



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“การผลิตวัสดุซีเมนต์ชนิดที่มีเบไลต์เป็นองค์ประกอบสูงจากวัสดุเหลือใช้
จากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อประหยัดพลังงาน”

“Production of High Belite Cement from Industrial By-Productions for Saving Energy”

โดย

ดร.เกศรินทร์ พิมรักษา

น.ส.สกลวรรณ ท่านจิตสุวรรณ

มิถุนายน 2550

สัญญาเลขที่ RDG4950008

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

“การผลิตวัสดุซีเมนต์ชนิดที่มีเบไลต์เป็นองค์ประกอบสูงจากวัสดุเหลือใช้
จากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อประหยัดพลังงาน”

“Production of High Belite Cement from Industrial By-Products for Saving Energy”

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1.ดร.เกสรินทร์ พิมรักษา

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

2.น.ส.สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ชุดโครงการ

“ วิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม ปี 2548”

สนับสนุนโดยงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.)

และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ภายใต้โครงการทุนวิจัยสาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อมประจำปี 2548 ในการสนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง, โรงงานผลิตปุ๋ยแห่งชาติ จังหวัดระยอง, โรงงานถลุงสังกะสี จังหวัดตากที่อนุเคราะห์วัสดุดิบสำหรับใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบตัวอย่างและให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคลากรและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ ที่มีส่วนทำให้งานวิจัยนี้สามารถทำได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้สามารถนำมาให้เป็นแนวทางสำหรับการสังเคราะห์ซีเมนต์ต่อไป

ดร. เกศรินทร์ พิมรักษา

น.ส.สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์เบไลต์ซีเมนต์โดยใช้วัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ ซึ่งศึกษาการสังเคราะห์ 2 วิธี คือการสังเคราะห์แบบเผาหรือเรียกว่า clinkerization และการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอล

การสังเคราะห์แบบเผาได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ อุณหภูมิการสังเคราะห์, อัตราในการขึ้นอุณหภูมิ, อัตราการเย็นตัว และชนิดของไอออน และวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดจากองค์ประกอบทางแร่ ผลการทดลองพบว่าเฟสที่พบในปูนเม็ด คือ larnite (β -C₂S) และ gehlenite (C₂AS) และเบไลต์ซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดที่ 28 วัน และ 45 วัน เท่ากับ 16.15 และ 18.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

การสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอลได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์และอุณหภูมิในการแคลไซน์ วิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดจากองค์ประกอบทางแร่และโครงสร้างทางจุลภาค พบว่าเฟสที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดก่อนแคลไซน์ คือ katoite (Ca₃Al₂SiH₈O₁₂) และเฟสนี้จะเปลี่ยนเป็นเบไลต์เฟส (α' -C₂S และ β -C₂S) เมื่อแคลไซน์ปูนเม็ด และเบไลต์ซีเมนต์มอร์ตาร์มีค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดที่ 28 วันเท่ากับ 49-93 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

คำสำคัญ : ซีเมนต์เบไลต์, แก้วลอย, กระบวนการเผา, กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล, การละลายและการตกตะกอน

Abstract

In this research, a high belite cement is synthesized by using industrial by-products as starting materials. There are two pathways; firing so called “clinkerization” and hydrothermal processes used for the synthesis.

Clinkerization process; the studied parameters are firing temperature, heating rate, cooling rate and types of mineralizer. The clinkers are investigated in term of phase composition. As a result, the clinkers mostly consist of larnite and gehlenite phases and compressive strength at 28 days and 45 days of belite rich cement mortar are 16.15 and 18.90 kg/cm², respectively.

Hydrothermal process; the synthesis is studied by using different alkali concentrations and different temperatures of calcination. The calcined phases are investigated in terms of phase composition and microstructure. The hydrothermal products are katoite and afterwards transformed into belite cement by calcination. The compressive strength at 28 days of belite rich cement mortar giving a 49-93 kg/cm².

Keywords: Belite rich cement, Fly ash, Clinkerization process, Hydrothermal process, Dissolution-precipitation

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	2
2.1 วัสดุซีเมนต์	3
2.2 ซีเมนต์เบโกลต์	7
2.3 เถ้าลอย	11
2.4 วิธีสังเคราะห์ซีเมนต์เบโกลต์	13
2.5 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	19
2.6 สาระสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ซีเมนต์เบโกลต์แบบเผา	21
2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ซีเมนต์เบโกลต์แบบไฮโดรเทอร์มอล	24
2.7 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	27
2.8 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา	27
2.9 ขอบเขตการศึกษา	27
บทที่ 3 เครื่องมือ อุปกรณ์ วัสดุดิบ สารเคมี และวิธีการทดลอง	28
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	28
3.2 วัสดุดิบและสารเคมี	28
3.3 วิธีการทดลอง	30
3.3.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบ	31
3.3.2 การสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบเผา	31
3.3.2.1 ศึกษาผลของตัวกลางที่ใช้ในการเย็นตัวต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตที่ 1300°C	31
3.3.2.2 ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์	31
3.3.2.3 ศึกษาผลของชนิดไอออนที่มีต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตที่ 1180°C	31

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต	32
3.3.2.5 ศึกษาผลของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาน้อยต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต	32
3.3.2.6 ศึกษาผลของอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเท่ากับ 3 ต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต	32
3.3.2.7 ศึกษาผลของซัลเฟตต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต	32
3.3.2.8 ศึกษาการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็ก และ อะลูมินา เป็นองค์ประกอบสูง	32
3.3.2.9 ศึกษาการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง	33
3.3.2.10 ศึกษาสมบัติเชิงกล	33
3.3.2.11 ศึกษาผลกระทบต่องี๊วแวดล้อม	33
3.3.3 การสังเคราะห์ไดแคลเซียมซิลิเกตแบบไฮโดรเทอร์มอล	33
3.3.3.1 ศึกษาอุณหภูมิของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอล	34
3.3.3.2 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ด	34
3.3.3.3 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ด	34
3.3.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล	34
3.3.3.5 ศึกษาผลกระทบต่องี๊วแวดล้อม	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	35
4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ	35
4.1.1 ศึกษาค่าพีเอช และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบ	35
4.1.2 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	35
4.1.3 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบ	36
4.2 การสังเคราะห์ไดแคลเซียมซิลิเกตแบบเผา	42
4.2.1 ศึกษาผลของตัวกลางในการเย็นตัวต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกตที่ 1300°C	42
4.2.2 ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์	43
4.2.3 ศึกษาผลของชนิดไอออนที่มีต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกตที่ 1180°C	44
4.2.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต	47
4.2.5 ศึกษาผลของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาน้อยต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกตที่ 1100°C	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.6 ศึกษาผลของอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3 ต่อการเกิด ไดแคลเซียมซิลิเกต	50
4.2.7 ศึกษาผลของซัลเฟตที่มีต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต	51
4.2.8 การสังเคราะห์ซีเมนต์เบสไคต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็ก และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ การสังเคราะห์ซีเมนต์เบสไคต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็ก และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ	54
4.2.9 การสังเคราะห์ซีเมนต์เบสไคต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง	56
4.2.10 ศึกษาสมบัติเชิงกล	59
4.2.11 ศึกษาผลกระทบต่องีงแวดล้อม	60
4.3 การสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอล	63
4.3.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอล	63
4.3.2 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ด	64
4.3.3 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคปูนเม็ด	67
4.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล	69
4.3.5 ศึกษาผลกระทบต่องีงแวดล้อม	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	75
5.1 การสังเคราะห์ไดแคลเซียมซิลิเกตแบบเผา	75
5.2 การสังเคราะห์ไดแคลเซียมซิลิเกตแบบไฮโดรเทอร์มอล	75
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก การคำนวณวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ไดแคลเซียมซิลิเกต	79
ภาคผนวก ข การนำเสนอผลงาน	88

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์	4
ตารางที่ 2.2 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปผลึกของเบไลต์เฟส	8
ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533-2544	12
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นขององค์ประกอบหลักในปูนเม็ดทั้ง 4 ชนิด	14
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพีเอช และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบ	35
ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	36
ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบ	41
ตารางที่ 4.4 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตและเฟสที่ขึ้น	58
ตารางที่ 4.5 แสดงขนาดอนุภาคของปูนเม็ด	59
ตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะเฉพาะของปูนเม็ด	59
ตารางที่ 4.7 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ด	59
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงของมอร์ต้าร์ที่อายุบ่ม 28 และ 45 วัน	59
ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ในวัตถุดิบผสม	60
ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด)	61
ตารางที่ 4.11 แสดงขนาดอนุภาคของปูนเม็ดของทั้ง 3 ระบบ เมื่อแคลไซน์ที่ 750°, 850° และ 950°C	69
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความละเอียดของปูนเม็ดและการก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เบไลต์เฟสทั้ง 3 ระบบ	70
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งแรงของซีเมนต์เบไลต์มอร์ต้าร์ทั้ง 3 ระบบที่อายุบ่ม 28 วัน	70
ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เบไลต์มอร์ต้าร์ของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้น	73

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของปูนเม็ด	4
รูปที่ 2.2 แสดงการพัฒนาความแข็งแรงของ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF	5
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดกับอุณหภูมิ	7
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับรูปผลึกของเบไลต์เฟส	8
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของเบไลต์เฟส (ก) α - C_2S , (ข) α'_H - C_2S , (ค) β - C_2S , (ง) γ - C_2S	9
รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนพลังงานศักย์สำหรับ (ก) ปฏิกิริยาคายความร้อน (ข) ปฏิกิริยาดูดความร้อน	13
รูปที่ 2.7 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ $CaO-Al_2O_3-SiO_2$	17
รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความดันของของเหลวชนิดต่างๆ	18
รูปที่ 2.9 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการละลายและการตกตะกอน	19
รูปที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของ (ก) เถ้าลอย และ (ข) เถ้าหนัก	37
รูปที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าไม้	38
รูปที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของเฝ้าจีดีบีซัม	38
รูปที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของฟอสโฟบีซัม	39
รูปที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของตะกอนจาโรไซด์	39
รูปที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของดินคำแม่ทาน	40
รูปที่ 4.7 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของดินแดงคอยสะเก็ด	40
รูปที่ 4.8 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ $1300^{\circ}C$ และเย็นตัว (ก) ในอากาศ และ (ข) ในลิควิดไนโตรเจน	42
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DTA (mW/mg) กับ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ของวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย	43
รูปที่ 4.10 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ $1180^{\circ}C$ (ก) แคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย (ข) แคลเซียมคาร์บอเนตกับซิลิกอนไดออกไซด์	44
รูปที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และ (ก) 3%แบเรียมคาร์บอเนต (ข) 3%สทรอนเซียมคาร์บอเนต (ค) 3%โพแทสเซียมคาร์บอเนต เมื่อเผาที่ $1180^{\circ}C$	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.12 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย และ (ก) 3%แบเรียมซัลเฟต (ข) 3%แบเรียมคลอไรด์ (ค) 3%แบเรียมคาร์บอเนต เมื่อเผาที่ 1180°C	46
รูปที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย เมื่อเผาที่ (ก) 900°C (ข) 950°C	47
รูปที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย เมื่อเผาที่ (ก) 1000°C (ข) 1050°C (ค) 1100°C (ง) 1180°C	48
รูปที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าเคลบ เมื่อเผาที่ 1100°C	49
รูปที่ 4.16 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอย เมื่อเผาที่ (ก) 1200°C (ข) 1300°C	50
รูปที่ 4.17 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และเอฟจีดีพีซัม เมื่อเผาที่ (ก) 1200°C (ข) 1300°C	51
รูปที่ 4.18 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และเอฟจีดีพีซัม เมื่อเผาที่ 1200°C (ก) SO ₄ = 3.7% (ข) SO ₄ = 19.79%	52
รูปที่ 4.19 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และเอฟจีดีพีซัม (SO ₄ = 3.7%) เมื่อเผาที่ 1200°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (ก) อัตรา 7°C ต่อนาที (ข) อัตรา 10°C ต่อนาที	53
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DTA (mW/mg) กับ อุณหภูมิ (°C) ของวัตถุดิบผสม ระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย, ฟอสโฟปิซัม, อะลูมินา และเฟอร์รัสซัลเฟต	54
รูปที่ 4.21 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย, อะลูมินา, ฟอสโฟปิซัมและเฟอร์รัสซัลเฟตเมื่อเผาที่ (ก) 1200°C (ข) 1300°C	55
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DTA (mW/mg) กับ อุณหภูมิ (°C) ของวัตถุดิบผสม ระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และ (ก) 3%เฟอร์รัสซัลเฟต (ข) 3%เฟอร์รัสออกไซด์	56
รูปที่ 4.23 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ 1180°C ที่ได้จาก (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และ 3%เฟอร์รัสซัลเฟต (ข) แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และ 3%เฟอร์รัสออกไซด์	57
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างกับซีเมนต์เบโลต์ (ปูนเม็ด) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน	61

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) กับ ΔT ของสารประกอบใหม่ที่ได้ หลังการไฮโดรเทอร์มอลระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าลอย	63
รูปที่ 4.26 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย และน้ำ (ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C	64
รูปที่ 4.27 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย, น้ำและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ (ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C	65
รูปที่ 4.28 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย, น้ำและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ (ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C	65
รูปที่ 4.29 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย และน้ำ (ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C	67
รูปที่ 4.30 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย, น้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ (ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C	68
รูปที่ 4.31 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย, น้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ (ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C	68
รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงของซีเมนต์เบโกลต์มอร์ตาร์ทั้ง 3 ระบบ ที่อายุบ่ม 28 วัน	71
รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างกับ ซีเมนต์เบโกลต์มอร์ตาร์ของระบบที่ไม่ถูกกระตุ้นเมื่อแคลไซน์ที่ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะใช้พลังงานทางทฤษฎี 1674-1799 กิโลจูลต่อน้ำหนักปูนเม็ด 1 กิโลกรัม เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อทำปูนเม็ด 1450 องศาเซลเซียส แต่ในทางปฏิบัตินั้นต้องใช้พลังงานถึง 3100-3600 กิโลจูลต่อน้ำหนักปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ซึ่งเป็นพลังงานที่มากกว่าทางทฤษฎี เพราะในระหว่างการผลิตนั้นจะมีการสูญเสียพลังงานไป จะเห็นได้ว่าอุตสาหกรรม การผลิตปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่บริโภคพลังงานเป็นจำนวนมาก และเป็นอุตสาหกรรมอันดับ ต้นๆ ที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในปริมาณมาก ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือน กระจก (greenhouse effect) โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศเป็นอย่างมาก เช่น ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกสูงขึ้น ทำให้ประชากรโลกได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต และอินฟราเรดมากขึ้น [1]

จากผลกระทบที่เกิดขึ้นในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์เบสไลท์จึงเป็นซีเมนต์ชนิด หนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อีกทั้งยังเป็นการลด การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะการผลิตวัสดุซีเมนต์ประเภทนี้จะมีการลดค่า lime saturation factor (LSF) คือ สามารถลดปริมาณการใช้หินปูนที่เป็นวัตถุดิบหลัก และสามารถ ใช้หินปูนที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนต่ำได้ [1] และถึงแม้ว่าซีเมนต์เบสไลท์ไม่ก่อให้เกิดความแข็งแรง ในช่วงแรก แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะมีการพัฒนาความแข็งแรงได้ใกล้เคียงกับซีเมนต์เอไลท์ ฉะนั้น ซีเมนต์เบสไลท์จึงเหมาะกับงานก่อสร้างที่ไม่ต้องการให้มีการแข็งตัวเร็ว เช่น งานผลิตอิฐบล็อก

ถ้าลดยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจัดเป็นวัสดุเหลือใช้อีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากการใช้ถ่านลดยผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในอัตราที่พอเหมาะกับคอนกรีตที่ใช้งานตามความ ต้องการแต่ละประเภทช่วยให้อุตสาหกรรมก่อสร้างได้ใช้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีขึ้นกว่าคอนกรีตที่ ไม่ได้ผสมถ่านลดยแม่เมาะ ทั้งด้านความแข็งแรงคงทนต่อการใช้งาน และการทำงานเทคอนกรีตได้ สะดวกขึ้น อีกส่วนหนึ่งยังช่วยทำให้ราคาค่าต้นทุนในการผลิตคอนกรีตต่ำลงจากการประหยัดปูนซีเมนต์ ไปได้บางส่วน [2] และองค์ประกอบทางเคมีของถ่านลดยแม่เมาะที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา และ แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งคล้ายกับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ จึงมีแนวคิดที่จะใช้ถ่านลดยเป็น วัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเมนต์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการสังเคราะห์ซีเมนต์เบสไลท์จากวัสดุเหลือใช้ เพื่อลดพลังงาน อีกทั้ง ยังเป็นการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ โดยได้ศึกษาถึงการสังเคราะห์ซีเมนต์เบสไลท์จากถ่านลดย ด้วยวิธีการเผาและวิธีไฮโดรเทอร์มอล

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุซีเมนต์ [3]

2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ได้จากการบดปูนเม็ดซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ หินปูน (limestone) กับดินเหนียว (clay) หรือหินดินดาน (shale) ในสัดส่วนที่เหมาะสม ในการผลิตอาจมีการเติมแร่เหล็กหรือยิปซัมตามความจำเป็นเพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติตามความต้องการ

2.1.2 กรรมวิธีการผลิต

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก (wet process) และกระบวนการผลิตแบบแห้ง (dry process) การเลือกกระบวนการผลิตขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ, ความแข็งของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบ ในปัจจุบันนิยมกระบวนการผลิตแบบแห้งเพราะค่าใช้จ่ายถูกกว่า และพลังงานที่ใช้ในการเผาน้อยกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียกมาก

ในกระบวนการผลิตแบบเปียก วัตถุดิบจะผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนด โดยปกติถ้าใช้ดินเหนียวและหินชอล์กจะใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นบดส่วนผสมให้ละเอียดให้หม้อบด น้ำโคลนข้น (slurry) ที่ได้จะนำไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผา วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผาจะมีความชื้นประมาณร้อยละ 35-50

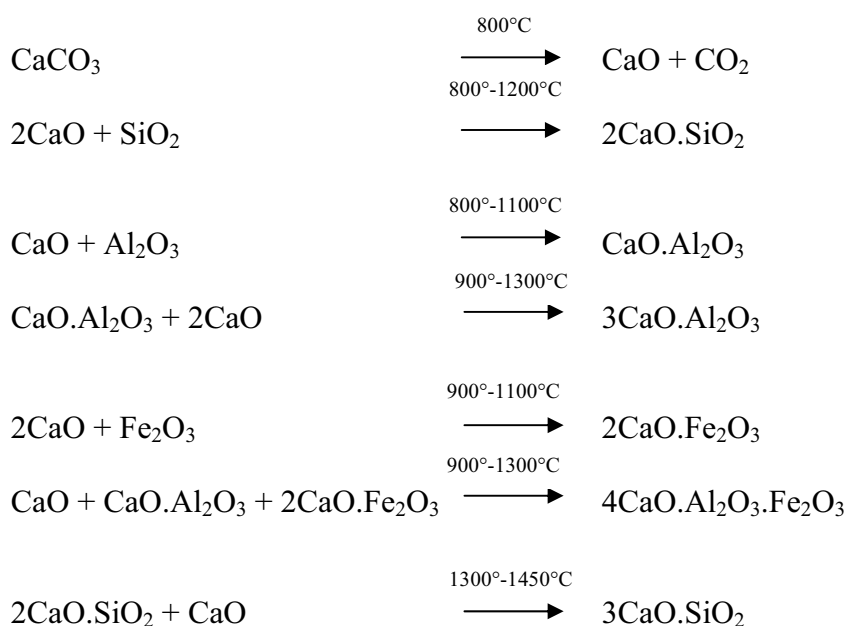
ในกระบวนการผลิตแบบแห้ง วัตถุดิบที่ระเบิดมาจากเหมืองจะนำมาบดให้เล็กลงในเครื่องย่อย จากนั้นจึงนำไปบดละเอียดในหม้อบดวัตถุดิบแล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัตถุดิบ และเพิ่มความร้อนของวัตถุดิบด้วยลมร้อนก่อนส่งเข้าเตาเผา

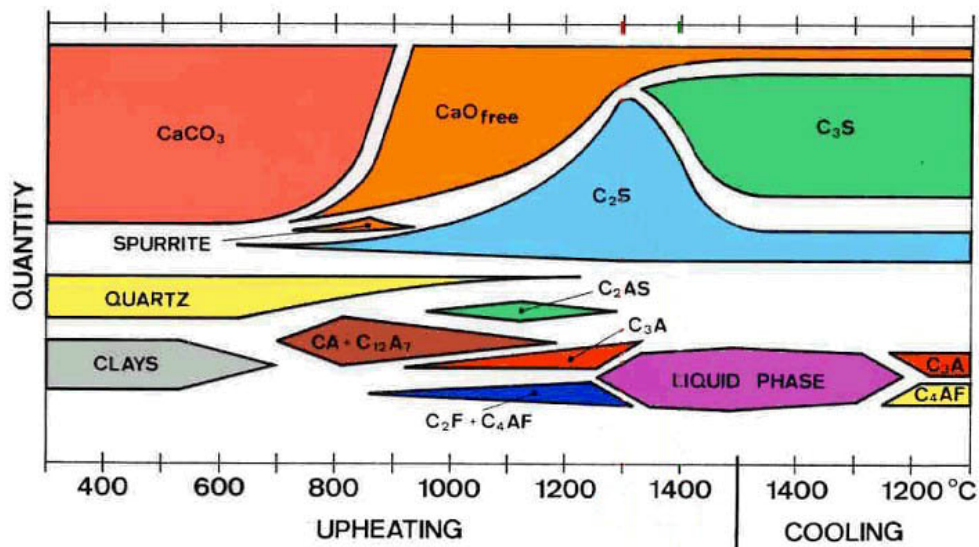
เตาเผาสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์เป็นเตาเผาแบบหมุน ทำด้วยเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกข้างในบุด้วยอิฐทนไฟ เตาเผามีความเอียงจากแนวราบเล็กน้อยประมาณร้อยละ 3-5 และหมุนรอบแกนของทรงกระบอกอย่างช้าๆประมาณ 1-3 รอบต่อนาที

กระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาเผาสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. การขจัดน้ำอิสระออกจากส่วนผสมทั้งหมดโดยการระเหย (evaporation)
2. การขจัดน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ (calcination)
3. การเกิดปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ด เนื่องจากการรวมตัวและการหลอมตัวของออกไซด์ต่างๆ (clinkering)
4. การลดอุณหภูมิ (cooling)

ในขั้นแรกวัตถุดิบที่ป้อนเข้าทางส่วนบนของเตาเผาหลังจากได้รับความร้อนจากอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิ 250-450 องศาเซลเซียส จึงเกิดการระเหยของน้ำรวมถึงเกิดการแตกตัวของน้ำในโครงสร้างของวัตถุดิบผสม ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เกิดการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตได้แคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พร้อมกับเกิดสารประกอบใหม่ คือ C_2S , $C_{12}A_7$, C_2F , C_3A และ C_4AF ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1250 องศาเซลเซียส $C_{12}A_7$ และ C_2F เกิดการหลอมละลายกลายเป็นลิกวิดเฟส และมีบางส่วนของ C_3A และ C_4AF หลอมละลาย และที่ 1300-1450 องศาเซลเซียส C_2S ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือในระบบเกิด C_3S ในส่วนท้ายสุดของเตาเผาอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วส่วนที่หลอมจะมีการตกผลึกบางส่วนเมื่อเย็นตัว และปูนเม็ดจะไหลออกจากเตา ซึ่งอัตราการลดลงของอุณหภูมิมีผลต่อความเป็นผลึกของปูนเม็ด จากนั้นนำปูนเม็ดมาบดร่วมกับยิปซัมร้อยละ 2.5-3 ของน้ำหนักปูนเม็ดเพื่อหน่วงการก่อตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์ ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของปูนเม็ด แสดงดังรูปที่ 2.1





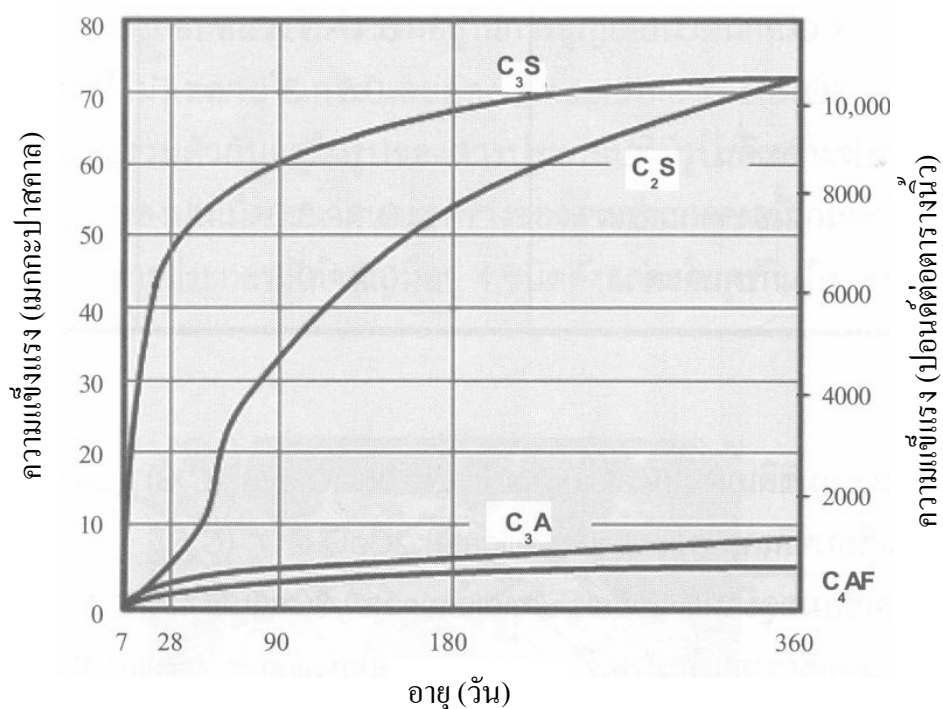
รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของปูนเม็ด [4]

2.1.3 คุณสมบัติของสารประกอบหลัก

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S :alite), ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S :belite), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A :celite) และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF :brownmillerite) เนื่องจากในปูนเม็ดมีปริมาณสารประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 90 จึงทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 2.1 และการพัฒนาความแข็งแรงของสารประกอบหลักแสดงดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ [3]

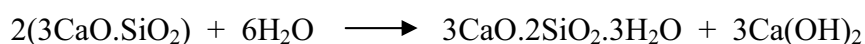
คุณสมบัติ	สารประกอบหลัก			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนาความแข็งแรง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1 วัน)	เร็วมาก (1 วัน)
ความแข็งแรง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง



รูปที่ 2.2 แสดงการพัฒนาความแข็งแรงของ C₃S, C₂S, C₃A และ C₄AF [3]

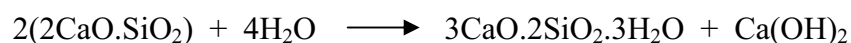
ก) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S)

มีมากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45-55 รูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาแก่ เมื่ออุณหภูมิในเตาเผาเท่ากับ 1250 องศาเซลเซียส อาจเกิดการแตกตัวของ C₃S อย่างช้าๆ และถ้าอุณหภูมิในเตาลดลงต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส C₃S จะมีความเสถียรและไม่เปลี่ยนสภาพ เมื่อ C₃S ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์ และจะให้ความแข็งแรงค่อนข้างดีในช่วง 7 วันแรก ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₃S ทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ 500 จูลต่อกรัม ความร้อนที่คายออกมาเรียกว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (heat of hydration) ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



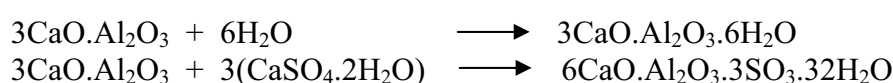
ข) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C₂S)

มีในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 15-35 มีลักษณะเป็นเม็ดกลม เมื่อ C₂S ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งการพัฒนาความแข็งแรงค่อนข้างช้าและช้ากว่า C₃S มาก คือเริ่มให้ความแข็งแรงหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไป ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C₂S ทำให้เกิดความร้อนขึ้นค่อนข้างต่ำประมาณ 250 จูลต่อกรัม ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



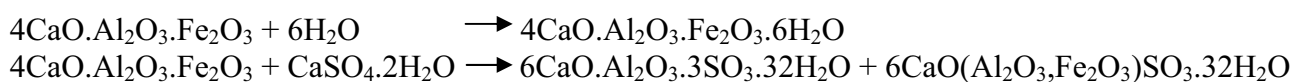
ค) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

มีในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 7-15 รูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อน เมื่อ C_3A ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว สามารถพัฒนาความแข็งแรงได้ภายในวันเดียวแต่ความแข็งแรงที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับ C_3S หรือ C_2S และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าสูงกว่า 880 จูลต่อกรัม ดังนั้นจึงมีการเติมยิปซัมเพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่ง C_3A ทำปฏิกิริยากับไอออนของซัลเฟตจากยิปซัมเกิดเป็นแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮดรต ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) หรือ เอททริงไกต์ (ettringite) ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



ง) เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

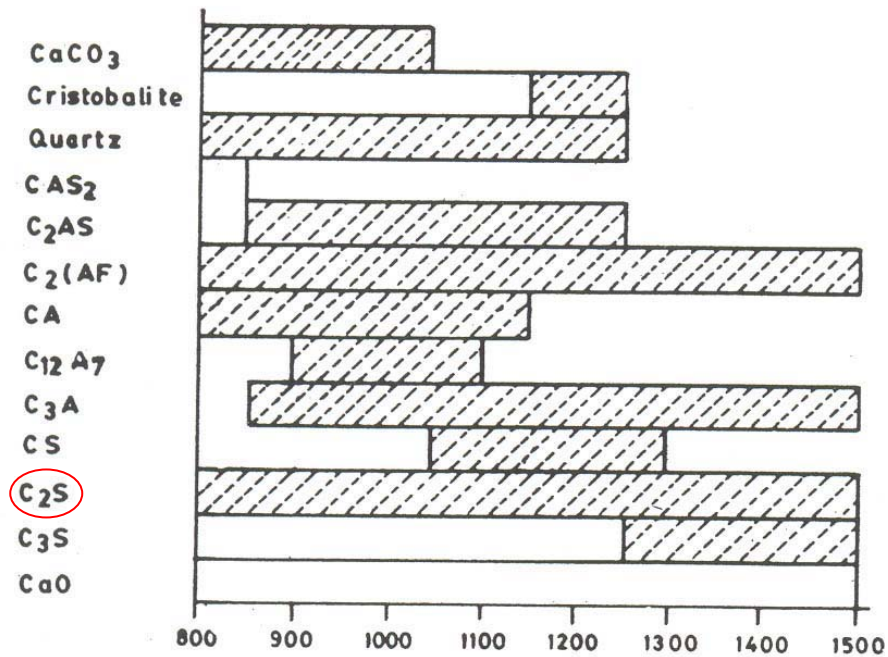
มีในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5-10 อยู่ในสภาพสารละลายของแข็ง (solid solution) เมื่อ C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำปฏิกิริยาจะเกิดคล้ายกับ C_3A แต่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้ากว่า และค่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่า คือมีค่าประมาณ 420 จูลต่อกรัม เมื่อเติมยิปซัมเพื่อหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ($C_6(A,F)\bar{S}_3H_{32}$) การพัฒนาความแข็งแรงของ C_4AF สามารถพัฒนาได้เร็วกว่า C_2S แต่ช้ากว่า C_3S ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



2.2 ซีเมนต์เบไลต์ (dicalcium silicate) [4]

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของซีเมนต์เบไลต์

เบไลต์เฟสเป็นเฟสหนึ่งของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เบไลต์เฟสสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า C_3S คือ สามารถพบได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 800-1500 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.3

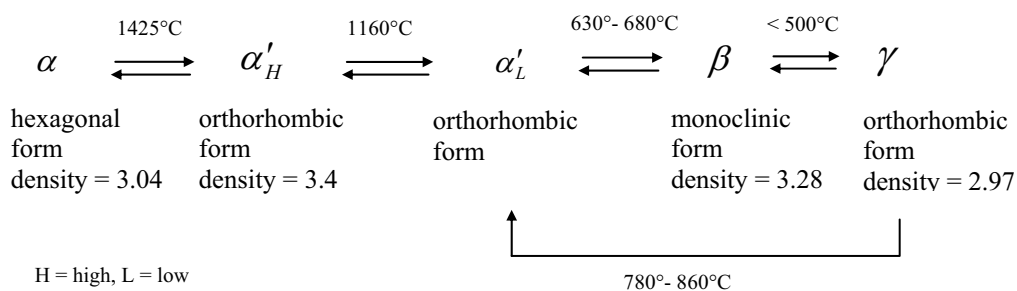


รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดกับอุณหภูมิ [4]

โครงสร้างของเบไลต์เฟสประกอบด้วยไอออนของ Ca^{2+} และ SiO_4^{4-} เบไลต์เฟสมี 5 รูปผลึก คือ α , α' , α_L' , β และ γ แต่ละรูปผลึกจะคงตัว ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 2.2 และรูปที่ 2.4 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบไคแคลเซียมซิลิเกตในรูปเบตา

ตารางที่ 2.2 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปผลึกของเบไลต์เฟส

