



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมโดยใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อมประสาน

Preparation of Magnesia Castables Using Magnesium-Based Cement as a
Binder

ชื่อนิสิต	นางสาววันวิสา การิวัตร	เลขประจำตัว	6033269723
	นางสาวศิริลักษณ์ วงศ์ณรัตน์	เลขประจำตัว	6033271923
ภาควิชา	วัสดุศาสตร์		
ปีการศึกษา	2563		

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การเตรียมคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมโดยใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อมประสาน

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

- 1.นางสาววันวิสา การิวัตร เลขประจำตัว 6033269723
- 2.นางสาวศิริลักษณ์ วงศ์ณรัตน์ เลขประจำตัว 6033271923

อนุมัติโดย



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2563

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมโดยใช้ซีเมนต์ฐานแมกนีเซียมเป็นตัวเชื่อมประสาน
โดย	นางสาววันวิสา การวิวัตร นางสาวศิริลักษณ์ วงศ์ณรัตน์
สาขาวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมเป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติในด้านความทนไฟสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพหรือรูปร่างที่อุณหภูมิสูง สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนเชิงต่างได้ดี โดยทั่วไปคอนกรีตทนไฟผลิตจากการนำเอาวัสดุดิบหลายขนาดมาผสมกันโดยใช้แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน อย่างไรก็ตามปริมาณอะลูมินาในแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์จะส่งผลทำให้ความทนทานต่อการกัดกร่อนเชิงต่างลดลง งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมโดยใช้แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน เพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัวและคงรูปได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์จะสลายตัวเหลือแมกนีเซียมเพียงเฟสเดียว ทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตทนไฟ ในการทดลองนี้ศึกษาผลของปริมาณการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตซีเมนต์อย่างละร้อยละ 1 ถึง 4 ต่อสมบัติของชิ้นงานที่เตรียมได้ จากผลการทดลองพบว่า ความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมหลังอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ซึ่งมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานสูงสุดเท่ากับ 246.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตอย่างละร้อยละ 4 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสปรากฏเฟสบลูไซด์ แมกนีไซด์ และแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ เฟส 3-1-8 ขึ้นภายในโครงสร้างของชิ้นงาน จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต เมื่อนำชิ้นงานไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานหลังเผามีความแข็งแรงต่อแรงดัดและความหนาแน่นรวมลดลง แต่ค่าการดูดซึมน้ำและค่าความพรุนตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต เนื่องจากเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของบลูไซด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ เกิดเป็นเฟสเพอริเคลส ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างของชิ้นงาน จึงส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง

Title Preparation of Magnesia Castables Using Magnesium-Based Cement as a Binder

Authors Miss Wanwisa Kariwat
Miss Sirilak Wongnarat

Department Materials Science

Advisor Assistant Professor Dr. Karn Serivalsatit

Academic Year 2020

Abstract

Magnesia castable is a ceramic material with high refractoriness, high deformation resistance at high temperatures, and high basic corrosion resistance. Castable is typically made by combining aggregates with a binder such as calcium aluminate cement. However, the alumina content of calcium aluminate cement reduces basic corrosion resistance. The purpose of this research was to investigate the preparation of magnesia castables using magnesium oxysulfate cement as a binder to allow a specimen to harden and retain its shape at room temperature. When fired at high temperatures, magnesium oxysulfate cement decomposes into only magnesia, which does not affect the basic corrosion resistance of magnesia castable. The effect of light burnt magnesia and magnesium sulfate heptahydrate contents with percentage values ranging from 1 to 4 on specimen properties was investigated. From the experimental result, the modulus of rupture of the dried specimens tended to increase as the amount of light burnt magnesia and magnesium sulfate heptahydrate increased. It had the highest strength with a percentage of 4 at 246 kg/cm^2 . According to x-ray diffraction analysis, the phase of brucite, magnesite, and magnesium oxysulfate cement 3-1-8 in the structure of the specimen was detected as a result of the reaction between light burnt magnesia, magnesium sulfate heptahydrate, and water. After firing at $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ for 5 hours, it was found that the modulus of rupture and the density of the specimens decreased while water absorption and porosity increased due to thermal decomposition of brucite, magnesite, and magnesium oxysulfate cement to periclase phase. This resulted in a decrease in strength due to the presence of pores in the structure of the specimen.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการ ได้รับความเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ วัสดุ และเครื่องมือสำหรับการวิจัย ตลอดจนได้รับความช่วยเหลือแนะนำแนวทางในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยสนับสนุนเงินทุนในงานวิจัย และทำยนี้ ขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นที่ไม่ได้เอ่ยนาม อาทิ พี่ประจำศูนย์เครื่องมือต่างๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ รวมถึงกลุ่มคนที่คอยดูแลและให้กำลังใจในตลอดการทำงานจนผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ดี

วันวิสา การิวัตร
ศิริลักษณ์ วงศ์ณรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 วัสดุทนไฟ.....	3
2.2 วัสดุทนไฟแมกนีเซียม (Magnesia refractory)	4
2.2.1 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียม (Magnesia refractory castables).....	4
2.3 ตัวเชื่อมประสาน.....	4
2.3.1 ซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง	5
2.3.2 ไมโครซิลิกา.....	7
2.3.3 Hydratable Alumina	8
2.3.4 โซเดียมซิลิเกต.....	9

สารบัญ (ต่อ)

2.3.5 แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ (Magnesium oxysulfate cement)	9
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	11
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	11
3.1.1 แมกนีเซียมออกไซด์	11
3.1.2 แมกนีเซียมซัลเฟต	11
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	11
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง	11
3.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน	13
3.3 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของชิ้นงาน	13
3.3.1 ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และความพรุนตัวของชิ้นงาน	13
3.3.2 การแข็งแรงต่อแรงตัด (Modulus of Rupture).....	14
3.3.3 การตรวจสอบองค์ประกอบเฟส	15
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	18
4.1 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมก่อนเผา	18
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อแรงตัดของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมก่อนเผา.....	18
4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสก่อนเผาและหลังเผา	20
4.1.3 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมหลังเผา	21
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมหลังผ่านการเผา.....	22
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม ค่าการดูดซึมน้ำ และความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผา.....	22
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อแรงตัดของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมหลังผ่านการเผา.....	24
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	26
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	26

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	26
เอกสารอ้างอิง.....	28
ภาคผนวก.....	30

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูงชนิดต่างๆ.....	5
ตารางที่ 2.2	แสดงข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีและเฟสของ Calcium Aluminate Cement.....	5
ตารางที่ 2.3	สมบัติต่างๆของเฟสที่พบในซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง.....	6
ตารางที่ 2.4	สมบัติต่างๆของเฟสที่พบในซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง.....	6
ตารางที่ 2.5	แสดงข้อมูลเกี่ยวกับเฟสของแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตซีเมนต์.....	10
ตารางที่ 3.1	แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขนาดต่างๆ.....	11
ตารางที่ 3.2	สูตรปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียม.....	12

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกาฟุ่ม.....	5
รูปที่ 3.1 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด.....	15
รูปที่ 3.2 เครื่อง X-ray diffractometer Bruker D8 Advance.....	16
รูปที่ 3.3 ภาพแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์แสดงให้เห็นว่าผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์ระหว่างสองระนาบมีค่าเป็น $2d\sin\theta$	17
รูปที่ 4.1 ความแข็งแรงต่อแรงดัดก่อนเผาของคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B, C และ D.....	19
รูปที่ 4.2 องค์ประกอบเฟสของคอนกรีตทนไฟสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิตำ่ร้อยละ 4 และแมกนีเซียมเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 4 ที่ไม่มีมวลรวมหยาบ.....	20
รูปที่ 4.3 องค์ประกอบเฟสของคอนกรีตทนไฟสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิตำ่ร้อยละ 4 และแมกนีเซียมเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 4 ที่ไม่มีมวลรวมหยาบหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง.....	21
รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B และ C หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส.....	22
รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B และ C หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส.....	23
รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B และ C หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส.....	24
รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B, และ C หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	25

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตทนไฟ (Refractory castable) เป็นผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากคอนกรีตทนไฟเป็นวัสดุที่มีสมบัติในด้านความทนไฟสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพหรือรูปร่างที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงการทำงาน สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนและการขัดสีที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้คอนกรีตทนไฟยังสามารถติดตั้งโดยการหล่อขึ้นรูปให้มีรูปร่าง ลักษณะ และขนาดได้ตามที่ต้องการ จึงมีความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน คล้ายกับอิฐทนไฟแต่สามารถติดตั้งได้ในระยะเวลาที่รวดเร็วกว่า ทำให้คอนกรีตทนไฟสามารถลดปัญหาเรื่องระยะเวลาในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังเหมาะกับการใช้งานในบริเวณที่ไม่สามารถทำการก่ออิฐได้เป็นอย่างดี

