

การพัฒนาคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อมประสาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF CORDIERITE-MULLITE REFRACTORY CASTABLES USING MAGNESIUM-
BASED CEMENTS AS A BINDER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้ ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อมประสาน
โดย	น.ส.วาริณี คลังหิรัญ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)	

วาริณี คลังหิรัญ : การพัฒนาคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อมประสาน. (DEVELOPMENT OF CORDIERITE-MULLITE REFRACTORY CASTABLES USING MAGNESIUM-BASED CEMENTS AS A BINDER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมผลิตภัณฑ์คอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ซึ่งสามารถแข็งตัวเองได้ในแม่แบบโดยใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อมประสาน ได้แก่ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ โดยศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนส่วนผสมของซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานต่อสมบัติของคอนกรีตทนไฟชนิดนี้ จากการทดลองพบว่าซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยได้โดยเฟสซีเมนต์เหล่านี้ช่วยทำให้เกิดความแข็งแรงในชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงเฟสซีเมนต์จะสลายตัวเป็นเฟสแมกนีเซียมและทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ได้ ชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 มีสมบัติทางกายภาพดีที่สุด ชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮดรต และแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮดรตเท่ากับ 3 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานที่เตรียมได้มีค่าใกล้เคียงอยู่ในช่วงของตัวอย่างทางการค้าและสามารถใช้งานได้ที่ 1200 องศาเซลเซียสโดยชิ้นงานยังไม่เกิดการหลอม เมื่อเปรียบเทียบการใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิดนี้ พบว่าการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากไม่มีการสลายตัวเป็นไอกรดที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการเผา

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370147123 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: CORDIERITE-MULLITE MAGNESIUM-BASED CEMENTS MAGNESIUM
SILICATE HYDRATED CEMENT MAGNESIUM OXYCHLORIDE CEMENT
MAGNESIUM OXYSULFATE CEMENT

Warinee Klunghirun : DEVELOPMENT OF CORDIERITE-MULLITE REFRACTORY
CASTABLES USING MAGNESIUM-BASED CEMENTS AS A BINDER. Advisor: Asst.
Prof. KARN SERIVALSATIT, Ph.D.

This research studied the fabrication of cordierite-mullite refractory castables. The products can be hardened in the molds using magnesium-based cements as a binder, i.e. magnesium silicate hydrated (MSH) cement, magnesium oxychloride (MOC) cement and magnesium oxysulfate (MOS) cement. The effects of type and mixture ratio of magnesium-based cement used as a binder on the properties of the castables were investigated. The castables were successfully prepared using these three types of magnesium-based cements as a binder. These cements provided the strength of the samples at room temperature and decomposed to magnesia which reacted with alumina and silica to form cordierite during firing. The samples using MSH cement as a binder with magnesia to silica molar ratio of 1 obtained the best physical properties. The samples using MOC cement and MOS cement as a binder with magnesia to magnesium chloride hexahydrate and magnesia to magnesium sulfate heptahydrate molar ratio of 3 were the optimal ratio. The physical properties of these samples are comparable to those of the commercially products and can be used at 1200 °C without any deformation. Compared to the other castables, the castable which used MSH cement as a binder was the most appropriate due to the absence of acid vaporization during the firing process.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือและการสนับสนุนทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัยจากบุคลากรหลายท่าน ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณในความกรุณาของทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตรวจสอบแก้ไข และติดตามความก้าวหน้าในการทำวิจัยที่เป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยสำหรับการสนับสนุนทุนการศึกษาจนจบหลักสูตร และโครงการ GAICCE

ASEAN University Network/Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN/SEED-net) สำหรับทุนวิจัยในการนำเสนอผลงานทางวิชาการ

ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่คอยให้กำลังใจสนับสนุนและความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนและอำนวยความสะดวกเรื่องอาคารสถานที่ และอุปกรณ์เครื่องมือตลอดระยะเวลาดำเนินงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วาริณี คลังหิรัญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วัสดุทนไฟ.....	3
2.2 วัสดุทนไฟคอร์เดียไรต์-มุลไลต์.....	4
2.2.1 คอร์เดียไรต์ (cordierite).....	4
2.2.2 มุลไลต์ (mullite).....	5
2.2.3 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตคอร์เดียไรต์-มุลไลต์.....	5
2.3 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ.....	7
2.3.1 การขึ้นรูปด้วยการอัดแบบแห้ง (dry pressing).....	7
2.3.2 การขึ้นรูปด้วยการหล่อ.....	9
2.3.3 ตัวเชื่อมประสาน.....	9

2.3.3.1	แมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์	10
2.3.3.2	แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์.....	11
2.3.3.3	แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์.....	15
2.3.3.4	แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์.....	19
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1	วัตถุประสงค์และสารเคมี	25
3.1.1	องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุประสงค์	25
3.1.2	องค์ประกอบเฟสของวัตถุประสงค์	26
3.2	วิธีการดำเนินการทดลอง	28
3.2.1	อัตราส่วนส่วนผสมในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอร์เตียไรต์-มุลไลต์	28
3.2.2	การขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานในแม่แบบ	31
3.3	การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้.....	36
3.3.1	การทดสอบความต้านแรงดัด	36
3.3.2	การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา.....	37
3.3.3	การทดสอบความหนาแน่นรวม ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ	37
3.3.4	การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส.....	38
3.3.5	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค.....	39
3.3.6	การวิเคราะห์พันธะทางเคมี.....	39
3.3.7	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน.....	40
3.4	แผนผังการทดลอง	41
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
4.1	ผลการศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อม ประสาน	43

4.1.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกต ไฮเดรต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	43
4.1.1.1 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ซิลิเกตไฮ เดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	43
4.1.1.2 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ซิลิเกตไฮเดรต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	44
4.1.1.3 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ซิลิเกตไฮเดรต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	45
4.1.2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ซิลิเกต ไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	46
4.1.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมโดย ใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	47
4.1.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	50
4.1.5 ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโก ปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน....	53
4.1.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ซิลิเกตไฮเดรต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	54
4.1.7 ผลการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความ ร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	56
4.2 ผลการศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อม ประสาน	57
4.2.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซี คลอไรด์ ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	57
4.2.1.1 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีคลอ ไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	57

4.2.1.2 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ออกซีคลอไรด์ ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	58
4.2.1.3 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ออกซีคลอไรด์ ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	59
4.2.2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซี คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	60
4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมโดย ใช้แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	61
4.2.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้ แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	65
4.2.5 ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโก ปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	67
4.2.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ออกซีคลอไรด์ ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	68
4.2.7 ผลการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความ ร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	70
4.3 ผลการศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อม ประสาน	71
4.3.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	71
4.3.1.1 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ออกซี ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	71
4.3.1.2 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	73
4.3.1.3 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ออกซีซัลเฟต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	74

4.3.2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ออกซีซัลเฟต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	75
4.3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมโดย ใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	76
4.3.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้ แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	79
4.3.5 ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโก ปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	82
4.3.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียม ออกซีซัลเฟต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน.....	84
4.3.7 ผลการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความ ร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน .	86
4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทางการค้ากับตัวอย่างที่เตรียมได้	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	91
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
บรรณานุกรม.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แร่ที่เกี่ยวข้องกับระบบแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์	11
ตารางที่ 2.2 เฟสที่พบได้ในแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์	15
ตารางที่ 2.3 เฟสที่พบได้ในแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์	20
ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	25
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ	26
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยโมลของตัวเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา	28
ตารางที่ 3.4 ปริมาณวัตถุดิบสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก).....	30
ตารางที่ 3.5 ปริมาณวัตถุดิบสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก).....	30
ตารางที่ 3.6 ปริมาณวัตถุดิบสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)	31
ตารางที่ 3.7 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปคอนกรีตคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ที่ใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)	32
ตารางที่ 3.8 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปคอนกรีตคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)	33
ตารางที่ 3.9 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปคอนกรีตคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)	33
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทางการค้ากับตัวอย่างที่เตรียมได้	87

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ผลของขนาดแม่พิมพ์ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานแบบอัดทิศทางเดียว	8
รูปที่ 2.2 ผลของขนาดแม่พิมพ์ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานแบบอัดสองทิศทาง	8
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบทางเฟสของส่วนผสมของแมกนีเซียมที่เชื่อมกับกรดซิลิสิกที่อุณหภูมิต่าง ๆ	13
รูปที่ 2.4 สเปกตรัม ^{25}Mg MAS NMR ของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่บ่มไว้เป็นเวลา 8 เดือน ทัลค์ และลิซซาร์ดไดต์	14
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเฟส 2, 3, 5 และ 9 จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	17
รูปที่ 2.6 ปริมาณของเฟส 5-1-8 และ 3-1-8 ณ เวลาต่าง ๆ	17
รูปที่ 2.7 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบ $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิห้อง (เส้นประแสดงถึงการเกิด เจล)	19
รูปที่ 2.8 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบ $\text{MgO-MgSO}_4\text{-H}_2\text{O}$	21
รูปที่ 2.9 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบ $\text{MgO-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส	22
รูปที่ 2.10 แผนภาพการเกิดชั้นไฮเดรตชั้นบนผิวของแมกนีเซียมในแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟต	23
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเฟส (ก) แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ (ข) ดินขาวเผา (ค) แคลไซต์ อะลูมินา และ (ง) ซิลิกาฟุ่ม	27
รูปที่ 3.2 ส่วนผสมที่ผ่านการผสมให้เข้ากัน	32
รูปที่ 3.3 หล่อขึ้นรูปในแม่แบบอะคริลิค	34
รูปที่ 3.4 บ่มชิ้นงานในแม่แบบและคลุมด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันน้ำระเหยออกจากชิ้นงาน	34
รูปที่ 3.5 ชิ้นงานหลังหล่อแบบ	35
รูปที่ 3.6 อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	35
รูปที่ 3.7 ชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่ม อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที	36
รูปที่ 3.8 การทดสอบความต้านแรงดัดแบบ 3-point bending	36

รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักชุดทดสอบความหนาแน่น.....	38
รูปที่ 3.10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ รุ่น D8 Discover.....	39
รูปที่ 3.11 เครื่องวัดการขยายตัวเชิงความร้อน.....	41
รูปที่ 3.12 แผนผังการทดลอง.....	42
รูปที่ 4.1 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกา ต่าง ๆ.....	44
รูปที่ 4.2 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาต่าง ๆ	45
รูปที่ 4.3 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาต่าง ๆ	46
รูปที่ 4.4 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกา ต่าง ๆ.....	47
รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาต่าง ๆ.....	48
รูปที่ 4.6 ความพรุนตัวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาต่าง ๆ.....	48
รูปที่ 4.7 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาต่าง ๆ.....	49
รูปที่ 4.8 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อม ประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	51
รูปที่ 4.9 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานเฉพาะส่วนละเอียดที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานหลังบ่ม 28 วัน.....	52
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของ ชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมล แมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1.....	53
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังอบที่กำลังขยาย (ค) 2000 เท่า (ง) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังเผาที่กำลังขยาย (จ) 2000 เท่า (ฉ) 5000 เท่า ที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่ อัตราส่วนโดย โมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1.....	55

รูปที่ 4.12 การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1	56
รูปที่ 4.13 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ	58
รูปที่ 4.14 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ	59
รูปที่ 4.15 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ	60
รูปที่ 4.16 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมล แมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ	61
รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมล แมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ	62
รูปที่ 4.18 ความพรุนตัวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมล แมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ	62
รูปที่ 4.19 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ	63
รูปที่ 4.20 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานคอนกรีตที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	66
รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3	67
รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังอบที่กำลังขยาย (ค) 2000 เท่า (ง) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังเผาที่กำลังขยาย (จ) 2000 เท่า (ฉ) 5000 เท่า ที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3	69

รูปที่ 4.23 การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3	71
รูปที่ 4.24 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ	72
รูปที่ 4.25 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ	73
รูปที่ 4.26 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ	74
รูปที่ 4.27 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ	75
รูปที่ 4.28 ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ	77
รูปที่ 4.29 ความพรุนตัวของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ	77
รูปที่ 4.30 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ	78
รูปที่ 4.31 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	80
รูปที่ 4.32 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานเฉพาะส่วนละเอียดที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานหลังบ่ม 28 วัน	82
รูปที่ 4.33 การวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมล แมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3	83
รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังอบที่กำลังขยาย (ค) 2000 เท่า (ง) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังเผาที่กำลังขยาย (จ) 2000 เท่า	

(ฉ) 5000 เท่า ที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตเท่ากับ 3..... 85

รูปที่ 4.35 การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตเท่ากับ 3 86



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

คอร์เดียไรต์-มุลไลต์ เป็นวัสดุทนไฟที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยมักจะใช้ทำ วัสดุรองเผา (kiln furniture) ผลิตภัณฑ์เซรามิก โดยคอร์เดียไรต์มีสูตรเคมีคือ $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ สมบัติที่สำคัญคือ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient of thermal expansion, COE) ต่ำ ประมาณ 1×10^{-6} ถึง 2×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส^[1] และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลัน (thermal shock resistance) ได้ดี ส่วนมุลไลต์มีสูตรเคมีคือ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1870 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และมีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี จึงนิยมนำเอาวัสดุ 2 ชนิดนี้มารวมกันทำให้ได้สมบัติที่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลันและความแข็งแรงเชิงกลสูงเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1300 องศาเซลเซียส

โดยทั่วไปวัสดุรองเผามักขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแห้ง (dry pressing) แต่เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ จึงส่งผลต่อการออกแบบแม่แบบ (mold) ที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุรองเผา อีกทั้งยังมีต้นทุนในการผลิตแม่แบบค่อนข้างสูง และถ้าความต้องการของผลิตภัณฑ์นั้นมีจำนวนน้อย อาจทำให้ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในการผลิตแม่แบบที่มีรูปร่างเฉพาะต่อผลิตภัณฑ์นั้น จากปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงสนใจการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอร์เดียไรต์-มุลไลต์ด้วยวิธีการเทหล่อแบบ ทำให้สามารถใช้แม่แบบได้หลากหลายรูปแบบและมีต้นทุนในการผลิตแม่แบบที่ถูกกว่า โดยการเทหล่อแบบมีกระบวนการคล้ายกับการเทคอนกรีต กล่าวคือขึ้นงานนั้นสามารถแข็งตัวเองได้ในแม่แบบชนิดต่างๆ โดยใช้ตัวเชื่อมประสานระหว่างคอร์เดียไรต์กับมุลไลต์ให้เกิดความแข็งแรงก่อนเผา ซึ่งซีเมนต์ฐานแมกนีเซียม (magnesium-based cement) เป็นซีเมนต์ที่มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างคอร์เดียไรต์กับมุลไลต์ เนื่องจากแมกนีเซียมที่เป็นองค์ประกอบในซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการใช้แมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ แต่ฟอสเฟตในแมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัว (flux) ส่งผลให้ความทนไฟของวัสดุที่อุณหภูมิสูงลดลง ไม่สามารถใช้งานวัสดุที่อุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมชนิดอื่นที่ไม่มีฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซิคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกซิซิลิเกตซีเมนต์ เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ โดย

แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียม (MgO) กับ ซิลิกาฟุ้ง (silica fume; SiO₂) เกิดเป็นเฟสสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (M-S-H) สำหรับ แมกนีเซียมออกซิคลอไรด์ซีเมนต์สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมกับ แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮดรต (magnesium chloride hexahydrate; MgCl₂·6H₂O) เกิดเป็น เฟสสารประกอบแมกนีเซียมคลอไรด์ (xMg(OH)₂·yMgCl₂·zH₂O) และแมกนีเซียมออกซิซัลเฟต ซีเมนต์เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมกับแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮดรต (magnesium sulfate heptahydrate; MgSO₄·7H₂O) เกิดเป็นเฟสสารประกอบแมกนีเซียมซัลเฟต (xMg(OH)₂·yMgSO₄·zH₂O) ซึ่งเฟสเหล่านี้สามารถเกิดการแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อผ่านการ เผาที่อุณหภูมิสูงแมกนีเซียมในซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมเกิดเป็น เฟสคอร์เดียไรต์ได้ โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนส่วนผสมของซีเมนต์ ฐานแมกนีเซียมที่ใช้เป็นตัวเชื่อมประสานต่อสมบัติของคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ที่ เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาชนิดและอัตราส่วนส่วนผสมของซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็น ตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์

1.3 ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

ศึกษาวิธีการพัฒนาคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ โดยใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียม เป็นตัวเชื่อมประสาน และศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมล MgO/SiO₂, MgO/MgCl₂·6H₂O และ MgO/MgSO₄·7H₂O ที่มีผลต่อสมบัติของคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ผลิตภัณฑ์คอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ที่ใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อม ประสาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุทนไฟ

วัสดุทนไฟ หรือ วัตถุทนไฟ (refractory) มาจากภาษาละตินว่า refractarius ซึ่งมีความหมายว่าไม่เปลี่ยนแปลง คำจำกัดความของวัสดุทนไฟคือ วัสดุโลหะหรือสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic) ที่มีออกไซด์เป็นองค์ประกอบ โดยวัสดุทนไฟจะต้องมีสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพหรือเสียรูปร่างขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง สามารถรับน้ำหนักขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้เพียงพอโดยไม่เกิดการยุบตัว ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงการใช้งาน ทนต่อการกัดกร่อนจากมลพิษฝุ่นหรือวัสดุต่าง ๆ ได้ที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และการทำปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิสูง

วัสดุทนไฟสามารถจำแนกได้หลากหลายประเภท แต่ที่นิยมใช้มี 2 ลักษณะ ได้แก่ การแบ่งประเภทตามองค์ประกอบทางเคมี และการแบ่งประเภทตามลักษณะรูปร่าง วัสดุทนไฟที่แบ่งประเภทตามองค์ประกอบทางเคมีสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่

- วัสดุทนไฟเชิงกรด สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของตะกั่วหรือตะกั่วที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่สามารถทำปฏิกิริยากับตะกั่วหรือตะกั่วต่างได้ง่าย มักมีสูตรเคมีอยู่ในรูปสารประกอบ MO_2 เช่น SiO_2 นิยมใช้ในเตาหลอมแก้ว

- วัสดุทนไฟเชิงกลาง สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของตะกั่วหรือตะกั่วและต่างอ่อนที่อุณหภูมิสูงได้ มักมีสูตรเคมีอยู่ในรูปสารประกอบ M_2O_3 เช่น Al_2O_3 นิยมใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และเตาเผาทั่วไป

- วัสดุทนไฟเชิงด่าง สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของตะกั่วหรือตะกั่วที่อุณหภูมิสูงได้ดี มักมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบลักษณะ MO เช่น CaO และ MgO นิยมใช้ในเตาถลุงโลหะ และเตาเผาปูนซีเมนต์

วัสดุทนไฟที่แบ่งประเภทตามลักษณะรูปร่างสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

- วัสดุทนไฟที่มีรูปร่างแน่นอน (shaped refractory) ได้แก่ อิฐทนไฟ วัสดุรองเผา

- วัสดุทนไฟที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน (unshaped refractory หรือ monolithic) ได้แก่

คอนกรีตทนไฟ ปูนทนไฟ ผงดำ ผงยิง และผงฉาบ^[2]

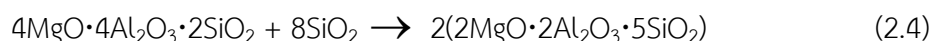
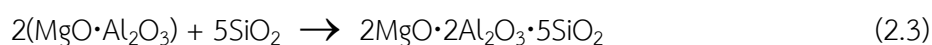
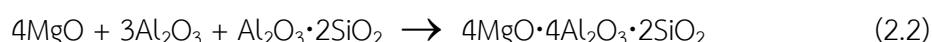
2.2 วัสดุทนไฟคอร์เดียไรต์-มุลไลต์

วัสดุทนไฟคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ เป็นวัสดุทนไฟที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยนิยมนำมาทำเป็นวัสดุรองเผา เนื่องจากมีข้อดีคือ คอร์เดียไรต์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก และมุลไลต์มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำวัสดุสองชนิดนี้มารวมกันทำให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดีและสามารถรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูงได้ดี ซึ่งเป็นการนำข้อดีของทั้งสองเฟสมารวมกันเป็นเนื้อเดียว^[3]

2.2.1 คอร์เดียไรต์ (cordierite)

คอร์เดียไรต์มีสูตรทางเคมีคือ $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$ โดยมี MgO ร้อยละ 13.7, Al_2O_3 ร้อยละ 34.9 และ SiO_2 ร้อยละ 51.4 โดยน้ำหนัก คอร์เดียไรต์นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุทนความร้อน วัสดุฐานรองรับแผงวงจรไฟฟ้า และวัสดุในเตาเผา เนื่องจากคอร์เดียไรต์มีสมบัติที่สำคัญคือมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมากประมาณ 1 ถึง 2×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี มีความเสถียรต่อความร้อนและสารเคมี มีจุดหลอมตัวที่อุณหภูมิ 1460 องศาเซลเซียส และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.6 คอร์เดียไรต์สามารถเตรียมได้หลากหลายวิธี โดยวิธีที่นิยมคือการสังเคราะห์จากออกไซด์บริสุทธิ์เช่น อะลูมินา ซิลิกา และแมกนีเซีย หรือสังเคราะห์จากแร่ต่าง ๆ เช่น ดินดำ ดินขาว ทัลค์ และแมกนีไซต์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

Tuan, K. และคณะ^[4] ศึกษาปฏิกิริยาการเกิดคอร์เดียไรต์ พบว่าปฏิกิริยาเริ่มต้นจากแมกนีเซียทำปฏิกิริยากับอะลูมินาเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมอะลูมิเนียมเตสปีเนล (MgAl_2O_4) และทำปฏิกิริยากับเฟสสปีเนล ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) เกิดเฟสแซฟไฟริน (sapphirine; $4\text{MgO}\cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) ที่อุณหภูมิ 944 องศาเซลเซียส แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 1266 องศาเซลเซียส เฟสสปีเนลและแซฟไฟรินจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ขึ้น แสดงดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



2.2.2 มุลไลต์ (mullite)

มุลไลต์มีสูตรทางเคมีคือ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ โดยมี Al_2O_3 ร้อยละ 72 และ SiO_2 ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก มุลไลต์ส่วนใหญ่ได้มาจากการสังเคราะห์จากวัตถุดิบที่ประกอบด้วยอะลูมินาและซิลิกาเป็นหลัก ได้แก่ ดินขาว ดินดำ อะลูมินา ททราย แกลบ ไตอะตอมไมต์ และซิลิกาเจล สมบัติที่สำคัญของมุลไลต์ได้แก่ มีจุดหลอมตัวสูงประมาณ 1870 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงเชิงกลสูง มีความทนทานต่อสารเคมีสูง มีความเสถียรทางความร้อน มีค่าการนำความร้อนต่ำ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนปานกลางประมาณ 4.5×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.2 นิยมนำมุลไลต์มาใช้ในการผลิตพอร์ซเลน คอนกรีตทนไฟ ซีเมนต์ แก้ว หลอดเทอร์โมคัปเปิล และฐานรองโซลาร์เซลล์ เป็นต้น^[5]

2.2.3 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตคอร์เตียไรต์-มุลไลต์

- ดินขาวเผา (calcined kaolin)

ดินขาวเผาทำมาจากดินขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง นำมาทำการบดและคัดขนาด มีองค์ประกอบของออกไซด์โดยประมาณคือ Al_2O_3 ร้อยละ 42, SiO_2 ร้อยละ 54.5, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ น้อยกว่าร้อยละ 2 และ Fe_2O_3 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สำหรับเฟสในเนื้อของดินขาวเผาประกอบด้วยมุลไลต์ ร้อยละ 55 และซิลิกาที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous silica) ร้อยละ 45 มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน 4.5×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.7 ค่าความทนไฟอยู่ที่ PCE 34 ถึง 35 (ประมาณ 1750 ถึง 1770 องศาเซลเซียส) โดยจุดประสงค์ในการเติมดินขาวเผาเพื่อให้เกิดเฟสมุลไลต์ขึ้นภายในเนื้อของวัสดุทนไฟ ช่วยทำให้วัสดุทนไฟมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ทนทานต่อการเกิดคืบ (creep) และช่วยลดการหดตัวของชิ้นงานหลังอบและหลังเผา

- อะลูมินา (alumina)

อะลูมินา หรือ อะลูมิเนียมออกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 อะลูมินาในธรรมชาติเป็นแร่ที่พบอยู่ในรูปของเฟสคอร์รันดัม (corundum; Al_2O_3) ไตอะสปอร์ (diaspore; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) กีบไซต์ (gibbsite; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และบ็อกไซต์ (bauxite; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) อะลูมินาบริสุทธิ์สามารถสกัดได้จากแร่บ็อกไซต์ โดยอะลูมินาที่ได้จะพบอยู่ในรูปอัลฟา (α) แกมมา (γ) และเบต้า (β) โดยส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในรูปของอัลฟาและแกมมา ซึ่งอะลูมินาในรูปของอัลฟาจะมีความเสถียรมากที่สุด อะลูมินามีสมบัติเด่นคือ มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 2030 องศาเซลเซียส ความแข็ง (Mohs scale) เท่ากับ 9 มีความหนาแน่นสูง ความถ่วงจำเพาะ 3.4 ถึง 4.0 มีความต้านทานต่อการขีดสีและสึกกร่อนสูง มีความทนทานต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดีและมีความทนไฟสูง จึงสามารถนำอะลูมินามาใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น เครื่องขัดถู (abrasive) วัสดุทนไฟ และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น^[6]

- ซิลิกา (silica)

ซิลิกา หรือ ซิลิคอนไดออกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ SiO_2 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.2 ถึง 2.6 จุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1713 องศาเซลเซียส ซิลิกามีลักษณะเป็นผลึกใสไม่มีสีหรือมีสีขาว มักพบมากในดินและหิน ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิห้อง และไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิดแต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ โดยรูปแบบของซิลิกาประกอบด้วย 2 รูปแบบ ได้แก่

- ซิลิกาที่มีโครงสร้างผลึก (crystalline silica) พบในรูปของสินแร่ โครงสร้างมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่อง มีรูปร่างเป็นระบบผลึกที่แน่นอนภายใต้ความดันปกติ มี 3 รูปแบบ ได้แก่ ควอตซ์ (quartz) เป็นรูปแบบที่พบมากที่สุด มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียส ไทรดิมิท (tridymite) มีความเสถียรที่อุณหภูมิ 870 ถึง 1470 องศาเซลเซียส และ คริสโตบาไลต์ (cristobalite) มีความเสถียรที่อุณหภูมิ 1470 องศาเซลเซียส โดยซิลิกาทั้ง 3 รูปแบบนี้ สามารถเปลี่ยนรูปแบบไปมาได้โดยการให้ความร้อนหรือลดอุณหภูมิ ทำให้เกิดการจัดเรียงอะตอมหรือพันธะเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้าง
- ซิลิกาที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous silica) อะตอมภายในโครงสร้างจัดเรียงไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างไม่แน่นอน มีพันธะหลายรูปแบบ สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามลักษณะผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ ได้แก่ ซิลิกาแก้ว (silica glass) ได้จากการหลอมซิลิกาอสัณฐานแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว มักไม่มีรูพรุน ซิลิกาเจล (silica gel) มีโครงสร้างรูพรุนแบบเปิด และซิลิกาฟุ้ง (silica fume) เตรียมได้จากสภาวะกลายเป็นไอและการตกตะกอนของสารละลายที่มีลักษณะการฟุ้งกระจายของอนุภาคสูง เมื่อตกตะกอนจะได้ซิลิกาที่มีขนาดเล็กมากและมีพื้นที่ผิวสูง

ซิลิกาถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ใช้เป็นองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นสารเติมแต่ง เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยว สารเพิ่มความหนืด สารดูดซับความชื้น สารเพิ่มความเงา เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง และใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในวัสดุเป็นต้น^[7]

- แมกนีเซียม (magnesia)

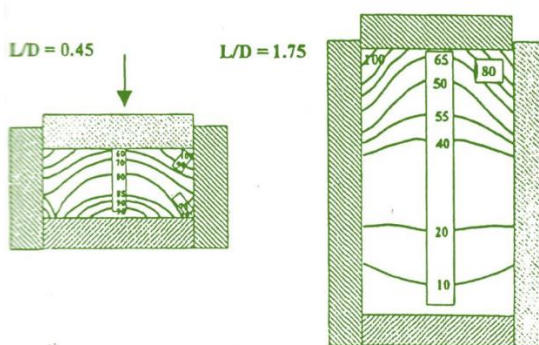
แมกนีเซียม หรือ แมกนีเซียมออกไซด์ มีสูตรทางเคมีคือ MgO เป็นแร่สีขาวหรือไม่มีสี โดยผลิตได้จากการเผาแร่ที่มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งในธรรมชาติมักพบในรูปของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2) และแมกนีไซต์ (MgCO_3) เป็นส่วนมาก แมกนีเซียมเป็นวัตถุดิบหลักสำหรับผลิตอิฐทนไฟที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตที่มีสภาวะเป็นด่างเช่น เตาปูนซีเมนต์ เตาเผาปูนไหม้ และเตาหลอมเหล็ก เป็นต้น เนื่องจากเป็นสารที่มีความคงตัวได้ดีที่ความร้อนสูง

มีจุดหลอมเหลวสูงถึง 2852 องศาเซลเซียส โดยแมกนีเซียมที่ใช้ทั่วไปสามารถแบ่งประเภทจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแมกนีเซียมได้ 3 ประเภท ได้แก่ แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง (dead burned magnesia) คือ แมกนีเซียมที่ถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิสูง 1500 ถึง 2000 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่ำ มักใช้ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟเป็นส่วนใหญ่ นิยมใช้ทำอิฐทนไฟ และผนังเตาเผา เนื่องจากมีจุดหลอมตัวสูง แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิมกกลาง (hard burned magnesia) คือ แมกนีเซียมที่ถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิ 1000 ถึง 1500 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาค่อนข้างต่ำ ใช้ในอุตสาหกรรมประเภทวัสดุขัดถูและสิ่งก่อสร้างเป็นหลัก และแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ (light burned magnesia) คือ แมกนีเซียมที่ถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาสูง นิยมใช้ในอุตสาหกรรม การเกษตร กระดาษ และเภสัชกรรมเป็นส่วนใหญ่^[8]

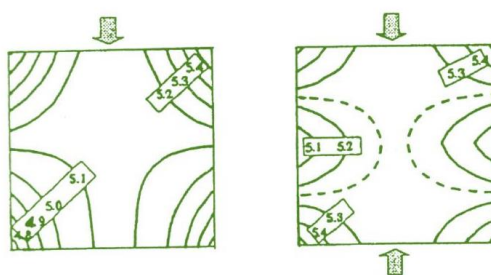
2.3 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟ

2.3.1 การขึ้นรูปด้วยการอัดแบบแห้ง (dry pressing)

วัสดุทนไฟคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ส่วนใหญ่มักขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบแห้ง โดยกระบวนการขึ้นรูปด้วยการอัดนิยมใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยวิธีนี้จะเตรียมส่วนผสมให้อยู่ในรูปผงเม็ดแกรนูลทรงกลม ทำให้มีสมบัติการไหลตัวดี จากนั้นเทใส่ลงในแม่แบบซึ่งนิยมทำจากโลหะแล้วอัดขึ้นรูปด้วยความดันสูง เมื่อชิ้นงานแข็งตัวจึงแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบโลหะ การขึ้นรูปด้วยการอัดมี 2 แบบ คือ การอัดแบบทิศทางเดียว (uniaxial pressing) และการอัดแบบสองทิศทาง (biaxial pressing) สำหรับการอัดขึ้นรูปแบบแห้งจะใช้ปริมาณน้ำในการขึ้นรูปน้อยที่สุด โดยความชื้นภายในผงวัตถุดิบส่วนผสมจะต่ำกว่า 4% ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งมีการหดตัวน้อยกว่าวิธีการขึ้นรูปแบบอื่น ๆ แต่ข้อเสียสำหรับวิธีนี้คือ ขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้จะถูกจำกัดกว่าวิธีอื่น ๆ เนื่องจากหากชิ้นงานมีขนาดใหญ่มากเกินไปหรือชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อน เมื่อทำการอัดผงวัตถุดิบอาจเกิดการกระจายไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ความหนาแน่นในแต่ละตำแหน่งของชิ้นงานไม่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ซึ่งเมื่อนำชิ้นงานไปอบแห้งและเผาที่อุณหภูมิสูงอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน และชิ้นงานอาจเกิดการแตกหักได้



รูปที่ 2.1 ผลของขนาดแม่พิมพ์ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานแบบอัดทิศทางเดียว^[9]



รูปที่ 2.2 ผลของขนาดแม่พิมพ์ต่อความหนาแน่นของชิ้นงานแบบอัดสองทิศทาง^[9]

โดยปัจจัยที่มีผลในการขึ้นรูปด้วยการอัด ได้แก่

- ความชื้นของผงวัสดุบด หากผงวัสดุบดมีความชื้นสูงเกินไปจะทำให้ผงวัสดุบดติดบนหน้าแม่แบบ แต่ถ้าผงวัสดุบดมีความชื้นต่ำเกินไปจะเกิดปัญหาหุ้มของชิ้นงานยุ่ยและบิ่นง่าย ทำให้เกิดการหลุดลอก (lamination) ได้ง่าย
- การกระจายขนาดอนุภาค ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคหลังขึ้นรูป ถ้าการกระจายตัวของผงวัสดุบดไม่เหมาะสมจะทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานหลังขึ้นรูปเปลี่ยนแปลงไปมาก ส่งผลต่อการหดตัวของชิ้นงานหลังอบและหลังเผา
- ความดันที่ใช้ในการอัด ถ้าใช้ความดันสูงจะส่งผลให้ชิ้นงานหลังขึ้นรูปมีความหนาแน่นสูง การหดตัวหลังเผาจะมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้ความดันต่ำจะส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าต่ำลง
- อัตราความเร็วของหัวกด ส่งผลต่อความหนาแน่นในช่วงหัวถึงท้ายของชิ้นงานในขณะทำการอัดขึ้นรูป
- จำนวนรอบในการอัด ส่งผลต่อความหนาแน่นและตำหนิต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในชิ้นงานรวมทั้งปริมาณการผลิตในแต่ละรอบ

- การออกแบบแม่แบบ มีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่ง ถ้าแม่แบบไม่มีความสมมาตรจะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน ส่งผลให้มีการหดตัวไม่เท่ากัน ชิ้นงานอาจเกิดการแตกร้าวได้ในขณะอบแห้ง

ดังนั้นแม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปจะต้องมีรูปร่างไม่ซับซ้อน เพราะจะส่งผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งขณะทำการอัด นอกจากนี้ต้นทุนในการผลิตแม่แบบแต่ละรูปร่างค่อนข้างสูง เนื่องจากแม่แบบส่วนใหญ่ทำจากโลหะ บางครั้งทำจากคาร์ไบด์ ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงในการผลิตแม่แบบ การขึ้นรูปด้วยการอัดจึงเหมาะกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ขนาดไม่ใหญ่ และมีความต้องการในการผลิตจำนวนมาก^[9, 10]

2.3.2 การขึ้นรูปด้วยการหล่อ

การขึ้นรูปด้วยการหล่อเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่เตรียมส่วนผสมให้อยู่ในสภาพที่สามารถไหลตัวได้ โดยส่วนผสมจะถูกเทลงในแม่แบบที่มีรูปร่างที่ต้องการ จากนั้นส่วนผสมจะเกิดการแข็งตัวและสามารถแกะออกจากแม่แบบได้ ข้อดีของการขึ้นรูปด้วยการหล่อคือ สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายขนาดและรูปทรง ทำให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ซึ่งถ้าทำโดยวิธีการอื่นอาจทำได้ยากหรือมีราคาแพง นอกจากนี้ต้นทุนในการผลิตแม่แบบถูกกว่าการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด การหล่อขึ้นรูปในกระบวนการทางเซรามิกมี 2 ลักษณะ ได้แก่ การหล่อโดยมีการเทส่วนผสมที่เหลือทิ้ง (drain casting) นิยมหล่อชิ้นงานแบบกลวงในแม่แบบปูนปลาสเตอร์ เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผนังบางและต้องการความหนาสม่ำเสมอ เช่น สุขภัณฑ์ และถ้วยชาม การหล่อโดยให้ส่วนผสมแข็งตัวอยู่ภายในแม่แบบ (solid casting) เหมาะกับการหล่อแบบผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาและตัน เช่น คอนกรีต มักจะมีการเติมตัวเชื่อมประสานลงไปเพื่อให้ส่วนผสมสามารถเกิดการแข็งตัวได้ในแม่แบบที่อุณหภูมิห้อง^[11, 12]

2.3.3 ตัวเชื่อมประสาน

โดยทั่วไปแล้วตัวเชื่อมประสานที่นิยมใช้ในวัสดุทนไฟคือ แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ และโซเดียมซิลิเกต แต่ตัวเชื่อมประสานสองชนิดนี้มีข้อเสียคือ แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ซึ่งมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ และโซเดียมซิลิเกตซึ่งมีโซเดียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งทั้งแคลเซียมและโซเดียมทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัว ทำให้เมื่อนำวัสดุทนไฟไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงความแข็งแรงจะลดลงไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นซีเมนต์ที่มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างคอร์เตียไรต์กับมุลไลต์ โดยซีเมนต์

ฐานแมกนีเซียมมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น แมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์ เป็นต้น^[13]

2.3.3.1 แมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์

แมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์ คือ ซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยากรด-เบสจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมกับกรดฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ มักนิยมใช้เป็นแอมโมเนียมฟอสเฟตและโพแทสเซียมฟอสเฟต ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือแมกนีเซียมฟอสเฟตหรือสารประกอบแมกนีเซียมฟอสเฟตที่มีสมบัติคล้ายซีเมนต์ สามารถเกิดการแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง ดังสมการที่ 2.5



แมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์สามารถเตรียมได้จากการนำแมกนีเซียมผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกหรือเกลือฟอสเฟต โดยการใช้แมกนีเซียมผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจะช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เกิดรวดเร็วจนเกินไป เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นนี้มักเกิดอย่างรุนแรงและรวดเร็ว มีการคายความร้อนออกมาอย่างมาก^[13] B. E. I. Abdelrazig และคณะ^[14] ศึกษาเฟสของแมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจากการนำแมกนีเซียมมาทำปฏิกิริยากับโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต ผลการศึกษาพบเฟสสตรูไวต์ (struvite; $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เกิดขึ้นเป็นเฟสหลัก เฟสเชอเตไลต์ (schertelite; $(\text{NH}_4)_2\text{MgH}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) และเฟสดิทมาร์ไรต์ (dittmarite; $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เป็นเฟสรอง การเกิดเฟสต่าง ๆ เหล่านี้สัมพันธ์กับอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อฟอสเฟตและปริมาณน้ำที่ใช้ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของซีเมนต์

จุดเด่นของแมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์คือ แข็งตัวเร็ว สามารถแข็งตัวได้ภายใน 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จึงนิยมนำไปใช้งานในด้านโครงสร้าง วัสดุทนไฟ ทันดรัม และใช้ในการซ่อมถนนทางเดิน และสะพานคอนกรีต แต่แมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ในด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ เนื่องจากซีเมนต์จะมีการปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกมาขณะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากงานวิจัยของ N. E. Hipedinger และคณะ^[15] ได้ศึกษาการนำแมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์มาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟคอร์เตียไรต์ พบว่าสามารถเตรียมคอนกรีตทนไฟคอร์เตียไรต์-มูลสัตว์ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบการขยายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเกิดการหดตัวอย่างมาก เนื่องมาจากฟอสเฟตซึ่งเป็นองค์ประกอบในแมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัว ส่งผลให้ความทนไฟของวัสดุลดลง

ดังนั้นคอนกรีตทนไฟที่ใช้แมกนีเซียมฟอสเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานเหมาะกับการนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1250 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้จึงเลือกซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมชนิดอื่นมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ โดยที่ตัวเชื่อมประสานเหล่านี้ไม่มีองค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัว ได้แก่ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์

2.3.3.2 แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์

แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ คือ ซีเมนต์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมกับซิลิกา สามารถเตรียมได้จากการนำแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำมาทำปฏิกิริยากับแหล่งซิลิกา มักนิยมใช้เป็นซิลิกาฟุ่ม โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีโครงสร้างคล้ายกับแร่ในกลุ่มทัลค์ (talc; $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$) หรือเซอร์เพนทีน (serpentine; $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$) ซึ่งเป็นแร่ที่มีความเป็นผลึกต่ำ มีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาโครงสร้างและธรรมชาติของระบบแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ โดยแร่ที่เกี่ยวข้องกับระบบแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 2.1^[13]

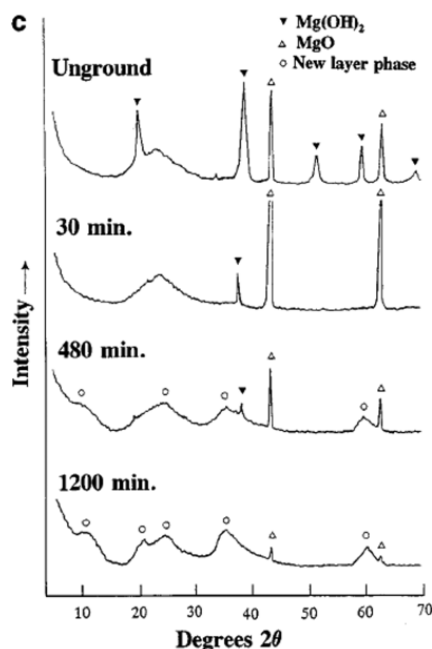
ตารางที่ 2.1 แร่ที่เกี่ยวข้องกับระบบแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์

แร่	กลุ่ม	สูตรทางเคมี
lizardite	serpentine	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$
antigorite	serpentine	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$
chrysotile	serpentine	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$
sepiolite	phyllosilicate	$Mg_4(Si_6O_{15})(OH)_2 \cdot 6H_2O$
saponite	phyllosilicate	$Ca_{0.25}(Mg,Fe)_3((Si,Al)_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$
talc	phyllosilicate	$Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$

แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์นิยมนำมาใช้ในการกำจัดของเสียนิวเคลียร์และคอนกรีตทนไฟ^[16] เนื่องจากมีข้อดีคือ มีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีความเสถียรทางความร้อน^[17] J. Szczerba และคณะ^[18] กล่าวว่า แมกนีเซียมและฟอร์สเตอร์ไรต์ (forsterite; Mg_2SiO_4) มีจุดหลอมเหลวสูงมาก ซึ่งทั้งสองเฟสนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในคอนกรีตทนไฟ นอกจากนี้ B. Sandberg และคณะ^[19] ได้ศึกษาการนำแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์มาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในวัสดุทนไฟ

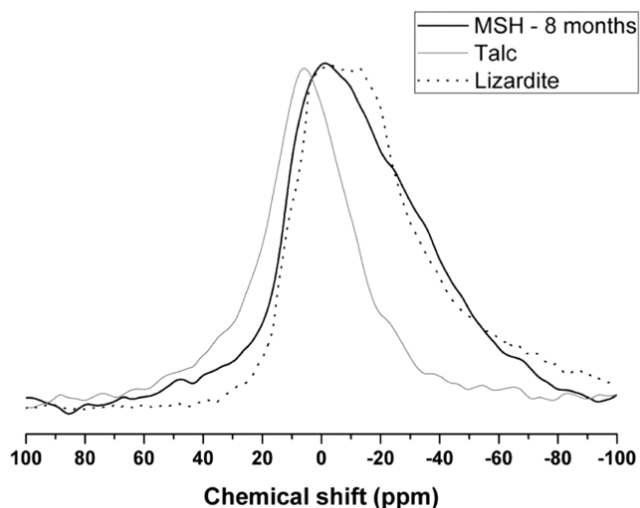
แทนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (portland cement) โดยเตรียมจากการนำแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงมาผสมกับไมโครซิลิกาและพ่นลงบนพื้นผิวชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1500 องศาเซลเซียส และมีความต้านทานแรงอัด (compressive strength) สูงถึง 130 MPa เมื่อบ่มไว้เป็นเวลา 28 วัน แสดงให้เห็นว่าแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ซีเมนต์มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง แต่ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาที่อธิบายเกี่ยวกับการนำแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ซีเมนต์ไปใช้งานในเชิงพาณิชย์ และมีงานวิจัยเพียงเล็กน้อยที่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์นอกเหนือจากความต้านทานแรงอัดและความทนทานในระยะยาว เนื่องจากแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์แข็งตัวช้าที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งอาจถูกจำกัดในการนำไปใช้งานด้านการก่อสร้าง^[13] สอดคล้องกับงานวิจัยของ T. H และคณะ^[20] พบว่าคอนกรีตที่ใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานมีความต้านทานแรงอัดต่ำกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และพัฒนาความแข็งแรงช้า เนื่องจากกระบวนการไฮดรอกไซด์เกิดได้ช้า

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมต่อซิลิคอนมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่เตรียมได้ ในปี 1954 G. L. Kalousek และคณะ^[21] ศึกษาเฟสของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ โดยใช้แมกนีเซียมผสมกับกรดซิลิก (silicic acid; H_4SiO_4) ด้วยอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อซิลิคอน (Mg/Si) เท่ากับ 0.5 ถึง 2.0 ที่อุณหภูมิ 75 ถึง 350 องศาเซลเซียส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาประกอบด้วยทัลค์ และโครโซไทล์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ J. Temuujin และคณะ^[22] ศึกษาการเกิดแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมีเชิงกล (mechanochemical process) ผสมแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียม และกรดซิลิกในหม้อบดพลังงานสูง ผลการทดลองพบว่าเมื่อบดที่เวลานานขึ้นจะเกิดเป็นส่วนผสมของทัลค์และโครโซไทล์ที่มีความเป็นผลึกต่ำ แสดงดังรูปที่ 2.3 C. Roosz และคณะ^[23] สังเคราะห์แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่มีอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อซิลิคอนในช่วง 0.57 ถึง 1.07 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเจลมีโครงสร้างคล้ายกับแร่ในกลุ่มฟิลาโลซิลิเกต



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบทางเฟสของส่วนผสมของแมกนีเซียมกับกรดซิลิสิกที่ถูกบดเวลาต่าง ๆ^[22]

D. R. M. Brew และคณะ^[24] สังเคราะห์เจลแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ตกตะกอนจากการผสมกันระหว่างแมกนีเซียมไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และโซเดียมเมตาซิลิเกตเพนตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) บ่มเจลที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน เมื่อวิเคราะห์ ^{29}Si ด้วย NMR พบว่าเจลเหล่านี้มีโครงสร้างแตกต่างกันเล็กน้อยตามอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อซิลิคอน เจลที่มีปริมาณแมกนีเซียมมาก (อัตราส่วนแมกนีเซียมต่อซิลิคอนเท่ากับ 0.89 และ 0.94) จะมีการพัฒนารูปแบบโครงสร้างเฟสตามระยะเวลาการบ่มมากกว่าเจลที่มีปริมาณแมกนีเซียมต่ำ โดยตำแหน่งพีค Q^3 ใน ^{29}Si MAS NMR เกิดการเลื่อนตำแหน่งไปของเจลที่มีอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อซิลิคอนสูง บ่งบอกว่าเมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมมากขึ้น จะเกิดโครงสร้างคล้ายเซอร์เพนไทน์ ในขณะที่ถ้ามีปริมาณแมกนีเซียมน้อยลงจะเกิดโครงสร้างคล้ายทัลค์ แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยแรกรุ่นเซอร์เพนไทน์ เป็นกลุ่มแร่ที่มีปริมาณแมกนีเซียมมากซึ่งจะประกอบไปด้วยแร่ 3 ชนิด ได้แก่ แอนติโกไรต์ ไครโซไทล์ และลิซาร์ดไคต์ ซึ่งโครงสร้างของแร่ 3 ชนิดนี้มีความคล้ายคลึงกันมาก จึงมีความเป็นไปได้ยากที่จะแยกชนิดของเฟสแร่ที่มีความเป็นผลึกต่ำเหล่านี้ได้

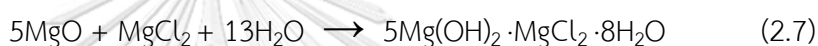


รูปที่ 2.4 สเปกตรัม ^{25}Mg MAS NMR ของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่บ่มไว้เป็นเวลา 8 เดือน ทัลค์ และลิซาร์ดไตต์^[24]

จากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้นในแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อซิลิกอนเป็นหลัก H.M. Tran และคณะ^[25] ได้ศึกษาหาอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อซิลิกอนที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตในซีเมนต์ โดยส่วนผสมเตรียมจากแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและซิลิกาฟุ่ม มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลในช่วง 1 ถึง 2.25 ผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกอนมีผลต่อสัดส่วนของเจลแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฮเดรชัน เมื่อทดสอบความต้านแรงอัดพบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อซิลิกอนมากขึ้น ปริมาณซิลิกาฟุ่มน้อยลง ความต้านแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 2.25 มีความต้านแรงอัดสูงถึง 42.8 MPa หลังจากบ่มเป็นเวลา 28 วัน และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกอนน้อยลง ปริมาณซิลิกาฟุ่มมากขึ้น ซิลิกาฟุ่มทำให้ความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของอนุภาคต่ำลงส่งผลให้ความต้านแรงอัดลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ T. Zhang และคณะ^[26] กล่าวว่าผลผลิตหลักของกระบวนการไฮเดรชันระหว่างแมกนีเซียกับซิลิกาฟุ่มคือ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และเจลแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต โดยเริ่มจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแมกนีเซียกับน้ำเกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์และเมื่อเวลาผ่านไปแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาฟุ่มและเปลี่ยนเป็นเจลแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตเป็นเฟสหลักทั้งหมด ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยให้เกิดความแข็งแรงของตัวเชื่อมประสาน^[27] โดยสรุปว่าอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกอนเท่ากับ 2.25 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการรับแรงอัดของแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์

2.3.3.3 แมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์

แมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์ คือ ซีเมนต์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมกับแมกนีเซียมคลอไรด์โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย สามารถเตรียมได้จากการนำแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำมาทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเฟส $x\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot y\text{MgCl}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ และสามารถเกิดการแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยเฟส $x\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot y\text{MgCl}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ สามารถเกิดได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารตั้งต้น อุณหภูมิ และความสามารถในการทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียม โดยเฟสที่มักพบบ่อยได้แก่ เฟส 3 และ เฟส 5 ดังสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ โดยชื่อเฟส 3 และเฟส 5 ได้มาจากอัตราส่วนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ (x/y) ในแต่ละเฟส



โดยเฟสที่สามารถพบได้ในแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 2.2^[13]

ตารางที่ 2.2 เฟสที่พบได้ในแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์^[13]

เฟส	องค์ประกอบ
3-1-8	$3\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ หรือ $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
5-1-8	$5\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ หรือ $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
2-1-2	$2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
2-1-4	$2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
9-1-4	$9\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

แมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์ถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1867 โดย S. Sorel จึงนิยมเรียกแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์อีกชื่อว่า ซอเรลซีเมนต์ (sorel cement) ข้อดีของแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์ได้แก่ มีความแข็งแรงสูง สามารถเกิดการแข็งตัวได้อย่างรวดเร็ว นำความร้อนต่ำ จึงเป็นฉนวนความร้อนที่ดี มีความทนไฟสูง มีความหนาแน่นต่ำ นิยมนำไปใช้เป็นวัสดุโครงสร้าง วัสดุฉนวนความร้อน วัสดุชีวภาพ และบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้แมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์ยังมีราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแมกนีเซียมต่ำกว่าในการผลิตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ อย่างไรก็ตามแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์มีข้อเสียคือ มีความทนทานต่อน้ำ (water resistance) ต่ำ เนื่องจากมีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งถือเป็นปัญหาหลักของแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์^[28]

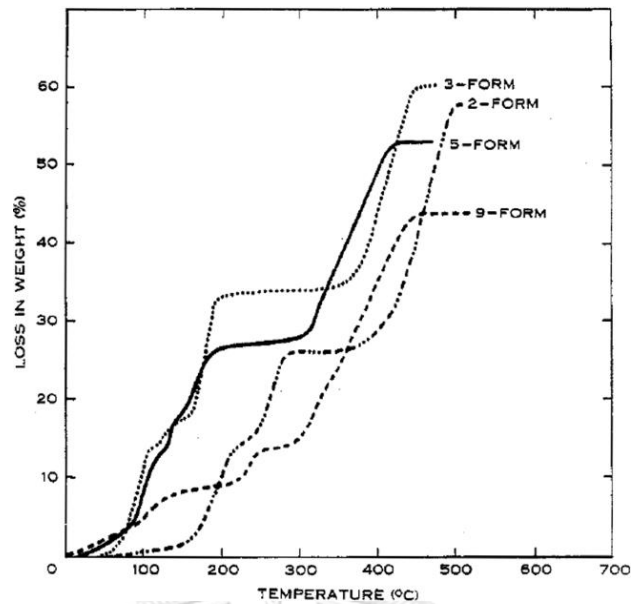
การศึกษาองค์ประกอบทางเฟสของเฟสเชื่อมประสานในแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เริ่มต้นในปี 1871 โดย C. Bender^[29] กล่าวว่าเฟสเชื่อมประสานที่เกิดขึ้นคือ เฟส $5\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 17\text{H}_2\text{O}$ และเมื่อแห้งจะกลายเป็น $5\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ในขณะที่ W. O. Robinson^[30] กล่าวว่าเฟส $3\text{MgO}\cdot\text{MgCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ เป็นเฟสที่เสถียรในระบบ $\text{MgO-HCl-H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อมีปริมาณแมกนีเซียมในระบบมากเกินไป เช่นเดียวกับงานวิจัยของ H. S. Lukens^[31] กล่าวว่าเฟส 3 เป็นเฟสเชื่อมประสานหลักในแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ แต่ระบุเป็นเฟส $3\text{Mg}(\text{OH})_2\cdot\text{MgCl}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ อย่างไรก็ตามเฟส 3 นี้ไม่ใช่เฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เพียงเฟสเดียวเท่านั้น พบว่ามีเฟส 3-1-10 และ 5-1-7 เกิดขึ้น จึงยืนยันว่ามีการเกิดเฟส 5 เกิดขึ้นร่วมด้วย L. B. Walter-Levy^[32] กล่าวว่าเฟส 5 ขึ้นเป็นส่วนใหญ่เมื่อสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์มีความเข้มข้นมากกว่า 1.5 โมลาร์ ซึ่งการมีปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์มากเกินไปในสารละลายจะทำให้เฟส 5 เปลี่ยนไปเป็นเฟส 3 อย่างช้า ๆ ในขณะที่ถ้าใช้สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 1.5 โมลาร์จะเกิดเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์แทน นอกจากนี้ยังพบว่ามีเฟสใหม่ 2 เฟสปรากฏขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสคือ เฟส 2-1-4 และ 9-1-4 ซึ่งเฟส 2-1-4 ไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้องและจะเปลี่ยนกลับไปเป็นเฟส 3-1-8 R. E. Dinneber และคณะ^[33] ได้ทำการศึกษาเฟสที่อุณหภูมิ 50 ถึง 175 องศาเซลเซียส พบว่ามีเฟส 2-1-2 และ 3-1-1 เกิดขึ้น และตั้งสมมติฐานว่าจะเกิดเฟส 9-1-4 ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงในระดับปานกลางที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในกระบวนการไฮเดรชันของแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ และในที่สุดจะเปลี่ยนไปเป็นเฟส 3 เช่นเดียวกับเฟส 5 ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำก่อนที่จะเปลี่ยนไปเป็นเฟส 3 ที่มีความเสถียรมากกว่า ในปี 1955 W. F. Cole และคณะ^[34] ได้ศึกษาความเสถียรทางความร้อนของแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ในแต่ละเฟส โดยใช้เทคนิค TG/DTA แสดงดังรูปที่ 2.5 พบว่าความร้อนทำให้เฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เกิดการคายน้ำเป็นขั้นตอน ส่งผลให้แต่ละเฟสเกิดรูปแบบไฮเดรตที่มีความเสถียรหลากหลายรูปแบบ ดังนี้

เฟส 2: $4\text{H}_2\text{O}$, $2\text{H}_2\text{O}$ และ H_2O

เฟส 3: $8\text{H}_2\text{O}$, $5\text{H}_2\text{O}$, $4\text{H}_2\text{O}$ และ H_2O

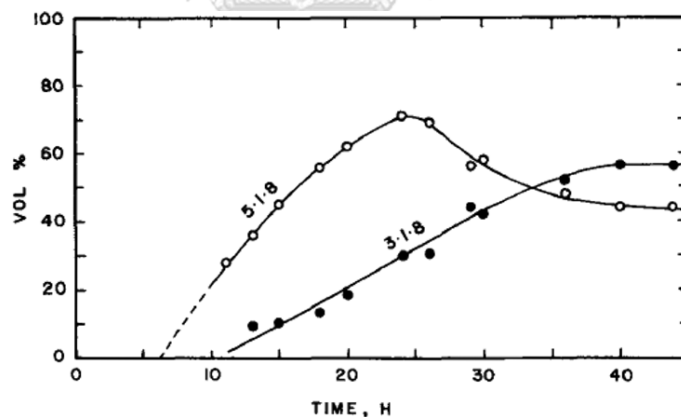
เฟส 5: $8\text{H}_2\text{O}$, 5 หรือ $4\text{H}_2\text{O}$, $3\text{H}_2\text{O}$ และ H_2O

เฟส 9: $5\text{H}_2\text{O}$, $2\text{H}_2\text{O}$ และ H_2O



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเฟส 2, 3, 5 และ 9 จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส^[34]

L. Urwongse และคณะ^[35] ได้ศึกษาความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมในสารละลายไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส พบว่าเฟส 5-1-8 มีแนวโน้มที่จะเกิดได้รวดเร็วกว่าเฟส 3-1-8 แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปริมาณของเฟส 5-1-8 และ 3-1-8 ณ เวลาต่าง ๆ^[35]

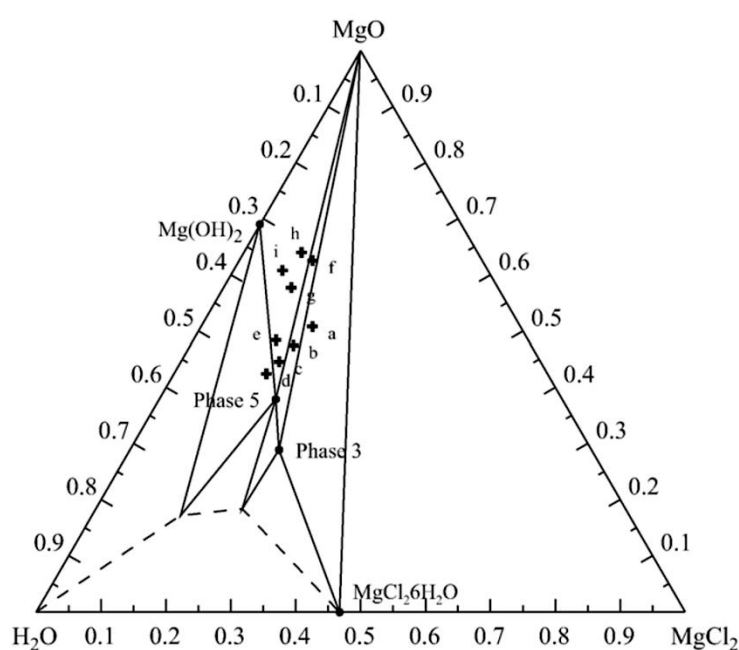
นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างหลังการเกิดปฏิกิริยาเพียงไม่กี่วัน พบว่าเฟส 5-1-8 มีความเสถียรในช่วงที่กว้างมากกว่าเฟส 3-1-8 ภายใต้สภาวะต่าง ๆ จึงกล่าวได้ว่าการแข็งตัวของซีเมนต์ในช่วงต้นเกิดจากเฟส 3-1-8 หรือเฟส 5-1-8

การปรับปรุงความทนทานหรือความแข็งแรงของซีเมนต์ชนิดนี้ โดยทั่วไปทำได้โดยให้เฟส 5-1-8 เกิดอย่างรวดเร็วให้มากที่สุด ซึ่งเชื่อว่าผลลึกรูปเข็มที่ประสานกันไปมาของเฟส 5-1-8 นี้จะเป็น

แหล่งให้ความแข็งแรงของซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม B. Matkovic และคณะ^[36] กล่าวว่าผลึกรูปเข็มที่ประสานกันนั้นไม่ใช่แหล่งของความแข็งแรงเป็นหลัก แต่เป็นการที่เข็มผลึกนี้ไปเกิดในรูพรุนทำให้โครงสร้างจุลภาคของแมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์มีความหนาแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ซีเมนต์มีความแข็งแรงสูงขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเฟสที่เกิดขึ้นมีผลต่อสมบัติของซีเมนต์ ซึ่งการเกิดเฟสต่าง ๆ เหล่านี้เป็นผลมาจากอัตราส่วนของสารตั้งต้นเป็นหลัก จากการศึกษาของ K. Li และคณะ^[28] พบว่าเฟสหลักในแมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์ประกอบด้วย แมกนีเซียม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และเฟสไฮเดรตซีเมนต์ ได้แก่ เฟส 3-1-8 และ 5-1-8 โดยเฟส 3-1-8 จะพบในซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่ำ ปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์มาก ในขณะที่เฟส 5-1-8 จะพบในซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตสูง ปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์น้อย โดยเฟส 5-1-8 เป็นเฟสหลักที่ให้ความแข็งแรงในซีเมนต์เนื่องจากในกระบวนการไฮเดรชัน เฟส 5-1-8 ซึ่งมีรูปร่างผลึกคล้ายแท่งเข็มจะขยายตัวไปในช่องว่างและเชื่อมประสานกันไปมาทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้น H. A. Abdel-Gawwad และคณะ^[37] ได้ทำการเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์จากแมกนีเซียมและแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตในช่วง 9 ถึง 19 ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลมีผลต่อสมบัติของแมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นอย่างมาก โดยส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 14 มีความต้านแรงอัดสูงสุดตลอดระยะเวลาการบ่ม เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเฟสพบว่าความเข้มข้นของเฟส 5-1-8 สูงมากในขณะที่ความเข้มข้นของเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ต่ำ ซึ่งเฟส 5-1-8 มีรูปร่างผลึกเป็นรูปเข็มจะช่วยในเรื่องของความต้านแรงอัด ในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 19 ความต้านแรงอัดมีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์ไม่เพียงพอต่อการเกิดเฟสไฮเดรตซีเมนต์ จึงสรุปว่าส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 14 เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูง ในขณะที่ Z.G. Li และคณะ^[38] ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ส่งผลต่อสมบัติของแมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เช่นกัน โดยศึกษาอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตในช่วง 7 ถึง 19 ซึ่งมากกว่าอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 5 ตามค่าทางทฤษฎีในการเกิดเฟส 5 เนื่องจากแมกนีเซียมไม่ได้ถูกทำปฏิกิริยาทั้งหมด จึงต้องใส่ปริมาณแมกนีเซียมมากกว่าค่าทางทฤษฎี ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตในช่วง 11 ถึง 17 เป็นช่วงที่เฟส 5-1-8 เกิดขึ้นเป็นเฟสหลักในซีเมนต์ โดยสามารถคาดการณ์ผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาได้จากแผนภาพสมดุลเฟส แสดงดังรูปที่ 2.7 เมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อ

แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมากขึ้นความต้านแรงอัดจะมีค่าสูงขึ้น โดยส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 13 มีความต้านแรงอัดสูงสุดตลอดระยะเวลาการบ่มและมีค่าสูงถึง 150 MPa หลังบ่มไว้เป็นเวลา 7 วัน เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเฟสพบว่าความเข้มข้นของเฟส 5-1-8 สูงที่สุดและมีฐานเฟสออสติเนียนต่ำที่สุด สำหรับซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตน้อยกว่า 11 พบเฟส 3-1-8 เป็นเฟสหลัก ในขณะที่ซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมากกว่า 17 จะพบเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเฟสหลัก



รูปที่ 2.7 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบ $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิห้อง (เส้นประแสดงถึงการเกิดเจล)^[38]

2.3.3.4 แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์

แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ คือ ซีเมนต์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมกับแมกนีเซียมซัลเฟต สามารถเตรียมได้จากการนำแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำมาทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเฟส $x\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot y\text{MgSO}_4 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ และสามารถเกิดการแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้อง เฟส $x\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot y\text{MgSO}_4 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ สามารถพบได้หลายรูปแบบ โดยเฟสที่มักพบบ่อยได้แก่ เฟส 3 และเฟส 5 ดังสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