อุณหภูมิสำหรับการเปลี่ยนโครงสร้าง (องศาเซลเซียส)	รูปผลึก	ชนิดโครงสร้างผลึก
1425	α	เฮกซะโกนอล
1160	α'_H	ออโรรมบิก
780-860 (เพิ่มอุณหภูมิจากรูปผลึก γ) 690 (เพิ่มอุณหภูมิจากรูปผลึก β)	α'_L	ออโรรมบิก
630-680 (เย็นตัวจากรูปผลึก α'_L)	β	โมนอคลินิก
<500 (เย็นตัวจากรูปผลึก β)	γ	ออโรรมบิก



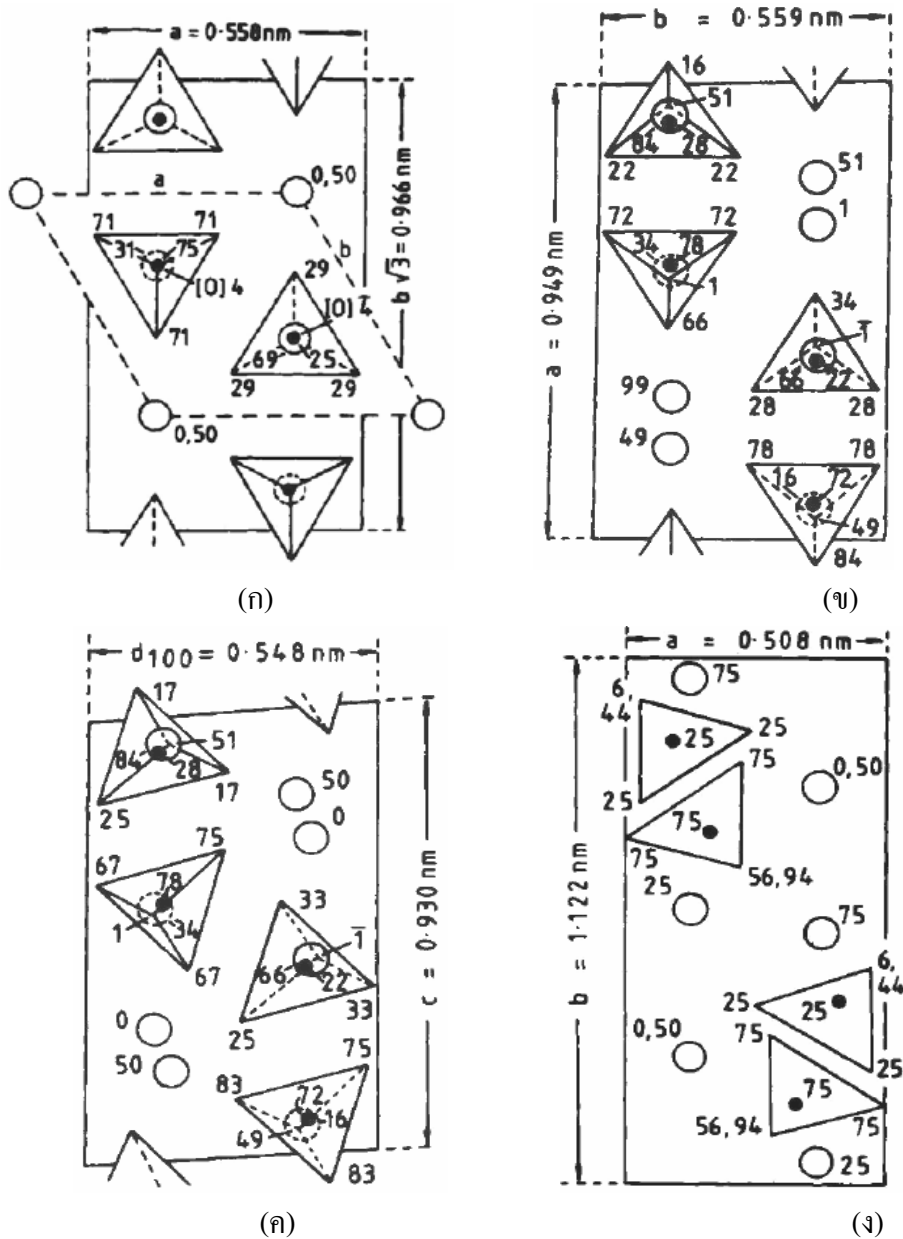
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับรูปผลึกของเบไลต์เฟส [6]

α -C₂S จะเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 1420-1447 องศาเซลเซียส ขณะเย็นตัวปูนเม็ดจะเปลี่ยนเป็น α' -C₂S ถ้าต้องการให้ α -C₂S คงตัวได้ที่อุณหภูมิห้องควรเติม 34%3CaO.P₂O₅ ให้กับระบบ แต่มีผลทำให้ α -C₂S ไม่มีคุณสมบัติไฮดรอลิก หรือเติม 2-3%Al₂O₃ และ 1.5%Fe₂O₃ ที่ 1400 องศาเซลเซียส หรือเติม 2-3% Al₂O₃ และ 2.5%Fe₂O₃ ที่ 1500 องศาเซลเซียส หรือเติม 1.5%MgO ที่ 1600 องศาเซลเซียส จะช่วยให้ α -C₂S คงตัวที่อุณหภูมิห้อง

α' -C₂S จะเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 800-1447 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ γ -C₂S สามารถเปลี่ยนเป็น α' -C₂S ได้ และเมื่อเย็นตัวปูนเม็ดจนถึงอุณหภูมิ 630-680 องศาเซลเซียสจาก α' -C₂S จะเปลี่ยนเป็น β -C₂S และถ้าต้องการให้ α' -C₂S คงตัวได้ที่อุณหภูมิห้องต้องเติม 15%3CaO.P₂O₅ ให้กับระบบ มีผลทำให้ α' -C₂S มีสมบัติไฮดรอลิกเล็กน้อย หรือเติม 1%Al₂O₃ หรือ 1%Fe₂O₃ ที่ 1300-1350 องศาเซลเซียส หรือ 2%MgO ที่ 1400 องศาเซลเซียส จะช่วยให้ α' -C₂S คงตัวที่อุณหภูมิห้อง

β -C₂S จะเสถียรเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 760-900 องศาเซลเซียส หรือลดอุณหภูมิจาก 650-450 องศาเซลเซียส และสามารถเปลี่ยนเป็น α' -C₂S ได้ที่ 630-680 องศาเซลเซียส ถ้าในระบบ มี 0.1%B₂O₃ หรือ 1%Cr₂O₃ หรือ 1%CaO.P₂O₅ จะป้องกันการเปลี่ยนจาก β -C₂S ไปเป็น γ -C₂S รวมถึงการเย็นตัวปุณเเม็ดอย่างรวดเร็วจะสามารถป้องกันการเกิด γ -C₂S ได้ เนื่องจาก γ -C₂S ไม่มีสมบัติไฮดรอลิก

γ -C₂S จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 780-860 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเปลี่ยนกลับไปเป็น α' -C₂S



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของเบไลต์เฟส (ก) α -C₂S, (ข) α'_H -C₂S, (ค) β -C₂S, (ง) γ -C₂S [6]

จากรูปที่ 2.5 วงกลมเปิดแทนอะตอมของแคลเซียม วงกลมปิดแทนอะตอมของซิลิกอน และสามเหลี่ยมแทนซิลิกอน-ออกซิเจนเตตราไฮดรอล รูปผลึก α'_H , α'_L และ β เปลี่ยนแปลงมาจาก α โดยมีการจัดเรียงตัวภายในของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตราไฮดรอลใหม่เพื่อเพิ่มสมมาตร รวมถึงการเคลื่อนย้ายของ Ca^{2+} ในโครงสร้าง ส่วน $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ นั้นมีความหนาแน่นต่ำกว่ารูปผลึกอื่นๆ

2.2.2 ชนิดของเบไลต์ซีเมนต์ [5]

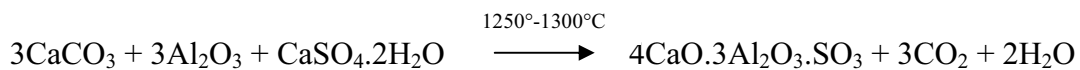
เบไลต์ซีเมนต์สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ซัลโฟเฟอร์โรอะลูมินาเบไลต์ซีเมนต์ และซีเมนต์เบไลต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง

1) ซัลโฟเฟอร์โรอะลูมินาเบไลต์ซีเมนต์ (sulfoferroaluminate-belite cement, SFAB)

คือ ซีเมนต์เบไลต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็ก และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ ซึ่งซีเมนต์ชนิดนี้มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับซัลโฟอะลูมินาเบไลต์ซีเมนต์ (sulfoaluminate-belite cement, SAB) กล่าวคือ เป็นซีเมนต์ที่มีเบไลต์เฟสเป็นองค์ประกอบหลัก และมีแคลเซียมซัลโฟอะลูมินาเล็กน้อย แต่จะมีการแทนที่ Al^{3+} ในโครงสร้างของแคลเซียมซัลโฟอะลูมินาด้วย Fe^{3+} และปริมาณแคลเซียมซัลโฟอะลูมินาที่เหมาะสมใน SAB ที่ไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ชนิดนี้ คือ ประมาณ 30-40%

ซัลโฟอะลูมินาเบไลต์ซีเมนต์มีความต้านทานต่อสารเคมีได้ดีเมื่ออยู่ในสารละลายคลอไรด์ หรือ สารละลายซัลเฟต และมีการคายความร้อนอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เนื่องจากการเกิดเฟส ettringite ขึ้นภายในซีเมนต์ แต่ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นของซีเมนต์ชนิดนี้มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ OPC เนื่องจากในซีเมนต์ชนิดนี้ไม่มีเฟส C_3S และ C_3A ซึ่งทั้งสองเฟสดังกล่าวนั้น หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะคายพลังงานเป็นจำนวนมาก และค่าความร้อนของซีเมนต์ชนิดนี้จะลดลงเมื่อมีปริมาณเบไลต์เฟสมากขึ้น

ในระบบ $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3$ ประกอบด้วยสารประกอบ 2 ชนิด คือ แคลเซียมซัลโฟอะลูมินา หรือ เตตราแคลเซียมไตรอะลูมินาซัลเฟต ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$, $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$) ปฏิกิริยาการเกิดแสดงดังสมการ และแคลเซียมซัลโฟซิลิเกต หรือ sulfoaluminatite ($5\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{SO}_3$, $\text{C}_5\text{S}_2\text{S}$)

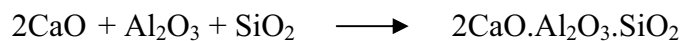


ลำดับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3$ คือ

1. ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะเกิดเฟส C_2S และ C_2AS
2. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ไม่พบเฟส C_2AS และเกิดเฟส $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$, $\text{C}_5\text{S}_2\text{S}$
3. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1180 องศาเซลเซียส ไม่พบเฟส $\text{C}_5\text{S}_2\text{S}$ และเกิดเฟส $\alpha'\text{-C}_2\text{S}$ และ CS

จากลำดับการเกิดปฏิกิริยาของระบบ $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3$ พบว่า ถ้าระบบมีซัลเฟตจะไม่พบเฟส C_2AS เนื่องจากซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาในระบบเกิดเป็นเฟส $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ แทน

แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกต หรือ gehlenite ($2\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$, C_2AS) เป็นแร่ชนิดหนึ่งในกลุ่ม melilite ซึ่งมีโครงสร้างแบบเตตราโกนอล มักพบเฟส gehlenite ในซีเมนต์ที่มีองค์ประกอบของอะลูมินา (aluminous cement) ถ้ามีองค์ประกอบของซิลิกาในวัตถุดิบผสมอย่างน้อย 40% อาจพบเฟส C_2AS ในปูนซีเมนต์ ซึ่งเฟส gehlenite ทำปฏิกิริยากับน้ำได้น้อยและเป็นเฟสที่ไม่ต้องการในปูนซีเมนต์



2) ซีเมนต์เบ้ไลต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง (high ferro-belite cement, HFBC)

คือ ซีเมนต์ที่มีองค์ประกอบของเบ้ไลต์เฟสร่วมกับโมโนแคลเซียมเฟอร์ไรต์ ($\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$) เมื่อมีเหล็กออกไซด์อยู่ในโครงสร้างจะช่วยลดอุณหภูมิในการเกิดปูนเม็ด

2.3 เถ้าลอย [7,8]

เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกว่า เถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรจนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตรจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย (fly ash) เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิตเพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน

เถ้าลอยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหิน ได้แก่ ประเภท F และประเภท C คือ

1. เถ้าลอยประเภท F เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาหินประเภทแอนทราไซต์ และบิทูมินัส มีผลรวมของซิลิกา, เฟอร์ริกออกไซด์ และอะลูมินา มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 หรือเรียกว่าเถ้าลอยที่มีแคลเซียมต่ำ ซึ่งเถ้าลอยนี้มีคุณสมบัติการเป็นซีเมนต์น้อย แต่ยังมีคุณสมบัติของวัสดุปอชโซลาน

2. เถ้าลอยประเภท C เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาหินประเภทลิกไนต์ และซับบิทูมินัส มีผลรวมของซิลิกา, เฟอร์ริกออกไซด์ และอะลูมินา ร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 15-23 หรือเรียกว่าเถ้าลอยที่มีแคลเซียมสูง ซึ่งเถ้าลอยนี้มีคุณสมบัติของซีเมนต์และปอชโซลานในตัวเอง

อย่างไรก็ตามคุณภาพและปริมาณของเถ้าลอยสามารถแปรผันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า, ชนิดของถ่านหิน, อุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน, ระบบการดักจับเถ้าลอย ดังนั้น

เถ้าลอยที่ได้ในแต่ละแห่งการผลิตจึงมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะนั้น ถูกจัดเป็นเถ้าลอยประเภท F

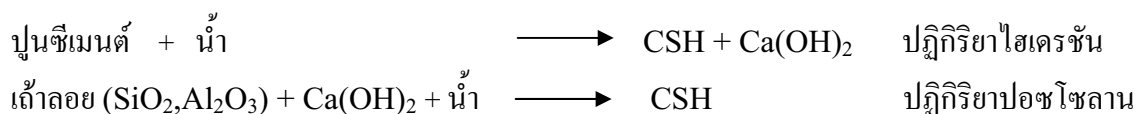
ในช่วงก่อน พ.ศ. 2533 การนำเถ้าลอยมาใช้งานนั้นยังมีปัญหาในเรื่องการควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี เนื่องจากคุณภาพของถ่านหินและอุณหภูมิที่ใช้เผาถ่านหิน แต่เมื่อได้มีการควบคุมคุณภาพของถ่านหินก่อนป้อนเข้าโรงไฟฟ้า โดยการควบคุมปริมาณกำมะถันในถ่านหินให้อยู่ในช่วงร้อยละ 1-3 ทำให้เถ้าลอยที่ได้มีคุณภาพสม่ำเสมอ มีปริมาณซิลเฟอไรต์รอกโซไซด์ในปริมาณที่ไม่เกินเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-94 a ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533-2544 แสดงดังตารางที่ 2.3 จากตารางพบว่าปริมาณซิลเฟอไรต์รอกโซไซด์ได้ลดลงจากร้อยละ 3.9-1.5

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี พ.ศ. 2533-2544 [8]

ปี พ.ศ.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
2533	37.80	20.50	14.20	17.40	3.30	0.90	2.10	3.90	0.80
2534	42.80	23.30	14.00	10.50	2.40	0.80	2.30	3.90	0.70
2535	40.30	24.00	15.00	11.20	2.80	1.00	2.60	3.10	0.50
2536	43.10	20.20	13.20	13.00	2.70	1.30	2.40	2.60	0.60
2537	52.80	18.00	8.50	13.30	1.40	0.90	2.00	2.80	0.30
2538	40.60	22.80	12.80	14.40	2.50	0.70	2.00	2.80	0.90
2539	40.60	23.60	13.00	13.00	2.50	1.20	3.00	2.40	0.70
2540	41.50	28.10	12.30	10.00	1.20	0.60	3.30	2.00	0.80
2541	37.30	22.10	14.40	11.40	2.70	1.10	2.70	2.50	0.10
2542	47.20	22.10	9.10	9.40	3.30	1.70	1.30	2.50	0.10
2543	38.90	22.80	13.40	15.20	2.30	0.80	3.00	2.50	0.10
2544	39.90	18.20	13.60	17.20	2.40	1.30	2.70	1.50	0.10

ปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอย

เถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน กล่าวคือ วัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน (glassy phase) โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน (cementitious) ดังสมการต่อไปนี้



2.4 วิธีสังเคราะห์ซีเมนต์เบลต์ [4]

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ซีเมนต์เบลต์อยู่ 2 วิธี คือ

2.4.1 วิธี clinkerization อาศัยกลไกแบบ solid-solid reaction ในการเกิดเป็นสารประกอบใหม่ กล่าวคือ เมื่ออะตอมของวัตถุดิบได้รับพลังงานกระตุ้นที่เหมาะสม ซึ่งพลังงานกระตุ้นนี้ได้มาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ อะตอมที่ได้รับพลังงานจะสั่นและเกิดการแพร่ไปยังอะตอมข้างเคียงทำให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นในกลไก solid-solid reaction สามารถคำนวณได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius's equation)

$$K = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

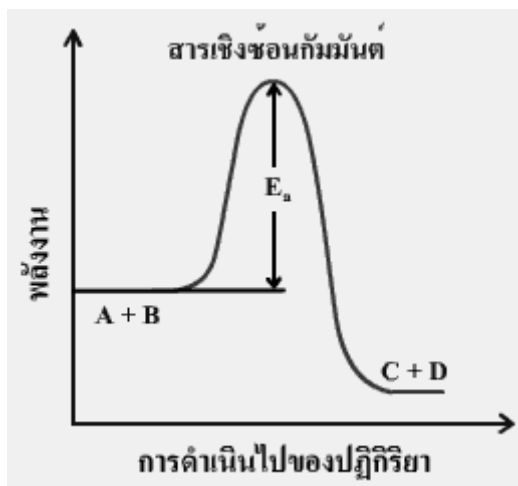
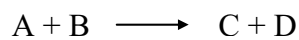
เมื่อ E_a = พลังงานกระตุ้น หรือ พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (จูลต่อโมล)

T = อุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

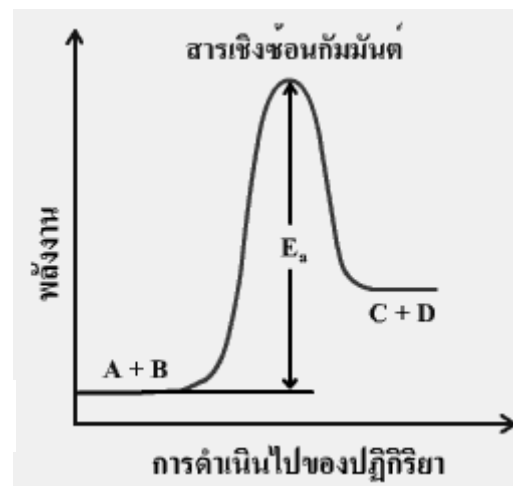
A = แฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor) ซึ่งมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างพอสมควรสำหรับแต่ละปฏิกิริยา

R = ค่าคงที่ของแก๊ส เท่ากับ 8.314 จูลต่อเคลวิน-โมล

พลังงานกระตุ้น (E_a) เป็นพลังงานต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ ถ้ามีพลังงานต่ำกว่านี้จะไม่เกิดปฏิกิริยา เช่น การทำปฏิกิริยาระหว่างสาร A และ B เกิดเป็นสารประกอบใหม่ คือ สาร C และ D



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนพลังงานศักย์สำหรับ (ก) ปฏิกิริยาคายความร้อน (ข) ปฏิกิริยาดูดความร้อน[9]

จากกราฟถ้าสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น (C+D) มีพลังงานต่ำกว่าสารตั้งต้น (A+B) ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะมีการคายความร้อนเกิดขึ้น เรียกปฏิกิริยาชนิดนี้ว่าปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) แต่ถ้าสารผลิตภัณฑ์มีพลังงานมากกว่าสารตั้งต้นในขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะมีการดูดความร้อนเกิดขึ้น เรียกปฏิกิริยาชนิดนี้ว่าปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่เกิดขึ้นนี้เปรียบเสมือนกำแพงกั้นอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าพลังงานกระตุ้นไม่ให้เกิดปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาเคมีทั่วไปอนุภาคของสารตั้งต้นมักมีจำนวนมากแต่จะมีอนุภาคเพียงบางส่วนที่มีพลังงานจลน์มากพอที่จะข้ามกำแพงนี้ไปได้ ซึ่งอนุภาคที่สามารถข้ามผ่านกำแพงได้เหล่านี้เป็นอนุภาคที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้สูงแล้วเกิดปฏิกิริยาเพื่อเป็นสารประกอบใหม่

สำหรับค่าพลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการเกิดเฟสต่างๆ ภายในปูนเม็ดยังขึ้นกับองค์ประกอบและสัดส่วนของวัตถุดิบผสมที่ใช้ และการแตกตัวของหินปูนนั้นต้องใช้พลังงานกระตุ้น 125604-251208 จูลต่อโมล ค่าพลังงานจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสิ่งปนเปื้อนและสัดส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีในวัตถุดิบผสม จะเห็นว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างมากจึงส่งผลต่อค่าพลังงานรวมที่ใช้สำหรับการเกิดองค์ประกอบหลักทั้ง 4 ชนิดในปูนเม็ด แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นขององค์ประกอบหลักในปูนเม็ดทั้ง 4 ชนิด [4]

องค์ประกอบหลักในปูนเม็ด	พลังงานกระตุ้น (จูลต่อโมล)	สารตั้งต้นที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา
C_3S	837360	$CaCO_3$ -aluminosilicate
β - C_2S	164959.92 257655.67 179404.38 105088.68	CaO - SiO_2 (2:1) $CaCO_3$ -kaolinite (6:1) $CaCO_3$ -kaolinite (9:1) $CaCO_3$ - C_2AS
C_3A	202682.99 499652.71 362576.88	CaO - Al_2O_3 $CaCO_3$ -kaolinite (6:1) $CaCO_3$ -kaolinite (9:1)
C_4AF	438274.22 297179.06	CaO - Al_2O_3 - Fe_2O_3 C_3A -CF

ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยวิธีการเผาคือ

ก) องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ควรเลือกวัตถุดิบที่มีออกไซด์ที่เด่นเพื่อมาเป็นตัวแทนของแหล่งให้แคลเซียม, ซิลิกอน, อะลูมิเนียม และเหล็ก หลังจากเลือกวัตถุดิบที่เป็นแหล่งให้ออกไซด์ได้แล้วนั้นภายในวัตถุดิบผสมควรมีออกไซด์ขององค์ประกอบหลักและองค์ประกอบรองในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งออกไซด์แต่ละตัวนั้นจะส่งผลที่แตกต่างกันต่อการเผาปูนเม็ด โดยมีค่า LSF, M_S และ M_A ที่จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของปูนเม็ด

ค่า LSF คือ อัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา, อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ ซึ่งค่า LSF สามารถบอกถึงเฟส C_3S และ C_2S ในปูนเม็ด

$$\text{lime saturation factor (LSF)} = \frac{\%CaO}{2.8(\%SiO_2) + 1.2(\%Al_2O_3) + 0.65(\%Fe_2O_3)}$$

ถ้าค่า LSF เท่ากับ 88-94 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเผาปูนเม็ด ถ้าค่า LSF เท่ากับ 100 แสดงว่ามีแคลเซียมออกไซด์มากทำให้องค์ประกอบหลักของปูนเม็ดชนิดนี้ คือ C_3S และ C_4AF ซึ่งทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเผาเพื่อให้ได้ปูนเม็ดตามที่ต้องการ และถ้าค่า LSF ต่ำทำให้มี C_3S ไม่เพียงพอในปูนเม็ด ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงในช่วงแรก

ค่าโมดูลัสซิลิกา คือ อัตราส่วนน้ำหนักของซิลิกาต่ออะลูมินาและเฟอร์ริกออกไซด์ ซึ่งอัตราส่วนนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการเผาปูนซีเมนต์ เมื่อผลรวมของอะลูมินาและเฟอร์ริกออกไซด์มีค่าน้อยหมายถึงปริมาณของลิควิดเฟสลดลงจะส่งผลทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการเผา และถ้าค่า M_S ต่ำเกินไปทำให้มีปริมาณซิลิกาไม่พอที่จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์เพื่อให้เกิดเป็น C_2S และ C_3S ส่งผลทำให้เกิด C_2S และ C_3S ที่ไม่สมบูรณ์ ในปูนซีเมนต์มี M_S เท่ากับ 2-3

$$\text{silica modulus (M}_S\text{)} = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$$

ค่าโมดูลัสอะลูมินา คือ อัตราส่วนน้ำหนักของอะลูมินาต่อเฟอร์ริกออกไซด์ ซึ่งอัตราส่วนนี้บอกถึงคุณภาพของลิควิดเฟสที่อุณหภูมิต่ำ และค่า M_A สูงเกินไปทำให้มี C_3A มากกว่า C_4AF ในปูนซีเมนต์มี M_A เท่ากับ 1-4

$$\text{alumina modulus (M}_A\text{)} = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3}$$

ข) ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบผสม วัตถุดิบผสมที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้มาก ทำให้อนุภาคอยู่ใกล้ชิดกันจึงมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาต่อกันเพื่อเกิดเป็นสารประกอบใหม่ได้ นอกจากนี้วัตถุดิบผสมที่มีขนาดเล็กยังช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เนื่องจากใช้ความร้อนไม่มากก็สามารถเกิดการแตกตัวเพื่อเกิดเป็นสารประกอบใหม่ได้ นอกจากนี้การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของวัตถุดิบผสมก็ถือเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญในการผลิต เนื่องจากจะส่งผลต่อคุณภาพของปูนเม็ด, กระบวนการเผา ตลอดจนการใช้เชื้อเพลิงในการผลิต

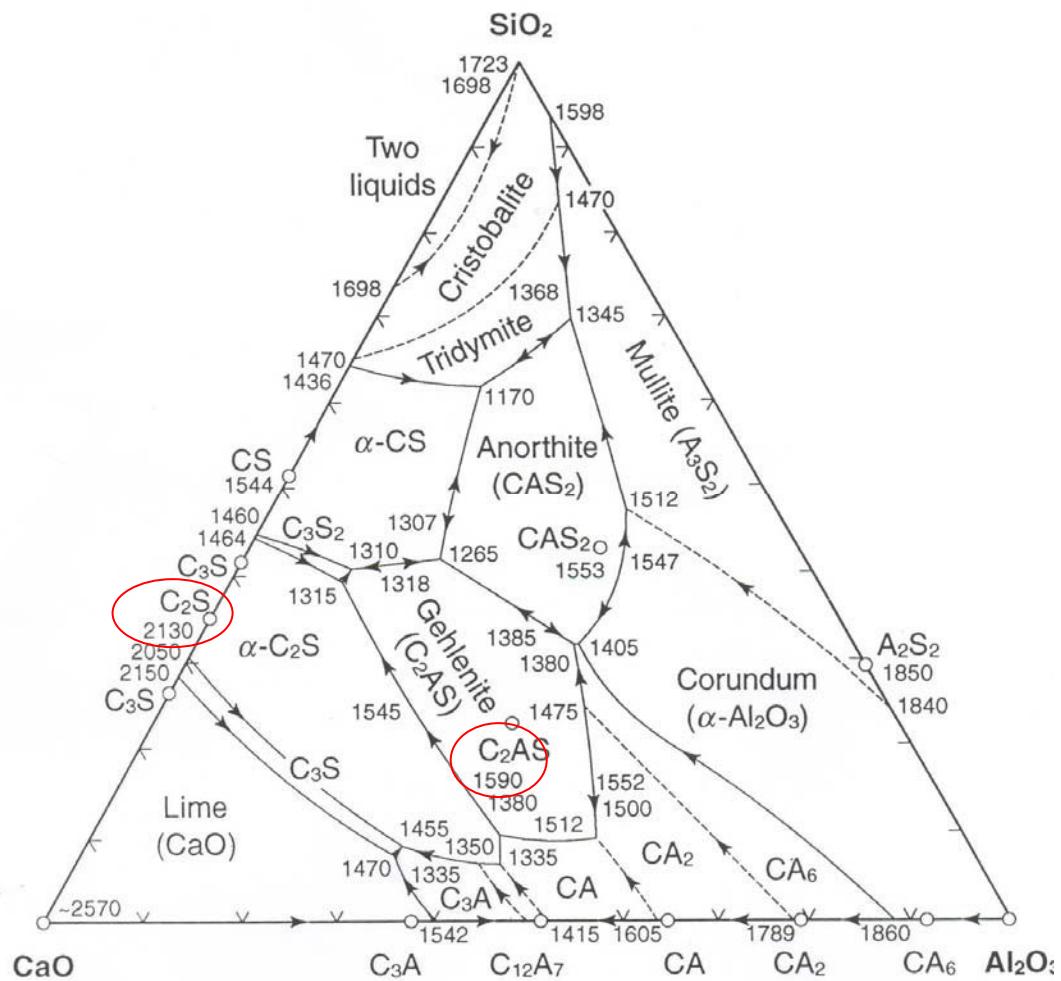
ค) ผลของไอออน การมีไอออนบางชนิดในวัตถุดิบผสมจะช่วยในการจำกัดเฟสของปูนเม็ดหรือทำให้เฟสชนิดนั้นคงตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง เช่น ถ้ามี Ba^{2+} หรือ SO_4^{2-} อยู่ร่วมในโครงสร้างของ C_2S มีผลทำให้เฟส C_2S ที่ได้หลังการเผามีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับน้ำ

ง) อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์, อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ และตัวกลางที่ใช้การเย็นตัวของปูนเม็ดจะส่งผลต่อเฟสและรูปผลึกที่เกิดขึ้นภายในปูนเม็ด

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาปูนเม็ดยังต้องเพียงพอต่อการเกิดเฟส C_3S ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปทำให้เชื้อเพลิงมาก ทำให้ค่าความแข็งแรงของซีเมนต์ลดลง และทำให้ผลึกของ C_3S มีขนาดใหญ่ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาวัตถุดิบผสมเพื่อเกิดเป็นสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิดในปูนเม็ด สามารถคำนวณได้จาก

$$^{\circ}C = 1300 + 4.51 C_3S - 3.74 C_3A - 12.64 C_4AF$$

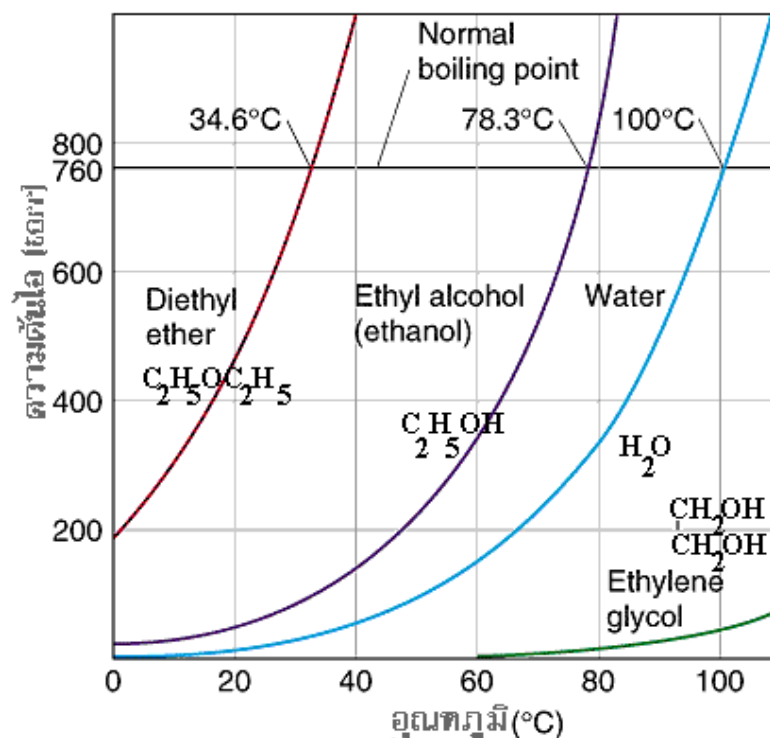
เมื่อเพิ่มเวลาในการเย็นไฟจะส่งผลให้ปริมาณเฟส C_2S , C_3A ลดลง และ C_3S , C_4AF เพิ่มขึ้น และมีแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ถ้าใช้อัตราการเผาที่เร็วทำให้เกิดเฟส C_2S ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจะส่งผลดีเมื่อเฟส C_2S ทำปฏิกิริยากับน้ำ ในส่วนของการเย็นตัวควรให้ปูนเม็ดมีการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อจำกัดเฟสบางเฟสไว้ให้อยู่ในรูปผลึกที่เสถียร อีกทั้งการเย็นตัวอย่างรวดเร็วยังเป็นการเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของปูนเม็ดเพราะภายในปูนเม็ดจะมีพลังงานส่วนหนึ่งเหลือค้างอยู่ภายในตัวเอง ฉะนั้นจึงควรให้ความสำคัญในเรื่องของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ส่วนนี้ค่อนข้างมาก



รูปที่ 2.7 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [6]

