.5 MPa ซึ่งบล็อกประสานที่มีค่ากำลังอัดที่สามารถนำมาใช้เป็นบล็อกประสานแบบไม่รับน้ำหนักนั้นมีอัตราส่วนดังนี้ บล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:3 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก, บล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:5 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 10 และ 15 โดยน้ำหนัก, บล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:7 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก และบล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:9 ที่ไม่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อย

เมื่อพิจารณาการนำบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยมาใช้ในการก่อสร้างทั้งภายในและภายนอกนั้น ซึ่งพิจารณาจากการสูญเสียน้ำหนักของบล็อกประสานที่ผ่านการตากแดด ฝน ลม เป็นเวลา 60 วัน และมีน้ำหนักที่สูญเสียต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งน่าจะนำมาใช้เป็นบล็อกประสานภายนอกอาคารได้ ซึ่งอัตราส่วนที่ผ่านตามเงื่อนไขดังกล่าวนี้คือ บล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:5 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก, บล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:7 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก และบล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:9 และ 1:11 ที่ไม่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อย ส่วนบล็อกประสานที่สามารถใช้ภายในได้ มีอัตราส่วนดังนี้ บล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:3 และ 1:5 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 10 และ 15 โดยน้ำหนัก, บล็อกประสานที่อัตราส่วน 1:7, 1:9 และ 1:11 ที่มีการแทนที่เถ้าขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก

## บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางวิศวกรรมของบล็อกประสาน คืออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง และปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ค่ากำลังอัด และความหนาแน่นมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเพิ่มขึ้น แต่ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณของดินลูกรังที่ผสมในบล็อกประสานมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทำให้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุยึดประสาน ไม่สามารถที่จะกระจายทั่วถึงทั้งบล็อกประสาน ทำให้บล็อกประสานยึดเกาะกันด้วยแรงกคในการอัดขึ้นรูปเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

ส่วนปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า ค่ากำลังอัด และความหนาแน่นมีค่าลดลง และค่าการดูดซึมน้ำมีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่ม เนื่องจากเถ้าขานอ้อยที่นำมาผสมมีความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุที่ผ่านการเผา ซึ่งจะมีความพรุนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเผาจะทำให้สารอินทรีย์อยู่ในขานอ้อยถูกเผาและระเหยออกไป ทำให้เกิดรูพรุน เป็นผลให้ความหนาแน่นของบล็อกประสานลดลง และในการผสมอัดขึ้นรูปบล็อกประสานนั้นอัตราส่วนที่มีปริมาณเถ้าขานอ้อยสูงจะใช้ปริมาณน้ำในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น เมื่อบล็อกประสานผ่านการบ่มน้ำจะระเหยออกไปทำให้เกิดช่องว่างภายในบล็อกประสาน เป็นเหตุให้ความหนาแน่นของบล็อกประสานลดลง นอกจากนี้ความพรุนของเถ้าขานอ้อยยังทำให้บล็อกประสานมีสมบัติการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น แต่ในการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยนั้นจะทำให้สมบัติในการนำความร้อนของบล็อกประสานเพิ่มขึ้น เนื่องจากความพรุนภายในบล็อกประสาน

บล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยที่ใช้เป็นบล็อกประสานชนิดแบบไม่รับน้ำหนัก ที่สามารถใช้ในการก่อสร้างได้นั้น (ซึ่งพิจารณากำลังรับแรงอัดที่มีค่ามากกว่า 25 MPa) มีอัตราส่วนดังนี้ บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 0 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:5 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 0 10 และ 15 โดยน้ำหนัก บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:7 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก

ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนที่มีค่าการดูดซึมน้ำตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อิฐบล็อกประสาน ( $123.41 - 210.45 \text{ kg/m}^3$ ) คืออัตราส่วนบล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 1:5 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 0 10 และ 15 โดยน้ำหนัก บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:7 1:9 ที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อยเท่ากับ 0 และ 10 โดยน้ำหนัก บล็อกประสานที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:11 ที่ไม่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าขานอ้อย

ต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อย จะมีค่าต่ำกว่าบล็อกประสานปกติ ประมาณร้อยละ 20 - 30 ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนของบล็อกประสานลดลงคือ ค่าขนส่งเถาขานอ้อยมาใช้ในการผลิตบล็อกประสาน แต่เป็นการลดปริมาณเถาขานอ้อยที่ต้องกำจัด และเป็น การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดจากการทิ้งเถาขานอ้อยโดยการฝังกลบ และบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อยมีต้นทุนในการผลิตบล็อกประสานอยู่ในช่วง 3.09 - 5.56 บาท

อัตราส่วนบล็อกประสานที่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อยที่มีสมบัติทางวิศวกรรม เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน อิฐบล็อกประสาน และมีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดคืออัตราส่วนที่ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:3 และ 1:5 ที่สามารถแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อยได้ มากถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ประมาณร้อยละ 35 - 40 โดยปริมาตรของบล็อกประสาน)

การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อยในบล็อกประสาน ทำให้ค่าความสามารถในการเป็น ฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสมเถาขานอ้อย ทำให้บล็อกประสานมีความพรุนเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปอย่างช้า ทำให้ค่าการนำความร้อน และการกระจายความร้อนมีค่าลดลง การแทนที่ดินลูกรังด้วยเถาขานอ้อยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการนำ ความร้อน และการกระจายความร้อนลดลง ประมาณร้อยละ 15 - 20 โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเพิ่มขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการส่งเสริมให้มีการใช้เถาขานอ้อยในการผลิตบล็อกประสานในพื้นที่ใกล้โรงงานเพื่อลด ค่าใช้จ่ายในการขนส่งเถาขานอ้อย
- 2) ในการขึ้นรูปบล็อกประสานจะต้องพิจารณาปริมาณความชื้นของดินลูกรังที่จะนำมาผลิต บล็อกประสาน เนื่องจากดินลูกรังจะถูกกองเก็บกลางแจ้ง ซึ่งอาจจะมีค่าความชื้นสูงดังนั้นในการผสม ปริมาณที่ได้จากการทดสอบอาจจะไม่สามารถใช้ได้ (ซึ่งอาจจะมีค่าความชื้นมากเกินไป) ซึ่งทางผู้ผลิต สามารถทำการทดสอบได้ด้วยเทคนิคง่ายๆ คือ ความชื้นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ เมื่อผสมน้ำแล้ว สามารถที่จะนำดินที่ผสมแล้วเป็นก้อนไม่มีน้ำไหลออกมา แต่ถ้ากำเป็นก้อนไม่ได้แสดงว่ามีปริมาณ ความชื้นน้อยเกินไป
- 3) ในการเผาเถาขานอ้อยจากเตาเผาชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้ในการผลิตบล็อกประสานนั้น ถ้ามี การควบคุมอุณหภูมิ และออกซิเจนในการเผา และความชื้นของขานอ้อยก่อนเข้าเตาเผา จะทำให้เถา ขานอ้อยที่ได้ออกมาจากเตาเผานั้นมีปริมาณสารอินทรีย์น้อยลง ซึ่งทำให้อัตราการหน่วงการ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ซึ่งจะช่วยให้บล็อกประสานสามารถพัฒนากำลังอัดได้สูง และเร็วขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] กล้าณรงค์ คา โศกกลาง, วุฒิจ พิณิจผล และวีระศักดิ์ บุญนา, 2553, “คุณสมบัติบล็อกประสานระหว่าง ดินซีเมนต์และเถ้าลอย”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [2] กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, “การจัดการดินลูกรัง”, พิมพ์ครั้งที่ 1, คณะกรรมการกำหนดมาตรการและจัดทำเอกสาร, กรุงเทพฯ, หน้า 6 – 13.
- [3] จรุงญ เจริญเนตรกุล, 2557, “อิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมเถ้าแกลบและปาล์มน้ำมัน”, วารสารการพัฒนารวมชนและคุณภาพชีวิต, ปีที่ 2, ฉบับที่ 1, หน้า 103-112.
- [4] ชูศักดิ์ ศิริรัตน์, 2554, “ปฏิพิภคศาสตร์”, สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ, 738-745.
- [5] นิชาดา ฉัตรสถาปัตยกุล, มณฑล วังเวียง และภัทรา เฟงธรรมกิริติ, 2555, “ความเป็นไปได้ของการใช้กากตะกอนเคมีจากการผลิตน้ำประปาพร้อมกับปูนซีเมนต์ในซีเมนต์มอร์ต้าและอิฐบล็อกประสาน”, วารสารวิชาการ Rajabhat Journal of Science, Humanities & Social Sciences ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 48-54.
- [6] นพปฎล เสี่ยงมศักดิ์ และเรืองรุชดี ชีระโรจน์, 2550, “การใช้ตะกอนประปาเพื่อเป็นส่วนผสมในบล็อกประสาน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 12, วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2550, โรงแรม อมารินทร์ลาภูน, พิษณุโลก, หน้า 195-199.
- [7] ประชุม คำพุ่ม, กิตติพงษ์ สุวีโร, อมเรศ บกสุวรรณ, นิรมล ปั่นลาย, 2558, “การใช้ฝุ่นหินภูเขาไฟในผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน”, วารสารการพัฒนารวมชนและคุณภาพชีวิต, ปีที่ 3, ฉบับที่ 2, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 239-247.
- [8] ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2551, “ปฏิภคยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ”, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 5, สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ, หน้า 47-54.
- [9] พงษ์ภูมิ ศรีชมแก้ว, 2555, “การผลิตอิฐบล็อกประสานจากกากอุตสาหกรรม”, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล.
- [10] พิมพ์วัลย์วัฒนภาส, สายจิต ดาวสุขโข, 2553, “อิฐเนื้อพรุนจากเซรามิกแตก”, พัฒนาการผลิตสู่ ภาคอุตสาหกรรม [ออนไลน์], แหล่งค้นหา : <http://www.most.go.th/main/index.php/org/1652.html> [วันที่สืบค้น : 25 ตุลาคม 2558].

- [11] แม้น อมรสิทธิ์, สมชัย อัครทิวา, 2544, “วัสดุวิศวกรรม”, สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ, หน้า 410.
- [12] รัชณี คงเมือง, 2554, “การผลิตบล็อกประสานโดยใช้กากตะกอนจากกระบวนการทำน้ำเกลือให้บริสุทธิ์ของโรงงานเหมืองแร่เกลือหิน จังหวัดนครราชสีมา”, การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มสธ, ครั้งที่ 1, วันที่ 26 สิงหาคม 2554, อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550 มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, กรุงเทพฯ, หน้า 1-12.
- [13] วชิระ แสงรัศมี, 2555, “การพัฒนาบล็อกประสานน้ำหนักเบาจากเยื่อกระดาษเหลือทิ้ง”, การประชุมวิชาการประจำปี 2555 Built Environment Research Associates’ Conference, BERAC III 2012, ครั้งที่ 3, วันที่ 25 พฤษภาคม 2555, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, กรุงเทพฯ, หน้า 12-20.
- [14] วราธร แก้วแสง, 2554, “คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของอิฐบล็อกประสานดินขาวที่ผสมด้วยกลวิธี โพลีเมอร์ไรเซชัน”, การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ครั้งที่ 8, วันที่ 8-9 ธันวาคม 2554, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, หน้า 1393-1401.
- [15] วุฒินัย กกกำแหง และพิชิต เจนบรรจง, ม.ป.ป., “เอกสารประกอบการอบรมการผลิตบล็อกประสาน วว.”, การผลิตบล็อกประสานให้ได้คุณภาพ ฝายถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.).
- [16] วุฒินัย กกกำแหง และวิทยา วุฒิจำนง, 2550, “การประยุกต์ใช้ปั๊มในการผลิตบล็อกประสาน”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 12, วันที่ 2-4 พฤษภาคม 2550, โรงแรมอมรินทร์ลากูน, พิษณุโลก, หน้า 343-346.
- [17] สมคณ เกียรติก่อง, 2556, “ความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำของบล็อกคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ผสมกับดินเซรามิกและเศษใบไม้”, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, หน้า 212-217.
- [18] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนอุตสาหกรรม, 2547, “มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนบล็อกประสาน”, มผช, 602/2547, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- [19] สำเร็จ สารมาคม, 2556, “การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการผลิตบล็อกประสาน”, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [20] สุบรรณ ตาคาวิน, วิศรุต เรืองฤทธิ์ และอารยา กิ่งหลักเมือง, 2558, “คุณสมบัติทางกลบล็อกประสาน ผสมเถ้ากะลามะพร้าว”, การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ, ครั้งที่ 8, วันที่ 28 พฤศจิกายน 2558, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, หน้า 195-200.

- [21] อมเรศ บกสุวรรณ, กิตติพงษ์ สุวีโร และประชุม คำพุด, 2556, “การพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน ผสมกากดินขาว จากจังหวัดระนอง”, รายงานการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [22] อรพิน ขวัญศรี, 2549, “ต้นทุนการผลิตบล็อกประสานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี”, วารสารการวิจัย และพัฒนา, ฉบับที่ 21 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, หน้า 51-56.



ภาคผนวก

ตารางที่ ก ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 7 วัน

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย ก๊าซชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )	
1:3	0	7904.36	287.4	27.5	
		7329.50	287.4	25.5	
		8048.08	287.4	28.0	
		7760.65	287.4	27.0	
		8048.08	287.4	28.0	
<b>รวม</b>		<b>7818.13</b>	<b>287.43</b>	<b>27.20</b>	
1:5			5739.05	287.4	20.0
			5806.11	287.4	20.2
			5691.14	287.4	19.8
			5604.91	287.4	19.5
			5231.25	287.4	18.2
<b>รวม</b>		<b>5614.49</b>	<b>287.43</b>	<b>19.53</b>	
1:7			4828.85	287.4	16.8
			4800.10	287.4	16.7
			5087.54	287.4	17.7
			5116.28	287.4	17.8
			5288.74	287.4	18.4
<b>รวม</b>		<b>5024.30</b>	<b>287.43</b>	<b>17.48</b>	
1:9			3564.15	287.4	12.4
			3477.92	287.4	12.1
		3420.43	287.4	11.9	
		3104.26	287.4	10.8	
		3420.43	287.4	11.9	
<b>รวม</b>	<b>3397.44</b>	<b>287.43</b>	<b>11.82</b>		
1:11		2126.99	287.4	7.4	
		2141.36	287.4	7.5	
		1868.30	287.4	6.5	
		1868.30	287.4	6.5	
		1868.30	287.4	6.5	
<b>รวม</b>	<b>1974.65</b>	<b>287.43</b>	<b>6.87</b>		

ตารางที่ ก ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 7 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย ก๊าซชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )
1:3	10	7746.28	287.4	27.0
		7182.91	287.4	25.0
		7082.31	287.4	24.6
		7527.83	287.4	26.2
		7484.71	287.4	26.0
<b>รวม</b>		<b>7404.81</b>	<b>287.43</b>	<b>25.76</b>
1:5		5624.27	287.4	19.6
		5689.99	287.4	19.8
		5008.20	287.4	17.4
		5436.76	287.4	18.9
		4865.06	287.4	16.9
<b>รวม</b>		<b>5324.86</b>	<b>287.43</b>	<b>18.53</b>
1:7		5116.28	287.4	17.8
		4771.36	287.4	16.6
		4656.39	287.4	16.2
		4541.42	287.4	15.8
		4656.39	287.4	16.2
<b>รวม</b>		<b>4748.37</b>	<b>287.43</b>	<b>16.52</b>
1:9	3421.58	287.4	11.9	
	3338.80	287.4	11.6	
	3283.62	287.4	11.4	
	2949.05	287.4	10.3	
	3283.62	287.4	11.4	
<b>รวม</b>	<b>3255.33</b>	<b>287.43</b>	<b>11.33</b>	
1:11	1982.36	287.4	1982.36	
	2055.71	287.4	2055.71	
	1793.57	287.4	1793.57	
	1737.52	287.4	1737.52	
	1756.21	287.4	1756.21	
<b>รวม</b>	<b>1865.07</b>	<b>287.43</b>	<b>1865.07</b>	

ตารางที่ ก ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 7 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย ก๊าซชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )
1:3	15	6429.41	287.4	22.4
		6035.11	287.4	21.0
		6465.83	287.4	22.5
		6312.51	287.4	22.0
		6712.10	287.4	23.4
<b>รวม</b>		<b>6390.99</b>	<b>287.43</b>	<b>22.23</b>
1:5		4668.14	287.4	16.2
		4780.75	287.4	16.6
		4572.26	287.4	15.9
		4559.04	287.4	15.9
		4362.86	287.4	15.2
<b>รวม</b>		<b>4588.61</b>	<b>287.43</b>	<b>15.96</b>
1:7		3927.78	287.4	13.7
		3952.41	287.4	13.8
		4087.33	287.4	14.2
	4161.58	287.4	14.5	
	4410.81	287.4	15.3	
<b>รวม</b>	<b>4107.98</b>	<b>287.43</b>	<b>14.29</b>	
1:9	2899.08	287.4	10.1	
	2863.72	287.4	10.0	
	2747.98	287.4	9.6	
	2525.00	287.4	8.8	
	2852.64	287.4	9.9	
<b>รวม</b>	<b>2777.68</b>	<b>287.43</b>	<b>9.66</b>	
1:11	1730.10	287.4	6.0	
	1763.20	287.4	6.1	
	1501.00	287.4	5.2	
	1519.68	287.4	5.3	
	1558.17	287.4	5.4	
<b>รวม</b>	<b>1614.43</b>	<b>287.43</b>	<b>5.62</b>	

ตารางที่ ก ค่ากำลังอัดของบล็อคประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 7 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย เถ้าขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )	
1:3	20	5944.08	287.4	20.7	
		5511.78	287.4	19.2	
		6044.11	287.4	21.0	
		5836.01	287.4	20.3	
		6052.16	287.4	21.1	
<b>รวม</b>		<b>5877.63</b>	<b>287.43</b>	<b>20.4</b>	
1:5			4315.76	287.4	15.0
			4366.20	287.4	15.2
			4279.74	287.4	14.9
			4214.89	287.4	14.7
			3933.90	287.4	13.7
<b>รวม</b>		<b>4222.10</b>	<b>287.43</b>	<b>14.7</b>	
1:7			3631.29	287.4	12.6
			3609.68	287.4	12.6
			3825.83	287.4	13.3
			3847.44	287.4	13.4
			3977.13	287.4	13.8
<b>รวม</b>		<b>3778.27</b>	<b>287.43</b>	<b>13.1</b>	
1:9			2680.24	287.4	9.3
			2615.40	287.4	9.1
		2572.17	287.4	8.9	
		2334.40	287.4	8.1	
		2572.17	287.4	8.9	
<b>รวม</b>	<b>2554.87</b>	<b>287.43</b>	<b>8.9</b>		
1:11		1599.50	287.4	5.6	
		1610.31	287.4	5.6	
		1404.96	287.4	4.9	
		1404.96	287.4	4.9	
		1404.96	287.4	4.9	
<b>รวม</b>	<b>1484.94</b>	<b>287.43</b>	<b>5.2</b>		

ตารางที่ ก ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 7 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย ก๊าซชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )	
1:3	30	4205.12	287.4	14.6	
		3899.29	287.4	13.6	
		4281.58	287.4	14.9	
		4128.66	287.4	14.4	
		4281.58	287.4	14.9	
<b>รวม</b>		<b>4159.25</b>	<b>287.43</b>	<b>14.5</b>	
1:5			3053.17	287.4	10.6
			3088.85	287.4	10.7
			3027.69	287.4	10.5
			2981.81	287.4	10.4
			2783.03	287.4	9.7
<b>รวม</b>		<b>2986.91</b>	<b>287.43</b>	<b>10.4</b>	
1:7			2568.95	287.4	8.9
			2553.66	287.4	8.9
			2706.57	287.4	9.4
			2721.86	287.4	9.5
			2813.61	287.4	9.8
<b>รวม</b>		<b>2672.93</b>	<b>287.43</b>	<b>9.3</b>	
1:9			1896.13	287.4	6.6
			1850.25	287.4	6.4
		1819.67	287.4	6.3	
		1651.47	287.4	5.7	
		1819.67	287.4	6.3	
<b>รวม</b>	<b>1807.44</b>	<b>287.43</b>	<b>6.3</b>		
1:11		1131.56	287.4	3.9	
		1139.21	287.4	4.0	
		993.94	287.4	3.5	
		993.94	287.4	3.5	
		993.94	287.4	3.5	
<b>รวม</b>	<b>1050.52</b>	<b>287.43</b>	<b>3.7</b>		

ตารางที่ ข ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 14 วัน

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย ก๊าซชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )	
1:3	0	10893.7	287.4	37.9	
		10232.6	287.4	35.6	
		10922.4	287.4	38.0	
		11497.3	287.4	40.0	
		11209.8	287.4	39.0	
<b>รวม</b>		<b>10951.14</b>	<b>287.43</b>	<b>38.10</b>	
1:5			7070.8	287.4	24.6
			7358.2	287.4	25.6
			7875.6	287.4	27.4
			7588.2	287.4	26.4
			7415.7	287.4	25.8
<b>รวม</b>		<b>7461.72</b>	<b>287.43</b>	<b>25.96</b>	
1:7			5806.1	287.4	20.2
			6064.8	287.4	21.1
			5978.6	287.4	20.8
			5921.1	287.4	20.6
			5892.3	287.4	20.5
<b>รวม</b>		<b>5932.58</b>	<b>287.43</b>	<b>20.64</b>	
1:9			4483.9	287.4	15.6
			4627.6	287.4	16.1
		4598.9	287.4	16.0	
		4455.2	287.4	15.5	
		4800.1	287.4	16.7	
<b>รวม</b>	<b>4593.15</b>	<b>287.43</b>	<b>15.98</b>		
1:11		2874.3	287.4	10.0	
		3190.5	287.4	11.1	
		3104.3	287.4	10.8	
		3391.7	287.4	11.8	
		3133.0	287.4	10.9	
<b>รวม</b>	<b>3138.75</b>	<b>287.43</b>	<b>10.92</b>		

ตารางที่ ข ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 14 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย ก๊าซชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )	
1:3	10	9586.4	287.4	33.4	
		9096.7	287.4	31.6	
		10048.6	287.4	35.0	
		10922.4	287.4	38.0	
		10705.4	287.4	37.2	
<b>รวม</b>		<b>10071.91</b>	<b>287.43</b>	<b>35.04</b>	
1:5			6222.3	287.4	21.6
			6541.5	287.4	22.8
			7245.6	287.4	25.2
			7208.8	287.4	25.1
			7082.0	287.4	24.6
<b>รวม</b>		<b>6860.03</b>	<b>287.43</b>	<b>23.87</b>	
1:7			5892.3	287.4	20.5
			5834.9	287.4	20.3
			6179.8	287.4	21.5
			6237.3	287.4	21.7
			6266.0	287.4	21.8
<b>รวม</b>		<b>6082.05</b>	<b>287.43</b>	<b>21.16</b>	
1:9			4304.6	287.4	15.0
			4442.5	287.4	15.5
		4369.0	287.4	15.2	
		4277.0	287.4	14.9	
		4608.1	287.4	16.0	
<b>รวม</b>	<b>4400.23</b>	<b>287.43</b>	<b>15.31</b>		
1:11		2730.6	287.4	9.5	
		2967.2	287.4	10.3	
		2855.9	287.4	9.9	
		3256.0	287.4	11.3	
		2882.4	287.4	10.0	
<b>รวม</b>	<b>2938.41</b>	<b>287.43</b>	<b>10.22</b>		



ตารางที่ ข ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 14 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย เถ้าขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )	
1:3	15	8860.9	287.4	30.8	
		8595.3	287.4	29.9	
		8884.3	287.4	30.9	
		9236.9	287.4	32.1	
		9003.7	287.4	31.3	
<b>รวม</b>		<b>8916.23</b>	<b>287.43</b>	<b>31.02</b>	
1:5			5751.4	287.4	20.0
			6180.9	287.4	21.5
			6406.0	287.4	22.3
			6096.4	287.4	21.2
			5956.3	287.4	20.7
<b>รวม</b>		<b>6078.20</b>	<b>287.43</b>	<b>21.15</b>	
1:7			4722.7	287.4	16.4
			5094.4	287.4	17.7
			4863.0	287.4	16.9
		4757.0	287.4	16.6	
		4732.7	287.4	16.5	
<b>รวม</b>	<b>4833.97</b>	<b>287.43</b>	<b>16.82</b>		
1:9		3647.2	287.4	12.7	
		3887.2	287.4	13.5	
		3740.7	287.4	13.0	
		3579.3	287.4	12.5	
		3855.4	287.4	13.4	
<b>รวม</b>	<b>3741.99</b>	<b>287.43</b>	<b>13.02</b>		
1:11		2338.0	287.4	8.1	
		2680.0	287.4	9.3	
		2525.0	287.4	8.8	
		2724.9	287.4	9.5	
		2516.4	287.4	8.8	
<b>รวม</b>	<b>2556.86</b>	<b>287.43</b>	<b>8.90</b>		

ตารางที่ ข ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 14 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย เถ้าขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )	
1:3	20	8192.02	287.4	28.5	
		7490.23	287.4	26.1	
		8213.64	287.4	28.6	
		8645.94	287.4	30.1	
		8205.59	287.4	28.5	
<b>รวม</b>		<b>8149.48</b>	<b>287.43</b>	<b>28.4</b>	
1:5			5317.25	287.4	18.5
			5533.40	287.4	19.3
			5922.47	287.4	20.6
			5706.32	287.4	19.9
			5576.63	287.4	19.4
<b>รวม</b>		<b>5611.21</b>	<b>287.43</b>	<b>19.5</b>	
1:7			4366.20	287.4	15.2
			4560.73	287.4	15.9
			4495.89	287.4	15.6
		4452.66	287.4	15.5	
		4431.04	287.4	15.4	
<b>รวม</b>	<b>4461.30</b>	<b>287.43</b>	<b>15.5</b>		
1:9		3371.92	287.4	11.7	
		3479.99	287.4	12.1	
		3458.37	287.4	12.0	
		3350.30	287.4	11.7	
		3609.68	287.4	12.6	
<b>รวม</b>	<b>3454.05</b>	<b>287.43</b>	<b>12.0</b>		
1:11		2161.48	287.4	7.5	
		2399.25	287.4	8.3	
		2334.40	287.4	8.1	
		2550.55	287.4	8.9	
		2356.02	287.4	8.2	
<b>รวม</b>	<b>2360.34</b>	<b>287.43</b>	<b>8.2</b>		

ตารางที่ ข ค่ากำลังอัดของบล็อคประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 14 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรังด้วย ก๊าซชีวภาพ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )	
1:3	30	5795.42	287.4	20.2	
		5443.72	287.4	18.9	
		5810.71	287.4	20.2	
		6116.54	287.4	21.3	
		5963.63	287.4	20.7	
<b>รวม</b>		<b>5826.00</b>	<b>287.43</b>	<b>20.3</b>	
1:5			3761.67	287.4	13.1
			3914.59	287.4	13.6
			4189.83	287.4	14.6
			4036.92	287.4	14.0
			3945.17	287.4	13.7
<b>รวม</b>		<b>3969.63</b>	<b>287.43</b>	<b>13.8</b>	
1:7			3088.85	287.4	10.7
			3226.47	287.4	11.2
			3180.60	287.4	11.1
			3150.02	287.4	11.0
			3134.73	287.4	10.9
<b>รวม</b>		<b>3156.13</b>	<b>287.43</b>	<b>11.0</b>	
1:9			2385.45	287.4	8.3
			2461.91	287.4	8.6
		2446.62	287.4	8.5	
		2370.16	287.4	8.2	
		2553.66	287.4	8.9	
<b>รวม</b>	<b>2443.56</b>	<b>287.43</b>	<b>8.5</b>		
1:11		1529.14	287.4	5.3	
		1697.34	287.4	5.9	
		1651.47	287.4	5.7	
		1804.38	287.4	6.3	
		1666.76	287.4	5.8	
<b>รวม</b>	<b>1669.82</b>	<b>287.43</b>	<b>5.8</b>		