คอนกรีตทนไฟผลิตจากการนำเอาวัตถุดิบหลายๆขนาดและตัวเชื่อมประสาน (Binder) มาผสมเข้าด้วยกัน ซึ่งคอนกรีตทนไฟสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภทขึ้นกับประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ คอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย (Magnesia; MgO) เป็นผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าและอุตสาหกรรมผลิตปูนโม่ เนื่องจากแมกนีเซียมีจุดหลอมเหลวสูง ทนทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะเชิงต่างได้ดี โดยทั่วไปคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียจะมีการเติมแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสาน อย่างไรก็ตามแคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และอะลูมินา (Al₂O₃) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งออกไซด์ทั้งสองชนิดส่งผลทำให้คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของตะกรันเชิงต่าง (basic slag) ลดลง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ (Magnesium oxysulfate cement) เป็นตัวเชื่อมประสานที่น่าสนใจในการนำมาใช้งานเป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย เนื่องจากแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์เป็นซีเมนต์ที่มีความแข็งแรงสูง ทนความร้อนได้ดี และเมื่อสลายตัวที่อุณหภูมิสูงจะเหลือเพียงแมกนีเซียเพียงอย่างเดียว ทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตทนไฟ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการพัฒนาคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย โดยใช้แมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ เป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งเตรียมได้จากนำแมกนีเซียมาผสมกับแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (MgSO₄·7H₂O) โดยศึกษาถึงผลของปริมาณแมกนีเซียมออกซีสัลเฟตซีเมนต์ที่มีผลต่อสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่ใช้ในการเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ต่อสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมร้อยละ 1 และ 4 และปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตในช่วงร้อยละ 1 ถึง 4 ที่ใช้ในการเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ต่อสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟต่อสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟที่อุณหภูมิห้อง และชิ้นงานคอนกรีตทนไฟที่ผ่านการเผาที่ 1500 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานได้

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุทนไฟ

วัสดุทนไฟ หรือวัสดุทนไฟ (Refractory) เป็นคำมาจาก ภาษาละตินว่า Refractorius ซึ่งมีความหมายว่า ดื้อ ไม่เปลี่ยนแปลง เป็นสารประกอบประเภท Inorganic ที่มีคุณสมบัติทนต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง วัสดุทนไฟมีคุณสมบัติพื้นฐานดังนี้

- 1) ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ หรือรูปร่าง ที่อุณหภูมิสูง
- 2) ทนต่อการกัดสี ที่อุณหภูมิสูง
- 3) ทนต่อการทำปฏิกิริยาเคมี ที่อุณหภูมิสูง
- 4) ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วงการใช้งาน

และได้มีการจำแนกประเภทของวัสดุทนไฟได้ 2 ลักษณะ คือ ตามองค์ประกอบทางเคมีและตามลักษณะ

1. การแบ่งประเภทตามองค์ประกอบทางเคมี

- 1.1 วัสดุทนไฟเชิงกรด มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบที่มีลักษณะสูตรเคมี MO_2 เช่น SiO_2 เป็นต้น
- 1.2 วัสดุทนไฟเชิงกลาง มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบที่มีลักษณะสูตรเคมี M_2O_3 เช่น Al_2O_3 เป็นต้น
- 1.3 วัสดุทนไฟเชิงด่าง มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบที่มีลักษณะสูตรเคมี MO เช่น CaO และ MgO เป็นต้น

2 การแบ่งประเภทตามลักษณะ

- 2.1 วัสดุทนไฟ ที่มีรูปร่างแน่นอน (Shaped Refractory)
- 2.2 วัสดุทนไฟ ที่ไม่มีรูปร่างแน่นอน (Unshaped Refractory หรือ Monolithic) ได้แก่ คอนกรีตทนไฟ (Refractory Concrete), ปูนทนไฟ (Refractory Mortar), ผงต้ำ (Ramming Mixes), ผงยิง (Gunning Mixes), ผงฉาบ (Patching Material)

2.2 วัสดุทนไฟแมกนีเซียม (Magnesia refractory)^[1]

วัสดุทนไฟแมกนีเซียมเป็นวัสดุทนไฟที่มีจุดหลอมเหลวสูง มีความทนไฟสูงภายใต้การรับน้ำหนัก มีความทนทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะเชิงต่าง จึงได้ถูกนำไปใช้งานได้มากมาย เช่น นำไปใช้งานในการก่อเตาผลิตเหล็กกล้า ใช้ในการก่อผนังเตาและบริเวณส่วนสำคัญที่มีการเสียดสีมากภายในเตา และเตาถลุงโลหะ แต่ไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้เกิดการเสียหายของชิ้นงานได้ง่าย มีความไวต่อการกัดกร่อนของกรด และมีการขยายตัวเมื่อได้รับความชื้น จึงทำให้เกิดการพัฒนาวัสดุทนไฟแมกนีเซียมให้ปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของวัสดุทนไฟแมกนีเซียมให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น

2.2.1 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียม (Magnesia refractory castables)^[5]

เป็นวัสดุทนไฟที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Refractory monolithics) ประกอบไปด้วยเม็ดวัสดุดิบหยาบ (Aggregates) ซึ่งขนาดของเม็ดวัสดุดิบหยาบสามารถมีได้หลายขนาดในหน่วยมิลลิเมตร (โดยทั่วไปมักจะมีขนาด 8 มิลลิเมตรไปจนถึง 30 มิลลิเมตร) จนถึงอนุภาคย่อยขนาดไมโครเมตรและตัวเชื่อมประสาน (Binder) มาผสมเข้าด้วยกัน คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียม การทำงานคล้ายกับงานหล่อคอนกรีตทั่วไปในบริเวณที่ก่ออิฐทนไฟได้ยาก และต้องการรูปทรงเฉพาะเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุทนไฟที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าและอุตสาหกรรมผลิตปูนไฮดรอกไซด์ เนื่องจากแมกนีเซียมมีจุดหลอมเหลวสูง (2800°C) มีคุณสมบัติในการทนทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะเชิงต่างได้ดี ทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูง แต่ถึงอย่างไรแมกนีเซียมสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ง่าย เกิดเป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Magnesium hydroxide; $Mg(OH)_2$)

2.3 ตัวเชื่อมประสาน

ตัวเชื่อมประสานสำหรับวัสดุทนไฟเป็นสารที่ช่วยยึดเกาะระหว่างผงของส่วนผสมให้เข้ากัน ทำให้ส่วนผสมแข็งตัวเร็วแล้วยังคงรูปร่างไว้ได้ภายหลังจากการหล่อขึ้นรูป โดยทั่วไปมักจะเป็นซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง เช่น แคลเซียมอะลูมินาซีเมนต์ มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งออกไซด์ทั้งสองชนิดส่งผลทำให้คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของตะกรันเชิงต่างลดลง จากการศึกษาค้นคว้าแมกนีเซียมออกไซด์ซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานที่มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนเชิงต่างได้ดี เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจะเหลือเพียงแมกนีเซียมเพสเดียว ทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตทนไฟ จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

2.3.1 ซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง^[4]

ซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง (High Alumina Cement; HAC) หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ (Calcium Aluminate Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศฝรั่งเศส เพื่อทนทานต่อซัลเฟต แต่มีการใช้อย่างแพร่หลายในงานที่ต้องการกำลังอัดอย่างรวดเร็วซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูงได้จากเผาส่วนผสมของหินปูน และแร่บ็อกไซต์ (Bauxite) ซึ่งก็คือ อะลูมินา ที่อุณหภูมิ 1600 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาบด องค์ประกอบของซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูงจะแตกต่างอย่างมากจากปูนซีเมนต์ทั่วไปรวมทั้งสีของซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูงก็จะเข้มกว่า เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบของเหล็กอยู่จำนวนมาก ซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง ใช้ในงานที่ต้องการใช้คอนกรีตทนซัลเฟตได้ดีมากๆ งานซ่อมคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูงในเวลาอันรวดเร็ว โดยจะได้กำลังอัดสูงถึง 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในเวลาเพียง 6-8 ชั่วโมง รวมไปถึงการทำคอนกรีตทนไฟ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูงชนิดต่างๆ

Properties	A	B	C	D	E	F
Chemical composition (wt%)						
Al ₂ O ₃	54.3	72.5	73.0	73.0	80.1	89.3
CaO	37.0	26.5	26.0	26.0	18.0	9.2
SiO ₂	4.5	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1
Fe ₂ O ₃	1.5	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
TiO ₂	2.6	—	—	—	—	—
Refractoriness (SK)	16	33	33	33	36	39
Water content (wt%)	25.5	27.0	27.0	27.0	23.0	23.0
Setting time start (h-min.)	4-40	8-30	9-00	9-30	0-15	0-15
end (h-min.)	5-20	9-30	10-00	10-30	0-40	0-40
Flow value (mm)	260	210	250	230	295	290

นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีและเฟสของซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูงยังส่งผลต่อเฟสที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีและเฟสของ Calcium Aluminate Cement

%	40% alumina CAC	50% alumina CAC	70% Alumina CAC
Al ₂ O ₃	37,5 – 41,5	50,8 – 54,2	68,7 – 70,5
CaO	36,5 – 39,5	35,9 – 38,9	28,5 – 30,5
SiO ₂	4,2, - 5,0	4,0 – 5,5	0,2 – 0,6
FeO+Fe ₂ O ₃	14,0-18,0	1,0 – 2,2	<0,4
TiO ₂	<4,0	<4,0	<0,5
CA	47-57	64 - 74	54 – 64
CA ₂			+++
A			+
C ₁₂ A ₇	1-5%	Trace	Trace
C ₂ AS	++	++	
C ₄ AF	++		
C ₂ S	Trace		
CT		+	

Cement chemistry abbreviations: C = CaO, A = Al₂O₃, S = SiO₂, F = Fe₂O₃, M = MgO, T = TiO₂, H = H₂O