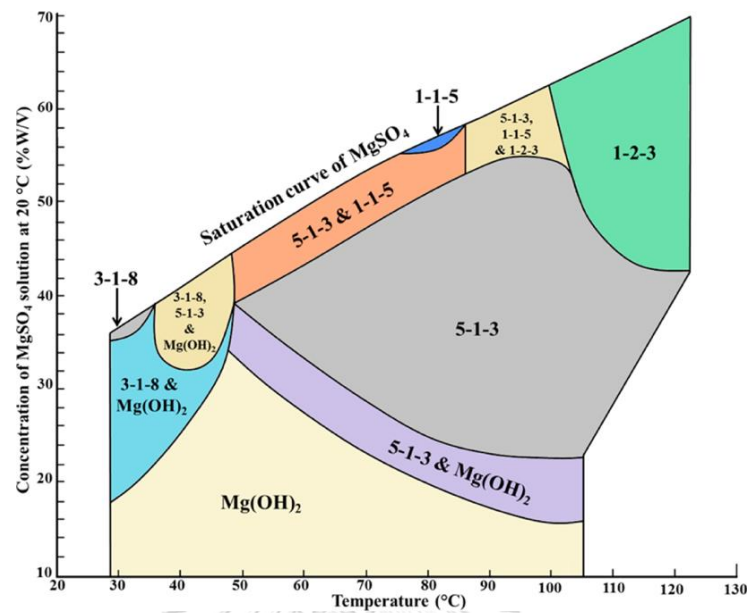
โดยเฟสที่สามารถพบได้ในแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เฟสที่พบได้ในแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์^[13]

เฟส	องค์ประกอบ
3-1-8	$3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
5-1-3 หรือ 5-1-2	$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
1-1-5	$\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
1-2-3	$\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
5-1-7	$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

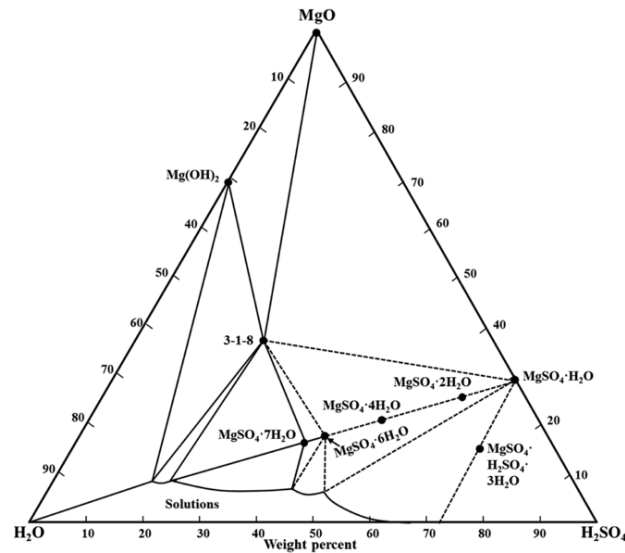
ข้อดีของแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์คือ มีความทนไฟสูง นำความร้อนต่ำ น้ำหนักเบา แข็งตัวเร็ว มักถูกนำไปใช้งานในด้านการเคลือบเป็นสารทนไฟ แผ่นยิปซัมบอร์ด แผ่นฉนวนน้ำหนักเบา และเสริมแรงในคอนกรีต แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์จะคล้ายกับแมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์ แต่ได้รับความสนใจมากกว่า เนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตมีความไวต่อความชื้นน้อยกว่าแมกนีเซียมคลอไรด์ จึงสามารถทนต่อสภาพอากาศได้ดีกว่า และมีสมบัติปกป้องเหล็กได้ดีกว่า เนื่องจากไม่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ แต่ข้อเสียคือ แมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตมีข้อจำกัดในการละลายมากกว่าแมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ที่อุณหภูมิห้อง^[13]

แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เริ่มต้นในปี 1891 โดย Enricht, L.^[39] นำแมกนีเซียมแมกนีเซียมซัลเฟตและน้ำมาผสมกัน เกิดเป็นสารออกซีซัลเฟตของแมกนีเซียม เมื่อแห้งแล้วจะเกิดเป็นซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงมากและไม่ถูกทำลายด้วยสภาพอากาศ T. Demediuk และคณะ^[40] ศึกษาระบบ $\text{MgO}-\text{MgSO}_4-\text{H}_2\text{O}$ โดยวิเคราะห์จากการตกผลึกของสารละลายอิ่มตัวของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งมีการเติมแมกนีเซียมเข้าไปที่อุณหภูมิตั้งแต่ 30 ถึง 120 องศาเซลเซียสและได้ระบุเฟสแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตที่เกิดขึ้นทั้งหมด 4 เฟสได้แก่ เฟส 3-1-8, 5-1-3, 1-1-5 และ 1-2-3 แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยจะเห็นว่าอุณหภูมิส่งผลต่อการเกิดเฟสเหล่านี้เป็นอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการละลายของแมกนีเซียมซัลเฟตจะมีค่ามากขึ้นทำให้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตในสารละลายสูงขึ้น เกิดการตกตะกอนของเฟส 1-1-5 และ 1-2-3 ซึ่งเป็นเฟสที่มีสัดส่วนของแมกนีเซียมซัลเฟตสูงขึ้น



รูปที่ 2.8 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบ MgO-MgSO₄-H₂O^[40]

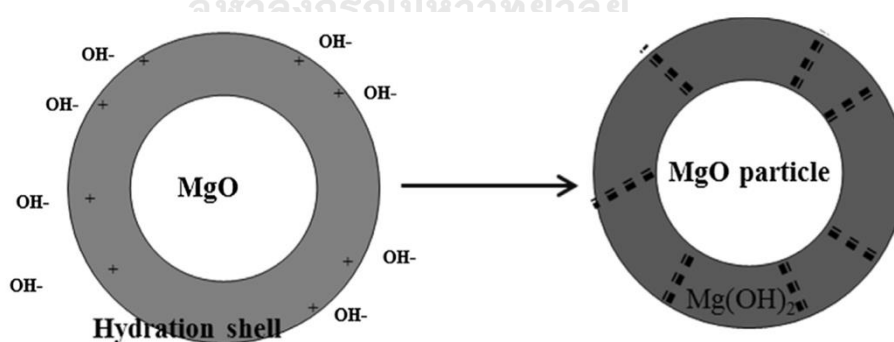
จากแผนภาพสมดุลเฟสจะเห็นได้ว่าเฟส 3-1-8 และเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เสถียรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ส่วนเฟส 5-1-3 จะเสถียรในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 120 องศาเซลเซียส และเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดในกรณีที่แมกนีเซียมซัลเฟตมีความเข้มข้นต่ำ ต่อมา L. Unwongse และคณะ^[41] ได้พัฒนาแผนภาพสมดุลเฟสสำหรับระบบ MgO-H₂SO₄-H₂O ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยมีการใช้กรดซัลฟิวริกแทนแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าเฟส 3-1-8 เกิดขึ้นเป็นเฟสหลัก ได้มีการตั้งสมมติฐานสำหรับซีเมนต์ในเชิงพาณิชย์ว่า เฟส 5-1-3 เป็นเฟสที่ต้องการมากที่สุดในเรื่องของการพัฒนาความแข็งแรง แต่มีการระบุว่าเฟสนี้เป็นเฟสที่เสถียรได้เฉพาะภายใต้สภาวะการบ่มด้วยไอน้ำเท่านั้น



รูปที่ 2.9 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบ $\text{MgO-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส^[41]

โดยการเกิดเฟสไฮเดรตซีเมนต์ต่าง ๆ เหล่านี้เป็นผลมาจากอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้เป็นหลัก ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของซีเมนต์เป็นอย่างมาก จากงานวิจัยของ Z.G. Li และคณะ^[38] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตที่ส่งผลต่อความต้านแรงอัดของแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ โดยใช้แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต และเติมกรดซิตริก ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) ลงไปเป็นสารเติมแต่ง โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 5, 7, 9 และ 11 อัตราส่วนโดยโมลน้ำต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 18, 20 และ 24 ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นทรงลูกบาศก์และวัดความต้านแรงอัดที่ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน หลังจากการบ่ม ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนวัตถุดิบตั้งต้นมีผลอย่างมากต่อความต้านแรงอัดของแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตความต้านแรงอัดของซีเมนต์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 11 และอัตราส่วนโดยโมลน้ำต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ 20 มีความต้านแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 107.6 MPa เมื่อบ่มไว้เป็นเวลา 7 วัน นั่นคือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตสูงและมีอัตราส่วนของน้ำต่อแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำทำให้สามารถเกิดเฟส 5-1-7 ได้ในปริมาณมาก และเกิดเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณน้อย ซึ่งเฟส 5-1-7 มีรูปร่างผลึกเป็นรูปเข็มสามเหลี่ยมจึงส่งผลดีต่อความต้านแรงอัดของแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตทำให้มีปริมาณแมกนีเซียมที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยแมกนีเซียมเหล่านี้เองจะทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมในแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ซึ่งส่งผลดีต่อความแข็งแรงในซีเมนต์ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ L. Qin และคณะ^[42] ศึกษาอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตในช่วง 15 ถึง 21 โดยใช้แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่

อุณหภูมิต่ำผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ผลการทดลองพบว่าเฟสที่พบเป็นหลักประกอบด้วยเฟส 3-1-8 แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยา โดยเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมากขึ้น ทำให้เฟส 3-1-8 และแมกนีเซียมที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นในปริมาณมากและเกิดเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์น้อยลง ซึ่งทำให้ความต้านแรงอัดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมากขึ้น โดยส่วนผสมที่มีอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 21 มีความต้านแรงอัดสูงสุดถึง 58.1 MPa หลังจากบ่มไว้ 28 วัน S. Tang และคณะ^[43] ศึกษากระบวนการไฮเดรชันของแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ พบว่าเมื่อแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะเกิดเป็นชั้นแมกนีเซียมไฮดรอกซิลปกคลุมบนพื้นผิวอนุภาคของแมกนีเซียมและหมู่ไฮดรอกซิลบางตัวจะถูกปล่อยลงในของเหลว แสดงดังรูปที่ 2.10 เมื่อความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลสูงจนถึงค่าวิกฤติ เฟส 1-1-5 ซึ่งเป็นเฟสกิ่งเสถียรจะเริ่มเกิดขึ้นและจะสลายตัวเป็นเฟส 5-1-7 และเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ โดยเฟส 5-1-7 มีรูปร่างเป็นผลึกรูปเข็มประสานไขว้กันไปมาและไปเติมเต็มในรูพรุน จึงเป็นแหล่งที่ให้ความแข็งแรงเป็นหลักในซีเมนต์ ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวว่าอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไม่ได้มีผลต่อระดับความเป็นผลึกของผลิตภัณฑ์ไฮเดรตมากนักแต่เป็นระยะเวลาการเกิดไฮเดรชันที่มีผลต่อระดับความเป็นผลึกของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เมื่อระยะเวลาการเกิดไฮเดรชันมากขึ้นความเป็นผลึกจะสูงขึ้น ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเฟสด้วยเทคนิควิเคราะห์เลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์

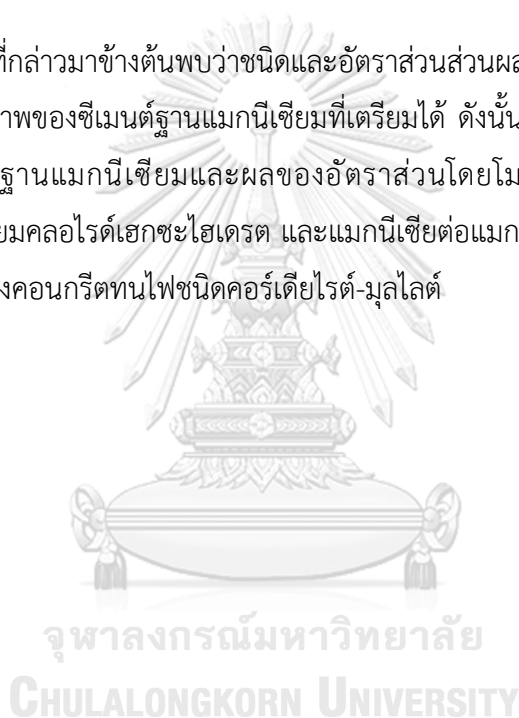


รูปที่ 2.10 แผนภาพการเกิดขึ้นไฮเดรชันบนผิวของแมกนีเซียมในแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟต^[44]

C. Wu และคณะ^[45] เตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์จากกรดซัลฟิวริก โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 4 ถึง 8 ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วน

โดยโมลของแมกนีเซียมต่อกรดซัลฟิวริก ความต้านแรงอัดจะมีค่ามากขึ้นจากนั้นความต้านแรงอัดจะมีค่าน้อยลง เนื่องจากมีเฟสแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 6 มีความต้านแรงอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 41.8 MPa เมื่อบ่มไว้เป็นเวลา 28 วัน เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสพบว่าที่อัตราส่วนนี้มีเฟส 5-1-7 เป็นหลักซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความแข็งแรงในซีเมนต์ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์มีผลต่อความต้านแรงอัด เมื่อใช้น้ำปริมาณมากจะทำให้ความต้านแรงอัดลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของซีลเฟตไอออนลดลง ทำให้โอกาสที่แมกนีเซียมซีลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง เกิดเฟส 5-1-7 ได้น้อยลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของซีเมนต์ลดลง

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าชนิดและอัตราส่วนส่วนผสมของซีเมนต์ฐานแมกนีเซียม มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมที่เตรียมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของชนิดของซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมและผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมต่อซิลิกา แมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต และแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซีลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่อสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ดินขาวเผา แคลไซน์อะลูมินา ทรายบด และแมกนีเซียมคาร์บอเนต รวมถึงสารเคมีอื่น ๆ รายละเอียดเกี่ยวกับบริษัทผู้ผลิตจำหน่ายแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบและสารเคมี	บริษัทผู้จำหน่าย
ดินขาวเผา (โมโลไคต์; molochite) ขนาด -30, -80 และ -120 เมช	บริษัท Imerys Refractory Minerals ประเทศฝรั่งเศส
แคลไซน์อะลูมินา ชนิด 4C34BC	บริษัท Alteo จำกัด
ทรายบด ขนาด -325 เมช	บริษัท ฮีโร่ไซน์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด
แมกนีเซียมคาร์บอเนต	บริษัท อิตาเลียน-ไทย เซรามิค วัสดุทนไฟ จำกัด
ซิลิกาฟูล	บริษัท เอลเคม (ประเทศไทย) จำกัด
แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต 99%	บริษัท เคมออส จำกัด
แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 99.5%	บริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด

3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF) แสดงดังตารางที่ 3.2 พบว่า ดินขาวเผา มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 53.12 โดยน้ำหนัก และมีอะลูมินาในปริมาณรองลงมา ร้อยละ 42.63 โดยน้ำหนัก แคลไซน์อะลูมินามีอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 99.85 โดยน้ำหนัก ทรายบดมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 98.80 โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมคาร์บอเนตมีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 44.92 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

องค์ประกอบทางเคมี (wt%)	ดินขาวเผา	แคลไซต์ อะลูมินา	ทรายบด	แมกนีเซียม คาร์บอเนต
SiO ₂	53.12	0.07	98.80	3.61
Al ₂ O ₃	42.63	99.85	0.32	0.28
MgO	0.23	-	<0.01	44.92
K ₂ O	2.38	-	0.03	0.01
CaO	0.04	0.02	<0.01	0.76
Na ₂ O	0.06	-	<0.01	0.13
Fe ₂ O ₃	-	0.02	0.04	0.06
Loss on ignition (LOI)	-	-	0.64	50.16

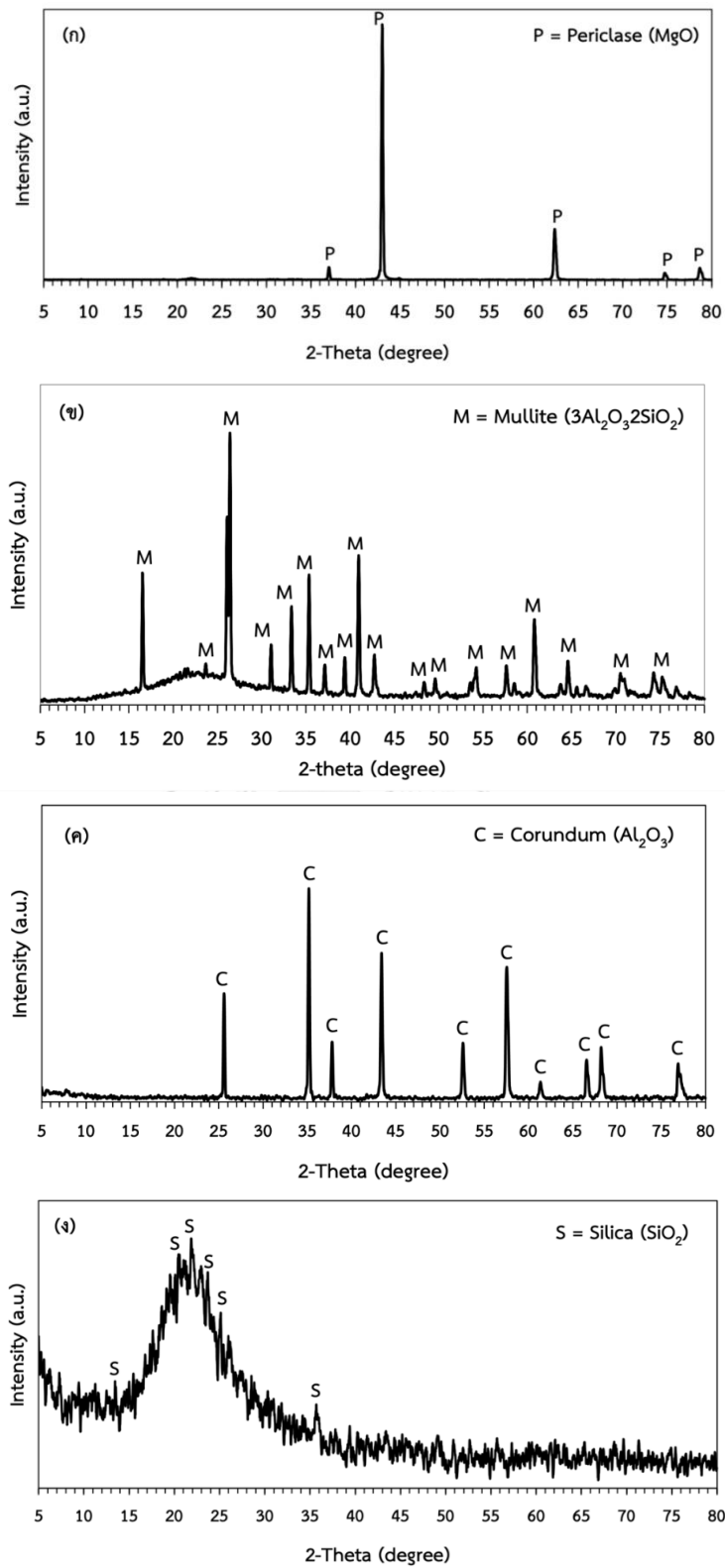
3.1.2 องค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ

การตรวจสอบองค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบ จะใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยองค์ประกอบเฟสของวัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ดินขาวเผา และแคลไซต์อะลูมินา แสดงดังรูปที่ 3.1 พบว่า แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำปรากฏเฟสเพอร์เคลส (JCPDS no. 074-1125) เพียงเฟสเดียว โดยมีความเข้มพีกสูงสุดที่ตำแหน่ง 2-theta ที่มุม 43.05 และ 62.14 องศา

องค์ประกอบเฟสของดินขาวเผาปรากฏเฟสมุลไลต์ (JCPDS no. 015-776) เป็นเฟสหลักโดยมีความเข้มพีกสูงสุดที่ตำแหน่ง 2-theta ที่มุม 16.54, 26.10 และ 26.40 องศา ตามลำดับ พีกที่มีฐานกว้างที่ตำแหน่ง 2-theta ที่มุมประมาณ 21.00 องศา แสดงเฟสของซิลิกาอสัณฐานซึ่งมีความเป็นผลึกต่ำ

องค์ประกอบเฟสของแคลไซต์อะลูมินาปรากฏเฟสคอร์รันดัม (JCPDS no. 046-1212) เพียงเฟสเดียว โดยมีความเข้มพีกสูงสุดที่ตำแหน่ง 2-theta ที่มุม 35.20, 43.37 และ 57.54 องศา ตามลำดับ

องค์ประกอบเฟสของซิลิกาฟุ่มปรากฏเฟสซิลิกา (JCPDS no. 082-1553) เพียงเฟสเดียว ซึ่งมีโครงสร้างแบบอสัณฐานจึงไม่ปรากฏพีกอย่างชัดเจน



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเฟส (ก) แมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ (ข) ดินขาวเผา (ค) แคลไซต์อะลูมินา และ (ง) ซิลิกาฟุ่ม

3.2 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.2.1 อัตราส่วนผสมในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอร์เตียไรต์-มูลไส้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองศึกษาหาอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมระหว่างแมกนีเซียมซีลีกาฟุม แมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรต และแมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกซีซิลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานตามลำดับ ที่มีผลต่อสมบัติของคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เตียไรต์-มูลไส้ โดยกำหนดอัตราส่วนที่ต้องการศึกษาดังนี้ สำหรับการเตรียมแมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรตซีเมนต์ กำหนดอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมซีลีกาเท่ากับ 0.75, 1, 2, 3 และ 4 สำหรับการเตรียมแมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์และแมกนีเซียมออกซีซิลเฟตซีเมนต์ กำหนดอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรต และแมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรตซีเมนต์เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3.3 สำหรับการกำหนดอัตราส่วนที่ต้องการศึกษานี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของเฟสซีเมนต์ที่จะสามารถเกิดขึ้นได้โดยอ้างอิงจากงานวิจัยต่าง ๆ ดังที่กล่าวไปข้างต้น

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยโมลของตัวเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา

ตัวเชื่อมประสาน	อัตราส่วนโดยโมล	
แมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรตซีเมนต์	แมกนีเซียมซีลีกา	0.75, 1, 2, 3 และ 4
แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์	แมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรตซีเมนต์	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25
แมกนีเซียมออกซีซิลเฟตซีเมนต์	แมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรตซีเมนต์	1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25

สำหรับส่วนผสมในคอนกรีตทนไฟจะประกอบไปด้วยส่วนหยาบ (aggregate) ร้อยละ 60 ซึ่งได้จากการนำดินขาวเผาขนาดต่าง ๆ มาผสมกันโดยมีเฟสหลักเป็นเฟสมูลไส้ และส่วนละเอียด (matrix) ร้อยละ 40 ประกอบด้วย แมกนีเซียมซีลีกา ร้อยละ 13.7 อะลูมินา ร้อยละ 34.9 และซีลีกา ร้อยละ 51.4 ซึ่งหลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยากันเกิดเป็นเฟสคอร์เตียไรต์ ในงานวิจัยนี้ใช้แมกนีเซียมซีลีเกตไฮเดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกซีซิลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟคอร์เตียไรต์-มูลไส้ จึงใช้แมกนีเซียมซีลีกาที่ผ่านการเผาที่

อุณหภูมิต่ำ แคลไซน์อะลูมินา และทรายบดเป็นวัตถุดิบ เมื่อขึ้นงานผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง แมกนีเซียมในซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ได้

เมื่อกำหนดอัตราส่วนโดยโมลของตัวเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 3.3 แล้ว จากนั้นคำนวณปริมาณวัตถุดิบส่วนผสมที่ต้องใช้ในแต่ละอัตราส่วนโดยโมลตามสัดส่วนทางทฤษฎี ได้แก่ แคลไซน์อะลูมินา ทรายบด แมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ และดินขาวเผาขนาด -30 เมช, -80 เมช และ 120 เมช โดยปริมาณวัตถุดิบส่วนผสมสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซิคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกซิซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน แสดงในตารางที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ โดยแมกนีเซียที่ใช้เป็นส่วนผสมในตัวเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิดนี้จะใช้เป็นแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเตรียมได้จากการนำแมกนีเซียมคาร์บอเนตไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที สำหรับส่วนผสมที่ใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานจะใช้ปริมาณทรายบดในแต่ละอัตราส่วนไม่เท่ากัน เนื่องจากซิลิกาฟุ่มมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนทรายบด จึงต้องมีการลดทอนปริมาณของทรายบดในแต่ละอัตราส่วนเพื่อให้ปริมาณซิลิกาไม่เกินองค์ประกอบทางเคมีของคอร์เดียไรต์ และสำหรับส่วนผสมที่ใช้แมกนีเซียมออกซิคลอไรด์ซีเมนต์และแมกนีเซียมออกซิซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานจะใช้ปริมาณแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำในแต่ละอัตราส่วนไม่เท่ากัน เนื่องจากแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมีองค์ประกอบทางเคมีของแมกนีเซียร่วมด้วย เมื่อนำมาใช้ร่วมกับแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ จึงต้องมีการลดทอนปริมาณของแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำในแต่ละอัตราส่วน

ตารางที่ 3.4 ปริมาณวัสดุดิบสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้
แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)

อัตราส่วน โดยโมล แมกนีเซียม ต่อซิลิกา	แมกนีเซียม ที่ผ่านการ เผาที่ อุณหภูมิ ต่ำ	ซิลิกา ฟวม	แคลไซต์ อะลูมินา	ทราย บด	ดินขาว เผาขนาด -30#	ดินขาว เผาขนาด -80#	ดินขาวเผา ขนาด -120#
0.75	6.08	10.89	13.96	9.23	32.00	13.00	15.00
1	6.08	8.17	13.96	11.95	32.00	13.00	15.00
2	6.08	4.09	13.96	16.04	32.00	13.00	15.00
3	6.08	2.72	13.96	17.40	32.00	13.00	15.00
4	6.08	2.04	13.96	17.79	32.00	13.00	15.00

ตารางที่ 3.5 ปริมาณวัสดุดิบสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้
แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)

อัตราส่วน โดยโมล แมกนีเซียมต่อ แมกนีเซียม คลอไรด์ เฮกซะ ไฮดรต	แมกนีเซียมที่ ผ่านการเผา ที่อุณหภูมิ ต่ำ	แมกนีเซียม คลอไรด์ เฮกซะ ไฮดรต	แคลไซต์ อะลูมินา	ทรายบด	ดินขาว เผา ขนาด -30#	ดินขาว เผา ขนาด -80#	ดินขาว เผา ขนาด -120#
1	3.04	13.82	13.94	20.34	32.00	13.00	15.00
2	4.05	9.21	13.94	20.27	32.00	13.00	15.00
3	4.56	6.91	13.93	20.23	32.00	13.00	15.00
4	4.86	5.53	13.93	20.21	32.00	13.00	15.00
5	5.07	4.61	13.93	20.19	32.00	13.00	15.00
10	5.53	2.51	13.93	20.16	32.00	13.00	15.00
15	5.70	1.73	13.93	20.15	32.00	13.00	15.00
20	5.79	1.32	13.93	20.14	32.00	13.00	15.00
25	5.85	1.06	13.93	20.14	32.00	13.00	15.00

ตารางที่ 3.6 ปริมาณวัตถุดิบสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้
แมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)

อัตราส่วนโดย โมลแมกนีเซียม ต่อ แมกนีเซียม ซีลเฟต เฮปตะ ไฮเดรต	แมกนีเซียม ที่ผ่านการ เผาที่ อุณหภูมิ ต่ำ	แมกนีเซียม ซีลเฟต เฮปตะ ไฮเดรต	แคลไซน์ อะลูมินา	ทรายบด	ดินขาว เผา ขนาด -30#	ดินขาว เผา ขนาด -80#	ดินขาว เผา ขนาด -120#
1	3.04	16.76	13.94	20.34	32.00	13.00	15.00
2	4.05	11.17	13.94	20.27	32.00	13.00	15.00
3	4.56	8.38	13.93	20.23	32.00	13.00	15.00
4	4.86	6.70	13.93	20.21	32.00	13.00	15.00
5	5.07	5.59	13.93	20.19	32.00	13.00	15.00
10	5.53	3.05	13.93	20.16	32.00	13.00	15.00
15	5.70	2.10	13.93	20.15	32.00	13.00	15.00
20	5.79	1.60	13.93	20.14	32.00	13.00	15.00
25	5.85	1.29	13.93	20.14	32.00	13.00	15.00

3.2.2 การขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานในแม่แบบ

การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน มีดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักวัตถุดิบตามปริมาณที่กำหนดในแต่ละอัตราส่วนโดยโมลดังตารางที่ 3.4 ถึง 3.6 จากนั้นนำส่วนผสมมาผสมให้เข้ากัน ค่อย ๆ เติมน้ำกลั่นลงในส่วนผสม จนส่วนผสมสามารถปั้นเป็นทรงกลม (ball in hand) ได้ ดังรูปที่ 3.2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในแต่ละอัตราส่วนส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3.7 ถึง 3.9 โดยลักษณะของส่วนผสมที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานจะมีลักษณะเหนียวกว่าส่วนผสมที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์หรือแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน



รูปที่ 3.2 ส่วนผสมที่ผ่านการผสมให้เข้ากัน

ตารางที่ 3.7 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปคอนกรีตคอร์เตียร์-มุลไลต์ที่ใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต
ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)

อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกา	ปริมาณน้ำที่ใช้โดยประมาณ
0.75	17
1	17
2	17
3	18
4	19

ตารางที่ 3.8 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปคอนกรีตคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)

อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต	ปริมาณน้ำที่ใช้โดยประมาณ
1	13
2	15
3	16
4	17
5	18
10	20
15	21
20	22
25	22

ตารางที่ 3.9 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปคอนกรีตคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน (สัดส่วนโดยน้ำหนัก)

อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต	ปริมาณน้ำที่ใช้โดยประมาณ
1	14
2	16
3	16
4	17
5	19
10	20
15	21
20	22
25	22

2. เทส่วนผสมที่ได้ลงในแม่แบบอะคริลิกขนาด 25x150x25 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องสั่นช่วยการไหลตัวของแม่แบบ ดังรูปที่ 3.3



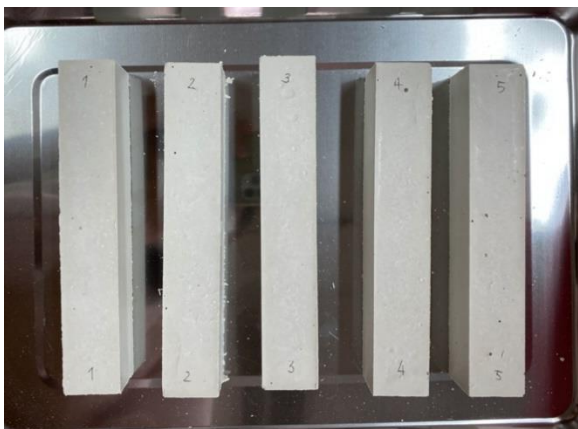
รูปที่ 3.3 หล่อชิ้นรูปในแม่แบบอะคริลิก

3. ปั่นชิ้นงานทิ้งไว้ในแม่แบบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยคลุมถุงพลาสติกไว้เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออกจากชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ปั่นชิ้นงานในแม่แบบและคลุมด้วยถุงพลาสติกเพื่อป้องกันน้ำระเหยออกจากชิ้นงาน

4. แกะชิ้นงานออกจากแม่แบบ ดังรูปที่ 3.5 และนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบความต้านแรงดัด วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบ



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานหลังหล่อแบบ

5. นำชิ้นงานหลังหล่อแบบมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.6 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความต้านแรงดัด วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังอบแห้ง



รูปที่ 3.6 อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6. นำชิ้นงานหลังอบมาเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ด้วยเตาไฟฟ้ายี่ห้อ Lindberg รุ่น Shimax MAC3A

ดังรูปที่ 3.7 จากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบความต้านแรงดัด ความหนาแน่นรวม ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำ วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังเผา และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน



รูปที่ 3.7 ชิ้นงานหลังเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.3 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้

3.3.1 การทดสอบความต้านแรงดัด

ทดสอบความต้านแรงดัด (bending strength) ของชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้จากตัวเชื่อมประสานแต่ละชนิดและอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบขนาด 25x150x25 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ทดสอบความต้านแรงดัดด้วยวิธี 3-point bending ด้วยเครื่องทดสอบความต้านแรงดัด รุ่น HT-8116 จากบริษัท Hung Ta Instrument Co.,Ltd วางชิ้นงานดังรูปที่ 3.8 โดยกำหนดระยะห่างระหว่างฐานรองรับเท่ากับ 100 มิลลิเมตร กำหนดอัตราความเร็วของหัวกด 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นนำค่าแรงกดที่วัดได้จากเครื่องทดสอบมาคำนวณความต้านแรงดัดของชิ้นงานดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.8 การทดสอบความต้านแรงดัดแบบ 3-point bending