ตารางที่ ค ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน

อัตราส่วน วัสดุยึด ประสานต่อ มวลรวม ละเอียด	ปริมาณการแทน ที่ดินลูกรังด้วยเถ้า ขาน้อย (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ความ สูง (ชม.)	น้ำหนัก (กก.)	ปริมาตร (ชม. <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น (ก./ชม. <sup>3</sup> )	ค่าแรงกด (กก.)	ความเค้น อัด (กก./ ชม. <sup>2</sup> )
1:3	0	287.4	10.0	4.9380	2874.3	1.72	13049.4	45.4
		287.4	10.0	4.9380	2874.3	1.72	11583.5	40.3
		287.4	10.0	4.9390	2874.3	1.72	11899.7	41.4
		287.4	9.9	4.9880	2845.6	1.75	12503.3	43.5
		287.4	10.0	4.9540	2874.3	1.72	12647.0	44.0
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>9.98</b>	<b>4.95</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.73</b>	<b>12336.56</b>	<b>42.92</b>
1:5		287.4	10.4	4.8970	2989.3	1.64	287.4	30.2
		287.4	10.1	4.8950	2874.3	1.70	287.4	31.2
		287.4	10.1	4.8970	2874.3	1.70	287.4	32.2
		287.4	10.0	4.8823	2845.6	1.72	287.4	32.4
		287.4	10.0	4.8220	2874.3	1.68	287.4	32.8
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.12</b>	<b>4.88</b>	<b>2891.56</b>	<b>1.69</b>	<b>287.43</b>	<b>31.76</b>
1:7		287.4	10.2	4.7750	2931.8	1.63	287.4	26.5
		287.4	10.5	4.7850	2874.3	1.66	287.4	26.3
		287.4	10.2	4.7650	2874.3	1.66	287.4	25.8
		287.4	10.4	4.7200	2845.6	1.66	287.4	27.7
		287.4	10.2	4.7700	2874.3	1.66	287.4	26.8
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.30</b>	<b>4.76</b>	<b>2880.06</b>	<b>1.65</b>	<b>287.43</b>	<b>26.62</b>
1:9		287.4	10.1	4.3220	2903.1	1.49	287.4	22.3
		287.4	10.3	4.3220	2874.3	1.50	287.4	22.4
	287.4	10.2	4.3220	2874.3	1.50	287.4	23.1	
	287.4	10.1	4.3500	2845.6	1.53	287.4	23.4	
	287.4	10.0	4.3100	2874.3	1.50	287.4	25.5	
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.15</b>	<b>4.33</b>	<b>2874.31</b>	<b>1.50</b>	<b>287.43</b>	<b>23.34</b>	
1:11	287.4	10.1	4.123	2903.1	1.42	287.4	15.5	
	287.4	10.2	4.133	2874.3	1.44	287.4	15.7	
	287.4	10.4	4.134	2874.3	1.44	287.4	15.4	
	287.4	10.1	4.189	2845.6	1.47	287.4	16.5	
	287.4	10.0	4.135	2874.3	1.44	287.4	14.7	
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.16</b>	<b>4.14</b>	<b>2874.31</b>	<b>1.44</b>	<b>287.43</b>	<b>15.56</b>	

ตารางที่ ค ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวล รวมละเอียด	ปริมาณการแทน ที่ดินลูกรังด้วยเถ้า ขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ซม. <sup>2</sup> )	ความ สูง (ซม.)	น้ำหนัก (กก.)	ปริมาตร (ซม. <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น (ก./ซม. <sup>3</sup> )	ค่าแรง กด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ซม. <sup>2</sup> )
1:3	10	287.4	9.9	4.7100	2845.6	1.66	287.4	42.4
		287.4	9.8	4.7230	2845.6	1.66	287.4	39.5
		287.4	9.7	4.7440	2845.6	1.67	287.4	38.5
		287.4	10.0	4.7240	2874.3	1.64	287.4	39.6
		287.4	10.0	4.7290	2874.3	1.65	287.4	40.9
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>9.88</b>	<b>4.73</b>	<b>2857.07</b>	<b>1.65</b>	<b>287.43</b>	<b>40.18</b>
1:5		287.4	10.1	4.5670	2845.6	1.61	287.4	28.2
		287.4	10.2	4.5870	2845.6	1.61	287.4	30.6
		287.4	10.4	4.5770	2845.6	1.62	287.4	29.9
		287.4	10.1	4.5820	2874.3	1.59	287.4	29.5
		287.4	10.0	4.6040	2874.3	1.60	287.4	30.5
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.16</b>	<b>4.59</b>	<b>2857.07</b>	<b>1.61</b>	<b>287.43</b>	<b>29.74</b>
1:7		287.4	10.2	4.4910	2845.6	1.58	287.4	25.7
		287.4	10.4	4.5010	2845.6	1.58	287.4	25.8
		287.4	10.1	4.4310	2845.6	1.56	287.4	25.9
	287.4	10.2	4.4900	2874.3	1.56	287.4	24.8	
	287.4	10.2	4.4900	2874.3	1.56	287.4	25.3	
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.22</b>	<b>4.48</b>	<b>2857.07</b>	<b>1.57</b>	<b>287.43</b>	<b>25.50</b>	
1:9	287.4	10.1	4.2400	2845.6	1.49	287.4	21.6	
	287.4	10.4	4.3400	2845.6	1.53	287.4	21.1	
	287.4	10.1	4.2500	2845.6	1.49	287.4	21.9	
	287.4	10.1	4.2930	2874.3	1.49	287.4	22.5	
	287.4	10.0	4.2170	2874.3	1.47	287.4	24.0	
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.14</b>	<b>4.27</b>	<b>2857.07</b>	<b>1.49</b>	<b>287.43</b>	<b>22.21</b>	
1:11	287.4	10.1	3.997	2845.6	1.40	287.4	13.3	
	287.4	10.5	4.022	2845.6	1.41	287.4	14.4	
	287.4	10.3	4.001	2845.6	1.41	287.4	14.0	
	287.4	10.4	4.032	2874.3	1.40	287.4	15.0	
	287.4	10.0	3.989	2874.3	1.39	287.4	12.9	
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.26</b>	<b>4.01</b>	<b>2857.07</b>	<b>1.40</b>	<b>287.43</b>	<b>13.95</b>	

ตารางที่ ค ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวล รวมละเอียด	ปริมาณการแทน ที่ดินลูกรังด้วยน้ำ ขาน้อย (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ความ สูง (ชม.)	น้ำหนัก (กก.)	ปริมาตร (ชม. <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น (ก./ชม. <sup>3</sup> )	ค่าแรง กด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )
1:3	15	287.4	10.1	4.5130	2903.1	1.55	287.4	36.9
		287.4	10.2	4.5230	2903.1	1.56	287.4	32.8
		287.4	10.4	4.5300	2903.1	1.56	287.4	35.6
		287.4	10.1	4.5340	2903.1	1.56	287.4	34.8
		287.4	10.1	4.5920	2903.1	1.58	287.4	36.2
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.18</b>	<b>4.54</b>	<b>2903.06</b>	<b>1.56</b>	<b>287.43</b>	<b>35.26</b>
1:5	15	287.4	10.1	4.4530	2903.1	1.53	287.4	24.6
		287.4	10.5	4.5770	2903.1	1.58	287.4	25.4
		287.4	10.2	4.5820	2903.1	1.58	287.4	27.7
		287.4	10.4	4.3450	2903.1	1.50	287.4	25.9
		287.4	10.0	4.3030	2903.1	1.48	287.4	27.0
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.24</b>	<b>4.45</b>	<b>2903.06</b>	<b>1.53</b>	<b>287.43</b>	<b>26.10</b>
1:7	15	287.4	10.4	4.1670	2903.1	1.44	287.4	21.6
		287.4	10.1	4.1650	2903.1	1.43	287.4	21.4
		287.4	10.1	4.1650	2903.1	1.43	287.4	22.2
		287.4	9.9	4.1650	2903.1	1.43	287.4	22.2
		287.4	10.0	4.1340	2903.1	1.42	287.4	22.0
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.10</b>	<b>4.16</b>	<b>2903.06</b>	<b>1.43</b>	<b>287.43</b>	<b>21.87</b>
1:9	15	287.4	10.4	4.0920	2903.1	1.41	287.4	18.1
		287.4	10.1	4.0820	2903.1	1.41	287.4	18.2
		287.4	10.1	4.0920	2903.1	1.41	287.4	19.9
		287.4	10.1	4.0530	2903.1	1.40	287.4	18.7
		287.4	10.1	4.0900	2903.1	1.41	287.4	21.0
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.16</b>	<b>4.08</b>	<b>2903.06</b>	<b>1.41</b>	<b>287.43</b>	<b>19.18</b>
1:11	15	287.4	10.1	3.7980	2903.1	1.31	287.4	12.6
		287.4	10.2	3.7930	2903.1	1.31	287.4	12.8
		287.4	10.4	3.7970	2903.1	1.31	287.4	13.2
		287.4	10.1	3.7950	2903.1	1.31	287.4	13.2
		287.4	10.1	3.7090	2903.1	1.28	287.4	12.1
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.18</b>	<b>3.78</b>	<b>2903.06</b>	<b>1.30</b>	<b>287.43</b>	<b>12.78</b>

ตารางที่ ค ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวล รวมละเอียด	ปริมาณการแทน ที่ดินลูกรังด้วยเถ้า ขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ชม. <sup>2</sup> )	ความ สูง (ชม.)	น้ำหนัก (กก.)	ปริมาตร (ชม. <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น (ก./ชม. <sup>3</sup> )	ค่าแรง กด (กก.)	ความเค้นอัด (กก./ชม. <sup>2</sup> )
1:3	20	287.4	10.2	4.0440	2874.3	1.41	287.4	34.1
		287.4	10.4	4.0340	2874.3	1.40	287.4	29.5
		287.4	10.1	4.0240	2874.3	1.40	287.4	31.1
		287.4	10.0	4.0550	2874.3	1.41	287.4	32.7
		287.4	9.9	4.0280	2845.6	1.42	287.4	32.6
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.12</b>	<b>4.04</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.41</b>	<b>287.43</b>	<b>32.0</b>
1:5			287.4	10.2	3.9640	2874.3	1.38	287.4
		287.4	10.4	3.9940	2874.3	1.39	287.4	23.5
		287.4	10.1	3.9890	2874.3	1.39	287.4	23.9
		287.4	10.1	3.9230	2874.3	1.36	287.4	24.4
		287.4	10.0	3.9400	2845.6	1.38	287.4	24.7
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.16</b>	<b>3.96</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.38</b>	<b>287.43</b>	<b>23.8</b>	
1:7		287.4	10.0	3.8900	2874.3	1.35	287.4	19.9
		287.4	10.5	3.9900	2874.3	1.39	287.4	19.8
		287.4	10.2	3.9200	2874.3	1.36	287.4	19.4
		287.4	10.4	3.9800	2874.3	1.38	287.4	20.8
		287.4	10.1	3.7600	2845.6	1.32	287.4	20.2
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.24</b>	<b>3.91</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.36</b>	<b>287.43</b>	<b>20.0</b>	
1:9		287.4	10.4	3.8550	2874.3	1.34	287.4	16.8
		287.4	10.1	3.8650	2874.3	1.34	287.4	16.8
		287.4	10.1	3.8650	2874.3	1.34	287.4	17.4
		287.4	10.2	3.8380	2874.3	1.34	287.4	17.6
		287.4	10.4	3.8190	2845.6	1.34	287.4	19.2
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.24</b>	<b>3.85</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.34</b>	<b>287.43</b>	<b>17.6</b>	
1:11		287.4	10.5	3.4550	2874.3	1.20	287.4	11.7
		287.4	10.2	3.4350	2874.3	1.20	287.4	11.8
		287.4	10.4	3.4445	2874.3	1.20	287.4	11.6
		287.4	10.1	3.4380	2874.3	1.20	287.4	12.4
		287.4	10.4	3.4190	2845.6	1.20	287.4	11.1
<b>รวม</b>	<b>287.43</b>	<b>10.32</b>	<b>3.44</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.20</b>	<b>287.43</b>	<b>11.7</b>	

ตารางที่ ค ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุ ยึดประสานต่อ มวลรวมละเอียด	ปริมาณการแทน ที่ดินลูกรังด้วยน้ำ ข่านอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	พื้นที่หน้าตัด (ซม. <sup>2</sup> )	ความ สูง (ซม.)	น้ำหนัก (กก.)	ปริมาตร (ซม. <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น (ก./ซม. <sup>3</sup> )	ค่าแรง กด (กก.)	ความเค้น อัด (กก./ ซม. <sup>2</sup> )
1:3	30	287.4	10.0	3.7660	2874.3	1.31	287.4	24.2
		287.4	10.2	3.7680	2874.3	1.31	287.4	21.4
		287.4	10.4	3.7690	2874.3	1.31	287.4	22.0
		287.4	10.1	3.7640	2874.3	1.31	287.4	23.1
		287.4	9.9	3.7780	2845.6	1.33	287.4	23.4
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.12</b>	<b>3.77</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.31</b>	<b>287.43</b>	<b>22.8</b>
1:5		287.4	10.5	3.6220	2874.3	1.26	287.4	16.1
		287.4	10.2	3.6200	2874.3	1.26	287.4	16.6
		287.4	10.4	3.6520	2874.3	1.27	287.4	17.1
		287.4	10.1	3.6450	2874.3	1.27	287.4	17.2
		287.4	10.0	3.6450	2845.6	1.28	287.4	17.4
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.24</b>	<b>3.64</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.27</b>	<b>287.43</b>	<b>16.9</b>
1:7		287.4	10.0	3.4700	2874.3	1.21	287.4	14.1
		287.4	10.2	3.4730	2874.3	1.21	287.4	14.0
		287.4	10.4	3.4740	2874.3	1.21	287.4	13.7
		287.4	10.1	3.4670	2874.3	1.21	287.4	14.7
		287.4	10.1	3.4500	2845.6	1.21	287.4	14.3
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.16</b>	<b>3.47</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.21</b>	<b>287.43</b>	<b>14.2</b>
1:9		287.4	10.5	3.4440	2874.3	1.20	287.4	11.9
		287.4	10.5	3.4540	2874.3	1.20	287.4	11.9
		287.4	10.5	3.4460	2874.3	1.20	287.4	12.3
		287.4	10.2	3.3660	2874.3	1.17	287.4	12.4
		287.4	10.4	3.3400	2845.6	1.17	287.4	13.6
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.42</b>	<b>3.41</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.19</b>	<b>287.43</b>	<b>12.4</b>
1:11		287.4	10.5	2.8988	2874.3	1.01	287.4	8.2
		287.4	10.4	2.8760	2874.3	1.00	287.4	8.4
		287.4	10.1	2.8922	2874.3	1.01	287.4	8.2
		287.4	10.1	2.8930	2874.3	1.01	287.4	8.8
		287.4	10.4	2.9800	2845.6	1.05	287.4	7.8
<b>รวม</b>		<b>287.43</b>	<b>10.30</b>	<b>2.91</b>	<b>2868.57</b>	<b>1.01</b>	<b>287.43</b>	<b>8.3</b>



ตารางที่ ง ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวล รวมละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดิน ลูกรังด้วยเถ้าขาน้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำหนักเปียก (กก.)	น้ำหนักแห้ง (กก.)	น้ำหนักน้ำ (กก.)	ปริมาตร (ม. <sup>3</sup> )	ค่าการดูดซึมน้ำ (กก./ม. <sup>3</sup> )
1:3	0	5.450	4.938	0.5120	0.00287	178.13
		5.530	4.988	0.5420	0.00285	190.47
		5.456	4.954	0.5020	0.00287	174.65
<b>รวม</b>		<b>5.5</b>	<b>5.0</b>	<b>0.5187</b>	<b>0.0</b>	<b>181.08</b>
1:5		5.432	4.897	0.5350	0.00299	178.97
		5.433	4.882	0.5507	0.00285	193.53
		5.456	4.822	0.6340	0.00287	220.57
<b>รวม</b>		<b>5.4</b>	<b>4.9</b>	<b>0.5732</b>	<b>0.0</b>	<b>197.69</b>
1:7		5.410	4.775	0.6350	0.00293	216.59
		5.400	4.720	0.6800	0.00285	238.97
		5.410	4.770	0.6400	0.00287	222.66
<b>รวม</b>		<b>5.4</b>	<b>4.8</b>	<b>0.6517</b>	<b>0.0</b>	<b>226.07</b>
1:9	4.992	4.322	0.6700	0.00290	230.79	
	5.033	4.350	0.6830	0.00285	240.02	
	4.998	4.310	0.6880	0.00287	239.36	
<b>รวม</b>	<b>5.0</b>	<b>4.3</b>	<b>0.6803</b>	<b>0.0</b>	<b>236.72</b>	
1:11	4.832	4.123	0.7090	0.00290	244.23	
	4.893	4.189	0.7040	0.00285	247.40	
	4.856	4.135	0.7210	0.00287	250.84	
<b>รวม</b>	<b>4.9</b>	<b>4.1</b>	<b>0.7113</b>	<b>0.0</b>	<b>247.49</b>	

ตารางที่ ๖ ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวล รวมละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดิน ลูกรังด้วยฝายหินอ่อน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำหนักเปียก (กก.)	น้ำหนักแห้ง (กก.)	น้ำหนักน้ำ (กก.)	ปริมาตร (ม. <sup>3</sup> )	ค่าการดูดซึมน้ำ (กก./ม. <sup>3</sup> )
1:3	10	5.310	4.710	0.6000	0.00285	210.85
		5.312	4.724	0.5880	0.00287	204.57
		5.296	4.729	0.5670	0.00287	197.26
<b>รวม</b>		<b>5.3</b>	<b>4.7</b>	<b>0.5850</b>	<b>0.0</b>	<b>204.23</b>
1:5		5.232	4.577	0.6550	0.00285	230.18
		5.233	4.582	0.6510	0.00287	226.49
		5.256	4.604	0.6520	0.00287	226.84
<b>รวม</b>		<b>5.2</b>	<b>4.6</b>	<b>0.6527</b>	<b>0.0</b>	<b>227.84</b>
1:7		5.210	4.491	0.7190	0.00285	252.67
		5.230	4.490	0.7400	0.00287	257.45
		5.190	4.490	0.7000	0.00287	243.54
<b>รวม</b>		<b>5.2</b>	<b>4.5</b>	<b>0.7197</b>	<b>0.0</b>	<b>251.22</b>
1:9	5.062	4.240	0.8220	0.00285	288.87	
	5.053	4.293	0.7600	0.00287	264.41	
	5.056	4.217	0.8390	0.00287	291.90	
<b>รวม</b>	<b>5.1</b>	<b>4.3</b>	<b>0.8070</b>	<b>0.0</b>	<b>281.73</b>	
1:11	4.902	3.997	0.9050	0.00285	318.04	
	4.903	4.032	0.8710	0.00287	303.03	
	4.906	3.989	0.9170	0.00287	319.03	
<b>รวม</b>	<b>4.9</b>	<b>4.0</b>	<b>0.8977</b>	<b>0.0</b>	<b>313.37</b>	

ตารางที่ ๖ ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

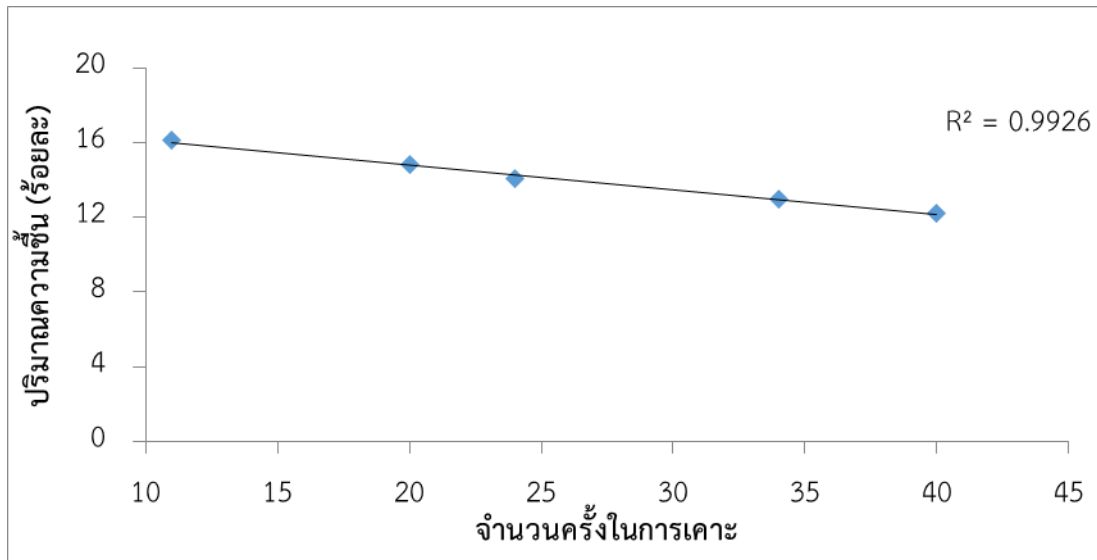
อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวล รวมละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดิน ลูกรังด้วยฝายหินอ่อน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำหนักเปียก (กก.)	น้ำหนักแห้ง (กก.)	น้ำหนักน้ำ (กก.)	ปริมาตร (ม. <sup>3</sup> )	ค่าการดูดซึมน้ำ (กก./ม. <sup>3</sup> )
1:3	15	5.180	4.513	0.6670	0.00290	229.76
		5.210	4.534	0.6760	0.00290	232.86
		5.250	4.592	0.6580	0.00290	226.66
<b>รวม</b>		<b>5.2</b>	<b>4.5</b>	<b>0.6670</b>	<b>0.0</b>	<b>229.76</b>
1:5		5.252	4.453	0.7990	0.00290	275.23
		5.083	4.345	0.7380	0.00290	254.21
		5.096	4.303	0.7930	0.00290	273.16
<b>รวม</b>		<b>5.1</b>	<b>4.4</b>	<b>0.7767</b>	<b>0.0</b>	<b>267.53</b>
1:7		5.020	4.167	0.8530	0.00290	293.83
		5.060	4.165	0.8950	0.00290	308.30
		5.050	4.134	0.9160	0.00290	315.53
<b>รวม</b>		<b>5.0</b>	<b>4.2</b>	<b>0.8880</b>	<b>0.0</b>	<b>305.88</b>
1:9	5.062	4.092	0.9700	0.00290	334.13	
	5.053	4.053	1.0000	0.00290	344.46	
	5.006	4.090	0.9160	0.00290	315.53	
<b>รวม</b>	<b>5.0</b>	<b>4.1</b>	<b>0.9620</b>	<b>0.0</b>	<b>331.37</b>	
1:11	4.762	3.798	0.9640	0.00290	332.06	
	4.732	3.795	0.9370	0.00290	322.76	
	4.796	3.709	1.0870	0.00290	374.43	
<b>รวม</b>	<b>4.8</b>	<b>3.8</b>	<b>0.9960</b>	<b>0.0</b>	<b>343.09</b>	

ตารางที่ ๓ ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวล รวมละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดิน ลูกรังด้วยเถ้าขาน้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำหนักเปียก (กก.)	น้ำหนักแห้ง (กก.)	น้ำหนักน้ำ (กก.)	ปริมาตร (ม. <sup>3</sup> )	ค่าการดูดซึมน้ำ (กก./ม. <sup>3</sup> )
1:3	20	4.890	4.044	0.8460	0.00287	294.33
		4.880	4.055	0.8250	0.00287	287.03
		4.890	4.028	0.8620	0.00285	302.93
<b>รวม</b>		<b>4.9</b>	<b>4.0</b>	<b>0.8443</b>	<b>0.0</b>	<b>294.76</b>
1:5		4.832	3.964	0.8680	0.00287	301.99
		4.833	3.923	0.9100	0.00287	316.60
		4.856	3.940	0.9160	0.00285	321.90
<b>รวม</b>		<b>4.8</b>	<b>3.9</b>	<b>0.8980</b>	<b>0.0</b>	<b>313.50</b>
1:7		4.790	3.890	0.9000	0.00287	313.12
		4.794	3.980	0.8140	0.00287	283.20
		4.790	3.760	1.0300	0.00285	361.97
<b>รวม</b>		<b>4.8</b>	<b>3.9</b>	<b>0.9147</b>	<b>0.0</b>	<b>319.43</b>
1:9	4.920	3.855	1.0650	0.00287	370.52	
	4.930	3.838	1.0920	0.00287	379.92	
	4.926	3.819	1.1070	0.00285	389.03	
<b>รวม</b>	<b>4.9</b>	<b>3.8</b>	<b>1.0880</b>	<b>0.0</b>	<b>379.82</b>	
1:11	4.634	3.455	1.1790	0.00287	410.18	
	4.603	3.438	1.1650	0.00287	405.31	
	4.560	3.419	1.1410	0.00285	400.97	
<b>รวม</b>	<b>4.6</b>	<b>3.4</b>	<b>1.1617</b>	<b>0.0</b>	<b>405.49</b>	

ตารางที่ ๖ ค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานที่อัตราส่วนวัสดุยึดประสานต่อมวลรวมละเอียด ที่อายุ 28 วัน (ต่อ)

อัตราส่วนวัสดุยึด ประสานต่อมวล รวมละเอียด	ปริมาณการแทนที่ดินลูกรัง ด้วยเถ้าขาน้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	น้ำหนักเปียก (กก.)	น้ำหนักแห้ง (กก.)	น้ำหนักน้ำ (กก.)	ปริมาตร (ม. <sup>3</sup> )	ค่าการดูดซึมน้ำ (กก./ม. <sup>3</sup> )
1:3	30	4.790	3.766	1.0240	0.00287	356.26
		4.730	3.764	0.9660	0.00287	336.08
		4.856	3.778	1.0780	0.00285	378.83
<b>รวม</b>		<b>4.8</b>	<b>3.8</b>	<b>1.0227</b>	<b>0.0</b>	<b>357.06</b>
1:5		4.732	3.622	1.1100	0.00287	386.18
		4.733	3.645	1.0880	0.00287	378.53
		4.756	3.645	1.1110	0.00285	390.43
<b>รวม</b>		<b>4.7</b>	<b>3.6</b>	<b>1.1030</b>	<b>0.0</b>	<b>385.05</b>
1:7		4.704	3.470	1.2340	0.00287	429.32
		4.702	3.467	1.2350	0.00287	429.67
		4.702	3.450	1.2520	0.00285	439.98
<b>รวม</b>		<b>4.7</b>	<b>3.5</b>	<b>1.2403</b>	<b>0.0</b>	<b>432.99</b>
1:9	4.702	3.444	1.2580	0.00287	437.67	
	4.753	3.366	1.3870	0.00287	482.55	
	4.756	3.340	1.4160	0.00285	497.62	
<b>รวม</b>	<b>4.7</b>	<b>3.4</b>	<b>1.3537</b>	<b>0.0</b>	<b>472.61</b>	
1:11	4.260	2.899	1.3612	0.00287	473.57	
	4.332	2.893	1.4390	0.00287	500.64	
	4.380	2.980	1.4000	0.00285	491.99	
<b>รวม</b>	<b>4.3</b>	<b>2.9</b>	<b>1.4001</b>	<b>0.0</b>	<b>488.74</b>	



ภาพที่ ก การทดสอบหาค่าขีดจำกัดเหลวของดินลูกรัง

### โครงการย่อยที่ 3

สมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่ได้จาก  
กระบวนการเผาพร้อมกับถ้ำชานอ้อย

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สภาวะปัจจุบัน กระแสการตื่นตัวทางด้านสิ่งแวดล้อมโลกและการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน ได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นประเด็นสำคัญในการกำหนดแนวทางในการพัฒนาประเทศ โดยแนวคิดในการเพิ่มมูลค่าของผลพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรม อาทิเช่น การแปรรูป หรือการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ จึงมีความสำคัญในการสนับสนุนนโยบายดังกล่าว สอดคล้องกับแนวทางการลดการเกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ซึ่งพบว่าของเสียจากอุตสาหกรรมได้ถูกนำมาเพิ่มมูลค่าโดยกระบวนการเผา ร่วมและกำจัดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Waste Co-processing) ก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในแง่ของการใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบทดแทน ดังนั้นเตาเผาปูนซีเมนต์จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่น่าจะมีความเหมาะสมในการแก้ไขปัญหาการจัดการของเสียอุตสาหกรรมได้อย่างครบวงจร และช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกำจัดกากของเสียด้วยวิธีการฝังกลบและการเผาแบบดั้งเดิม [1-3]

งานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดโครงการวิจัยการศึกษาแนวทางการจัดการของเสียแบบต่างๆ ให้กับภาคอุตสาหกรรม โดยการมุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสีย โดยนำมาใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเกษตร น่าจะมีศักยภาพอย่างมากทั้งในเชิงของการนำมาเป็นวัตถุดิบและพลังงานทดแทน เนื่องจากส่วนใหญ่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ[๔] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาศักยภาพของเถ้าขานอ้อยซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ในการนำมาเป็นวัตถุดิบทดแทนซิลิกาซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยเถ้าขานอ้อยเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลที่ได้จากการเผาขานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงาน โดยประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยในปี 2556 ประมาณ 10,078,025 ไร่ โดยได้ผลผลิตเป็นอ้อยประมาณ 103 ล้านตัน[5] และทำให้เกิดเถ้าขานอ้อยหลังจากการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 427,700 ตันต่อปี[6] ซึ่งเถ้าขานอ้อยดังกล่าวนำมาใช้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการกำจัดเป็นบริเวณกว้าง โดยนอกจากผลกระทบของพื้นที่ในการกำจัด เนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีอนุภาคขนาดเล็กจึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศอีกด้วย จากการสำรวจเอกสารพบว่าในแง่ของการนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมพบว่านักวิจัยส่วนใหญ่นำเถ้าขานอ้อยที่เกิดขึ้นมาเพิ่มมูลค่าโดยการนำมาผสมเป็นวัสดุปอซโซลานเพิ่มเติมคุณสมบัติให้กับซีเมนต์และคอนกรีต[7-11] ซึ่งพบว่าเถ้าขานอ้อยในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้คุณสมบัติของซีเมนต์ดีขึ้น แต่ปัญหาที่พบคือสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีสีออกไปทางสีดำเข้ม ดังนั้นการนำเถ้าขานอ้อยไปเป็นวัสดุปอซโซลานจึงจำเป็นต้องศึกษาทั้งในส่วนของคุณสมบัติเชิงกลและลักษณะทางกายภาพ [7-10] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าขานอ้อยทั้งในแง่ของวัตถุดิบทดแทนซิลิกาและพลังงานทดแทน โดยพัฒนาในเชิงของคุณสมบัติของซิลิกาในเถ้าขานอ้อยตั้งแต่เป็นวัตถุดิบและการนำมาเผาร่วมในกระบวนการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ เพื่อเป็นแนวทางในการเปรียบเทียบเทคโนโลยี



ที่ดีที่สุดในการนำเถ้าชานอ้อยไปใช้ประโยชน์ และนับว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตและลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่นับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น

วิกฤติการณ์ทางด้านทรัพยากรธรรมชาติและพลังงานนับวันจะทวีความวิกฤติ อันเนื่องมาจากแนวโน้มในการใช้ทรัพยากรและพลังงานของโลกสูงกว่าปริมาณทรัพยากรที่มีอย่างจำกัด จากการศึกษาการวิเคราะห์ของกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา พบว่าประมาณปี 2563 สัดส่วนการใช้ น้ำมันประมาณร้อยละ 37 รองลงมา คือ ก๊าซธรรมชาติร้อยละ 27 ถ่านหิน ร้อยละ 25 พลังงานหมุนเวียน ร้อยละ 8 และพลังงานนิวเคลียร์ร้อยละ 3 จะเห็นได้ว่า สัดส่วนการใช้ น้ำมันสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการใช้พลังงานของประเทศไทยที่มีความต้องการใช้น้ำมันสูงสุดเช่นกัน และรองลงมา คือ พลังงานหมุนเวียน ก๊าซธรรมชาติ ลิกไนต์ และถ่านหิน จากข้อมูลดังกล่าว พบว่าหากไม่มีการสำรวจและค้นพบแหล่งพลังงานใหม่เพิ่มเติม แหล่งสำรองน้ำมันและพลังงานอื่นๆ ก็จะหมดไป ดังนั้นทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยจึงได้มีนโยบายในการลดการใช้พลังงาน หรือการศึกษาวัตถุดิบที่ทดแทนการใช้พลังงาน เพื่อลดปัญหาวิกฤติการณ์ที่กำลังเกิดขึ้น โดยภาครัฐได้ส่งเสริมให้ภาคอุตสาหกรรมต่างๆ มีนโยบายในการส่งเสริมการใช้พลังงานให้คุ้มค่าและยั่งยืน อาทิเช่น นโยบายการส่งเสริมการปลูกพืชพลังงาน หรือการนำผลพลอยได้จากการเกษตรมาเป็นพลังงาน ที่เรียกว่า พลังงานชีวมวล ซึ่งพบว่ามีอุตสาหกรรมจำนวนมากที่ได้นำแนวทางนี้ไปใช้ โดยผลิตผลทางการเกษตรที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำไปใช้เป็นพลังงานชีวมวล อาทิเช่น มันสำปะหลัง แกลบ และชานอ้อย ในส่วนของชานอ้อยพบว่าโรงงานผลิตน้ำตาลได้พยายามเพิ่มมูลค่าชานอ้อยที่เกิดจากการกระบวนการผลิตโดยใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงาน โดยประเทศไทยผลิตอ้อยในปี 2557 ได้เป็นจำนวนทั้งหมด ๑๐๓ ล้านตัน[5] เมื่อคำนวณโดยวิธีของ Cordeiro และคณะ [6] จะได้เถ้าชานอ้อยหลังจากการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 427,700 ตัน โดยจำเป็นต้องหาที่กำจัดเถ้าชานอ้อยเหล่านี้ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาคุณสมบัติของเถ้าชานอ้อยเพื่อนำมาใช้ในงานด้านต่างๆ โดยแนวทางหนึ่งที่ช่วยกำจัดและเพิ่มมูลค่าของเถ้าชานอ้อยคือการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ [7-13]

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์นับว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้พลังงานสูงมากในกระบวนการผลิต โดยมีการพัฒนาแนวทางในการนำเทคโนโลยีหรือพลังงานรูปแบบต่างๆ มาใช้ทดแทน เพื่อลดการใช้พลังงานจากธรรมชาติ อาทิเช่น การนำพลังงานความร้อนมาใช้ใหม่ การพัฒนาการใช้เชื้อเพลิง การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดการใช้พลังงาน และการนำเอาของเสียจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือพลังงานทดแทน เป็นต้น ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ใช้วัตถุดิบมากกว่า 1,000 องค์ประกอบ และวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ (1) วัสดุธาตุปูน(Calcareous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม (Calcium) ได้แก่ หินปูน และหินชอล์ก (2) วัสดุอะซิลลาเซียส (Argillaceous material) เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน(Silicon) และ อลูมิเนียม(Aluminium) ได้แก่ ดินเหนียว หินเชลล์ หรือ หินดินดาน และหินชนวน โดยวัตถุดิบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในเตาเผาทำให้เกิดผลผลิตทางเคมี

และสารประกอบขึ้นหลายตัว โดยสารประกอบหลักๆนั้นประกอบไปด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ ) ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ ) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ ) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ ) เนื่องจากมีปริมาณมากถึง ร้อยละ 90 [14] จึงทำให้สารประกอบ 4 เฟสนี้เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติ และคุณภาพของปูนซีเมนต์ ซึ่งสารประกอบหลักที่ให้ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นส่วนใหญ่ โดยไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นองค์ประกอบหลักที่พบประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 ซึ่งเกิดได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 1,250 องศาเซลเซียส กับไตรแคลเซียมซิลิเกต พบประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิต่ำลงมา โดยไตรแคลเซียมซิลิเกตจะพัฒนากำลังในช่วง 28 วันแรกอย่างรวดเร็วแล้วจะค่อยๆ พัฒนาอย่างช้าๆ หลังจากนั้น ในส่วนของไตรแคลเซียมซิลิเกตจะค่อยๆพัฒนากำลังในช่วงปลายจนเทียบเท่ากับไตรแคลเซียมซิลิเกตในเวลา 360 วัน [14-15] ซึ่งทั้งสององค์ประกอบหลักพบว่ามีซิลิกาและแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งในปัจจุบันพบว่าแหล่งวัตถุดิบจากธรรมชาติเหล่านี้วันจะลดน้อยลง

ดังนั้นจึงมีนักวิจัยได้พยายามศึกษาเทคโนโลยีในการใช้วัสดุทดแทนวัตถุดิบจากธรรมชาติเหล่านี้ โดยมีการนำของเสียจากภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรมมาใช้เพื่อลดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตเป็นปูนซีเมนต์ เช่น การใช้เถ้าลอย แกลบ และเถ้าขานอ้อย เป็นต้น ในส่วนของเถ้าขานอ้อย พบว่ามีนักวิจัยส่วนใหญ่ได้ศึกษาเป็นส่วนผสมของคอนกรีต หรือเรียกว่าวัสดุปอซโซลาน โดยพบว่าเถ้าขานอ้อยที่ละเอียดมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี [7-11] และการทำปฏิกิริยาของเถ้าขานอ้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกอนออกไซด์ที่ไม่เป็นผลึก สิ่งเจือปน ขนาดอนุภาค และความละเอียด [7-10] นอกจากนี้ Chusilp และคณะ [12-13] ยังพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมของเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และยังพบอีกว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและลดการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลานต้องระวังในเรื่องสีที่เข้ม และปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากต้องใช้เวลาในการบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ โดยมีงานวิจัยน้อยมากที่ศึกษาแนวทางการพัฒนาปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ใช้เถ้าขานอ้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาศักยภาพของ ซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าขานอ้อยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน ตลอดจนแนวทางการกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดที่สังเคราะห์ โดยการเผาพร้อมระหว่างเถ้าขานอ้อยและวัตถุดิบหลักด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล เนื่องจากมีรายงานเกี่ยวกับกรณีของแกลบและเถ้าลอย ที่พบว่ามีนักวิจัยได้พยายามนำเทคนิคซึ่งอาศัยตัวกลางที่มีน้ำ ณ ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 25 องศาเซลเซียส และความดันสูงมากกว่า 1 บรรยากาศ [16-17] มาใช้ในการกระตุ้นปฏิกิริยาของซิลิกา จากผลการทดลองพบว่าการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์โดยกระตุ้นด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลก่อนเผาให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบเผาปกติ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคุณสมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์จากกระบวนการเผาร่วมกับเถ้าขานอ้อย เพื่อให้ได้

แนวทางในการเพิ่มมูลค่าเถ้าขาน้อยให้กับอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ตลอดจนแนวทางในการลดการใช้พลังงานและวัตถุดิบจากธรรมชาติในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อศึกษาสมบัติของเถ้าขาน้อย (เถ้าดำ) ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ความสามารถในการทำปฏิกิริยา ค่าทางจลน์ศาสตร์ และลักษณะสมบัติทางกายภาพ

2) เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการเผาเถ้าขาน้อยกับวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ และลักษณะสมบัติของปูนเม็ดและซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผาเถ้าขาน้อย ได้แก่ เฟสส่วนประกอบของปูนเม็ด ลักษณะทางกายภาพ และกำลังอัด (compressive strength)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) เถ้าขาน้อยที่ใช้มาจากโรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง ตำบลท่าผา อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี
- 2) อุณหภูมิที่ใช้ศึกษา 1250 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้แนวทางในการสังเคราะห์ปูนเม็ด
- 2) ได้ข้อมูลผลกระทบของเถ้าขาน้อยในการนำมาสังเคราะห์ปูนเม็ด
- 3) ได้อัตราส่วนที่ผสมเถ้าขาน้อยที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนเม็ด
- 4) ได้ข้อมูลผลกระทบเมื่อนำปูนเม็ดที่ผสมเถ้าขาน้อยมาใช้งานจริง

## บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

อุตสาหกรรมการผลิตซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานสูงโดยพลังงานที่ใช้คิดเป็น 30-40 เปอร์เซ็นต์ของค่าใช้จ่ายในการผลิต ไม่รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุน ตั้งแต่ในอดีตที่ผ่านมา เชื้อเพลิงหลักที่ใช้ คือ ถ่านหิน และมีการใช้เชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น Petroleum coke แกสธรรมชาติและน้ำมัน นอกจากนี้เชื้อเพลิงเหล่านี้แล้วในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ยังใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงด้วยในทวีปยุโรป อุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์มีการใช้กากของเสียอุตสาหกรรมประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ของการใช้เชื้อเพลิงทั้งหมด ในแง่ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ วัตถุดิบหลักๆได้แก่ หินปูน หินดินดาน ดินอลูมินาสูง ดินลูกรัง และ อื่นๆโดยมีสัดส่วนประมาณ 77.8, 18.5, 1.5, 2.0 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต; ก.หินปูน (Lime Stone) ข.หินดินดาน (Shale)

### 2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์

วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. วัสดุธาตุปูน(Calcareous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม(Calcium) ได้แก่ หินปูน และหินชอล์ก
2. วัสดุอะซิลลาเซียส(Argillaceous material) เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน(Silicon) และอลูมิเนียม(Aluminium) ได้แก่ ดินเหนียว หินเซลล์ หรือหินดินดาน และหินชนวน

ในบางครั้งดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีทั้งออกไซด์ของแคลเซียมและซิลิกอน ได้แก่ ดินมาร์ล นอกจากนี้ การผลิตซีเมนต์ยังต้องการวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งได้จากดินลูกรัง ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการยิปซัม(Gypsum) เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วเกินไปโดยบดร่วมกับปูนเม็ด(Clinker) ในขั้นตอนสุดท้าย โดยในตาราง 2.1 ได้แสดงส่วนประกอบ(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของวัตถุดิบบางชนิดในกระบวนการผลิตซีเมนต์

**ตารางที่ 2.1** ส่วนประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ของวัตถุดิบบางชนิดในกระบวนการผลิตซีเมนต์[4]

ส่วนประกอบ	หินปูน	ดินร่วน	ดินเหนียว	ดินทราย	สินแร่บ็อกไซต์	สินแร่
LOI	40.38	24.68	7.19	0.2	15-20	5-12
SiO <sub>2</sub>	3.76	27.98	67.29	99.2	16-22	20-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.10	10.87	8.97	-	44-58	3-9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.66	3.08	4.28	0.5	10-16	45-60
CaO	52.46	30.12	7.27	-	2-4	0.5-2.5
MgO	1.23	1.95	1.97	-	0.2-1.0	1.5-7
K <sub>2</sub> O	0.18	0.20	1.20	-	-	0.3-0.6
Na <sub>2</sub> O	0.22	0.33	1.51	-	-	-
SO <sub>3</sub>	0.01	0.70	0.32	-	-	-
รวม	100.0	99.91	100	99.9	-	-

- LOI คือ ปริมาณที่สูญหายไปเนื่องจากการเผา

โดยวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์จะประกอบด้วยสารจำพวกโลหะและอโลหะปะปนอยู่ เช่น ฟลูออไรด์ สารหนู แบริลียม แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว พรอท นิเกิล เงิน วานาเดียม สังกะสี โบรมีน คลอรีน ฟลูออรีน และไอโอดีน เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบมีส่วนประกอบประเภทใดนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของวัตถุดิบแต่ละแหล่ง

### 2.3 กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก (Wet process) และกระบวนการผลิตแบบแห้ง (Dry process) การเลือกกระบวนการผลิตแบบใดขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบ ที่ความชื้นช่วงหนึ่งการบดวัตถุดิบจะทำได้ยาก จำเป็นต้องขจัดความชื้นที่มีอยู่หรือเติมน้ำให้มีปริมาณมากขึ้น ถ้าวัตถุดิบเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงใช้กระบวนการผลิตแบบเปียก หากวัตถุดิบเป็นหินปูนและหินเชลจะมีความชื้นค่อนข้างต่ำจึงควรใช้กระบวนการผลิตแบบแห้ง ในปัจจุบันนิยมใช้กระบวนการผลิตแบบแห้งเพราะค่าใช้จ่ายถูกกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียกมาก เตาเผาของระบบแห้งมีขนาดเล็กกว่าระบบเปียก และพลังงานที่ใช้ในการเผาจะน้อยกว่าของระบบเปียกมาก

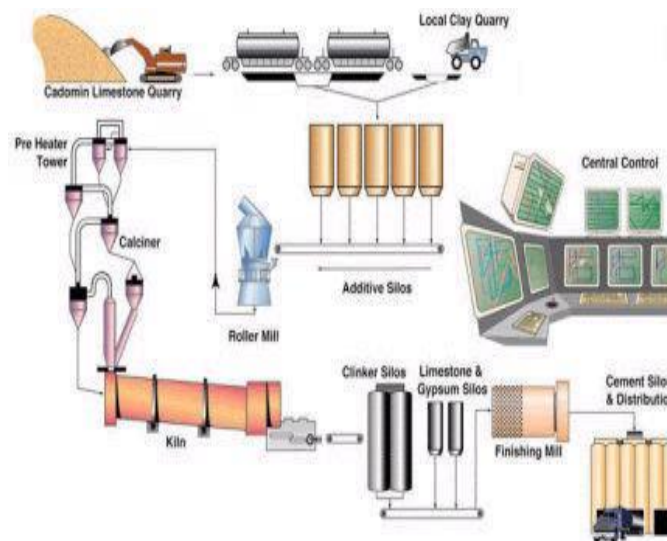
ในกระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบจะผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด โดยปกติถ้าใช้ ดินเหนียวและหินชอล์กจะใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นจะบดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก(Wash mill) น้ำโคลนข้น(Slurry) ที่ได้จะนำไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผา วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผาจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 35 ถึง 50



ภาพที่ 2.2 การเตรียมกองวัตถุดิบสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์



ภาพที่ 2.3 การนำกองวัตถุดิบเข้าเผาสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์



ภาพที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตโดยทั่วไปและขอบเขตระบบการผลิตซีเมนต์

ในกระบวนการผลิตแบบแห้ง วัสดุที่ระเบิดมาจากเหมืองจะนำมาย่อยให้เล็กลงในเครื่องย่อยขั้นต้น(primary crusher) และเครื่องย่อยขั้นที่สอง(secondary crusher) ตามลำดับ จากนั้นจึงนำวัสดุไปบดละเอียดในหม้อบดวัตถุดิบ(raw mill) แล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัตถุดิบ (blending silo) จากนั้นเพิ่มความร้อนของวัตถุดิบด้วยลมร้อนก่อนส่งเข้าเตาเผา ในกรณีของการผลิตแบบกึ่งแห้ง (semi-dry process) จะนำวัตถุดิบไปทำเป็นเม็ดโดยการเติมน้ำเล็กน้อยและผ่านเข้าไปในเครื่องทำเม็ด (granulator) วัตถุดิบจะจับกันเป็นก้อนกลมขนาดประมาณ 12 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาเผาสะดวกขึ้น วัตถุดิบจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 12 ดังนั้นเตาเผาของกระบวนการผลิตแบบแห้งและกึ่งแห้งจึงมีขนาดเล็กกว่าเตาเผาในกรณีกระบวนการผลิตแบบเปียก

ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

### ขั้นตอนที่ 1 วัตถุดิบ (Quarrying)

วัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ คือ หินปูน ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต รองลงมา คือ ดินหรือหินเชล (shale) ซึ่งเป็นแหล่งซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก ( $Fe_2O_3$ ) โดยที่แคลเซียมออกไซด์และซิลิกาออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักที่ให้ความแข็งแรงแก่ปูนซีเมนต์ ส่วนออกไซด์ของเหล็กเป็นตัวช่วยหลอมทำให้ปฏิกิริยาเคมีในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้นและยังเป็นตัวให้สีแก่ซีเมนต์

### ขั้นตอนที่ 2 เตรียมวัตถุดิบ (Raw materials preparation)

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ขึ้นกับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งแรงและชนิดของวัตถุดิบ

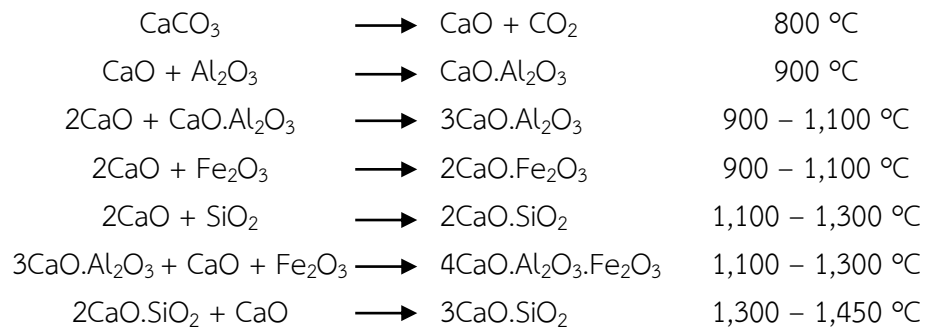
1. กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (wet process) ใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นสูง ได้แก่ หินชอล์กและดินเหนียว ในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1 : 3 นำไปบดให้ละเอียดก่อนที่จะเข้าเตาเผา
2. กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (dry process) ใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นปกติ ได้แก่ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย มาผสมในสภาพที่แห้งให้ได้สัดส่วนตามต้องการ และบดให้ละเอียดก่อนที่จะป้อนเข้าไปในเตาเผา

### ขั้นตอนที่ 3 การเกิดปูนเม็ด (Clinkering)

การเกิดปูนเม็ดเป็นตัวกำหนดสมบัติของปูนซีเมนต์ โดยวัตถุดิบผ่านการเตรียมในข้อ 2 เข้าสู่ระบบเตาเผา ซึ่งเกิดกระบวนการในเตาเผา ดังนี้

1. การขจัดน้ำอิสระโดยการระเหย (evaporation) เกิดบริเวณส่วนบนของเตาเผา เมื่อป้อนวัตถุดิบเข้าเตาเผาจะได้รับความร้อนช่วงอุณหภูมิ 250-450 องศาเซลเซียส วัตถุดิบจะถูกทำให้แห้งและเข้าสู่กระบวนการอื่นต่อไป
2. การขจัดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (calcination) หลังจากที่น้ำระเหยออกไป อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 600 องศาเซลเซียส วัตถุดิบเริ่มมีการสลายตัว น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกำจัดออก
3. การทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด (clinkering) หลังจากที่น้ำระเหยออกไป เกิดการสลายตัวของหินปูนเป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) ส่วนวัตถุดิบอื่นๆเกิดการสลายตัวเป็นออกไซด์อิสระ และจะ

รวมตัวกันกลายเป็นสารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส จะเริ่มเกิดสารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเกิดการหลอมของ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และออกไซด์ของเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เกิดเป็นสารประกอบ  $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  และในช่วง อุณหภูมิประมาณ 1,100 – 1,300 องศาเซลเซียส เกิดสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกตและ สารประกอบเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์เรต และในช่วงอุณหภูมิ 1,300 – 1,450 องศาเซลเซียส ออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุดิบตั้งต้นและที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา จะทำปฏิกิริยา เกิดเป็นสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกตตติยภูมิ โดยมีสมการการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



#### ขั้นตอนที่ 4 การเย็นตัวของปูนเม็ด (Cooling zone)

นำปูนเม็ดออกจากเตาเผาและลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว ทำให้มีผลต่อความเป็นผลึก (Crystallinity) ของปูนเม็ด ซึ่งการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วเพื่อต้องการให้เฟสที่เกิดที่อุณหภูมิสูง คงที่อุณหภูมิห้อง จะได้องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกตหรือเอไลต์ ( $\text{C}_3\text{S}$ ) ประมาณ 35 – 55% ไดแคลเซียมซิลิเกตหรือเบไลต์ ( $\text{C}_2\text{S}$ ) ประมาณ 15 – 35% ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ประมาณ 7 – 15% และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์เรต ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) ประมาณ 5 – 10%

#### ขั้นตอนที่ 5 การบดปูนเม็ด (Cement milling)

นำปูนเม็ดบดรวมกับยิปซัม เพื่อลดการก่อตัวอย่างรวดเร็วของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตซึ่งเป็น ส่วนหนึ่งของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ ไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับน้ำเร็วเกินไป [15]

### 2.3 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_3\text{S})$ ) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประมาณ 45-55% เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม สีเทาเข้ม เมื่อผสมกับน้ำจะ เกิดการก่อตัวและแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง ให้ความร้อนประมาณ 500 จูลต่อกรัม และมีกำลังอัด เพิ่มขึ้นในช่วง 7 วันแรก

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{C}_2\text{S})$ ) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประมาณ 15 – 35% เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย  $\text{C}_2\text{S}$  มีอยู่หลายรูปแบบ มี  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  มีสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ  $\text{C}_3\text{S}$

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_3\text{A})$ ) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประมาณ 7 – 15% เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน เมื่อทำปฏิกิริยา



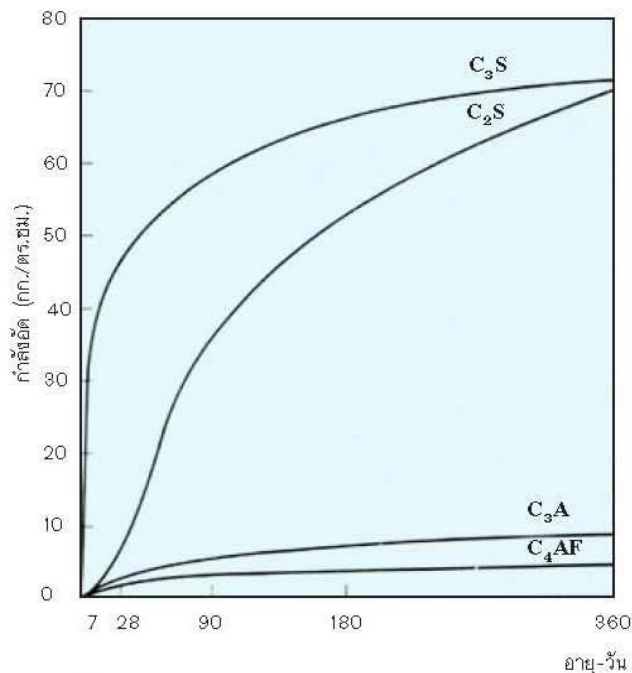
กับน้ำจะ ก่อให้เกิด Flash Set ทันทีและเกิดความร้อนจำนวนมากประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกันการเกิด Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C<sub>3</sub>A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite : 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>4</sub>AF)) มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 5 – 10% C<sub>4</sub>AF ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็ว และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดขึ้นประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C<sub>4</sub>AF ค่อนข้างต่ำ [15]

สมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.2 และการพัฒนากำลังอัดของสารประกอบดังแสดงในภาพที่ 2.5

ตารางที่ 2.2 สรุปสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมบัติ	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
การพัฒนา กำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
กำลังอัด	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)



ภาพที่ 2.5 การพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลัก [16]

## 2.5 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์

### 1. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์

ในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตปูนซีเมนต์ จะบดปูนเม็ดร่วมกับยิปซัม (gypsum, CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O หรือ CaO.SO<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O หรือ CSH<sub>2</sub>) เป็นการป้องกันการก่อตัวเร็วเกินไปของซีเมนต์เพสต์ และถ้ามีปริมาณยิปซัมมากเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าว

ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง  $C_3A$  กับยิปซัมทำให้เกิดเอทริงไกต์ (ettringite) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิม และถ้ามียิปซัมผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่าง  $C_3A$  กับยิปซัมจะเกิดขึ้นขณะที่ซีเมนต์เพสต์ยังอยู่ในสภาพพลาสติก ทำให้การปริมาตรขยายตัวเกิดขึ้นก่อนการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์จึงทำให้ไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่หากมียิปซัมผสมอยู่มากเกินไปปฏิกิริยาจะยังคงเกิดขึ้นแม้ว่าซีเมนต์เพสต์จะแข็งตัวแล้ว ดังนั้น จึงต้องมีการกำหนดปริมาณ  $SO_3$  ในปูนซีเมนต์ไม่ให้เกิน 3% ซึ่ง  $SO_3$  ปริมาณ 0.1 – 0.5% มาจากวัสดุดิบที่ใช้ทำปูนซีเมนต์

### 2. ปูนขาวอิสระ (free lime, CaO)

ปูนขาวอิสระเกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุดิบมีปริมาณมาณปูนขาว (CaO) มากเกินไปในการทำปฏิกิริยากับ  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  และ  $Fe_2O_3$  ในเตาเผา หรือเกิดขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวไม่มากเกินไปแต่การทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ดในขั้นตอนการเผาไม่สมบูรณ์ ทำให้เหลือปูนขาวอิสระ ซึ่งปูนซีเมนต์มีปูนขาวอิสระประมาณ 0.5 – 1.0% เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของ  $CaCO_3$  ประมาณ 900 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิในการเผาปูนซีเมนต์สูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส จะทำให้ปูนขาวเผาจนเกรียม (hard burnt) ส่งผลให้ปูนขาวอิสระที่เกิดขึ้นรวมตัวกับน้ำอย่างช้าๆ ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งถ้ามีปูนขาวอิสระมากอาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วขยายตัวและแตกร้าว