เฟสหลักที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง^[6] $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA) โดยมีเฟสรอง $12\text{CaO}\cdot7\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_{12}A_7) และ $\text{CaO}\cdot2\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_1A_2) ซึ่งทั้งสามเฟสสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ซึ่งรวดเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของ Calcium Aluminate Cement ดังแสดงดังตารางที่ 2.3 โดยเฟสที่มีปริมาณ CaO มากหรือมีอัตราส่วน C/A ratio สูงจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้รวดเร็ว

ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆของเฟสที่พบในซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง

	C_3A	C_{12}A_7	CA	CA_2	CA_6
C/A	3	1,7	1	0,5	0,2
Reactivity at 20°C	Very rapid	Fast	Slow	Very slow	None

ตารางที่ 2.4 สมบัติต่างๆของเฟสที่พบในซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง

Mineral	Chemical Composition (wt %)				T_m (°C)	Density (g/cm ³)	Crystal System
	C	A	F	S			
C	99.8				2570	3.32	Cubic
C_{12}A_7	48.6	51.4			1415-1495	2.69	Cubic
CA	35.4	64.6			1600	2.98	Mon.
CA_2	21.7	78.3			1750-1765	2.91	Mon.
C_2S	65.1			34.9	2066	3.27	Mon.
C_4AF	46.2	20.9	32.9		1415	3.77	Orth.
C_2AS	40.9	37.2		21.9	1590	3.04	Tet.
CA_6	8.4	91.6			1830	3.38	Hex.
$\bar{\square}\text{A}$		99.8			2051	3.98	Rhomb

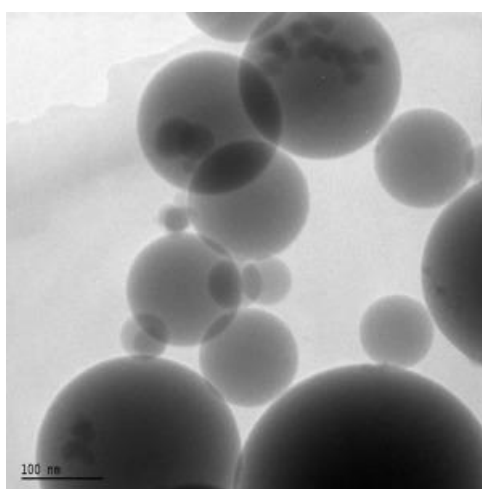
เฟส CA เป็นเฟสที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นเฟสที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง (1600 องศาเซลเซียส) และสามารถเกิดการแข็งตัวได้อย่างรวดเร็ว และมีความแข็งแรงสูง CA_2 เป็นเฟสที่พบรองลงมา มีความทนไฟมากกว่า CA แต่ใช้เวลาในการแข็งตัวนานกว่า ความแข็งแรงของ CA_2 หลังจากบ่มไว้ 3 วัน จะมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับเฟส CA และ C_{12}A_7 สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างรวดเร็ว แต่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า C_2S และ C_4AF เป็นเฟสที่มักพบในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แต่อาจพบในซีเมนต์ที่มีปริมาณอะลูมินาสูง ได้ถ้ามีปริมาณสิ่งเจือปน เช่น SiO_2 และ Fe_2O_3 มากในวัตถุดิบตั้งต้น CA_6 เป็นเฟสที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ แต่มักเกิดในกรณีของคอนกรีตทนไฟอะลูมินา (Alumina castable) โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง CA_2 กับ อะลูมินาในคอนกรีตทนไฟ

ในปี 2009 Salomao และ Pandolfeli^[6] ได้ศึกษาบทบาทของแคลเซียมอะลูมินาซีเมนต์และ hydratable alumina ในคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย พบว่าปริมาณของตัวเชื่อมประสานเหล่านี้ สามารถส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของแมกนีเซียและการขยายตัวในคอนกรีตทนไฟ จากผลการทดลองพบว่าการใส่แคลเซียมอะลูมินาซีเมนต์ปริมาณ 12 wt.% จะลดความเสียหายในคอนกรีตทนไฟที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด แต่สำหรับการใส่

แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ปริมาณ 6-9 wt.% จะเกิดการเสียหายมากที่สุดจากการรวมกันของค่า pH สูง ทำให้มีความแข็งแรงไม่มากพอที่จะจำกัดการขยายตัวเชิงปริมาตร ดังนั้นการใช้ hydratable alumina จึงมีประโยชน์ที่น่าสนใจมากกว่า เนื่องจากมีการเกิด Hydrotalcite (HDTC) บนพื้นที่ผิวของอนุภาคเมื่อใส่ hydratable alumina ในปริมาณมากทำให้ไหลตัวได้ดีและไม่แปลงค่า pH มากนักและมีค่าความแข็งแรงที่มากกว่า

2.3.2 ไมโครซิลิกา^[2]

ไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อว่าซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) เป็นชื่อเรียกวัดผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของการผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็น กระบวนการรีดักชันจากควอร์ซ (quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี electric arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (fume) ของ SiO_2 ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอนุภาคของซิลิกาขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึก (amorphous) มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกา (SiO_2) โดยทั่วไปที่พบมักจะมีซิลิกาที่สูงมากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไปส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O และออกไซด์อื่นๆร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งมักจะอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยเมื่อขยายด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่ามีความละเอียดของอนุภาคสูงมาก อนุภาคมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.15 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะของไมโครซิลิกามีค่าประมาณ 2.2 ถึง 2.3 ความละเอียดทดสอบโดยวิธีของเบลนมีค่าประมาณ 15,000 ถึง 30,000 ตารางเมตรต่อกิโลกรัม



รูปที่ 2.1 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกาฟุ้ง

ไมโครซิลิกา^[9]เป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวเชื่อมประสานที่ดี มีความแข็งแรงสูง ช่วยเพิ่มคุณสมบัติในการไหลตัวของอนุภาค (Flowability) สามารถเพิ่มความทนทานต่อการถูกกัดกร่อนของคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียได้ดี เนื่องจากมีพันธะ $MgO-SiO_2-H_2O$ ที่แข็งแรง อีกทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงการเกิดความเสียหายภายในชิ้นงานอันเกิดมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อีกด้วย

จากงานวิจัย Eckstein และคณะ^[9] ได้อธิบายการพัฒนาของวัสดุทนไฟแมกนีเซีย-คาร์บอนที่ประกอบไปด้วยพันธะกรดซิลิกที่เกิดจากการใช้งานของไมโครซิลิกาและซิลิกาเจล การใช้งานของพวกเขาไม่เพียงแต่ให้ความแข็งแรงที่เหมาะสมหลังการบ่มและการเผาภายใต้บรรยากาศรีดักชัน แต่ยังสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตทนไฟได้ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยไม่ได้ให้ข้อบ่งชี้ใดๆ เกี่ยวกับวิธีการที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็วระหว่างแมกนีเซียและซิลิกา แต่อาจจะการใช้คาร์บอนหรือการใช้ซิลิกาหายาบ (ไมโครซิลิกา) ซึ่งจะช่วยให้ลดความเสี่ยงการเกิดปฏิกิริยา

จากงานวิจัยของ Sandberg และ Mosberg^[9] ได้รายงานการใช้งานของระบบพันธะแมกนีเซีย-ซิลิกากับคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย, ซิลิกอนไนไตรด์ และแมกนีเซีย-คาร์บอน ระบบนี้ให้ความต้านทานเชิงกลที่เหมาะสมโดยใช้น้ำเพียงเล็กน้อย (5.0-5.5%) และมีการเติมไมโครซิลิกา 6% อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านแรงดัดจะแสดงค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิระหว่าง 1000-1200 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถพัฒนาคุณสมบัติได้ด้วยการเติมอะลูมินาหรืออะลูมิเนียมฟลูออไรด์ คุณสมบัติอื่นของระบบนี้คือการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงเมื่อเวลาผ่านไปหลังจากการขึ้นรูป การทนต่อแรงกดเพิ่มขึ้น 7 เท่าหลังจากผ่านไป 28 วันของการบ่มในอากาศซึ่งพฤติกรรมคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ระบบนี้ดูเหมือนจะได้รับความแข็งแรงจากการก่อตัวของสารประกอบผลึกต่ำระหว่างอนุภาคของแมกนีเซีย แต่ยังไม่เป็นที่เข้าใจได้อย่างสมบูรณ์

2.3.3 Hydratable Alumina^[8]

Hydratable Alumina ถูกสร้างจากกระบวนการแคลไซน์แร็กกับไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวสูง ที่เรียกว่า rho-alumina ($\rho-AL_2(OH)_3$) เมื่อสัมผัสกับน้ำจะละลายได้บางส่วนและสร้าง boehmite เจลอย่างรวดเร็ว เจลเหล่านี้จะไปช่วยลดรูพรุนในโครงสร้าง และหลังจากผ่านช่วงเวลาสั้นๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนเป็น crystalline bayerite ($Al(OH)_3$) ซึ่งส่งผลให้อนุภาคสร้างพันธะและเพิ่มความแข็งแรง เพราะฉะนั้นวัสดุทนไฟที่ใช้ Hydratable Alumina นอกจากจะมีความแข็งแรงแล้วยังมีความหนาแน่นสูง

แม้ว่า Hydratable Alumina จะใช้เป็นวัสดุประสานในซีเมนต์ แต่ก็มีผลเสียบางอย่างเช่น ต้องการเวลาในการผสมนานกว่าจะเป็ยกที่จะใช้งานและมีความเสี่ยงที่จะใช้น้ำมากเกินไป เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเฉพาะสูงสามารถทำให้ยากต่อการใช้งาน นอกจากนี้ เมื่อ Hydratable Alumina สัมผัสกับน้ำ ชั้นเจลจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของอนุภาค

ของ Hydratable Alumina ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างดูดซึมน้ำได้น้อย และค่าสภาพการซึมซาบได้ต่ำในกระบวนการระเหยส่งผลให้เกิดการระเบิดระหว่างอบแห้งและการให้ความร้อนในช่วงต้น

2.3.4 โซเดียมซิลิเกต^{[13][14]}

โซเดียมซิลิเกตหรือหรือเรียกกันในชื่อแก้วเหลว (water glass) มีสูตรทางเคมีคือ Na_2SiO_3 ซึ่งเป็นกลุ่มของสารประกอบโซเดียมออกไซด์กับทรายที่มีได้หลายอัตราส่วน และเรียกชื่อได้ต่างกัน ถ้าอัตราส่วนของโซเดียมออกไซด์ต่อทรายเป็น 1:1 เรียกว่า โซเดียมเมตาซิลิเกต (sodium metasilicate) ถ้าเป็น 3:2 เรียกว่า โซเดียมเซสควิซิลิเกต (sodium sesquisilicate) โดยทั่วไปมีหลายรูปแบบ มีลักษณะเป็นผลึกเป็นแก้วไม่มีอสังฐาน เป็นผงแห้งหรือของเหลวข้น ความแตกต่างในการใช้งานถูกกำหนดโดยส่วนประกอบที่แตกต่างกันของสารเคมีและพารามิเตอร์ ได้แก่ สัดส่วนโดยโมลและความหนืด โดยทั่วไปการผลิตโซเดียมซิลิเกตของเหลวจะได้มาจากการละลายโซเดียมซิลิเกตของแข็งในอุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งสามารถปรับค่าทางเคมีและคุณสมบัติต่างๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท โดยทั่วไปโซเดียมซิลิเกตมีประโยชน์มากสำหรับ อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมย้อมผ้า สำหรับในอุตสาหกรรมเซรามิกส่วนใหญ่ นำมาใช้สำหรับเป็นตัวช่วยกระจายลอยตัว เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการก่ออิฐเตา การใช้งานในวัสดุทนไฟใช้เป็นตัวเชื่อมประสานเมื่อผสมกับมวลรวมน้ำหนักเบา ผลิตเป็นแผงฉนวนกันความร้อน และวัสดุทนไฟการป้องกันอัคคีภัยแบบพาสซีฟ จะเห็นว่าโซเดียมซิลิเกตสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้กว้างขวาง และยังเป็นสารที่เตรียมได้ง่าย มีต้นทุนการผลิตไม่สูง จึงเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ

2.3.5 แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ (Magnesium oxysulfate cement)^[7]

แมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ เป็นอีกหนึ่งตัวเชื่อมประสานที่มีความน่าสนใจอย่างมากในการนำมาใช้งานเป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์มีคุณสมบัติที่ดีในด้านการนำมาใช้งานเป็นตัวเชื่อมประสาน มีความแข็งแรงสูงที่สภาวะอุณหภูมิสูง ทนความร้อนได้ดี และอีกคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อสลายตัวที่อุณหภูมิสูงจะเหลือเพียงแมกนีเซียเพียงเฟสเดียว ซึ่งทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตทนไฟ โดยแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO), แมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium sulfate; MgSO_4) และน้ำ (H_2O) ซึ่งเกิดเป็นออกไซด์ซัลเฟตของแมกนีเซียม โดยทั่วไปรูปแบบของสมการเคมีที่พบได้ทั่วไปเป็นดังนี้



อีกทั้งเรายังสามารถพบเฟสของแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ที่สามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับเฟสของแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์

Phase	Composition
3-1-8	$3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
5-1-3 (5-1-2)	$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$]
1-1-5	$\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
1-2-3	$3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
5-1-7	$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

การใช้งานแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตเป็นผลิตภัณฑ์เฉพาะทางอย่างมาก แม้ว่าในปัจจุบันจะพบว่ามีการนำแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตมาใช้งานน้อยมาก ยังไม่เป็นที่นิยมในการนำมาทำเป็นวัสดุซีเมนต์ที่ทันสมัย เนื่องจากแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตยังคงมีปัญหาในเรื่องของความทนทานต่อน้ำต่ำ อีกทั้งความสามารถในการละลายน้ำของแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำ จำเป็นต้องใช้การบ่มด้วยไอน้ำเพื่อการสร้างเฟสจำนวนมาก ดังนั้น สิ่งเหล่านี้จึงเป็นข้อจำกัดในด้านการใช้งานแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์

แต่อย่างไรก็ตาม แมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ก็ยังคงมีความน่าสนใจในการใช้งานเป็นตัวเชื่อมประสานในคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย เนื่องจากแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์มีคุณสมบัติที่ดีในด้านการนำมาใช้งานเป็นตัวเชื่อมประสาน มีความแข็งแรงสูงที่สภาวะอุณหภูมิสูง ทนความร้อนได้ดี และอีกคุณสมบัติที่สำคัญคือ เมื่อสลายตัวที่อุณหภูมิสูงจะเหลือเพียงแมกนีเซียเพียงเฟสเดียว ซึ่งทำให้ไม่ส่งผลเสียต่อความทนทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีตทนไฟ ดังนั้นเราจึงสนใจที่จะนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 แมกนีเซียมออกไซด์

ในการทดลองใช้แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง (dead-burned magnesia; DBM) ขนาดอนุภาค ตั้งแต่ 0 ถึง 0.47 มิลลิเมตร ในปริมาณร้อยละ 99, 96, 97 และ 98 และได้มีการเตรียมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่ อุณหภูมิต่ำ (light-burned magnesia; LBM) ขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ในปริมาณที่แตกต่างกันออกไปเพื่อ ใช้ในการเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ซีลเฟตดังนี้ 1, 2, 3 และ 4%

3.1.2 แมกนีเซียมซีลเฟต

ในการทดลองมีการเติมแมกนีเซียมซีลเฟตในปริมาณที่แตกต่างกันออกไปเพื่อใช้ในการเตรียมแมกนีเซียม ออกไซด์ซีลเฟตดังนี้ 1, 2, 3 และ 4%

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

- 1) นำแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลองนี้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ขนาดต่างๆ

วัตถุดิบ	ขนาด
MgO	-4+12#
MgO	-12+30#
MgO	-30#
MgO	-325#

มาคำนวณตามสูตรของ Andreasen packing model ดังสมการที่ 3.1

$$CPFT (\%) = \left(\frac{d}{D}\right)^q \quad (3.1)$$

เมื่อ CPFT คือ cumulative percent finer than (%)

d คือ ขนาดอนุภาค

D คือ ขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุด

Q คือ distribution coefficient ซึ่งในการทดลองนี้ q มีค่าเท่ากับ 0.28

2) ทำการเตรียมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 325 โดยการนำผงแมกนีเซียมคาร์บอเนตไปทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3) นำแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงและแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำมาผสมกัน โดยแบ่งเป็น 4 สูตรการทดลอง โดยแต่ละกลุ่มนำมาผสมกับ $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ตามอัตราส่วนต่างๆเพื่อเตรียมเป็นแมกนีเซียมออกซิซัลเฟตซีเมนต์ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรปริมาณส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียม

สูตร	Dead burned MgO (%)				Light burned MgO (%)	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (%)
	-4+12#	12+30#	-30#	-325#	-325#	
A	25	19	9	46	1	1
B	25	19	9	45	2	2
C	25	19	11	42	3	3
D	25	19	9	43	4	4

4) นำมาหล่อเป็นชิ้นงาน โดยการบ่ม 24 ชั่วโมง อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล โดยในการทดลองครั้งนี้จะใช้การดัดงอแบบ 3 จุด (three-pointed bending)

3.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

การขึ้นรูปชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย สามารถทำได้ดังนี้

1. เตรียมส่วนผสมวัตถุดิบ ได้แก่ แมกนีเซียขนาดต่างๆ แมกนีเซียมซัลเฟตและปริมาณน้ำตามอัตราส่วนที่กำหนด (ประมาณร้อยละ 10-11)
2. นำส่วนผสมทั้งหมดที่เตรียมไว้มาผสมเข้าด้วยกัน เติมน้ำลงไปแล้วผสมจนเนื้อเข้ากันดี
3. ทำการหล่อโดยการ ค่อยๆเทลงในแม่แบบซิลิโคน
4. บ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงแกะแบบออก จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของชิ้นงาน

3.3 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของชิ้นงาน^[3]

3.3.1 ความหนาแน่น ค่าการดูดซึมน้ำ และความพรุนตัวของชิ้นงาน

ความหนาแน่นของชิ้นงานสามารถหาได้โดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes Principle) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C830 เริ่มด้วยวิธีการอบชิ้นงานให้ความร้อนออกจากชิ้นงาน ทิ้งไว้สักพักจนชิ้นงานเย็นตัวลง จากนั้นนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นงาน (W_{dry}) บันทึกค่า แล้วนำชิ้นงานไปต้มในน้ำเดือด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่มีน้ำท่วมทั้งชิ้นงานจากนั้นแช่ชิ้นงานทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างต่ำ 12 ชั่วโมงหรือมากกว่า จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานในขณะที่อยู่ในน้ำ (W_{sus}) แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักส่วนเกินออก เพื่อที่จะทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่อิ่มตัวด้วยน้ำในอากาศ (W_{sat}) จากนั้นนำผลที่ได้สามารถไปหาค่าของ Bulk density, Water absorption และ Apparent porosity ได้ดังสมการด้านล่าง

$$\text{Bulk density} = \frac{W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \quad (3.2)$$

$$\text{Water absorption} = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{Apparent porosity} = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{sat} - W_{sus}} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ	Bulk density	= ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	W_{dry}	= น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างที่ชั่งขณะแห้งในอากาศ (กรัม)
	W_{sat}	= น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างที่ซึบน้ำส่วนเกินที่ผิวออก (กรัม)
	W_{sus}	= น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