จากเฟสไดอะแกรมรูปที่ 2.7 ทำให้ทราบถึงเฟสที่เกิดขึ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ เมื่อวัตถุดิบมีองค์ประกอบของ $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อปริมาณขององค์ประกอบเปลี่ยนไปจะได้สารประกอบใหม่เกิดขึ้น และถ้าต้องการสังเคราะห์ C_2S (larnite) ตามเฟสไดอะแกรมจะต้องใช้วัตถุดิบที่มีเฉพาะองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาซึ่งอยู่บนเส้น CaO-SiO_2 และสังเคราะห์ที่อุณหภูมิประมาณ 2130 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ที่บริสุทธิ์มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาค่อนข้างมาก และเฟส C_2AS (gehlenite) นั้นตามเฟสไดอะแกรมจะเกิดขึ้นที่ 1590 องศาเซลเซียส ดังนั้นการสังเคราะห์สารประกอบใหม่โดยอาศัยเฟสไดอะแกรมทำนายอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ วัตถุดิบตั้งต้นควรเป็นสารบริสุทธิ์จึงจะได้เฟสต่างๆ ตามเฟสไดอะแกรม

2.4.2 วิธีไฮโดรเทอร์มอล ใช้หลักการของการละลายและการตกตะกอนเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง กล่าวคือ เมื่อนำวัตถุดิบผสมกับน้ำจะเกิดการละลายและแตกตัวได้ไอออน การละลายจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งจะเกิดการอิ่มตัวของไอออน จากนั้นไอออนจะเกิดการตกผลึกกลายเป็นสารประกอบใหม่ โดยปฏิกิริยาการตกผลึกเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบใหม่นั้นจะเกิดภายในหม้อนิ่งอัดไอน้ำ (autoclave) ซึ่งอาศัยหลักการของการต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำในภาชนะปิด ปกติแล้วเมื่อบรรจุของเหลวในภาชนะปิดและตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่งของเหลวจะระเหยไปหมด แต่ถ้าบรรจุของเหลวในภาชนะปิดและวางภาชนะนี้ไว้ในที่สถานะที่มีอุณหภูมิ และความดันเดียวกันพบว่า มีไอที่เกิดจากการระเหยปรากฏอยู่เหนือของเหลวนี้ ไอของโมเลกุลของเหลวที่อยู่เหนือของเหลวนี้จะวิ่งชนกับผนังของภาชนะทำให้เกิดความดัน เรียกว่า ความดันไอ (vapor pressure) และของเหลวแต่ละชนิดจะมีความดันไอไม่เท่ากัน โดยทั่วไปพบว่าถ้าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลน้อย ค่าความดันไอของของเหลวจะมีค่าสูง เพราะโมเลกุลของของเหลวสามารถระเหยได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามถ้าของเหลวมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมาก ค่าความดันไอของของเหลวก็จะมีค่าน้อย นอกจากนี้ค่าความดันไอของเหลวยังขึ้นอยู่กับชนิดและอุณหภูมิของของเหลวนั้น แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความดันของของเหลวชนิดต่างๆ [9]

ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล คือ

ก) ความสามารถในการละลายของวัตถุดิบ วัตถุดิบต้องสามารถละลายน้ำได้เพื่อเกิดการแตกตัวให้อิออน

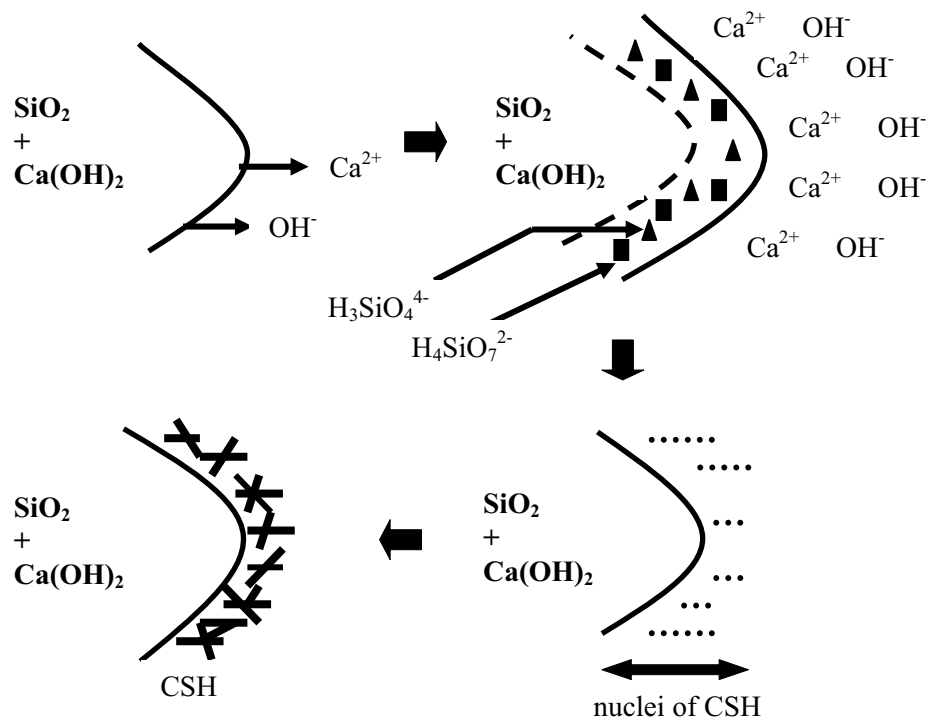
ความสามารถในการละลายของสารชนิดหนึ่งในสารอีกชนิดหนึ่งนั้นสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างตัวถูกละลายกับตัวทำละลาย หรืออัตราส่วนระหว่างตัวถูกละลายกับสารละลาย ในสถานะที่สารละลายนั้นเป็นสารละลายอิ่มตัว ซึ่งสามารถบอกเป็นความหนาแน่นสูงสุดของสารละลายนั้นได้อีกด้วย โดยจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น แรงระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับตัวถูกละลาย

ข) ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่มีขนาดเล็กจะเกิดการละลายได้ดี จึงมีโอกาสเกิดเป็นสารประกอบใหม่ได้ง่าย

ค) ความเข้มข้นของสารกระตุ้น (สารละลายเบสต่างๆ) เป็นตัวกระตุ้นให้วัตถุดิบเกิดการละลายได้มากขึ้น เช่น ถ้าระบบมีค่าพีเอชประมาณ 14 แก้วลอยสามารถละลายให้ซิลิกาและอะลูมินาเพิ่มขึ้น

ง) อุณหภูมิและความดันที่ใช้ทำปฏิกิริยาในหม้อหนึ่งความดันไอน้ำ เมื่อนำสารละลายของวัตถุดิบผสมมาทำปฏิกิริยาในหม้อหนึ่งความดันไอน้ำ อุณหภูมิและความดันจะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้สารประกอบใหม่

จ) อุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ หลังจากการทำปฏิกิริยาของสารละลายวัตถุดิบผสมในหม้อหนึ่งความดันไอน้ำแล้วซึ่งจะได้เฟสที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้าง เมื่อนำมาแคลไซน์จะเปลี่ยนจากเฟสที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างให้เป็นซีเมนต์เฟส โดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์จะมีผลต่อฟอร์มของเฟสที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.9 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการละลายและการตกตะกอน

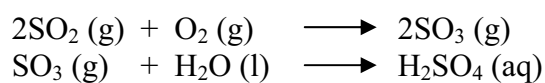
เมื่อแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ละลายทำให้ระบบมีความเป็นเบสมากขึ้น จากนั้น Si^{4+} จะถูกชะออกมาจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเนียมไอออน (H^+) ได้กรดซิลิกิก ($\text{H}_3\text{SiO}_4^{4-}, \text{H}_4\text{SiO}_7^{2-}$) และทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ที่อยู่ในระบบเกิดเป็นนิวเคลียสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เมื่อเวลาผ่านไปเจลของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเริ่มฟอร์มเป็นผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีลักษณะเป็นเส้นใยและมีบางส่วนเกิดการสานกันไปด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ขณะเกิดตกผลึกเพื่อเกิดเป็นเส้นใยของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ถ้ามีการเย็นตัวแบบรวดเร็วผลึกที่ได้จะมีขนาดเล็ก แต่เมื่อมีการเย็นตัวแบบช้าๆผลึกที่ได้จะมีขนาดใหญ่

ซึ่งประเภทของ CSH นั้นจะขึ้นอยู่กับ ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์, ความเข้มข้นของไอออนที่ถูกละลายออกมา, อุณหภูมิและความดันของระบบที่ใช้ในการสังเคราะห์

2.5 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [10]

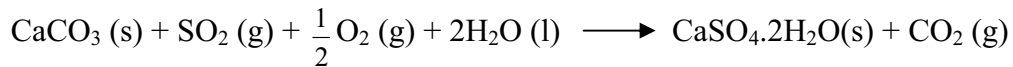
ในขั้นตอนการเผาปูนซีเมนต์นั้นเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่ทำให้เกิดผลต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตรวมถึงการใช้วัตถุดิบผสมที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อวัตถุดิบผสมนั้นถูกเผาจะปล่อยก๊าซเสียออกสู่บรรยากาศและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมาก

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงและถ่านหินที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศบางส่วนจะรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และก๊าซนี้สามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำในอากาศโดยมีฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือ ฝนกรด ดังสมการต่อไปนี้



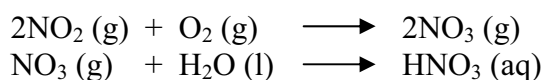
วิธีการลดปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ อาจทำได้โดย 1) การใช้ถ่านหินที่มีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ 2) การลดปริมาณกำมะถันจากเชื้อเพลิงก่อนนำมาใช้ โดยซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไพไรต์ (FeS_2) อาจแยกออกจากถ่านหินโดยใช้ความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ ซึ่งไพไรต์นั้นมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 5 และถ่านหินที่สะอาดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 สำหรับซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์นั้นจะเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของถ่านหินซึ่งต้องสกัดออกด้วยสารเคมี 3) กำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ก่อนปล่อยก๊าซนั้น

สู่บรรยากาศ โดยผ่านก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปยังผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เปียกจะทำปฏิกิริยากัน กลายเป็นแคลเซียมซัลเฟต ดังสมการต่อไปนี้



ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น หินปูน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์ จึงเป็นก๊าซที่ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศมากที่สุด การสะสมตัวของก๊าซชนิดนี้ในบรรยากาศจะส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิของโลก ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) เพราะก๊าซชนิดนี้จะกักไม่ให้ความร้อนจากพื้นโลกผ่านทะลุชั้นบรรยากาศออกไปได้จึงทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นเรื่อยๆ อาจทำให้น้ำแข็งที่ขั้วโลกละลายทำให้น้ำทะเลสูงขึ้นได้ อีกวิธีหนึ่งในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศทางอ้อม คือ การนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่

ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อุณหภูมิสูงไม่น้อยกว่า 1100 องศาเซลเซียส และถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วออกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงไม่สลายตัว จะพบว่ายังมีการเผาไหม้ดีเท่าใด ในโตรเจนในบรรยากาศก็จะรวมตัวกับออกซิเจนได้ดีขึ้นเท่านั้น และเมื่อรวมตัวกับไอน้ำในอากาศจะเกิดเป็นกรดไนตริก (HNO_3) ที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ดังสมการต่อไปนี้



2.6 สารสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ซีเมนต์เบสไลต์แบบเผา

การสังเคราะห์เบสไลต์ซีเมนต์

Popescu และคณะ [1] ทดลองผลิตซีเมนต์เบสไลต์ในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ โดยผลิตซีเมนต์สามชนิด คือ 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ 1420 องศาเซลเซียส 2) ซีเมนต์เบสไลต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็ก และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบสูง (SFAB) และ 3) ซีเมนต์เบสไลต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง (HFBC) ที่ 1260-1330 องศาเซลเซียส โดยใช้หินปูน, ดินที่ผ่านการเผา, แก้วเขาไฟ, แก้วไฟไรต์ และยิปซัมเป็นวัตถุดิบตั้งต้น จากองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ด พบว่า มีองค์ประกอบ C_3S ใน OPC = 65%, HFBC = 30% องค์ประกอบ C_2S ใน OPC = 7%, HFBC = 45%, SFAB = 61% ส่วน Klein's compound ($\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$) พบเฉพาะ SFAB = 11% และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการผลิต SFAB, HFBC กับ OPC พบว่าใช้พลังงานต่ำกว่า OPC 500-540 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และในปูนเม็ดที่มีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์มากหรือมีซัลเฟตไอออนเล็กน้อยจะใช้อุณหภูมิเผาต่ำลง 120-160 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับ OPC ค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของ SFAB, HFBC (LSF $\approx$ 85)

ในช่วง 2-7 วันแรกจะค่อยๆเพิ่มขึ้น และที่ 28 วัน SFAB = 35.6 เมกกะปาสกาล, HFBC = 34.2 เมกกะปาสกาล และ OPC = 43.7 เมกกะปาสกาล และหลังจาก 90 วัน ค่าความแข็งแรงของ SFAB, HFBC มีค่ามากกว่า OPC ข้อยกเว้นสำหรับ SFAB, HFBC คือเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้ากว่า OPC ในช่วงแรก ฉะนั้นควรมีการผสม OPC ก่อนนำมาใช้งาน

การสังเคราะห์ซัลโฟอะลูมินเอตเบไลต์ซีเมนต์

Arjunan และคณะ [11] ศึกษาการสังเคราะห์ซัลโฟอะลูมินเอตเบไลต์ซีเมนต์ (SAB) โดยใช้ฝุ่นจากห้องดักฝุ่นของเตาเผาปูนขาว (lime kiln bag house dust), เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบแคลเซียมต่ำ และตะกอนที่ได้จากการดักจับ (scrubber sludge) เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ ใช้อุณหภูมิ 1100-1300 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟ 30-60 นาที ในการสังเคราะห์จะใช้วัตถุดิบผสม (แบบก้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร, แบบผง) จากการทดลองพบเฟส SAB และ C_2S ที่ 1250 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟ 30 นาที เมื่อใช้วัตถุดิบผสมแบบก้อน และที่ 1175 องศาเซลเซียส ขึ้นไฟ 60 นาที เมื่อใช้วัตถุดิบผสมแบบผง จะเห็นว่าเมื่อใช้วัตถุดิบผสมแบบผงจะใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำกว่า และศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของวัตถุดิบผสมแบบผงที่ 1175 องศาเซลเซียส 60 นาที หลังการไฮเดรชัน 1 วัน จะพบเฟส SAB มีเฟส ettringite แทรกอยู่ตามช่องว่าง และพบเบไลต์เฟสเล็กน้อย เมื่อการไฮเดรชันผ่านไป 28 วัน จะพบเฟสแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เล็กน้อย แสดงว่าเกิดการไฮเดรชันของ C_2S ขึ้น และค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดที่อายุบ่ม 1, 7 และ 28 วัน ของ SAB (w/s=0.4) เท่ากับ 30, 50 และ 70 เมกกะปาสกาล การพัฒนาความแข็งแรงในช่วงแรกนั้นค่อนข้างสูงเนื่องจากมีเฟส ettringite และค่าความแข็งแรงในช่วงท้ายขึ้นกับ CSH gel และเมื่อเปรียบเทียบกับ OPC (w/s=0.3) พบว่า SAB มีค่าความแข็งแรงต่ำกว่า OPC ทุกอายุบ่มประมาณ 22 %

Beretka และคณะ [12] ศึกษาการสังเคราะห์, ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของแคลเซียมซัลโฟอะลูมินเอตซีเมนต์ โดยใช้ฟอสโฟิปซัม, กากตะกอนจากเตาถลุงโลหะ และเถ้าลอย เป็นวัตถุดิบตั้งต้นโดยเผาที่ 1200 องศาเซลเซียส ในปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลโฟอะลูมินเอต ($C_4A_3\bar{S}$) เมื่อมีแคลเซียมซัลเฟต (CS) ร่วมด้วยทำให้เกิดโครงสร้างของ ettringite ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$) ซึ่งโครงสร้างนี้ส่งผลให้ความแข็งแรงช่วงแรกดีขึ้น แต่ถ้ามี ettringite มากเกินไปอาจทำให้ซีเมนต์เกิดการขยายตัว ผลองค์ประกอบทางแร่ของซีเมนต์ E คือ $C_4A_3\bar{S} = 50\%$, $C_5S_2\bar{S} = 25\%$, $CS = 25\%$ ค่าความแข็งแรงในช่วง 1, 3, 7 วันแรกจะพัฒนาอย่างรวดเร็ว คือ 74.8, 84.5, 86.4 เมกกะปาสกาล ตามลำดับ และค่าความแข็งแรงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 28 วันค่าจากนั้นค่าความแข็งแรงจะลดลงเนื่องจากเกิดการขยายตัวของ ettringite ดังนั้นในซีเมนต์ควรมีองค์ประกอบของ $C_4A_3\bar{S}$ ที่

เหมาะสม เพื่อเกิดเป็น ettringite หลังปฏิกิริยาไฮเดรชันในปริมาณที่เหมาะสมที่จะช่วยพัฒนาความแข็งแรงในช่วงแรก และในซีเมนต์ที่มีเฟส $C_4A_3\bar{S}$ จะทนทานต่อการคาร์บอนเนชันได้ดี เพราะ $C_4A_3\bar{S}$ จะทำปฏิกิริยากับเตตราแคลเซียมมอโนซัลโฟอะลูมินेट ($C_4\bar{A}SH_{12}$) จะได้แคลเซียมซัลโฟอะลูมินेटไฮเดรต (C_4AH_{13}) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทนต่อการคาร์บอนเนชันได้ดีกว่า ettringite

ผลของแหล่งวัตถุดิบตั้งต้น

Rodrigues [13] ศึกษาการสังเคราะห์ไคแคลเซียมซัลเฟตจากแคลเซียมออกไซด์และเถ้าแกลบสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์และแบเรียมคลอไรด์ต่อซัลเฟตเท่ากับ 2 และมีการแทนที่ด้วยอะตอมแบเรียมในโครงสร้างตั้งแต่ 2-10% ผสมวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเผาวัตถุดิบผสมที่ 500-1000 องศาเซลเซียส จากผลวิเคราะห์ FTIR ของวัตถุดิบผสมหลังเผาในช่วงอุณหภูมิ 500-1000 องศาเซลเซียส พบพิกัดหลักที่บ่งบอกว่าเกิดเฟส β - C_2S คือ ตำแหน่งที่ 900 และ 1000 cm^{-1} และ 520 cm^{-1} และผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบผสมที่มีการแทนที่ด้วยแบเรียมออกไซด์อย่างน้อย 6% เเผาที่ 700 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ β - C_2S เกิดขึ้น และไม่มีแคลเซียมออกไซด์เหลืออยู่ แสดงว่าการแทนที่อะตอมแคลเซียมด้วยอะตอมแบเรียมในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ β - C_2S คงตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสังเคราะห์ซีเมนต์เบสไลต์ด้วยวิธีเผา พบว่า การนำวัสดุเหลือใช้มาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในสังเคราะห์ทำให้ลดอุณหภูมิการสังเคราะห์ลงเมื่อเทียบกับ OPC และการเลือกวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะคำนึงถึงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบชนิดนั้นๆ ภายในองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบนั้นจะต้องประกอบด้วยออกไซด์ของแคลเซียม, ซิลิกอน, อะลูมิเนียม และเหล็กเป็นหลัก รวมถึงพิจารณาควบคู่กับองค์ประกอบทางแร่ กล่าวคือ ถ้าวัตถุดิบประกอบด้วยออกไซด์ทั้ง 4 ชนิด และเป็นแร่ที่มีลักษณะเป็นออสติวนค่อนข้างมากจะง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเป็นสารประกอบใหม่

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์แบบไฮโดรเทอร์มอล ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์

Weimin และ Roy [14] ศึกษาการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์จากเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบแคลเซียมต่ำและแคลเซียมออกไซด์เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ใช้อัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 สังเคราะห์ภายใต้ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1.24 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากไฮโดรเทอร์มอลได้เฟส katoite, C_3AH_4 , CSH gel จากนั้นแคลไซน์ปูนเม็ดที่ 500-800 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อแคลไซน์ปูนเม็ดที่ 800 องศาเซลเซียสจะได้ซีเมนต์ชนิดใหม่เกิดขึ้น คือ β - C_2S , mayenite, calcite ได้ค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดที่ 28 วันของซีเมนต์จากเถ้าลอยประมาณ 20 เมกกะปาสคาล

Goni และคณะ [15] ศึกษาองค์ประกอบทางแร่และโครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เบไลต์โดยใช้เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมต่ำและแคลเซียมออกไซด์เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ใช้อัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 โดยสังเคราะห์ภายใต้ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1.24 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแคลไซน์ปูนเม็ดที่ 700-900 องศาเซลเซียส ปูนเม็ดก่อนแคลไซน์พบเฟส katoite, hillebrandite (α - C_2SH) เมื่อแคลไซน์ที่ 700 องศาเซลเซียส katoite จะเปลี่ยนไปเป็นเบไลต์เฟส (α'_L - Ca_2SiO_4 , β - Ca_2SiO_4) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแคลไซน์จะพบเบไลต์เฟสมากขึ้น และที่ 900 องศาเซลเซียส จะพบเฟส gehlenite เมื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า ปูนเม็ดก่อนแคลไซน์พบอนุภาคสี่เหลี่ยมผืนผ้าและอนุภาคคล้ายเม็ดยา ซึ่งเกิดจากมี α - C_2SH อยู่ร่วมกับ CSH gel และพบรูปร่างอนุภาคคล้ายรูปลูกบาศก์ของ katoite เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแคลไซน์จะมีเส้นใยมากขึ้น และที่ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเส้นใยจะปกคลุมอยู่บนทรงกลมที่เกาะกลุ่มกัน และที่ 900 องศาเซลเซียส มีการโตของผลึกมากขึ้น และไม่พบเส้นใย อนุภาคโดยรวมคล้ายกับแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า แสดงว่ารูปร่างของเบไลต์เฟสที่ได้มาจาก α - C_2SH จะมีลักษณะเป็นเส้นใย และ CSH gel ลักษณะอนุภาคคล้ายเม็ดยาสี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วนอนุภาคของ C_2AS จะเป็นทรงกลม

ผลของอุณหภูมิในระบบไฮโดรเทอร์มอลและอุณหภูมิในการแคลไซน์

Guerrero และคณะ [16] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์จากเถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมสูงเป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยสังเคราะห์ภายใต้ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ 100, 150 และ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1.24 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นนำแคลไซน์ปูนเม็ดที่ 700-1000 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแคลไซน์จาก 700-800 องศาเซลเซียส ปริมาณ α'_L - Ca_2SiO_4

สูงขึ้น โดยระบบที่ใช้ตัวกระตุ้นจะมี α'_L -Ca₂SiO₄ มากกว่า และมีแคลเซียมคาร์บอเนตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีตัวกระตุ้นที่ 900-1000 องศาเซลเซียส พบ β -Ca₂SiO₄, gehlenite และมีแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าที่ 900 องศาเซลเซียส จะพบ β -Ca₂SiO₄ แต่ทั้ง gehlenite และแคลเซียมออกไซด์ส่งผลในทางลบต่อซีเมนต์ เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ซีเมนต์เกิดการขยายตัวเมื่อผสมกับน้ำ และเฟส gehlenite มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับน้ำน้อย ฉะนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีเมนต์เบลต์ คือ การไฮโดรเทอร์มอลที่ 200 องศาเซลเซียส และแคลไชน์ที่ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะพบเฟสของ α'_L -Ca₂SiO₄ ในปูนเม็ด

ผลของตัวกระตุ้น

Guerrero และ Goni [17] ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เบลต์ที่ไม่ถูกกระตุ้น (FABC-1-W) กับซีเมนต์เบลต์ที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น (FABC-1-N) ซึ่งซีเมนต์เบลต์ทั้ง 2 ชนิดถูกสังเคราะห์ด้วยการไฮโดรเทอร์มอล 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1.24 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแคลไชน์ปูนเม็ดที่ 800 องศาเซลเซียส เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของซีเมนต์เบลต์หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 28 วัน พบเฟส α'_L -Ca₂SiO₄, calcite ในซีเมนต์เบลต์ทั้ง 2 ชนิด และพบแคลเซียมออกไซด์ใน FABC-1-W เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของมอร์ต้าที่อายุบ่ม 28 วัน ที่อุณหภูมิบ่ม 21 องศาเซลเซียส ของ FABC-1-N และ FABC-1-W เท่ากับ 6.7, 4 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ กล่าวคือ FABC-1-N มี α'_L -Ca₂SiO₄ มากกว่า FABC-1-W

ผลของสารประกอบที่ได้หลังจากไฮโดรเทอร์มอล

Georgescu และคณะ [18] ศึกษาการสังเคราะห์เบตาไดแคลเซียมซิลิเกตจากแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา ใช้อัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ต่อเฟสเบตาไดแคลเซียมซิลิเกตที่เกิดขึ้น คือ ภายใต้อุณหภูมิและความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ 95 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 เมกกะปาสคาล 10 ชั่วโมง และที่ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ 195 องศาเซลเซียส ความดัน 1.65 เมกกะปาสคาล 10 ชั่วโมง หลังจากไฮโดรเทอร์มอลทั้งสองความดันพบเฟส CSH และแคลไชน์ที่ 700-900 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า การปฏิกิริยาไฮเดรชันของ β -C₂S สังเคราะห์ที่ความดัน 1.65 เมกกะปาสคาล เซลเซียสและแคลไชน์ 700 องศาเซลเซียสจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์หลังจาก 7 วัน ส่วนการปฏิกิริยาไฮเดรชันของ β -C₂S สังเคราะห์ที่ความดัน 0.1 เมกกะปาสคาล เซลเซียส และแคลไชน์ 800 องศาเซลเซียสจะเกิดขึ้นประมาณ 50% หลังจาก 7 วัน กรณีค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของ β -C₂S สังเคราะห์ที่ความดัน 0.1 เมกกะปาสคาล และแคลไชน์ 800 องศาเซลเซียส ค่าความ

แข็งแรงจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงของ β -C₂S สังเคราะห์ที่ความดัน 1.65 เมกะปาสกาล เซลเซียส และแคลไซน์ 700 หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน 3 วัน ค่าความแข็งแรงจะลดลงซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันค่อนข้างสูง ดังนั้นระบบที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ β -C₂S คือ ที่ความดัน 0.1 เมกะปาสกาลเหมาะสม

Singh และคณะ [19] ศึกษาการสังเคราะห์เบตาไดแคลเซียมซิลิเกตจากแคลเซียมออกไซด์และซิลิกา ใช้อัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 สังเคราะห์ภายใต้ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ 205-215 องศาเซลเซียส ความดัน 1.73-1.94 เมกะปาสกาล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากไฮโดรเทอร์มอลได้เฟส hillebrandite, xonotlite จากนั้นแคลไซน์ปูนเม็ดที่ 700-1200 องศาเซลเซียส พบว่าที่ 900 องศาเซลเซียส จะได้ β -C₂S, มี wollastonite ปนเล็กน้อย และมี free lime ประมาณ 1% พบว่า β -C₂S ที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มอลนั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากประมาณ 4.5 ตารางเมตรต่อกรัม จึงต้องการน้ำมากในการขึ้นรูป ใช้ w/c=2.5 เมื่อศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ดก่อนแคลไซน์และแคลไซน์ที่ 900 องศาเซลเซียส พบว่ามีลักษณะคล้ายเข็มเหมือนกัน แสดงว่า β -C₂S นั้นสามารถเปลี่ยนฟอร์มมาจาก hillebrandite, xonotlite พบว่า องค์ประกอบทางแร่ของซีเมนต์เฟสที่อายุบ่ม 14 และ 28 วันพบว่ามีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง อาจเนื่องจากมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่วนหนึ่งกลายเป็นอสัณฐาน และมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์บางส่วนทำปฏิกิริยาเกิดเป็น CSH

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดซีเมนต์เบไลต์ คือ อุณหภูมิและความดันในหม้อหนึ่งความดันไอน้ำ, สารละลายเบสที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา, อุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซน์ค่อนข้างมีผลต่อการเกิดซีเมนต์เบไลต์ เพราะเป็นการเปลี่ยนจากเฟสของสารประกอบที่มีน้ำในโครงสร้างไปเป็นซีเมนต์เฟส และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้แคลไซน์มีผลต่อฟอร์มของเบไลต์เฟส (α'_L -Ca₂SiO₄, β -Ca₂SiO₄) และฟอร์มของเบไลต์เฟสจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์ที่ได้

2.7 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ผลิตวัสดุซีเมนต์ชนิดที่มีเบไลต์เป็นองค์ประกอบสูง เพื่อลดการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ
2. ศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุซีเมนต์เบไลต์ และเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของวัสดุซีเมนต์เบไลต์ที่เตรียมได้กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.8 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษา

ทราบชนิดของวัตถุดิบที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น รวมถึงสถานะที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเป็นวัสดุซีเมนต์

2.9 ขอบเขตการศึกษา

- 2.9.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบตั้งต้น
- 2.9.2 ศึกษาการสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบเผา
- 2.9.3 ศึกษาการสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบไฮโดรเทอร์มอล

บทที่ 3

เครื่องมือ อุปกรณ์ วัสดุดิบ สารเคมี และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

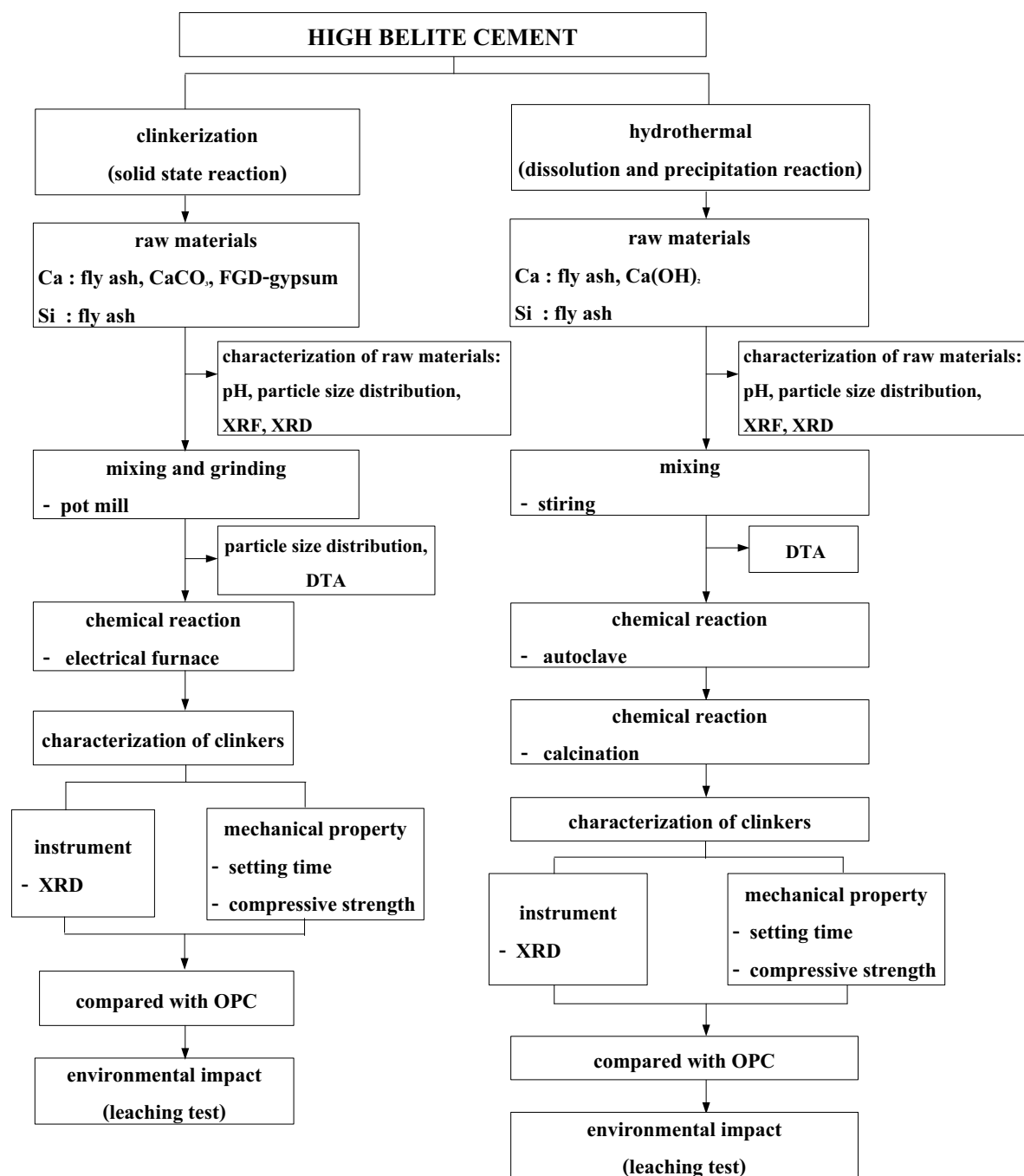
1. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (particle size analyzer) รุ่น Mastersizer S ของบริษัท Malvern
2. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ (differential thermal analysis; DTA) ของบริษัท Perkin-Elmer
3. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (x-ray diffraction; XRD) รุ่น X'Pert pro MPD ของบริษัท Philips
4. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence; XRF) รุ่น Magix pro MUA/USEP T84005 ของบริษัท Philips
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) รุ่น JSM-5910 LV ของบริษัท JEOL
6. เครื่องวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₃ analyzer) รุ่น SC632 ของบริษัท LECO
7. หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) รุ่น 1941 x
8. เตาเผาไฟฟ้า ของบริษัท Lenton Thermal Design Limited
9. เครื่องวัดพีเอช รุ่น ID 1000 ของบริษัท Index