### 3. แมกนีเซียมออกไซด์

แมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $MgCO_3$ ) เป็นวัสดุดิบสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการผสมอยู่เล็กน้อย เมื่อเผาวัสดุดิบ  $MgCO_3$  จะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) และบางส่วนจะอยู่ในรูปของผลึกอิสระและรวมตัวกับน้ำช้ามากใช้เวลาเป็นปี จึงอาจทำให้เกิดความไม่คงตัว ซึ่งการรวมตัวกับน้ำจะเกิดหลังจากซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว

### 4. ออกไซด์ของอัลคาไล

ออกไซด์ของอัลคาไล ได้แก่  $K_2O$  และ  $Na_2O$  มีอยู่ประมาณ 0.5 – 1.3% สามารถทำปฏิกิริยาอัลคาไลกับทรายและหิน ซึ่งเป็นพวกซิลิกาที่ว่องไวและทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของอัลคาไลได้ เรียกว่า ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา (alkali – silica reaction) ทำให้เกิดอัลคาไลซิลิกาเจล (alkali – silica gel) ที่ทำให้เกิดการขยายตัวและทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้

### 5. ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์

ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ ( $P_2O_5$ ) มาจากหินปูน มีอยู่ไม่เกิน 0.1 – 0.2% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ มีผลทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้า เนื่องจาก  $P_2O_5$  ทำให้  $C_3S$  สลายตัวเป็น  $C_2S$  กับ CaO และถ้ามี  $P_2O_5$  มากพอจะทำให้เกิดความไม่คงตัว เพราะมีปูนขาวอิสระเกิดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น หากมี  $P_2O_5$  อยู่มากควรลดปริมาณปูนขาวโดยลดปริมาณหินปูนจากวัสดุดิบ

### 6. กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง

ในขั้นตอนการเผาปูนซีเมนต์จะมีสิ่งเจือปนมาจากการเผาซีเมนต์ที่ไม่สมบูรณ์หรือบางส่วนปนมากับยิปซัม มีความเป็นผลึกสูงทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและไม่มีผลที่จะเพิ่มกำลังให้แก่ปูนซีเมนต์ ซึ่งสิ่งเจือปนนี้เรียกว่า กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue) ซึ่งถ้ามีปริมาณกากที่ไม่ละลายในกรดและด่างสูงจะทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง [15]

## 2.6 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

### 2.6.1 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์ระหว่างปูนกับน้ำหรือที่เรียกว่า ปฏิกริยาไฮเดรชัน ซึ่งปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์ระหว่างปูนกับน้ำทำให้เกิดความร้อน และเกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยสารประกอบจะทำปฏิกริยาต่อกันและกัน ซึ่งจะเป็นตัวช่วยกำหนดคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ทั้งในสภาพพลาสติกและสภาพที่แข็งตัวแล้ว โดยองค์ประกอบของซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจะมีปฏิกริยาเกิดขึ้นในสองลักษณะคือ

1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำก่อให้เกิดไอออนในสารละลาย และไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

2) การเกิดปฏิกริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกริยาประเภทนี้เรียกว่า solid state reaction

ปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้งสองลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกริยาระหว่างของแข็ง ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกริยาไฮเดรชัน ผลึกภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกริยาต่อไป ทำให้มีความแตกต่างจากผลึกภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ในที่นี้จะพิจารณาปฏิกริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละชนิดในปูนซีเมนต์ดังนี้

1) ปฏิกริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$  และ  $C_2S$ )

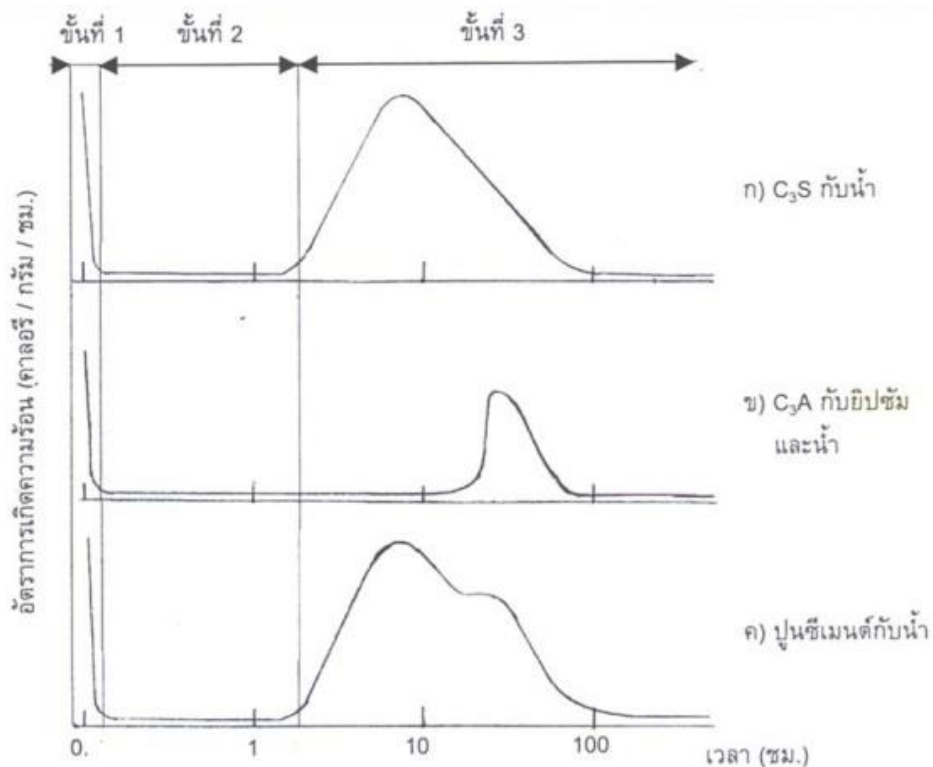
แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกริยากับน้ำ ก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate (C-S-H)) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน และสมการการเกิดปฏิกริยามีดังสมการที่ 2.1 – 2.2



ปฏิกริยาเคมีเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยา คือ ถ้ามีการทำปฏิกริยามากจะเกิดการคายความร้อนมาก ภาพที่ 2.3 (ก) แสดงความร้อนที่ทำให้ปฏิกริยาไฮเดรชันระหว่าง  $C_3S$  กับน้ำ สำหรับขั้นตอนในการทำปฏิกริยาแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 ทำการผสม  $C_3S$  กับน้ำจะเกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว โดยอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นจะลดลงและหยุดในเวลา 15 นาทีแรก ตามมาด้วยขั้นที่ 2 มีปฏิกริยาเกิดขึ้นเล็กน้อย เรียกว่า ระยะดอร์แมนต์ (dormant period) หรือระยะสงบ เป็นระยะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ในสภาพพลาสติกหลายชั่วโมง จึงสามารถเทเข้าแบบหรือหล่อคอนกรีตเข้าไปในแบบได้ก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัว และจะเริ่มเข้าสู่ขั้นที่ 3 เป็นการทำปฏิกริยาช่วงที่ 2 โดยจะเริ่มในช่วง 2-3 ชั่วโมงหลังจากผสม  $C_3S$  กับน้ำทำให้ตรงกับเวลาการก่อตัวระยะต้น ในช่วงนี้มีการคายความร้อนออกมาอย่างต่อเนื่อง และอัตราการเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดเมื่อระยะเวลาถึง 4-8 ชั่วโมง ซึ่งเกิดการก่อตัวสุดท้ายขึ้น หลังจากนั้นซีเมนต์เพสต์จะเริ่มแข็งตัวและรับกำลังได้เพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น และปฏิกริยาจะค่อยๆ ลดลง แต่ปฏิกริยายังคงเกิดต่อไปแต่เกิดน้อยเมื่อเวลานานขึ้น

เมื่อทำการผสม  $C_3S$  กับน้ำ ไอออนของแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) และไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สารละลายมีความเป็นด่างสูง (pH สูงกว่า 12) ซึ่งเป็นปฏิกริยาไฮโดรไลซิส

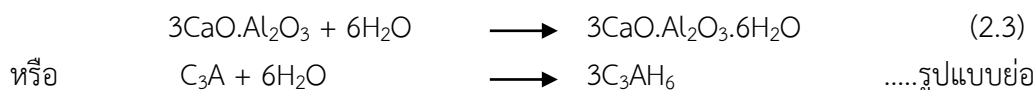
(hydrolysis) มีมากในระยะแรกและจะลดลงอย่างรวดเร็วและยังคงมีอยู่ตลอดในระยะดอร์แมนต์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของไอออนแคลเซียมและไฮดรอกไซด์ที่ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น เมื่อถึงจุดที่ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายสูงพอที่จะทำให้เกิดการตกผลึกของ CH ขณะเดียวกัน  $C_3S$  จะเริ่มทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้ง โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นบริเวณผิวของ  $C_3S$  ทำให้เกิด CSH ล้อมรอบเม็ดปูนหนาแน่น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเป็นไปได้อย่างช้าๆ แต่ปฏิกิริยายังคงเกิดต่อไปทำให้เกิด CSH มากขึ้น และขยายเข้าไปยังโพรงและมีปริมาณมากขึ้นโดยจะเชื่อมโยงถึงกัน และเกิดการยึดเกาะกัน สำหรับ  $C_2S$  ทำปฏิกิริยากับน้ำในลักษณะคล้ายกันกับ  $C_3S$  แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้ากว่าเพราะ  $C_2S$  ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา ทำให้ความร้อนปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงน้อยกว่า  $C_3S$



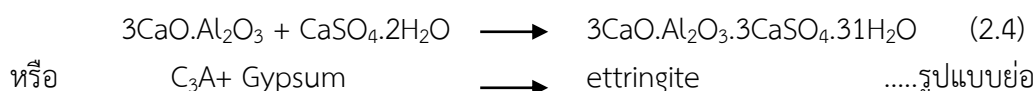
ภาพที่ 2.6 การเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

## 2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $C_3A$ )

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_3A$  จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ดังสมการที่ 2.3



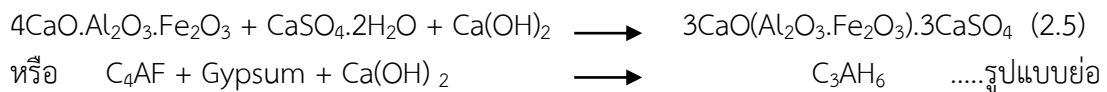
เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมที่ใส่จะทำปฏิกิริยากับ  $C_3A$  ทำให้เกิดชั้น ettringite บนผิวของอนุภาค  $C_3A$  ดังสมการที่ 2.4



ปฏิกิริยาของ  $C_3A$  กับน้ำเมื่อเติมยิปซัม แบ่งได้ 3 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ชั้นแรกปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดเอททริงไคต์ที่มีลักษณะยาวคล้ายเข็ม ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีซัลเฟตไอออนเพียงพอ การเกิดเอททริงไคต์เพิ่มมากขึ้นรอบ  $C_3A$  ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ยากและปฏิกิริยาลดลงอย่างรวดเร็ว ในชั้นที่ 2 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยและใช้เวลาหลายชั่วโมง เมื่อไอออนซัลเฟตทำปฏิกิริยาหมดแล้ว  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับเอททริงไคต์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต (calcium monosulfoaluminate,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ,  $C_3ACSH_{12}$  หรือ  $C_4ASH_{12}$ ) ในชั้นที่ 3 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อ 12 – 36 ชั่วโมง แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตจะสามารถเกิดกลับไปเป็นเอททริงไคต์เมื่อได้ซัลเฟตไอออนเพิ่มอีก ซึ่งมีส่วนในการเกิดการกัดกร่อนของสารซัลเฟต

### 3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $C_4AF$ )

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_4AF$  คล้ายกับปฏิกิริยาของ  $C_3A$  แต่จะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า โดยที่สารประกอบเหล็กออกไซด์ (F) จะทำปฏิกิริยาคลายกับอลูมิเนียมออกไซด์ และยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  มากกว่าการหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_3A$  ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของ  $C_4AF$  นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย  $C_4AF$  จะทำปฏิกิริยากับ ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของซัลเฟอร์ออลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลเฟอร์เฟอร์ไรต์ (Sulphoferrite) ดังสมการที่ 2.5 [15]



## 2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้น ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีผลต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว ได้แก่

- 1) อายุของเพสต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- 2) องค์ประกอบของซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแต่ละสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแตกต่างกัน
- 3) ความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมาก ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดในระยะเวลาที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา
- 4) อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ในช่วงแรกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่จะส่งผลกระทบต่อช่วงหลังทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ถ้าในส่วนผสมมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง ทำให้ผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเฉลี่ยลดลง
- 5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นต้องไม่ก่อให้เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ [16]

## 2.8 การใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตซีเมนต์

ปัญหาด้านพลังงานของประเทศไทยมีสาเหตุสืบเนื่องจากการที่ต้องสูญเสียเงินเป็นจำนวนมากเพื่อสั่งซื้อสารเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ เพื่อนำมาใช้ผลิตพลังงานในเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการขยายตัวไปอย่างมากอีกทั้งค่าแรงที่สูงขึ้น ทางภาคอุตสาหกรรมจึงได้นำเทคโนโลยีการผลิตเข้ามามากขึ้นเพื่อลดจำนวนของแรงงาน ซึ่งการนำเทคโนโลยีเหล่านั้นเข้ามา ก็ได้ส่งผลกระทบต่อปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและการใช้พลังงานที่มากยิ่งขึ้นด้วย [20] โดยที่อุตสาหกรรมที่จัดได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ของประเทศไทย อาทิเช่น โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งพบว่ามีการใช้พลังงานที่สูงมากเพราะใช้อุณหภูมิที่เผาค่อนข้างสูง อีกทั้งยังปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกอย่างคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ฉะนั้นแล้วจึงได้เริ่มมีงานวิจัยจำนวนมากในปัจจุบันพยายามแก้ไขปัญหานั้น อาทิเช่น การนำเอาขยะอินทรีย์มาเผาให้เกิดเป็นพลังงาน แต่ก็ยังคงเป็นการแก้ปัญหาที่ยังไม่ถูกจุดเพราะการนำเอาขยะอินทรีย์มาเผาก็จะเกิดมลพิษทางอากาศขึ้น

นอกเหนือจากความต้องการพลังงานที่สูงในกระบวนการผลิตยังพบว่า การที่ได้มาซึ่งวัตถุดิบนั้น จำเป็นที่จะต้องทำการระเบิดหินปูนซึ่งเป็นแหล่งของวัตถุดิบหลัก สิ่งที่มาคือทรัพยากรทางธรรมชาติที่ลดลงและมลพิษต่างๆ ทางสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น มลพิษทางด้านอากาศและเสียง เป็นต้น ดังนั้นจึงมีนักวิจัยได้พยายามศึกษาแนวทางการหาพลังงานและวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบจากธรรมชาติ เพื่อเป็นการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น เถ้าขานอ้อยเป็นของเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลที่ได้จากการเผาขานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงาน โดยประเทศไทยผลิตอ้อยในปี 2552 ได้เป็นจำนวนทั้งหมด 68.5 ล้านตัน [20] เมื่อคำนวณโดยวิธีของ Cordeiro และคณะ [22] จะได้เถ้าขานอ้อยหลังจากการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 427,700 ตันต่อปี โดยเถ้าขานอ้อยดังกล่าวมาใช้เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้พื้นที่ในการจัดตั้งเป็นบริเวณกว้าง และรอบๆ บริเวณพื้นที่จัดตั้งยังได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองของเถ้าขานอ้อยอีกด้วย ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านศึกษาคุณสมบัติของเถ้าขานอ้อยเพื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต โดยพบว่าเถ้าขานอ้อยที่ละเอียดมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี [23-27] และการทำปฏิกิริยาของเถ้าขานอ้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกอนออกไซด์ที่ไม่เป็นผลึก สิ่งเจอปน ขนาดอนุภาค และความละเอียด [23, 26] นอกจากนี้ Chusilp และคณะ [28, 29] ยังพบว่าอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมของเถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อให้ได้กำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และยังพบอีกว่าการใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดสามารถช่วยลดค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากธรรมชาติและลดการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากซัลเฟตได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุปอซโซลานต้องระวังในเรื่องสีที่เข้ม และปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากต้องใช้เวลาในการบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ โดยมีงานวิจัยน้อยมากที่ศึกษาแนวทางการพัฒนาปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่ใช้เถ้าขานอ้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาศักยภาพของซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเถ้าขานอ้อยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันตลอดจนแนวทางการกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยการเผาพร้อมระหว่างเถ้าขานอ้อยและวัตถุดิบหลัก เพื่อให้ได้แนวทางในการเพิ่มมูลค่าเถ้าขานอ้อยให้กับอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ตลอดจนแนวทางการลดการใช้พลังงานและวัตถุดิบจากธรรมชาติในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ในอนาคต

## บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

### วิธีการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วยดังต่อไปนี้

#### 3.1 การเตรียมปูนเม็ด

- 1) เตรียมวัตถุดิบหลักและรอง ให้ได้ตามอัตราส่วนสำหรับการสังเคราะห์ปูนเม็ดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์
- 2) หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) ปูนเม็ดที่ได้จะนำไปบด และนำไปวิเคราะห์ free lime, X-ray Diffraction (XRD) และ Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อใช้เป็นชุดควบคุม

#### 3.2 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ปูนเม็ดโดยกระบวนการเผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อย

- 1) เตรียมเถ้าขานอ้อย และนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางจุลภาค และองค์ประกอบทางเคมี
- 2) เถ้าขานอ้อยที่ได้จะนำไปผสมกับวัตถุดิบหลักตามอัตราส่วนสำหรับการเตรียมปูนเม็ดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในส่วนที่ 1
- 3) หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1250 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) ปูนเม็ดที่ได้จะนำไปบด และนำไปวิเคราะห์ free lime, X-ray Diffraction (XRD) และ Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการนำเถ้าขานอ้อยมาใช้ในการสังเคราะห์

#### 3.3 การศึกษาลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันของซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อย

ปูนเม็ดที่อัตราส่วนที่เหมาะสมจากส่วนที่ 2 จะนำมาทดสอบปฏิกิริยาไฮเดรชัน เปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่ใช้วัตถุดิบทั่วไปที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยจะมีการเตรียม 2 แบบ คือ เตรียมแบบมอร์ต้าสำหรับทดสอบกำลังอัด และซีเมนต์เพสต์ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ SEM ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

##### การเตรียมมอร์ต้า

- 1) การเตรียมมอร์ต้าจะเตรียมจากปูนเม็ด และทรายในอัตราส่วน 1:2.75 และอัตราส่วนน้ำ ต่อ ปูนเม็ด ในอัตราส่วน 0.475
- 2) เริ่มแรกวัตถุดิบแห้ง (ปูนเม็ด และทราย) จะถูกนำไปผสมใน Horbart Mixer เป็นเวลา 1 นาที
- 3) หลังจากนั้นน้ำตามอัตราส่วนข้อที่ 1 จะถูกเทลงไป และผสมอีกครั้ง เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที

- 4) เทสารละลายชั้น (slurry) ลงในแบบหล่อขนาด 5×5×5 ซม.3 และพ่นด้วยพลาสติกเพื่อกันน้ำระเหย
- 5) หลังจากผ่านไป 1 วัน ถอดตัวอย่างออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปบ่มต่อที่มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 90
- 6) ตัวอย่างจะถูกนำไปทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน

#### การเตรียมซีเมนต์เพสต์

- 1) การเตรียมซีเมนต์เพสต์จะเตรียมจากปูนเม็ด และน้ำ ในอัตราส่วน 1:1
- 2) ตัวอย่างจะถูกบ่ม และนำมาทดสอบที่อายุ 7 และ 28 วัน

### 3.4 เทคนิคการวิเคราะห์และสภาวะในการวิเคราะห์

#### 3.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ธาตุ โดยใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรเมทรี (X-Ray Fluorescence Spectrometry) สำหรับวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง โดยการวัดอัตราการเรืองรังสีเอกซ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของธาตุ ซึ่งปล่อยออกมาจากอะตอมที่สภาวะถูกกระตุ้น ลักษณะการทำงานเป็นแบบ Sequential Type Spectrometry โดยใช้ผลึก (Analyzer Crystal) กระจายความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ซึ่งตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เถ้าแกลบดำ เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ โดยทำการส่งวิเคราะห์ที่สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งเครื่องที่ใช้ชื่อ Bruker AXS รุ่น S4 Pioneer

#### 3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ร่วมกับเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS)

การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยการใช้อิเล็กตรอนเป็นสื่อกลางในการทำให้เกิดภาพ ด้วยการบังคับลำอิเล็กตรอนด้วยระบบเลนส์แม่เหล็กให้กวาดลงบนพื้นผิวตัวอย่าง อิเล็กตรอนจะตกกระทบกับพื้นผิวตัวอย่างแล้วสะท้อนกลับเป็นสัญญาณอิเล็กตรอนเข้าสู่ตัววัด และแปลงเป็นสัญญาณภาพที่ฉายบนฉากรับ และสามารถศึกษาองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างโดยใช้เทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในเชิงคุณภาพและปริมาณ ซึ่งตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ต้องทำการบดลดขนาดให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จากนั้นนำตัวอย่างเคลือบด้วยทองและนำไปวิเคราะห์โดยเทคนิค SEM – EDS ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ใช้ชื่อ JEOL รุ่น JSM – 6610 LV และชุดวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (EDS) ชื่อ Oxford รุ่น INCA 350 ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



### 3.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกของสารด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ร่วมกับโปรแกรม TOPAS

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกของสารด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) เป็นเทคนิคอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เทคนิค XRD เพื่อศึกษาเฟสของตัวอย่าง ซึ่งการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ต้องนำตัวอย่างบดลดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำไปแช่ในสารละลายอะซิโตน เพื่อทำการไล่น้ำในตัวอย่าง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำตัวอย่างไปเก็บในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปส่งวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD ที่สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น D8 Discover หลอดรังสี CuK $\alpha$  ซึ่งมีเงื่อนไขในการวิเคราะห์ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ XRD

พารามิเตอร์	เงื่อนไขที่ใช้
มุม 2 $\theta$	10 – 80 องศา
สเตปไซส์	0.02 องศา
สเตปไทม์	1 วินาที
ค่าความต่างศักย์	30 กิโลวัตต์
กระแสไฟฟ้า	30 มิลลิแอมแปร์
อุณหภูมิ	25 องศาเซลเซียส

หลังจากทดสอบลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ให้ข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม TOPAS เพื่อศึกษาปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง

### 3.4.4 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค Brunauer – Emmett – Teller (BET)

เทคนิค Brunauer – Emmett – Teller (BET) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ทำกรวิเคราะห์ อาศัยการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน โดยนำเถ้ากลบดำที่ทำการบดลดขนาดให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 และเก็บในโถดูดความชื้น (Desiccator) จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยเทคนิค BET ด้วยเครื่อง Autosorb – 1 ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 3.4.5 การวิเคราะห์แคลเซียมออกไซด์อิสระที่เหลืออยู่ (Free lime)

ศึกษาปริมาณร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยาในเกิดเป็นไดแคลเซียมซิลิเกต โดยวิธี Franke method ตามมาตรฐาน ASTM C114-07 ซึ่งในมาตรฐานกำหนดร้อยละของแคลเซียมออกไซด์อิสระที่มีอยู่ได้ประมาณในช่วงร้อยละ 1 – 2.5 โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการเผา 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นเติม Ethylene glycol 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปกวนในเครื่องกวนสาร (Hotplate stirrer) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำสารละลายที่ได้ไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 และนำสารละลายไปไทเทรตด้วยสารละลาย 0.1 M HCl โดยใช้หมอลบูล

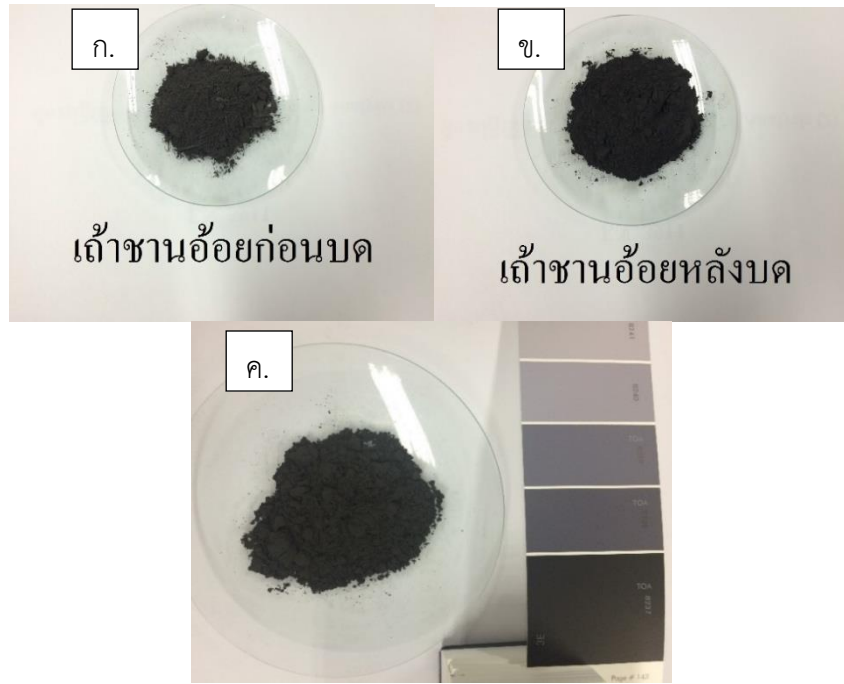
แอลกอฮอล์โซลูชัน 0.04% ประมาณ 5 หยดเป็นอินดิเคเตอร์ จนสารละลายเปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีเขียว จากนั้นนำไปคำนวณหาร้อยละของแคลเซียมออกไซด์อิสระ ดังสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละของ free lime} = (\text{HCl ที่ใช้ mL}) \times 0.56 \quad (3.1)$$

## บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล

### 4.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash, BA)

เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้ง จากการเผาไหม้ของชานอ้อยในอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งชานอ้อยที่เหลือจากการหีบจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตน้ำตาล จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เนื่องจากมีปริมาณซิลิกา ค่อนข้างสูง และมีโลหะออกไซด์ของแคลเซียม ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของปูนซีเมนต์ โดยเถ้าชานอ้อยที่ใช้ในงานทดลองนี้ มีแหล่งที่มาจากโรงงานน้ำตาลบ้านโป่ง ตำบลท่าผา อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี ซึ่งได้จากการเผากากอ้อยในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ ทั้งนี้ในกระบวนการเผาเถ้าชานอ้อยของโรงงานมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานความร้อนสำหรับการต้มน้ำให้เปลี่ยนเป็นไอน้ำ และนำไอน้ำที่ได้ไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังใช้เป็นพลังงานกลเพื่อหมุนชุดขับเคลื่อนอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมอ้อยและอุปกรณ์สกัดน้ำอ้อย ซึ่งจากรายงานพบว่าเถ้าชานอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานเมื่อนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในซีเมนต์เพสต์ร้อยละ 10 ส่งผลให้กำลังอัดที่สูงขึ้น และสามารถทนทานการกัดกร่อนทางเคมีได้สูง [30] ทั้งนี้ต้องทำการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพโดยการบด เพื่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัส [31] โดยในการวิจัยนี้จึงทำการบดเถ้าชานอ้อยแสดงดังภาพที่ 4.1 (ก.) และ (ข.) ซึ่งเถ้าชานอ้อยก่อนบดพบว่ามีสีดำปนเทาเล็กน้อย เนื่องจากมีลักษณะหยาบ มองเห็นเป็นเม็ดมากกว่า เถ้าชานอ้อยหลังบด และเมื่อทำการวัดสีโดยใช้แผ่นเทียบสี พบว่าเถ้าชานอ้อยหลังบดใกล้เคียงกับรหัสสี TOA 8237 ซึ่งมีสีดำเข้ม ดังภาพที่ 4.1 (ค.) คาดว่าเป็นผลจากการสะสมของคาร์บอนจากกระบวนการเผาไหม้ นอกจากนี้ศึกษาโดยการเทียบสี ทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ X-ray Fluorescence (XRF) X-ray diffraction (XRD) Particle Size Distribution (PSD) Scanning electron microscopy (SEM) และ Brunauer-Emmett-Teller (BET) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเบื้องต้นของเถ้าชานอ้อย โดยผลการศึกษา มีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 4.1 เถ้าชานอ้อย