3.3.2 การแข็งแรงต่อแรงดัด (Modulus of Rupture)^[11]

การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัด เป็นการตรวจสอบความแข็งแรงโดยวัดความสามารถในการต้านทานแรงดัด (Bending Load) และรายงานค่าทดสอบเป็น (Modulus of Rupture; MOR)

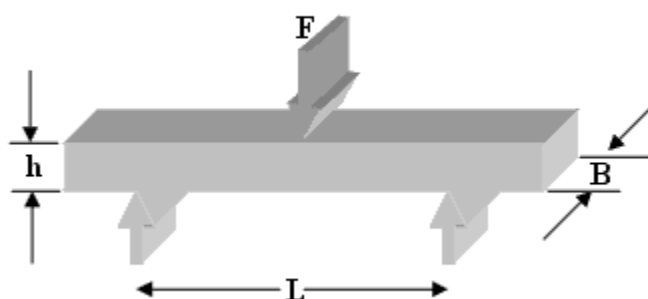
ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

- 1) นำแท่งทดสอบที่ได้จากการหล่อแบบพิมพ์ขนาด 50×50 มิลลิเมตร โดยทดสอบชิ้นงาน 3 ประเภทชิ้นงาน หลังขึ้นรูป (green sample) ชิ้นงานหลังอบแห้ง (dried sample) และชิ้นงานหลังเผา (fired sample)
- 2) หาค่าแรงกดที่ทำให้แท่งทดสอบหัก ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัด
- 3) คำนวณหาค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดจากแรงที่ทำให้ชิ้นงานเสียรูปโดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$MOR = 3PL/2bd^2 \quad (3.5)$$

เมื่อ	MOR	คือ การทนต่อแรงดัด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	P	คือ ขนาดของแรงที่กระทำ (กิโลกรัม)
	L	คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (เซนติเมตร)
	d	คือ ความหนาของชิ้นงาน (เซนติเมตร)
	b	คือ ความกว้างของชิ้นงาน (เซนติเมตร)

การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบและจุดรับรองในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน หัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและชุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน หรือเพลาลโลหะแข็งก็ได้ รัศมีของหัวกด และชุดให้แรงกระทำต้องมีรัศมีอย่างต่ำ 3.2 มิลลิเมตร และ มีรัศมีสูงสุดไม่เกิน 4 เท่าของความหนาชิ้นงานทดสอบ สำหรับหัวกด และ 1.5 เท่าของความหนาชิ้นทดสอบสำหรับชุดรองรับ การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าวเพื่อเป็นการลดความเข้มของความเค้น (stress concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้น นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16:1 ถึง 60:1



รูปที่ 3.1 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด

3.3.3 การตรวจสอบองค์ประกอบเฟส

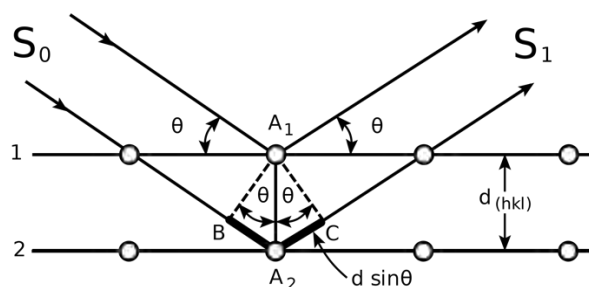
ในการตรวจสอบองค์ประกอบเฟสในชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบจากข้อ 3.3.1-3.3.3 แล้วนั้น มาทำการตรวจสอบองค์ประกอบเฟสด้วยเทคนิค X-ray diffraction ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (รุ่น Bruker D8 Advance จากบริษัท Bruker) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่อง X-ray diffractometer Bruker D8 Advance

โดยใช้หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากโลหะ โดยมี $\text{Cu-K}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ใช้ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ในการทดสอบ โดยรังสีเอ็กซ์จะไปตกกระทบกับผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูปผลึก และ มีการจัดเรียงของอะตอมอย่างมีระเบียบที่มีลักษณะเป็นระนาบ (hkl) จึงทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้น พร้อมกับเลี้ยวเบนออกมาในมุมที่มีลักษณะเฉพาะตามชุดของระนาบนาบ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และสามารถแทรกสอดเสริมกันได้ จึงทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่า รังสีนี้มาจากระนาบใดและมีปริมาณเท่าใด โดย ดูจากค่ามุมและปริมาณความเข้มข้นของรังสี ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไปตามลักษณะของโครงสร้างนั้นๆ

เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพ (QUALITATIVE) และเชิงปริมาณ (QUANTITATIVE) ซึ่งการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบเฟส เริ่มทดสอบโดยให้มุมเริ่มต้นที่ 2θ เท่ากับ 2 องศา และมุมสุดท้ายเท่ากับ 80 องศา จากนั้นผลที่แสดงออกมาจะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม 2θ



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์แสดงให้เห็นว่าผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์ระหว่างสองระนาบมีค่าเป็น $2d\sin\theta$

วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

1. ตัวอย่างเป็นของแข็ง ต้องตัดและขัดด้านที่ต้องการทดสอบให้ผิวเรียบ
2. ตัวอย่างที่เป็นผง จะต้องมีความละเอียดเล็กกว่า 325 mesh หรือ ประมาณ 40 micron จึงจะให้ผลการทดสอบที่ดี โดยปริมาณที่ต้องใช้ในการทดสอบต่อครั้ง จะอยู่ประมาณ 1-2 กรัมในกรณีตัวอย่างเป็นก้อน ต้องมีขนาดกว้างยาว ไม่เกิน 10 เซนติเมตร ทั้งนี้พื้นที่ที่จะทำการทดสอบ จะเป็นเพียงบริเวณเล็กๆ ประมาณ 10 มิลลิเมตร เท่านั้น กรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณน้อยมากๆ ก็อาจทำการทดสอบได้โดยทางห้องปฏิบัติการจะใช้แผ่น Zero Background ในการวางตัวอย่าง เพื่อทำการทดสอบ

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

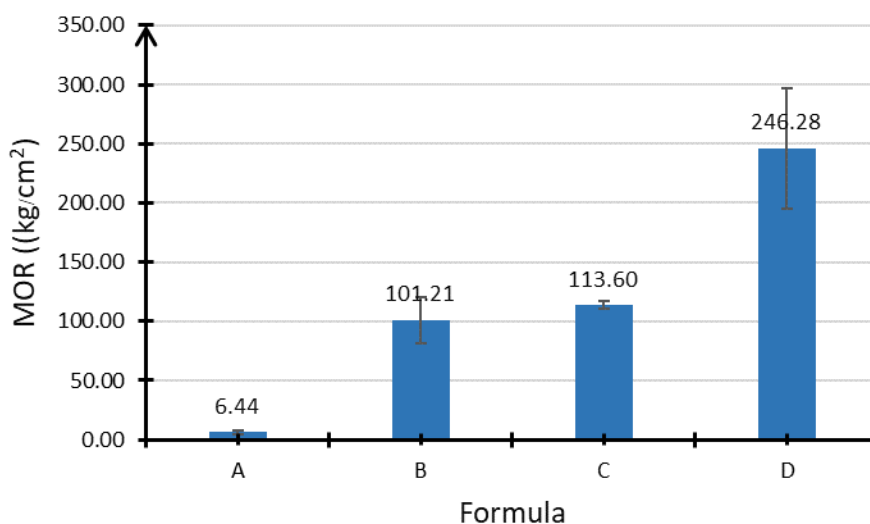
4.1 ผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมก่อนเผา

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมก่อนเผา

ทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดของคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมก่อนเผา สูตร A, B, C และ D ที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ (light burned magnesia; LBM) และ แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) ในอัตราส่วน 1:1 โดยคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมสูตร A มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 1 และแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 1 และเพิ่มปริมาณเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตสูตรร้อยละ 1 ตามลำดับ จนถึงสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 4 และ แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 4

ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมก่อนเผา สูตร A, B, C และ D แสดงดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่ใส่ในสูตร โดยคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมสูตร A ที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 1 และแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 1 มีความแข็งแรงต่อแรงดัดต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 6.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 4 และแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 4 มีความแข็งแรงต่อแรงดัดสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 246.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

สาเหตุที่ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่ใส่ในสูตร เนื่องจากแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเมื่อนำมาผสมกับน้ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเกิดเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและทำให้ส่วนผสมเกิดการแข็งตัวและคงรูป ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ดังนั้นการเติมปริมาณแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