3.2 วัสดุดิบและสารเคมี

1. เถ้าลอย โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
2. เถ้าหนัก จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
3. เถ้าไม้ จากโรงงานอิฐ จังหวัดเชียงใหม่
4. เอฟจีดียิปซัม (FGD-gypsum) โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
5. ฟอสโฟยิปซัม (phospho-gypsum) โรงงานปุ๋ยแห่งชาติ จังหวัดระยอง
6. ตะกอนจาโรไซต์ (jarosite slag) โรงงานถลุงสังกะสี จังหวัดตาก
7. ดินดำแม่ตาน
8. ดินแดงคอยสะเก็ด
9. แคลเซียมคาร์บอเนต เกรดการค้า
10. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เกรดการค้า
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Merk
12. แบเรียมคาร์บอเนต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Fluka
13. สทรอนเนียมคาร์บอเนต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Fluka

14. โฟเทสเซียมคาร์บอเนต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Merk
15. แบเรียมซัลเฟต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Merk
16. แบเรียมคลอไรด์ เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Ajax
17. แบเรียมคาร์บอเนต เกรดวิเคราะห์ ยี่ห้อ Merk

3.3 วิธีการทดลอง



3.3.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ

เตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์โดยการอบแห้งวัตถุดิบ ซึ่งประกอบด้วย ถั่วลันเตา, ถั่วแขก, ถั่วเขียว, เอฟจีดีบีซีเอ็ม, ฟอสโฟอีบีซีเอ็ม, ตะกอนจาโรโซท, ดินดำแม่ทาน และดินแดงคอยสะเก็ด และศึกษาค่าพีเอช, ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, องค์ประกอบทางเคมี และองค์ประกอบทางแร่

3.3.2 การสังเคราะห์ไดแคลเซียมซิลิเกตแบบเผา

คำนวณวัตถุดิบในอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ยืนไฟที่อุณหภูมินั้น 60 นาที และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

3.3.2.1 ศึกษาผลของตัวกลางในการเย็นตัวต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกตที่ 1300°C

คำนวณวัตถุดิบในอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 1300 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมินั้น 60 นาที และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศและในลิควิดไนโตรเจน

3.3.2.2 ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์

คำนวณวัตถุดิบในอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน วิเคราะห์วัตถุดิบผสมด้วยเครื่อง DTA เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัตถุดิบผสมและทำนายอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์

3.3.2.3 ศึกษาผลของชนิดไอออนที่มีต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกตที่ 1180°C

คำนวณวัตถุดิบในอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และใช้ไอออนบวก คือ แบเรียมคาร์บอเนต, สทรอนเชียมคาร์บอเนต, โพแทสเซียมคาร์บอเนต และไอออนลบ คือ แบเรียมซัลเฟต, แบเรียมคลอไรด์, แบเรียมคาร์บอเนต ร่วมด้วย โดยผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 1180 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมินั้น 60 นาที และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

3.3.2.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต

คำนวณวัตถุดิบในอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 900-1180 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมินั้น 60 นาที และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

3.3.2.5 ศึกษาผลของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต

คำนวณวัตถุดิบในอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 โดยใช้เถ้าแกลบเป็นแหล่งให้ซิลิกา ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 1100 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมินั้น 60 นาที และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

3.3.2.6 ศึกษาผลของอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาเท่ากับ 3 ต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต

คำนวณวัตถุดิบในอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3 ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 1200 องศาเซลเซียส และ 1300 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมินั้น 60 นาที และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

3.3.2.7 ศึกษาผลของซัลเฟตต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต

คำนวณวัตถุดิบในอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และใช้เอพิจิตยิปซัมเป็นแหล่งให้ซัลเฟต ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 1200 องศาเซลเซียส และ 1300 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมินั้น 60 นาที และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

3.3.2.8 ศึกษาการสังเคราะห์ซีเมนต์เบลต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็ก และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบสูง

คำนวณองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเพื่อให้ได้เฟสของไดแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ (C₄(Al_{0.6}Fe_{0.4})₃S) ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบ

ผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 1200 องศาเซลเซียส และ 1300 องศาเซลเซียส ยืนไฟที่อุณหภูมินั้น 60 นาที และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผา เพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

3.3.2.9 ศึกษาการสังเคราะห์ซีเมนต์เบลต์ที่มีหลักเป็นองค์ประกอบสูง

คำนวณองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเพื่อให้เฟสไดแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับโมโนแคลเซียมเฟอร์ไรต์ (CF; $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) ผสมวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำวัตถุดิบผสมที่ได้ใส่ในถ้วยทนไฟและนำเข้าเตาเผา เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาทีถึง 800 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30 นาที และเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึง 1180 องศาเซลเซียส และนำปูนเม็ดออกจากเตาเผาเพื่อให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

3.3.2.10 ศึกษาสมบัติเชิงกล

นำปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และเอฟจีดีพีซัม ($\text{SO}_4 = 3.7\%$) เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 7 องศาเซลเซียสต่อนาที มาทดสอบค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดที่อายุปม 28 และ 45 วัน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนเม็ดเท่ากับ 0.480 และปูนเม็ดต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75

3.3.2.11 ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ วัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และเอฟจีดีพีซัม ($\text{SO}_3 = 3.7\%$) ศึกษาปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ ทดสอบที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส และไม่ใช้ตัวกะตะลิสต์

ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะ ทดสอบการชะล้างของโลหะหนักของซีเมนต์เบลต์ (ปูนเม็ด) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งสกัดด้วยวิธี waste extraction test (WET) โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลฟิติกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นน้ำสกัด

3.3.3 การสังเคราะห์ไดแคลเซียมซิลิเกตแบบไฮโดรเทอร์มอล

ละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับเถ้าลอยในอัตราส่วน โมลแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 และ 3 โมลาร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นำสารละลายที่ได้เข้าเครื่องออโตเคลฟอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และแคลไชน์ของแข็งที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส

3.3.3.1 ศึกษาอุณหภูมิของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอล

ละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับถ้ำลอยในอัตราส่วนโมลแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 นำสารละลายที่ได้เข้าเครื่องออโตแคลฟอณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ความดัน 1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อบสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลให้แห้ง และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลและทำนายอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์

3.3.3.2 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ด

นำสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

3.3.3.3 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ด

นำสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM

3.3.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล

นำสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลมาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส และศึกษาหาขนาดอนุภาค, ค่าความละเอียดด้วยวิธีแอร์เพอร์มิอะบิลิตี, การก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เบสโพลีเอสเทอร์ และทดสอบค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดที่อายุบ่ม 28 วัน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนเม็ดเท่ากับ 0.873 และปูนเม็ดต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75

3.3.3.5 ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ นำสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลศึกษาปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ ทดสอบที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส และไม่ใช้ตัวสะตะลิสต์

ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะ ทดสอบการชะล้างของโลหะหนักของซีเมนต์เบสโพลีเมอร์ดาร์ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งสกัดด้วยวิธี waste extraction test (WET) โดยใช้สารละลายโซเดียมซิริกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นน้ำสกัด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ

4.1.1 ศึกษาค่าพีเอชและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบ

เมื่อนำวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์มาวิเคราะห์ค่าพีเอช และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบ ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า เถ้าไม้, เถ้าลอย และเถ้าหนักมีความเป็นเบสสูงตามลำดับ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุเหลือใช้มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับดินทั้งสองชนิด

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพีเอช และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	พีเอช	ขนาดอนุภาค	
		d (0.5)	D[4,3]
เถ้าลอย	12.29	31.95 μm	61.65 μm
เถ้าหนัก	10.99	74.02 μm	91.56 μm
เถ้าไม้	13.10	50.71 μm	78.77 μm
เอฟีคิยิปซัม	7.30	42.76 μm	48.38 μm
ฟอสโฟยิปซัม	5.49	24.15 μm	29.15 μm
ตะกอนจาโรไซท์	5.57	9.03 μm	19.56 μm
ดินดำแม่ทาน	2.25	2.96 μm	4.61 μm
ดินแดงคอยสะเก็ด	3.92	6.77 μm	13.48 μm

4.1.2 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

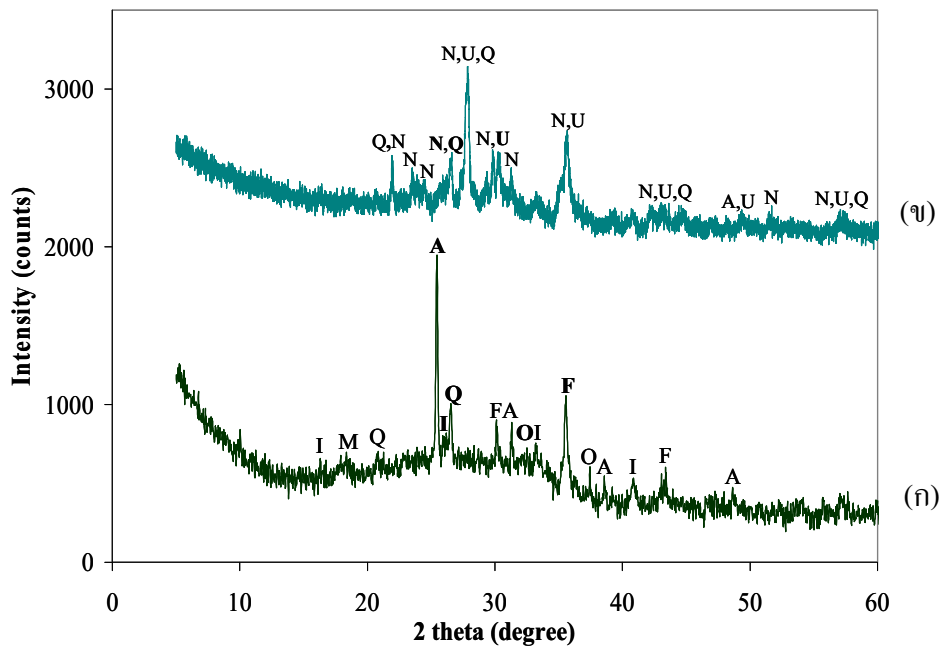
เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า เถ้าลอยและเถ้าหนักมีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา รองลงมาคือ อะลูมินาและแคลเซียมออกไซด์ เถ้าไม้มีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ ยิปซัมทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบหลักของซัลเฟต รองลงมาคือ แคลเซียมออกไซด์ ตะกอนจาโรไซท์มีองค์ประกอบของซิลิกามากที่สุด รองลงมาคือ ซัลเฟตและแคลเซียมออกไซด์ ดินทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบของอะลูมินาและซิลิกามากที่สุด และพบเหล็กออกไซด์ในดินแดงคอยสะเก็ดมากกว่าดินดำแม่ทาน จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจะใช้ประกอบในการคำนวณวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อให้ได้เฟสไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)										
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	MnO ₂
เถ้าลอย	17.21	38.45	14.38	0.93	2.77	2.49	21.32	0.18	1.69	0.44	0.15
เถ้าหนัก	15.54	39.56	14.93	0.77	2.76	2.54	22.48	0.19	0.65	0.46	0.12
เถ้าไม้	77.24	2.33	0.56	0.07	11.14	2.85	0.34	3.44	1.77	0.06	0.19
เอฟีดีียิปซัม	46.77	1.69	0.67	0.06	0.05	0.52	0.63	0.03	49.54	0.03	0.02
ฟอสโฟ ยิปซัม	44.92	1.87	0.37	0.14	0.05	0.08	0.33	0.12	52.07	0.02	0.01
ตะกอน จาโรไซท์	23.60	33.28	9.73	0.60	1.01	0.26	3.67	0.14	27.35	0.20	0.16
ดินค้ำแม่ทาน	2.34	66.08	2.26	0.22	2.40	0.47	27.20	0.04	0.02	1.07	0.01
ดินแดง คอยสะเก็ด	0.13	41.69	25.20	0.06	0.46	0.41	25.47	0.23	0.02	6.24	0.09

4.1.3 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบ

เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงดังรูปที่ 4.1-4.7 และตารางที่ 4.3 จากกราฟสามารถบอกความเป็นผลึก (crystalline) หรือไม่เป็นผลึก (amorphous) ของวัตถุดิบได้ กล่าวคือ จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าลอยและเถ้าหนักจะมีความไม่เป็นผลึกมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าไม้ ซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการได้มาของเถ้าลอยและเถ้าหนักที่ต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดเป็นของหลอมทำให้ได้เนื้อแก้วเมื่อเย็นตัว

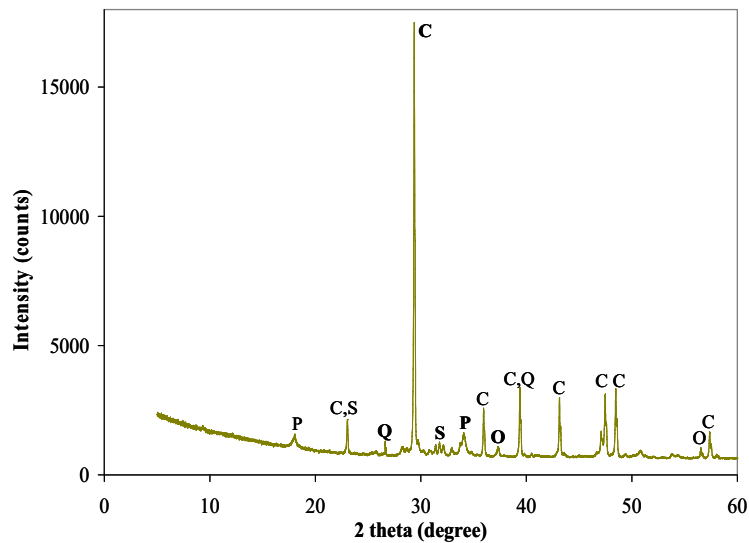


รูปที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของ (ก) แก้วลอย และ (ข) แก้วหนัก

[A:anhydrite (CaSO_4), I:mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), M:mayenite ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$), Q:quartz (SiO_2), F:magnetite (Fe_3O_4), O:calcia (CaO), U:augite ($\text{Ca}(\text{Mg,Al,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$), N:anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของแก้วลอยประกอบด้วย anhydrite, quartz, magnetite, mullite และ mayenite จากกราฟมีส่วนที่แสดงองค์ประกอบของอสัณฐาน (glassy phase) เนื่องจากการได้มาของแก้วลอยซึ่งต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง และคาดว่าองค์ประกอบของอสัณฐานนี้จะประกอบด้วยซิลิกา, อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์เป็นหลัก

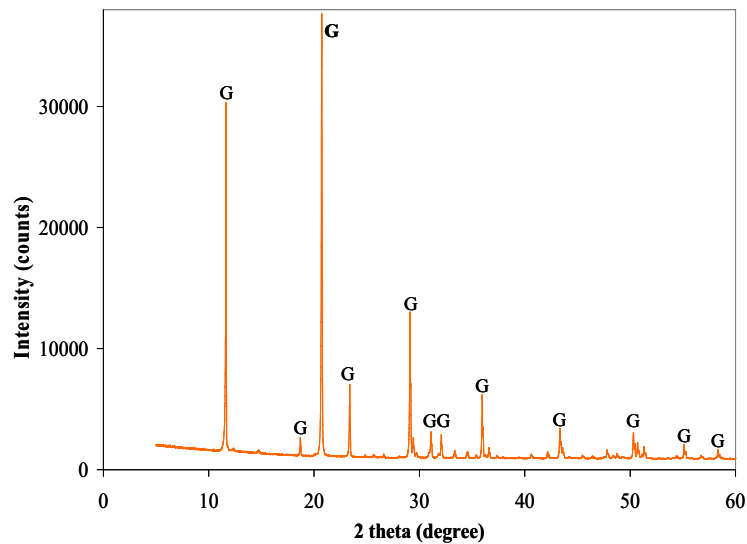
จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของแก้วหนักประกอบด้วย anorthite, augite และ quartz เมื่อเปรียบเทียบความเป็นอสัณฐานกับแก้วลอย พบว่า ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งแก้วหนักน่าจะเป็นอสัณฐานมากกว่าเนื่องจากการได้มาของแก้วหนักผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าและใช้ระยะเวลาที่อุณหภูมิสูงนานกว่าแก้วลอย จึงเกิดการหลอมตัวมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางแร่ของแก้วลอยและแก้วหนักพบแร่ที่เหมือนกันคือ ควอตซ์ ซึ่งปรากฏพีคที่ 2θ ประมาณ 26 องศาจะเห็นว่า แก้วหนักมีปริมาณควอตซ์สูงกว่าแก้วลอยซึ่งสอดคล้องกับผลขององค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณควอตซ์มากกว่าแก้วลอยเล็กน้อย การที่แก้วหนักมีปริมาณควอตซ์มากกว่าแก้วลอยนั้นเนื่องจากการตกผลึกใหม่ของควอตซ์ ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากการเย็นตัวของแก้วหนัก โดยความสามารถในการตกผลึกของควอตซ์ นั้นจะความสัมพันธ์กับความหนืดของสารเมื่อหลอมตัว และพบว่าเมื่อแก้วหนักหลอมตัวจะมีความหนืดมากกว่าแก้วลอย



รูปที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าไม้

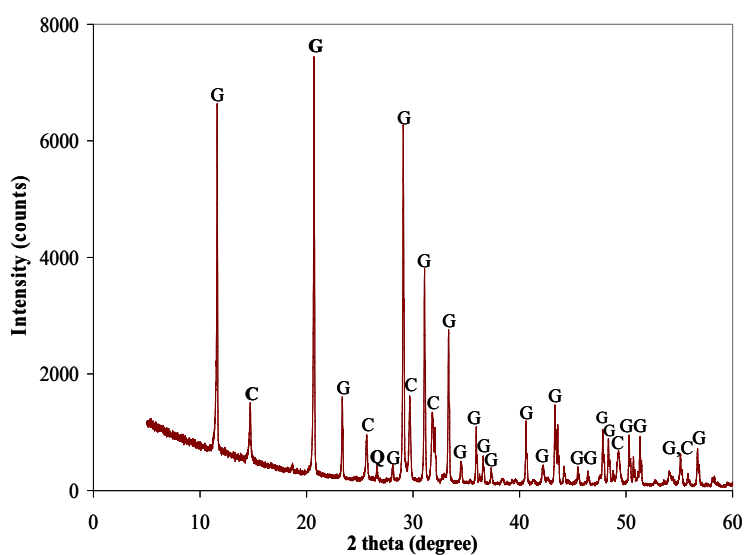
[C:calcite (CaCO_3), P:portlandite (Ca(OH)_2), Q:quartz (SiO_2), O:calcia (CaO), S:sodium Sulfate (Na_2SO_4)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าไม้ประกอบด้วย calcite, portlandite, calcia พบว่า portlandite มีค่าการละลายค่อนข้างสูงจึงเป็นแร่หลักที่ส่งผลให้เถ้าไม้มีความเป็นเบส และลักษณะของกราฟบอกถึงความเป็นผลึกค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของเถ้าฟอสฟอรัส [G:gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)]

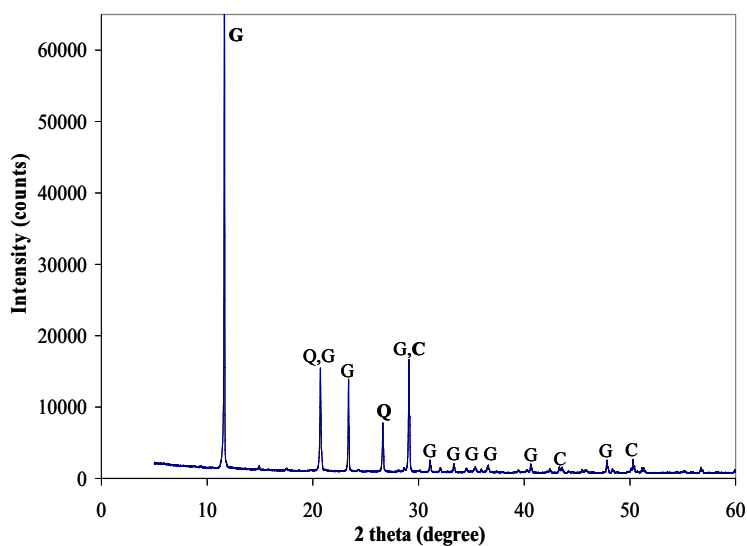
จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของเถ้าฟอสฟอรัสประกอบด้วย gypsum แสดงว่าเถ้าฟอสฟอรัสที่เป็นผลพลอยได้จากระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นค่อนข้างบริสุทธิ์ไม่มีสิ่งเจือปน อีกทั้งลักษณะของกราฟบอกถึงความเป็นผลึกค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของฟอสโฟอียิปต์

[G:gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), C:calcium sulfate hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), Q:quartz (SiO_2)]

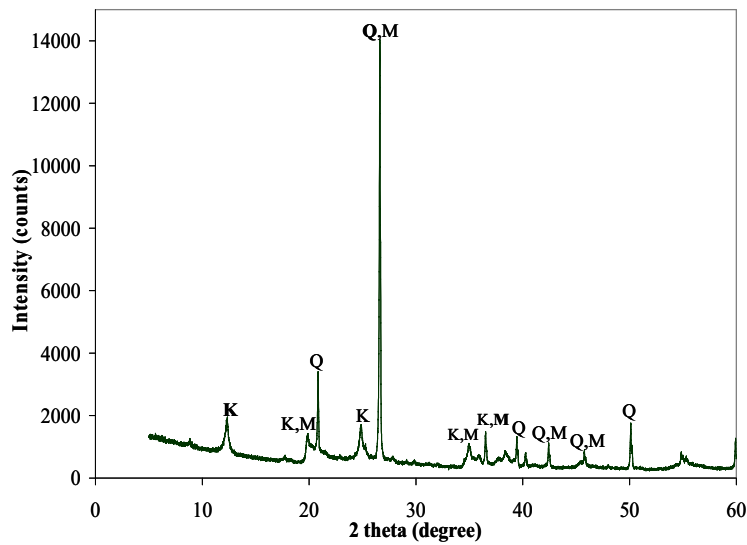
จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของฟอสโฟอียิปต์ประกอบด้วย gypsum, calcium sulfate hemihydrate, quartz และจากลักษณะของกราฟบอกลักษณะความเป็นผลึกค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของตะกอนจาโรไซต์

[G:gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Q:quartz (SiO_2), C:carphosiderite ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}$)]

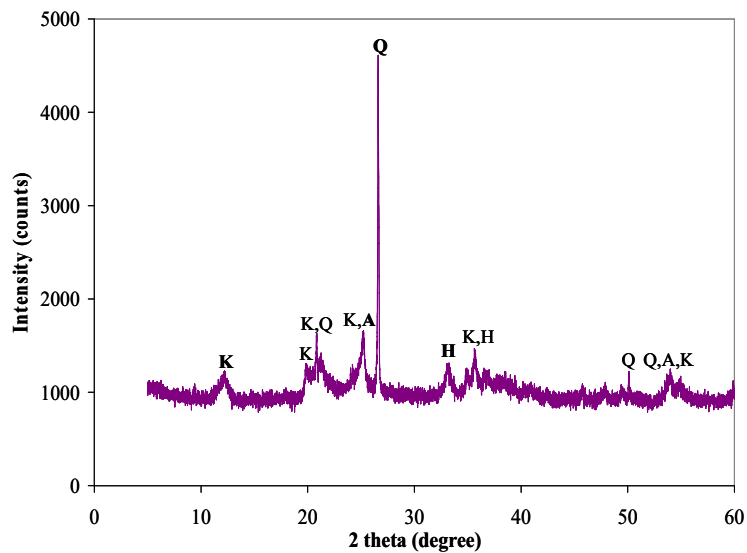
จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของตะกอนจาโรไซต์ประกอบด้วย gypsum, quartz, carphosiderite และจากลักษณะของกราฟบอกลักษณะความเป็นผลึกค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของดินดำแม่ทาน

[Q:quartz (SiO_2), K:kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), M:muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินดำแม่ทานประกอบด้วย quartz, kaolinite, muscovite



รูปที่ 4.7 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของดินแดงดอยสะเก็ด

[Q:quartz (SiO_2), H:hematite (Fe_2O_3), K:kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), A:anatase (TiO_2)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินแดงดอยสะเก็ดประกอบด้วย quartz, kaolinite และมี hematite ซึ่งแร่ hematite นี้ส่งผลให้ดินชนิดนี้มีสีแดง

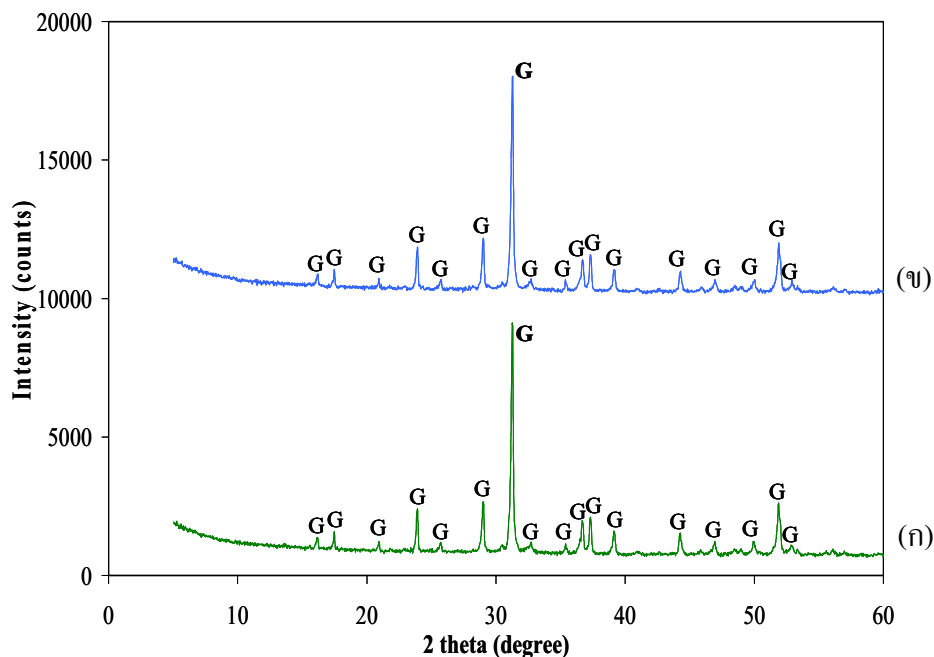
ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางแร่	สูตรทางเคมี
1. เถ้าลอย	anhydrite quartz magnetite calcia mullite mayenite	CaSO ₄ SiO ₂ Fe ₃ O ₄ CaO Al ₆ Si ₂ O ₁₃ Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃
2. เถ้าหนัก	quartz anorthite augite	SiO ₂ Al ₂ Ca(SiO ₄) ₂ Ca(Ma,Al,Fe)Si ₂ O ₆
3. เถ้าไม้	calcite portlandite calcia quartz sodium Sulfate	CaCO ₃ Ca(OH) ₂ CaO SiO ₂ Na ₂ SO ₄
4. เอฟจีดีอีปซัม	Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O
5. ฟอสโฟอีปซัม	gypsum calcium sulfate hydrate quartz	CaSO ₄ .2H ₂ O CaSO ₄ .1/2H ₂ O SiO ₂
6. ตะกอนจาโรไซต์	gypsum quartz carphosiderite	CaSO ₄ .2H ₂ O SiO ₂ Fe ₂ (SO ₄) ₂ (OH) ₅ .H ₂ O
7. ดินดำแม่ทาน	quartz kaolinite muscovite	SiO ₂ Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂
8. ดินแดงคอยสะเก็ด	quartz kaolinite hematite anatase	SiO ₂ Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄ Fe ₂ O ₃ TiO ₂

4.2 การสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบเผา

4.2.1 ศึกษาผลของตัวกลางในการเย็นตัวต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตที่ 1300°C

เมื่อเผาวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย ซึ่งมีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 ที่ 1300 องศาเซลเซียส โดยมีการเย็นตัวปูนเม็ดในอากาศ (air cooling) และเย็นตัวในลิกวิดไนโตรเจน (liquid nitrogen cooling) และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.8



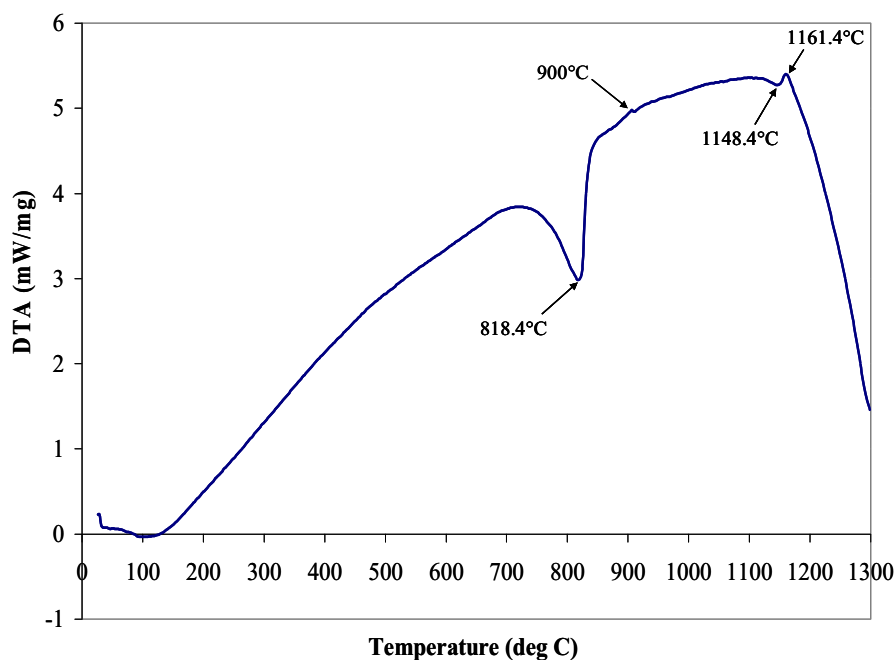
รูปที่ 4.8 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ 1300°C และเย็นตัว
(ก) ในอากาศ และ (ข) ในลิกวิดไนโตรเจน [G: gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$)]

ในการแบ่งช่วงอุณหภูมิการเผาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1300 องศาเซลเซียส จะเกิดเฟส C_2S [6] ในการทดลองนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสในการสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกต

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ พบว่า กราฟที่ได้มีความเป็นผลึกค่อนข้างสูงเนื่องจากเกิดการตกผลึกเป็นสารประกอบใหม่ได้ดี ซึ่งเฟสที่ปรากฏในปูนเม็ดเมื่อเย็นตัวในอากาศและในลิกวิดไนโตรเจน คือ เฟส gehlenite (C_2AS) ซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์, อะลูมินาและ ซิลิกาเป็นหลัก และเป็นเฟสที่ไม่ต้องการในงานวิจัยเนื่องจากไม่มีสมบัติไฮดรอลิก แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 1300 องศาเซลเซียส สูงเกินไปสำหรับการเกิดเฟสไคแคลเซียมซิลิเกต ฉะนั้นจึงทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดเฟสไคแคลเซียมซิลิเกต

4.2.2 ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์

เมื่อนำวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอย ซึ่งมีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบผสม รวมถึงการทำนายอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

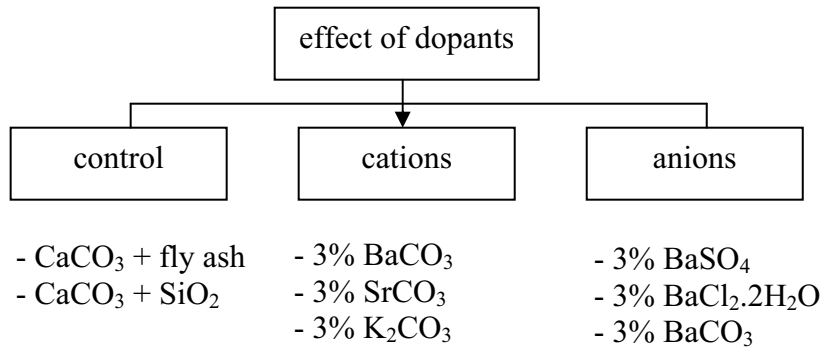


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DTA (mW/mg) กับ อุณหภูมิ (°C) ของวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย

จากกราฟ พบว่า ที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน เนื่องจากเกิดการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตให้ได้แคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และที่อุณหภูมิ 900-1200 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน ซึ่ง ณ อุณหภูมินี้คาดว่าจะเกิดสารประกอบใหม่ขึ้น ฉะนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่คาดว่าจะครอบคลุมการเกิดสารประกอบใหม่ คือ อุณหภูมิ 1180 องศาเซลเซียส ในการศึกษาผลของไอออนต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต

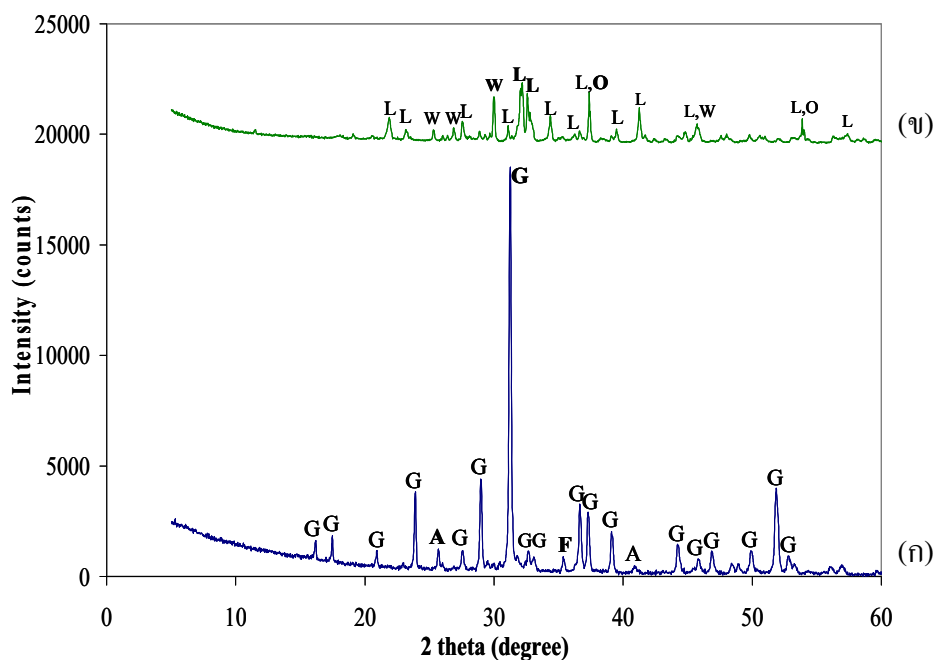
4.2.3 ศึกษาผลของชนิดไอออนที่มีต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกตที่ 1180°C