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.1)$$

- เมื่อ σ = ความต้านแรงดัด (MPa)
 P = แรงกดสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานหัก (N)
 L = ระยะระหว่างฐานรองรับ (mm)
 b = ความกว้างของชิ้นงานบริเวณรอยแตก (mm)
 d = ความหนาของชิ้นงานบริเวณรอยแตก (mm)

3.3.2 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักหลังเผา

การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา (weight loss) คือ ส่วนที่สลายไปเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง เช่น น้ำในโครงสร้าง และสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในชิ้นงาน ทดสอบได้โดยการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานหลังก่อนนำไปเผา บันทึกค่าน้ำหนักชิ้นงานก่อนเผา (W_1) จากนั้นนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานเย็นตัว นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักชิ้นงานหลังเผา (W_2) สามารถคำนวณค่าการสูญเสียน้ำหนักหลังเผาได้ดังสมการที่ 3.2

$$\text{Weight loss (\%)} = \left[\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนเผา (g)

W_2 = น้ำหนักของชิ้นงานหลังเผา (g)

3.3.3 การทดสอบความหนาแน่นรวม ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ

ความหนาแน่นรวม (bulk density) ค่าความพรุนตัว (porosity) และการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของชิ้นงานหลังเผา สามารถทดสอบได้โดยใช้หลักการอาร์คิมิดีส (Archimedes's principle) มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ นำชิ้นงานที่ผ่านการเผามาต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยในระหว่างการต้มน้ำจะต้องท่วมชิ้นงานอยู่เสมอ จากนั้นแช่ชิ้นงานในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนชิ้นงานอิ่มตัวในน้ำ แล้วนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่อง Densimeter ยี่ห้อ Alfa Mirage รุ่น EW300SG ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 3.9 ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานในน้ำ (suspended

weight) บันทึกค่าน้ำหนักชิ้นงานในน้ำ (W_3) ชั่งน้ำหนักชิ้นงานเบา ๆ ด้วยผ้าซามัวร์หรือผ้าหมาด จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานทันทีหลังจากชั่งน้ำ (saturated weight) บันทึกค่าน้ำหนักชิ้นงานเปียก (W_2) จากนั้นนำชิ้นงานไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อชิ้นงานเย็นตัว นำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง (dry weight) บันทึกค่าน้ำหนักชิ้นงานแห้ง (W_1) สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นรวม ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำดังสมการที่ 3.3 ถึง 3.5 ตามลำดับ

$$\text{Bulk density (g/cm}^3\text{)} = \frac{W_1}{W_2 - W_3} \quad (3.3)$$

$$\text{Porosity (\%)} = \left[\frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \right] \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{Water absorption (\%)} = \left[\frac{W_2 - W_1}{W_1} \right] \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ W_1 = น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (g)

W_2 = น้ำหนักชิ้นงานเปียก (g)

W_3 = น้ำหนักชิ้นงานในน้ำ (g)

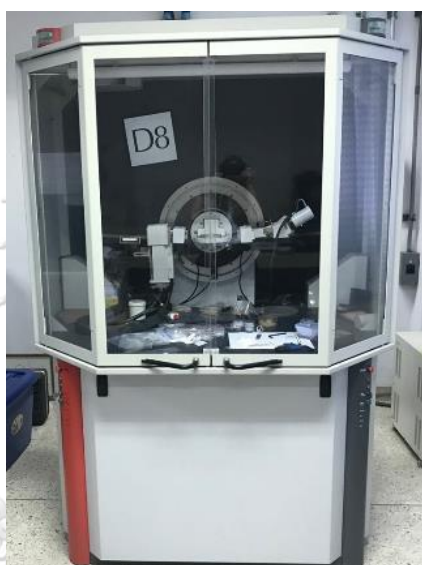


รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนักชุดทดสอบความหนาแน่น

3.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส

วิเคราะห์องค์ประกอบเฟสหรือโครงสร้างผลึกของชิ้นงานโดยใช้เทคนิควิเคราะห์เลี้ยวเบนจากรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) รุ่น D8

Discover จากบริษัท Bruker ประเทศเยอรมัน แสดงดังรูปที่ 3.10 เตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นงานมา บดเป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบดแบบสั่น (vibratory mill) แล้วนำผงตัวอย่างใส่ในภาชนะสำหรับใส่ สารตัวอย่าง เกลี่ยให้ทั่วจนผิวหน้าตัวอย่างเรียบและเสมอกับขอบของแผ่นที่บรรจุสารตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างวางบนแท่นวางตัวอย่างของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ โดยใช้แหล่งกำเนิด แสงเอกซเรย์คือ Cu-K α มีความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร ที่ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ ที่อัตราเร็วเชิงมุม 2 องศาต่อวินาที และกำหนดช่วงการวิเคราะห์ผล ของมุม (2-theta) 5 ถึง 80 องศา



รูปที่ 3.10 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ รุ่น D8 Discover

3.3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เพื่อวิเคราะห์ดูพื้นผิวของชิ้นงานและศึกษาการเชื่อมเกาะ กันของอนุภาคกับตัวเชื่อมประสาน เตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นงานมาทุบเป็นเศษชิ้นเล็ก ๆ แล้วติดลง บนแผ่นคาร์บอนเทป จากนั้นนำไปเคลือบผิวชิ้นงานด้วยทองเพื่อให้ชิ้นงานมีสมบัติการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น SU3500 บริษัท Hitachi ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าขนาด 5 กิโลโวลต์

3.3.6 การวิเคราะห์พื้นระทางเคมี

ทำการวิเคราะห์พื้นระทางเคมีของชิ้นงานเพื่อศึกษาองค์ประกอบพื้นระทางเคมีในชิ้นงาน เตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นงานมาบดเป็นผงด้วยเครื่องบดแบบสั่น แล้วนำมาวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

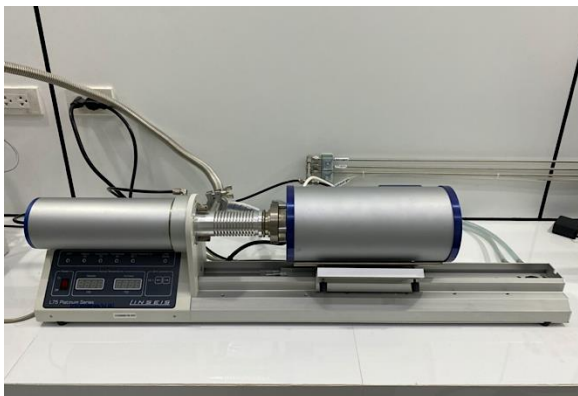
อินฟราเรดของสารตัวอย่างด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) รุ่น Nicolet iS 50 จากบริษัท Thermo Fisher Scientific โดยใช้โหมดวิเคราะห์แบบสะท้อนแสงอินฟราเรด (Attenuated total reflectance; ATR) ในการวิเคราะห์ และกำหนดเลขคลื่นที่ต้องการวัดอยู่ในช่วง 400 ถึง 4000 cm^{-1}

3.3.7 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงถึงความทนทานต่อความสามารถในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของชิ้นงาน เตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการเผามาตัดให้มีขนาดไม่เกิน 5x15x5 มิลลิเมตร จากนั้นนำตัวอย่างชิ้นงานมาวิเคราะห์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อน ด้วยเครื่องวัดการขยายตัวเชิงความร้อน (dilatometer) ยี่ห้อ Linseis รุ่น L75 ประเทศเยอรมัน แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยกำหนดอุณหภูมิทดสอบตั้งแต่ 100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตัวอย่างชิ้นงานจะเกิดการขยายตัว เครื่องจะทำการวัดความยาวของตัวอย่างชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนได้ตามช่วงของอุณหภูมิที่ต้องการได้จากสมการการขยายตัวเชิงเส้น (linear expansion) ดังสมการที่ 3.6

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T \quad (3.6)$$

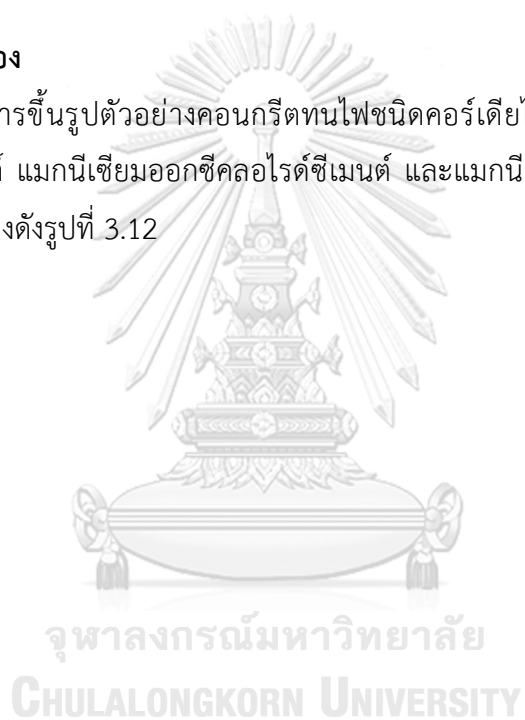
เมื่อ L = ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสุด
 L_0 = ความยาวของชิ้นงานที่อุณหภูมิห้อง
 α = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงที่ต้องการ

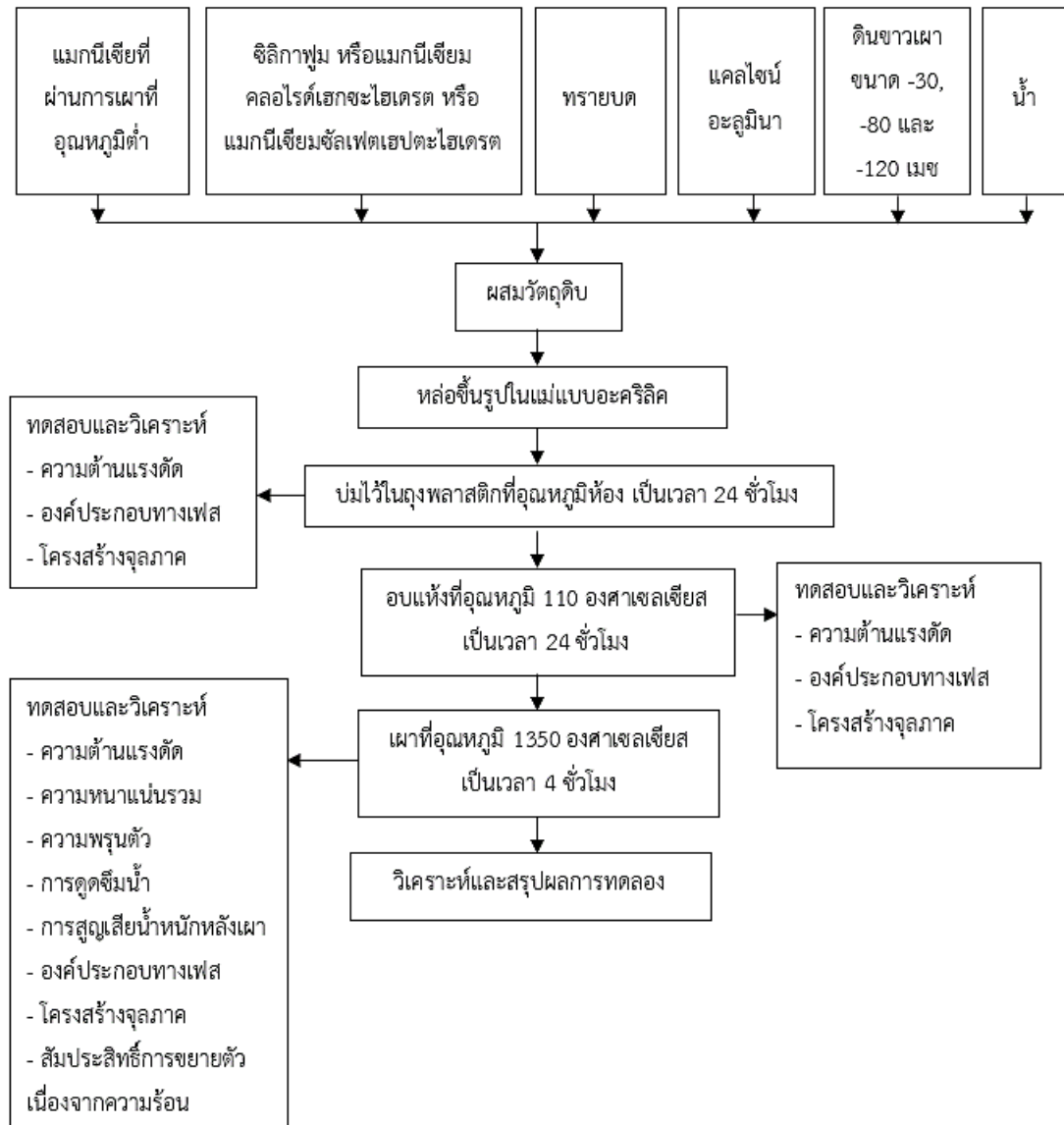


รูปที่ 3.11 เครื่องวัดการขยายตัวเชิงความร้อน

3.4 แผนผังการทดลอง

สรุปขั้นตอนการขึ้นรูปตัวอย่างคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน แสดงดังรูปที่ 3.12





รูปที่ 3.12 แผนผังการทดลอง

บทที่ 4

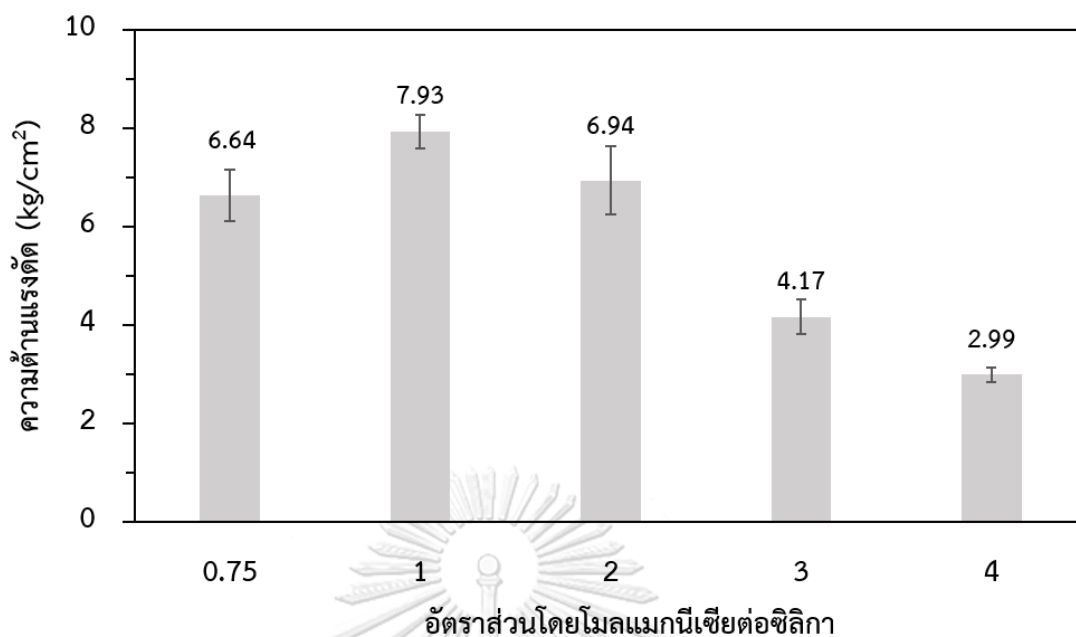
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

4.1.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

4.1.1.1 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

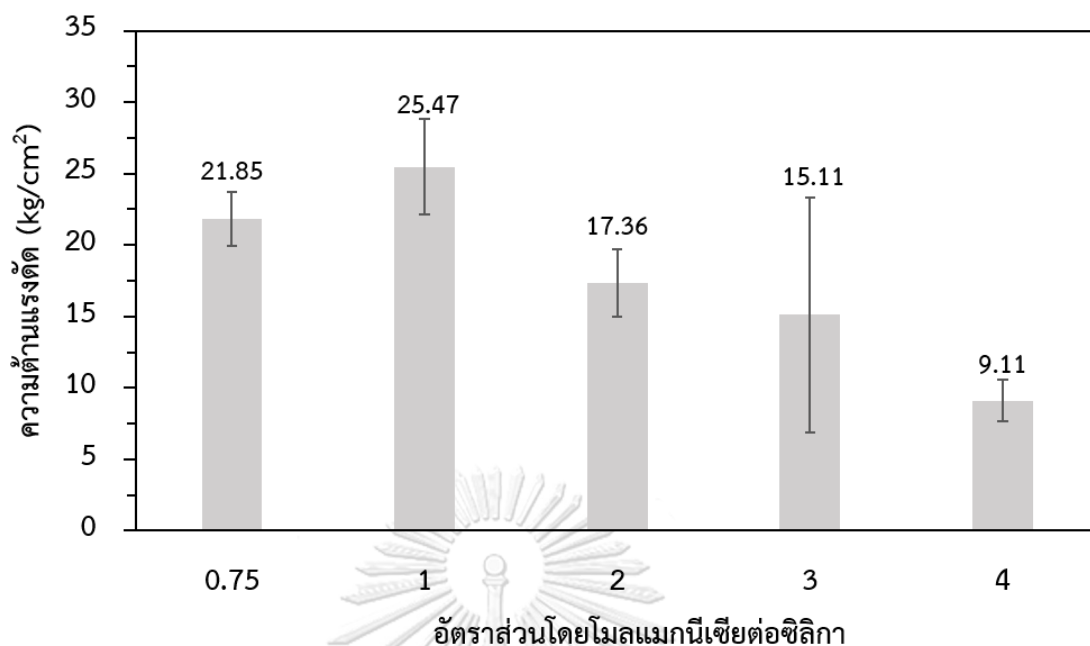
ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 0.75, 1, 2, 3 และ 4 แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาตกลง ความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบมีค่าสูงขึ้น โดยความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบเกิดจากเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ ซึ่งเกิดจากการที่แมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นเฟสบรูไซต์ในปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาพุ่มในส่วนผสมจนเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสานส่งผลให้เกิดความแข็งแรงในชิ้นงาน^[20] ดังนั้นเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกา จะทำให้ในส่วนผสมมีปริมาณซิลิกาพุ่มมากขึ้น ซิลิกาพุ่มจึงไปทำปฏิกิริยากับเฟสบรูไซต์เกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ได้เพิ่มมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 7.93 kg/cm^2 แต่เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 0.75 ความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบมีค่าลดลง เนื่องจากในส่วนผสมมีปริมาณซิลิกาพุ่มมากเกินไป และเหลือจากการทำปฏิกิริยากับเฟสบรูไซต์ จึงส่งผลให้ความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบของทุกอัตราส่วนยังคงอยู่ในระดับที่ชิ้นงานสามารถถอดแบบและเคลื่อนย้ายได้โดยชิ้นงานไม่เกิดการแตกหักเสียหาย



รูปที่ 4.1 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาต่าง ๆ

4.1.1.2 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

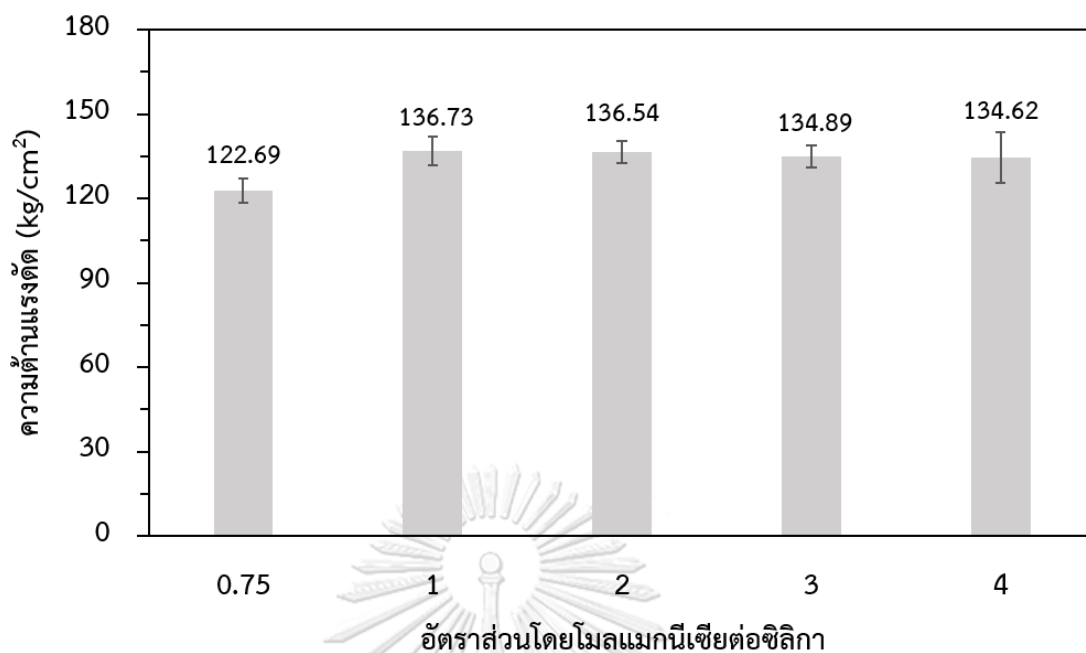
ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 0.75, 1, 2, 3 และ 4 แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าค่าความต้านแรงดัดหลังอบสอดคล้องกับความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบ โดยที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 1 มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 25.47 kg/cm² จะเห็นได้ว่าความต้านแรงดัดหลังอบมีค่าสูงกว่าความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบ เนื่องจากเมื่ออบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส น้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหยออกไป อนุภาคเข้ามาชิดกันและยึดเกาะกันมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อน้ำระเหยออกไปทำให้ความเข้มข้นของเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์มากขึ้น และสามารถตกผลึกออกมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้นได้เช่นกัน



รูปที่ 4.2 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแกลกนีเซียต่อซิลิกาต่าง ๆ

4.1.1.3 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แกลกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

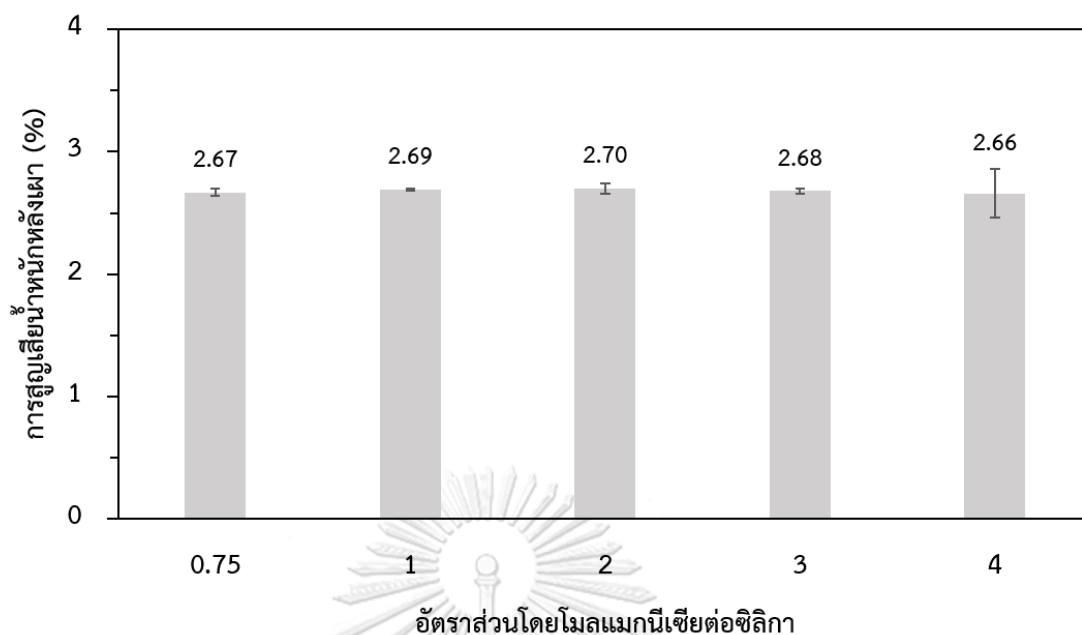
ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแกลกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 0.75, 1, 2, 3 และ 4 แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยชิ้นงานหลังเผาสามารถเตรียมได้จากการนำชิ้นงานหลังอบมาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าทุกอัตราส่วนโดยโมลแกลกนีเซียต่อซิลิกามีค่าความต้านแรงดัดหลังเผาใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วนโดยโมลแกลกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 1 มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 136.73 kg/cm² และเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแกลกนีเซียต่อซิลิกาน้อยลงเท่ากับ 0.75 ค่าความต้านแรงดัดมีค่าลดลง



รูปที่ 4.3 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแกลกนี่เซียต่อซิลิกาต่าง ๆ

4.1.2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แกลกนี่เซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

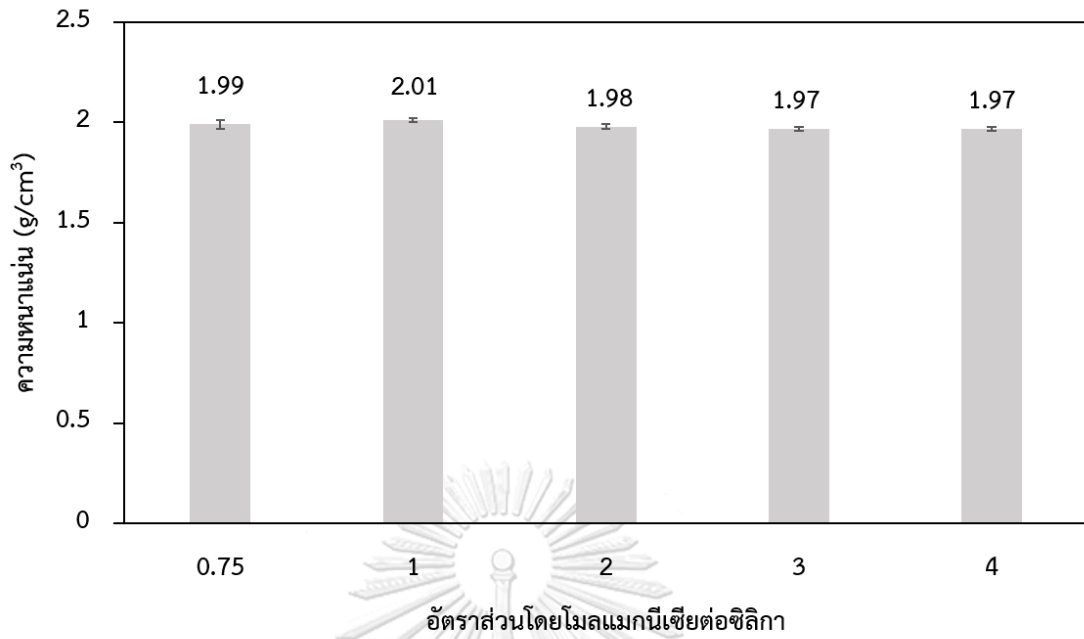
การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแกลกนี่เซียต่อซิลิกาเท่ากับ 0.75, 1, 2, 3 และ 4 แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าทุกอัตราส่วนโดยโมลแกลกนี่เซียต่อซิลิกามีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.66 ถึง 2.70 น้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผาอาจเกิดจากการสลายตัวของน้ำภายในโครงสร้างผลึกของเฟสแกลกนี่เซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์ หรือน้ำในโครงสร้างผลึกของเฟสบรูไซต์เกิดการสลายตัวขณะเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง^[46]



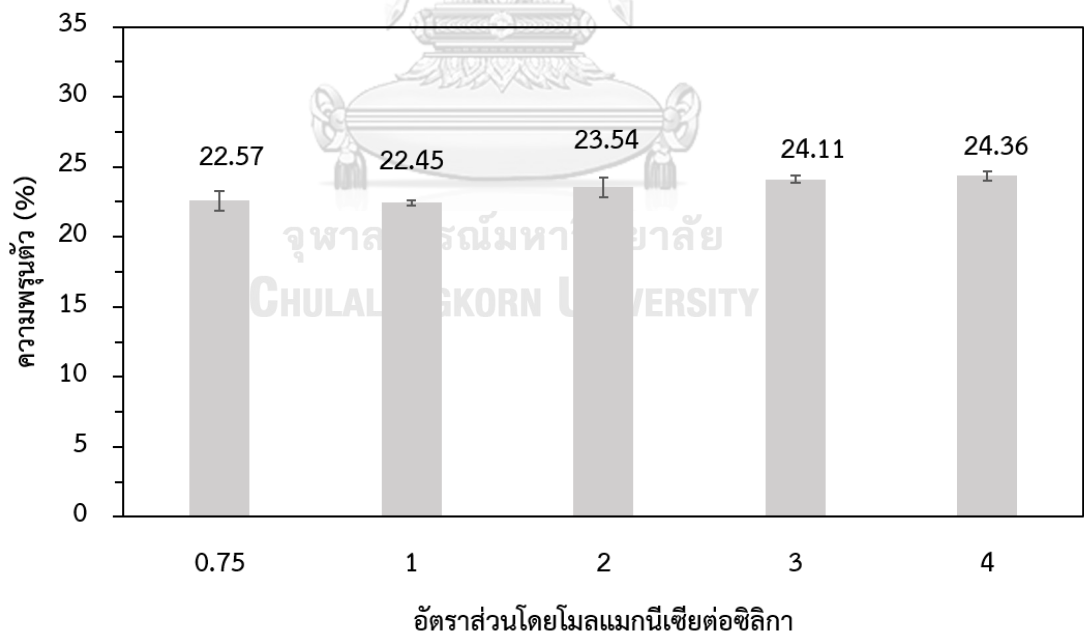
รูปที่ 4.4 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาต่าง ๆ

4.1.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

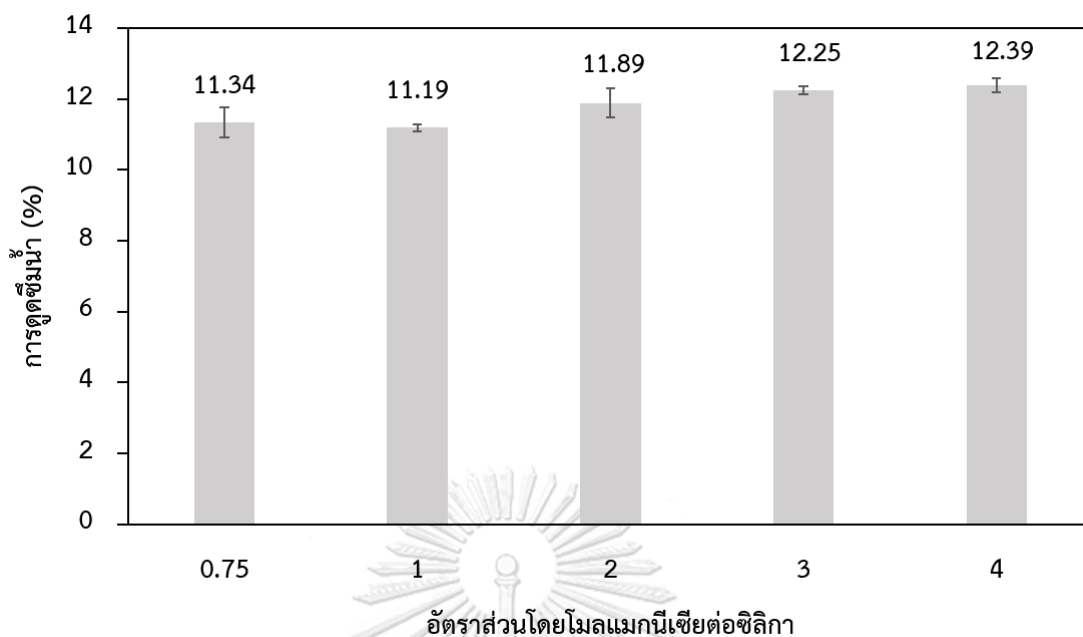
ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 0.75, 1, 2, 3 และ 4 แสดงดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 ตามลำดับ พบว่าทุกอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกามีค่าความหนาแน่น ร้อยละความพรุนตัว และร้อยละการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน โดยเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาตกลง ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำลดลงเล็กน้อย โดยที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 1 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 2.01 g/cm^3 ส่งผลให้มีค่าร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับ 22.45 และ 11.19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาต่าง ๆ



รูปที่ 4.6 ความพรุนตัวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาต่าง ๆ