(ก.) เถ้าชานอ้อยก่อนบด (ข.) เถ้าชานอ้อยหลังบด และ (ค.) แถบเทียบสีเถ้าชานอ้อย

#### 4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อยในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค XRF ในการวิเคราะห์หาชนิดธาตุและปริมาณธาตุต่างๆ ในสารตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยไม่ทำลายตัวอย่าง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าวพบว่าเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) โซเดียมไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) อะลูมิเนียมไดออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) คลอไรด์ (Cl) ไดฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) แมงกานีสไดออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) โดยแต่ละองค์ประกอบมีปริมาณร้อยละ 68.60 1.07 3.92 3.97 7.85 3.16 0.95 1.71 1.69 0.27 0.14 และ 1.44 ตามลำดับ โดยซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงสุดในองค์ประกอบทั้งหมด นอกจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือ Loss On Ignition (LOI) ของตัวอย่างเพื่อศึกษาปริมาณคาร์บอนสะสมในตัวอย่างพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 5.22 โดยผลการทดลองทั้งหมดแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นที่พบว่าเถ้าชานอ้อยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบร้อยละ 50 - 73 โดยร้อยละขององค์ประกอบที่แตกต่างกันขึ้นกับแหล่งกำเนิด ชนิดของดิน สภาพอากาศ และกระบวนการเผาในการใช้งาน เป็นต้น [32]

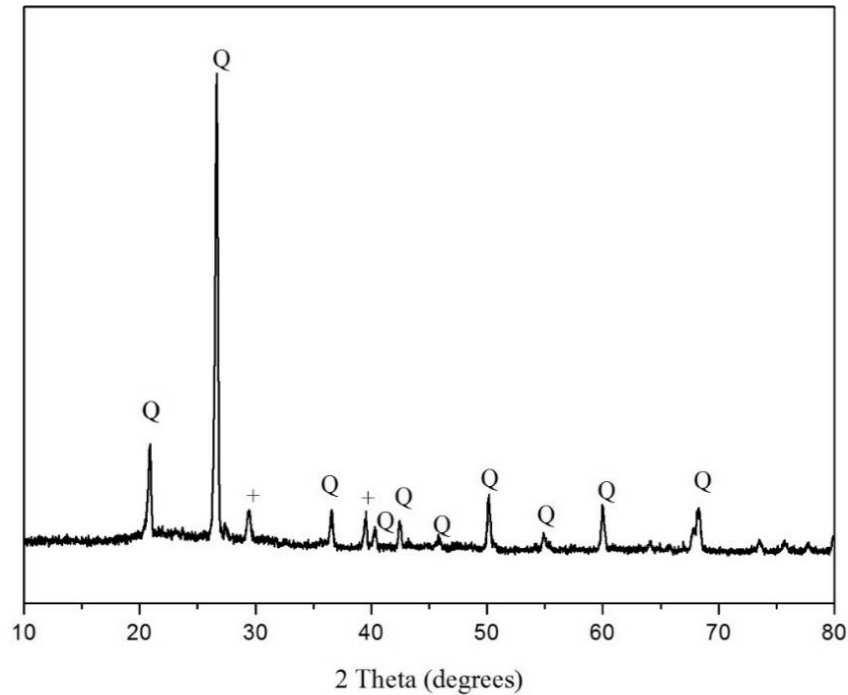
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยโดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

สารประกอบ	เถ้าขานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
SiO <sub>2</sub>	68.60
Na <sub>2</sub> O	1.07
K <sub>2</sub> O	3.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.97
CaO	7.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16
Cl	0.95
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.71
MgO	1.69
TiO <sub>2</sub>	0.27
MnO	0.14
SO <sub>3</sub>	1.44
LOI	5.22

\*การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาหรือ Loss on Ignition (LOI)

#### 4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าขานอ้อย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของเถ้าขานอ้อยก่อนทำการเผาพร้อมโดยใช้เทคนิค XRD โดยผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกปรากฏพีคที่ตำแหน่งต่างๆ และเมื่อทำการวิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม EVA พบว่าตำแหน่งที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นตำแหน่งของซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ โดยพบที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 21° 27° 37° 40° 42° 46° 50° 55° 60° และ 68° (อ้างอิงจาก JCPDs 86-1560) อีกทั้งปรากฏพีคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ตำแหน่งมุม 2θ เท่ากับ 29.5° และ 39.5° (อ้างอิงจาก JCPDs 85-1108) แสดงดังภาพที่ 4.2 ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งพบองค์ประกอบของซิลิกาสูงสุด และแคลเซียมออกไซด์รองลงมา ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาในประเด็นลักษณะของโครงสร้างพบว่าซิลิกอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นพีคยอดแหลม บ่งบอกถึงความเป็นโครงสร้างผลึกของซิลิกาแบบควอตซ์ (Quartz) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เป็นระเบียบ ต้องใช้พลังงานมากในการสลายพันธะ (ประมาณ 900 – 1000 องศาเซลเซียส) มีความเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้นำเถ้าขานอ้อยไปใช้ในการเผาร่วมกับวัสดุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (raw mill) โดยใช้อุณหภูมิในการเผาค่อนข้างสูง อาจส่งผลให้ซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปของควอตซ์ (Quartz) หลอม และทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่นๆ ในวัสดุดิบกลายเป็นเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดได้



ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของเถ้าขานอ้อย ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

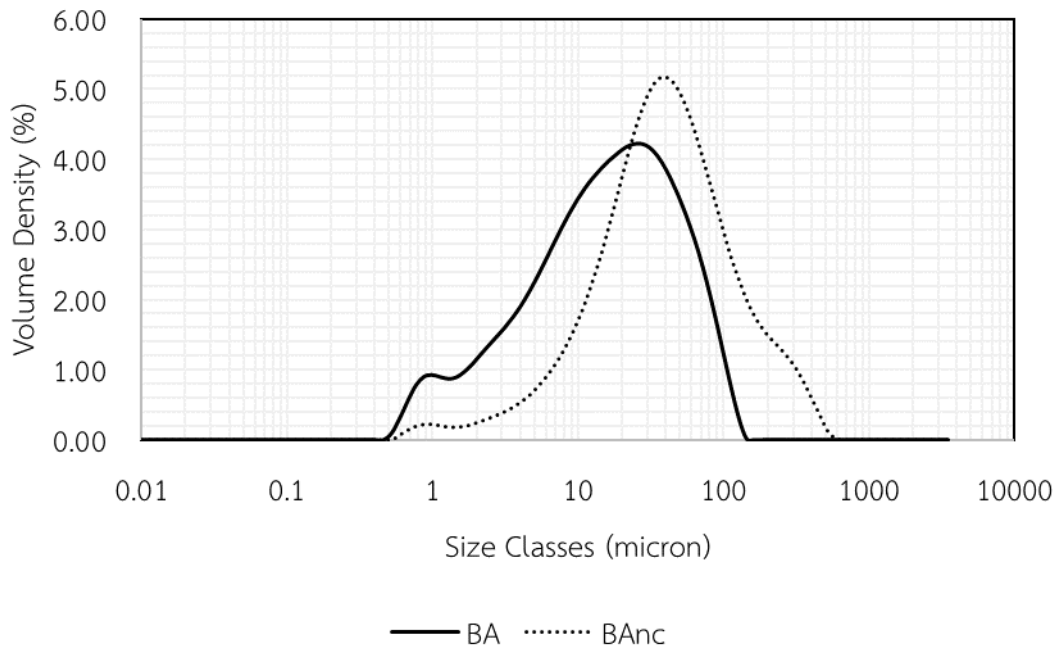
โดยสัญลักษณ์ Q แทนควอตซ์ (Quartz-SiO<sub>2</sub>) และสัญลักษณ์ + แทน Calcium Carbonate

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค การกระจายขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิวของเถ้าขานอ้อย

งานวิจัยนี้ต้องการสังเคราะห์ปูนเม็ดและปูนซีเมนต์จากการเผาพร้อมระหว่างเถ้าขานอ้อยกับวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตซีเมนต์ ดังนั้นปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยา อาทิเช่น ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ การกระจายตัวของขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวจำเพาะ และลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ เป็นต้น จำเป็นต้องทำการศึกษาก่อนทำการสังเคราะห์ โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคของเถ้าขานอ้อยก่อนทำการแทนที่ในการเผาพร้อมโดยการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Laser Particle Size Distribution Analyzer (PSD) พบว่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 (P<sub>50</sub>) ของเถ้าขานอ้อยมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 36.73 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงทำการบดเถ้าขานอ้อยเพื่อลดขนาด พบว่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 (P<sub>50</sub>) มีขนาดลดลง โดยมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 15.37 ไมโครเมตร และเมื่อทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) พบว่าเถ้าขานอ้อยหลังบดมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าเถ้าขานอ้อยก่อนบด โดยมีค่าเท่ากับ 32.08 และ 14.79 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ และในส่วนของขนาดรูพรุนพบว่ามีความน้อยลงเมื่อเทียบกับเถ้าขานอ้อยที่ไม่ผ่านการบด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.2 และเมื่อทำการเปรียบเทียบในประเด็นการกระจายของขนาดอนุภาคเถ้าขานอ้อยก่อนบดพบว่ามีความแคบกว่าการกระจายตัวของอนุภาคเถ้าขานอ้อยหลังบดที่มีการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง ดังภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าชานอ้อย

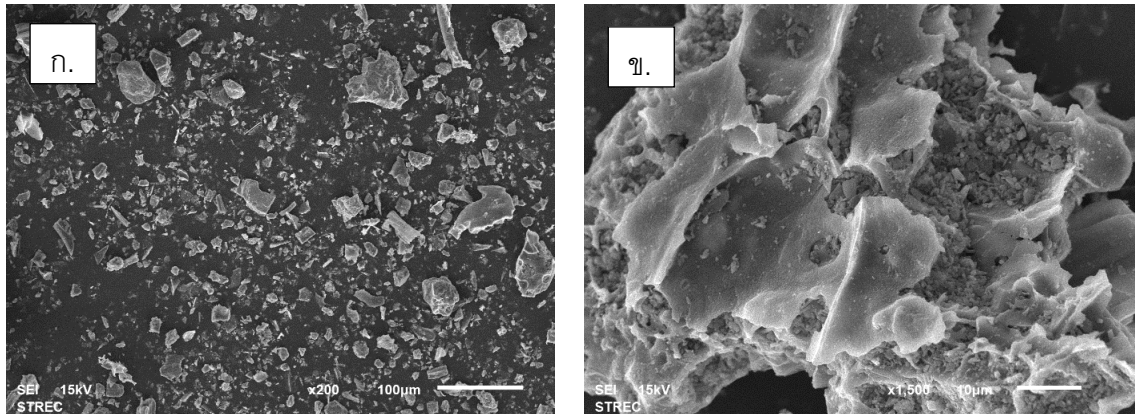
สมบัติทางกายภาพ		เถ้าชานอ้อยก่อนบด (BAnc)	เถ้าชานอ้อยหลังบด (BA)
ขนาดอนุภาค	P <sub>10</sub> (μm)	8.59	2.24
	P <sub>50</sub> (μm)	36.73	15.37
	P <sub>90</sub> (μm)	147.7	56.90
พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)		14.79	32.08
ปริมาตรรูพรุน (cm <sup>3</sup> /g)		0.03348	0.03987
ขนาดรูพรุน (Å)		90.53	49.71



ภาพที่ 4.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเถ้าชานอ้อย

4.1.4 การวิเคราะห์โครงสร้างในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดร่วมกับการวิเคราะห์สเปกตรัมกระจายพลังงาน Scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectroscopy (SEM with EDS)

การศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค SEM with EDS เพื่อตรวจสอบโครงสร้างลักษณะรูพรุนของเถ้าชานอ้อย ผลการวิเคราะห์พบว่าเถ้าชานอ้อยก่อนบดมีรูปร่างไม่แน่นอน พื้นที่ผิวขรุขระ ขนาดไม่สม่ำเสมอ ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน และเมื่อทำการบดและร่อนตะแกรงเบอร์ 324 พบว่าความพรุนของเถ้าชานอ้อยลดลง อันเนื่องมาจากการบดในการเตรียมเถ้าชานอ้อย โดยสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่พบว่า การบดนั้นส่งผลให้ชานอ้อยและเถ้าชานอ้อยมีขนาดและความพรุนลดลง [32, 33]



ภาพที่ 4.4 ผลการตรวจสอบรูปร่างผลึกของเถ้าขานอ้อยก่อนบด  
(ก) กำลังขยาย 200 เท่า (ข) กำลังขยาย 1500 เท่า

จากการนำเถ้าขานอ้อยมาทำการศึกษาเพื่อพิจารณาศักยภาพเบื้องต้นในการนำมาเผาพร้อมสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าเถ้าขานอ้อยมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาในปริมาณมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งซิลิกานับว่าเป็นองค์ประกอบหลักในการนำมาสังเคราะห์ปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการเผาพร้อมกับวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ และคุณสมบัติไฮเดรชันหลังจากการเผาพร้อม โดยผลการทดลองแต่ส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

#### 4.2 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการเผาพร้อมเถ้าขานอ้อยกับวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

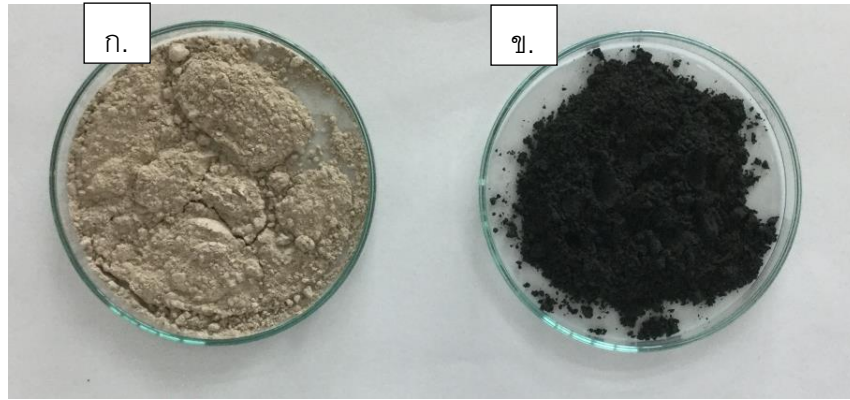
การศึกษายปริมาณที่เหมาะสมในการเผาพร้อมเถ้าขานอ้อยกับวัตถุดิบในการสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ได้ทำการศึกษาด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อใช้ในการพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการสังเคราะห์ปูนเม็ดที่ไม่มีแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 1,250, 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามเงื่อนไขที่ได้ระบุในบทที่ 3 (ส่วนของวิธีการทดลอง) เปรียบเทียบกับปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนต่างกัน จากนั้นนำตัวอย่างได้จากการสังเคราะห์มาทำการศึกษาค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือ (free lime) ศึกษาผลของเถ้าขานอ้อยที่มีต่อลักษณะโครงสร้างและเฟสองค์ประกอบของปูนเม็ดด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) Particle Size Distribution (PSD) Scanning electron microscopy (SEM) และทำการศึกษาในส่วนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

##### 4.2.1 ลักษณะสมบัติของปูนเม็ดและซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผาพร้อม

##### 1) ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบก่อนสังเคราะห์และหลังสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเผาพร้อม

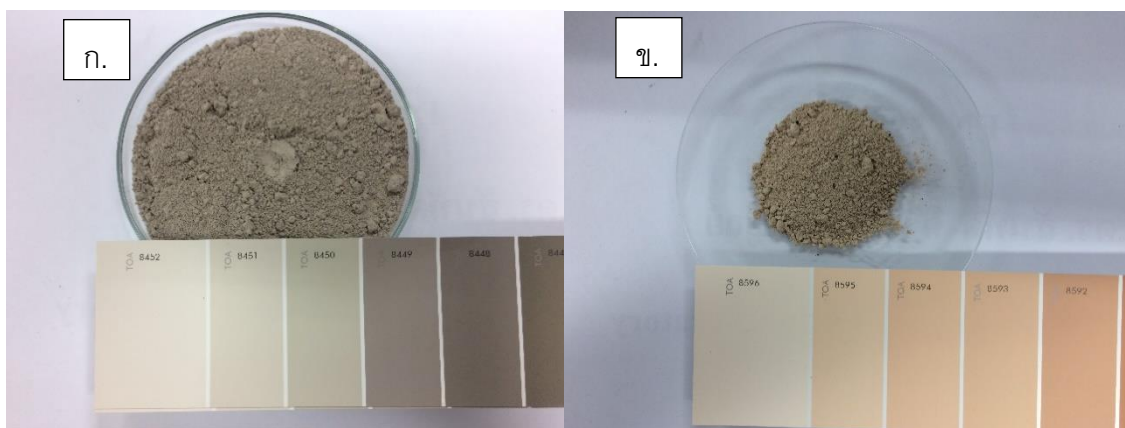
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างผลึกของเถ้าขานอ้อยพบว่ามีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบแทนในการเผาพร้อมกับวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ดังนั้นในการทดลองนี้ได้ทำการแทนที่เถ้าขานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกัน และทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250, 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยวัตถุดิบก่อนผสมแสดงดังภาพที่ 4.5 และหลักเผาพร้อมที่สัดส่วนต่างๆ กันแสดงดังรูป 4.6



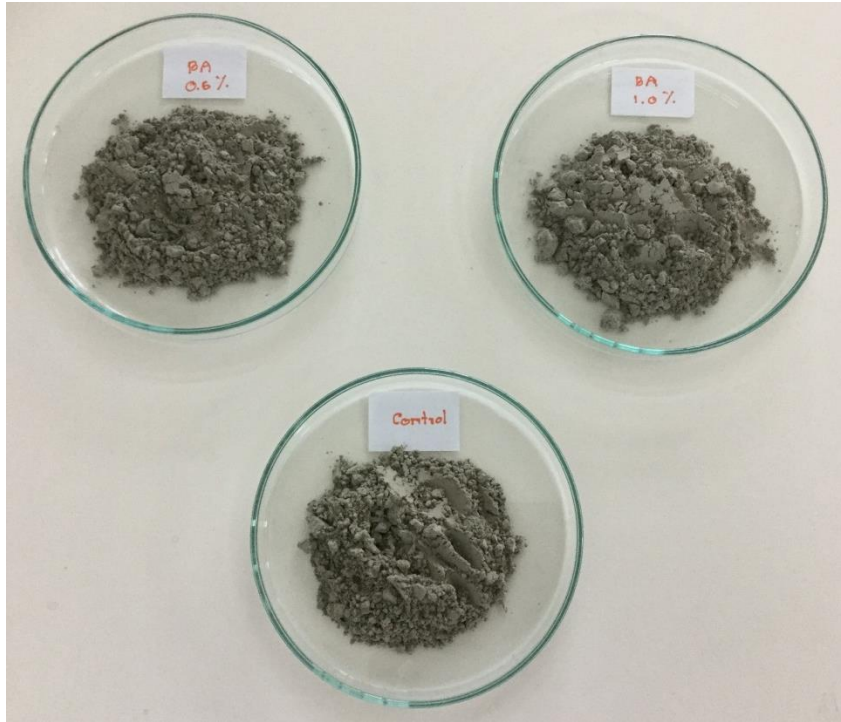


**ภาพที่ 4.5** แสดงลักษณะของสีวัตถุดิบหลักและเถ้าขาน้อยก่อนผสม  
(ก) สีของวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และ (ข) เถ้าขาน้อย

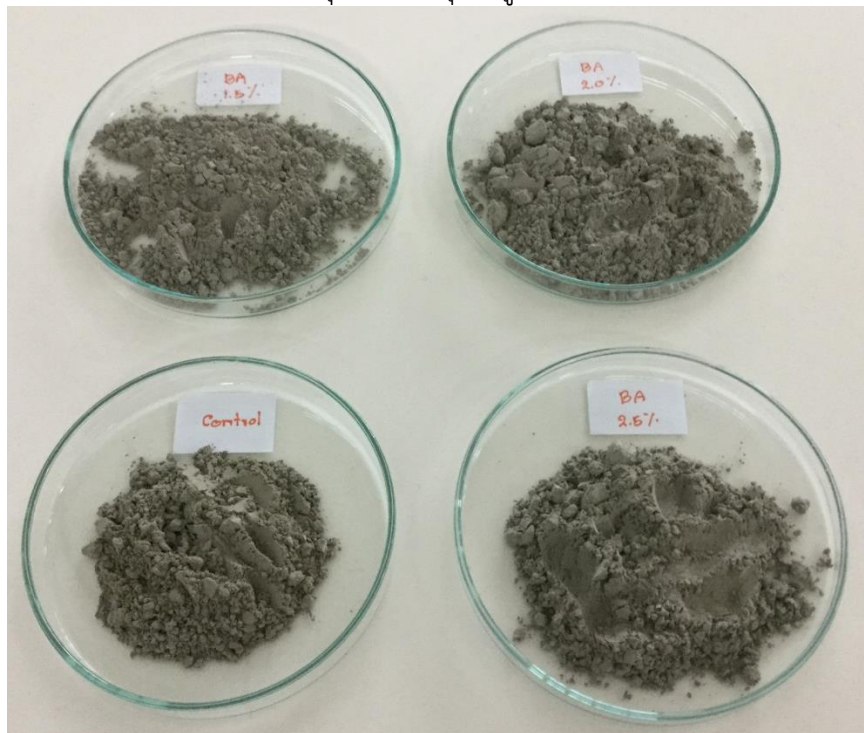
เมื่อนำวัตถุดิบหลักดังกล่าวเผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่ร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก ทำการสังเคราะห์โดยใช้อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.6-4.8 พบว่าส่วนผสมของปูนเม็ดก่อนเผาร่วมมีสีที่เข้มกว่าส่วนผสมของปูนเม็ดหลังเผา โดยใกล้เคียงกับรหัสสี TOA 8251 และ TOA 8595 ตามลำดับ และเมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ได้แก่ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส สีของตัวอย่างหลังสังเคราะห์ไม่แตกต่างกับตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ โดยเฉพาะคาร์บอน ซึ่งสะสมในตัวอย่าง ส่งผลให้ตัวอย่างมีเฉดสีที่สว่างมากขึ้น ดังนั้นประเด็นเรื่องสีของเถ้าขาน้อยที่เป็นปัญหา ทำให้ไม่เหมาะในการนำมาใช้งานเนื่องจากมีสีดำเข้มนั้น ไม่มีผลต่องานที่ใช้กระบวนการเผาร่วมในกระบวนการผลิตก่อนนำไปใช้งาน เนื่องจากการเผาร่วมสีดำที่เกิดจากคาร์บอนสะสมได้หายไปโดยการเผาที่อุณหภูมิสูง



**ภาพที่ 4.6** สีของปูนเม็ดที่เผาร่วมระหว่างเถ้าขาน้อยร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักและวัตถุดิบหลักที่อุณหภูมิ 1,250°C (ก.) แถบเทียบสีของส่วนผสมก่อนเผา และ(ข.) แถบเทียบสีของส่วนผสมหลังเผา



ภาพที่ 4.7 สีของปูนเม็ดที่เผาพร้อมระหว่างเถ้าขาน้อยร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก และวัสดุคิบลึกที่อุณหภูมิ 1,250°C



ภาพที่ 4.8 สีของปูนเม็ดที่เผาพร้อมระหว่างเถ้าขาน้อยร้อยละ 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1,250°C

## 2) ผลของเถ้าขานอ้อยที่มีต่อค่าร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือ (free lime)

การหา free lime เป็นการหาสัดส่วนของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยาในการเกิดเป็น  $C_3S$  (alite) และ  $C_2S$  (belite) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์ หากค่า free lime มีค่าสูงจะบ่งบอกถึงปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในปริมาณสูง ในทางกลับกันเมื่อค่า free lime ต่ำจะบ่งบอกถึงปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาได้สูง ดังนั้นในการทดลองได้ทำการศึกษาผลของ free lime ของปูนเม็ดที่มีเถ้าขานอ้อยผสมที่ร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 1,250, 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือของการเผาพร้อมในแต่ละสัดส่วนโดยผลการทดลองในส่วนนี้แสดงดังตารางที่ 4.3

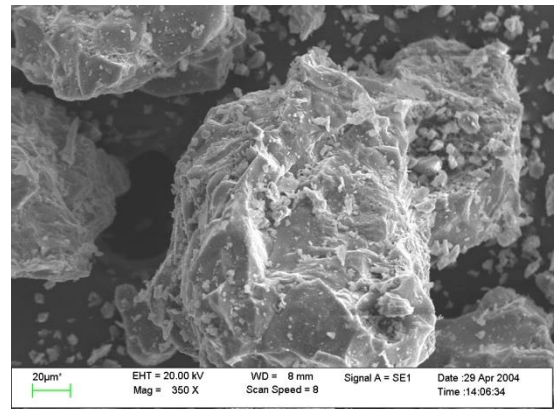
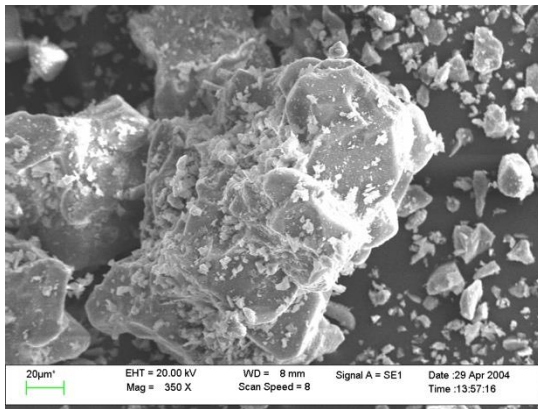
จากผลการทดลองพบว่าหากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1,250, 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระหรือ free lime ของปูนเม็ดที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยมีค่าเท่ากับร้อยละ  $36.44 \pm 0.01$ ,  $4.28 \pm 0.01$  และ  $1.16 \pm 0.01$  ตามลำดับ โดยค่า free lime ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียสมีค่าสูงสุด และค่า free lime ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำสุด แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อการทำปฏิกิริยาของวัตถุดิบ แคลเซียมออกไซด์ถูกใช้ในการทำปฏิกิริยากับธาตุตัวอื่นๆ เกิดเป็นสารประกอบต่างๆ ได้ดีที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตามในกรณีที่ทำการศึกษาที่อุณหภูมิเดียวกันแต่มีการแทนที่วัตถุดิบหลักของการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกันพบว่ายิ่งแทนที่เถ้าขานอ้อยในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า free lime ลดลง อาทิเช่น ที่สภาวะการเผาร่วมด้วยอุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส สัดส่วนของเถ้าขานอ้อยที่ผสมในวัตถุดิบหลัก ได้แก่ ร้อยละ 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าร้อยละ free lime เปลี่ยนเท่ากับ  $1.16 \pm 0.01$ ,  $1.02 \pm 0.02$ ,  $0.81 \pm 0.02$ ,  $0.76 \pm 0.01$ ,  $0.69 \pm 0.03$  และ  $0.51 \pm 0.01$  ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อเผาร่วมวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาในการเกิดเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ โดยอาจจะส่งผลให้ปริมาณเฟสหลักของปูนเม็ดเพิ่มขึ้น หรืออาจจะขัดขวางการเปลี่ยนรูปของ calcium oxide ไปเป็น alite หรือ belite โดยเปลี่ยนเป็นรูปอื่นๆ ที่ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการเผาร่วมที่อุณหภูมิและสัดส่วนแตกต่างกัน เพื่อพิจารณาสารประกอบที่ต้องการสำหรับการสนับสนุนคุณสมบัติไฮดรชันและต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4.3 ร้อยละของ free lime ของปูนเม็ดเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกัน

ร้อยละของเถ้าขานอ้อยที่ผสมในวัตถุดิบหลัก (โดยน้ำหนัก)	ค่าเฉลี่ยของร้อยละแคลเซียมออกไซด์อิสระ (free lime)		
	1,250 °C	1,350 °C	1,450 °C
0	$36.44 \pm 0.01$	$4.28 \pm 0.01$	$1.16 \pm 0.01$
0.5	$35.01 \pm 0.01$	$4.01 \pm 0.01$	$1.02 \pm 0.02$
1.0	$30.49 \pm 0.01$	$3.27 \pm 0.01$	$0.81 \pm 0.02$
1.5	$27.08 \pm 0.01$	$2.62 \pm 0.01$	$0.76 \pm 0.01$
2.0	$21.14 \pm 0.01$	$2.08 \pm 0.01$	$0.69 \pm 0.03$
2.5	$18.72 \pm 0.01$	$1.96 \pm 0.01$	$0.51 \pm 0.01$