ศึกษาผลของชนิดไอออนต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ชุด คือ ชุดควบคุม (กรณีที่ไม่มีการเติมไอออน), ผลของไอออนบวก และผลของไอออนลบ



ชุดควบคุม (กรณีไม่มีการเติมไอออน)

เมื่อเผาวัตถุดิบผสมที่ 1180 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 โดยเปรียบเทียบแหล่งให้ซิลิกาต่อการเกิดเฟสไดแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งมีแหล่งให้ซิลิกา คือ เถ้าลอยและซิลิกอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ แสดงดังรูปที่ 4.10



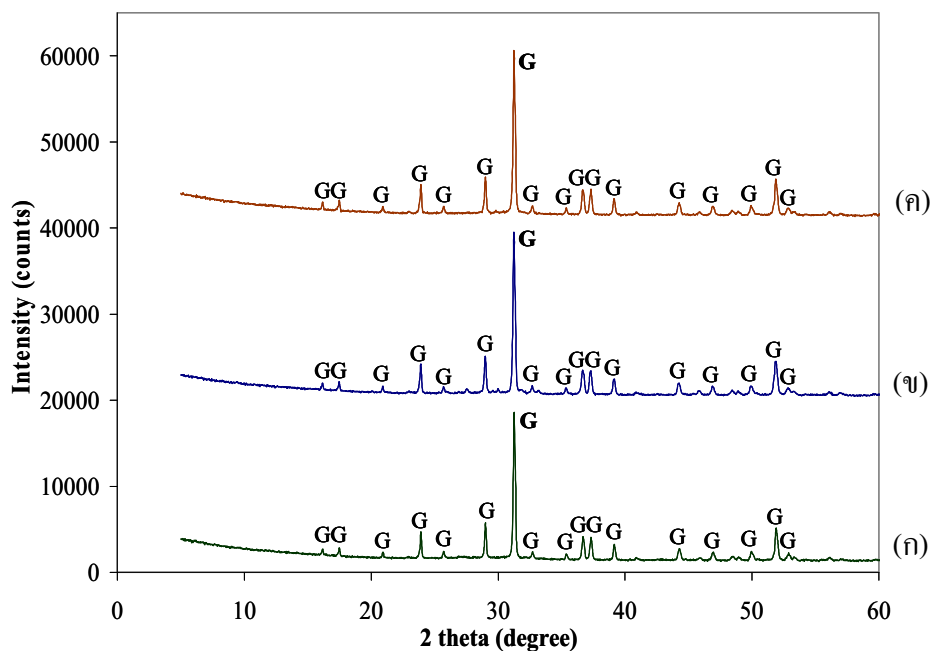
รูปที่ 4.10 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ 1180°C

(ก) แคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย (ข) แคลเซียมคาร์บอเนตกับซิลิกอนไดออกไซด์

[G: gehlenite (Ca₂Al(AlSi)O₇), L: larnite (β-Ca₂SiO₄), W: wollastonite (CaSiO₃),
O: calcium oxide (CaO), A: anhydrite (CaSO₄), F: magnetite (Fe₃O₄)]

ผลของไอออนบวก

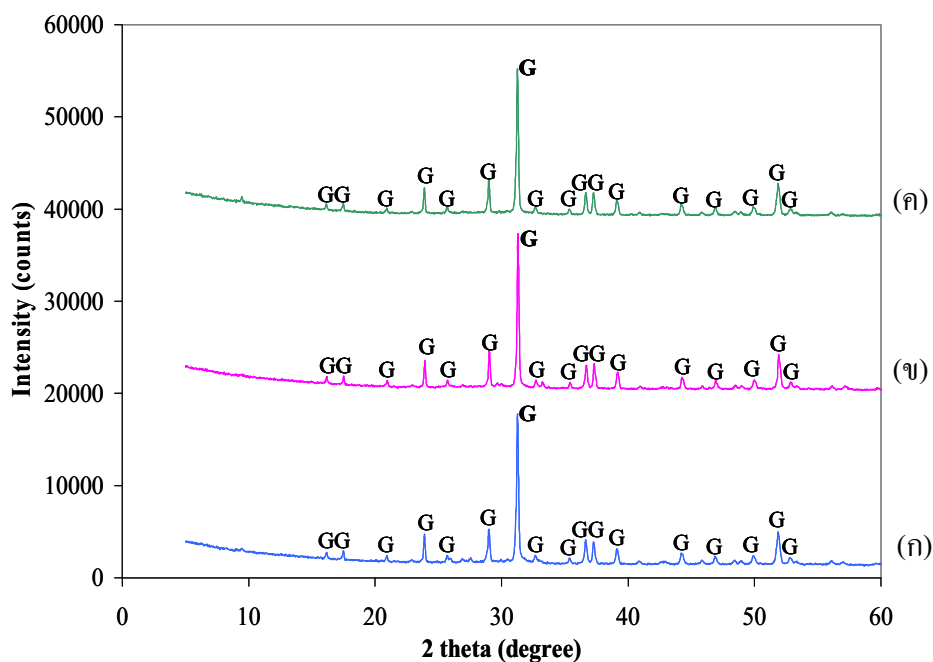
ศึกษาผลของไอออนบวกที่มีต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต โดยคิดอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์และไอออนบวกที่สนใจต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และผลไอออนบวกที่ศึกษา คือ แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3), สตรอนเชียมคาร์บอเนต (SrCO_3) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ในปริมาณอย่างละ 3% และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และ (ก) 3%แบเรียมคาร์บอเนต (ข) 3%สตรอนเชียมคาร์บอเนต (ค) 3%โพแทสเซียมคาร์บอเนต เมื่อเผาที่ 1180°C [G: gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$)]

ผลของไอออนลบ

ศึกษาผลของไอออนลบที่มีต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกต และผลไอออนลบที่ศึกษา คือ แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4), แบเรียมคลอไรด์ ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) และแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) ในปริมาณอย่างละ 3% และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย และ (ก) 3%แบเรียมซัลเฟต (ข) 3%แบเรียมคลอไรด์ (ค) 3%แบเรียมคาร์บอเนต เมื่อเผาที่ 1180°C

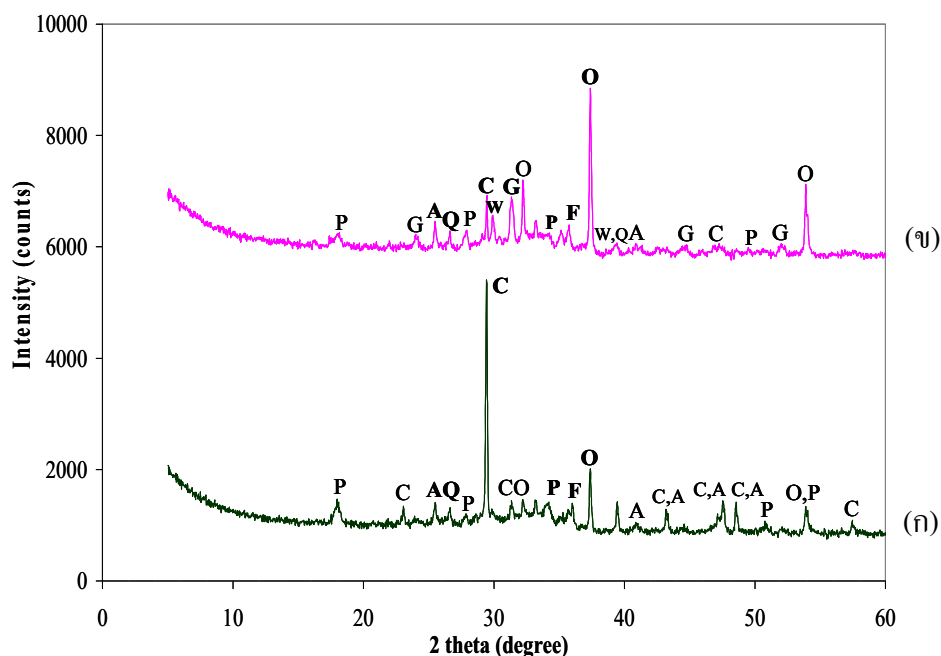
จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดในชุดควบคุมเมื่อเผาวัตถุดิบผสมที่ 1180 องศาเซลเซียส กรณีแหล่งให้ซิลิกาจากซิลิกอนไดออกไซด์จะพบเฟส C_2S (larnite) เกิดขึ้นในปูนเม็ด แต่แหล่งให้ซิลิกาจากเถ้าลอยพบเฟส C_2AS (gehlenite) เกิดขึ้น อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ไม่เหมาะสมที่จะทำให้ซิลิกาจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์เพื่อเกิดเฟสไคแคลเซียมซิลิเกต ฉะนั้นจึงได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่อการเกิดเฟสไคแคลเซียมซิลิเกต

ผลของไอออนบวกที่ศึกษา คือ แบเรียมไอออน (Ba^{2+}), โพแทสเซียมไอออน (K^+) และ สตรอนเชียมไอออน (Sr^{2+}) ซึ่งแต่ละไอออนมีขนาดเท่ากับ 1.4×10^{-10} เมตร, 1.33×10^{-10} เมตร และ 1.26×10^{-10} เมตร ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับขนาดของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เท่ากับ 1.06×10^{-10} เมตร [21] พบว่า มีขนาดไอออนไม่แตกต่างกันมาก จึงเลือกไอออนดังกล่าวมาอยู่ในโครงสร้างร่วมกับแคลเซียมไอออนซึ่งจะส่งผลทำให้มีโอกาสเกิดเฟสของ C_2S ได้มากขึ้น ผลของไอออนลบที่ศึกษา คือ

แบเรียมคาร์บอเนต, แบเรียมคลอไรด์ และแบเรียมซัลเฟต ซึ่งสารประกอบแต่ละชนิดมีจุดหลอมเหลวที่ 811, 962, 1580 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [21] ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ 1180 องศาเซลเซียส มีเพียงแบเรียมซัลเฟตที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า ซึ่งคาดว่าไอออนลบดังกล่าวจะส่งผลทำให้มีโอกาสเกิดเฟสของ C_2S ได้มากขึ้น และจากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่กรณีผลของไอออนลบและไอออนลบ พบว่า เฟสที่พบปูนเม็ดทั้ง 6 ชนิด คือ เฟส gehlenite เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์, ซิลิกาและอะลูมินาและทั้งซิลิกา, อะลูมินาที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าลอยมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดการแข่งขันกันทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์เพื่อเกิดเฟส C_2S และ C_2AS และจากค่าความสามารถในการเกิดเฟส (gibb free energy : ΔG) [24] ของ C_2AS เท่ากับ -3793240.8 จูลต่อโมล และ C_2S เท่ากับ -1064242 จูลต่อโมล จะเห็นว่า C_2AS มีค่าติดลบมากกว่าจึงมีโอกาสเกิดมากกว่าเมื่อเทียบกับ C_2S

4.2.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต

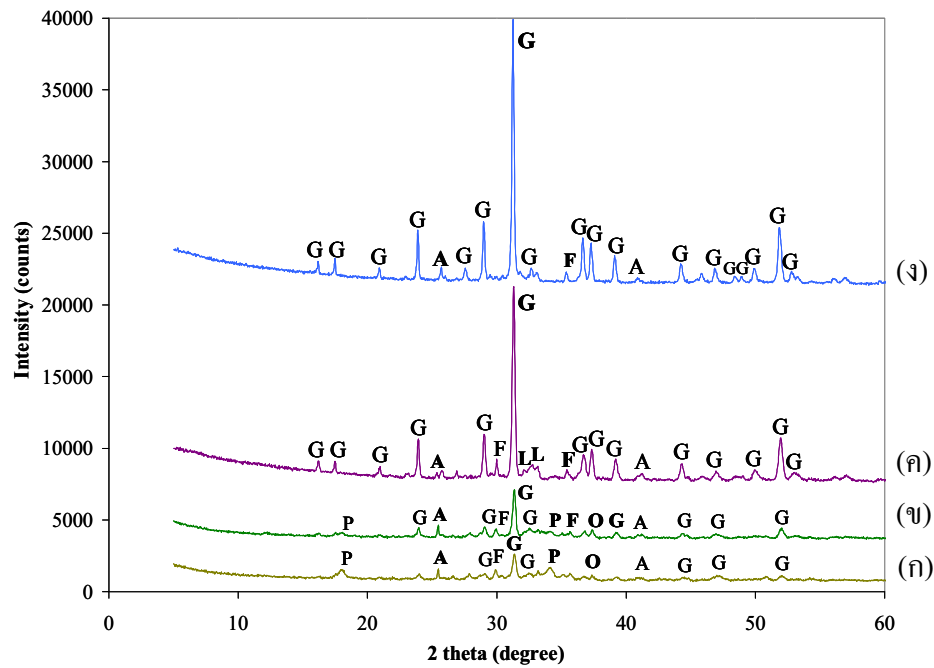
เมื่อเผาวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอยที่ 900-1180 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอัตราส่วน โมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD แสดงได้ดังรูปที่ 4.13-4.14



รูปที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย

เมื่อเผาที่ (ก) 900°C (ข) 950°C

[C:calcium carbonate ($CaCO_3$), P:portlandite ($Ca(OH)_2$), O:calcium oxide (CaO), F:magnetite (Fe_3O_4), A:anhydrite ($CaSO_4$), Q:quartz (SiO_2), G:gehlenite ($Ca_2Al(AlSi)O_7$), L:larnite ($\beta-Ca_2SiO_4$)]



รูปที่ 4.14 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย เมื่อเผาที่

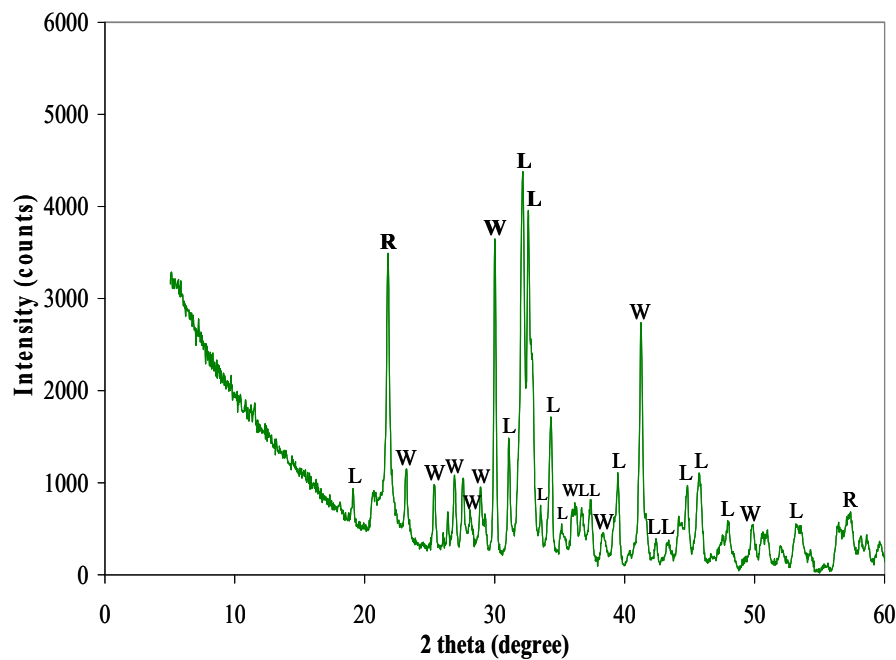
(ก) 1000°C (ข) 1050°C (ค) 1100°C (ง) 1180°C

[C:calcium carbonate (CaCO_3), P:portlandite (Ca(OH)_2), O:calcium oxide (CaO), F:magnetite (Fe_3O_4), A:anhydrite (CaSO_4), Q:quartz (SiO_2), G:gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al(AlSi)O}_7$), L:larnite ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ 900-1180 องศาเซลเซียส พบว่า ที่ 950 องศาเซลเซียส เกิดการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตค่อนข้างสมบูรณ์ให้ได้แคลเซียมออกไซด์ และเกิดเฟสสารประกอบใหม่ คือ gehlenite เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาจะพบเฟส gehlenite เพิ่มขึ้น และเกิดเริ่มเกิดเฟสของ larnite ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ฉะนั้นจึงทำการทดลองโดยเลือกใช้วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาต่ำ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดเฟส larnite ณ อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส

4.2.5 ศึกษาผลของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตที่ 1100°C

เมื่อเผาวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าแกลบที่ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 ซึ่งการทดลองนี้ใช้เถ้าแกลบเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์แทนเถ้าลอยเนื่องจากมีองค์ประกอบของอะลูมินาปริมาณน้อยเพื่อป้องกันการแข่งขันในการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินากับแคลเซียมออกไซด์เพื่อเกิดเฟส gehlenite และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD แสดงได้ดังรูปที่ 4.15

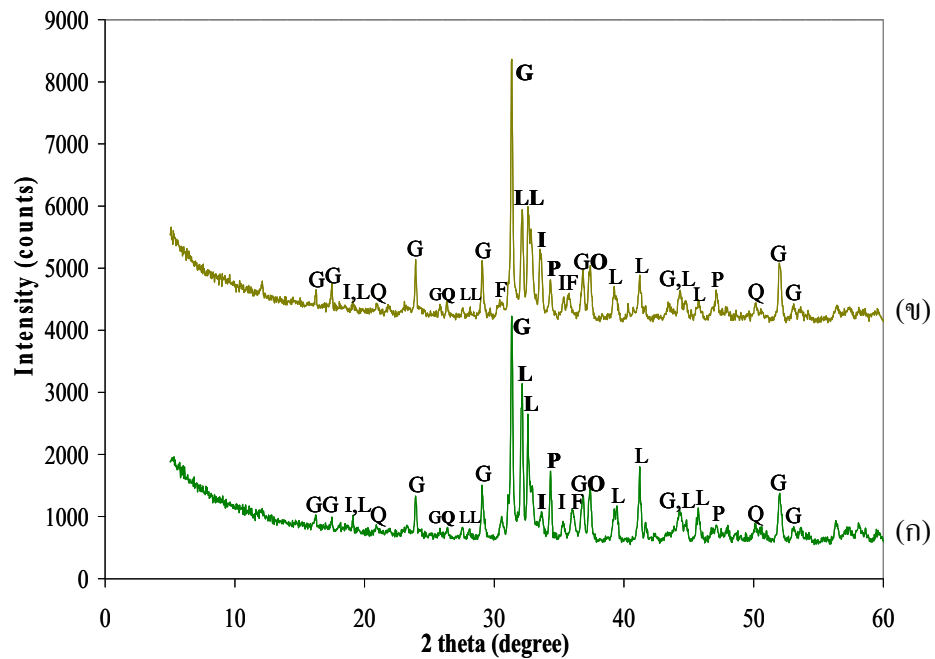


รูปที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าแกลบ เมื่อเผาที่ 1100°C [L:larnite (β - Ca_2SiO_4), W:wollastonite (CaSiO_3), R:cristobalite (SiO_2)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อใช้เถ้าแกลบเป็นวัตถุดิบตั้งต้น พบว่าเฟสสารประกอบใหม่ คือ larnite, wollastonite และมีเฟส cristobalite เหลืออยู่ เนื่องจากในเถ้าแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ฉะนั้นจึงมีโอกาสดเกิดเฟสของไคแคลเซียมซิลิเกตได้ค่อนข้างมาก จากผลการทดลองข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้น รวมถึงความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของออกไซด์นั้นในองค์ประกอบมีผลอย่างมากต่อเฟสที่เกิดขึ้น แสดงว่าแคลเซียมออกไซด์ไม่พอที่จะเกิดเป็น C_2S ซึ่งจะเห็นได้จากพบเฟสของ wollastonite และมี cristobalite เหลืออยู่

4.2.6 ศึกษาผลของอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3 ต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต

เมื่อเผาวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย ซึ่งมีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3 เพื่อให้มีแคลเซียมออกไซด์เพียงพอต่อการเกิดไดแคลเซียมซิลิเกต และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD แสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนตและเถ้าลอย

เมื่อเผาที่ (ก) 1200°C (ข) 1300°C

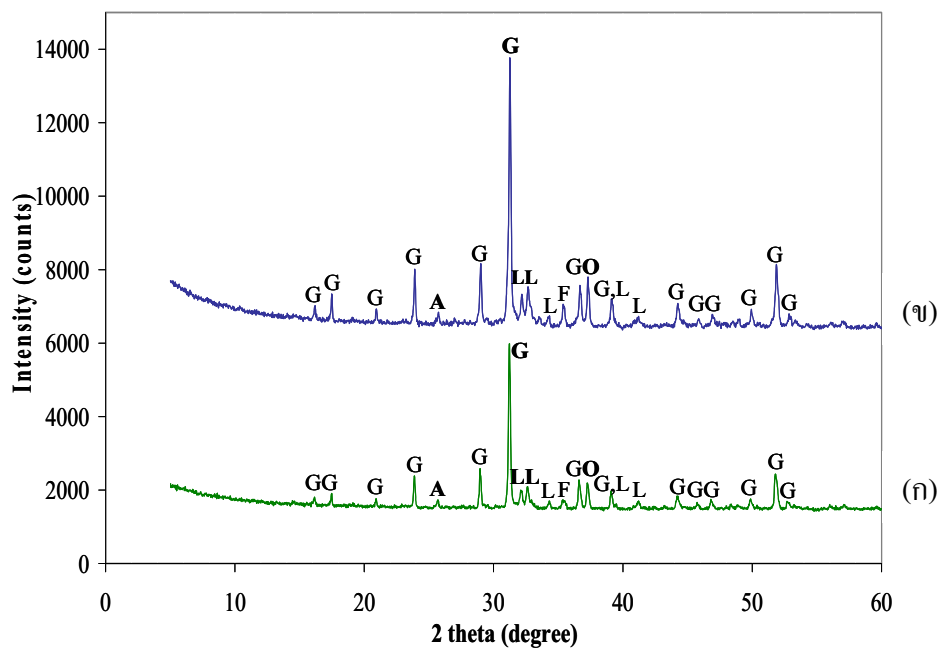
[O:calcium oxide (CaO), P:portlandite (Ca(OH)₂), Q:quartz (SiO₂), F:magnetite (Fe₃O₄), G:gehlenite (Ca₂Al(AlSi)O₇), L:larnite (β-Ca₂SiO₄), I:calcium iron oxide (CaFe₂O₄)]

เมื่อเผาวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอยที่ 1180 องศาเซลเซียส และใช้อัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 เฟสที่พบคือ gehlenite, larnite อาจเนื่องจากในระบบมีแคลเซียมออกไซด์ไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยา ฉะนั้นจึงเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้ระบบโดยใช้อัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ 1200 และ 1300 องศาเซลเซียส พบว่าเกิดสารประกอบใหม่คือ gehlenite, larnite, calcium iron oxide และการที่ระบบมี portlandite และ calcium oxide เหลืออยู่เนื่องจากมีแคลเซียมออกไซด์บางส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซิลิกา แสดงว่าความสามารถในการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์กับซิลิกาในเถ้าลอยเพื่อเกิดเป็นสารประกอบใหม่นั้นมีจำกัด และในระบบที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3 จะมี larnite เพิ่มขึ้น

4.2.7 ศึกษาผลของซัลเฟตที่มีต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกต

เมื่อเผาวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอย ซึ่งมีอัตราส่วน โมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และใช้เอฟจีดีบีซัมเป็นแหล่งให้ซัลเฟต ซึ่งซัลเฟตที่เพิ่มให้กับระบบจะช่วยป้องกันการเกิดเฟส gehlenite (C_2AS) ได้ เนื่องจากซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาเพื่อเกิดเฟส yeelimite ($C_4A_3\bar{S}$) (Ivan, 2000) ทำให้แคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเฟสไคแคลเซียมซิลิเกตได้ และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย

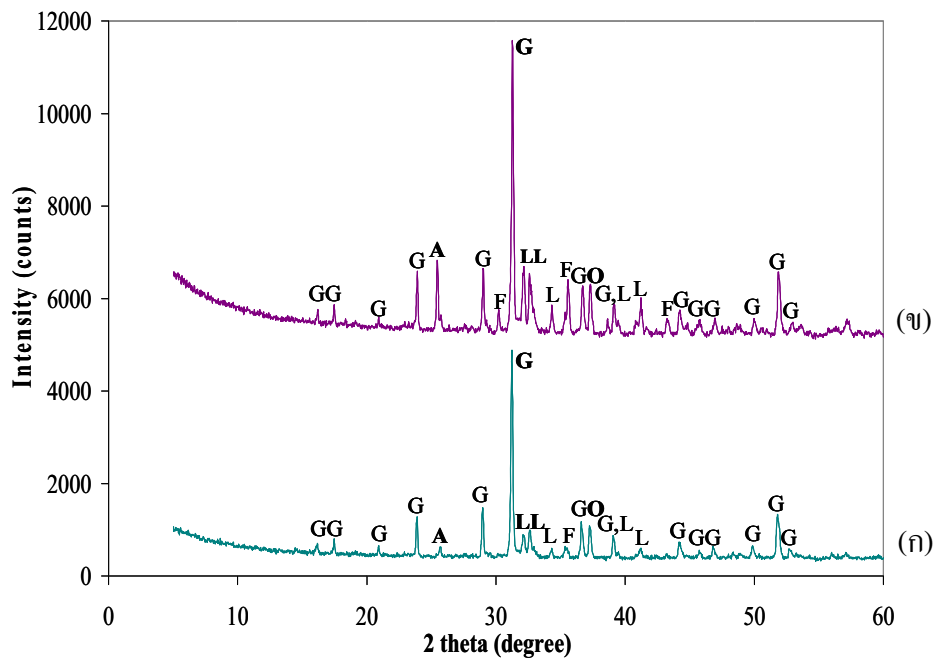
และเอฟจีดีบีซัม เมื่อเผาที่ (ก)1200°C (ข) 1300°C

[O:calcium oxide (CaO), A:anhydrite ($CaSO_4$), F:magnetite (Fe_3O_4),
G:gehlenite ($Ca_2Al(AlSi)O_7$), L:larnite ($\beta-Ca_2SiO_4$)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ 1200 และ 1300 องศาเซลเซียส พบว่า มีเฟสสารประกอบใหม่เกิดขึ้นเหมือนกันคือ gehlenite, larnite และมีเฟส anhydrite, magnetite, calcium oxide เหลืออยู่ เนื่องจากปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มให้กับระบบอาจไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาเพื่อเกิดเฟส yeelimite จึงยังคงพบเฟส gehlenite เป็นหลัก

และจากเฟสที่พบในปูนเม็ดทั้ง 2 อุณหภูมินั้นคือเฟสชนิดเดียวกัน แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นไม่มีผลต่อเฟสสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้น ฉะนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์คือ 1200 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของปริมาณซัลเฟตต่อการเกิดเฟสไคแคลเซียมซิลิเกต ($SO_4 = 3.7\%$, 19.79%)

ใช้อุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 1200 องศาเซลเซียส ในการสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของปริมาณซัลเฟต ($\text{SO}_4 = 3.7\%$, 19.79%) ต่อการเกิดเฟสไดแคลเซียมซิลิเกต และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.18



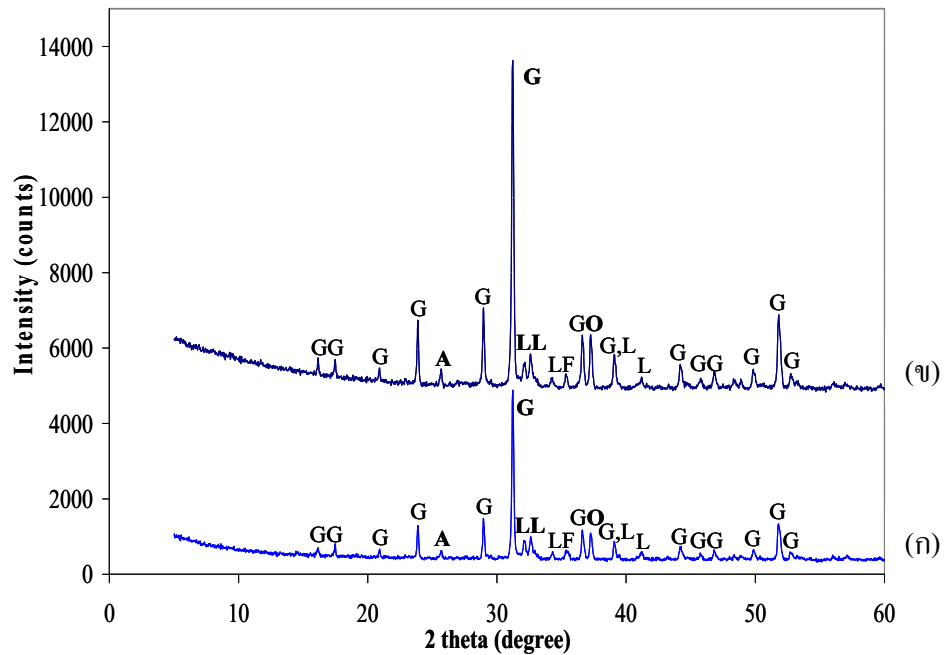
รูปที่ 4.18 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย

และเอพิจิยิปซัม เมื่อเผาที่ 1200°C (ก) $\text{SO}_4 = 3.7\%$ (ข) $\text{SO}_4 = 19.79\%$

[O:calcium oxide (CaO), A:anhydrite (CaSO_4), F:magnetite (Fe_3O_4),
G:gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$), L:larnite ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่มี $\text{SO}_4 = 3.7\%$ และ $\text{SO}_4 = 19.79\%$ เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบว่า สารประกอบใหม่เกิดขึ้นเหมือนกันคือ gehlenite, larnite แต่มีปริมาณ anhydrite ต่างกัน จะเห็นว่าปูนเม็ดที่มี $\text{SO}_4 = 19.79\%$ จะมี anhydrite เหลืออยู่มากกว่า ฉะนั้นจึงเลือกปูนเม็ดที่มีปริมาณซัลเฟต 3.7% เนื่องจากมี anhydrite เหลือน้อยกว่ามาศึกษาถึงผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อการเกิดเฟสไดแคลเซียมซิลิเกต (7°C ต่อนาที, 10°C ต่อนาที)

ใช้อุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 1200 องศาเซลเซียส และวัตถุดิบผสมมีปริมาณซัลเฟตเท่ากับ 3.7% ในการสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่อการเกิดเฟสไดแคลเซียมซิลิเกต (7°C ต่อนาที, 10°C ต่อนาที) และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.19



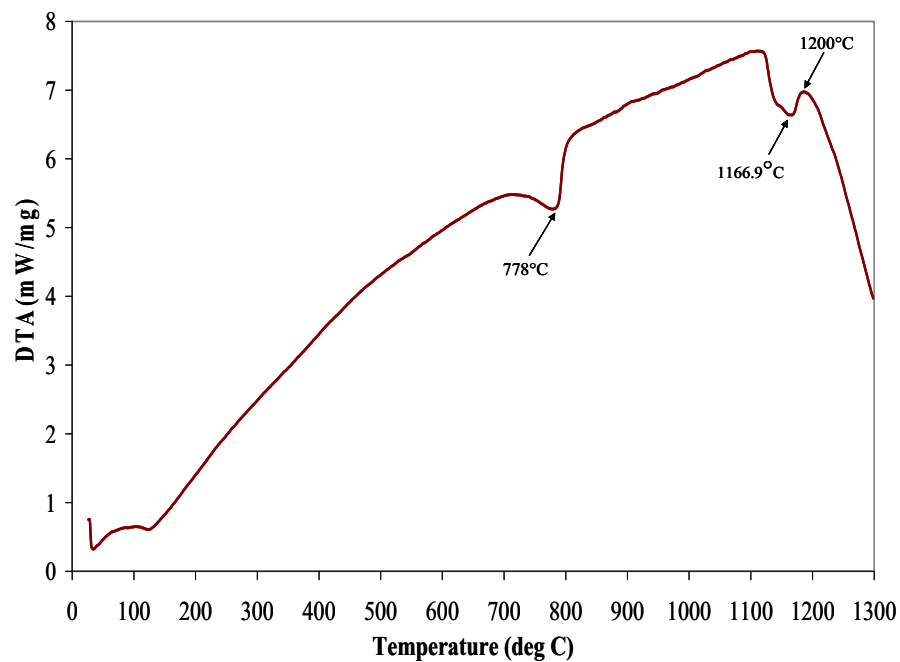
รูปที่ 4.19 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, แก้วลอย และเอพิจิอูปีซัม ($\text{SO}_4 = 3.7\%$) เมื่อเผาที่ 1200°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ

(ก) อัตรา 7°C ต่อนาที (ข) อัตรา 10°C ต่อนาที [O:calcium oxide (CaO), A:anhydrite (CaSO_4), F:magnetite (Fe_3O_4), G:gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$), L:larnite ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิต่างกัน เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และมีปริมาณซัลเฟตเท่ากับ 3.7% พบว่า เฟสสารประกอบใหม่เกิดขึ้นเหมือนกันคือ gehlenite, larnite แสดงว่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมินั้นไม่มีผลต่อเฟสของสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้น

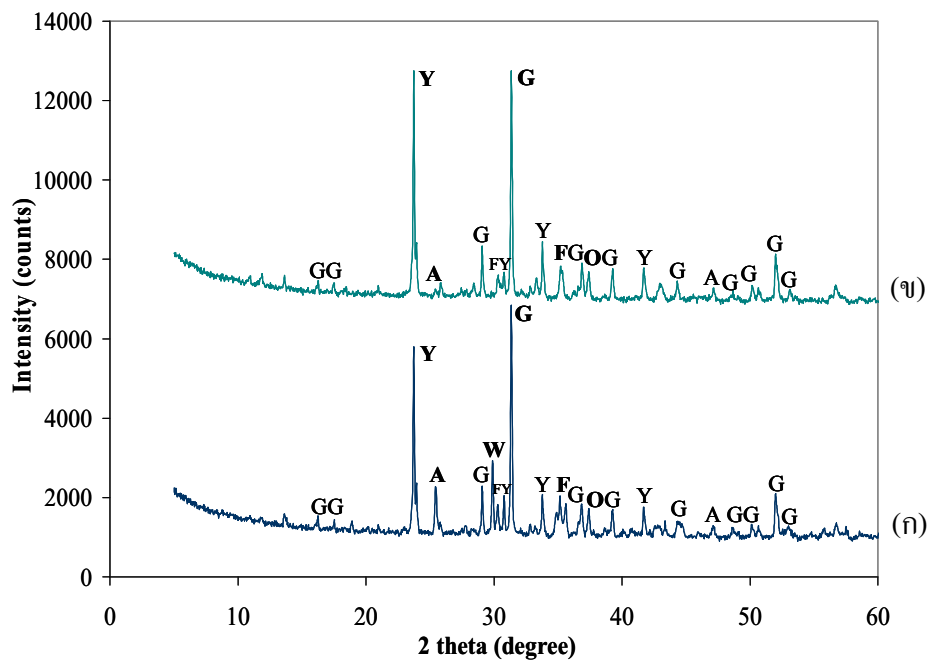
4.2.8 การสังเคราะห์ซีเมนต์เบลิต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็ก และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ (sulpho ferro aluminate-belite cement, SFAB)

เมื่อนำวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย, ฟอสโฟปิซัม, อะลูมินา และเฟอร์รัสซัลเฟต โดยคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเพื่อให้ได้เฟสของไดแคลเซียมซิลิเกต ร่วมกับแคลเซียมซัลโฟเฟอร์โรอะลูมินา ($C_4(Al_{0.6}Fe_{0.4})_3\bar{S}$) มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบผสม รวมถึงการทำนายอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ และวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.20-4.21



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DTA (mW/mg) กับ อุณหภูมิ (°C) ของวัตถุดิบผสมระหว่าง แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย, ฟอสโฟปิซัม, อะลูมินา และเฟอร์รัสซัลเฟต

จากการวิเคราะห์วัตถุดิบผสมด้วยเครื่อง DTA โดยศึกษาตั้งแต่อุณหภูมิ 30-1300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า ที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน เนื่องจากเกิดการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตให้ได้แคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสพบการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน ซึ่งคาดว่า ณ อุณหภูมินี้จะเกิดสารประกอบใหม่ขึ้น จึงใช้อุณหภูมินี้ในการสังเคราะห์ปูนเม็ด



รูปที่ 4.21 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย, อะลูมินา,

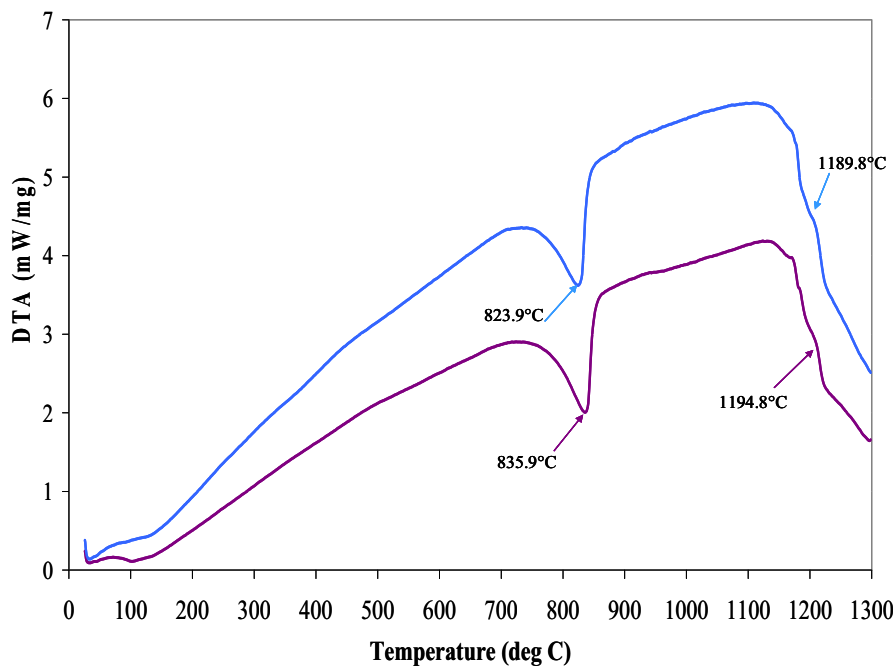
ฟอสโฟปัมและเฟอร์รัสซัลเฟตเมื่อเผาที่ (ก) 1200°C (ข) 1300°C

[G:gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$), Y:yeelimite ($\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4$), F:magnetite (Fe_3O_4),
A:anhydrite (CaSO_4), O:calcium oxide (CaO)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ 1200 และ 1300 องศาเซลเซียส พบว่า มีเฟสสารประกอบใหม่เกิดขึ้นเหมือนกันคือ gehlenite, yeelimite และมี calcium oxide, anhydrite, magnetite เหลืออยู่

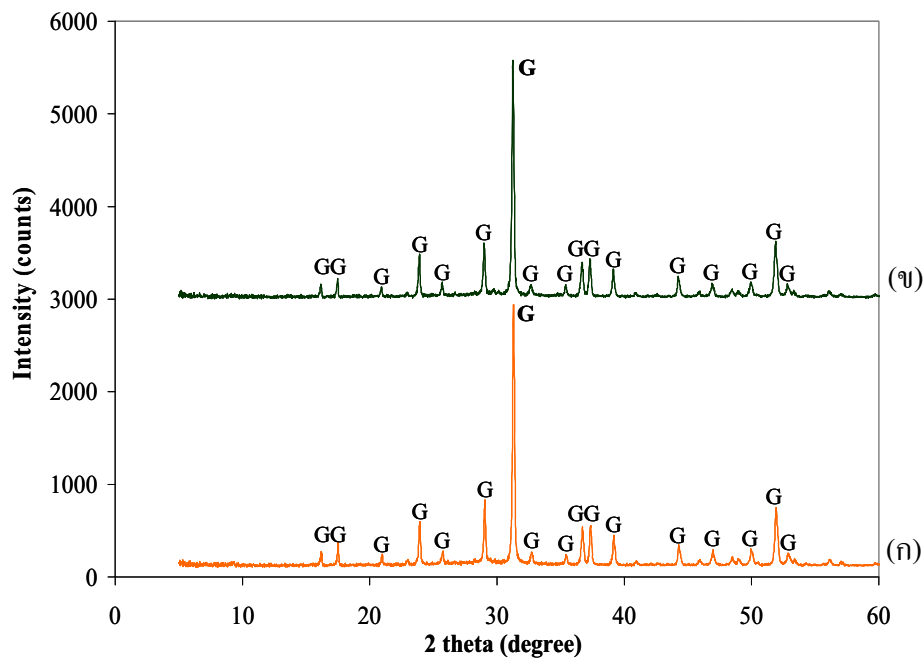
4.2.9 การสังเคราะห์ซีเมนต์เบลิต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง (high ferro-belite cement, HFBC)

เมื่อนำวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับเถ้าลอยและเฟอร์รัสซัลเฟตรวมถึงเฟอร์รัสออกไซด์ ซึ่งมีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์และเฟอร์รัสซัลเฟตรวมถึงเฟอร์รัสออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบผสม รวมถึงการทำนายอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.22-4.23



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DTA (mW/mg) กับ อุณหภูมิ (°C) ของวัตถุดิบผสมระหว่าง แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และ (ก) 3%เฟอร์รัสซัลเฟต (ข) 3%เฟอร์รัสออกไซด์

จากผลการวิเคราะห์วัตถุดิบผสมด้วยเครื่อง DTA โดยศึกษาตั้งแต่อุณหภูมิ 30-1300 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า ที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน เนื่องจากเกิดการแตกตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตให้ได้แคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และที่อุณหภูมิ 1180 องศาเซลเซียสพบการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน ซึ่งคาดว่า ณ อุณหภูมินี้จะเกิดสารประกอบใหม่ขึ้น จึงใช้อุณหภูมินี้ในการสังเคราะห์ปูนเม็ด



รูปที่ 4.23 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดเมื่อเผาที่ 1180°C ที่ได้จาก (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และ 3% เฟอรัสซิลิเกต (ข) แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และ 3% เฟอรัสออกไซด์
[G: gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดทั้ง 2 ชนิดที่มีการคิดสารประกอบเฟอรัสซิลิเกต และเฟอรัสออกไซด์ร่วมในโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งการที่มีเฟอรัสอยู่ในโครงสร้างจะช่วยลดอุณหภูมิในการสังเคราะห์ พบว่า เฟสหลักที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดทั้ง 2 ชนิดเหมือนกัน คือ เฟส gehlenite อาจเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 1180 องศาเซลเซียสไม่เพียงพอที่จะทำให้ทั้งเฟอรัสซิลิเกตและเฟอรัสออกไซด์เกิดแตกตัวและเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของแคลเซียมออกไซด์

จากปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกต คือ ผลการเย็นตัวของปูนเม็ดในอากาศและในลิควิดในโตรเจน, ผลของไอออนบวกและไอออนลบ, ผลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์, ผลของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของอะลูมินาน้อย, ผลของอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3 และผลของซัลเฟต พบว่า ซัลเฟตมีผลต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตค่อนข้างมาก แม้ว่าจะได้เฟส gehlenite และ larnite และมีเฟส anhydrite, calcium oxide, magnetite เหลืออยู่ไม่มาก ฉะนั้นจึงเลือกปูนเม็ดที่สังเคราะห์จากถ้ำลอย, แคลเซียมคาร์บอเนตและเอพิจิยิปซัม มาศึกษาคุณสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.4 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตและเฟสที่เกิดขึ้น

ปัจจัย	เฟสที่เกิดขึ้น
1. ผลของการเย็นตัวของปูนเม็ดที่ 1300°C - ในอากาศ - ในลิควิดในโตรเจน	gehlenite gehlenite
2. ผลของชนิดไอออนที่ 1180°C - ไอออนบวก - ไอออนลบ	gehlenite gehlenite
3. ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ - 900°C - 950°C - 1000°C - 1050°C - 1100°C - 1180°C	calcite, calcia, portlandite calcia, portlandite, wollastonite gehlenite, portlandite, calcia gehlenite, portlandite, calcia gehlenite, larnite gehlenite
4. วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบอะลูมินาน้อยที่ 1100°C	larnite, wollastonite, cristobalite
5. ผลของอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3 ที่ 1200°, 1300°C	gehlenite, larnite, calcium iron oxide, portlandite, calcium oxide
6. ผลของซัลเฟต 6.1 อุณหภูมิ (1200°, 1300°C) 6.2 ปริมาณซัลเฟต (SO ₄ =3.7%, 19.79%) 6.3 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (7°C ต่อนาที, 10°C ต่อนาที)	gehlenite, larnite gehlenite, larnite gehlenite, larnite
7. ซีเมนต์เบสไลต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็ก และอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ	yeelimite, gehlenite
8. ซีเมนต์เบสไลต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง	gehlenite

4.2.10 ศึกษาสมบัติเชิงกล

ศึกษาปูนเม็ดที่สังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และเอฟจีดี ยิปซัม ($\text{SO}_4 = 3.7\%$) เเผที่ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียสต่อนาที่ มาศึกษาขนาดอนุภาคของปูนเม็ดด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค, ค่าความถ่วงจำเพาะ, ค่าความละเอียดด้วยวิธีแอร์เพอร์มิเมตริค ตามมาตรฐาน ASTM C204, ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา, องค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ด และทดสอบค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน และ 45 วัน ตาม ASTM C109 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนเม็ดเท่ากับ 0.480 และปูนเม็ดต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 ดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.8

ตารางที่ 4.5 แสดงขนาดอนุภาคของปูนเม็ด

	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)				
	d(0.1)	d(0.5)	D(0.9)	D[3,2]	D[4,3]
ซีเมนต์เบ้ไลต์ ($\text{SO}_3=3.7\%$)	2.981	63.753	215.281	9.337	87.937

ตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะเฉพาะของปูนเม็ด

	ความถ่วงจำเพาะ	ความละเอียด (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	แคลเซียมออกไซด์ที่เหลือ (%)
ซีเมนต์เบ้ไลต์ ($\text{SO}_3=3.7\%$)	3.07	4,373	0.2

ตารางที่ 4.7 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนเม็ด

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2	Mn_2O_3
ซีเมนต์เบ้ไลต์ ($\text{SO}_3=3.7\%$)	12.4	59.8	11.50	43.07	2.67	1.62	0.68	3.67	0.37	0.11

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 และ 45 วัน

	ค่าความแข็งแรงที่ 28 วัน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)				ค่าความแข็งแรงที่ 45 วัน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	เฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	เฉลี่ย
ซีเมนต์เบ้ไลต์ ($\text{SO}_3=3.7\%$)	16.43	15.86	0	16.15	18.72	19.08	0	18.90

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะของซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด) ที่สังเคราะห์ได้ พบว่า ปูนเม็ดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ $D[4,3]$ เท่ากับ 87.937 ไมโครเมตร มีค่าความละเอียดเท่ากับ 4,373 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 0.2 เปอร์เซ็นต์ และจากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีมีค่าซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ เท่ากับ 3.67

เมื่อทดสอบค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน และ 45 วัน พบว่า มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย เท่ากับ 16.15 และ 18.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงที่ได้เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุบ่มเดียวกันมีค่าค่อนข้างต่ำ อาจเนื่องจากเฟสที่พบในซีเมนต์เบไลต์ คือ gehlenite และ larnite ซึ่งเฟส gehlenite นี้ทำปฏิกิริยากับน้ำน้อย จึงส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์

4.2.11 ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์: นำวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต, แก้วลอย และเอฟจีดีพีซัม ($SO_3 = 3.7\%$) ศึกษาปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ โดยทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 1450 องศาเซลเซียส โดยไม่ใช้ตัวกระตุ้น (V_2O_5) และเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในวัตถุดิบผสม

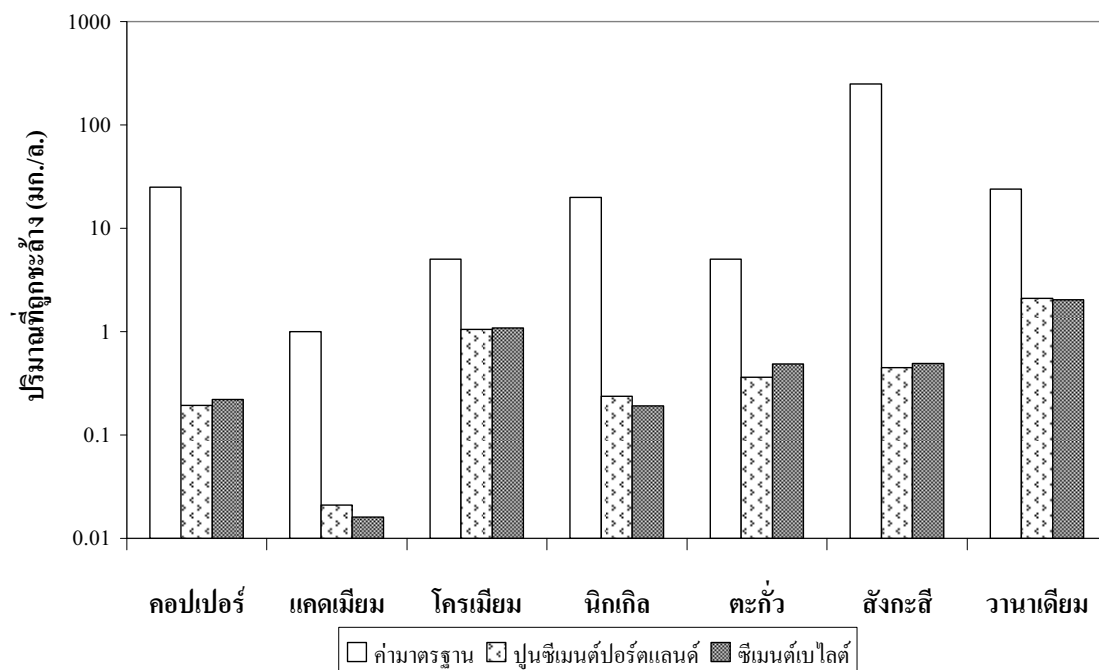
	ก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (%)
ซีเมนต์เบไลต์ ($SO_3 = 3.7\%$)	2.96
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.94

จากผลการทดสอบหาปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ณ 1450 องศาเซลเซียส ของวัตถุดิบผสมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต, แก้วลอย และเอฟจีดีพีซัม ($SO_3 = 3.7\%$) พบว่า มีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ เท่ากับ 2.96% ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงว่าปริมาณซัลเฟอร์จากเอฟจีดีพีซัมที่เพิ่มให้กับระบบของการสังเคราะห์ไม่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เกินกว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และสามารถคาดการณ์ได้ว่าในระบบของการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์ในงานวิจัยนี้ที่ 1200 องศาเซลเซียส จะปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์น้อยกว่า 2.96%

ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะ: ทดสอบการชะล้างของโลหะหนักของซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ซึ่งสกัดด้วยวิธี waste extraction test (WET) โดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นน้ำสกัด ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.24

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด)

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ซีเมนต์เบไลต์ (SO ₃ = 3.7%) (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
คอปเปอร์ (Cu)	25	0.220	0.193
แคดเมียม (Cd)	1	0.016	0.021
โครเมียม (Cr)	5	1.083	1.055
นิกเกิล (Ni)	20	0.192	0.236
ตะกั่ว (Pb)	5	0.486	0.361
สังกะสี (Zn)	250	0.494	0.447
วานาเดียม (V)	24	2.028	2.106



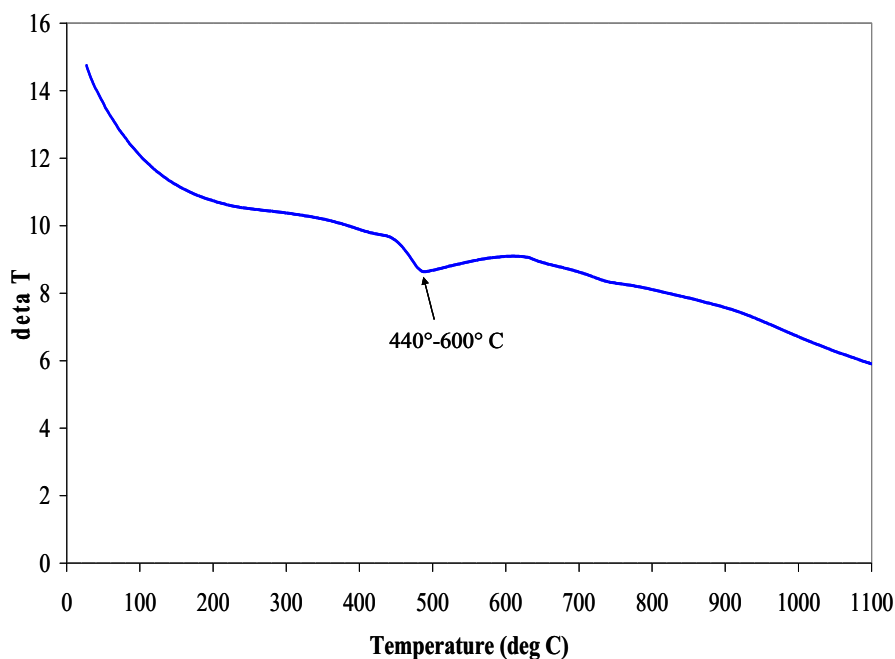
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างกับซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด) และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

จากการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด) พบว่า ในซีเมนต์เบไลต์มีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างไม่เกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แต่มีปริมาณของคอปเปอร์, โครเมียม, ตะกั่ว, สังกะสี ที่ถูกชะล้างมากกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อย และสำหรับการทดสอบหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์เนื่องจากผิวหน้าของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วันไม่เรียบ จึงอาจส่งผลต่อการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้าง จึงไม่ได้วิเคราะห์การชะล้างของเบไลต์ซีเมนต์มอร์ตาร์ แต่จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างของซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด) ไม่เกินค่ามาตรฐาน จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างของเบไลต์ซีเมนต์มอร์ตาร์จะมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานเช่นกัน

4.3 การสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอล

4.3.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอล

เมื่อนำสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งสังเคราะห์จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับถั่วลย มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DTA เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีของวัตถุดิบผสม รวมถึงการทำนายอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.25

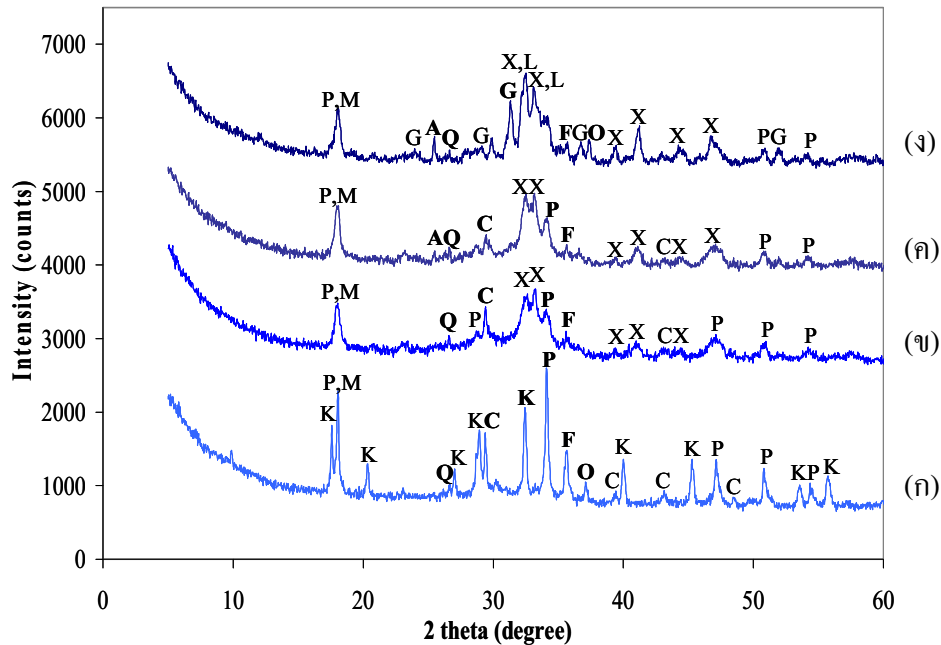


รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) กับ delta T ของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับถั่วลย

จากผลการวิเคราะห์สารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลด้วยเครื่อง DTA โดยวิเคราะห์ตั้งแต่อุณหภูมิ 30-1100 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าที่อุณหภูมิ 440-600 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อนเนื่องจากการแตกตัวของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอล รวมถึงมีการแตกตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อนที่ชัดเจน ดังนั้นในการแคลไซน์สารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลจึงใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 600 องศาเซลเซียส เนื่องจาก ณ อุณหภูมินี้เกิดการแตกตัวของสารประกอบใหม่ที่ได้หลังการไฮโดรเทอร์มอลเรียบร้อยแล้วและพร้อมที่จะเกิดเป็นสารประกอบซีเมนต์

4.3.2 ศึกษาองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ด

นำปูนเม็ดก่อนแคลไซน์ (หลังจากไฮโดรเทอร์มอล) และหลังแคลไซน์มาวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.26-4.28



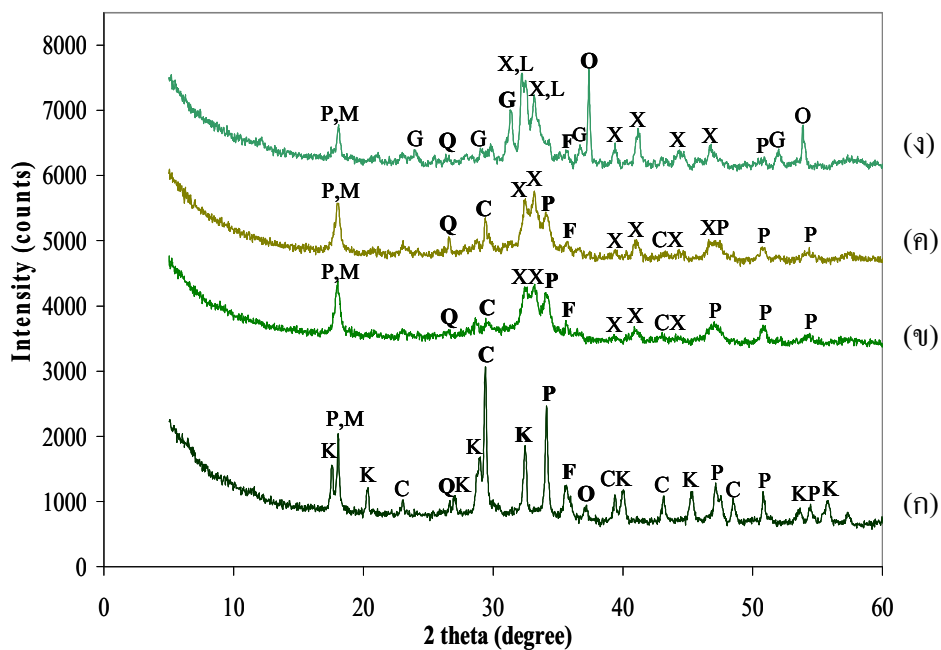
รูปที่ 4.26 แสดงองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย และน้ำ

(ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C

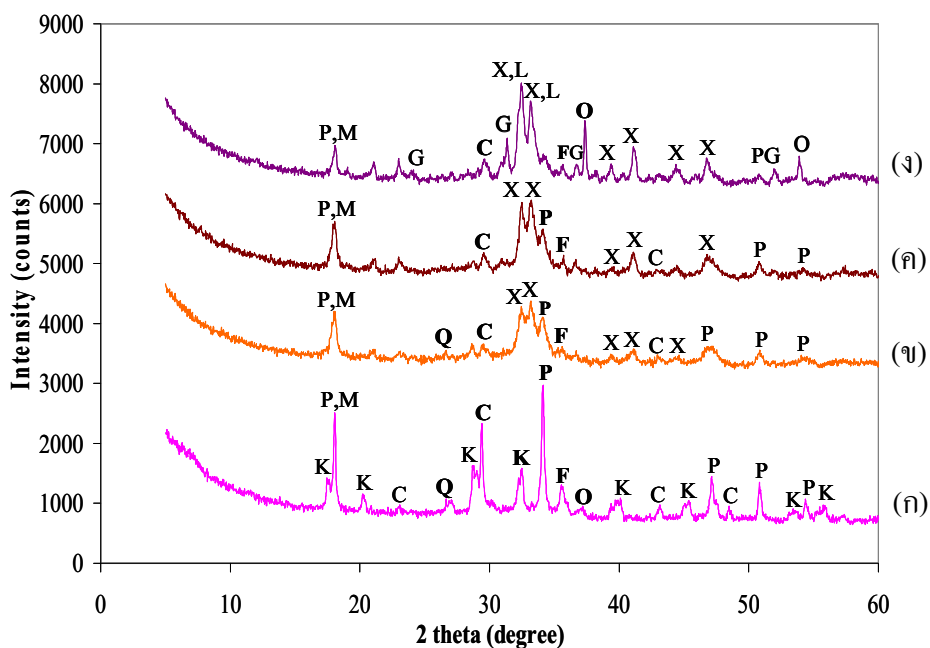
[P:portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), C:calcium carbonate (CaCO_3), Q:quartz (SiO_2), F:magnetite (Fe_3O_4), O:calcium oxide (CaO), M:mayenite ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$), K:katoite ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{SiH}_8\text{O}_{12}$), X:dicalcium silicate (α' - Ca_2SiO_4), L:larnite (β - Ca_2SiO_4), G:gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)]

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดของทั้ง 4 ชนิด พบว่า ปูนเม็ดก่อนแคลไซน์มีสารประกอบใหม่ คือ katoite, mayenite และการที่ระบบมี portlandite, calcium oxide, calcium carbonate และ magnetite เหลืออยู่ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินาในเถ้าลอยกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลนั้นยังไม่เพียงพอต่อการเกิดเป็นสารประกอบใหม่ทั้งหมด

เมื่อแคลไซน์ปูนเม็ดที่ 750 องศาเซลเซียส เฟส katoite เปลี่ยนเป็นเบไลต์เฟส (α' -dicalcium silicate, β -dicalcium silicate) ส่วนเฟสอื่นๆ ที่เหลืออยู่ในปูนเม็ดก่อนแคลไซน์มีปริมาณลดลง แสดงว่าเฟสที่เหลืออยู่เหล่านั้นมีส่วนหนึ่งที่เปลี่ยนเป็นเบไลต์เฟส เมื่อเพิ่มอุณหภูมิแคลไซน์จาก 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส จะมีเบไลต์เฟสเพิ่มขึ้น และที่ 950 องศาเซลเซียส เริ่มพบเฟส gehlenite ซึ่งเฟสนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำได้น้อย โดยเฟสหลักที่เกิดขึ้นเมื่อแคลไซน์ ณ อุณหภูมิต่างๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Guerrero และคณะ [7]



รูปที่ 4.27 แสดงการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้จาก
แคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย, น้ำและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์
(ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C

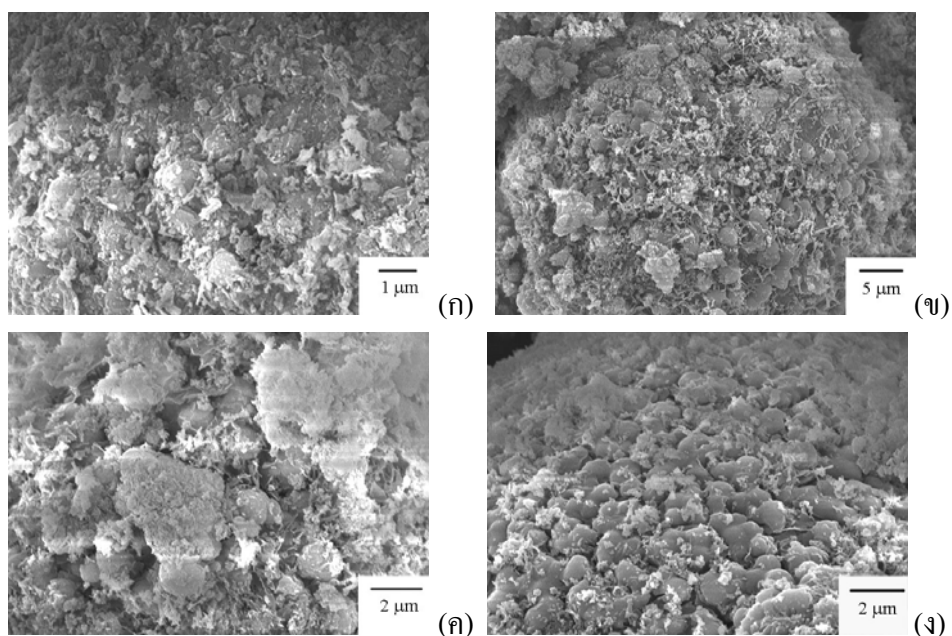


รูปที่ 4.28 แสดงการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดที่ได้
จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, เถ้าลอย, น้ำและโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์
(ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C

จากรูปที่ 4.27-4.28 มีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น เพื่อเพิ่มความเป็นเบสให้ระบบ เนื่องจากถ้าระบบมีความเป็นเบสสูง pH 14 จะช่วยชะซิลิกาและอะลูมินาจากเถ้าลอยได้มากขึ้นเพื่อเกิดเป็นสารประกอบใหม่ และจากผลวิเคราะห์หองค์ประกอบทางแร่ของปูนเม็ดทั้ง 2 ระบบพบว่า เฟสสารประกอบใหม่ก่อนแคลไซน์จะเหมือนกับระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้นคือ katoite แต่มีแคลเซียมคาร์บอเนตและควอร์ซเหลืออยู่ในระบบมากกว่า เนื่องจากทั้งซิลิกาและอะลูมินาที่ถูกชะออกจากเถ้าลอยมากขึ้นและพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ แต่อาจมีปัจจัยอื่นๆ ในระบบที่ทำให้ปริมาณของสารประกอบใหม่ไม่เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 และ 3 โมลาร์ ที่เพิ่มให้กับระบบนั้นไม่มีผลต่อการเกิดสารประกอบใหม่