รูปที่ 4.7 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาต่าง ๆ

เนื่องจากซิลิกาฟุ้งเป็นผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กและละเอียดมาก สามารถเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคหยาบได้ ทำให้โครงสร้างมีความแน่นตัวสูงขึ้นและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ซิลิกาฟุ้งเป็นตัวช่วยเพิ่มการไหลตัวในคอนกรีต จึงสามารถช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปได้^[47] ดังนั้นเมื่อในส่วนผสมมีปริมาณซิลิกาฟุ้งมากขึ้น จึงใช้น้ำในการขึ้นรูปชิ้นงานในปริมาณน้อยลง ดังตารางที่ 3.7 และเมื่อนำชิ้นงานไปอบและเผาที่อุณหภูมิสูง น้ำเกิดการระเหยออกไป เกิดเป็นรูพรุนภายในชิ้นงาน ดังนั้นถ้าภายในชิ้นงานมีน้ำปริมาณน้อยก็จะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีปริมาณรูพรุนน้อย ทำให้ความพรุนตัวมีค่าลดลงและมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดหลังเผามีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.3 แต่เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 0.75 พบว่าความหนาแน่นมีค่าลดลง ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องมาจากถ้าภายในโครงสร้างมีอนุภาคละเอียดมากเกินไปจะเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคละเอียดเยอะทำให้โครงสร้างมีความแน่นตัวลดลง ความพรุนตัวมากขึ้นและมีความหนาแน่นลดลง

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.7 จะเห็นว่าชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 มีสมบัติที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาอื่น ๆ โดยมีความต้านแรงดัด และความหนาแน่นสูงสุด มีความพรุนต่ำและการดูดซึมน้ำต่ำสุด จึงเลือกเอาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 มาทำการศึกษาลักษณะเฉพาะต่อไป

4.1.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ผลการศึกษาขององค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า ชิ้นงานหลังหล่อแบบที่อุณหภูมิห้องประกอบด้วยเฟสควอตซ์ มุลไลต์ คอรัันดัม และเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอรัันดัม มาจากวัตถุดิบที่ใส่ในส่วนผสมได้แก่ ทรายบด ดินขาวเผา และแคลไซต์อะลูมินา ตามลำดับ และเฟสบุรุษไซต์เกิดจากแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วไม่ถูกนำไปใช้ทำปฏิกิริยากับซิลิกาพุ่มในปฏิกิริยาไฮดรชัน^[41] ดังสมการที่ 4.1



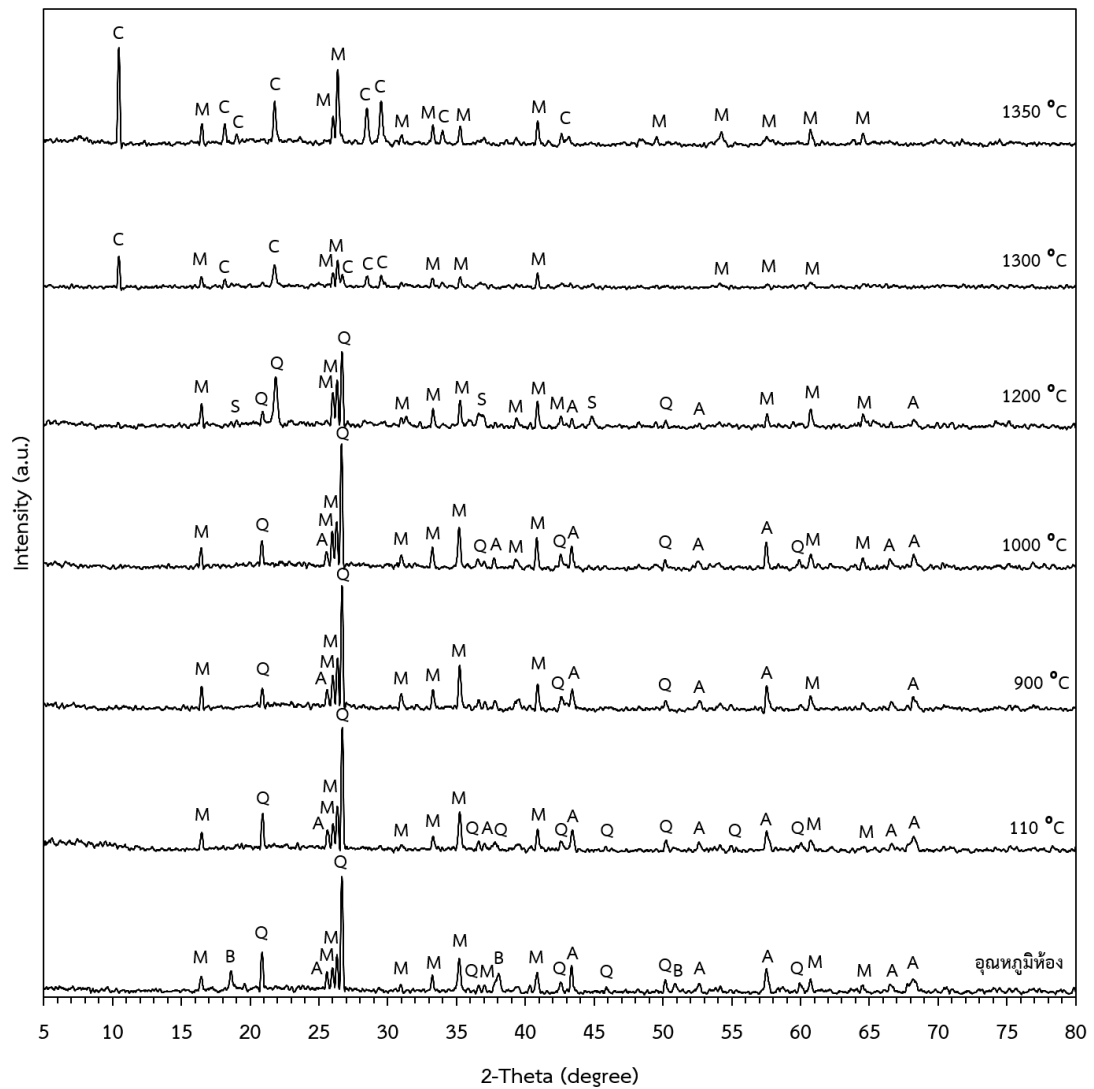
เมื่อนำชิ้นงานไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่าเหลือเพียงเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอรัันดัม ในขณะที่เฟสบุรุษไซต์หายไปซึ่งอาจเกิดจากการที่เฟสบุรุษไซต์ไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาพุ่มเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ และเมื่อนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิสูง จนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ชิ้นงานยังคงประกอบด้วยเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอรัันดัม แต่เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบว่ามีเฟสสปีเนลเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากันของแมกนีเซียมกับอะลูมินา ดังสมการที่ 4.2 นอกจากนี้ยังคงพบเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอรัันดัม



เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส พบเพียงเฟสคอร์เดียไรต์และมุลไลต์ ในขณะที่เฟสควอตซ์ คอรัันดัมและสปีเนลหายไป แสดงถึงว่าเฟสเหล่านี้เกิดการทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ ดังสมการที่ 4.3



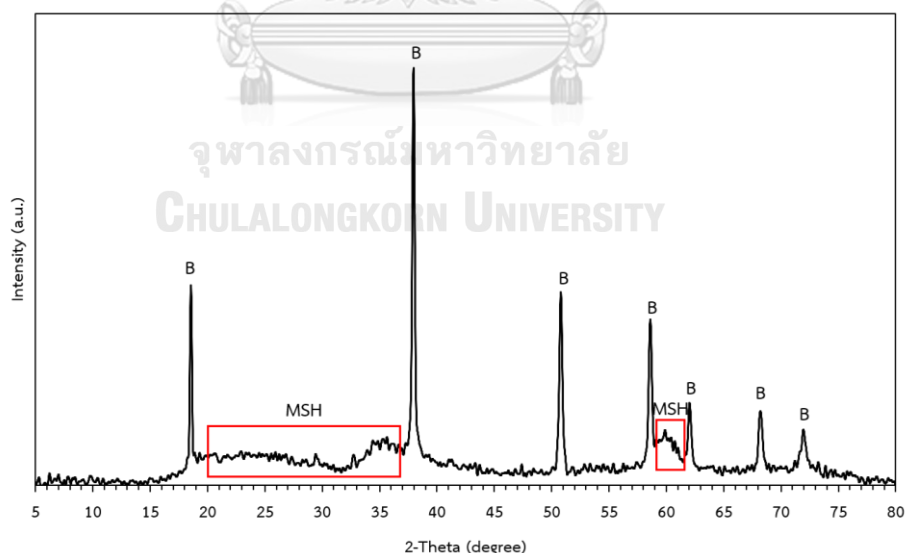
และที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส มีเพียงเฟสคอร์เดียไรต์และมุลไลต์เช่นกัน โดยความสูงของพีคของทั้งสองเฟสนี้สูงขึ้นกว่าที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส



A = corundum (Al_2O_3), B = brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), C = cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$),
Q = quartz (SiO_2), M = mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), S = spinel (MgAl_2O_4)

รูปที่ 4.8 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าไม่พบเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสานที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากชิ้นงานถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องเพียง 1 วัน ทำให้เฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์มีความเป็นผลึกต่ำ นอกจากนี้ปริมาณเฟสซีเมนต์ที่เกิดขึ้นอาจมีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเฟสอื่น ๆ จึงไม่พบเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ได้อย่างชัดเจน เพื่อให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาที่ชัดเจนมากขึ้น จึงนำเฉพาะส่วนละเอียดซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและซิลิกาพุ่มมาทำการผสมกันแล้วบ่มเป็นเวลา 28 วัน เพื่อให้เฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์มีเวลาเพียงพอในการตกผลึกออกมามากยิ่งขึ้น องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานเฉพาะส่วนละเอียดที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานหลังบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4.9 พบเฟสบริสุทธิ์ซึ่งเกิดจากแมกนีเซียทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วไม่ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซิลิกาพุ่มเพื่อเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ นอกจากนี้พบแถบพีคกว้าง ๆ ที่ตำแหน่ง 2-Theta ในช่วงประมาณ 20 ถึง 35 องศา และ 58 ถึง 62 องศา บ่งบอกถึงเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสที่มีความเป็นผลึกต่ำจึงปรากฏเป็นแถบพีคกว้าง ๆ ไม่เกิดเป็นพีคสูงอย่างชัดเจน^[48, 49] แสดงให้เห็นว่าเมื่อชิ้นงานถูกบ่มเป็นเวลานานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยามีเวลาเพียงพอในการตกผลึกเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ออกมาได้มากขึ้น จึงสามารถพบเฟสซีเมนต์ที่เกิดขึ้นได้

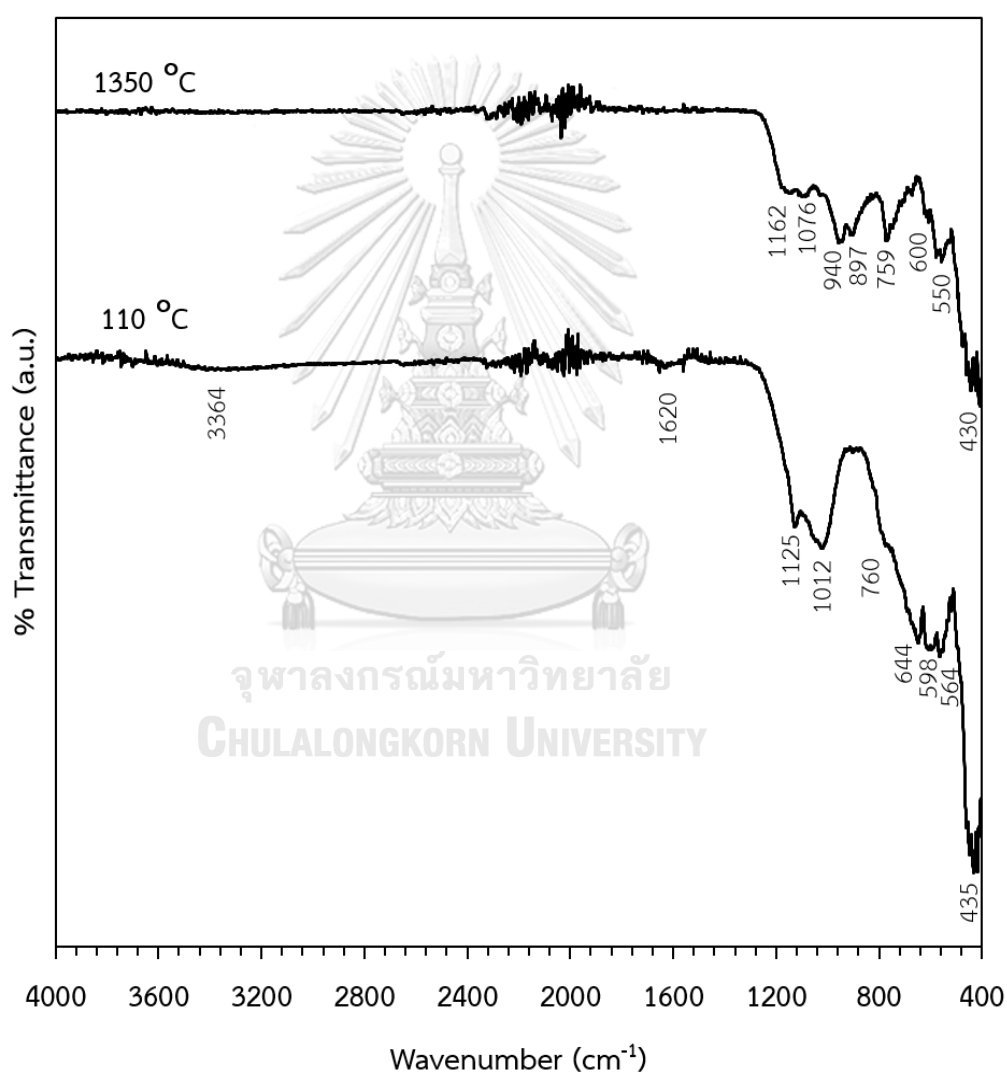


B = brucite ($Mg(OH)_2$), MSH = magnesium silicate hydrate cement

รูปที่ 4.9 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานเฉพาะส่วนละเอียดที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานหลังบ่ม 28 วัน

4.1.5 ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.10



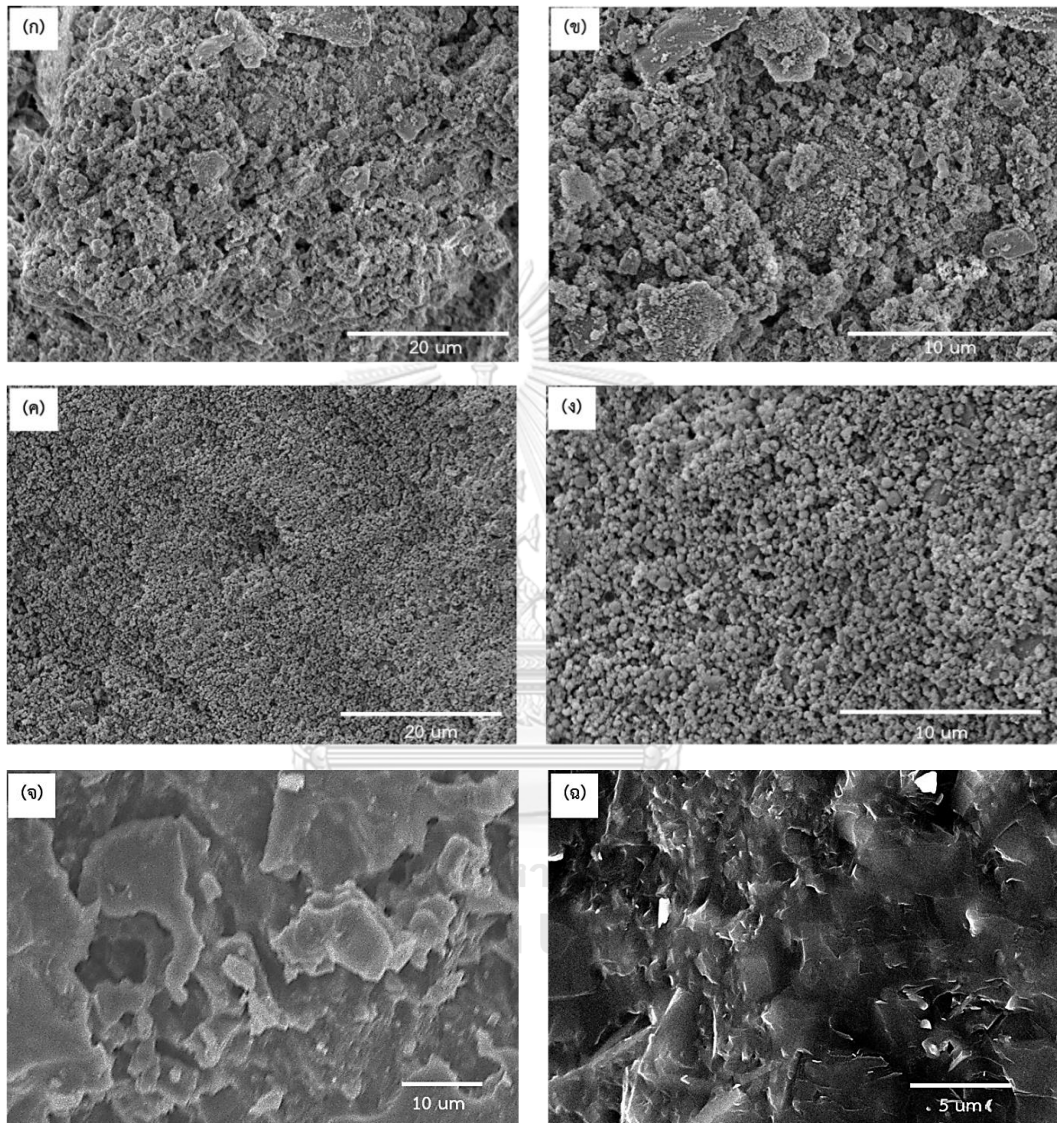
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1

พบว่าชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสประกอบด้วยแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งประมาณ 3364 และ 1620 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดและแบบงอของพันธะ O-H ในโมเลกุลของน้ำตามลำดับ นอกจากนี้แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งในช่วง 1200 ถึง 400 cm^{-1} มาจากวัตุดุบที่ใส่ลงไปในส่วนผสม โดยที่ตำแหน่งประมาณ 1125, 1012 และ 760 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O ที่ตำแหน่งประมาณ 644 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ Al-O ในแคลไซน์อะลูมินา ที่ตำแหน่งประมาณ 598 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O-Mg ซึ่งบ่งบอกถึงการมีเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์ในชิ้นงาน^[16] และที่ตำแหน่งประมาณ 564 และ 435 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ Mg-O ในแมกนีเซีย^[27] เมื่อนำชิ้นงานมาเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส พบว่าแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3364 และ 1620 cm^{-1} หายไป ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของพันธะ O-H ในโมเลกุลของน้ำ นอกจากนี้เกิดแถบการดูดกลืนของวัตุดุบที่ตำแหน่งประมาณ 1162, 1076, 940, 897, 759, 600, 550 และ 430 cm^{-1} ซึ่งเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากตอนหลังอบเล็กน้อย โดยที่ตำแหน่ง 1076, 940, 759, 550 และ 430 cm^{-1} ใกล้เคียงกับแถบการดูดกลืนของเฟสคอร์เดียไรต์^[50, 51] และที่ตำแหน่ง 1162, 897 และ 600 cm^{-1} ใกล้เคียงกับแถบการดูดกลืนของเฟสมุลไลต์^[52, 53] จึงเป็นการยืนยันได้ว่าวัตุดุบเกิดการทำปฏิกิริยากันแล้วเปลี่ยนเป็นเฟสคอร์เดียไรต์และมุลไลต์ ดังรูปที่ 4.8

4.1.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.11 (ก-จ) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบ ดังรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) ประกอบด้วยอนุภาคมีลักษณะเป็นก้อนทรงเหลี่ยมขนาดใหญ่ซึ่งเป็นอนุภาคของวัตุดุบต่าง ๆ โดยพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยอนุภาคของซิลิกาฟุ่มซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเล็กจำนวนมาก^[25] เมื่อนำชิ้นงานไปอบแห้ง พบว่าอนุภาคเม็ดทรงกลมของซิลิกาฟุ่มปกคลุมบนพื้นผิวของอนุภาคขนาดใหญ่เกือบทั้งหมด และมีบางส่วนเข้าไปแทรกตัวอยู่ในรูพรุน ดังรูปที่ 4.11 (ค) และ (ง) ทำให้โครงสร้างมีความแน่นตัวมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านแรงดัดหลังอบของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.2 และเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง พบว่าทุกอนุภาคเกิดการเชื่อมประสานกันหลังจากเกิดการเผาผนึก โดยส่วนอนุภาคหยาบหรือเฟสมุลไลต์จะ

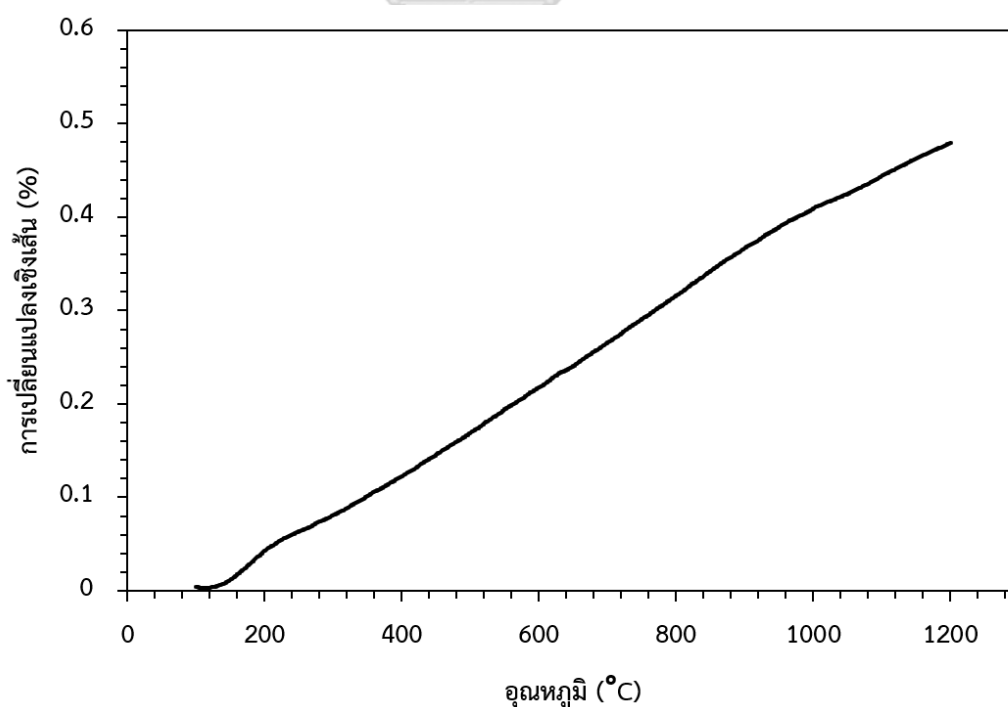
ฝังตัวอยู่ในส่วนเนื้อละเอียดหรือเฟสคอร์เดียไรต์ซึ่งเชื่อมยึดอนุภาคเข้าไว้ด้วยกัน^[54] ดังรูปที่ 4.11 (จ) และ (ฉ)



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังอบที่กำลังขยาย (ค) 2000 เท่า (ง) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังเผาที่กำลังขยาย (จ) 2000 เท่า (ฉ) 5000 เท่า ที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่ อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 1

4.1.7 ผลการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 1 แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนเป็นชิ้นงานหลังเผาซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ชิ้นงานเกิดการขยายตัวมากขึ้น จนถึงที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสชิ้นงานยังคงไม่เกิดการลอม และจากกราฟในช่วงอุณหภูมิ 1000 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานเกิดการหดตัวเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเผาผนึกที่ยังไม่สมบูรณ์จากการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียสในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง และเมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 4.50×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส



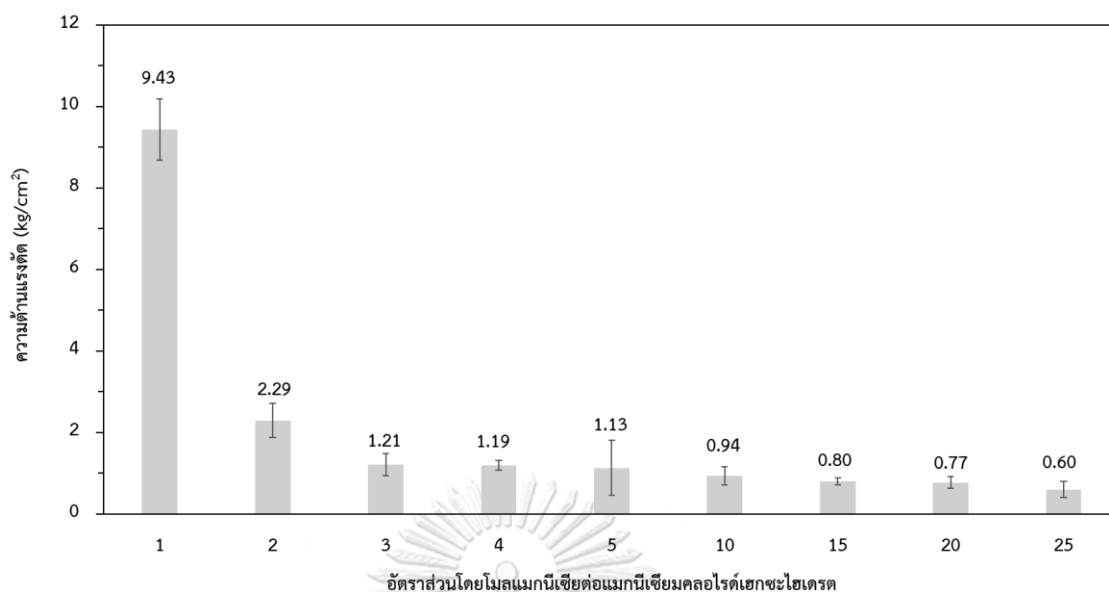
รูปที่ 4.12 การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อซิลิกาเท่ากับ 1

4.2 ผลการศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

4.2.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

4.2.1.1 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตลดลง ความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1 มีค่าความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบสูงสุดเท่ากับ 9.43 kg/cm^2 จากการทดลองเมื่อขึ้นรูปชิ้นงานแล้วทำการบ่มเป็นเวลา 1 วัน พบว่าชิ้นงานหลังหล่อแบบเตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1 และ 2 มีคราบเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเกาะบนชิ้นงานจำนวนมาก บ่งบอกถึงการมีปริมาณเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่มากเกินไปและไม่ได้ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมจนเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ จึงคาดว่าความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบมาจากเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเป็นหลัก เนื่องจากชิ้นงานถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องเพียง 1 วัน อาจทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสานมีเวลาไม่เพียงพอในการตกผลึกเฟสซีเมนต์ออกมาได้ในปริมาณมาก เมื่อในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตในมากขึ้น ความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบจะมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบของทุกอัตราส่วนยังคงอยู่ในระดับที่ชิ้นงานสามารถถอดแบบและเคลื่อนย้ายได้โดยชิ้นงานไม่เกิดการแตกหักเสียหาย

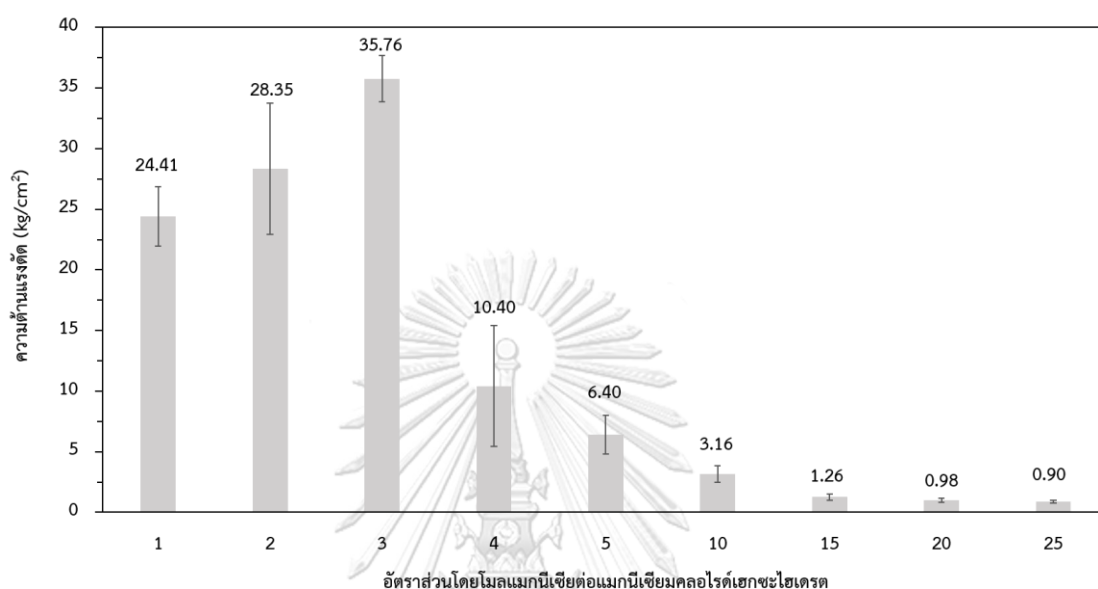


รูปที่ 4.13 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ต่างๆ

4.2.1.2 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซิดคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ลดลง ความต้านแรงดัดหลังอบมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 35.76 kg/cm² และเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ลงจากนี้ ความต้านแรงดัดหลังอบมีค่าลดลง ซึ่งคาดว่าความต้านแรงดัดหลังอบมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมกับแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์เกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกซิดคลอไรด์ซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสานเป็นหลัก เนื่องจากเมื่ออบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส น้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหยออกไป ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์สูงขึ้น และสามารถตกผลึกเฟสแมกนีเซียมออกซิดคลอไรด์ซีเมนต์ออกมาได้ในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์น้อยเกินไป ปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ในส่วนผสมมากเกินไป สังเกตจากคราบเกลือที่เกาะบนชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมโดยใช้อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์

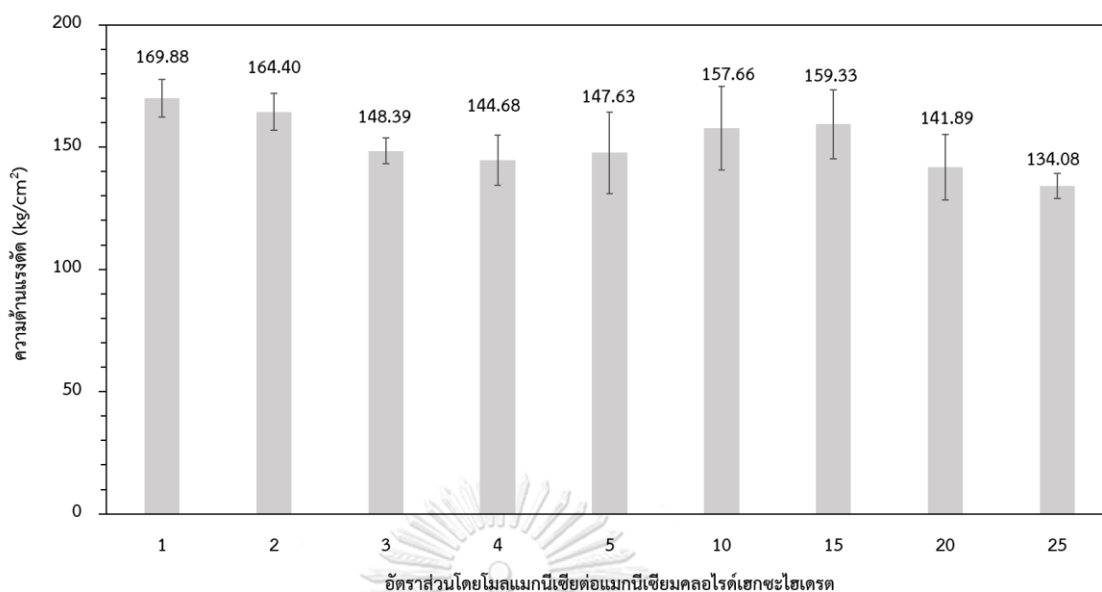
เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1 และ 2 ในขณะที่ในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียน้อยลง ทำให้เกิดเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ได้ในปริมาณน้อย ส่งผลให้ความต้านแรงดัดหลังอบมีค่าลดลง



รูปที่ 4.14 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ

4.2.1.3 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

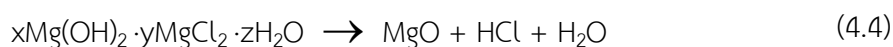
ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.15 โดยชิ้นงานหลังเผาสามารถเตรียมได้จากการนำชิ้นงานหลังอบมาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตลดลง ความต้านแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1 มีค่าความต้านแรงดัดหลังเผาสูงสุดเท่ากับ 169.88 kg/cm²