### 3) ผลของเถ้าขานอ้อยที่มีต่อลักษณะโครงสร้างและเฟสองค์ประกอบของปูนเม็ด

การทดลองในส่วนนี้ได้นำปูนเม็ดที่สังเคราะห์จากการเผาไหม้ระหว่างเถ้าขานอ้อยกับวัตถุดิบหลักทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างและสารประกอบของปูนเม็ดที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer เพื่อวิเคราะห์ผลของเถ้าขานอ้อยที่มีต่อเฟสส่วนประกอบต่างๆของปูนเม็ด ได้แก่ Tricalcium silicate (Alite:  $C_3S$ ) Dicalcium silicate (Belite:  $C_2S$ ) Tricalcium aluminate (Aluminate:  $C_3A$ ) และ Tetracalcium aluminoferrite (Ferrite:  $C_4AF$ ) นอกจากนี้ได้นำปูนเม็ดที่สังเคราะห์ได้ตรวจสอบลักษณะของเฟสต่างๆ ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy หรือ SEM เพื่อเป็นข้อมูลเสริมในส่วนการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างส่วนประกอบของปูนเม็ด ในงานวิจัยนี้ก่อนทำการศึกษาผลของเถ้าขานอ้อยที่มีต่อลักษณะโครงสร้างและเฟสองค์ประกอบของปูนเม็ด โดยก่อนทำการศึกษาผลของเถ้าขานอ้อยที่มีต่อลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของเฟสปูนเม็ด ทางผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบปูนเม็ดสังเคราะห์ที่ได้จากห้องปฏิบัติการและปูนเม็ดที่ได้กระบวนการผลิตจริง เพื่อยืนยันว่าผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้อ้างอิงกับกระบวนการผลิตจริงได้ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.9-4.11

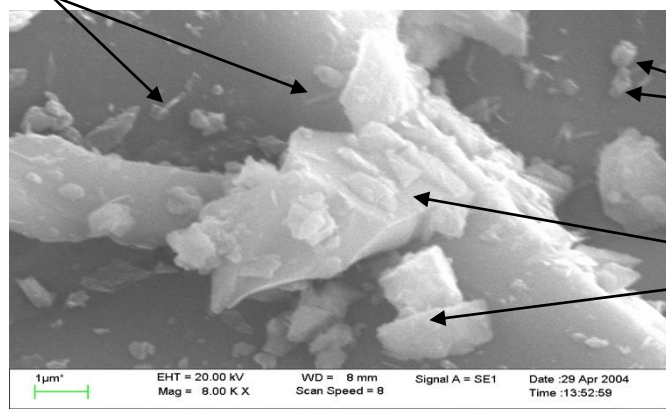


(ก) ปูนเม็ดจากกระบวนการผลิตของโรงงาน

(ข) ปูนเม็ดจากห้องปฏิบัติการ

ภาพที่ 4.9 ภาพเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของปูนเม็ดที่กำลังขยาย 350 เท่า

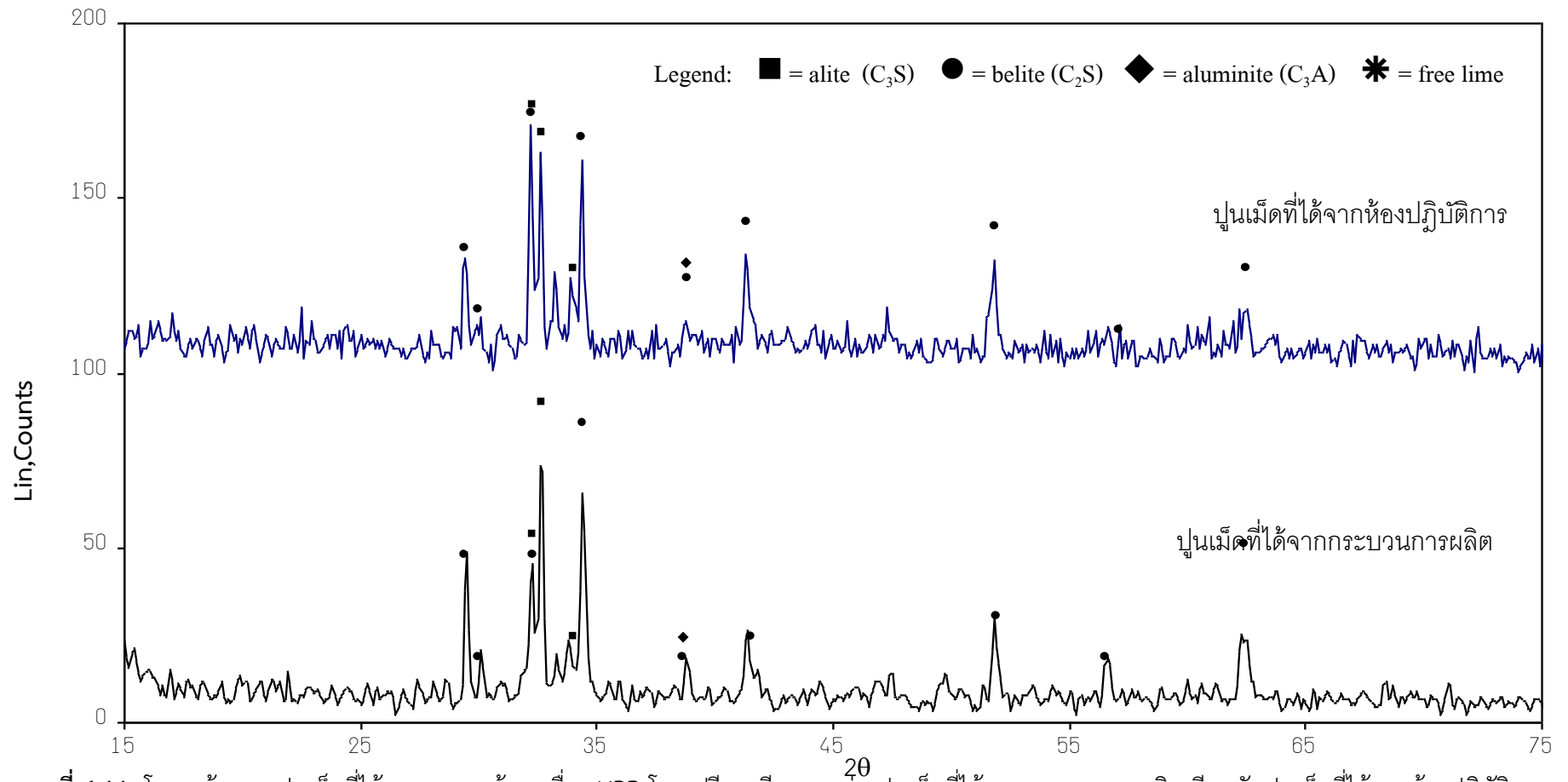
aluminite ( $C_3A$ )



belite ( $C_2S$ )

alite ( $C_3S$ )

ภาพที่ 4.10 ภาพแสดงเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตของโรงงานที่กำลังขยาย 8,000 เท่า

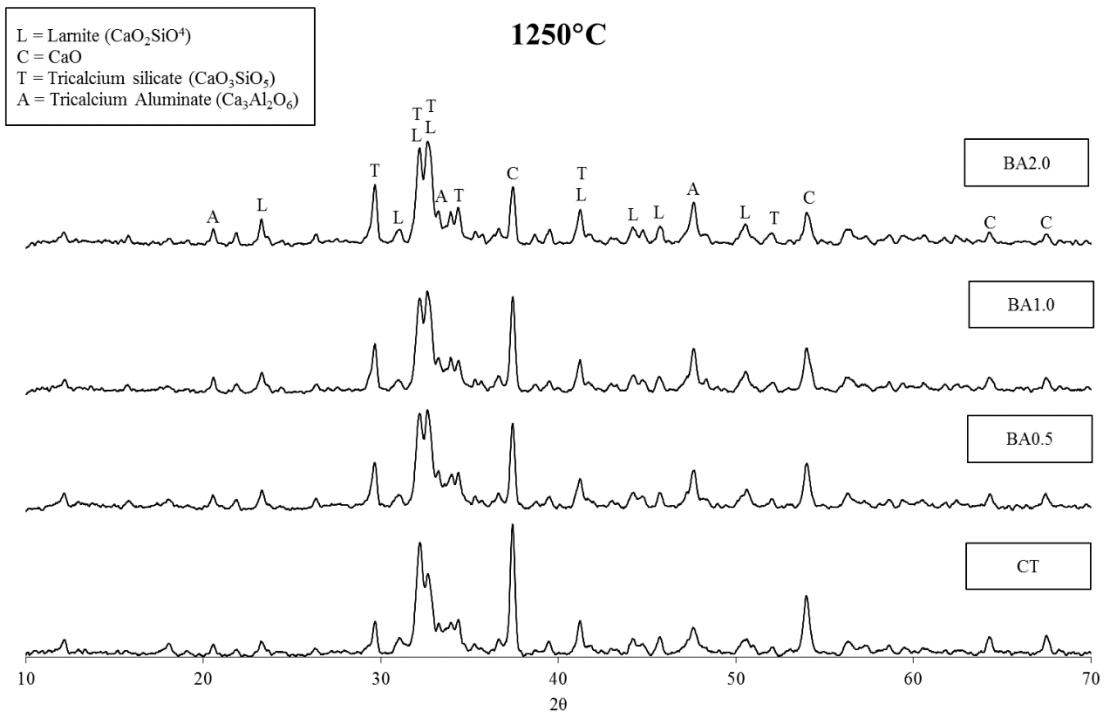


ภาพที่ 4.11 โครงสร้างของปูนเม็ดที่ได้จากการเผาด้วยเครื่อง XRD โดยเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดที่ได้จากกระบวนการผลิตเทียบกับปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

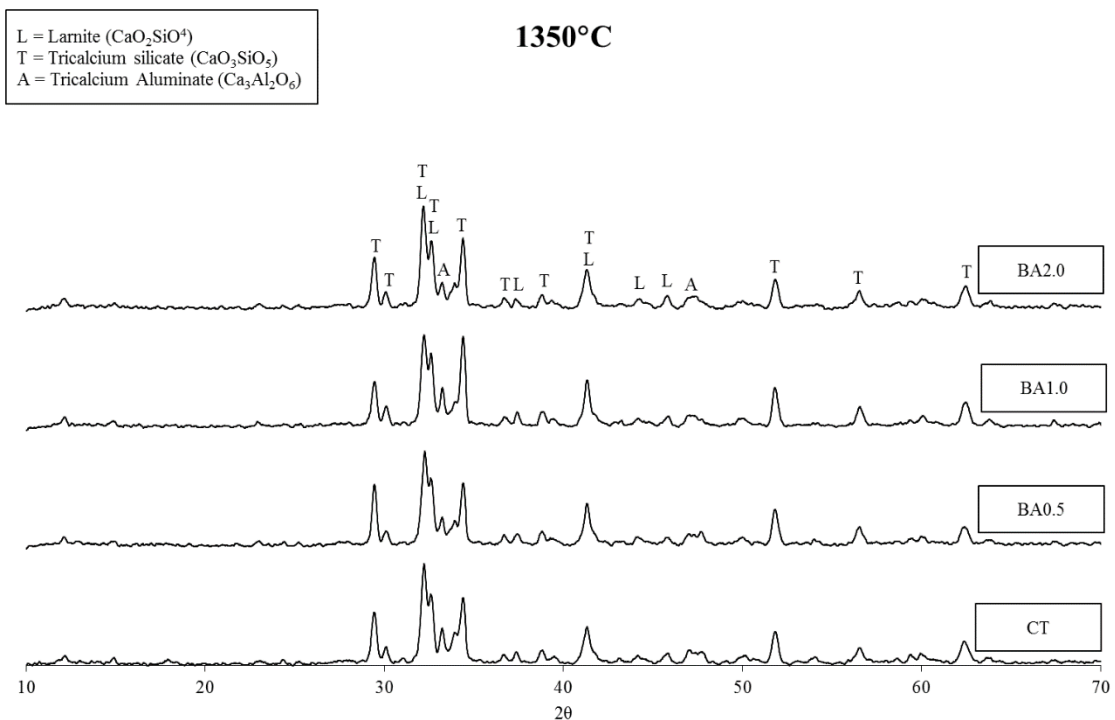
ในส่วนของการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD เพื่อเปรียบเทียบเฟสองค์ประกอบของปูนเม็ดที่ได้จากโรงงานกับปูนเม็ดที่ได้จากห้องปฏิบัติการแสดงดังภาพที่ 4.11 จากรูปพบว่าตำแหน่งในการเกิดเฟส และความสูงของเฟสต่างๆ ที่เกิดขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ประกอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ SEM ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะของเฟสต่างๆ ที่เกิดในปูนเม็ด ได้แก่ Tricalcium silicate ( $C_3S$ ) จะมีลักษณะกลม Dicalcium silicate ( $C_2S$ ) จะมีลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยม และ Tricalcium aluminite ( $C_3A$ ) มีลักษณะเป็นเกล็ดกระจายอยู่ทั่วไป ดังนั้นผลในการศึกษาปูนเม็ดที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการคาดว่าจะให้ผลที่เทียบเคียงกับผลที่เกิดขึ้นจริงเมื่อมีการนำเถ้าชานอ้อยไปเผาพร้อมในระดับอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษามูลของการเผาพร้อมเถ้าชานอ้อยกับวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยการสังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ เนื่องจากป้องกันการปนเปื้อนของวัตถุดิบอื่นๆ นอกจากปัจจัยที่ต้องการศึกษา

จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเฟสต่างๆ ของปูนเม็ดที่เผาพร้อมระหว่างวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และเถ้าชานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 1,250 องศาเซลเซียส มีเฟสองค์ประกอบหลักของปูนเม็ดเกิดขึ้น ได้แก่ Lanite ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของเฟส Dicalcium silicate ( $C_2S$ ), Tricalcium silicate ( $C_3S$ ), Tricalcium aluminite ( $C_3A$ ) และ CaO โดยตำแหน่งที่พบเฟส Lanite มีมากที่สุดหากเปรียบเทียบกับเฟสอื่นๆ โดยบางตำแหน่งมีการทับซ้อนกันระหว่างเฟส Lanite และเฟส Tricalcium silicate ( $C_3S$ ) โดยแสดงดังภาพที่ 4.12 ซึ่งจากทฤษฎีพบว่าเฟส Tricalcium silicate ( $C_3S$ ) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า Lanite และเมื่อพิจารณาเฟสของ CaO พบว่าเกิดขึ้นในหลายตำแหน่งและมีความสูงของพีคชัดเจนที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ประมาณ  $38^\circ C$  บ่งบอกถึงมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนของ free lime ที่รายงานว่าที่อุณหภูมิต่ำ ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือมีปริมาณสูง อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อมีการแทนที่วัตถุดิบหลักด้วยเถ้าชานอ้อยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นความสูงของพีค CaO ลดลง คาดว่าเป็นผลมาจากองค์ประกอบในเถ้าชานอ้อย อาทิ ซิลิกาหรืออะลูมินาได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือ ส่งผลให้แคลเซียมออกไซด์ถูกนำไปใช้งานเพิ่มขึ้น

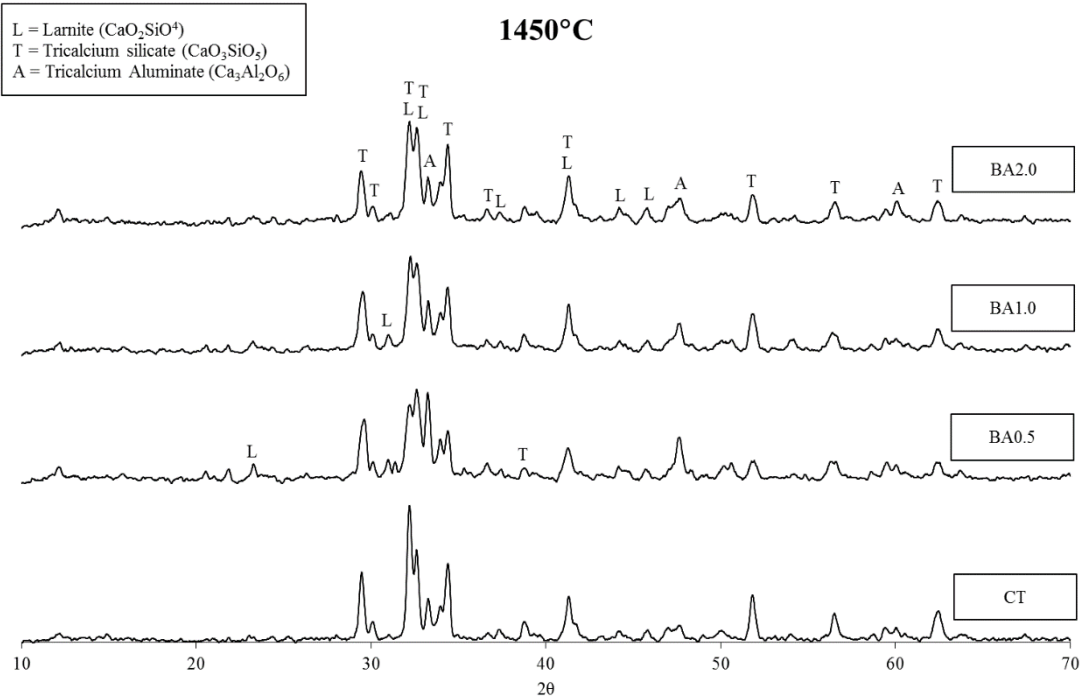
ในกรณีของผลการทดลองเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาพร้อมเป็น 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ที่แสดงดังภาพที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าตำแหน่งของเฟสองค์ประกอบหลักเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันกับอุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส แต่ประเด็นที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ ความสูงของตำแหน่งที่เกิดสารประกอบ Tricalcium silicate พบว่าสูงกว่าตำแหน่งของ Lanite หรือ  $CaO_2SiO_4$  เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง  $CaO_2SiO_4$  จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็น  $CaO_3SiO_5$  และประเด็นที่น่าสนใจคือตำแหน่งของพีค CaO ได้หายไป บ่งบอกถึงแคลเซียมออกไซด์ถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยา โดยผลการวิเคราะห์บางส่วนแสดงดังภาพที่ 4.12-4.15



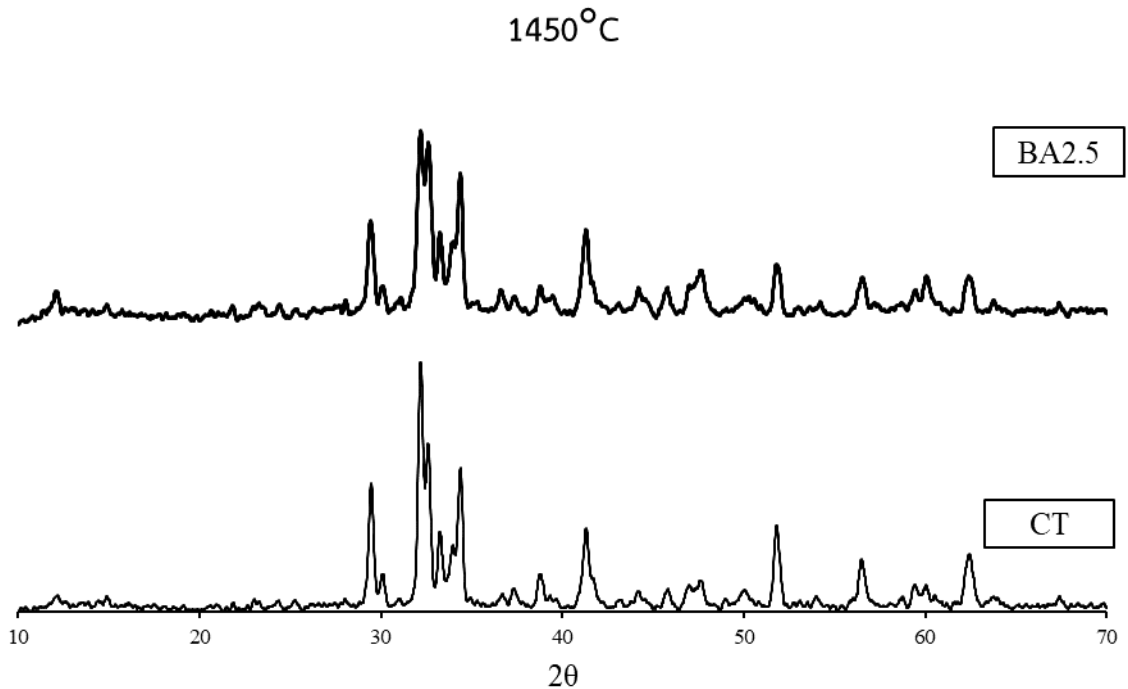
ภาพที่ 4.12 การวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขาน้อย ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD



ภาพที่ 4.13 การวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขาน้อย ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD



ภาพที่ 4.14 การวิเคราะห์โครงสร้างของปูนเม็ดที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขาน้อย ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD



ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบโครงสร้างของปูนเม็ดที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขาน้อยร้อยละ 2.5 และไม่เผา รวม ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง XRD

เพื่อให้ทราบถึงปริมาณเฟสขององค์ประกอบที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์โดยมีการเผาพร้อมระหว่างเถ้าขาน้อยที่สัดส่วนต่างๆ กับวัตถุดิบหลัก ทางผู้วิจัยจึงได้นำผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ศึกษาเพิ่มเติมร่วมกับโปรแกรม TOPAS เพื่อคำนวณปริมาณเฟสที่เกิดขึ้นด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่ง



ความน่าเชื่อถือของข้อมูลในการวิเคราะห์ที่ได้ใช้ปัจจัยโปรไฟล์ถ่วงน้ำหนัก (The weighted – profile factor, Rwp.) และดัชนีความเที่ยงตรงของตัวอย่างในภาพรวม (Goodness of fit, GOF) เป็นตัวบ่งชี้ โดยค่า Rwp. เป็นตัวบ่งชี้ถึงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลจากการวัดและข้อมูลจากการคำนวณ (Tamer, 2013) กรณีค่า Rwp. มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึงค่าความถูกต้องที่เพิ่มขึ้น (Bruker AXS, 2009) ในส่วนของค่า GOF ควรมีค่าใกล้เคียง 1 (Liao et al., 2015) ดังนั้น จึงใช้ปัจจัยดังกล่าวพิจารณาความถูกต้องของข้อมูล ซึ่งผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสด้วยโปรแกรม TOPAS แสดงในตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** ผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสด้วยโปรแกรม TOPAS ที่อุณหภูมิการสังเคราะห์และอัตราส่วนการเผาเถ้าขานอ้อยที่แตกต่างกัน

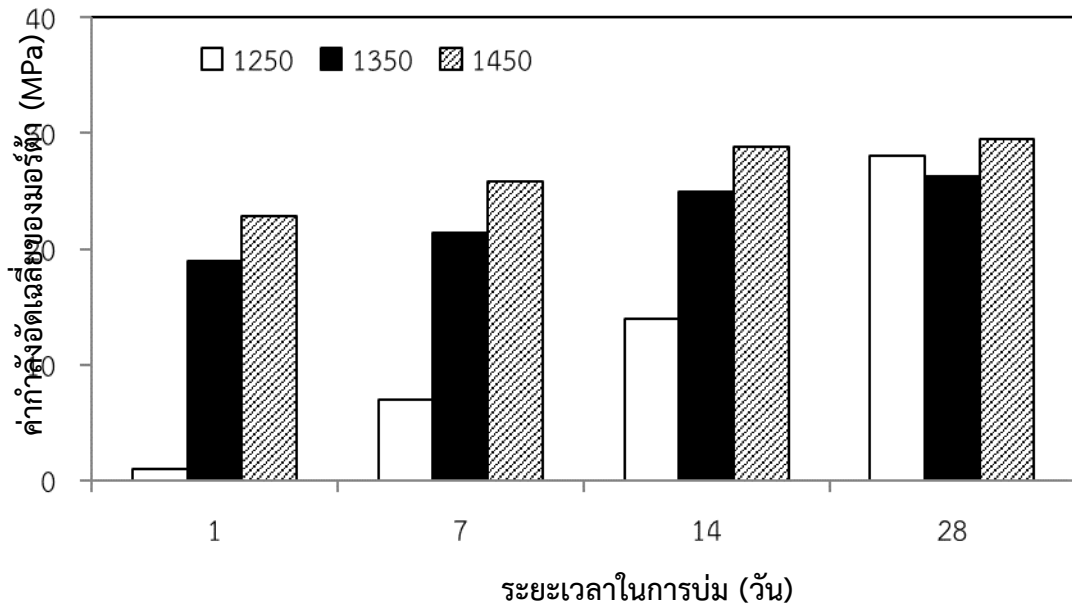
อุณหภูมิการสังเคราะห์	ร้อยละของเถ้าขานอ้อย	ร้อยละของสารประกอบที่เกิดขึ้น							
		Lime (CaO)	Larnite (C <sub>2</sub> S)	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSiO	Rwp.	GOF
1,250	0	36.44	32.1	12.3	4.3	5.4	10.3	10.43	0.84
	0.5	35.01	32.4	11.2	4.2	5.8	12.2	10.82	0.91
	1.0	30.49	32.1	13	4.6	5.1	15.3	10.32	0.84
	1.5	27.08	35.2	12.7	4.2	5.4	15.8	10.56	0.96
	2.0	21.14	32.5	13.1	5.1	5.3	23.1	10.75	0.88
	2.5	18.72	33.2	13	4.9	5.3	25.2	10.92	0.93
1,350	0	4.28	29	40.2	4.6	7.4	15	10.53	0.83
	0.5	4.01	28	40.5	5.1	6.4	16.2	11.83	0.91
	1.0	3.27	28	37.2	5.7	6.1	20.1	10.74	0.94
	1.5	2.62	27	30.3	4.9	7.9	27.6	12.41	0.80
	2.0	2.08	24	26.8	5.7	6.3	35.8	10.38	0.85
	2.5	1.96	27	21.5	6	7.9	36.1	12.94	0.81
1,450	0	1.16	32.2	52.1	6.2	7.8	0.9	11.03	0.89
	0.5	1.02	30.7	50.2	5.8	7.3	5.9	10.53	0.92
	1.0	0.81	28.5	47.8	4.6	7.2	11.4	13.02	0.87
	1.5	0.76	28.1	40.1	5.2	6.4	20.2	12.09	0.83
	2.0	0.69	27.8	35.3	4.9	6.1	26.1	10.73	0.91
	2.5	0.51	27.2	30.6	4.1	5.3	32.5	12.05	0.86

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณเฟสของสารประกอบที่เกิดขึ้นพบว่าที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์มีปริมาณสูงเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาในประเด็นของสารประกอบของปูนเม็ดที่เกิดขึ้น พบว่าปริมาณเฟสของสารประกอบ Larnite หรือ C<sub>2</sub>S เกิดขึ้นในปริมาณไม่แตกต่างกันเมื่อสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในประเด็นของสารประกอบ C<sub>3</sub>S ยิ่งอุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงขึ้น ปริมาณ C<sub>3</sub>S มีเพิ่มขึ้น ในกรณีของการแทนที่วัสดุหลักด้วยเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนที่ต่างกัน พบว่าเมื่อทำการแทนที่วัสดุหลักด้วยเถ้าขานอ้อยเพิ่มขึ้นส่งผลให้เฟสของสารประกอบหลักเกิดลดลงหากเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ดังนั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะในประเด็นของผลของเถ้าขานอ้อยที่มีต่อลักษณะโครงสร้างและเฟสองค์ประกอบของปูนเม็ด พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คือ 1,450 องศาเซลเซียส

อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องศึกษาในประเด็นของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันและผลการรับกำลังอัดของปูนซีเมนต์ที่สังเคราะห์โดยการเผาพร้อมระหว่างเถ้าขานอ้อยและวัสดุอิฐหลัก

#### 4.2.2 การทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าที่ได้จากกระบวนการเผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อย