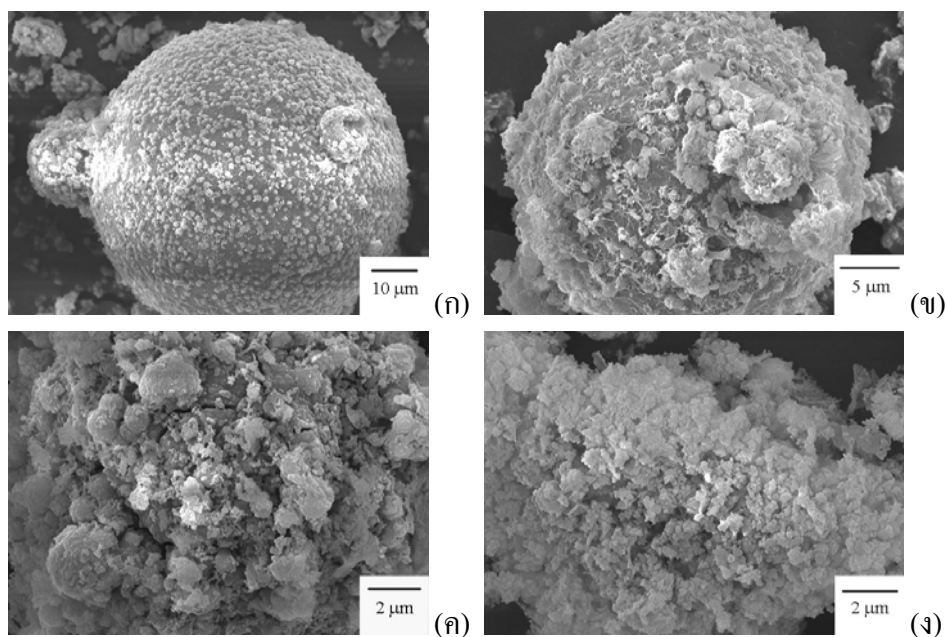
4.3.3 ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคปูนเม็ด

เมื่อนำปูนเม็ดที่ได้ก่อนแคลไซน์ (หลังจากไฮโดรเทอร์มอล) และหลังแคลไซน์มาวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.29-4.31

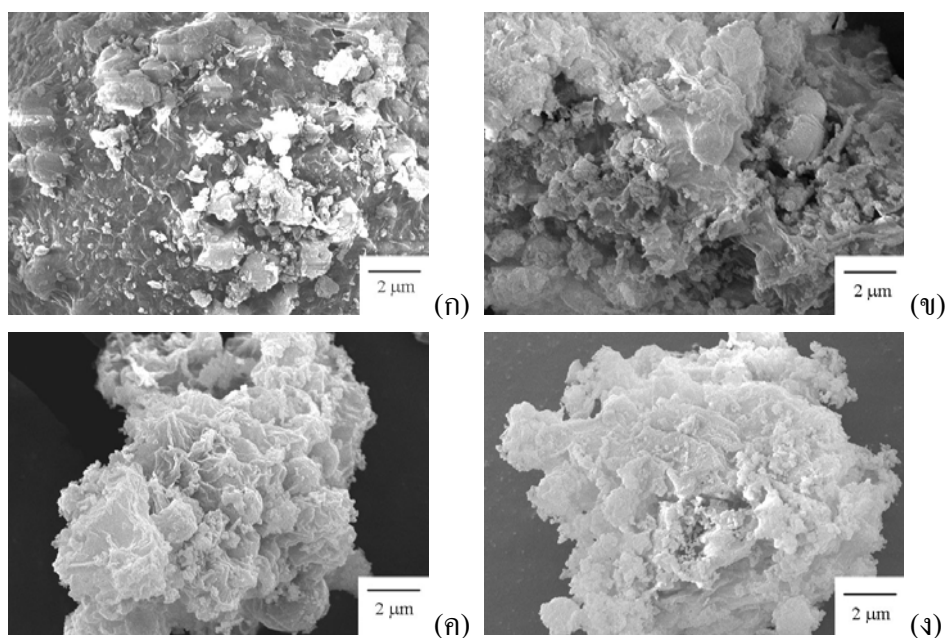


รูปที่ 4.29 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ดที่ได้จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, แก้วลอยและน้ำ (ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C

จากโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ดในระบบที่ไม่ถูกระตุ้นทั้ง 4 ชนิด พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ อนุภาคทรงกลมที่ปกคลุมบนผิวแก้วลอยมีมากขึ้นเมื่อเทียบกับปูนเม็ดที่ไม่ได้แคลไซน์ เมื่อระบบมีทั้ง β -Ca₂SiO₄ และ α' -Ca₂SiO₄ รูปร่างโดยรวมของอนุภาคจะเป็นทรงกลม



รูปที่ 4.30 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของพูนเม็ดที่ได้
จากแคลเซียมไฮดรอกไซด์, ถ้ำลอยน้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์
(ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C



รูปที่ 4.31 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของพูนเม็ดที่ได้จาก
แคลเซียมไฮดรอกไซด์, ถ้ำลอยน้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์
(ก) ก่อนแคลไซน์ (ข) แคลไซน์ที่ 750°C (ค) แคลไซน์ที่ 850°C (ง) แคลไซน์ที่ 950°C

จากโครงสร้างทางจุลภาคของปูนเม็ดในระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทั้ง 2 ความเข้มข้น พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแคลไซน์ปูนเม็ดมีรูปร่างไม่แน่นอนมากขึ้น แสดงว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อรูปผลึกของ C_2S ทำให้เกิด α' - Ca_2SiO_4 ได้มากกว่า β - Ca_2SiO_4 รูปร่างอนุภาคของปูนเม็ดโดยรวมจึงมีลักษณะไม่แน่นอน และความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 และ 3 โมลาร์ ที่เพิ่มให้กับระบบไม่มีผลต่อการเกิดสารประกอบใหม่

4.3.4 ศึกษาสมบัติเชิงกล

เมื่อนำปูนเม็ดที่ได้หลังแคลไซน์มาหาขนาดอนุภาค, ค่าความละเอียดด้วยวิธีแอร์เพอร์มิอะบิลิตี ตามมาตรฐาน ASTM C204, การก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เบสไลต์เพสต์ ตาม ASTM C191 และ ทดสอบค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของซีเมนต์เบสไลต์มอร์ตาร์ที่ 28 วัน ตาม ASTM C109 ใช้ อัตราส่วนน้ำต่อปูนเม็ดเท่ากับ 0.873 และปูนเม็ดต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 ดังแสดงในตารางที่ 4.11-4.13 และรูปที่ 3.32

ตารางที่ 4.11 แสดงขนาดอนุภาคของปูนเม็ดของทั้ง 3 ระบบ เมื่อแคลไซน์ที่ 750° , 850° และ $950^{\circ}C$

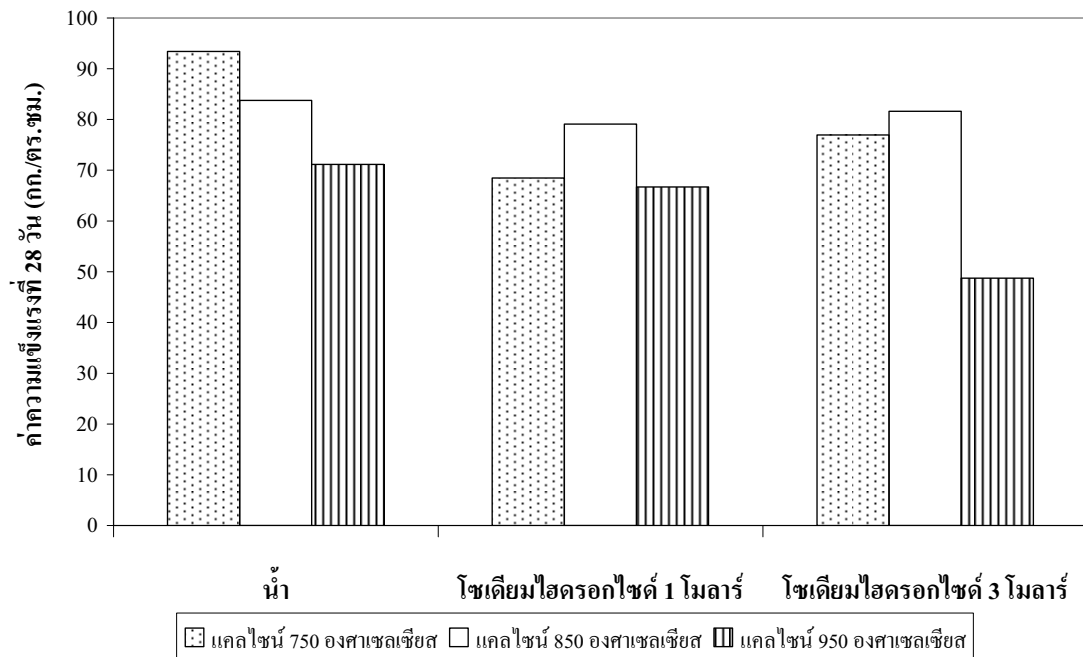
	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)				
	d(0.1)	d(0.5)	D(0.9)	D[3,2]	D[4,3]
water, $750^{\circ}C$	2.428	11.630	108.851	5.877	33.770
water, $850^{\circ}C$	2.157	9.901	91.550	5.138	32.916
water, $950^{\circ}C$	1.917	9.59	90.507	4.446	32.139
1M NaOH, $750^{\circ}C$	2.425	10.960	82.417	5.724	30.365
1M NaOH, $850^{\circ}C$	1.906	8.693	80.422	4.607	28.002
1M NaOH, $950^{\circ}C$	1.927	9.297	71.320	4.671	24.632
3M NaOH, $750^{\circ}C$	36.082	6.307	2.735	13.187	91.130
3M NaOH, $850^{\circ}C$	33.340	5.195	2.176	10.604	87.116
3M NaOH, $950^{\circ}C$	32.896	5.292	2.275	10.746	85.095

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความละเอียดของปูนเม็ดและการก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เบสไลต์เพสต์ทั้ง 3 ระบบ

	ความละเอียด (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	การก่อตัวระยะปลายของ ซีเมนต์เบสไลต์เพสต์ (ชั่วโมง)
water, 750°C	15,400	2.0
water, 850°C	16,426	3.0
water, 950°C	11,448	1.0
1M NaOH, 750°C	9,270	3.0
1M NaOH, 850°C	11,359	4.0
1M NaOH, 950°C	9,134	10.5
3M NaOH, 750°C	7,987	1.0
3M NaOH, 850°C	9,280	1.5
3M NaOH, 950°C	8,214	8.5

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความแข็งแรงของซีเมนต์เบสไลต์มอร์ตาร์ทั้ง 3 ระบบที่อายุบ่ม 28 วัน

	ค่าความแข็งแรงที่ 28 วัน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	เฉลี่ย
water, 750°C	93.17	97.08	89.91	93.39
water, 850°C	84.61	84.81	81.96	83.79
water, 950°C	69.24	71.93	72.33	71.17
1M NaOH, 750°C	68.54	67.65	69.19	68.46
1M NaOH, 850°C	80.49	79.18	77.59	79.09
1M NaOH, 950°C	65.97	66.50	67.52	66.67
3M NaOH, 750°C	77.19	79.84	73.92	76.98
3M NaOH, 850°C	82.45	79.76	82.53	81.58
3M NaOH, 950°C	48.81	46.89	50.56	48.75



รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ทั้ง 3 ระบบ ที่อายุบ่ม 28 วัน

จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด) พบว่า ปูนเม็ดของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้นและระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ $D[4,3]$ ค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือ มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 24-34 ไมโครเมตร ส่วนระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ $D[4,3]$ ระหว่าง 85-92 ไมโครเมตร

จากการทดสอบค่าความละเอียดของปูนเม็ดของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้นจะมีค่าสูงกว่าอีก 2 ระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และผลการทดสอบการก่อตัวระยะปลาย พบว่า ซีเมนต์เบไลต์เพสต์ของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้นจะใช้เวลาก่อตัวระยะปลายน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และซีเมนต์เบไลต์เพสต์จากระบบที่ถูกกระตุ้นทั้ง 2 ระบบเมื่อแคลิไซน์ที่ 950 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาก่อตัวระยะปลายค่อนข้างมาก อาจเนื่องจากมีเฟส gehlenite เกิดขึ้นในระบบ

จากผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วันของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้นจะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากค่าความละเอียดของปูนเม็ดในระบบที่ไม่ถูกกระตุ้นมีค่าสูงกว่าจึงทำปฏิกิริยากับน้ำได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่ามากกว่า และค่าความแข็งแรง

ของทั้ง 3 ระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแคลไซน์ ซึ่งค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ที่มีเบไลต์เฟสเพิ่มขึ้น และเมื่อแคลไซน์ที่ 950 องศาเซลเซียส ถึงแม้จะมีเบไลต์เฟสเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าลดลง อาจเนื่องจากมีเฟส gehlenite เกิดขึ้น ซึ่งเฟสนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำได้น้อยจึงส่งผลต่อค่าความแข็งแรง

ผลจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วันเมื่อแคลไซน์ปูนเม็ดที่ 850 องศาเซลเซียส ของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้นและถูกกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ มีค่าเท่ากับ 83 และ 78 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัย Gerrero และคณะ [8] เมื่อแคลไซน์ปูนเม็ดที่ 800 องศาเซลเซียส เท่ากับ 40 และ 67 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

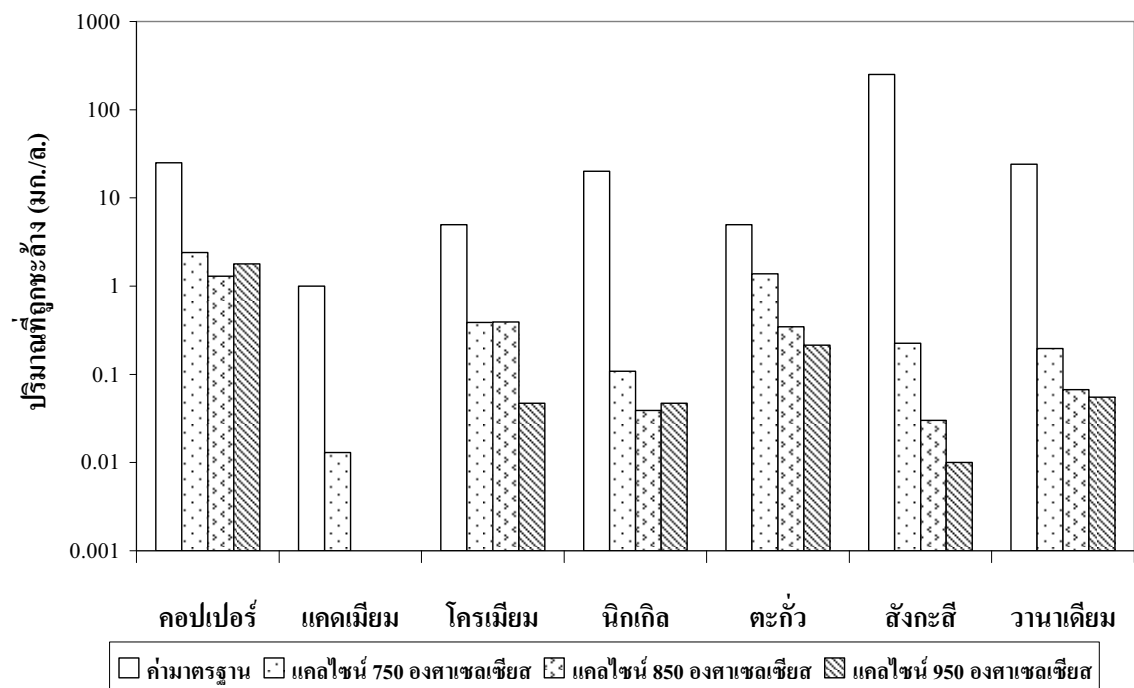
4.3.5 ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์: การแคลไซน์ปูนเม็ดที่ได้หลังจากการไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการแตกตัวของก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการแคลไซน์ปูนเม็ดที่อุณหภูมิดังกล่าวไม่ปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม

ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะ: ทดสอบการชะล้างของโลหะหนักของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้น ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ซึ่งสกัดด้วยวิธี waste extraction test (WET) โดยใช้สารละลายโซเดียมซดริกความเข้มข้น 0.2 โมลาร์เป็นน้ำสกัด ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.33

ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้น

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ไม่ใช้ตัวกระตุ้น, แคลไซน์ที่ 750°C (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ไม่ใช้ตัวกระตุ้น, แคลไซน์ที่ 850°C (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ไม่ใช้ตัวกระตุ้น, แคลไซน์ที่ 950°C (มิลลิกรัมต่อลิตร)
คอปเปอร์ (Cu)	25	2.406	1.303	1.783
แคดเมียม (Cd)	1	0.013	0.001	0.001
โครเมียม (Cr)	5	0.385	0.390	0.047
นิกเกิล (Ni)	20	0.109	0.039	0.047
ตะกั่ว (Pb)	5	1.372	0.347	0.214
สังกะสี (Zn)	250	0.225	0.030	0.010
วานาเดียม (V)	24	0.197	0.067	0.055



รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างกับซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ของระบบที่ไม่ถูกกระตุ้นเมื่อแคลไซน์ที่ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้นในปูนเม็ดของทั้ง 3 ระบบ พบว่า เป็นเฟสชนิดเดียวกัน แสดงว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 และ 3 โมลาร์ ที่เพิ่มให้กับระบบนั้นไม่มีผลต่อการเกิดเฟสของสารประกอบใหม่ และจากการทดสอบค่าความแข็งแรงของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่า ซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้นมีค่าความแข็งแรงค่อนข้างมาก จากทั้ง 2 การทดลองจึงได้เลือกซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้นมาทดสอบการชะล้างของโลหะหนัก

จากการทดสอบหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ของระบบที่ไม่ใช้ตัวกระตุ้น พบว่า ในซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์มีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างไม่เกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์โดยวิธีการเผาและวิธีไฮโดรเทอร์มอล รวมถึงศึกษาความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เบไลต์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลองจะสามารถสรุปผลการทดลอง ดังนี้

5.1 การสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตโดยวิธีเผา

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตเมื่อใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ พบว่าซิลเฟตมีผลต่อการเกิดไคแคลเซียมซิลิเกตค่อนข้างมาก จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่เกิดทั้งเฟส gehlenite และ larnite เนื่องจากเถ้าลอยมีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาที่ค่อนข้างว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ จึงมีโอกาที่จะเกิดทั้ง 2 เฟส ฉะนั้นระบบที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์โดยวิธีเผา คือ แคลเซียมคาร์บอเนต, เถ้าลอย และเอพิจิอิลิปซัม ($\text{SO}_4 = 3.7\%$) เผาที่ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 7 องศาเซลเซียสต่อนาที

เมื่อทดสอบค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ที่สังเคราะห์จากระบบที่มีซิลเฟต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนเม็ดเท่ากับ 0.480 และปูนเม็ดต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 ได้ค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดที่อายุบ่ม 28 วัน และ 45 วันเท่ากับ 16.15 และ 18.90 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อศึกษาปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ของวัตถุดิบผสมโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ที่ 1450 องศาเซลเซียส พบว่า มีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ 2.96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ 2.94 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด) พบว่า มีปริมาณโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ปี 2548 แต่มีปริมาณของคอปเปอร์, โครเมียม, ตะกั่ว, สังกะสี ที่ถูกชะล้างมากกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อย

5.2 การสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตโดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

เฟสที่พบในปูนเม็ดจากการสังเคราะห์ทั้ง 3 ระบบเหมือนกัน กล่าวคือ ปูนเม็ดก่อนแคลไชนมีเฟส katoite เมื่อแคลไชนปูนเม็ดที่ 750 องศาเซลเซียส จากเฟส katoite เปลี่ยนเป็นเบไลต์เฟส (α' - Ca_2SiO_4 , β - Ca_2SiO_4) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแคลไชนจะได้เบไลต์เฟสเพิ่มขึ้น และที่ 950

องศาเซลเซียส จะเริ่มพบเฟส gehlenite ฉะนั้นระบบที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล คือ ระบบที่ไม่ถูกกระตุ้น

เมื่อทดสอบค่าความละเอียดของซีเมนต์เบไลต์ (ปูนเม็ด) ที่ถูกแคลไซน์ที่ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 15405, 16430 และ 11450 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และค่าความแข็งแรงต่อการกดอัดของซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนเม็ดเท่ากับ 0.873 และปูนเม็ดต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 ได้ค่าความแข็งแรงของมอร์ตาร์ที่ถูกแคลไซน์ที่ 750, 850 และ 950 องศาเซลเซียส เท่ากับ 93.39, 83.79 และ 71.17 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าปูนเม็ดที่ถูกแคลไซน์ที่ 750 องศาเซลเซียส มีค่าความละเอียดค่อนข้างมากจึงส่งผลต่อความแข็งแรงของมอร์ตาร์

และเมื่อศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกจากซีเมนต์เบไลต์มอร์ตาร์พบว่า มีปริมาณโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ปี 2548

ข้อเสนอแนะ

1. กรณีที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์นั้น วิธีการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มอลจะเป็นวิธีที่เหมาะสมมากกว่าวิธีเผา เนื่องจากวิธีนี้ไม่มีผลของการแข่งขันกันในการปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินา ในเถ้าลอยเพื่อเกิดเป็น gehlenite (C_2AS) และ larnite (C_2S)
2. กรณีสังเคราะห์ซีเมนต์เบไลต์ด้วยวิธีการเผานั้นควรจำกัดความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของอะลูมินาที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าลอย เพื่อป้องกันการเกิด gehlenite
3. คุณภาพปูนเม็ดที่สังเคราะห์ได้จากเตาเผาในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นเตาไฟฟ้านั้นมีคุณภาพไม่คงที่เนื่องจากการสัมผัสกับความร้อนของวัตถุดิบผสมที่อยู่ในครุชเบิลไม่ทั่วถึง
4. ควรจะมีการวิเคราะห์เฟสที่พบในปูนเม็ดในเชิงปริมาณ เพื่อบ่งบอกถึงปริมาณของเบไลต์ที่พบในปูนเม็ด

บรรณานุกรม

- [1] Popescu, C.D., Muntean, M. and Sharp, J.H.. (2003). Industrial trial production of low energy belite cement. *Cem. Concr. Compo.*, 25, 89-93.
- [2] “การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://maemoh.egat.com/index.php?content=sara&topic=2> (3 พฤษภาคม 2550)
- [3] ปรินญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). *ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตไทย. กรุงเทพฯ.
- [4] Ghosh, S.N., (1991). *Cement and concrete science and technology volume I part I*. 1st edition. ABI books private limited. India.
- [5] Odler, I. (2000). *Special inorganic cements*. 1st edition. Taylor&Francis group publish. USA.
- [6] Taylor, H.F.W. (1990). *Cement chemistry*. 2nd edition. Thomas telford publish. UK.
- [7] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2544). *เถ้าลอยในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม*. ฝ่ายประชาสัมพันธ์การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.
- [8] การพัฒนาการใช้ประโยชน์เถ้าลอยลิกไนต์ในไทย. (2545). *Lab.today* วารสารเพื่อห้องปฏิบัติการ วัด/ทดสอบวิเคราะห์/วิจัย. พุศิจิภาณ-ธันวาคม. กรุงเทพฯ.
- [9] “เคมี สำหรับโครงการเรียนล่วงหน้า” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.il.mahidol.ac.th/course/ap_chemistry2/index.htm (3 พฤษภาคม 2550)
- [10] “มลพิษทางอากาศ” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://deqp.go.th> (3 พฤษภาคม 2550)
- [11] Arjunan, P., Silsbee, Michael R. and Roy, Della M. (1999). Sulfoaluminate-belite cement from low-calcium fly ash and sulfur-rich and other industrial by-products. *Cem. Concr. Res.*, 29, 1305-1311.
- [12] Beretka, J., Cioffi, R., Marroccoli, M. and Valenti, G.L. (1996). Energy-saving cements obtained from chemical gypsum and other industrial wastes. *Waste Management.*, 16, 231-235.
- [13] Rodrigues, Flavio A. (2003). Low-temperature of cements from rice hull ash. *Cem. Concr. Res.*, 33, 1525-1529.
- [14] Jiang, W. and Roy, Della M. (1992). Hydrothermal processing of new fly ash cement. *Ceram. Bull.*, 71 [4], 642-647.
- [15] Goni, S., Guerrero, A., Luxan, de M.P. and Macias, A.. (2000). Dehydration of pozzolanic products hydrothermally synthesized from fly ash: microstructure evolution. *Mater. Res. Bull.*, 35, 1333-1344.
- [16] Guerrero, A., Goni, S., Campillo, I. and Moragues, A. (2004). Belite cement clinker from coal fly ash of high Ca content. *Environ. Sci. Technol.*, 38, 3209-3213.
- [17] Guerrero, A., Goni, S., Moragues, A. and Dolado, J.S.. (2005). Microstructure and mechanical performance of belite cement from high calcium coal fly ash. *J. Am. Ceram. Soc.*, 88 [7], 1845-1853.

- [18] Georgescu, M., Tipan, J., Badanoiu, A., Crisan, D. and Dragan, I. (2000). Highly reactive dicalcium silicate synthesized by hydrothermal processing. *Concr. Res.*, 22, 315-319.
- [19] Singh, N.B., Rai, S. and Singh, N. (2002). Highly reactive β -dicalcium silicate. *J. Am. Ceram. Soc.*, 85 [9], 2171-2176.
- [20] Pradyot P. (2003). Handbook of inorganic chemicals. First edit. Printed in America. McGraw-Hill companies.
- [21] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C109: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or 50-mm cube specimens). *Annual Book of ASTM Standard*, V.04.01 : 83-87.
- [22] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C191: Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle. *Annual Book of ASTM Standard*, V.04.01 : 179-183.
- [23] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C204: Standard test method for fineness of hydraulic cement by air-permeability. *Annual Book of ASTM Standard*, V.04.01 : 185-191.
- [24] Philpotts, A.R., Barin L. and Knacke, O. (1991). *Thermodynamic Data*. New Jersey.

ภาคผนวก ก

การคำนวณวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ไดแคลเซียมซิลิเกต

ก1) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบเผา

ใช้เถ้าลอยเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ โดยคำนวณวัตถุดิบให้มีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{array}{rcl} 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 & & \\ 2(56) & 60 & \\ 112 \text{ กรัม} & 60 \text{ กรัม} & \end{array}$$

มีซิลิกา 38.45 กรัม ในเถ้าลอย 100 กรัม

ต้องการซิลิกา 60 กรัม ในเถ้าลอย $\left(\frac{100 \times 60}{38.45}\right) = 156.05$ กรัม

ในเถ้าลอย 100 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ 17.21 กรัม

ในเถ้าลอย 156.05 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ $\left(\frac{17.21 \times 156.05}{100}\right) = 26.86$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม = $112 - 26.86 = 85.14$ กรัม

ดังนั้นใช้เถ้าลอย 156.05 กรัม และแคลเซียมคาร์บอเนต 85.14 กรัม

ก2) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบเผาโดยศึกษาผลของไอออนบวก

ใช้เถ้าลอยเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ โดยคำนวณวัตถุดิบให้มีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์และไอออนบวกที่สนใจต่อซิลิกาเท่ากับ 2 สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{array}{rcl} 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 & & \\ 2(56) & 60 & \\ 112 \text{ กรัม} & 60 \text{ กรัม} & \end{array}$$

มีซิลิกา 38.45 กรัม ในเถ้าลอย 100 กรัม

ต้องการซิลิกา 60 กรัม ในเถ้าลอย $\left(\frac{100 \times 60}{38.45}\right) = 156.05$ กรัม

ในเถ้าลอย 100 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ 17.21 กรัม

ในเถ้าลอย 156.05 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ $\left(\frac{17.21 \times 156.05}{100}\right) = 26.86$ กรัม

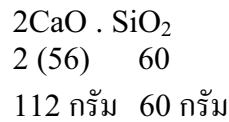
มีแบเรียมคาร์บอเนต 3% ของแคลเซียมออกไซด์ทั้งหมด = $\left(\frac{3}{100}\right) \times 112 = 3.36$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม = $112 - 26.86 - 3.36 = 81.77$ กรัม

ดังนั้นใช้เถ้าลอย 156.05 กรัม, แคลเซียมคาร์บอเนต 81.77 กรัม และแบเรียมคาร์บอเนต 3.36 กรัม

ก3) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ได้แคลเซียมซิลิเกตแบบเผาโดยศึกษาผลของไอออนลบ

ใช้เถ้าลอยเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ โดยคำนวณวัตถุดิบให้มีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และเพิ่มไอออนลบให้กับระบบ สามารถคำนวณได้โดย



มีซิลิกา 38.45 กรัม ในเถ้าลอย 100 กรัม

ต้องการซิลิกา 60 กรัม ในเถ้าลอย $\left(\frac{100 \times 60}{38.45}\right) = 156.05$ กรัม

ในเถ้าลอย 100 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ 17.21 กรัม

ในเถ้าลอย 156.05 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ $\left(\frac{17.21 \times 156.05}{100}\right) = 26.86$ กรัม

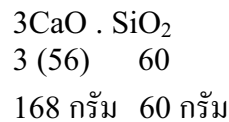
มีเบเรียมซิลเฟต 3% ของวัตถุดิบผสมทั้งหมด $= \left(\frac{3}{100}\right) \times (156.05 + 85.14) = 7.24$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม $= 112 - 26.86 = 85.14$ กรัม

ดังนั้นใช้เถ้าลอย 156.05 กรัม, แคลเซียมคาร์บอเนต 85.14 กรัม และเบเรียมซิลเฟต 7.24 กรัม

ก4) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบเผา และคิดอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3

ใช้เถ้าลอยเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ โดยคำนวณวัตถุดิบให้มีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 3 สามารถคำนวณได้โดย



มีซิลิกา 38.45 กรัม ในเถ้าลอย 100 กรัม

ต้องการซิลิกา 60 กรัม ในเถ้าลอย $\left(\frac{100 \times 60}{38.45}\right) = 156.05$ กรัม

ในเถ้าลอย 100 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ 17.21 กรัม

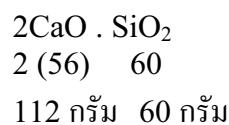
ในเถ้าลอย 156.05 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ $\left(\frac{17.21 \times 156.05}{100}\right) = 26.86$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม = $168 - 26.86 = 141.14$ กรัม

ดังนั้นใช้เถ้าลอย 156.05 กรัม และแคลเซียมคาร์บอเนต 141.14 กรัม

ก5) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบเผาโดยมีเถ้าแกลบเป็นแหล่งให้ซิลิกา

ใช้เถ้าแกลบเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ โดยคำนวณวัตถุดิบให้มีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 สามารถคำนวณได้โดย



มีซิลิกา 91.79 กรัม ในเถ้าแกลบ 100 กรัม

ต้องการซิลิกา 60 กรัม ในเถ้าแกลบ $\left(\frac{100 \times 60}{91.79}\right) = 65.37$ กรัม

ในเถ้าแกลบ 100 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ 1.37 กรัม

ในเถ้าแกลบ 65.37 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ $\left(\frac{1.37 \times 65.37}{100}\right) = 0.87$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม = $112 - 0.87 = 111.13$ กรัม

ดังนั้นใช้เถ้าแกลบ 65.37 กรัม และแคลเซียมคาร์บอเนต 111.13 กรัม

ก6) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบเผาโดยเพิ่มซัลเฟตให้ระบบ

ใช้เถ้าลอยเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ และใช้เฝัจีดียิปซัมเป็นแหล่งให้ซัลเฟต โดยคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเพื่อให้ได้เฟสของไคแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต สามารถคำนวณได้โดย

$$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4$$

$$1(56) \quad (0.75)(102) \quad (0.25)(96)$$

$$56 \text{ กรัม} \quad 76.5 \text{ กรัม} \quad 24 \text{ กรัม}$$

มีอะลูมินา	21.32	กรัม	ในเถ้าลอย	100	กรัม
ต้องการอะลูมินา	76.5	กรัม	ในเถ้าลอย	$\left(\frac{100 \times 76.5}{21.32}\right)$	$= 358.82$ กรัม
ในเถ้าลอย	100	กรัม	มีแคลเซียมออกไซด์	17.21	กรัม
ในเถ้าลอย	358.82	กรัม	มีแคลเซียมออกไซด์	$\left(\frac{17.21 \times 358.82}{100}\right)$	$= 61.75$ กรัม
ในเถ้าลอย	100	กรัม	มีซิลิกา	38.45	กรัม
ในเถ้าลอย	358.82	กรัม	มีซิลิกา	$\left(\frac{38.45 \times 358.82}{100}\right)$	$= 137.97$ กรัม
ในเถ้าลอย	100	กรัม	มีซัลเฟต	1.69	กรัม
ในเถ้าลอย	358.82	กรัม	มีซัลเฟต	$\left(\frac{1.69 \times 358.82}{100}\right)$	$= 6.06$ กรัม

ต้องการซัลเฟตเพิ่ม $= 24 - 6.06 = 17.94$ กรัม จากเฝัจีดียิปซัม

มีซัลเฟต	49.54	กรัม	ในเฝัจีดียิปซัม	100	กรัม
มีซัลเฟต	17.94	กรัม	ในเฝัจีดียิปซัม	$\left(\frac{100 \times 17.94}{49.54}\right)$	$= 36.21$ กรัม
ในเฝัจีดียิปซัม	100	กรัม	มีแคลเซียมออกไซด์	46.77	กรัม
ในเฝัจีดียิปซัม	36.21	กรัม	มีแคลเซียมออกไซด์	$\left(\frac{46.77 \times 36.21}{100}\right)$	$= 16.94$ กรัม
ในเฝัจีดียิปซัม	100	กรัม	มีซิลิกา	1.69	กรัม
ในเฝัจีดียิปซัม	36.21	กรัม	มีซิลิกา	$\left(\frac{1.69 \times 36.21}{100}\right)$	$= 0.61$ กรัม
ในเฝัจีดียิปซัม	100	กรัม	มีอะลูมินา	0.63	กรัม
ในเฝัจีดียิปซัม	36.21	กรัม	มีอะลูมินา	$\left(\frac{0.63 \times 36.21}{100}\right)$	$= 0.23$ กรัม