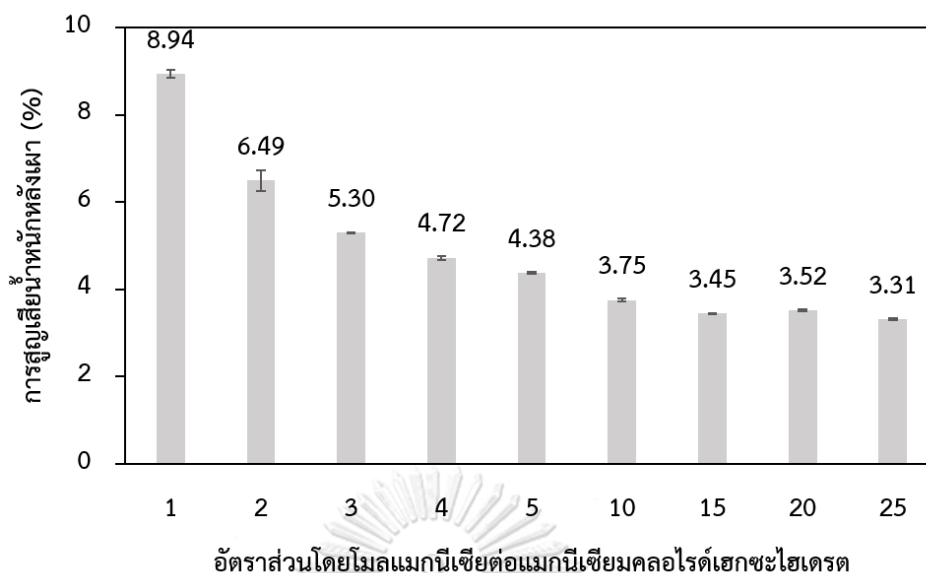


รูปที่ 4.15 ความต้านแรงอัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ต่างๆ

4.2.2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ลดลง ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผามีค่าสูงขึ้น โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาสูงสุดเท่ากับ 8.94 ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผาเกิดจากการสลายตัวของแมกนีเซียมออกไซด์เป็นหลัก นอกจากนี้ยังรวมถึงน้ำในโครงสร้างผลึกของเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์อีกด้วย โดยแมกนีเซียมออกไซด์เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส^[55] ดังสมการที่ 4.4





รูปที่ 4.16 การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมนนิโตลต่อแมนนิซีมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ

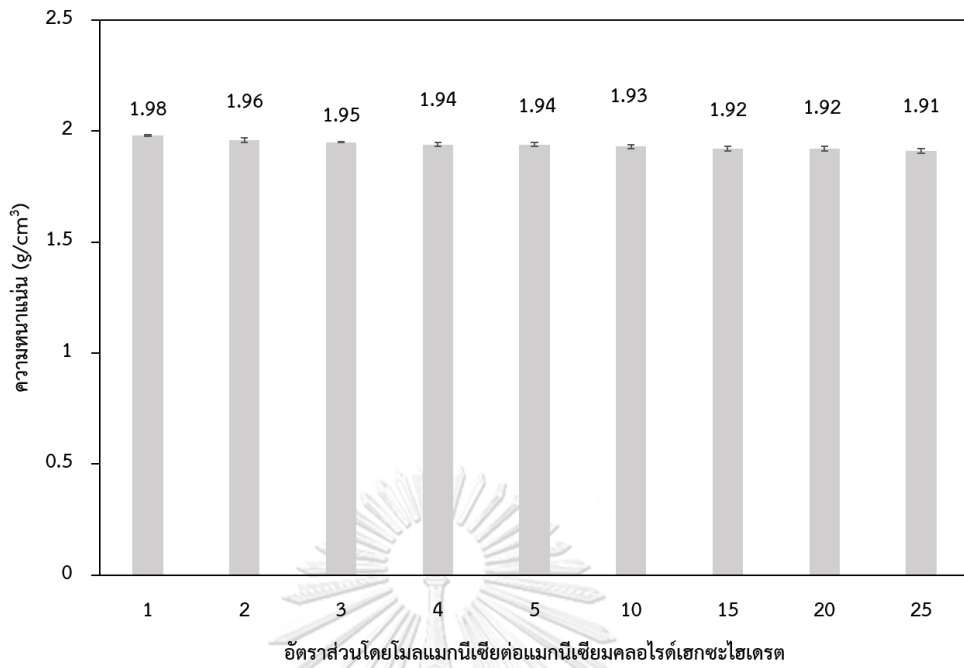
น้ำหนักที่สูญเสียไปจึงสัมพันธ์กับปริมาณของแมนนิซีมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่ใส่ในส่วนผสม ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมนนิโตลต่อแมนนิซีมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตลดลงเท่ากับในส่วนผสมมีปริมาณแมนนิซีมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมากขึ้น จึงทำให้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผามีค่าสูงขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

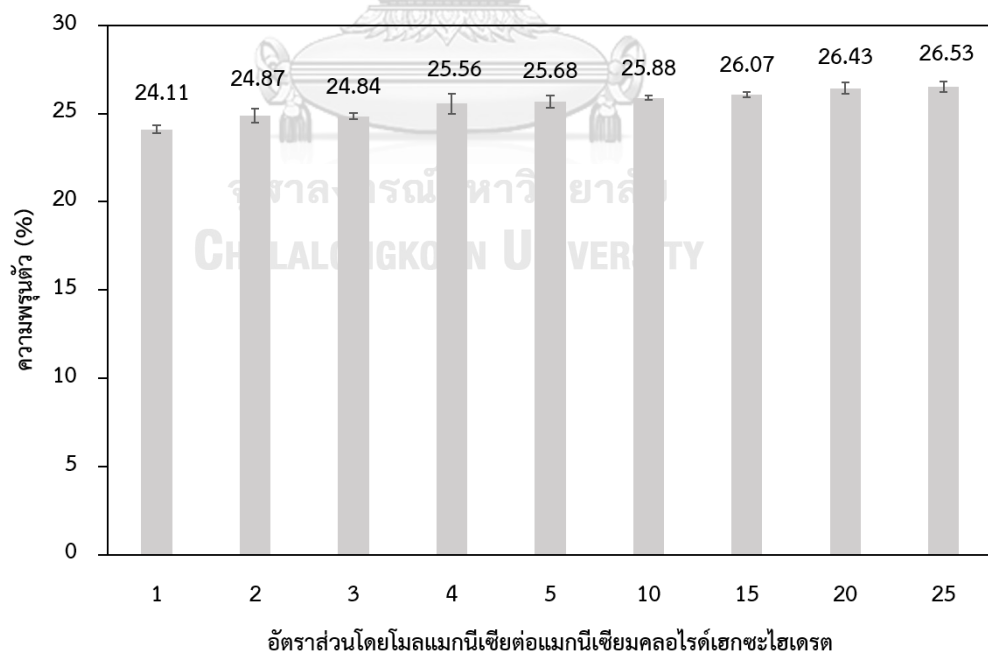
Chulalongkorn University

4.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมนนิซีมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

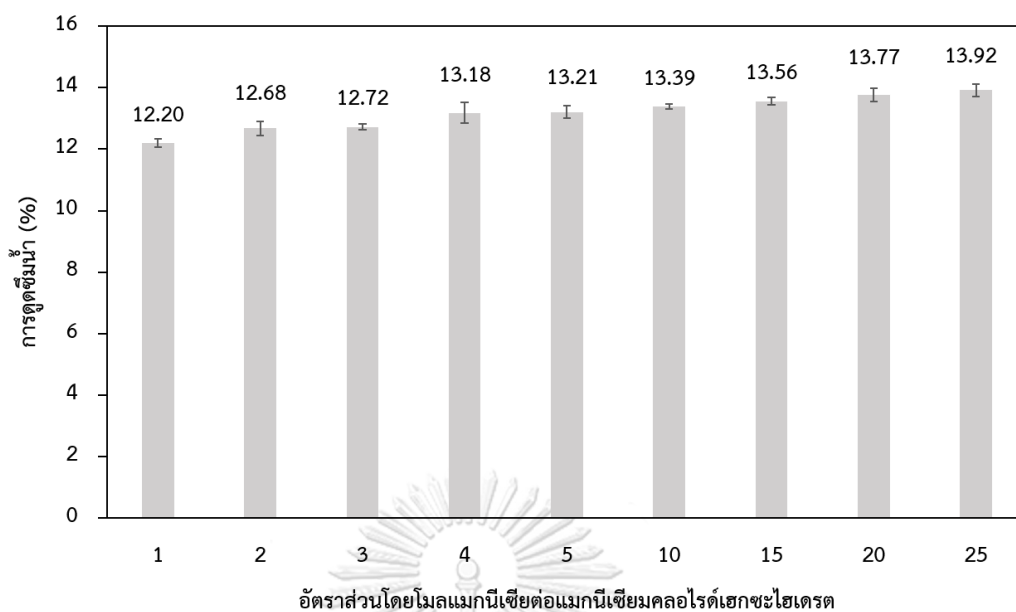
ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมนนิโตลต่อแมนนิซีมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 ตามลำดับ พบว่าทุกอัตราส่วนโดยโมลแมนนิโตลต่อแมนนิซีมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมีค่าความหนาแน่น ร้อยละความพรุนตัว และร้อยละการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วนโดยโมลแมนนิโตลต่อแมนนิซีมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.98 g/cm^3 ส่งผลให้มีค่าร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับ 24.11 และ 12.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ



รูปที่ 4.18 ความพรุนตัวของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ



รูปที่ 4.19 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตต่าง ๆ

จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมากขึ้น ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมากขึ้น ในส่วนผสมจะมีปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการที่อนุภาคของแข็งในส่วนผสมจะสามารถเกิดการไหลตัวได้น้ำจะต้องไปห่อหุ้มบนผิวอนุภาคของแข็งจนทำให้อนุภาคสามารถไหลตัวได้ ดังนั้นเมื่อในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณน้ำในการห่อหุ้มผิวอนุภาคของแข็งเพื่อให้เกิดการไหลตัวได้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังตารางที่ 3.8 ในขณะที่เกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตจะละลายน้ำอยู่ในรูปของสารละลาย และเมื่อนำชิ้นงานไปอบและเผาที่อุณหภูมิสูง น้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหย เกิดเป็นรูพรุนภายในชิ้นงาน ส่งผลให้ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าสูงขึ้น แต่ความหนาแน่นลดลง เช่นเดียวกับเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต เท่ากับในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมน้อยลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานน้อยลง เมื่อน้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหยออกไป ทำให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงานน้อย ส่งผลให้ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง แต่ความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดหลังเผามีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.15

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติหลังเผาของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานพบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเพิ่มขึ้น ความต้านแรงดัดหลังเผาและความหนาแน่นมีค่าลดลง แต่ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเพิ่มขึ้นในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อนำชิ้นงานไปอบและเผาที่อุณหภูมิสูง น้ำเกิดการระเหยออกไป เกิดเป็นรูพรุนภายในชิ้นงาน ถ้าภายในชิ้นงานมีน้ำปริมาณมากก็จะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีปริมาณรูพรุนมาก ความพรุนตัวจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่ความหนาแน่นมีค่าลดน้อยลง ทำให้ความต้านแรงดัดหลังเผาของชิ้นงานมีค่าลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เกิดในช่องว่างระหว่างอนุภาค ซึ่งหลังจากการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เหล่านี้จะสลายตัวเป็นเฟสแมกนีเซียมซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ขึ้น นอกจากนี้เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมากขึ้น จะมีเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตส่วนเกินที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายสามารถแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนได้ เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง เกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตส่วนเกินเหล่านี้จะสลายตัวเป็นเฟสแมกนีเซียมซึ่งจะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ขึ้นเช่นกัน ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น มีความพรุนตัวลดน้อยลง ส่งผลให้ความต้านแรงดัดหลังเผามีค่าสูงขึ้น

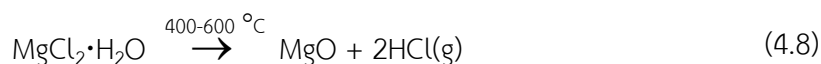
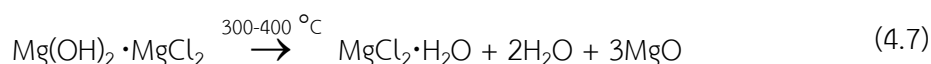
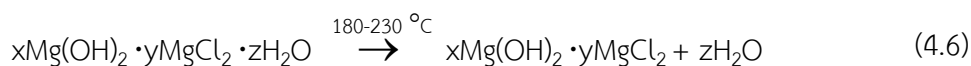
จากรูปที่ 4.13 ถึง 4.15 จะเห็นว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตลดลงหรือในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมีปริมาณมากขึ้น ความต้านแรงดัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตน้อยกว่า 3 จากการทดลองพบว่าชิ้นงานหลังหล่อแบบมีคราบเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเกาะบนชิ้นงานจำนวนมาก บ่งบอกถึงการมีปริมาณเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่มากเกินไป จึงเลือกเอาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 มาทำการศึกษาลักษณะเฉพาะต่อไป

4.2.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ผลการศึกษาขององค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าชิ้นงานหลังหล่อแบบที่อุณหภูมิห้อง ประกอบด้วยเฟสควอตซ์ มุลไลต์ คอรัันดัมเป็นเฟสหลัก และพบเฟสบรูไซต์เล็กน้อย โดยเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอรัันดัม มาจากวัตถุดิบที่ใส่ในส่วนผสมได้แก่ ทรายบด ดินขาวเผา และแคลไซต์อะลูมินา ตามลำดับ และเฟสบรูไซต์เกิดจากแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วไม่ถูกนำไปใช้ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตในปฏิกิริยาไฮเดรชัน^[44] ดังสมการที่ 4.2 เมื่อนำชิ้นงานไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่าเฟสบรูไซต์หายไป และพบเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ในรูปของเฟส 5-1-8 หรือ $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ เกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากเฟสบรูไซต์ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ ดังสมการที่ 4.5

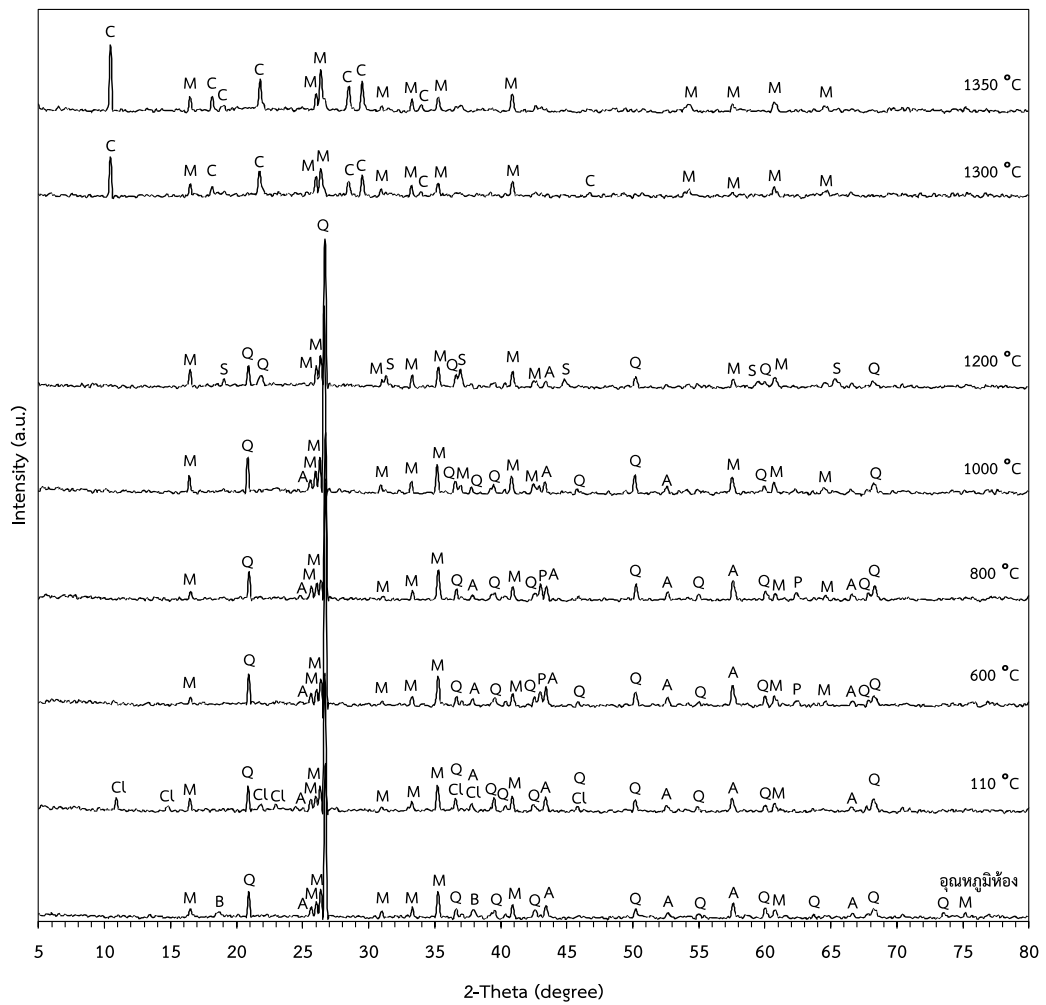


เมื่อนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส พบเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอรัันดัมเป็นเฟสหลัก นอกจากนี้พบเฟสเพอริเคลสซึ่งเกิดจากการสลายตัวของแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เกิดการสลายตัวเป็นแมกนีเซียม โดยปฏิกิริยาการสลายตัวของแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์แล้วเกิดเฟสเพอริเคลสเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น^[55] แสดงดังสมการที่ 4.6 ถึง 4.8



เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอรัันดัมเป็นเฟสหลัก และพบเฟสสปิเนลซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของแมกนีเซียมกับอะลูมินา ดังสมการที่ 4.2 เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส พบเพียงเฟสคอร์เดียไรต์และมุลไลต์ ในขณะที่เฟสควอตซ์ สปิเนลและคอรัันดัมหายไป แสดงถึงว่าเฟสเหล่านี้เกิดการทำปฏิกิริยากันเกิดเป็น

เฟสคอร์เดียไรต์ ดังสมการที่ 4.3 และที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส มีเพียงเฟสคอร์เดียไรต์และมุลไลต์เช่นกัน โดยความสูงของพีคของทั้งสองเฟสนี้สูงขึ้นกว่าที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส

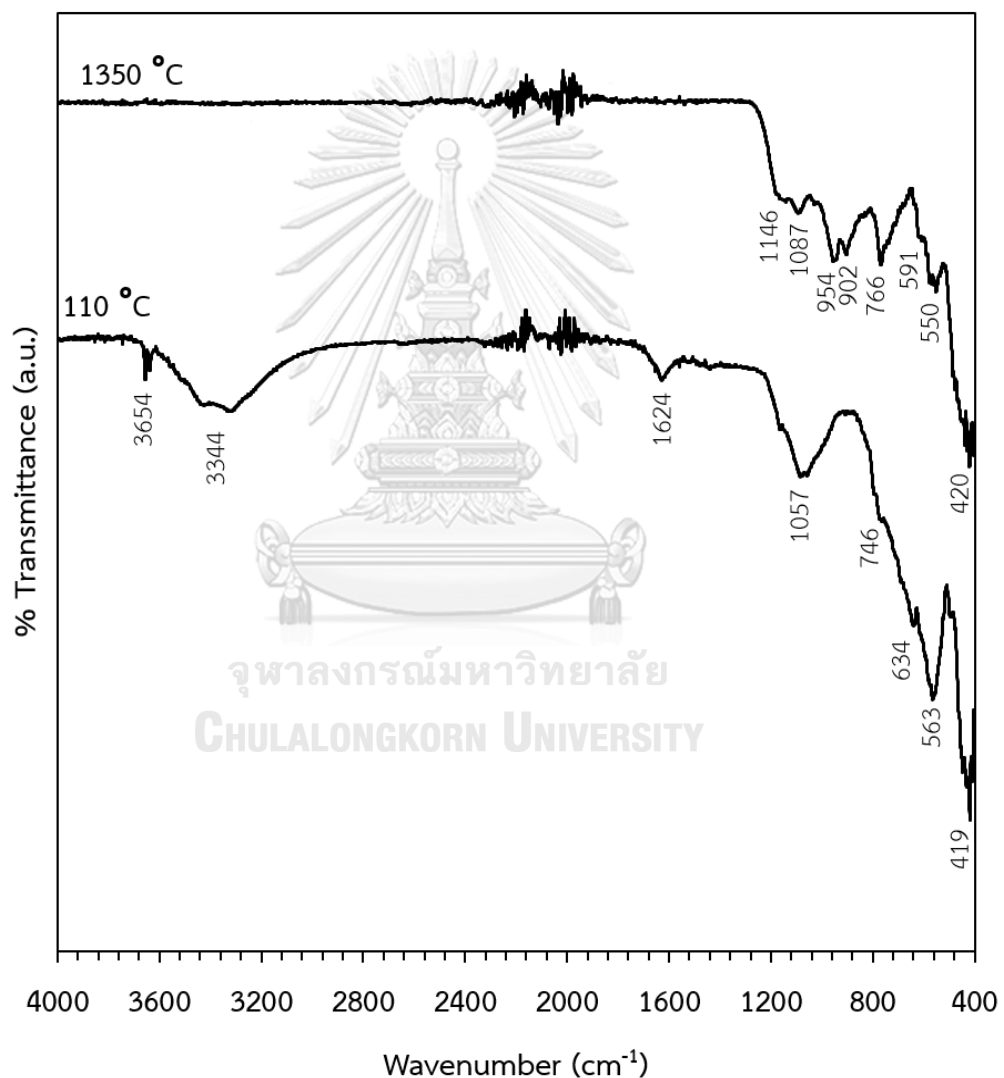


A = corundum (Al_2O_3), B = brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), C = cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$), Cl = $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, P = periclase (MgO), Q = quartz (SiO_2), M = mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), S = spinel (MgAl_2O_4)

รูปที่ 4.20 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานคอนกรีตที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.2.5 ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3

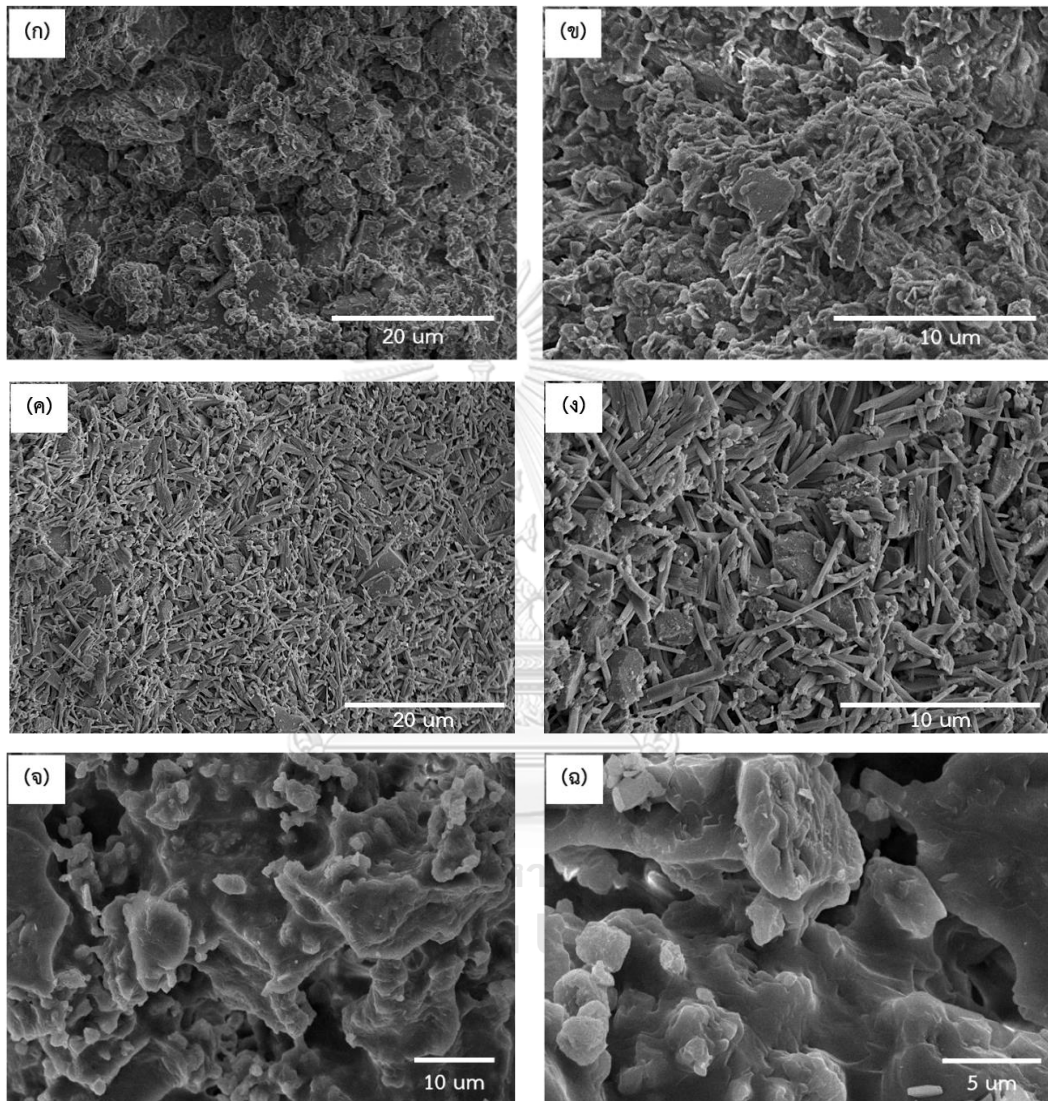
พบว่าชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสมีแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งประมาณ 3654 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H ในเฟส 5-1-8 หรือ $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ^[55] จากรูปที่ 4.20 จึงยืนยันได้ว่าเกิดเฟส 5-1-8 ขึ้นจริงในชิ้นงานหลังอบ ที่ตำแหน่งประมาณ 3344 และ 1624 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H ในโมเลกุลของน้ำ ที่ตำแหน่งประมาณ 1168 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ Cl-O ในแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์ โดยแถบการดูดกลืนเหล่านี้บ่งบอกถึงการมีเฟสซีเมนต์ในชิ้นงาน เนื่องจากรูปแบบของเฟสแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์ ประกอบด้วยพันธะของแมกนีเซียม แมกนีเซียมคลอไรด์ และน้ำ ที่ตำแหน่งประมาณ 1057 และ 746 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O ในทรายบด ที่ตำแหน่งประมาณ 634 และ 563 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ Al-O ในแคลไซต์อะลูมินา และที่ตำแหน่งประมาณ 419 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ Mg-O ในแมกนีเซียม^[28, 55] เมื่อนำชิ้นงานมาเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส พบว่าแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3654 , 3344 และ 1624 cm^{-1} หายไป จากการสลายตัวของพันธะ O-H ในโมเลกุลของน้ำ และหมู่คลอไรด์ในแมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์สลายตัวเป็นแก๊สไฮโดรคลอริกระเหยออกไป ดังสมการที่ 4.5 นอกจากนี้เกิดแถบการดูดกลืนของวัตถุบดที่ตำแหน่งประมาณ 1146 , 1087 , 954 , 902 , 766 , 591 , 550 และ 420 cm^{-1} ซึ่งเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากตอนหลังอบเล็กน้อย โดยที่ตำแหน่ง 1087 , 954 , 766 , 550 และ 420 cm^{-1} ใกล้เคียงกับแถบการดูดกลืนของเฟสคอร์เตียไรต์^[50, 51] และที่ตำแหน่ง 1146 , 902 และ 591 cm^{-1} ใกล้เคียงกับแถบการดูดกลืนของเฟสมุลไลต์^[52, 53] จึงเป็นการยืนยันได้ว่าวัตถุบดเกิดการทำปฏิกิริยากันแล้วเปลี่ยนเป็นเฟสคอร์เตียไรต์และมุลไลต์ ดังรูปที่ 4.20

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซิคโลไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 แสดงดังรูปที่ 4.22 (ก-ฉ) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบ ดังรูปที่ 4.22 (ก) และ (ข) มีผลึกรูปแท่งเข็มขนาดเล็กเกาะอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคบางส่วน แต่เมื่อนำชิ้นงานไปอบแห้ง พบว่าผลึกรูปแท่งเข็มเหล่านี้มีขนาดใหญ่ขึ้นและไขว้ประสานกันระหว่างอนุภาค ดังรูปที่ 4.22 (ค) และ (ง) เนื่องจากเมื่ออบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส น้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหย ส่งผลให้ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์มากขึ้น จนสามารถเกิดการตกผลึกออกมา

ได้ในปริมาณมากขึ้น ทำให้สามารถเห็นผลึกรูปแท่งเข็มเหล่านี้ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ
ชิ้นงานหลังหล่อแบบ โดยผลึกรูปเข็มนี้เป็นลักษณะเฉพาะของเฟสแมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์^[56]

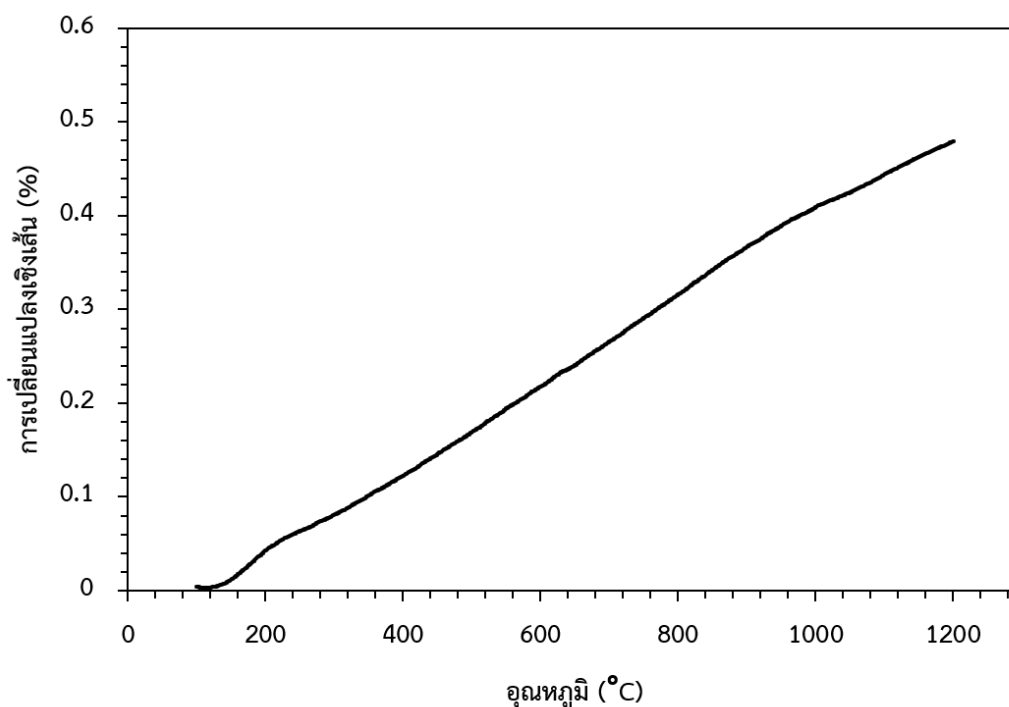


รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า
ชิ้นงานหลังอบที่กำลังขยาย (ค) 2000 เท่า (ง) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังเผาที่กำลังขยาย
(จ) 2000 เท่า (ฉ) 5000 เท่า ที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่
อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3

จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสดังรูปที่ 4.20 จึงยืนยันได้ว่าผลึกแท่งเข็มนี้อยู่ในรูปของเฟส 5-1-8 หรือ $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ จะเห็นได้ว่าผลึกแท่งเข็มสานไขว้กันไปมาระหว่างอนุภาคและยึดอนุภาคเข้าไว้ด้วยกัน จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงพบว่าผลึกแท่งเข็มหายไป อนุภาคเกิดการเชื่อมประสานกันเองหลังจากเกิดการเผาผนึก โดยส่วนอนุภาคหยาบหรือเฟสมุลไลต์จะฝังตัวอยู่ในส่วนเนื้อละเอียดหรือเฟสคอร์เดียไรต์ซึ่งเชื่อมยึดอนุภาคเข้าไว้ด้วยกัน^[54] ดังรูปที่ 4.22 (จ) และ (ฉ)

4.2.7 ผลการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 แสดงดังรูปที่ 4.23 โดยชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนเป็นชิ้นงานหลังเผาซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที จากการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ชิ้นงานเกิดการขยายตัวมากขึ้น จนถึงที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ชิ้นงานยังคงไม่เกิดการหลอม และจากกราฟในช่วงอุณหภูมิ 1000 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานเกิดการหดตัวเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเผาผนึกที่ยังไม่สมบูรณ์จากการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียสในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง และเมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 3.80×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3