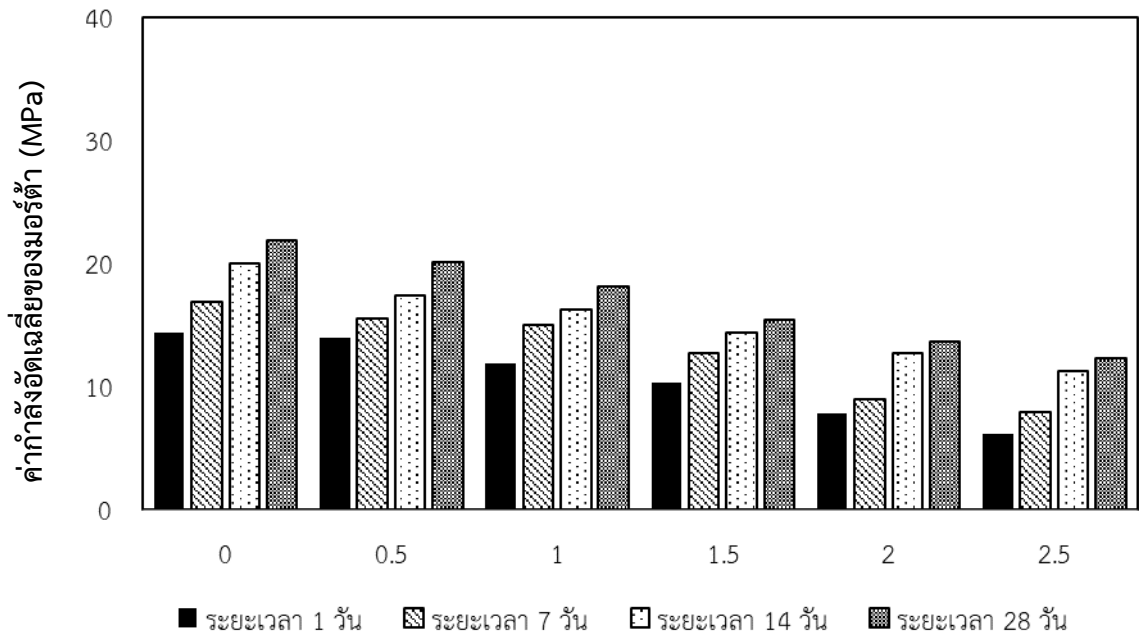
งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการเผาพร้อมระหว่างเถ้าขานอ้อยและวัสดุอิฐหลัก โดยวัสดุอิฐหลักถูกแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยที่ร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของทุกอนุกรมในการสังเคราะห์ และใช้อัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ต่อทรายต่อน้ำที่อัตราส่วน 1: 2.75 : 0.485 [ASTM C109-95] โดยทำการศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีระยะเวลาในการบ่มต่างๆ กัน คือ 1 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับกำลังอัดกับระยะเวลาการบ่มตัวอย่างจากการทดลองพบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยการมีอายุ 1 วันเท่ากับ 22.84 MPa จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นเป็น 27.54 MPa ที่อายุ 7 วัน และมีแนวโน้มการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งซีเมนต์มอร์ต้ามีอายุการบ่ม 28 วัน พบว่าการพัฒนากำลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง



ภาพที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยที่ระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน

สำหรับการศึกษาการพัฒนา กำลังของซีเมนต์มอร์ต้าที่ทำการเผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อยที่อนุกรมที่แตกต่างกันและร้อยละการแทนที่วัสดุอิฐด้วยเถ้าขานอ้อยตั้งแต่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าที่อนุกรมในการสังเคราะห์ 1,250 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่ไม่มีการเผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 14, 28 วัน ให้ค่าการรับกำลังอัดที่ 14.36 16.93 20.02 และ 21.89 MPa ตามลำดับ โดยการพัฒนากำลังของซีเมนต์มอร์ต้าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและมีแนวโน้มการพัฒนาลดลงในระยะปลายที่ระยะเวลา 28 วัน พบว่าการพัฒนาเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงผลของเถ้าขานอ้อยที่ทำการแทนที่ พบว่าเมื่อร้อยละการเผาพร้อมของเถ้า

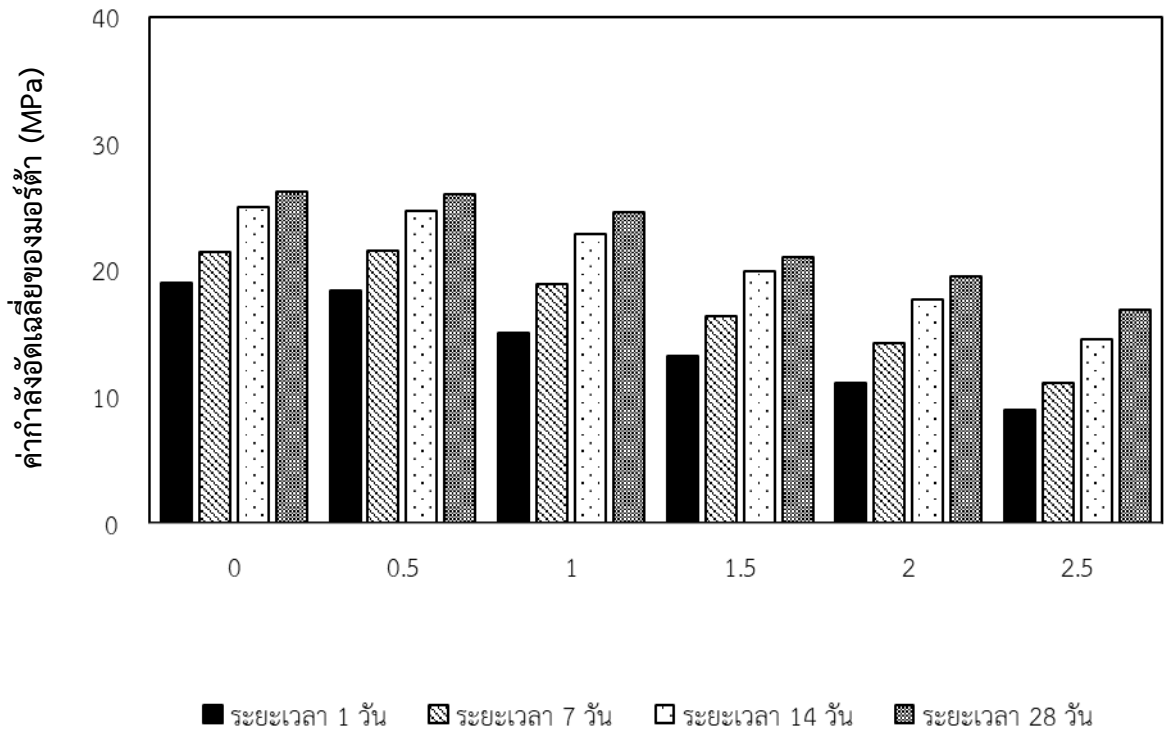
ขานอ้อยเพิ่มขึ้น การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง โดยสัดส่วนการลดลงเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อ ร้อยละการเผาไหม้มากกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.17



ร้อยละของวัสดุหลักที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อย

ภาพที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาไหม้ด้วยเถ้าขานอ้อยที่ อัตราส่วนแตกต่างกัน สังกะระห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่มที่ 1 7 14 และ 28 วัน

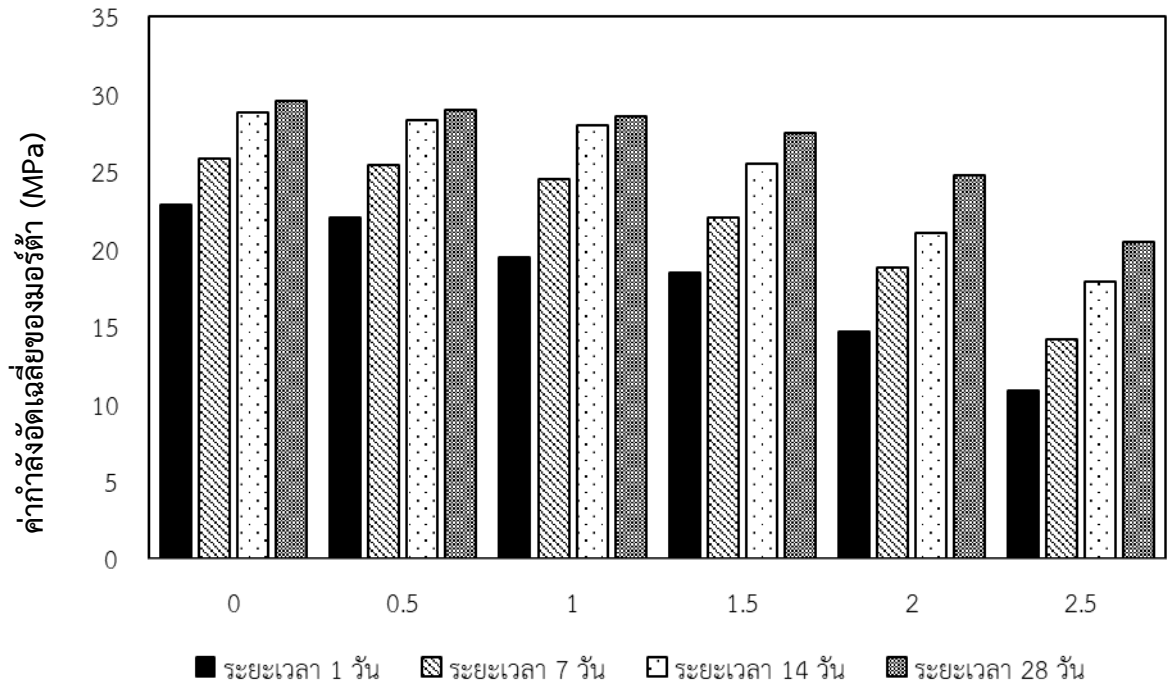
เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการสังเคราะห์ไปที่ 1,350 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนในการแทนที่ เหมือนกับตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส พบว่าการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อ ระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส โดย ตัวอย่างที่ไม่มีการเผาไหม้ด้วยเถ้าขานอ้อยมีค่าการรับกำลังอัดเท่ากับ 18.96, 21.45, 24.95 และ 26.24 MPa ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.18 แต่เมื่อพิจารณาค่าการพัฒนากำลังอัดของตัวอย่างที่ทำการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยที่ร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการรับกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่วัสดุหลักด้วยเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ให้ค่าการรับกำลังอัดสูงสุด คือ ตัวอย่างที่เผาไหม้ระหว่างวัสดุหลักและเถ้าขานอ้อยในร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน โดยมี ค่าเท่ากับ 26.04 MPa อย่างไรก็ตามทุกตัวอย่างของอุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์ที่ 1,350 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ในทุกสัดส่วน การเผาไหม้



#### ร้อยละของวัสดุหลักที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อย

ภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนแตกต่างกัน สังกะระห์ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่มที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน

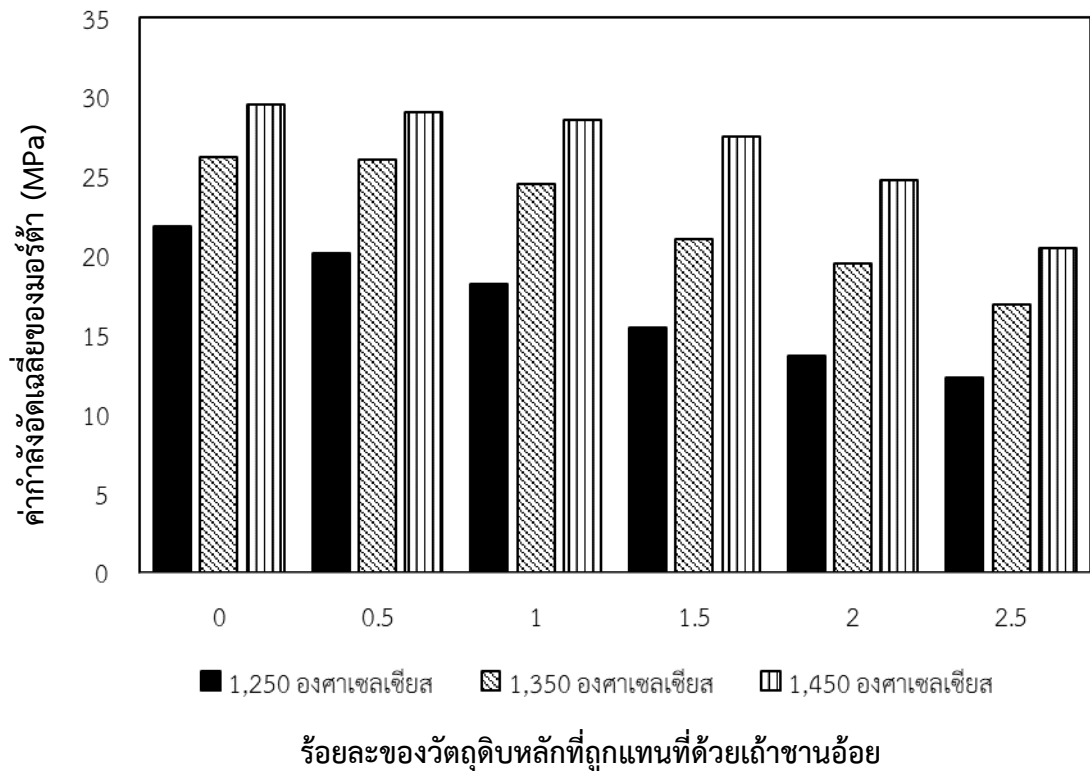
เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการสังเคราะห์ไปที่ 1,450 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนในการแทนที่เหมือนกับตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 และ 1,350 องศาเซลเซียส พบว่าการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ ทั้งสอง โดยตัวอย่างที่ไม่มีการเผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยมีค่าการรับกำลังอัดเท่ากับ 22.84, 25.86, 28.84 และ 29.54 MPa ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 14 และ 28 วันตามลำดับ โดยผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.19 แต่เมื่อพิจารณาค่าการพัฒนา กำลังอัดของตัวอย่างที่ทำการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยที่ร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการรับกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่วัสดุหลักด้วยเถ้าขานอ้อยในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ให้ค่าการรับกำลังอัดสูงสุดคือตัวอย่างที่เผาพร้อมระหว่างวัสดุหลักและเถ้าขานอ้อยในร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 29.01 MPa อย่างไรก็ตามทุกตัวอย่างของอุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์ที่ 1,450 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 และ 1,450 องศาเซลเซียส ในทุกสัดส่วนการเผาพร้อม ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณเฟสของสารประกอบหลักที่พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นปริมาณเฟสรวมของปูนเม็ด ได้แก่  $C_2S$  และ  $C_3S$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ  $CaO$  มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฟสดังกล่าวมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ส่งเสริมการพัฒนา กำลังอัดของปูนซีเมนต์



#### ร้อยละของวัสดุหลักที่ถูกแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อย

ภาพที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนแตกต่างกัน สังกะระห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่มที่ 1, 7, 14 และ 28 วัน

อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าการพัฒนากำลังของทุกอุณหภูมิมาทำการเปรียบเทียบ ณ ระยะเวลาในการบ่ม 28 วันพบว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส และแทนที่วัสดุหลักด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0.5-1.0 โดยน้ำหนัก ให้ค่าที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 (มอก.15 เล่ม 1-2547 หน้า 10)[15] โดยกำหนดให้ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่มีอายุในการบ่มที่ระยะเวลา 28 วันไม่น้อยกว่า 28 MPa[15,16] โดยตัวอย่างที่แทนที่มากกว่าร้อยละ 1.0 ค่าที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐานดังกล่าว โดยผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.20 ดังนั้นหากพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้งานควรทำการแทนที่วัสดุหลักด้วยเถ้าขานอ้อยในปริมาณไม่เกินร้อยละ 1 และทำการสังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 1,450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

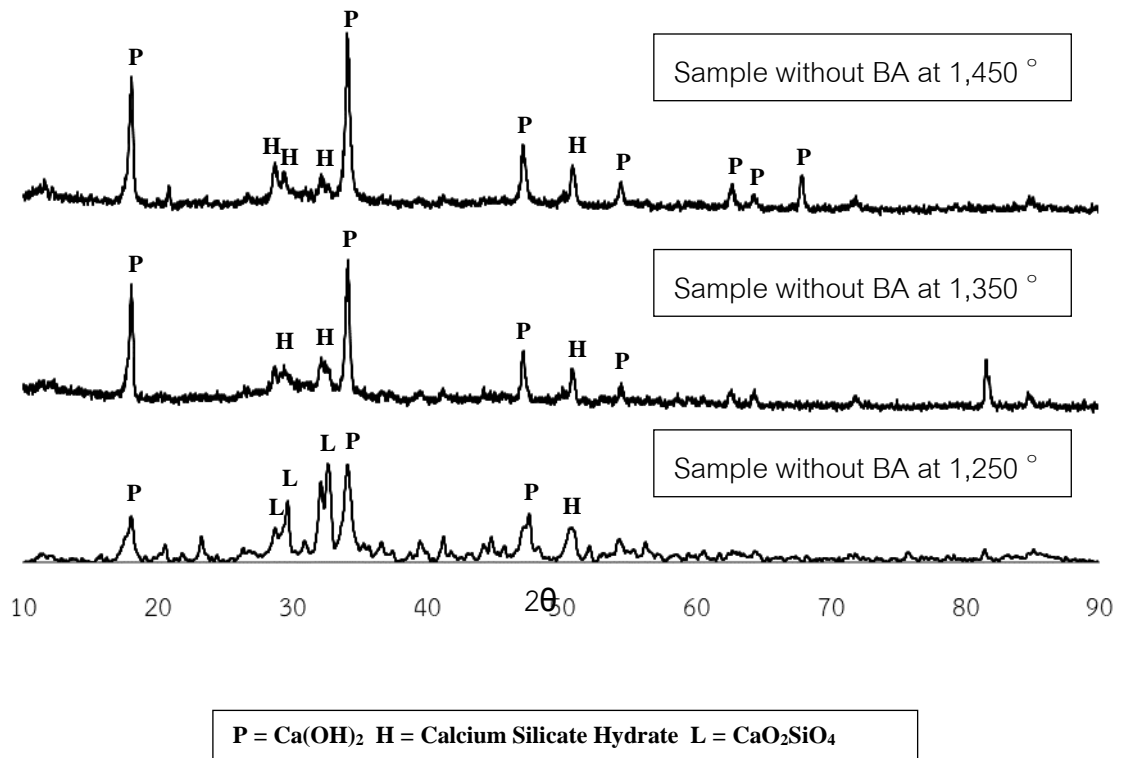


ภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน สังเคราะห์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ด้วยกระบวนการเผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

#### 4.2.3 การศึกษาผลผลิตกัณฑ์ไฮดรเจนของซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการเผาร่วมกับเถ้าขานอ้อย

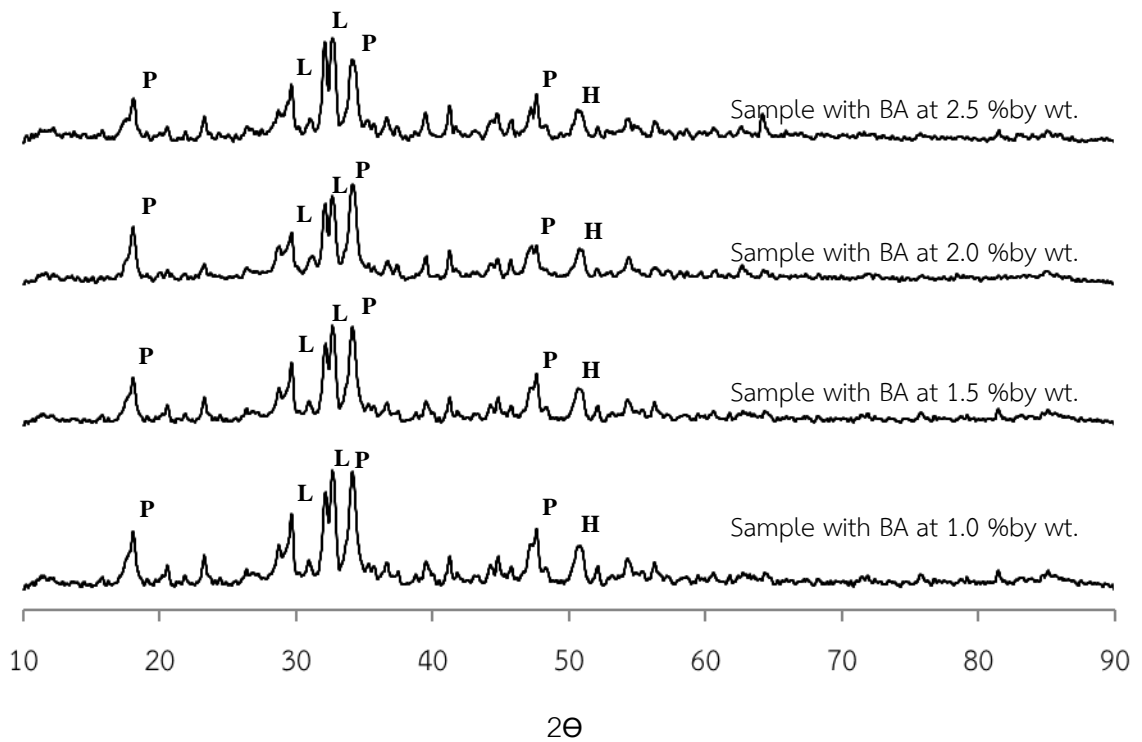
นอกจากการศึกษาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่ทำการเผาร่วมกับเถ้าขานอ้อยด้วยวิธีการทดสอบค่าการรับกำลังอัดของตัวอย่าง ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลผลิตกัณฑ์ไฮดรเจน ได้แก่  $\text{Ca(OH)}_2$  และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ของทุกตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ ณ ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน โดยทำการศึกษาโครงสร้างที่เกิดขึ้นในตัวอย่างหลังจากปฏิกิริยาไฮดรเจนด้วยเทคนิค XRD นอกจากนี้ได้นำตัวอย่างดังกล่าวศึกษารูปร่างผลผลิตกัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM โดยนำข้อมูลที่ได้จากทั้งสองส่วนพิจารณาสนับสนุนผลจากการทดสอบการรับกำลังอัดของตัวอย่างที่เกิดขึ้น

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีเถ้าขานอ้อยและทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน พบว่าปรากฏตำแหน่งของพีค  $\text{Ca(OH)}_2$  ในทุกตัวอย่าง ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $18^\circ$ ,  $34^\circ$ ,  $47^\circ$ ,  $54.5^\circ$ ,  $63^\circ$ ,  $64^\circ$  และ  $68^\circ$  (อ้างอิงจาก JCPDs 44-1481) โดยความสูงของพีคสูงสุดในตัวอย่างที่สังเคราะห์โดยใช้ อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาในส่วนของเฟส CSH ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนา กำลังอัดพบว่าปรากฏตำแหน่งของพีค CSH ในทุกตัวอย่าง โดยพบที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $29^\circ$ ,  $31^\circ$  และ  $51^\circ$  (อ้างอิงจาก JCPDs 33-0306) โดยเฟส CSH ปรากฏสูงสุดในตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ที่ อุณหภูมิ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 การวิเคราะห์สารประกอบซีเมนต์มอร์ต้าที่ไม่ได้เผาพร้อมกับเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 1,250, 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

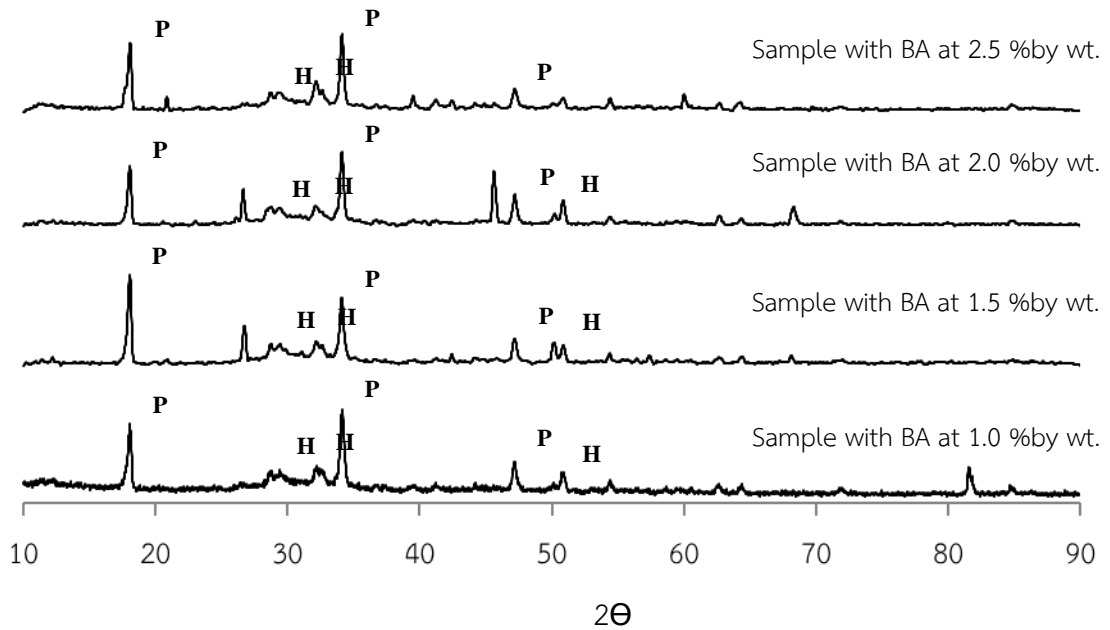
อย่างไรก็ตามพบว่ามีตำแหน่งของพีคสารประกอบ lanite (C<sub>2</sub>S) ปรากฏอยู่สำหรับตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส โดยข้อเสียของเฟสดังกล่าว คือ ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ช้าเมื่อเทียบกับเฟส C<sub>3</sub>S โดยสาเหตุที่ตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส พบเฟส lanite (C<sub>2</sub>S) มากกว่าอุณหภูมิ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส เนื่องจากความร้อนไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบหลัก C<sub>3</sub>S



ภาพที่ 4.22 การวิเคราะห์สารประกอบซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกัน โดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

จากนั้นทำการศึกษาตัวอย่างที่เผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกัน ได้แก่ ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 โดยน้ำหนัก โดยส่วนแรกทำการศึกษาที่อุณหภูมิในการเผา 1,250 องศาเซลเซียส พบว่าปรากฏตำแหน่งของพีค  $\text{Ca(OH)}_2$ , CSH และ Larnite ในทุกตัวอย่าง โดยพบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $18^\circ$ ,  $34^\circ$ ,  $47^\circ$ ,  $54.5^\circ$ ,  $63^\circ$ ,  $64^\circ$  และ  $68^\circ$  (อ้างอิงจาก JCPDs 44-1481) ตำแหน่งของ CSH ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $58^\circ$  (อ้างอิงจาก JCPDs 33-0306) และ ตำแหน่งของพีค lanite ( $\text{C}_2\text{S}$ ) ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $28.5^\circ$ ,  $29^\circ$  และ  $31.5^\circ$  (อ้างอิงจาก JCPDs 49-1673) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแต่ละสัดส่วนการแทนที่เถ้าขานอ้อยพบว่าเมื่อเพิ่มร้อยละของเถ้าขานอ้อยในการเผาสูงขึ้น ความสูงของพีคหลักผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ได้แก่  $\text{Ca(OH)}_2$  และ CSH มีความสูงไม่แตกต่างกันมาก โดยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณเฟสที่เกิดขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการรับกลับอัดที่แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าที่ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส

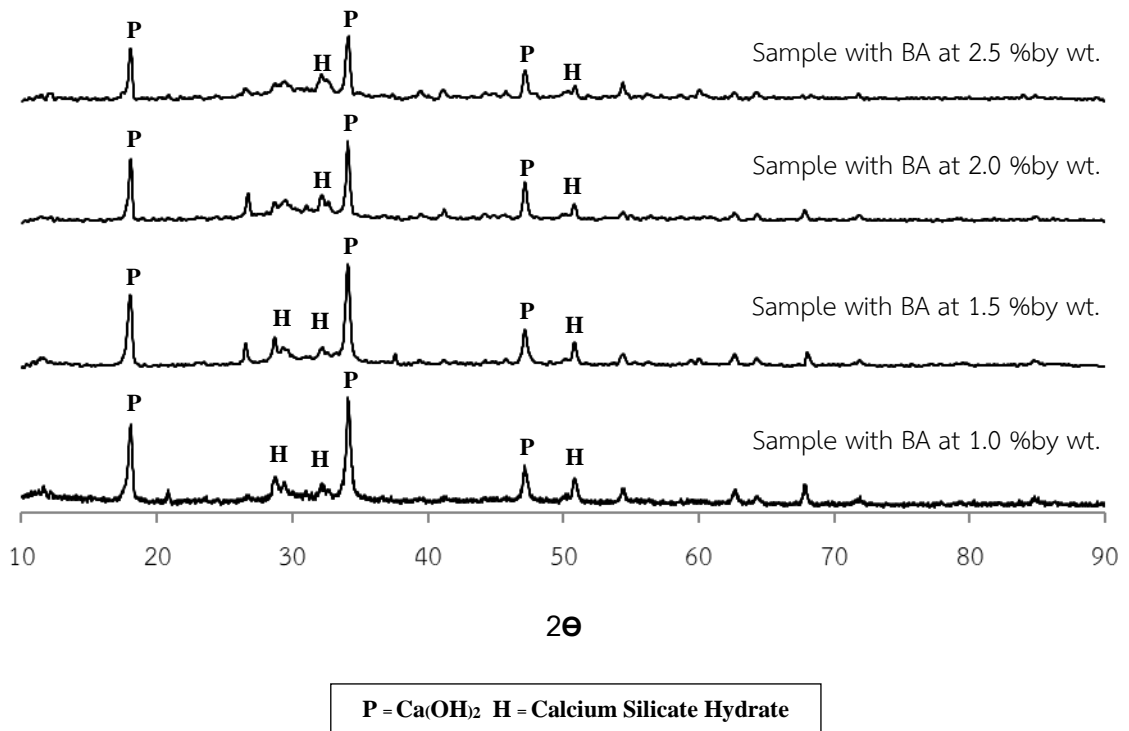




P =  $\text{Ca(OH)}_2$  H = Calcium Silicate Hydrate

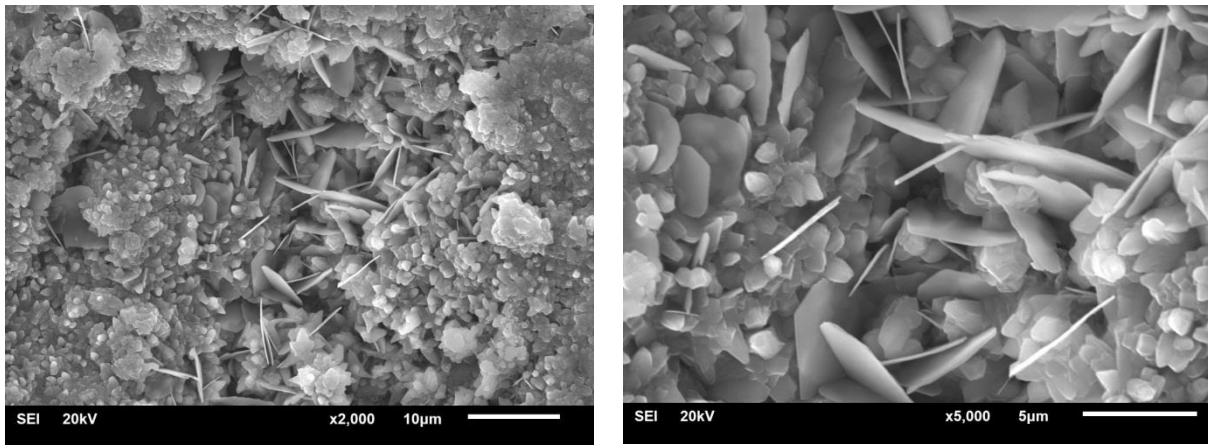
ภาพที่ 4.23 การวิเคราะห์สารประกอบซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกัน โดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

เมื่อทำการศึกษาในส่วนของตัวอย่างที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าขานอ้อยและทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,350 องศาเซลเซียส พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส โดยพบตำแหน่งของพีคผลึกภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ในทุกลักษณะที่มีการแทนที่ และตำแหน่งที่ปรากฏผลึกภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ ได้แก่  $\text{Ca(OH)}_2$  และ CSH เกิดขึ้นในตำแหน่งเดียวกันในทุกตัวอย่าง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าขานอ้อยความสูงของพีคดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง โดยประเด็นที่แตกต่างกับตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส พบว่าพีคของ lanite ( $\text{C}_2\text{S}$ ) ที่เคยเกิดในตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $28.5^\circ$ ,  $29^\circ$  และ  $31.5^\circ$  ได้หายไป อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส พบว่าความสูงของพีคผลึกภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ยังคงต่ำกว่าที่เกิดขึ้นในอุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส

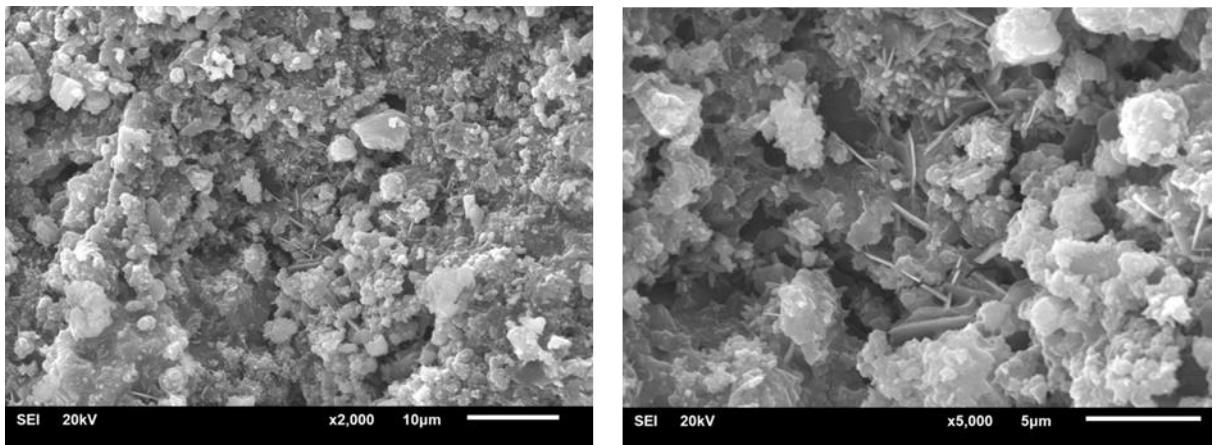


ภาพที่ 4.24 การวิเคราะห์สารประกอบซีเมนต์มอร์ต้าที่เผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อยที่สัดส่วนแตกต่างกัน โดยสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

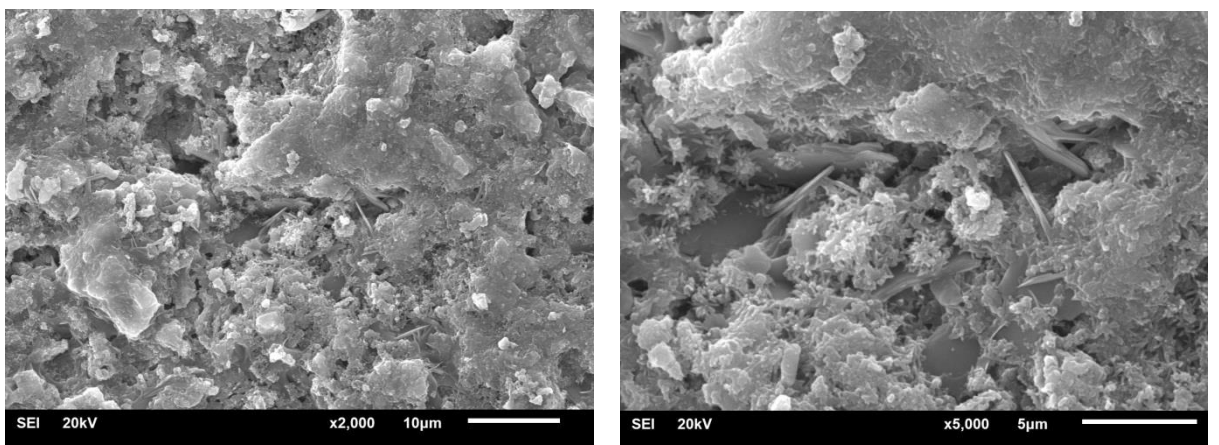
ในกรณีของตัวอย่างที่เผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อยที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส พบว่าปรากฏตำแหน่งของพีค  $\text{Ca(OH)}_2$  และ CSH ในทุกตัวอย่าง และไม่ปรากฏพีคของ lanite ( $\text{C}_2\text{S}$ ) โดยพบ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $18^\circ$ ,  $34^\circ$ ,  $47^\circ$ , และ  $54.5^\circ$  (อ้างอิงจาก JCPDs 44-1481) และตำแหน่งของ CSH ปรากฏที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $28.5^\circ$ ,  $29^\circ$  และ  $31.5^\circ$  (อ้างอิงจาก JCPDs 33-0306) และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแต่ละสัดส่วนการแทนที่เถ้าขานอ้อยพบว่าเมื่อเพิ่มร้อยละของเถ้าขานอ้อยในการเผาสูงขึ้น ความสูงของพีคผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ได้แก่  $\text{Ca(OH)}_2$  และ CSH มีความสูงลดลง โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อแทนที่เถ้าขานอ้อยที่ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก เป็นต้นไป อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการรับกำลังอัดของตัวอย่างที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก เป็นต้นไปให้ค่าการรับกำลังที่ต่ำกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547 ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก XRD ที่บ่งบอกว่าเมื่อเพิ่มร้อยละการเผาพร้อมมากขึ้นผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เกิดขึ้นลดลง โดยเฉพาะตัวอย่างที่เผาพร้อมมากกว่าร้อยละ 1.0 เป็นต้นไป เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการทดลองที่ได้นักวิจัยได้ทำการศึกษาในส่วนของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวอย่างด้วยเทคนิค SEM เพิ่มเติม พบว่าที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส มีการปรากฏเฟสของ  $\text{Ca(OH)}_2$  มากกว่าตัวอย่างที่ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.25



(a) 1,250 °C with BA (1%) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ 5,000 เท่า



(b) 1,350 °C with BA (1%) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ 5,000 เท่า



(c) 1,450 °C with BA (1%) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ 5,000 เท่า

ภาพที่ 4.25 ตัวอย่างซีเมนต์ที่เผาพร้อมด้วยเถ้าขาน้อยร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สังกะระห์ที่อุณหภูมิ 1,250, 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน

นอกจากนี้พบว่าไม่ปรากฏเฟสของ CSH คาดว่าปริมาณเฟส  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ปรากฏมากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ทำการเผาพร้อมกับอนุหภูมิอื่นๆ มีสาเหตุมาจากในขั้นตอนการสังเคราะห์ปูนเม็ดมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ หรือ free lime มากกว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ที่ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส โดยแคลเซียมออกไซด์อิสระมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเฟสดังกล่าวช่วยเพิ่มกำลังในขั้นต้นแต่ในระยะยาวจะส่งผลให้ปูนซีเมนต์มีการแตกร้าว เนื่องจากการพัฒนากำลังของเฟสดังกล่าวไม่ได้เกิดจากการทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงเหมือนการพัฒนาโดยเฟส CSH เมื่อพิจารณาพื้นผิวของตัวอย่างที่เผาพร้อมกับเถ้าขานอ้อยที่ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1,350 และ 1,450 องศาเซลเซียส พบว่าปรากฏทั้งเฟสของ  $\text{Ca(OH)}_2$  และ Needle CSH ในบนพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งผลที่ได้สนับสนุนข้อมูลจากการศึกษาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันด้วยเทคนิค XRD ที่ปรากฏตำแหน่งของพีค  $\text{Ca(OH)}_2$  และ CSH ในตัวอย่าง

ดังนั้นจากการศึกษาในทุกการทดลองตั้งแต่การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าขานอ้อยตลอดจนการนำเถ้าขานอ้อยมาเผาพร้อมกับอนุหภูมิต่างๆ ในสัดส่วนที่แตกต่างกันเพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติของการเป็นปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ พบว่าเถ้าขานอ้อยมีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุปอซโซลานแต่เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่มีสีดำทำให้ไม่นิยมนำมาใช้ในงานในบางประเภท ดังนั้นเมื่อนำมาเป็นวัสดุทดแทนในการเผาพร้อมกับวัสดุหลักในกระบวนการผลิตซีเมนต์พบว่าสีดำดังกล่าวหายไป เนื่องจากคาร์บอนที่สะสมในตัวเถ้าขานอ้อยถูกสลายที่อุณหภูมิสูง

**ตารางที่ 4.5** สรุปสัดส่วนที่เหมาะสมในการนำเถ้าขานอ้อยมาเป็นวัสดุทดแทนในการเผาพร้อมกับวัสดุหลักของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547

อุณหภูมิในการเผาพร้อม	ร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อยในการเผาพร้อมกับวัสดุหลัก				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
1,250 °C	X	X	X	X	X
1,350 °C	X	X	X	X	X
1,450 °C	✓	✓	X	X	X

เมื่อนำมาวิเคราะห์เฟสขององค์ประกอบปูนเม็ดที่ต้องการ พบว่าการเผาพร้อมที่อุณหภูมิแตกต่างกันให้ปริมาณเฟสหลักที่ต้องการต่างกัน โดยที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส พบว่ามีเฟส  $\text{C}_2\text{S}$  และ  $\text{C}_3\text{S}$  เกิดขึ้นในปริมาณสูงสุด ซึ่งเป็นเฟสที่ช่วยในเรื่องการพัฒนากำลัง อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อทำการเผาพร้อมเถ้าขานอ้อยมากกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก เฟสขององค์ประกอบหลักมีแนวโน้มลดลง อันมีสาเหตุมาจากสัดส่วนขององค์ประกอบเริ่มต้นในการทำปฏิกิริยาไม่เหมาะสม จึงไม่สามารถเกิดองค์ประกอบที่ต้องการได้ ท้ายที่สุดเมื่อนำตัวอย่างทั้งหมดที่สังเคราะห์ที่ทำการศึกษาค่ากำลังอัดที่ระยะเวลา 1, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบในรูปของซีเมนต์มอร์ต้า พบว่าตัวอย่างที่ทำการเผาพร้อมด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0.5 และ 1.0 ที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ 1,450 องศาเซลเซียส ให้ค่าการรับกำลังอัดที่สูงสุด โดยผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547 ดังนั้นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำเถ้าขานอ้อยไปใช้ในการเผาพร้อมของกระบวนการผลิตซีเมนต์ ได้แก่ ร้อยละ 0.5 ถึง 1.0

#### 4.3 แนวทางการนำถ้ำชานอ้อยไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ในการพิจารณาการนำถ้ำชานอ้อยไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบที่ไม่มีสารปนเปื้อนที่ส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่าองค์ประกอบหลักของถ้ำชานอ้อยมีศักยภาพในการนำไปเป็นวัตถุดิบทดแทน และจากการทดสอบพบว่าการเผาพร้อมด้วยถ้ำชานอ้อยในสัดส่วนไม่เกิดรอยละ 1 ให้ผลการพัฒนากำลังผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 15 เล่ม 1-2547 ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงการใช้งานพบว่ามีเป็นไปได้ในการนำไปใช้งาน แต่มีความจำเป็นต้องนำประเด็นเรื่องต้นทุนของการนำถ้ำชานอ้อยมาใช้งานเพื่อประกอบการพิจารณาไปด้วย โดยพบว่าปัจจัยที่เป็นต้นทุนของการนำถ้ำชานอ้อยไปใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน ได้แก่ ค่าพลังงานในการบดถ้ำชานอ้อยให้ได้ขนาดใกล้เคียงกับวัตถุดิบที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และ ค่าขนส่งถ้ำชานอ้อยจากแหล่งกำเนิดไปสู่โรงงานผลิต ในประเด็นแรกเกี่ยวกับค่าพลังงานในการบดถ้ำชานอ้อยพบว่าปัจจุบันกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จำเป็นต้องบดวัตถุดิบเพื่อควบคุมขนาดก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิตอยู่แล้ว ดังนั้นการบดถ้ำชานอ้อยถือว่าไม่ได้เพิ่มเติมต้นทุนส่วนนี้ให้กับทางโรงงานผู้ผลิต ในทางกลับกันขนาดของถ้ำชานอ้อยก่อนบดพบว่ามีความเล็กกว่าวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติที่ได้จากการสัมปทานเหมือง และลักษณะของผลึกของถ้ำชานอ้อยพบว่าสามารถบดเพื่อลดขนาดได้ง่าย ดังนั้นในส่วนของค่าพลังงานที่ใช้ในส่วนนี้คาดว่าน้อยกว่าการใช้วัตถุดิบในปัจจุบัน กรณีปัจจัยที่สองที่คาดว่าส่งผลต่อต้นทุนของผลิตภัณฑ์ คือ ค่าขนส่งถ้ำชานอ้อยจากแหล่งกำเนิดไปสู่โรงงานผลิต เนื่องจากปัจจุบันโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ขนาดใหญ่พบว่าส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในพื้นที่เดียวกับเหมืองที่ทำการขอสัมปทานเพื่อนำวัตถุดิบมาป้อนกระบวนการผลิต และจากข้อมูลที่ทำการศึกษาเบื้องต้นพบว่าโรงงานผลิตปูนซีเมนต์รายใหญ่ของประเทศไทยตั้งอยู่คนละพื้นที่กับโรงงานอ้อยและน้ำตาลซึ่งเป็นแหล่งที่มาของถ้ำชานอ้อย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีต้นทุนในเรื่องการขนส่งถ้ำชานอ้อยจากแหล่งกำเนิดไปสู่โรงงานผลิตปูนซีเมนต์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยขึ้นอยู่กับระยะทางและรูปแบบการขนส่ง โดยแนวทางการลดต้นทุนในเรื่องการขนส่ง ทางผู้วิจัยเสนอให้มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการนำถ้ำชานอ้อยไปกำจัดหรือการนำไปใช้กับโรงงานผลิตขนาดเล็กในพื้นที่แหล่งกำเนิดหรือศึกษารูปแบบการขนส่งที่ให้ปริมาณเยอะที่สุดเพื่อลดต้นทุนที่จะเกิดขึ้น

## บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

### 5.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash, BA) สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การวิเคราะห์เถ้าชานอ้อยก่อนนำไปศึกษาผลที่มีต่อคุณสมบัติของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์พบว่าลักษณะภาพนอกมีสีดำสนิท องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) โซเดียมไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) โพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) อะลูมิเนียมไดออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) คลอไรด์ (Cl) ไดฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) แมงกานีสไดออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) โดยแต่ละองค์ประกอบมีปริมาณร้อยละ 68.60 1.07 3.92 3.97 7.85 3.16 0.95 1.71 1.69 0.27 0.14 และ 1.44 ตามลำดับ และพบว่าซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงสุด ในส่วนของลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาค พบว่าเถ้าชานอ้อยมีรูพรุนไม่แน่นอน พื้นผิวขรุขระ ขนาดไม่สม่ำเสมอ ภายในมีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 14.79 ตารางเมตรต่อกรัม มีปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.03348 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 90.53 Å ( $\text{Å} = 10^{-10}$  เมตร) ตามลำดับ ดังนั้นหากพิจารณาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าชานอ้อยเบื้องต้นพบว่ามีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในกระบวนการผลิตซีเมนต์ แต่ต้องพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเผาร่วมระหว่างเถ้าชานอ้อยและวัตถุดิบหลัก

### 5.2 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการเผาร่วมเถ้าชานอ้อยกับวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

ส่วนผสมของปูนเม็ดที่เผาร่วมระหว่างเถ้าชานอ้อยและวัตถุดิบหลักก่อนเผาพบว่ามีส่วนที่เข้มข้นกว่าส่วนผสมหลังเผา โดยใกล้เคียงกับรหัส TOA 8251 และ TOA 8595 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากการเผาเพื่อสังเคราะห์ปูนนั้นใช้อุณหภูมิที่สูง ส่งผลให้สารอินทรีย์ เช่น คาร์บอน เกิดการสลายตัว ทำให้มีเฉดสีที่สว่างขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อนำเถ้าชานอ้อยมาเผาร่วมกับวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่ำ ( $1,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือไม่ถูกนำไปใช้ทำปฏิกิริยา โดยค่า free lime จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเผาร่วมที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเกิดเป็นเฟสหลักของปูนเม็ดมากขึ้น โดยเฉพาะเฟสที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ ได้แก่ Tricalcium silicate ( $\text{CaO}_3\text{SiO}_5$ ) และ Dicalcium silicate ( $\text{CaO}_2\text{SiO}_4$ ) ดังนั้นตัวอย่างที่มีความเหมาะสมในการนำไปเป็นปูนซีเมนต์ คือ ตัวอย่างที่ทำการเผาร่วมและสังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงเพียงพอให้ แคลเซียมออกไซด์ถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยา และเมื่อทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของตัวอย่างที่ทำการเผาร่วมด้วยวัตถุดิบในกระบวนการผลิตพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำเถ้าชานน้อยไปใช้ในการเผาร่วมของกระบวนการผลิตซีเมนต์ ได้แก่ ร้อยละ 0.5 ถึง 1.0 เนื่องจากให้ค่าการพัฒนากำลังอัดที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2547 (ไม่น้อยกว่า 28 MPa) โดยความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าของตัวอย่างดังกล่าวที่ระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน ให้ค่า 29.01 และ 28.59 MPa ตามลำดับ

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1) งานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยใช้เตาเผาในห้องปฏิบัติการโดยเตาเผาดังกล่าวมีลักษณะที่แตกต่างกับเตาเผาในกระบวนการผลิตจริงซึ่งมีการหมุนตลอดเวลาในกระบวนการเผา ดังนั้นในการผลิตที่อุณหภูมิเดียวกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการอาจส่งผลให้เกิดสารประกอบของปูนเม็ดที่ต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนของเตาเผาที่มีลักษณะหมุนได้สามารถสัมผัสได้ทั่วถึงมากกว่าการเผาในห้องปฏิบัติการปกติ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาโดยใช้เตาเผาแบบหมุนซึ่งใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมซีเมนต์ เพื่อเป็นแนวทางการลดพลังงานในระดับอุตสาหกรรมเพื่อยืนยันผลที่ได้

2) ในการประเมินการใช้งานควรนำปัจจัยอื่น ๆ สภาพแวดล้อมที่ใช้งานร่วมประกอบในการพิจารณาด้วย อาทิเช่น การใช้งานที่ต้องการความทนต่อสภาพการเป็นกรดต่าง การทนต่อสภาพซัลเฟตและคลอไรด์ เป็นต้น เนื่องจากมีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

3) ควรมีการส่งเสริมให้มีการใช้เถ้าขานอ้อยในการแทนที่วัสดุดิบในกระบวนการผลิตซีเมนต์สำหรับแหล่งผลิตในพื้นที่ใกล้เคียงกับแหล่งก่อกำเนิดเถ้าขานอ้อย เพื่อลดต้นทุนในการขนส่งและลดผลกระทบในการบริหารจัดการทางสิ่งแวดล้อมของแต่ละโรงงาน

## บรรณานุกรม

1. บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด มหาชน, การนำกากของเสียมาใช้ในการเผา [Online], Available:[http://www.siamcitycement.com/about/environmental/ecosiam/ecosiam.aspx?lag=th\[2549,สิงหาคม 19\]](http://www.siamcitycement.com/about/environmental/ecosiam/ecosiam.aspx?lag=th[2549,สิงหาคม 19])
2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2538, การกำจัดของเสียโดยการเผาพร้อมในหม้อเผาปูนซีเมนต์ในประเทศไทย, บริษัทปูนซีเมนต์ไทย(แก่งคอย) จำกัด หน้า 1-8.
3. เจตพล เอम्मณี ,2547, การจัดการกากอุตสาหกรรม : การจัดการประเภทกากอุตสาหกรรมในมุมมองของการกำจัดในอุตสาหกรรมซีเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า ๓
4. บุญรักษ์ กาญจนวรวณิษฐ์, 2556, เถ้าแกลบ ของเหลือสารพัดประโยชน์ [ออนไลน์], Available : [http://www.mtec.or.th/index.php\[5 มกราคม 2558\]](http://www.mtec.or.th/index.php[5 มกราคม 2558]).
5. Office of Cane and Sugar Board, 2010, Report on total cane crushing and sugar production 2009/2010, Thailand: Ministry of Industry.
6. Office of Cane and Sugar Board, 2010, Report on total cane crushing and sugar production 2009/2010, Thailand: Ministry of Industry.
7. Cordeiro, G.C., Filijp, R.D.T., Fairbairt, E.M.R., Luis, M.M.T., and Oliver, C.H., 2004, “Influence of mechanical grind on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash”, proceedings of the international conference on use of recycled materials in building and
8. Martirena Hernandez, J.F., Middendorf, B., Gehrke, M., and Budelmann, H., 1998, “Use of waste of sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction”, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 11, pp. 1525-1536.
9. Singh, N.B., Singh, V.D., and Rai, S., 2000, “Hydration of bagasse ash-blended Portland cement”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 9, pp. 1485-1488.
10. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Diaz-Pinzon, L., and Ordonez, L.M., 2002, “Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production”, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol. 77, No. 3, pp. 321-325.
11. Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M., and Fairbairn, E.M.R., 2008, “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars”, Cement and Concrete Composites, Vol. 30, No. 5, pp. 410-418.
12. Villar-Cocina, E., Frias, M., and Valencia-Morales, E., 2008, “Sugar cane wastes as pozzolanic materials: Application of mathematical model”, ACI Materials Journal, Vol. 105, No. 3, pp. 258-264.
13. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2009, “Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars”, Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 12, pp. 3523-3531.



14. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2009, "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete", Construction and
15. ปริญา จินดาประเสริฐ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 1 สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.).
16. ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2540, **คอนกรีตเทคโนโลยี**, คอนกรีตผสมเสร็จจซีแพค, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, หน้า 9-24.
17. วินิต ช่อวิเชียร, 2539, คอนกรีตเทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่ 8, ป.สัมพันธ์พานิชย์, หน้า 6-16.
18. อิติพันธุ์ ทองเต็ม, 2557, การสังเคราะห์วัสดุนาโนโดยวิธีไมโครเวฟ, ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
19. อิติพันธุ์ ทองเต็ม, 2557, การสังเคราะห์วัสดุนาโนโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล, ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
20. อนุสรณ์ ธรรมใจ, 2558, แนวโน้มการส่งออกและทิศทางการอุตสาหกรรมไทยปี 2557, [ออนไลน์]<http://www.bangkokbiznews.com/blog/detail/549612>.
20. Office of Cane and Sugar Board, 2010, *Report on total cane crushing and sugar production 2009/2010*, Thailand: Ministry of Industry.
21. Cordeiro, G.C., Filijp, R.D.T., Fairbairt, E.M.R., Luis, M.M.T., and Oliver, C.H., 2004, "Influence of mechanical grind on the pozzolanic activity of residual sugarcane bagasse ash", *Proceedings of the international conference on use of recycled materials in building and structure*, Barcelona; pp. 342.
22. Martirena Hernandez, J.F., Middendorf, B., Gehrke, M., and Budelmann, H., 1998, "Use of waste of sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: Study of the reaction", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 11, pp. 1525-1536.
23. Singh, N.B., Singh, V.D., and Rai, S., 2000, "Hydration of bagasse ash-blended Portland cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 1485-1488.
24. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Diaz-Pinzon, L., and Ordonez, L.M., 2002, "Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 77, No. 3, pp. 321-325.
25. Cordeiro, G.C., Toledo Filho, R.D., Tavares, L.M., and Fairbairn, E.M.R., 2008, "Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 5, pp. 410-418.
26. Villar-Cocina, E., Frias, M., and Valencia-Morales, E., 2008, "Sugar cane wastes as pozzolanic materials: Application of mathematical model", *ACI Materials Journal*, Vol. 105, No. 3, pp. 258-264.
27. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2009, "Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 12, pp. 3523-3531.

28. Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 2009, "Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 11, pp. 3352-3358.
29. Singh, N.B., Singh, V.D., and Rai, S., 2000, "Hydration of bagasse ash-blended portland cement", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp. 1485- 1488.
30. Cordeiro, G.C., Filho, R.D.T., Tavares, L.M., Fairbairn, E.M.R., 2008, "Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars", *Cement and Concrete Composites*, Vol.30, pp. 410-418.
31. Catia, F., Gerhard E., Guiherme, F.B., Joao, B.F., Fernando, J.G., Ricardo, L. and Tiago R., 2014, "An analysis of Brazilian sugarcane bagasse ash behavior under thermal gasification", *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, pp.1-9.
32. Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R., 2003, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material", *Journal of Materials in civil Engineering : ASCE*, Vol. 15, pp. 48-54
33. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, วลัยลักษณ์ สาระจันทร์, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และเอกชัย ภัทรวงศ์ไพบูลย์, 2550, "ผลกระทบของความละเอียดและอัตราการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ต่อกำลังอัดและอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, 2-4 พฤษภาคม, จ.พิษณุโลก, หน้า MAT 55-60.