จากถ้ำลอยและเอฟจีดีบีซัม

มีแคลเซียมออกไซด์ = $5.75 + 16.94 = 22.96$ กรัม

มีซิลิกา = $137.97 + 0.61 = 138.58$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม = $(2 \times 138.58) - 22.96 = 54.47$ กรัม

ดังนั้นใช้ถ้ำลอย 358.82 กรัม, แคลเซียมคาร์บอเนต 57.47 กรัม และเอฟจีดีบีซัม 36.21 กรัม

ก7) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ซีเมนต์เบลต์ที่มีซัลเฟอร์ เหล็กและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบสูง

ใช้ถ้ำลอยเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ และใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นแหล่งให้ซัลเฟต โดยคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเพื่อให้ได้เฟสของไดแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับแคลเซียมซัลโฟเฟอร์โรอะลูมินาต ($C_4(Al_{0.6}Fe_{0.4})_3\bar{S}$) สามารถคำนวณได้โดย

$$SFAB = 70\%C_2S + 30\% C_4(Al_{0.6}Fe_{0.4})\bar{S}$$

$$\begin{array}{l} 0.7(2CaO \cdot SiO_2) \\ (0.7)(1)(56) \quad (0.7)(0.5)(60) \\ 39.2 \text{ กรัม} \quad 21 \text{ กรัม} \end{array}$$

มีซิลิกา 38.45 กรัม ในถ้ำลอย 100 กรัม

ต้องการซิลิกา 21 กรัม ในถ้ำลอย $\left(\frac{100 \times 21}{38.45}\right) = 54.62$ กรัม

ในถ้ำลอย 100 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ 17.21 กรัม

ในถ้ำลอย 54.62 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ $\left(\frac{17.21 \times 54.62}{100}\right) = 9.4$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม = $39.2 - 9.4 = 29.8$ กรัม

$$0.3(4CaO \cdot 3(Al_{1.6}Fe_{0.4})O_3 \cdot SO_4)$$

$$\begin{array}{cccc}
 0.3(0.83\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0.25\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0.21\text{SO}_4) & & & \\
 (0.3)(0.83)(56) & (0.3)(1)(102) & (0.3)(0.25)(160) & (0.3)(0.21)(96) \\
 13.94 \text{ กรัม} & 30.6 \text{ กรัม} & 12 \text{ กรัม} & 6.05 \text{ กรัม}
 \end{array}$$

ในถ้ำลอย	100	กรัม	มีแคลเซียมออกไซด์	17.21	กรัม
ในถ้ำลอย	30	กรัม	มีแคลเซียมออกไซด์	$\left(\frac{17.21 \times 30}{100}\right)$	$= 5.16$ กรัม
ในถ้ำลอย	100	กรัม	มีอะลูมินา	21.32	กรัม
ในถ้ำลอย	30	กรัม	มีอะลูมินา	$\left(\frac{21.32 \times 30}{100}\right)$	$= 6.4$ กรัม
ในถ้ำลอย	100	กรัม	มีเหล็กออกไซด์	14.38	กรัม
ในถ้ำลอย	30	กรัม	มีเหล็กออกไซด์	$\left(\frac{14.38 \times 30}{100}\right)$	$= 4.31$ กรัม
ในถ้ำลอย	100	กรัม	มีซิลเฟต	1.69	กรัม
ในถ้ำลอย	30	กรัม	มีซิลเฟต	$\left(\frac{1.69 \times 30}{100}\right)$	$= 0.51$ กรัม

ต้องการซิลเฟตเพิ่ม $= 6.05 - 0.51 = 5.54$ กรัม จากฟอสโฟิปซัม

มีซิลเฟต	52.07	กรัม	ในฟอสโฟิปซัม	100	กรัม
มีซิลเฟต	5.54	กรัม	ในฟอสโฟิปซัม	$\left(\frac{100 \times 5.54}{52.07}\right)$	$= 10.64$ กรัม
ในฟอสโฟิปซัม	100	กรัม	มีแคลเซียมออกไซด์	46.77	กรัม
ในฟอสโฟิปซัม	10.64	กรัม	มีแคลเซียมออกไซด์	$\left(\frac{46.77 \times 10.64}{100}\right)$	$= 4.78$ กรัม
ในฟอสโฟิปซัม	100	กรัม	มีอะลูมินา	0.33	กรัม
ในฟอสโฟิปซัม	10.64	กรัม	มีอะลูมินา	$\left(\frac{0.33 \times 10.64}{100}\right)$	$= 0.04$ กรัม
ในฟอสโฟิปซัม	100	กรัม	มีเหล็กออกไซด์	0.37	กรัม
ในฟอสโฟิปซัม	10.64	กรัม	มีเหล็กออกไซด์	$\left(\frac{0.37 \times 10.64}{100}\right)$	$= 7.65$ กรัม

จากถ้ำลอยและฟอสโฟิปซัม

มีแคลเซียมออกไซด์ $= 5.16 + 4.78 = 9.94$ กรัม มีอะลูมินา $= 6.40 + 0.04 = 6.44$ กรัม

มีเหล็กออกไซด์ $= 4.31 + 0.04 = 4.35$ กรัม

ดังนั้นใช้ถ้ำลอย 84.62 กรัม, แคลเซียมคาร์บอเนต 33.8 กรัม, อะลูมินา 24.16 กรัม, ฟอสโฟิปซัม 10.64 กรัม และเฟอร์รัสซิลเฟต 7.65 กรัม

ก8) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ซีเมนต์เบสไลต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสูง

ใช้ถ้ำล่อยเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ และเฟอร์รัสซิลเฟตเป็นแหล่งให้ซิลเฟต โดยคำนวณวัตถุดิบให้มีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์และเฟอร์รัสซิลเฟตต่อซิลิกาเท่ากับ 2 สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{array}{rcl} 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 & & \\ 2(56) & 60 & \\ 112 \text{ กรัม} & 60 \text{ กรัม} & \end{array}$$

มีซิลิกา 38.45 กรัม ในถ้ำล่อย 100 กรัม

ต้องการซิลิกา 60 กรัม ในถ้ำล่อย $\left(\frac{100 \times 60}{38.45}\right) = 156.05$ กรัม

ในถ้ำล่อย 100 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ 17.21 กรัม

ในถ้ำล่อย 156.05 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ $\left(\frac{17.21 \times 156.05}{100}\right) = 26.86$ กรัม

ในถ้ำล่อย 100 กรัม มีอะลูมินา 21.32 กรัม

ในถ้ำล่อย 156.05 กรัม มีอะลูมินา $\left(\frac{21.32 \times 156.05}{100}\right) = 33.27$ กรัม

มีเฟอร์รัสซิลเฟต 3% ของแคลเซียมออกไซด์ทั้งหมด $= \left(\frac{3}{100}\right) \times 112 = 3.36$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม $= 112 - 26.86 - 3.36 = 81.77$ กรัม

ดังนั้นใช้ถ้ำล่อย 156.05 กรัม แคลเซียมคาร์บอเนต 81.77 กรัม และเฟอร์รัสซิลเฟต 3.36 กรัม

ก9) การคำนวณวัตถุดิบกรณีสังเคราะห์ไคแคลเซียมซิลิเกตแบบไฮโดรเทอร์มอล

ใช้ถ้ำลอยเป็นแหล่งให้แคลเซียมออกไซด์และซิลิกา และใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ให้กับระบบ โดยคำนวณวัตถุดิบให้มีอัตราส่วนโมลของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 2 และใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเท่ากับ 5 สามารถคำนวณได้โดย

ในถ้ำลอย 100 กรัม มีซิลิกา 38.45 กรัม

ในถ้ำลอย 50 กรัม มีซิลิกา $\left(\frac{38.45 \times 50}{100}\right) = 19.23$ กรัม

ในถ้ำลอย 50 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ 17.21 กรัม

ในถ้ำลอย 50 กรัม มีแคลเซียมออกไซด์ $\left(\frac{17.21 \times 50}{100}\right) = 8.61$ กรัม

ต้องการแคลเซียมออกไซด์เพิ่ม $= (2 \times 19.23) - 8.61 = 29.85$ กรัม

ดังนั้นใช้ถ้ำลอย 50 กรัม และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 29.85 กรัม

ภาคผนวก ข
การนำเสนอผลงานวิจัย



Synthesis of Belite Bearing Cement from Mae Moh Fly Ash

Kedsarin Pimraksa¹
Sakonwan Hanjitsuwan²

^{1,2}Department of Industrial Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University
E-mail : kpimrakp@science.cmu.ac.th¹, yim_kachan@yahoo.com²

Abstract: Belite cement is friendly environmental material as it can be produced at low temperature in the range of 750-950°C leading to energy saving and low carbon dioxide emission. The synthesis of belite bearing cement is studied by using different alkaline concentrations and heat treatment temperatures. The synthesis is based on the hydrothermal - heat treatment-route. The intermediate and final products are investigated in terms of phase composition and microstructure. The hydraulic and mechanical properties of belite bearing cement mortar are studied using setting time and 28 days compressive strength as indicators. As a result, the final product is belite rich cement giving a 1-10 hrs. of final setting time and a 5-9 MPa of 28 days compressive strength.

Keywords: Belite rich cement, Fly ash, Hydrothermal process, Dissolution-precipitation

1. Introduction

The Portland cement manufacturing industry has been facing the pressure to reduce energy consumption and CO₂ emissions [1]. Some estimates put the cement industry total as high as 5% of total global CO₂ emissions that is only a minor part of the larger issues of the role of the construction industry in the sustainable development of our civilization [2]. This research, however, is carried out to reduce the global CO₂ emission as well as energy saving related to cement manufacture. Cement that contains high proportion of belite (C₂S) has been accepted to be one of the interests because the belite-rich cement can be manufactured by using lower LSF (Lime Saturation Factor), lower carbonate content and lower burning temperature resulting in a less CO₂ emission than Portland cement (PC). The belite cement phase (Ca₂SiO₄) of dicalcium silicate is a component of the Portland cement, which does not contribute to the early strength owing to its very low hydraulic activity [3]. However, the long-term strength of belite based materials can reach the same level of that of PC. The belite cement obtained from firing technique has several drawbacks such as low specific surface area and slow hydration. In order to improve both disadvantages, the dissolution-precipitation method at high temperature so called "hydrothermal process" is considered because the belite cement is formed through the pathway of gelation which can provide very fine particles. Another way for dissolving the latter drawback is adding a reactive component such as calcium sulfoaluminate, C₄A₃S* in the hydrothermally belite-rich cement as the hydration of this phase contributes the early strength due to ettringite (C₆AS₃*H₃₂) formation. Such sulfoaluminate cement is produced at the temperature around 1100°C and thus low energy is consumed in the production.

This research, therefore, aims to hydrothermally synthesis belite bearing cement from fly ash used in specific application which has no early strength demand such a concrete block production. The studied factors here are alkaline concentration effect on the dissolution of the starting material and therefore on the precipitation of the final product (belite rich cement) and heat treatment effect on phase development of the final product. Fly ash generally contains glassy phase and high silica content which possesses pozzolanic property resulting in a formation of calcium silicate hydrate (CSH), similar to that produced by the hydration of PC. Other cementitious products are also formed as a result of the pozzolanic reaction between lime and alumina or iron oxide. Hydrothermal processing is widely used for CSH and calcium aluminate hydrate (CAH) preparations and the hydration products afterwards are transformed into the final product or reacted cement by using heat treatment process. The hydrothermal-calcination-route was first used by Jiang and Roy [4]. The latent heat which is in charge of hydraulic property of fly ash is influenced by the chemical and mineralogical compositions, the surface area and the type of activation. Generally, fly ash becomes more active by alkaline activation that is affected by a high concentration of OH⁻ in the mix. The siliceous fly ash partly therefore is activated and dissolved resulting in silanol group (=Si-OH) which is neutralized in the alkaline medium and precipitated as various types of hydration products depending on types of major and minor elements containing in fly ash. The heat treatment process is performed to remove chemically bound water from the hydration products and to transform the anhydrous products into the required belite bearing cement.

2. Experimental

Fly ash was obtained from Mae Moh Power Plant located in Lampang province. Hydrated lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) is a commercial grade reagent supplied from Northern Chemical Co., Ltd.

2.1 Synthesis of belite bearing cement

Fly ash and calcium hydroxide were used as starting materials. They were mixed at a Ca/Si molar ratio of 2. The chemical composition of fly ash is shown in Table 1. Fly ash was first dissolved in hydrated lime solution and then treated hydrothermally at 120-140°C. 1 M and 3 M sodium hydroxides (NaOH) were used as alkaline activators. The hydrothermal or intermediate products were calcined at different temperatures from 750, 850 and 950°C.

Table 1 Chemical composition of fly ash

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
17.21	38.45	21.32	14.38	0.93	2.77
MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	
2.49	0.44	0.15	0.18	1.69	

2.2 Analysis and measurement

Thermal analyze was recorded using a Perkin-Elmer DTA device with a heating rate of 10°C/min in air stream. The phase compositions of the synthesized cement were investigated using a Philips X'Celerator diffractometer with a $\text{Cu K}\alpha_1$ radiation. SEM analyzes were carried out with JEOL JSM-5910 LV microscope equipped with EDS microanalysis. Fineness is determined using Blaine test according with ASTM C204 [5]. Compressive strength at 28 days and setting time tests were done according with ASTM C109 [6] and C191 [7], respectively.

3. Results and discussions

3.1 Thermal analysis

As shown in Fig. 1, the physical and chemical reactions of the hydrothermal reaction products were detected by DTA in the range of RT-1100°C.

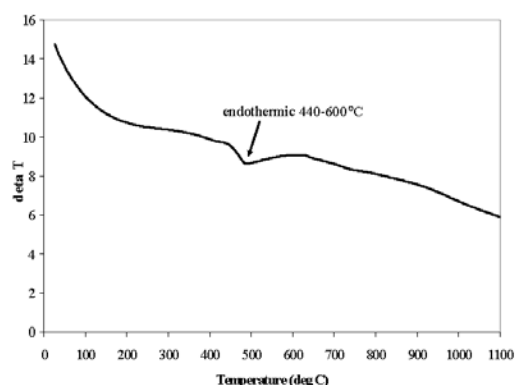


Figure 1 DTA-curve of hydrothermal reaction products

The used calcining temperature was followed up using DTA-curve. The hydration or intermediate products begin to decompose into anhydrous phase at 440-600°C. The decomposition of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ also takes place at that temperature range. However, there is no exothermic peak which is in charge of new phase development appearing at the higher temperature. This is similar to the result obtained from Heller mentioning the transformation of CSH into $\beta\text{-C}_2\text{S}$ at 450°C [8]. It is pointed out that there is very few of calcite (CaCO_3) remaining in the sample relating to the effective consumption of hydrated lime in the hydrothermally chemical reaction. Ishida et al. reported that the $\beta\text{-C}_2\text{S}$ was formed when the anhydrous phases were heated further to 900-1000°C [9].

3.2 Mineralogical analysis

The starting fly ash contains calcium aluminate ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$), mullite ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), anhydrite, quartz, magnetite, lime and glassy phase which is identified by hump peak as reported by XRD curve in Fig. 2.

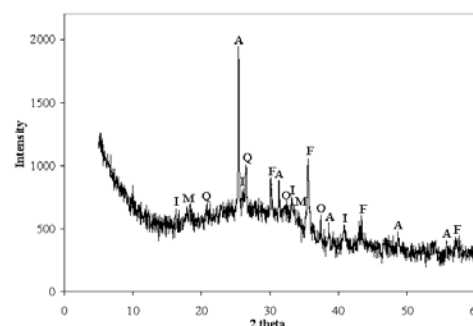


Figure 2 XRD-pattern of as-received fly ash

Note : A= CaSO_4 , Q= SiO_2 , F= Fe_3O_4 , O= CaO , I= $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$, M= $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$

Mineralogical compositions of the hydration products and the final cement products prepared from the mixture of fly ash and hydrated lime are recorded as XRD-patterns as shown in Fig. 3. As a result of hydrothermal synthesis, new hydration phases: katoite ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{SiH}_8\text{O}_{12}$) which is a cubic crystallographic variety of hydrogarnet series is formed and CSH gel ($\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$) is also developed identified by a small hump peak as demonstrated in Fig. 3 (a). The reflections of calcite and portlandite show that the fly ash pozzolanic reaction under steam is not completed. With heat treatment at 750°C, katoite is entirely changed into alpha and beta-belite ($\alpha\text{-C}_2\text{S}$ & $\beta\text{-C}_2\text{S}$) as shown in Fig. 3 (b). In addition, mayenite ($\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$), portlandite, magnetite and calcite are decreased indicating the transformation of those minerals into belite phase. With increasing calcining temperatures from 750°C to 950°C, the intensities of the belite are increased and a new phase so called "gehlenite" ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) is formed when the calcining temperature is raised up to 950°C. Gehlenite is not desirable due to its small hydraulic property but can give Ca and Al ions with the presences of strong base [3].

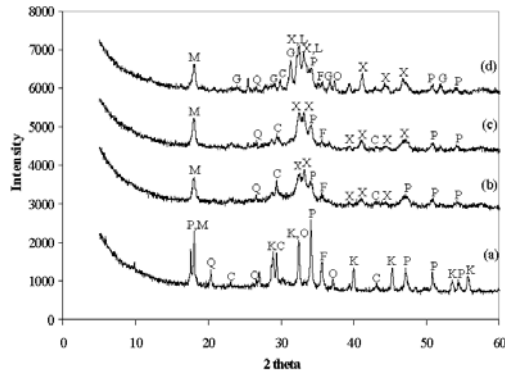


Figure 3 XRD-patterns of the mixtures made of fly ash-hydrated lime-water (a) noncalcined (b) calcined at 750°C (c) at 850°C (d) at 950°C

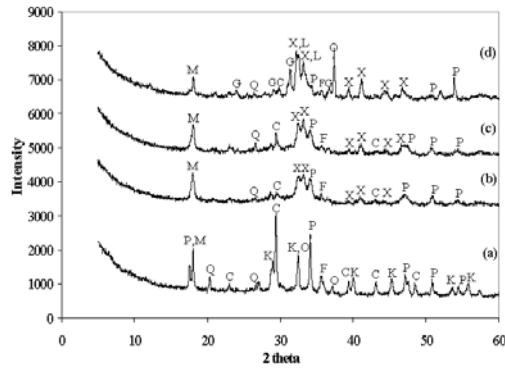


Figure 4 XRD-patterns of the mixtures made of fly ash-hydrated lime-1 M NaOH-water (a) noncalcined (b) calcined at 750°C (c) at 850°C (d) at 950°C

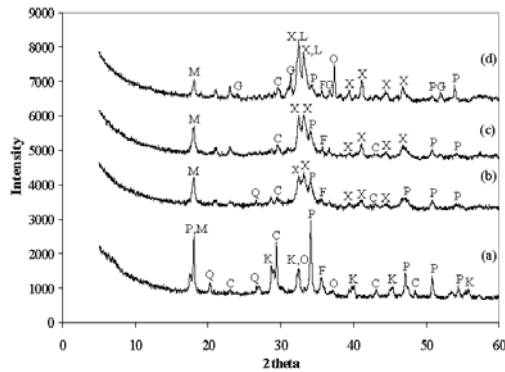


Figure 5 XRD-patterns of the mixtures made of fly ash-hydrated lime-3 M NaOH-water (a) noncalcined (b) calcined at 750°C (c) at 850°C (d) at 950°C

Note : P=Ca(OH)₂, C=CaCO₃, Q=SiO₂, F=Fe₂O₄, O=CaO, M=Ca₁₂Al₁₄O₃₃, K=Ca₃Al₂SiH₈O₁₂, X=α'-Ca₂SiO₄, L=β-Ca₂SiO₄, G=Ca₂Al₂SiO₇

Mineralogical compositions of the hydration products and the final cement products prepared from the mixture of fly ash and hydrated lime activated by 1 M and 3 M NaOH are recorded as XRD-patterns as shown in Fig. 4 and 5, respectively. Generally, XRD-patterns of both 1M and 3 M NaOH activated mixtures are similar. In addition, they are similar to the patterns of non-activated mixtures for all ranges of calcining temperatures but the intensities and the amount of gehlenite. In fact, pH significantly controls solution speciation and dictates the form and mechanism by which the various complexes precipitate [10]. The dissolution of pozzolanic material can be, therefore, accelerated when pH of a system is over 13 [11,12]. From the above results, it is pointed out that the activations using both 1 and 3 M NaOH slightly affect the belite preparations. It possibly means that most of silica containing in fly ash can be hydrothermally dissolved. The alkaline activations can slightly enhance the quantities of the belite cement. XRD powder evidences show that the obtained belite cements are the mixture of α_L'-C₂S and β-C₂S. In addition, a small amount of portlandite still remains after the calcinations for all temperature ranges. This must be strictly taken into consideration as lime can produce expansion during hydration.

3.3 Microstructure analysis

SEM analyses were carried out on the belite bearing cements obtained from the hydrothermal-calcination-route with both non-activated and NaOH activated systems. The results reveal that with a non-activated synthesis there are rounded and irregular particles at the surfaces of fly ash particles after 750, 850 and 950°C calcinations as shown in Fig. 6 (b), (c) and (d). The hydrothermal products have no such particles as shown in Fig. 6 (a). A very common shape of belite cement in the form of β-C₂S mixed with some α_L'-C₂S is rounded. For the β-C₂S to α_L'-C₂S transformation, the shape of those grains is typically irregular [13]. Therefore, these photomicrographs confirm the existences of both α_L'-C₂S and β-C₂S. The particle size of the belite rich cement increases with an increase of calcining temperature due to a grain growth. In the presence of 3 M NaOH, the particle shape of belite cement is about out-rounded after 750°C calcination and becomes irregular when the calcining temperature is up to 850°C as shown in Fig. 7 (b), (c) and (d). It can be said that the NaOH activated fly ash resulting in the α_L'-C₂S phase rather than β-C₂S phase.

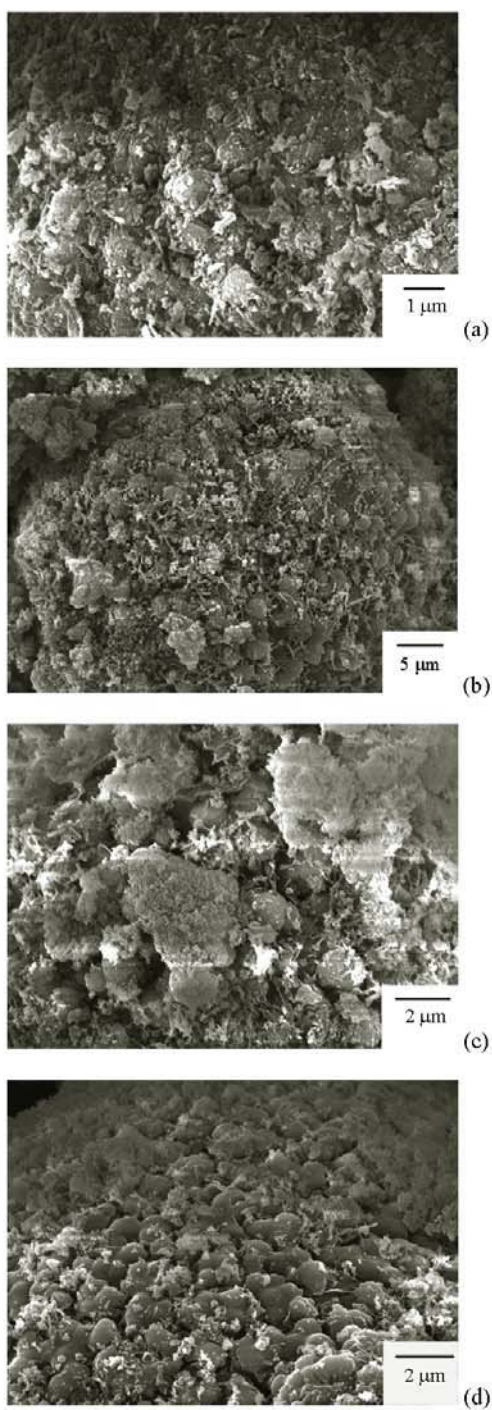


Figure 6 SEM-photomicrographs of the mixtures made of fly ash-hydrated lime-water (a) noncalcined (b) calcined at 750°C (c) at 850°C (d) at 950°C

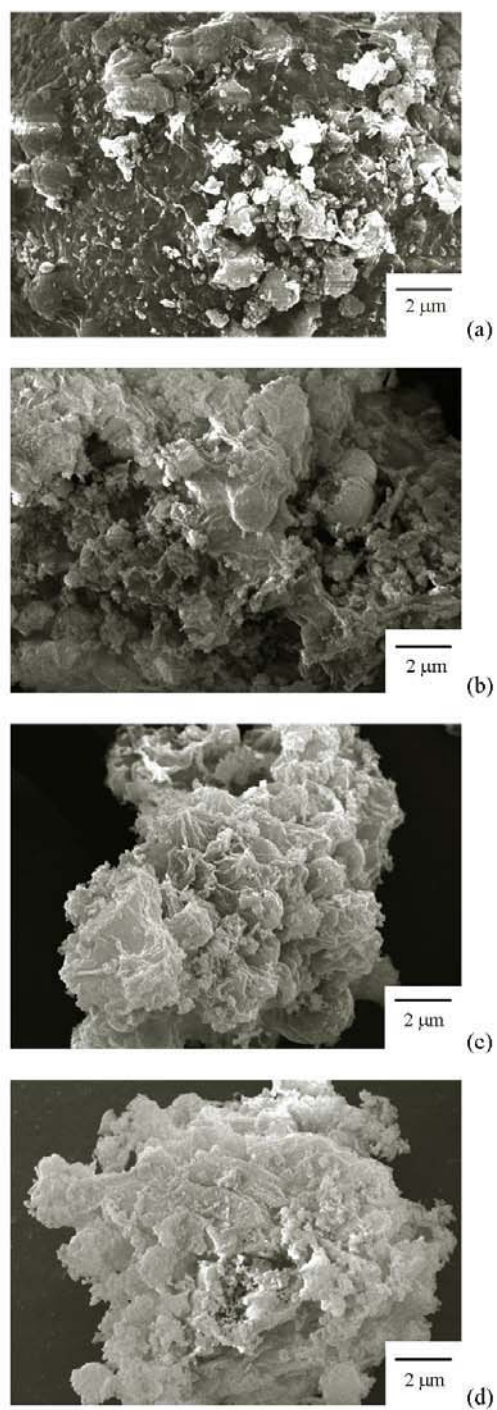


Figure 7 SEM-photomicrographs of the mixtures made of fly ash-hydrated lime-3 M NaOH-water (a) noncalcined (b) calcined at 750°C (c) at 850°C (d) at 950°C

3.4 Mechanical testing and measurement

Compressive strength and setting time of non-activated and activated mortars are shown in Table 2. After 28 days of hydration, non-activated mortars generally have higher compressive strength values than 1 and 3 M NaOH activated systems. It is believed that the difference of mineralogical compositions of those systems leads to the strength enhancement in that non-activated system and both activated belite cements contain beta-belite rich and alpha-belite rich cements, respectively. In addition, the alkaline activated systems have much lower specific surface areas than the non-activated system.

The setting time can imply to the reactivity of hydration. The shorter time is the higher hydration rate. The hydration rate is functionally influenced by the reactive sites of cement particles. Actually, non-activated cement should have the shortest setting time. In the contrary, 3 M NaOH activated cement which has the lowest surface area possesses the lowest setting time. As a matter of fact that alkaline activated synthesis, especially with higher concentration contains more free lime than non-activated and low alkaline content syntheses. The fast setting time therefore comes from the hydration of lime also. Here, the final setting time of the obtained belite cement is relative short when compared to ordinary Portland cement (OPC). This is possibly due to the difference of their specific surface areas. The typical values of modern OPC and rapid hardening Portland cement are about 3,000-3,500 and 4,000-4,500 cm²/g, respectively [13]. Here, the surface areas of fly ash belite cements are averagely two to three times higher than that of those Portland cements.

The highest compressive strength of non-activated system is obtained from the mortar prepared by using 750°C calcined belite cement. This is in a good agreement with the XRD analyses, where the intensity of belite phase is practically higher for 850°C calcined belite in comparison with that of 750°C calcined belite. Although, the intensity of 950°C calcined belite is slightly higher than that of 850°C calcined belite, its compressive strength is lower at 28 days curing period. This is possibly due to the presence of gehlenite at higher calcining temperature. Such gehlenite can retard the hydration. The strength obtained from this experiment is higher than that obtained from Guerrero et. al [14] in that the 28 days strengths of belite cements reported by Guerrero are 4 MPa for 1 M NaOH hydrothermal treatment and 6.7 MPa for water hydrothermal treatment.

As a result, the optimum calcining temperature of belite preparation is about 750°C and the proper condition for obtaining the belite rich cement is non activated system indicated by the good mechanical properties. However, strength test should be investigated in long term curing in order to follow up lately strength value and find out whether the strength can be comparable to OPC.

Table 2 Influence of preparation condition on the compressive strength at 28 days and final setting time of fly ash belite cement

Preparation conditions	Blaine fineness [cm ² /g]	Strength at 28 days [MPa]	Final setting time [hr.]
Water, 750°C	15,405	9.0	2.0
Water, 850°C	16,430	8.0	3.0
Water, 950°C	11,450	7.0	1.0
1MNaOH, 750°C	9,270	7.0	3.0
1MNaOH, 850°C	11,360	8.0	4.0
1MNaOH, 950°C	9,145	7.0	10.5
3MNaOH, 750°C	7,990	8.0	1.0
3MNaOH, 850°C	9,300	8.0	1.5
3MNaOH, 950°C	8,215	5.0	8.5

4. Conclusions

1. Belite rich cement can be synthesized using Mae Moh fly ash and a hydrothermal-calcination-route.
2. Non-activated cement is beta-C₂S rich while NaOH activated is alpha-rich in all ranges of heat treatment.
3. The optimum condition and heat treatment temperature for the belite synthesis are non-activated and 750°C, respectively.
4. The compressive strength at 28 days and final setting time of the non-activated belite are approximately 7-9 MPa and 1-3 hrs., respectively.

Acknowledgement

Supports given by TRF-The Thailand Research Fund, Mr. Thanit Pulivekin and Mr. Santi Yuen-Ying from Siam City Cement Public Company Limited, Prof. Dr. Prinya Chindaprasirt from SIRDC, Khon Kaen University are gratefully acknowledged.

References

- [1] Keith Quillin, 2001. Performance of belite-sulfoaluminat cements. *Cem. Concr. Res.*, 31 : 1341-1349.
- [2] Ellis Gartner, 2004. Industrially interesting approaches to low-CO₂ cement. *Cem. Concr. Res.*, 34 : 1489-1498.
- [3] A. Guerrero, S. Goni, I. Campillo and A. Moragues, 2004. Belite cement clinker from coal fly ash of high Ca content. *Environ. Sci. Technol.* 38 : 3209-3213.
- [4] Weimin Jiang and Della M. Roy, 1997. Hydrothermal processing of new fly ash cement. *Cer. Bull.*, 71 [4] : 642-647.
- [5] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C204 : Standard test method for fineness of hydraulic cement by air-permeability. *Annual Book of ASTM Standard*, V.04.01 : 185-191.
- [6] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C109 : Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars

- (using 2-in. or 50-mm cube specimens). Annual Book of ASTM Standard, V.04.01 : 83-87.
- [7] American Society for Testing and Materials, 2001. ASTM C191 : Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle. Annual Book of ASTM Standard, V.04.01 : 179-183.
- [8] L. Heller, 1952. The structure of dicalcium silicate α -hydrate. Acta Crystallogr., 5[6] : 724-728.
- [9] H. Ishida, S. Yamazaki, K. Sasaki, Y. Okada and T. Mitsuda, 1993. α -Dicalcium silicate hydrate: preparation, decomposed phase and its hydration. J. Am. Ceram. Soc., 76[7] : 1707-1712.
- [10] J.W. Phair and J.S.J Van Deventer, 2001. Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of water-based inorganic polymer. Miner. Eng., 14[3] : 289-304.
- [11] P. Chindaprasirt, 2005. Fly ash in concrete, 2nd ed. Thailand: Thai Concrete Association Pub. (In Thai).
- [12] D. Li, Y. Chen, J. Shen, J. Su and X. Wu., 2000. The alkalinity on the activation and microstructure of fly ash. Cem. Concr. Res., 30 : 881-886.
- [13] H.F.W Tylor, 1990. Cement Chemistry. 2nd ed. UK: Thomas Telford Pub.
- [14] A. Guerrero, S. Goni, A. Moragues and J.S. Dolado, 2005. Microstructure and mechanical performance of belite cement from high calcium coal fly ash. J. Am. Ceram. Soc., 88[7] : 1845-1853.

Biographies



Kedsarin Pimraksa was born in Chiang Rai, Thailand in 1973, has earned Ph.D from the Institute for Chemical Technology of Inorganic Materials, Vienna University of Technology (Austria) since 2003 and is presently a lecturer in Chiang Mai University.



Sakonwan Hanjitsuwan was born in Lampang, Thailand in 1982, has earned B.Sc. from Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang since 2004 and is presently a master student in Chiang Mai University.