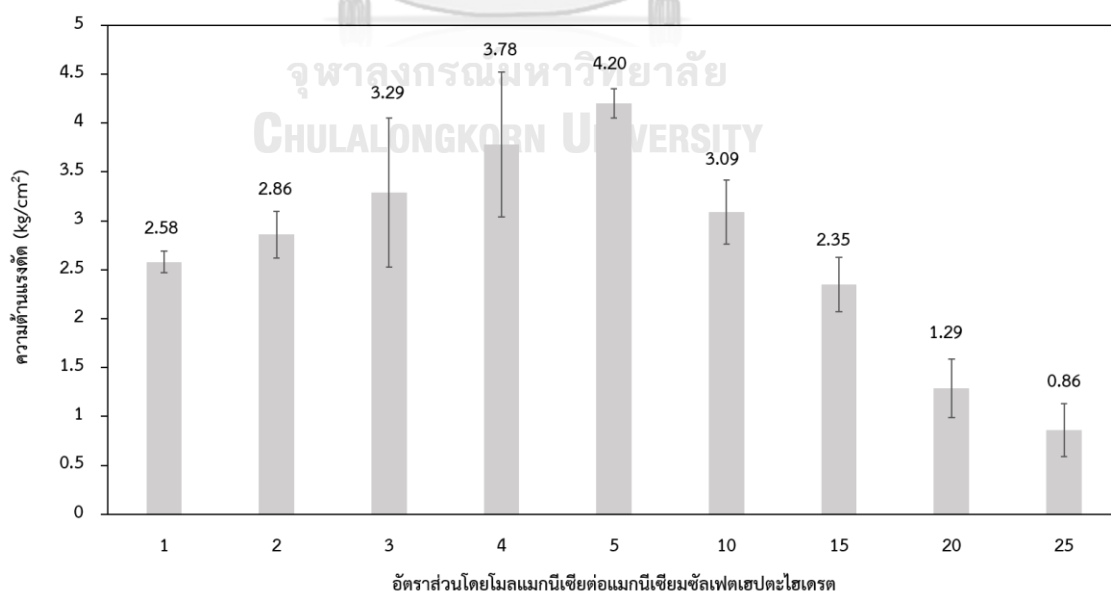
4.3 ผลการศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

4.3.1 ผลการทดสอบความต้านแรงดัดของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

4.3.1.1 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลิเกตเฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลิเกตเฮกซะไฮเดรตลดลง ความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนถึงที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลิเกตเฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 5 มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 4.20 kg/cm^2 และเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลิเกตเฮกซะไฮเดรตลงจากนี้ความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบมีค่าลดลง คาดว่าความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมกับแมกนีเซียมซิลิเกตเฮกซะไฮเดรต

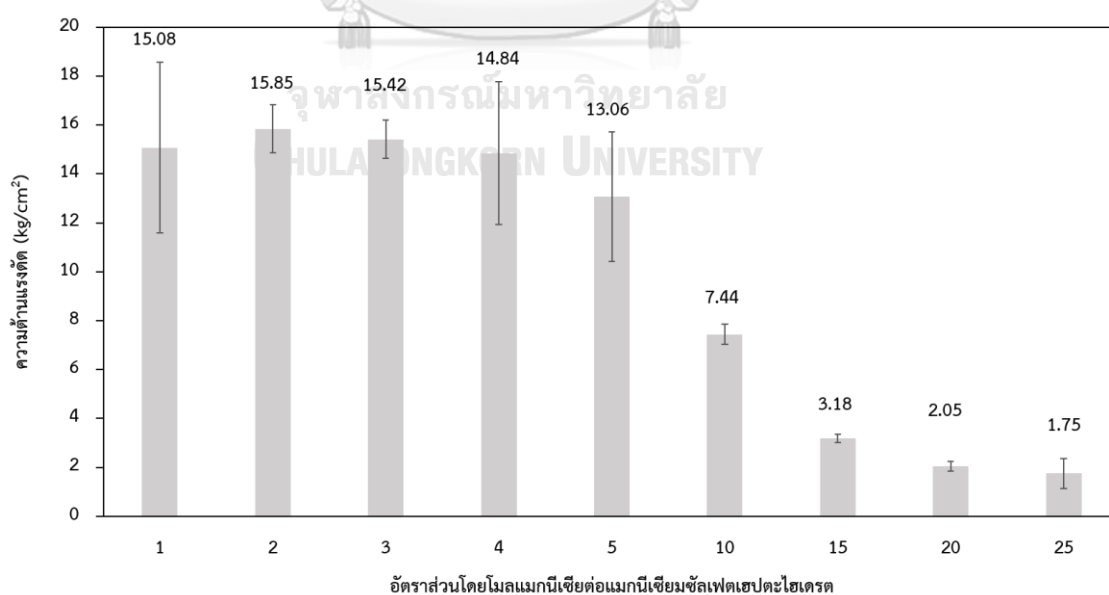
เกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสานช่วยให้เกิดความแข็งแรงภายในชิ้นงาน ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลเฟตเฮปตะไฮเดรตลดลง ปริมาณแมกนีเซียมซิลเฟตเฮปตะไฮเดรตในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์ได้ในปริมาณมากขึ้น แต่เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลเฟตเฮปตะไฮเดรตน้อยเกินไป มีปริมาณแมกนีเซียมซิลเฟตเฮปตะไฮเดรตในส่วนผสมมากเกินไป ในขณะที่แมกนีเซียมมีปริมาณน้อยลง ทำให้ปริมาณเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์เกิดได้น้อยลง ส่งผลให้ความต้านแรงดัดมีค่าลดลง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟที่เกาะบนชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 1 และ 2 ซึ่งบ่งบอกถึงการมีปริมาณเกลือแมกนีเซียมซิลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่มากเกินไปและไม่ได้ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมจนเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์ อย่างไรก็ตามความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบอาจเกิดจากเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์ที่เกิดขึ้นบางส่วน เนื่องจากชิ้นงานถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องเพียง 1 วัน อาจทำให้ปฏิกิริยาในการเกิดเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์มีเวลาไม่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์และตกผลึกเฟสซีเมนต์ออกมาได้ในปริมาณมาก แต่อย่างไรก็ตามความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบของทุกอัตราส่วนยังคงอยู่ในระดับที่ชิ้นงานสามารถถอดแบบและเคลื่อนย้ายได้โดยชิ้นงานไม่เกิดการแตกหักเสียหาย



รูปที่ 4.24 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ

4.3.1.2 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

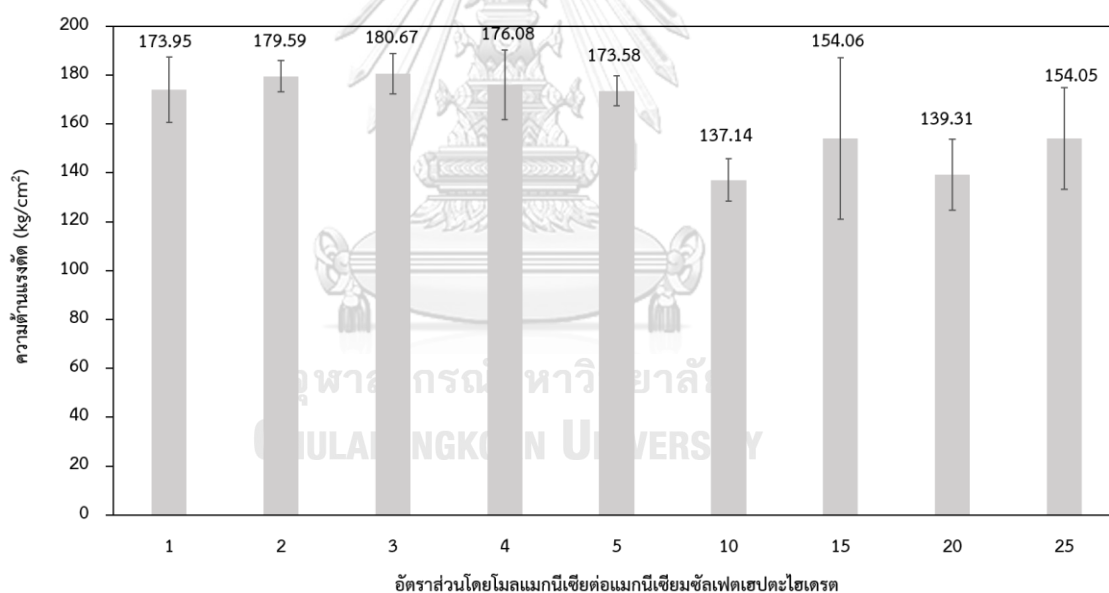
ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตลดลง ความต้านแรงดัดหลังอบมีค่าสูงขึ้นจนถึงที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตเท่ากับ 2 มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 15.85 kg/cm^2 และเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตเท่ากับ 1 ความต้านแรงดัดหลังอบมีค่าลดลง คาดว่าความต้านแรงดัดหลังอบมาจากเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์และมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหลังหล่อแบบ เนื่องจากเมื่ออบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส น้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหยออกไป ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตสูงขึ้น และสามารถตกผลึกเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ออกมาได้ในปริมาณมากขึ้น ถ้าลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตน้อยเกินไป ในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตมากขึ้นในขณะที่มีปริมาณแมกนีเซียมน้อยลง ทำให้มีแมกนีเซียมไปทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตแล้วเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ได้น้อยลง ส่งผลให้ความต้านแรงดัดหลังอบมีค่าลดลง



รูปที่ 4.25 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังอบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตต่าง ๆ

4.3.1.3 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

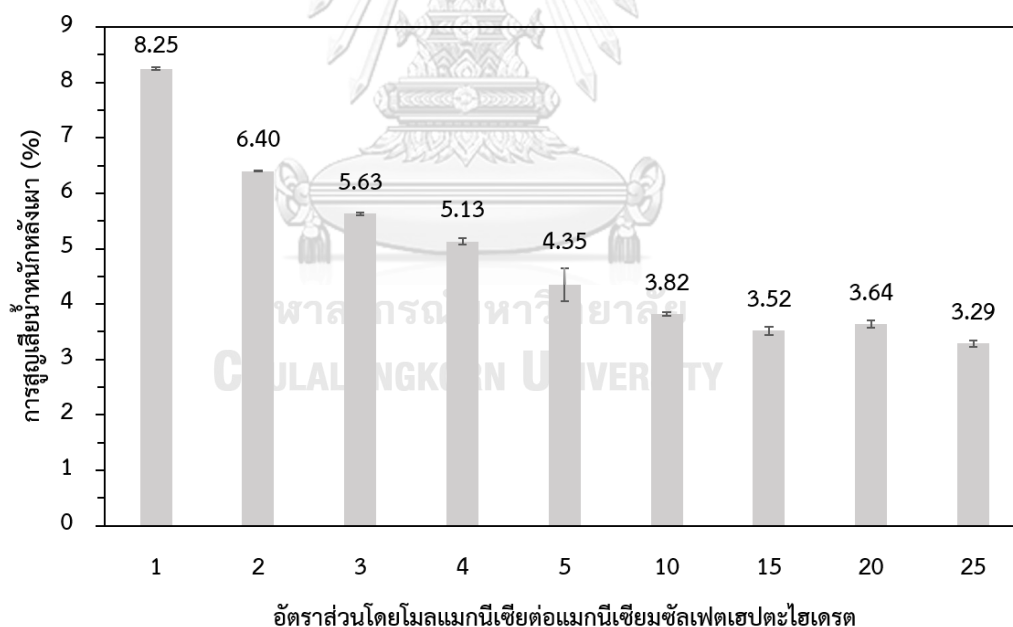
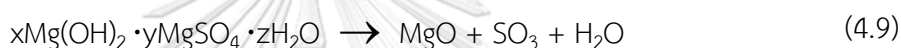
ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซีลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.26 โดยชิ้นงานหลังเผาสามารถเตรียมได้จากการนำชิ้นงานหลังอบมาผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซีลเฟตเฮปตะไฮเดรตลดลง ความต้านแรงดัดหลังเผา มีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซีลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 มีค่าความต้านแรงดัดสูงสุดเท่ากับ 180.67 kg/cm^2 และเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซีลเฟตเฮปตะไฮเดรตลงจากนี้ค่าความต้านแรงดัดมีค่าลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.26 ความต้านแรงดัดของชิ้นงานหลังเผาที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซีลเฟตเฮปตะไฮเดรตต่าง ๆ

4.3.2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซิซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

การสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตลดลง ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผามีค่าสูงขึ้น โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตเท่ากับ 1 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผาสูงสุดเท่ากับ 8.25 ซึ่งน้ำหนักที่สูญเสียไปหลังจากการเผาเกิดจากการสลายตัวของแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นหลัก นอกจากนี้ยังรวมถึงน้ำในโครงสร้างผลึกของเฟสแมกนีเซียมออกซิซัลเฟตซีเมนต์ด้วย โดยแมกนีเซียมซัลเฟตเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส^[42] ดังสมการที่ 4.9



รูปที่ 4.27 การสูญเสียน้ำหนักหลังเผาของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตต่าง ๆ

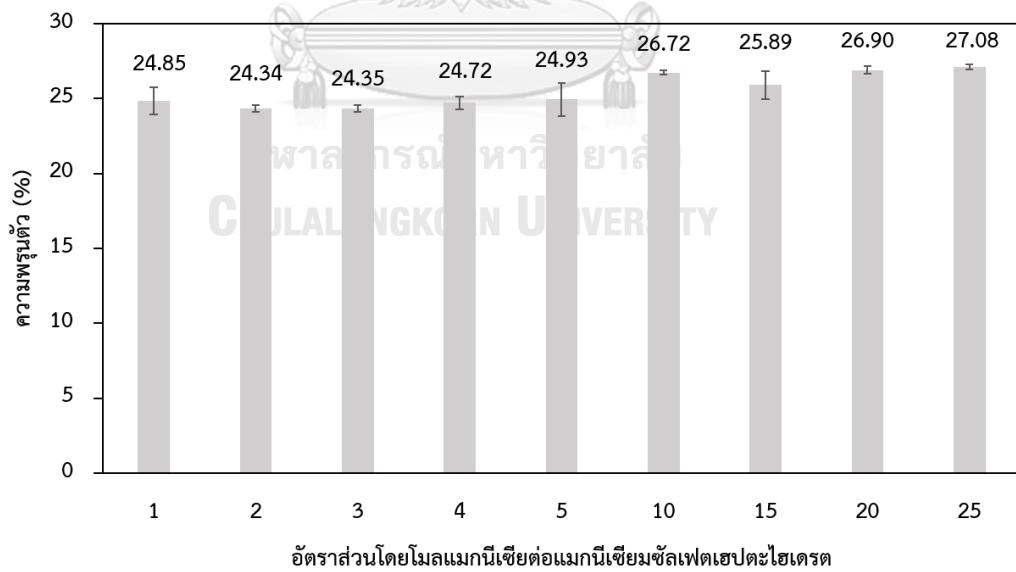
น้ำหนักที่สูญเสียไปจึงสัมพันธ์กับปริมาณของแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่ใส่ในส่วนผสม ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตลดลงหรือในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมากขึ้น ทำให้ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังเผามีค่าสูงขึ้น

4.3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซิซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

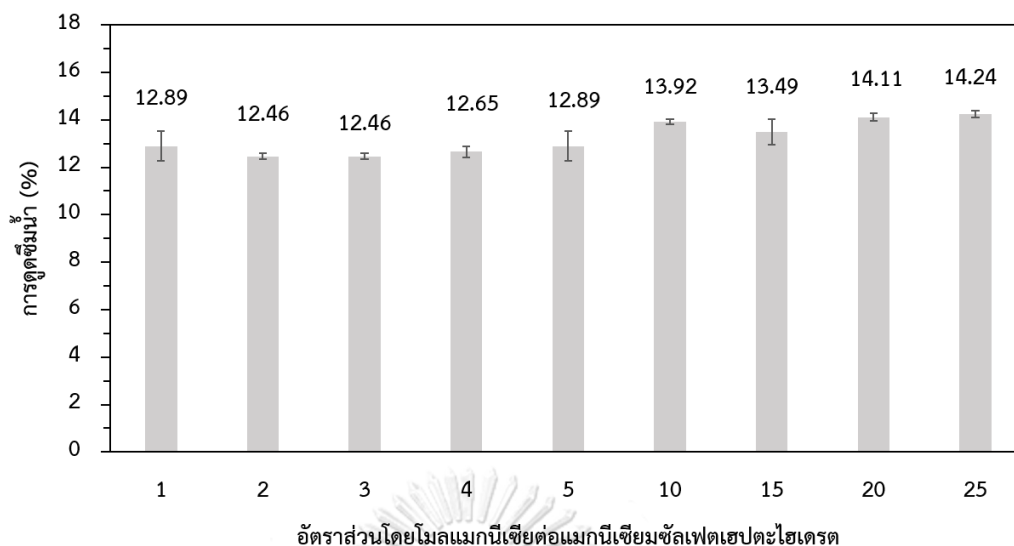
ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 แสดงดังรูปที่ 4.28 ถึง 4.30 ตามลำดับ พบว่าทุกอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมีค่าความหนาแน่น ร้อยละความพรุนตัว และร้อยละการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน โดยที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 2, 3 และ 4 มีค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 1.95 g/cm^3 ส่งผลให้มีค่าร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำต่ำ โดยที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 มีค่าร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับ 24.35 และ 12.46 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมากขึ้น ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมากขึ้น ในส่วนผสมจะมีปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณน้ำในการขึ้นรูปชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังตารางที่ 3.9 และเมื่อนำชิ้นงานไปอบและเผาที่อุณหภูมิสูง น้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหย เกิดเป็นรูพรุนภายในชิ้นงาน ส่งผลให้ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าสูงขึ้น แต่ความหนาแน่นมีค่าลดลง เช่นเดียวกับเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ในส่วนผสมมีปริมาณแมกนีเซียมน้อยลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานน้อยลง เมื่อน้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหยออกไป ทำให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงานน้อย ส่งผลให้ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง แต่ความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลทำให้ความต้านแรงดัดหลังเผามีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.28 ความหนาแน่นของชิ้นงานหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตต่าง ๆ



รูปที่ 4.29 ความพรุนตัวของชิ้นงานหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮดรตต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 การดูดซึมน้ำของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติหลังเผาของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานพบว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ความต้านแรงดัดหลังเผาและความหนาแน่นมีค่าลดลง แต่ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ปริมาณแมกนีเซียมในส่วนผสมจะมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการขึ้นรูปมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อนำชิ้นงานไปอบและเผาที่อุณหภูมิสูง น้ำเกิดการระเหยออกไป เกิดเป็นรูพรุนภายในชิ้นงาน ถ้าภายในชิ้นงานมีน้ำปริมาณมากก็จะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีปริมาณรูพรุนมาก นั่นคือความพรุนตัวจะมีค่าสูงขึ้น แต่ความหนาแน่นมีค่าลดลง ทำให้ความต้านแรงดัดหลังเผาของชิ้นงานมีค่าลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าเฟสซีเมนต์เกิดในช่องว่างระหว่างอนุภาค ทำให้โครงสร้างมีความพรุนตัวน้อยลง ส่งผลให้ความต้านแรงดัดหลังเผามีค่าสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.25 ถึง 4.27 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตลดลงหรือในส่วนผสมปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตมากขึ้น ความต้านแรงดัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตน้อยกว่า 3 จากการทดลองพบว่าชิ้นงานหลังหล่อแบบมีคราบเกลือแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตเกาะบนชิ้นงานจำนวนมาก บ่งบอกถึงการมีปริมาณเกลือแมกนีเซียมซัลเฟต

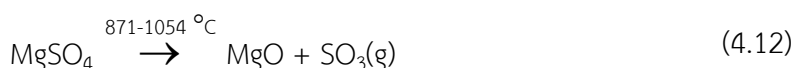
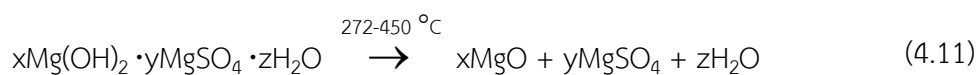
เฮปตะไฮเดรตที่มากเกินไป จึงเลือกเอาชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 มาทำการศึกษาลักษณะเฉพาะต่อไป

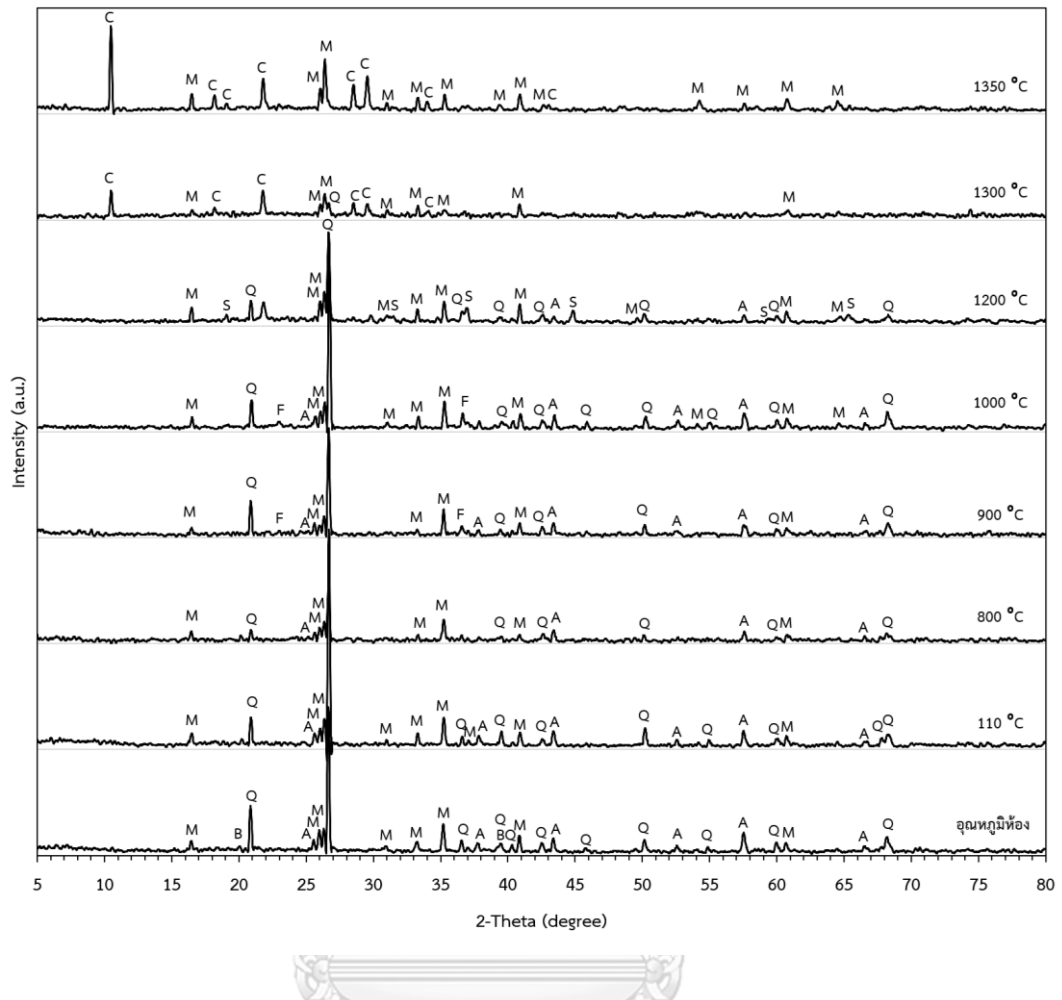
4.3.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ผลการศึกษาองค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่าชิ้นงานหลังหล่อแบบที่อุณหภูมิห้อง ประกอบด้วยเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอร์รันดัมเป็นเฟสหลัก และพบเฟสบรูไซต์เล็กน้อย โดยเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอร์รันดัม มาจากวัสดุดิบที่ใส่ในส่วนผสมได้แก่ ทรายบด ดินขาวเผา และแคลไซต์อะลูมินา ตามลำดับ และเฟสบรูไซต์เกิดจากแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วไม่ถูกนำไปใช้ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตในปฏิกิริยาไฮเดรชัน^[44] ดังสมการที่ 4.1 เมื่อนำชิ้นงานไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส พบว่ามีเพียงเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอร์รันดัม ในขณะที่เฟสบรูไซต์หายไป ซึ่งอาจเกิดจากเฟสบรูไซต์ไปทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ ดังสมการที่ 4.10



ต่อมาเมื่อนำชิ้นงานไปเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบเฟสควอตซ์ มุลไลต์ และคอร์รันดัมเป็นเฟสหลัก และพบเฟสพอร์สโตไรต์ ซึ่งเกิดจากแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับซิลิกา โดยแมกนีเซียมเกิดจากการสลายตัวของแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เกิดการสลายตัวเป็นแมกนีเซียม^[42] โดยปฏิกิริยาการสลายตัวของแมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์แล้วเกิดเฟสพอร์สโตไรต์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น^[57] แสดงดังสมการที่ 4.11 ถึง 4.13 ตามลำดับ





A = corundum (Al_2O_3), B = brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), C = cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$),

F = forsterite (Mg_2SiO_4), Q = quartz (SiO_2), M = mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$),

S = spinel (MgAl_2O_4)

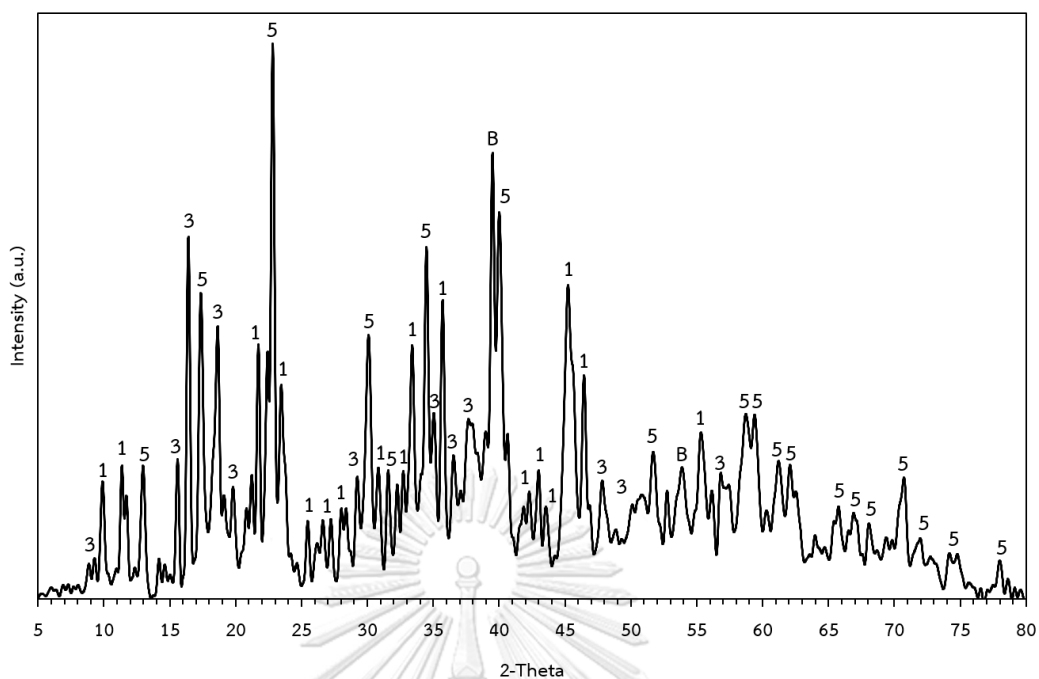
รูปที่ 4.31 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าเฟสฟอร์สเตอร์ไรต์หายไปและเกิดเฟสสปิเนลขึ้น ซึ่งเฟสสปิเนลเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมกับอะลูมินา ดังสมการที่ 4.14



และเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส พบเพียงเฟสคอร์เดียไรต์และมุลไลต์ ในขณะที่เฟสควอตซ์ สปิเนลและคอร์รันดัมหายไป แสดงถึงว่าเฟสเหล่านี้เกิดการทำให้ปฏิกิริยากันเกิดเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ ดังสมการที่ 4.3 และที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส มีเพียงเฟสคอร์เดียไรต์และมุลไลต์เช่นกัน โดยความสูงของพีคของทั้งสองเฟสนี้สูงขึ้นกว่าที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.31 จะเห็นว่าไม่พบเฟสแมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสานที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากชิ้นงานถูกบ่มที่อุณหภูมิห้องเพียง 1 วัน ทำให้เวลาในการปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อการตกผลึกของเฟสแมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์ได้ในปริมาณมาก เฟสแมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์ที่เกิดขึ้นจึงอาจมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน เพื่อให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาที่ชัดเจนมากขึ้น จึงนำเฉพาะส่วนละเอียดซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมาทำการผสมกันแล้วบ่มเป็นเวลา 28 วัน เพื่อให้เฟสแมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์มีเวลาเพียงพอในการตกผลึกออกมาในปริมาณมากขึ้น องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานเฉพาะส่วนละเอียดที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานหลังบ่ม 28 วัน แสดงดังรูปที่ 4.32 พบเฟสแมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์ ได้แก่ เฟส 1-1-5 หรือ $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, เฟส 3-1-8 หรือ $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, และ เฟส 5-1-3 หรือ $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ แสดงให้เห็นว่าเมื่อชิ้นงานถูกบ่มเป็นเวลานานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยามีเวลาเพียงพอในการตกผลึกเฟสแมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์ออกมาได้มากขึ้น จึงสามารถพบพีคของเฟสแมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์ได้ชัดเจนขึ้น นอกจากนี้ยังพบเฟสบรูไซต์ซึ่งเกิดจากแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วไม่ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันกับแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเพื่อเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกไซด์เฟตซีเมนต์



1 = $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 3 = $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$,

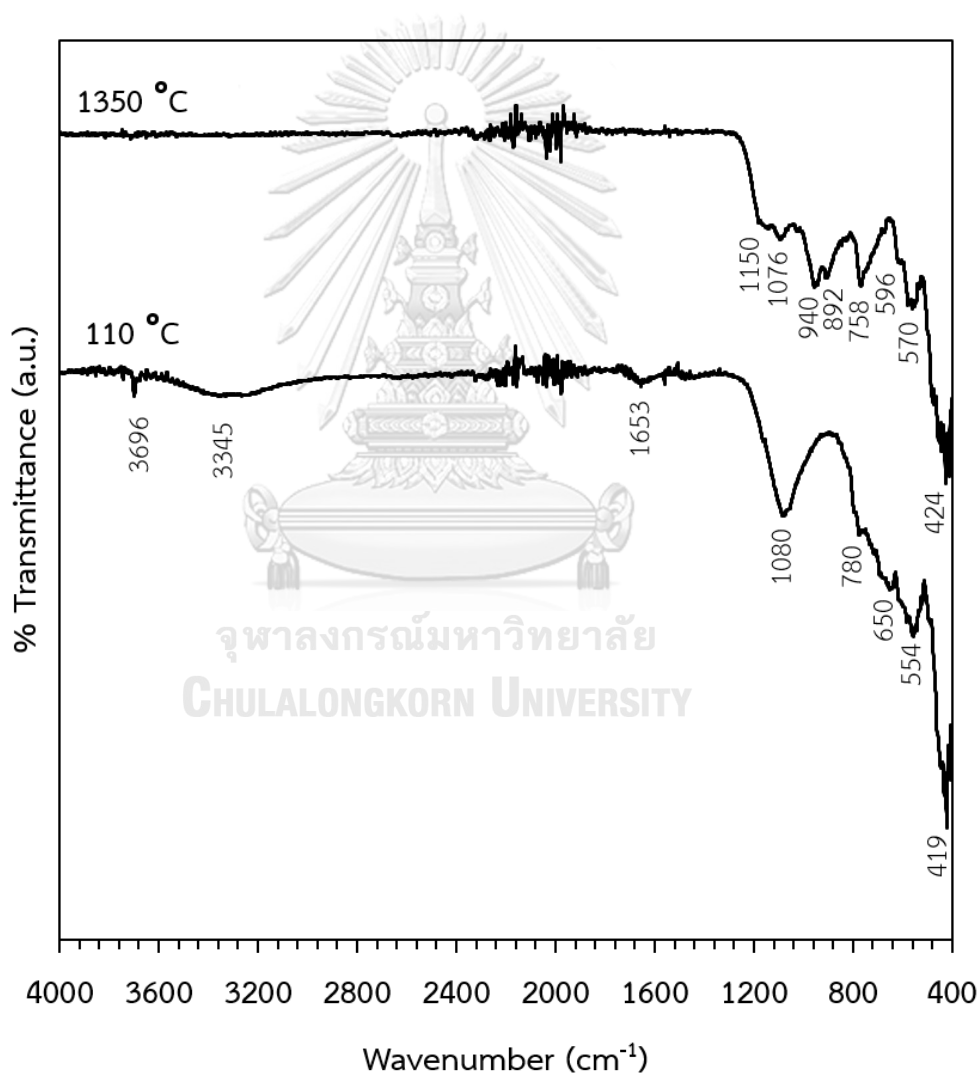
5 = $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, B = brucite