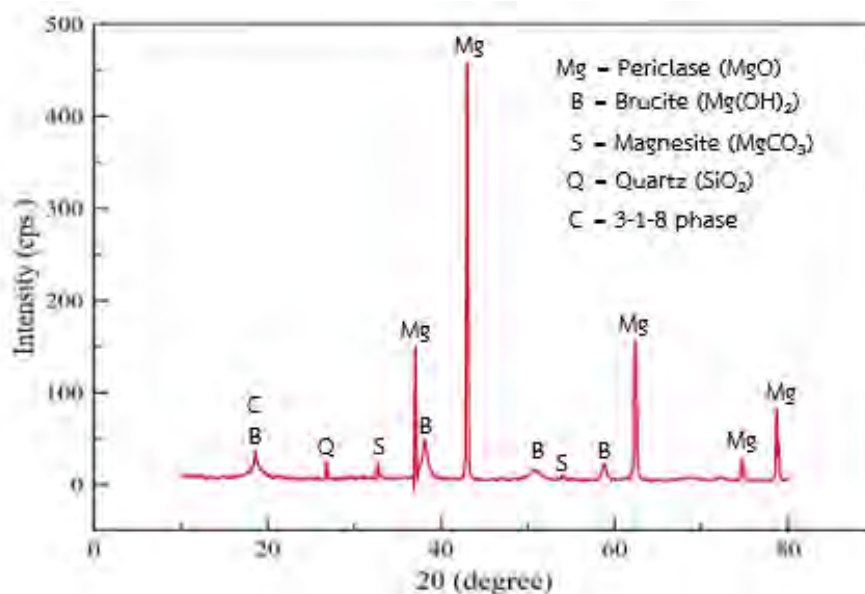


รูปที่ 4.1 ความแข็งแรงต่อแรงดัดก่อนเผาของคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B, C และ D

จากการพิจารณาความแข็งแรงต่อแรงดัดของคอนกรีตทนไฟชนิดทั่วไป (conventional castable) ที่มีขายทางการค้า พบว่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของคอนกรีตทนไฟก่อนเผามีค่าอยู่ในช่วง 70 ถึง 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสูตรที่มีการใช้แมกนีเซียออกซิซัลเฟตซีเมนต์เป็นตัวเชื่อมประสานในการทดลองนี้ จะเห็นว่าสูตร B และ C ซึ่งมีการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตอย่างละร้อยละ 2 และ 3 ตามลำดับ มีความแข็งแรงต่อแรงดัดเท่ากับ 101.2 และ 113.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับคอนกรีตทนไฟทางการค้า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตอย่างละไม่เกินร้อยละ 3 ก็มีความเพียงพอที่จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงดัดอยู่ใกล้เคียงกับคอนกรีตทนไฟทางการค้า ส่วนสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตอย่างละร้อยละ 4 ถึงแม้ชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีความแข็งแรงดัดสูงที่สุด แต่ชิ้นงานจะมีปริมาณของแมกนีเซียออกซิซัลเฟตซีเมนต์ปริมาณมาก ซึ่งเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้น้ำและซัลเฟตที่อยู่ในแมกนีเซียออกซิซัลเฟตซีเมนต์เกิดการสลายตัวออกไป ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงานจำนวนมาก ซึ่งจะส่งผลให้ความแข็งแรงรวมถึงความทนทานต่อการกัดกร่อนของชิ้นงานลดลง ดังนั้นในการทดลองสมบัติของชิ้นงานหลังผ่านการเผาจึงทำการทดลองในสูตรที่มีการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตอย่างละไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่งมีปริมาณแมกนีเซียออกซิซัลเฟตซีเมนต์ไม่สูงเกินไป และมีความแข็งแรงดัดอยู่ในช่วงที่สามารถใช้งานได้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสก่อนเผาและหลังเผา

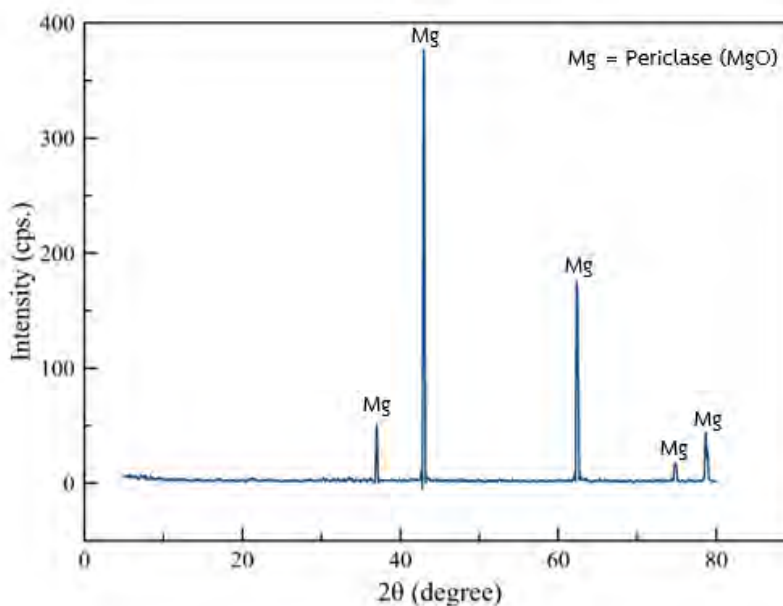
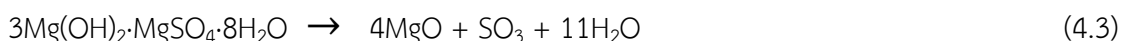
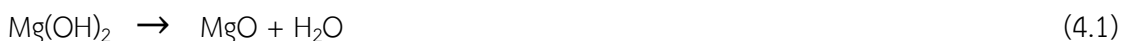
เพื่อทำการวิเคราะห์เฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จึงเลือกทำการศึกษาจากสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 4 และแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 4 ซึ่งน่าจะเกิดเฟสแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ในชิ้นงานมากที่สุด และทำการเตรียมชิ้นงานเฉพาะส่วนละเอียดที่ไม่มีมวลรวมหยาบ เพื่อให้เห็นเฟสซีเมนต์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ผลการวิเคราะห์เฟสของชิ้นงานก่อนเผาด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าปรากฏเฟสหลักของเพริคลาส (Periclase; MgO) โดยมีความเข้มสูงสุดที่ตำแหน่ง 2-theta ที่มุม 36.14° 42.67° และ 62.23° และพบเฟสบลูไซต์ (Brucite; $\text{Mg}(\text{OH})_2$) ที่มุม 18.60° 38.15° 50.99° และ 58.76° โดยเฟสซีเมนต์ที่เกิด คาดว่าจะเกิดแมกนีเซียมออกไซด์ซัลเฟตซีเมนต์ เฟส 3-1-8^[12] ($3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$; 3-1-8 phase) ในปริมาณเล็กน้อยใกล้กับบริเวณที่ซ้อนทับกับเฟสบลูไซต์ที่มุม 18.60° จึงอาจจะทำให้เห็นพีกที่ไม่ชัดมาก นอกจากนี้ยังพบเฟสควอทซ์ซึ่งมาจากผงแมกนีเซียมในปริมาณเล็กน้อยที่มุม 26.78° และพบการเกิดขึ้นของเฟสแมกนีไซต์ที่เกิดจากกระบวนการคาร์บอนชั้นบริเวณผิวของชิ้นงานทดสอบในปริมาณเล็กน้อย



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบเฟสของคอนกรีตทนไฟสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 4 และแมกนีเซียมเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 4 ที่ไม่มีมวลรวมหยาบ

4.1.3 องค์ประกอบทางเฟสของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมหลังเผา

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสของคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 4 และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 ที่ไม่มีมวลรวมหายาบ หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมงด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.4 พบเฟสเพอร์ไคลสเป็นเฟสหลักเพียงเฟสเดียวโดยมีความเข้มสูงสุดที่ตำแหน่ง 2-theta ที่มุม 36.28° 41.80° และ 62.04° แสดงให้เห็นว่าเฟสบลูไซต์ แมกนีไซต์ และแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์ เฟส 3-1-8 เกิดการสลายตัวทางความร้อนเกิดเป็นเฟสเพอร์ไคลสดังสมการที่ 4.1-4.3 เฟสควอตซ์ที่พบเล็กน้อยในชิ้นงานก่อนเผาอาจเกิดการหลอมเป็นเนื้อแก้วที่มีโครงสร้างอสัญฐาน ทำให้ไม่พบเฟสควอตซ์ในชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้ว

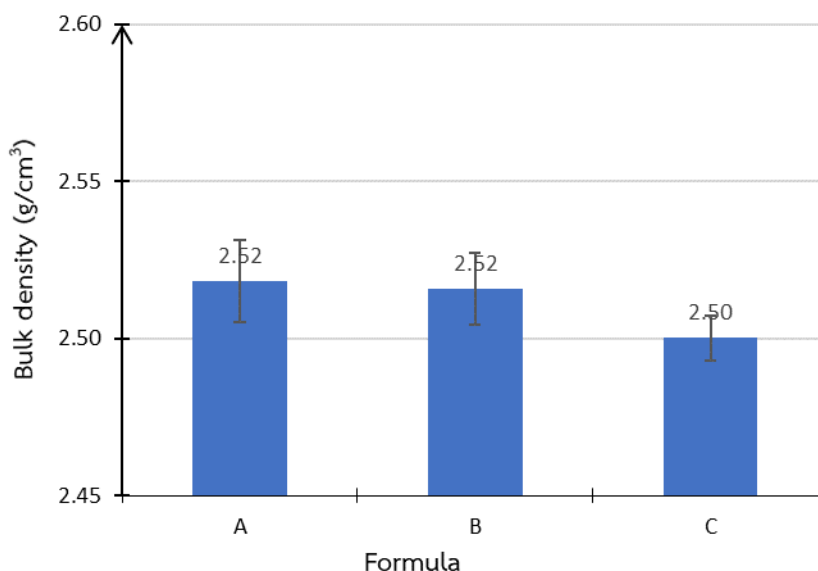


รูปที่ 4.3 องค์ประกอบเฟสของคอนกรีตทนไฟสูตร D ที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 4 และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 ที่ไม่มีมวลรวมหายาบหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียหลังผ่านการเผา

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นรวม ค่าการดูดซึมน้ำ และความพรุนตัวของชิ้นงานหลังเผา

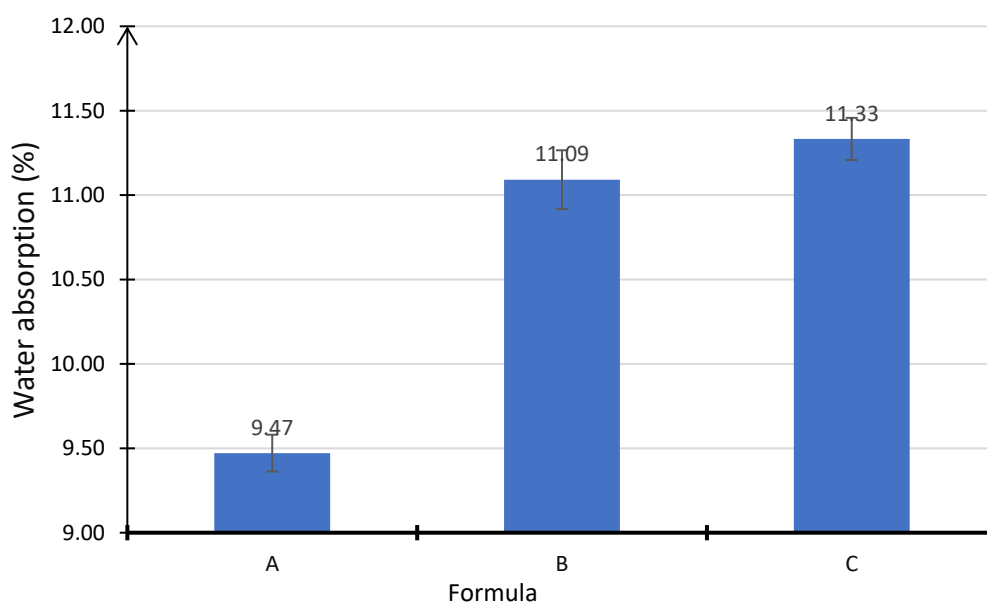
เมื่อนำชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B และ C ไปเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง สีของชิ้นงานจะเข้มขึ้นและมีการหดตัวเกิดขึ้น นำชิ้นงานดังกล่าวไปทำการทดสอบหาค่าความหนาแน่น ความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน



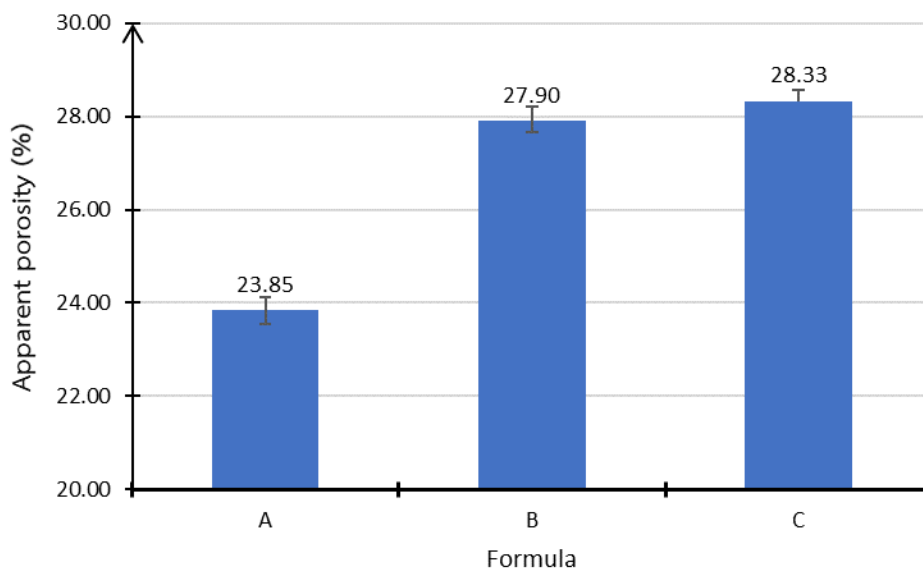
รูปที่ 4.4 ความหนาแน่นรวมของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B และ C หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบพบว่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B และ C มีค่าลดลงเล็กน้อย จากชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A ที่มีความหนาแน่นรวม 2.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงเป็น 2.52 และ 2.49 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสำหรับชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร B และ C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นรวมของชิ้นงานมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อมีการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมออกซิซัลเฟตไฮดรตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมออกซิซัลเฟตไฮดรตจะส่งผลให้เกิดเฟสบลูไซด์ แมกนีไซด์ และแมกนีเซียมออกซิซัลเฟตซีเมนต์ ซึ่งเฟสเหล่านี้เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนเกิดเฟสเพอริเคลสดังสมการที่ 4.1-4.3 และทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในชิ้นงาน ทำให้ความหนาแน่นลดลง

ในส่วนของการทดสอบร้อยละดูดซึมน้ำและร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมทั้ง 3 สูตรจะพบว่า ร้อยละดูดซึมน้ำและร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ในชิ้นงานที่มีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตไฮดรตสูงชันดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 โดยค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมทั้ง 3 สูตรอยู่ในช่วงร้อยละ 9.31 ถึง 11.47 และค่าความพรุนตัวอยู่ในช่วงร้อยละ 23.41 ถึง 28.59 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของร้อยละดูดซึมน้ำและร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานเมื่อมีการเติมแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตไฮดรตสูงชันเกิดจากการสลายตัวของความร้อนของเฟสบลูไซต์ แมกนีไซต์ และแมกนีเซียมออกไซด์ซิลิเกตซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารที่เพิ่มขึ้น ร้อยละการดูดซึมน้ำและร้อยละความพรุนตัวจึงเพิ่มขึ้น



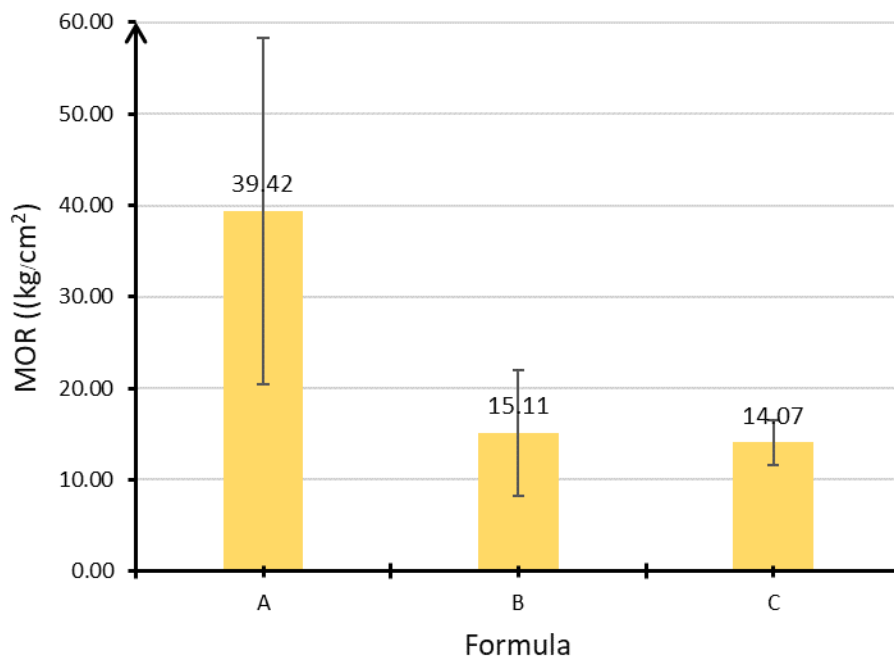
รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมสูตร A, B และ C หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละความพรุนตัวของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B และ C
หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียหลังการเผา

เมื่อนำชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B และ C ไปเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาทั้ง 3 สูตรมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดระหว่าง 14.1 ถึง 39.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.7 โดยคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A ที่มีการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 1 และแมกนีเซียออกซิซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 1 มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดหลังเผาสูงสุดที่ 39.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าความแข็งแรงดัดก่อนเผาคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A ที่มีต่ำที่สุด แต่เมื่อพิจารณาคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร C ที่มีการเติมแมกนีเซียที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 3 และแมกนีเซียออกซิซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตร้อยละ 3 ซึ่งเป็นสูตรที่มีการเติมอัตราส่วนซีเมนต์ในปริมาณมากจะมีค่าความแข็งแรงดัดก่อนเผาสูง แต่มีค่าความแข็งแรงดัดหลังเผาต่ำสุดที่ 14.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของบลูไซด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียออกซิซัลเฟตซีเมนต์ดังสมการที่ 4.1 ถึง 4.3 เกิดเป็นเฟสเพอริเคลส ส่งผลให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างของชิ้นงาน ทำให้ความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียสูตร A, B, และ C หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ และศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำต่อแมกนีเซียมเฮปตะไฮเดรต ในอัตราส่วน 1:1 โดยแบ่งเป็น 4 สูตรการทดลองตามปริมาณแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำร้อยละ 1 และ 4 และปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตในช่วงร้อยละ 1 ถึง 4 เป็นสูตร A B C และ D ตามลำดับ ต่อสมบัติของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมหลังอบแห้ง และชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่ 1500 องศาเซลเซียส โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) หลังผ่านการอบแห้ง ชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมที่เตรียมจากสูตร A มีความแข็งแรงต่อแรงดัดเฉลี่ยต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 6.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในขณะที่คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมที่เตรียมจากสูตร D มีความแข็งแรงต่อแรงดัดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 246.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมหลังที่มีการเติมปริมาณแมกนีเซียมหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่เพิ่มขึ้นจะมีความแข็งแรงต่อแรงดัดที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตซีเมนต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและทำให้ส่วนผสมเกิดการแข็งตัวและคงรูปได้มากขึ้น

2) หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมที่เตรียมจากสูตร C มีความแข็งแรงต่อแรงดัดเฉลี่ยต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 14.1 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมที่เตรียมจากสูตร A มีความแข็งแรงต่อแรงดัดเฉลี่ยสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 39.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยสูตรที่มีการเติมปริมาณแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำและปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่เพิ่มขึ้น จะพบมีความแข็งแรงต่อแรงดัดที่ลดลง และมีความหนาแน่นรวมลดลง แต่ในทางกลับกันค่าการดูดซึมน้ำและค่าความพรุนตัวเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการสลายตัวของเฟสบลูไซด์ แมกนีไซต์ และแมกนีเซียมออกซีซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต เฟส 3-1-8

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและทดลองนี้สามารถปรับปรุงและพัฒนาขั้นต่อไปดังนี้

1) ทำการศึกษาการปรับการกระจายขนาดของอนุภาคของแมกนีเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ส่วนผสมมีการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้มีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานคอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมที่ดียิ่งขึ้น

2) ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดของชิ้นงาน
คอนกรีตทนไฟแมกนีเซีย

เอกสารอ้างอิง

- [1] กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์. เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุทนไฟและวัสดุขัดถู, หน้า33-35.
- [2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ซิลิกาฟูม. วารสารคอนกรีต [อินเทอร์เน็ต]. 2542 [เข้าถึงเมื่อ 28 เมษายน 2563]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.thaitca.or.th/images/journal/journal1/journal1-2.pdf>
- [3] ญัฐริญา ซาคิกานนท์. การทดสอบปูนทนไฟที่พัฒนาขึ้น (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555)
- [4] CPAC. ปูนซีเมนต์ [อินเทอร์เน็ต]. 2017 [เข้าถึงเมื่อ 29 เมษายน 2563]. เข้าถึงได้จาก: https://cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/e-contech%20u2.pdf
- [5] Charles A. Schacht. Refractories Handbook, Schacht Consulting Services Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A; 2004.
- [6] R. Salomao, V.C. Pandolfelli. The role of hydraulic binders on magnesia containing refractory castables: Calcium aluminate cement and hydratable alumina. Brazil. Federal University; 2009
- [7] Sam A. Walling and John L. Provis. Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future, Immobilisation Science Laboratory, Department of Materials Science & Engineering, United Kingdom; 2016.
- [8] Tony Hansen. Alumina Hydrate [Internet]. 2017 [cited 2020 April 28]. Available from: https://digitalfire.com/4sight/material/alumina_hydrate_42.html
- [9] Wagner Moulin Silva. Microsilica-bonded Magnesia-based Refractory Castables: Bonding Mechanism and Control of Damage Due to Magnesia Hydration. Rio de Janeiro. Freiberg University; 2011
- [10] H.R. Borges et al. Andreasen Particle Packing Method on the Development of Geopolymer Concrete for Civil Engineering. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014: 692-697.
- [11] จินตมัย สุวรรณประทีป. การทดสอบแรงดัดงอ[ออนไลน์]. 2020 [เข้าถึงเมื่อ 13 พฤษภาคม 2563]. เข้าถึงได้จาก: <https://tmaxtech.co.th/blog/1>

- [12] Ling Qin, Xiaojian G, Wengui Li and Huan Ye. Modification of Magnesium Oxysulfate Cement by Incorporating Weak Acids, Journal of Materials in Civil Engineering, 2018
- [13] โซเดียมซิลิเกต-วัตดูติบสำหรับอุตสาหกรรมหลายประเภท[ออนไลน์]. 2525 [เข้าถึงเมื่อ 30 เมษายน 2564]. เข้าถึงได้จาก: http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_j/2525_100_22.pdf
- [14] ช.เคมีไทย. โซเดียมซิลิเกตของเหลว. 2017 [เข้าถึงเมื่อ 30 เมษายน 2564]. เข้าถึงได้จาก: <https://cthaichemicals.com/th/sodium-silicate-liquid/>

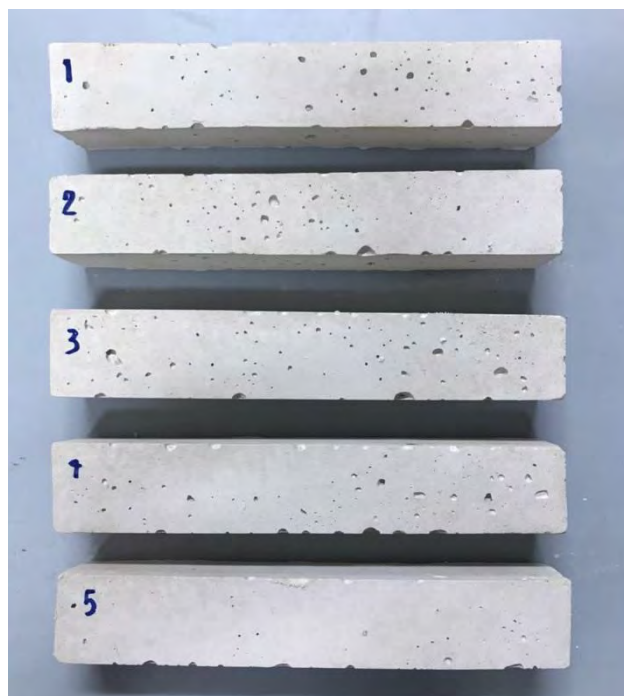
ภาคผนวก

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 สมบัติของคอนกรีตทนไฟชนิดทั่วไปทางการค้า

Properties of Products		คอนกรีตทนไฟชนิดทั่วไป (Conventional Castables)																	
		Normal Conventional Castable						Extra Strength (ES Series)		Lightweight (LW Series)					Coarse Grain (CG Series)				
		CAST 13	CAST 15	CAST 16	CAST 16 SP	CAST 17 M	CAST 18	CAST 18 SP	CAST 13 ES	CAST 15 ES	CAST 10 LW	CAST 11 LW	CAST 13 LW	CAST 15 LW	CAST 18 LW	CAST 13 CG	CAST 14 CG	CAST 17 CG	
Physical Properties : (Typical)																			
Maximum Service Temperature	°C	1300	1500	1600	1600	1700	1800	1800	1300	1500	1000	1100	1300	1500	1800	1300	1400	1700	
Approximate Weight Required for Casting	kg/m ³	2010	2200	2300	2720	2600	2720	2720	2010	2150	600	860	1300	1450	1450	2110	2220	2560	
Approximate Amount of Water Required for Casting	%	11	11	10	10	10	9	10	11	11	110	50	30	22	20	11	10	10	
Bulk Density after Drying at 110 °C	kg/m ³	2070	2250	2350	2350	2650	2830	2830	2115	2270	580	1025	1400	1500	1650	2155	2290	2640	
Modulus of Rupture after Drying at 110 °C	kg/cm ²	70	70	70	70	70	120	120	80	80	3	7	25	40	30	60	80	80	
Cold Crushing Strength after Drying at 110 °C	kg/cm ²	380	300	400	400	400	650	650	450	400	6	40	125	250	150	380	380	400	
Permanent Linear Change	%	+0.50	-0.50	-0.20	-0.20	-0.60	-0.50	-0.50	+0.50	-1.00	-0.90	-0.80	-0.04	-0.80	-0.40	+0.50	-0.03	-0.60	
after Heating at	°C	1260	1480	1595	1595	1705	1760	1760	1260	1480	925	1040	1260	1480	1760	1260	1370	1705	
Thermal Conductivity at 400 °C	Kcal/hr.m.°C	0.52	0.82	0.93	0.93	1.35	1.56	1.56	0.52	0.82	0.10	0.15	0.31	0.51	0.71	0.53	0.56	1.40	
at 600 °C	Kcal/hr.m.°C	0.76	0.85	0.95	0.95	1.38	1.40	1.40	0.76	0.85	0.12	0.17	0.32	0.52	0.66	0.77	0.81	1.42	
at 1000 °C	Kcal/hr.m.°C	0.80	0.87	0.98	0.98	1.20	1.29	1.29	0.80	0.87		0.21	0.35	0.53	0.66	0.83	0.85	1.20	
Chemical Composition : Approximate																			
Alumina (Al ₂ O ₃)	%	28.4	48.0	59.6	59.6	85.7	93.8	93.8	32.8	53.0	24.0	14.7	32.7	68.0	94.4	32.4	46.0	87.8	
Silica (SiO ₂)	%	58.8	45.1	33.2	33.2	6.2	0.2	0.2	46.6	40.0	44.0	54.5	48.7	13.1	0.3	51.9	42.1	5.0	
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	%	4.0	0.9	1.4	1.4	1.6	0.3	0.3	6.2	0.9	6.8	0.5	1.6	1.3	0.1	5.8	1.9	1.2	

ภาพที่ 1 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียก่อนเผาสูตร A



ภาพที่ 2 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียหลังเผาสูตร A



ภาพที่ 3 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมซีเยก่อนเผาสูตร B



ภาพที่ 4 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมซีเยหลังเผาสูตร B



ภาพที่ 5 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียก่อนเผาสูตร C



ภาพที่ 6 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียหลังเผาสูตร C



ภาพที่ 7 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมซียก่อนเผาสูตร D



ภาพที่ 8 คอนกรีตทนไฟแมกนีเซียมซียหลังเผาสูตร D