รูปที่ 4.32 องค์ประกอบเฟสของชิ้นงานเฉพาะส่วนละเอียดที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานหลังบ่ม 28 วัน

4.3.5 ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

ผลการวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 แสดงดังรูปที่ 4.33 พบว่าชิ้นงานหลังอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสมีแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งประมาณ 3696, 3345 และ 1653 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดและแบบงอของพันธะ O-H ในโมเลกุลของน้ำตามลำดับ ที่ตำแหน่งประมาณ 1080 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ S-O ในแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์^[43] ที่ตำแหน่งประมาณ 780 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะ Si-O ในทรายบด ที่ตำแหน่งประมาณ 650 และ 554 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ Al-O ในแคลไซต์อะลูมินา และที่ตำแหน่งประมาณ 419 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของพันธะ Mg-O เมื่อนำชิ้นงานมาเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียสพบว่าแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3696, 3345 และ 1653 cm^{-1} หายไป จากการสลายตัวของพันธะ

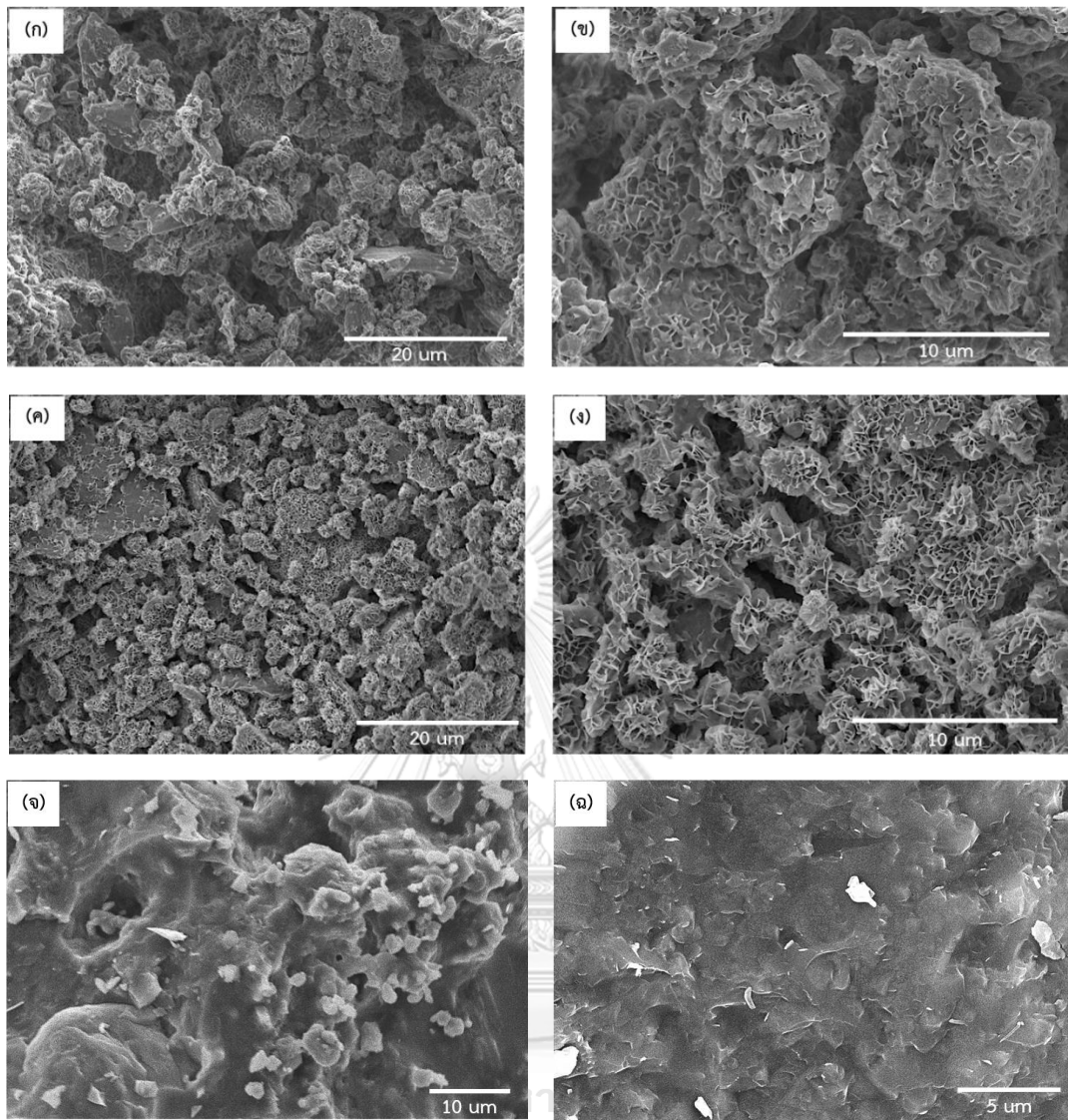
O-H ในโมเลกุลของน้ำ และหมู่ซัลเฟตในแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์สลายตัวออกไปดังสมการที่ 4.10 นอกจากนี้เกิดแถบการดูดกลืนของวัตถุบิที่ตำแหน่งประมาณ 1-1-50, 1076, 940, 892, 758, 596, 570 และ 424 cm^{-1} ซึ่งเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งไปจากตอนหลังอบเล็กน้อย โดยที่ตำแหน่ง 1076, 940, 758, 570 และ 424 cm^{-1} ใกล้เคียงกับแถบการดูดกลืนของเฟสคอร์เตียไรต์^[50, 51] และที่ตำแหน่ง 1-1-50, 892 และ 596 cm^{-1} ใกล้เคียงกับแถบการดูดกลืนของเฟสมุลไลต์^[52, 53] จึงเป็นการยืนยันได้ว่าวัตถุบิเกิดการทำปฏิกิริยากันแล้วเปลี่ยนเป็นเฟสคอร์เตียไรต์และมุลไลต์ ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.33 การวิเคราะห์พันธะทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมซัลเฟตไฮเดรตเท่ากับ 3

4.3.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

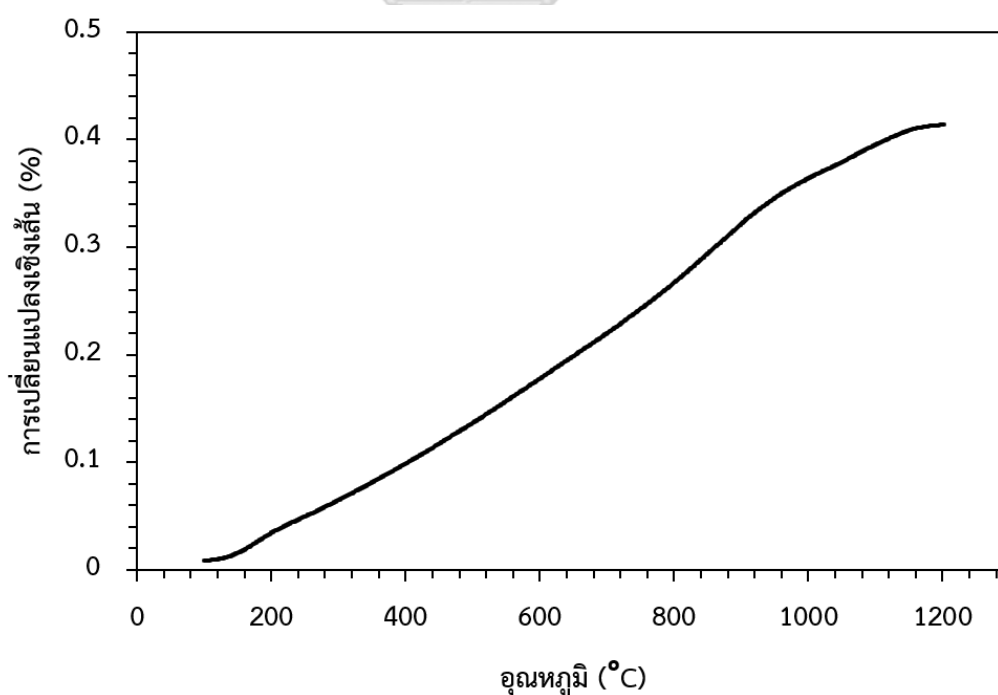
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 แสดงดังรูปที่ 4.34 (ก-ฉ) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบ มีผลึกลักษณะเป็นแผ่นปกคลุมอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคบางส่วน ดังรูปที่ 4.34 (ก) และ (ข) แต่เมื่อนำชิ้นงานไปอบแห้งพบว่าผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นเหล่านี้สามารถเห็นได้ชัดเจนมากขึ้น ดังรูปที่ 4.34 (ค) และ (ง) เนื่องจากเมื่ออบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส น้ำภายในชิ้นงานเกิดการระเหย ส่งผลให้ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตมากขึ้น จนสามารถเกิดการตกผลึกออกมาได้ในปริมาณมากขึ้น ทำให้สามารถเห็นผลึกเหล่านี้ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานหล่อแบบ โดยผลึกลักษณะเป็นแผ่นเช่นนี้เป็นลักษณะเฉพาะของเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์^[58] จะเห็นว่าผลึกเหล่านี้อัดตัวกันแน่นทำให้โครงสร้างมีความแน่นตัวมากขึ้น จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.25 และเมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงพบว่าผลึกที่มีลักษณะเป็นแผ่นเหล่านี้หายไป อนุภาคเกิดการเชื่อมประสานกันเองหลังจากเกิดการเผาผนึก โดยส่วนอนุภาคหยาบหรือเฟสมูลไคต์จะฝังตัวอยู่ในส่วนเนื้อละเอียดหรือเฟสคอร์เดียไรต์ซึ่งเชื่อมยึดอนุภาคเข้าไว้ด้วยกัน^[54] ดังรูปที่ 4.34 (จ) และ (ฉ)



รูปที่ 4.34 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังหล่อแบบที่กำลังขยาย (ก) 2000 เท่า (ข) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังอบที่กำลังขยาย (ค) 2000 เท่า (ง) 5000 เท่า ชิ้นงานหลังเผาที่กำลังขยาย (จ) 2000 เท่า (ฉ) 5000 เท่า ที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลิเกตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3

4.3.7 ผลการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมซิลิเกตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 แสดงดังรูปที่ 4.36 โดยชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนเป็นชิ้นงานหลังเผาซึ่งผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากการวิเคราะห์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ชิ้นงานเกิดการขยายตัวมากขึ้น จนถึงที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ชิ้นงานยังคงไม่เกิดการหลอม และจากกราฟในช่วงอุณหภูมิ 1000 ถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานเกิดการหดตัวเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเผาผนึกที่ยังไม่สมบูรณ์จากการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียสในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง และเมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 1000 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 3.94×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.35 การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียต่อแมกนีเซียมซิลิเกตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทางการค้ากับตัวอย่างที่เตรียมได้

สมบัติของตัวอย่างทางการค้าเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกต ไฮเดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่มีอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 แมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทางการค้ากับตัวอย่างที่เตรียมได้

สมบัติ	ตัวอย่างทางการค้าจากบริษัท Imerys Refractory ประเทศฝรั่งเศส ^[59]	ตัวอย่างทางการค้าจากบริษัท Yufeng Refractory ประเทศจีน ^[60]	ตัวอย่างทางการค้าจากบริษัท Patra Refractory ประเทศไทย ^[61]	ตัวอย่างที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	ตัวอย่างที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน	ตัวอย่างที่เตรียมโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน
ความต้านแรงดัด (kg/cm ²)	122.37	112.17	152.96	136.73	148.39	180.67
ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	1.84	2.2	2.20	2.01	1.95	1.95
ร้อยละความพรุนตัว (%)	27	22	20	22.45	24.84	24.35
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (x10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	2	3.2	4.5	4.50	3.80	3.94
องค์ประกอบทางเคมี (wt%)						
MgO	8	5	3		5.48	
Al ₂ O ₃	39	60	38		38.22	
SiO ₂	50	35	59		51.75	

เมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าความต้านแรงดัด ความหนาแน่น และความพรุนตัวของชิ้นงานที่เตรียมได้จากการใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานมีค่าใกล้เคียงอยู่ในช่วงของตัวอย่างทางการค้า อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมได้มีค่าสูงกว่าตัวอย่างทางการค้า เนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีส่วนผสมในการทดลองนี้มีปริมาณแมกนีเซียมน้อยกว่าและมีซิลิกามากกว่าในตัวอย่างทางการค้า ส่งผลให้เกิดเฟสคอร์เดียไรต์น้อยและเกิดเฟสมุลไลต์มากกว่า โดยเฟสมุลไลต์นี้เองมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนค่อนข้างสูงจึงส่งผลให้ชิ้นงานที่เตรียมจากการทดลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาชนิดของซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมที่นำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ ได้แก่ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ แมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ จากผลการทดลองพบว่าแมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์ และแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส ระหว่างการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส ซึ่งการสลายตัวของซีเมนต์ทั้งสองชนิดนี้จะมีปล่อยแก๊สออกมา โดยแมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส จะปล่อยแก๊สไฮโดรคลอริกออกมา เมื่อคำนวณส่วนผสมสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟจำนวน 1 ตัน พบว่าจะปล่อยแก๊สไฮโดรคลอริกออกมาประมาณ 24.10 กิโลกรัม และสำหรับแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีการปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ออกมาซึ่งเมื่อรวมตัวกับน้ำจะเกิดเป็นกรดซัลฟิวริก เมื่อคำนวณส่วนผสมสำหรับการเตรียมคอนกรีตทนไฟจำนวน 1 ตัน พบว่าจะปล่อยแก๊สซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ออกมาประมาณ 27.20 กิโลกรัม จะเห็นได้ว่าการปลดปล่อยแก๊สเหล่านี้ซึ่งเป็นไอกรดอันตรายส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ในกระบวนการผลิตต้องมีระบบในการบำบัดแก๊สพิษเหล่านี้ก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม สำหรับการใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานพบว่า ส่วนผสมมีลักษณะค่อนข้างเหนียว ทำให้เมื่อเทหล่อแบบขึ้นรูปชิ้นงานในแม่แบบได้ค่อนข้างยากและขอบมุมของชิ้นงานไม่ค่อยมีความเหลี่ยมคมชัด แต่อย่างไรก็ตามสามารถเติมสารช่วยกระจายตัว (dispersant) เพื่อให้ส่วนผสมมีการกระจายตัวและสามารถไหลตัวได้ดีขึ้น และนอกจากนี้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ไม่มีการสลายตัวเป็นแก๊สที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย ดังนั้นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์จึงมี

ความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาชนิดและอัตราส่วนผสมของซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ โดยทำการทดสอบความต้านแรงดัด การสูญเสียน้ำหนักหลังเผา ความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ วิเคราะห์องค์ประกอบเฟส พันธะทางเคมี โครงสร้างจุลภาค และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของชิ้นงานที่เตรียมขึ้นได้ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ พบว่าสามารถเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานได้ โดยซิลิกาฟุ่มจะทำปฏิกิริยากับเฟสเบรู่ไซต์ซึ่งเกิดจากแมกนีเซียมทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสานช่วยให้เกิดความแข็งแรงหลังหล่อแบบภายในชิ้นงานได้ เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เฟสแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เกิดการสลายตัวเป็นเฟสสปิเนลแล้วไปทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมกลายเป็นเฟสคอร์เดียไรต์เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส นอกจากนี้อนุภาคซิลิกาฟุ่มซึ่งมีขนาดเล็กสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างอนุภาคหยาบส่งผลให้ชิ้นงานมีความพรุนตัวลดลง และมีความหนาแน่นสูงขึ้น โดยเมื่ออัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาลดลง สมบัติทางกายภาพของชิ้นงานดีขึ้น โดยชิ้นงานที่เตรียมอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อซิลิกาเท่ากับ 1 มีสมบัติทางกายภาพดีที่สุด โดยมีค่าความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบหลังอบ และหลังเผาสูงที่สุดเท่ากับ 7.93, 25.47 และ 136.73 kg/cm² ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดเท่ากับ 2.01 g/cm³ มีร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 22.45 และ 11.19 ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 4.50x10⁻⁶ ต่อองศาเซลเซียส

2. จากการศึกษาการใช้แมกนีเซียมออกซิคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ พบว่าสามารถเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมออกซิคลอไรด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานได้ โดยแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮดรตแล้วเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกซิคลอไรด์ซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสาน ซึ่งพบอยู่ในรูปของเฟส 5-1-8 หรือ 5Mg(OH)₂·MgCl₂·8H₂O มีลักษณะผลึกเป็นรูปแท่งเข็มไขว้ประสานกันระหว่างอนุภาค ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงชิ้นเฟสแมกนีเซียมออกซิคลอไรด์ซีเมนต์เริ่มเกิดการสลายตัวเป็นเฟสฟอร์สเตอไรต์ที่อุณหภูมิ 900

องศาเซลเซียส และเฟสพอร์สเทอไรต์จะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาเกิดเป็นเฟสสปีเนลที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จากนั้นเฟสสปีเนลจะไปทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมกลายเป็นเฟสคอร์เดียไรต์เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส โดยเมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ความต้านแรงดัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตมากเกินไป จะมีปริมาณเกลือแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตที่เหลือจากการทำปฏิกิริยามากเกินไป ดังนั้นอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรตเท่ากับ 3 มีค่าความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบ หลังอบ และหลังเผาเท่ากับ 1.21, 35.76 และ 148.39 kg/cm² ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.95 g/cm³ มีร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำต่ำเท่ากับ 24.84 และ 12.72 ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 3.80×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส

3. จากการศึกษาการใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ พบว่าสามารถเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์โดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานได้ โดยแมกนีเซียมจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตแล้วเกิดเป็นเฟสแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ซึ่งเป็นเฟสเชื่อมประสานช่วยให้เกิดความแข็งแรงขึ้นภายในชิ้นงาน เมื่อเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น เฟสแมกนีเซียมออกซีคลอไรด์ซีเมนต์เริ่มเกิดการสลายตัวเป็นเฟสเพอริเคลสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และเฟสเพอริเคลสจะทำปฏิกิริยากับอะลูมินาเกิดเป็นเฟสสปีเนลที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จากนั้นเฟสสปีเนลจะไปทำปฏิกิริยากับอะลูมินาและซิลิกาในส่วนผสมกลายเป็นเฟสคอร์เดียไรต์เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1350 องศาเซลเซียส เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ความต้านแรงดัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อลดอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมากเกินไป จะมีปริมาณเกลือแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่เหลือจากการทำปฏิกิริยามากเกินไป ดังนั้นอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยชิ้นงานที่เตรียมด้วยอัตราส่วนโดยโมลแมกนีเซียมต่อแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเท่ากับ 3 มีค่าความต้านแรงดัดหลังหล่อแบบ หลังอบ และหลังเผาเท่ากับ 3.29, 15.42 และ 180.67 kg/cm² ตามลำดับ มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.95 g/cm³ มีร้อยละความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำเท่ากับ 24.35 และ 12.46 ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน 3.94×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส

4. จากการศึกษาชนิดของซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมที่นำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์ พบว่าการเตรียมคอนกรีตทนไฟชนิดคอร์เดียไรต์-มุลไลต์จากการใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานมีความเหมาะสมมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ

แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์หรือแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์ เนื่องจากในขั้นตอนการเผา
ชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง แมกนีเซียมออกไซด์คลอไรด์ซีเมนต์และแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์เกิดการ
สลายตัวและปลดปล่อยแก๊สไฮโดรคลอริกและแก๊สซิลเฟอร์ไตรออกไซด์ซึ่งมีความเป็นกรดส่งผล
กระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์ไม่มีการสลายตัวเป็นไอกรดที่ส่งผล
กระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างกระบวนการเผา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรปรับส่วนผสมในการทดลองเพื่อให้เกิดเฟสคอร์เดียไรต์มากขึ้น เพื่อลด
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานให้มีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างทางการค้า
2. ควรมีการเติมสารช่วยกระจายตัวในส่วนผสมที่ใช้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรตซีเมนต์เป็น
ตัวเชื่อมประสาน เพื่อช่วยให้ส่วนผสมสามารถไหลตัวได้ดีขึ้น
3. ควรวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานเฉพาะส่วนละเอียดที่ทำการบ่มเป็นเวลา
1 วัน เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ถูกบ่มเป็นเวลา 28 วัน เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงการเกิดเฟสซีเมนต์ได้
อย่างชัดเจนมากขึ้น
4. ควรทำการทดสอบระยะเวลาการแข็งตัวของส่วนผสมคอนกรีตทนไฟ เพื่อให้ทราบถึง
ระยะเวลาที่ส่วนผสมคอนกรีตทนไฟเกิดการแข็งตัว
5. ควรทำการทดสอบสมบัติความต้านทานการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของชิ้นงาน
เนื่องจากเป็นสมบัติที่แสดงถึงสภาวะการใช้งาน

บรรณานุกรม

1. Zirczy, G.N., Kinetics of cordierite formation. Ceramic Engineering. 1972, Georgia Institute of Technology. p. 1-65.
2. Thai S.S. Refractory. วัสดุทนไฟ คืออะไร. 2017 [15 September 2022]; Available from: <https://www.tssrefractory.com/วัสดุทนไฟ-refractory-selection/>.
3. ดร. คชินท์ สายอินทวงศ์. การผลิตแผ่นรองเผาชนิดคอร์เดียไรท์ (Cordierite)- มัลไลท์ (Mullite). 2008 [15 September 2022]; Available from: http://www.thaiceramicsociety.com/pd_klin_cordierite.php.
4. Tuan, K., et al., A study of cordierite ceramics synthesis from domestic kaolin. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. **947**(1): p. 012021.
5. Schneider, H., Fischer, R.X., and Schreuer, J., Mullite: crystal structure and related properties. Journal of the American Ceramic Society, 2015. **98**(10): p. 2948-2967.
6. ผศ.ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล, การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมินา-โครเมียม ด้วยอนุภาคเซอร์โคเนีย. 2010.
7. ธวัชชัย ศรีภักดี. ซิลิกา (silica/SiO₂) และประโยชน์ซิลิกา [15 September 2022]; Available from: <https://www.siamchemi.com/ซิลิกา/>.
8. Yang N, T.H., Scott ACN, Dhakal R, Watson M, Shi C, Properties of magnesium based cements, in The New Zealand Concrete Industry Conference. 2017: Te Papa, Wellington.
9. พรนภา สุจริตวรกุล, การขึ้นรูปไฮดรอกซีอะพาไทต์ชนิดพรุนโดยใช้ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรต และไดแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัสจากอุตสาหกรรมกระดูกสัตว์, คณะวิทยาศาสตร์. 2000, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
10. ดร. คชินท์ สายอินทวงศ์. การขึ้นรูปด้วยการอัดแบบแห้ง (Dry Pressing) 2008 [15 September 2022]; Available from: http://www.thaiceramicsociety.com/pc_press_feature.php.
11. Society, T.A.C. Ceramic processing: slip casting. [15 September 2022]; Available from: <http://ceramics.org/wp-content/uploads/2014/04/Slip-Casting-Lesson-111.pdf>.

12. มาชีอโร เจ้ตาโอ๊ะ. การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก. 2013 [15 September 2022]; Available from: http://masuross.blogspot.com/2013/09/blog-post_15.html.
13. Walling, S. and Provis, J., Magnesia-based cements: a journey of 150 years, and cements for the future? *Chemical Reviews*, 2016. **116**.
14. Abdelrazig, B.E.I., Sharp, J.H., and El-Jazairi, B., The chemical composition of mortars made from magnesia-phosphate cement. *Cement and Concrete Research*, 1988. **18**(3): p. 415-425.
15. Hipedinger, N.E., Scian, A.N., and Aglietti, E.F., Magnesia–ammonium phosphate-bonded cordierite refractory castables: Phase evolution on heating and mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 2004. **34**(1): p. 157-164.
16. Zhang, T., et al. Characterization of Magnesium Silicate Hydrate (MSH) Gel Formed by Reacting MgO and Silica Fume. *Materials*, 2018. **11**, DOI: 10.3390/ma11060909.
17. Sonat, C., Dung, N.T., and Unluer, C., Performance and microstructural development of MgO–SiO₂ binders under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 2017. **154**: p. 945-955.
18. Szczerba, J., et al., Influence of time and temperature on ageing and phases synthesis in the MgO–SiO₂–H₂O system. *Thermochimica Acta*, 2013. **567**: p. 57-64.
19. Sandberg, B. and Mosberg, T., Use of Elkem microsilica in binder systems for ultra-low cement castables and basic, “cement-free” castables. *Ceramic Transactions: Advances in Refractories Technology*; Fisher, R. E., Ed.; American Ceramic Society, 1989. **4**: p. 245–258.
20. Tran, H., et al., Mechanical and durability properties of a concrete using magnesium silicate hydrate binder system, in 3rd International Congress on Durability of Concrete. 2017: Adelaide, Australia. p. 9.
21. Kalousek, G.L. and Mui, D., Studies on formation and recrystallization of intermediate reaction products in the system magnesia-silica-water. *Journal of the American Ceramic Society*, 1954. **37**(2): p. 38-42.
22. Temuujin, J., Okada, K., and Mackenzie, K., Formation of layered magnesium silicate during the aging of magnesium hydroxide–silica mixtures. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005. **81**: p. 754-756.

23. Roosz, C., et al., Crystal structure of magnesium silicate hydrates (M-S-H): The relation with 2:1 Mg–Si phyllosilicates. *Cement and Concrete Research*, 2015. **73**: p. 228-237.
24. Brew, D.R.M. and Glasser, F.P., Synthesis and characterisation of magnesium silicate hydrate gels. *Cement and Concrete Research*, 2005. **35**(1): p. 85-98.
25. Tran, H.M. and Scott, A., Strength and workability of magnesium silicate hydrate binder systems. *Construction and Building Materials*, 2017. **131**: p. 526-535.
26. Zhang, T., Vandeperre, L.J., and Cheeseman, C.R., Formation of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement pastes using sodium hexametaphosphate. *Cement and Concrete Research*, 2014. **65**: p. 8-14.
27. Wei, J., et al., Reaction products of MgO and microsilica cementitious materials at different temperatures. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2011. **26**(4): p. 745-748.
28. Li, K., et al., Recent progress of magnesium oxychloride cement: manufacture, curing, structure and performance. *Construction and Building Materials*, 2020. **255**: p. 119381.
29. Bender, C., Ueber die hydrate des magnesiumoxychlorids. *Liebigs Ann*, 1871. **159**: p. 341–349.
30. Robinson, W.O. and Waggaman, W.H., Basic magnesium chlorides. *The Journal of Physical Chemistry*, 1909. **13**(9): p. 673-678.
31. Lukens, H.S., The composition of magnesium oxychloride. *Journal of the American Chemical Society*, 1932. **54**(6): p. 2372-2380.
32. Walter-Levý, L. and Bianco, Y., Action de la magnesie sur les solutions de chlorure de magnesium a 100°C. *Comptes Rendus Hebdomadaires Des Seances de L'Academie Des Sciences*, 1951. **232**: p. 730-732.
33. Dinnebier, R.E., et al., $9\text{Mg}(\text{OH})_2\cdot\text{MgCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, a high temperature phase of the magnesia binder system. *Inorganic Chemistry*, 2010. **49**(21): p. 9770-9776.
34. Cole, W.F. and Demediuk, T., X-Ray, thermal, and dehydration studies on Magnesium oxychlorides. *Australian Journal of Chemistry*, 1955. **8**(2): p. 234-251.
35. Urwongse, L. and Sorrell, C.A., The system $\text{MgO}-\text{MgCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ at 23°C. *Journal of the American Ceramic Society*, 1980. **63**(9-10): p. 501-504.

36. Matkovic, B. and Young, J.F., Microstructure of magnesium oxychloride cements. *Nature Physical Science*, 1973. **246**(153): p. 79-80.
37. Abdel-Gawwad, H.A. and Khalil, K.A., Preparation and characterization of one-part magnesium oxychloride cement. *Construction and Building Materials*, 2018. **189**: p. 745-750.
38. Li, Z.G. and Ji, Z.S., Effect of molar ratios on compressive strength of modified magnesium oxysulfate cement. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015. **8**(6): p. 87-93.
39. Enricht, L., *Artificial stone or cement*. 1891: United States.
40. Demediuk, T. and Cole, W.F., A study on magnesium oxysulphates. *Australian Journal of Chemistry*, 1957. **10**(3): p. 287-294.
41. Urwongse, L. and Sorrell, C., Phase relations in magnesium oxysulfate cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006. **63**: p. 523-526.
42. Qin, L., et al., Modification of magnesium oxysulfate cement by incorporating weak acids. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018. **30**.
43. Tang, S., et al., In situ monitoring of hydration of magnesium oxysulfate cement paste: Effect of MgO/MgSO₄ ratio. *Construction and Building Materials*, 2020. **251**: p. 119003.
44. Wu, C., et al., The hydration mechanism and performance of Modified magnesium oxysulfate cement by tartaric acid. *Construction and Building Materials*, 2017. **144**: p. 516-524.
45. Wu, C., Zhang, H., and Yu, H., Preparation and properties of modified magnesium oxysulfate cement derived from waste sulfuric acid. *Advances in Cement Research*, 2016. **28**(3): p. 178-188.
46. Wang, J.A., et al., Characterizations of the Thermal Decomposition of Brucite Prepared by Sol–Gel Technique for Synthesis of Nanocrystalline MgO. *Materials Letters - MATER LETT*, 1998. **35**: p. 317-323.
47. Henan superior abrasive. Silica fume effect on concrete. 2010 [15 April 2023]; Available from: <https://microsilica-fume.com/silica-fume-effect-concrete.html>.

48. Tonelli, M., et al., Structural characterization of magnesium silicate hydrate: towards the design of eco-sustainable cements. *Dalton Transactions*, 2016. **45(8)**: p. 3294-3304.
49. Shand, M.A., 5 - Magnesium silicate hydrate cements, in *Magnesia Cements*, M.A. Shand, et al., Editors. 2020, Elsevier: Oxford. p. 173-181.
50. Nadafan, M. and Majidi, R., Study of optical constants and dielectric properties of nanocrystalline α -cordierite ceramic. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2020. **8(2)**: p. 502-509.
51. Sanad, M.M.S., et al., Structural, Microstructure, Mechanical and Electrical Properties of Porous Zr^{4+} -Cordierite Ceramic Composites. 2014.
52. Gören, R., et al., Colloidal stability–slip casting behavior relationship in slurry of mullite synthesized by the USP method. *Ceramics International* 2012. **38**.
53. Cividanes, L.S., et al., Review of mullite synthesis routes by sol–gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2010. **55(1)**: p. 111-125.
54. Kiattisakophon Phatthamon and Thiansem Sukdiphon., The preparation of cordierite-mullite composite for thermal shock resistance material. *Chiang Mai Journal of Science*, 2008. **35**: p. 6-10.
55. Xia, S., Xing, P., and Gao, S., Studies on the basic compounds of magnesia cement: the thermal behaviour of magnesium oxychlorides. *Thermochimica Acta*, 1991. **183**: p. 349-363.
56. Li, K., et al., Raw material ratio optimisation of magnesium oxychloride cement using response surface method. *Construction and Building Materials*, 2021. **272**: p. 121648.
57. Li, X., et al., Effects of unreactive MgO and impurities in light burned MgO on the hydration process and performance of base magnesium sulfate cement. *Construction and Building Materials*, 2020. **240**: p. 117854.
58. Gomes, C. and Oliveira, A., Chemical phases and microstructural analysis of pastes based on magnesia cement. *Construction and Building Materials*, 2018. **188**: p. 615-620.

59. IMERYS kiln furniture. (2010). Kiln furniture products [22 May 2023]
<https://www.imerys.com/product-ranges/kiln-furniture-range>
60. Tom, L. (2018). Powder calcination kiln furniture cordierite mullite glass phase refractory [22 May 2023] <https://yufengrefractory.en.made-in-china.com/product>
61. Pattra refractory Co. Ltd. (2012). Patra key specifications [20 May 2023]
<http://www.patrarefractory.com/index.html>





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววาริณี คลังหิรัญ
วัน เดือน ปี เกิด	20 พฤศจิกายน พ.ศ.2540
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ แขนงวิชาเซรามิกและวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562
ที่อยู่ปัจจุบัน	39/150 ม.4 หมู่บ้านฉัตรหลวง8 ต.สามโคก อ.สามโคก จ.ปทุมธานี 12160
ผลงานตีพิมพ์	การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "DEVELOPMENT OF MAGNESIUM-BASED CEMENT BONDED CORDIERITE-MULLITE REFRACTORY CASTABLES" ในการประชุมทาง วิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference 2022 ระหว่างวันที่ 30 มิถุนายน – 1 กรกฎาคม 2565



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY