

การศึกษาการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูงจากซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว

นางสาวเปรมฤดี กาญจนปิยะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0316-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY ON THE PRODUCTION OF HIGH ALUMINA CEMENT  
FROM USED SILICA-ALUMINA

Miss Premrudee Kanchanapiya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

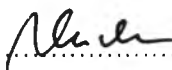
Academic Year 2001

ISBN 974-03-0316-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การศึกษาการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูงจากซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว  
โดย    นางสาวเปรมฤดี กาญจนปิยะ  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา                          รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ


---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

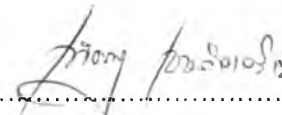
..........คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปิัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..........ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สุรี ชาวเขียว)

..........อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)

..........กรรมการ

(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร)

..........กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ปมทอง มาลากุล ณ อยุธยา)

## บทคัดย่อวิทยานิพนธ์

เปรมฤดี กาญจนปิยะ : การศึกษาการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูงจากซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว (STUDY ON THE PRODUCTION OF HIGH ALUMINA CEMENT FROM USED SILICA-ALUMINA)  
 อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร ชาวกิจเจริญ 121 หน้า, ISBN 974-03-0316-1.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูง (HAC) ร่วมกับหินปูนและตะกอนเหล็ก (GGBS) ซึ่งปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้จะนำไปใช้ประโยชน์ในการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักนิกเกิลให้เป็นก้อนแทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในการทดลองแรกทำการศึกษาถึงผลกระทบที่มีผลต่อการผลิต HAC และแสดงสมบัติทางกายภาพเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานได้แก่ ค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่นและค่าระยะเวลาก่อตัว นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจสอบสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction) ในการวิจัยมีการทดลองสามส่วนคือ ส่วนแรกทำการศึกษาอัตราส่วนของหินปูนต่อซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว (L/Si-Al) ซึ่งแปรค่าตั้งแต่ 35/65 40/60 45/55 และ 50/50 การทดลองชุดที่สองทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเผาซึ่งแปรค่าตั้งแต่ 1200 1300 1400 และ 1450 °C และการทดลองส่วนที่สามทำการศึกษาผลกระทบของเวลาในการเผาซึ่งแปรค่าตั้งแต่ 1.5 2.5 3.5 และ 4.5 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ที่ทำให้กำลังรับแรงอัดของ HAC ที่ L/Si-Al เท่ากับ 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง ณ อายุ 3 วัน และ HAC ผสม GGBS ณ อายุ 28 วัน มีค่าสูงสุดคือ 0.65 และ 0.60 ตามลำดับ สัดส่วนของ L/Si-Al อุณหภูมิและเวลาเผาที่เหมาะสม ในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS คือ 40/60 1300 °C และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยกำลังรับแรงอัดของ HAC น้อยกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนกำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ให้ค่าน้อยกว่ามาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่อายุ 28 วัน แต่ที่ 60 วัน จะให้ค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ สัดส่วน L/Si-Al อุณหภูมิและเวลาเผาที่เหมาะสม อายุการบ่ม 28 วัน จะมีค่าลดลงจากอายุ 3 วัน เท่ากับ 16.7% เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส  $CAH_{10}$  ไปเป็น  $C_3AH_6$  ส่วนกำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน และ 60 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นจากอายุ 3 วัน เท่ากับ 127% และ 186% เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยน เฟส  $C_2AH_6$  ไปเป็น  $C_2ASH_6$  ระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS มีค่าน้อยลงเมื่ออัตราส่วน  $CaO/Al_2O_3$  สูงขึ้นและระยะเวลาก่อตัวมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ สัดส่วน L/Si-Al อุณหภูมิและเวลาเผาที่เหมาะสมกับมาตรฐาน พบว่ามีค่าไม่ผ่านมาตรฐานและมีค่าน้อยกว่ามาก ส่วนระยะเวลาก่อตัวของ HAC ผสม GGBS เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ามีค่าผ่านมาตรฐาน เกิดปฏิกิริยาคอนเวอร์ชันใน HAC โดยเปลี่ยนเฟสจาก  $CAH_{10}$  ไปเป็น  $C_3AH_6$  และเกิดปฏิกิริยาลดการคอนเวอร์ชันใน HAC ผสม GGBS ซึ่งเปลี่ยนเฟสจาก  $C_2AH_6$  ไปเป็น  $C_2ASH_6$  ซึ่งพบที่อายุ 3 วัน

การทดลองที่สองได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่ผลิตได้ในการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อนโดยใช้อัตราส่วนผสมของตะกอนโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.0 w/c = 0.65 ผลการทดลองพบว่าค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความหนาแน่น และการชะละลายมีค่าผ่านมาตรฐานโดยมีประสิทธิภาพในการลดการชะละลายเท่ากับ 99.99%

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา	2544	

นางกัญญา กาญจนปิยะ  
 25/10/2544

# ABSTRACT

##4270430021 : MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD : Spent Silica-Alumina / High-Alumina Cement / Blast-Furnace Slag / Nickel Sludge

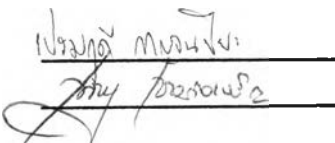
PREMRUDEE KANCHANAPIYA : INVESTIGATIONS ON THE PRODUCTION OF HIGH ALUMINA CEMENT FROM SPENT SILICA-ALUMINA. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., 121 pp, ISBN 974-03-0316-1.

This research investigated the utilization of spent silica-alumina combined with limestone and ground granulated blast-furnace slag (GGBS) to produce High Alumina Cement (HAC) mixed with GGBS. These cements were used to stabilize Nickel sludge instead of Portland cement.

The first experiment was performed to determine not only the factors affecting the HAC manufacturing process, but also the physical properties of HAC and HAC mixed with GGBS, such as the compressive strength, density and setting times. In addition, X-Ray diffraction was utilized in analysing the mineral properties. A total of three kinds of experiment were performed. The first experiment indicated the effect of chemical composition by varying the lime/spent silica-alumina ratio (L/Si-Al) at 35/65 40/60 45/55 and 50/50. The second experiment indicated the effect of the firing temperature by varying temperatures at 1200 1300 1400 and 1450 °C. The third experiment indicated the effect of the firing time by varying times at 1.5 2.5 3.5 and 4.5 hours. The results showed that the water/cement ratio (w/c) which made the highest compressive strength in HAC ( L/Si-Al = 40/60 firing temperature = 1200 °C ; firing time = 2.5 hours) and HAC mixed with GGBS at 3 days and at 28 days were 0.65 and 0.60 respectively . The optimum conditions of the L/Si-Al, firing temperature and firing times for producing HAC and HAC mixed with GGBS were 40/60 ,1300 °C and 3.5 hours, respectively. By using these conditions, the compressive strength of HAC was lower than Standard and the compressive strength of a HAC mixed with GGBS was lower than Standard at 28 days, but within the standard limit of 60 days. The compressive strength of HAC at 28 days decreased by 16.7 % when compared with that of 3 days, due to the changing of phase  $CAH_{10}$  to phase  $C_3AH_6$ , while the compressive strength of HAC mixed with GGBS at 28 days and 60 days increased by 127 % and 186 % in comparison to that of 3 days, due to changing phase  $C_2AH_6$  to phase  $C_2ASH_6$ . When the setting time of HAC and HAC mixed with GGBS decreased,  $CaO/Al_2O_3$  ratio increased. In contrast, the setting time of HAC and HAC mixed with GGBS increased when the firing temperature decreased. The setting time of HAC was much lower than Standard while HAC mixed with GGBS was within Standard . Upon using XRD, it was found that the conversion reaction in HAC occurred by changing  $CAH_{10}$  to phase  $C_3AH_6$ . Similarly, the reversion reaction in HAC mixed with GGBS occurred by changing phase  $C_2AH_6$  to phase  $C_2ASH_6$  at 3 days .

As optimum results were obtained from the second experiment, it was reapplied in order to detect the preliminary properties of HAC and HAC mixed with GGBS in the stabilization of nickel sludge by using a nickel sludge/cement ratio of 1.0 and a water/cement ratio of 0.65. The results indicated that compressive strength, density and extraction tests on specimens were all within standard limits.

Department	<u>Environmental Engineering</u>	Student's signature
Field of study	<u>Environmental Engineering</u>	Advisor's signature
Academic year	<u>2001</u>	

  
\_\_\_\_\_



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รศ. ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ เป็นอย่างสูง ที่เมตตาและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังกรุณาและแนะนำให้คำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอดวิชาความรู้ทางวิชาการ

ขอขอบพระคุณบิดามารดา และพี่ๆทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคุณอนุรักษ์ หัวหน้าฝ่ายการผลิตบริษัท เพอรอกซิไทยจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์การทำวิจัย ตลอดจนวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและมูลนิธิชิน โสภณพนิชที่มอบทุนสนับสนุนบางส่วนของงานวิจัยในครั้งนี้

ท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรัก คำปรึกษา และความช่วยเหลือขณะที่ศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญรูป .....	ฏ
สัญลักษณ์ .....	ด
บทที่ 1 บทนำ .....	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย .....	2
บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร .....	3
3.1 ปูนซีเมนต์อลูมินาสูง .....	3
3.1.1 กรรมวิธีในการผลิต .....	3
3.1.2 ปัจจัยที่เหมาะสมของวัตถุดิบ .....	8
3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ .....	9
3.1.4 ความต้านทานต่อสารเคมี .....	15
3.1.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน .....	17
3.1.6 Conversion และผลที่เกิดขึ้น .....	17
3.1.7 การพัฒนาปูนซีเมนต์อลูมินาสูงเพื่อป้องกันการเกิด Conversion .....	21
3.2 ขยะอุตสาหกรรมที่ใช้ในการวิจัยนี้ .....	21
3.2.1 ซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว (Spent Silica- Alumina) .....	21
3.2.2 Blast Furnance Slags .....	24
3.2.3 ตะกอนโลหะหนัก .....	24
3.3 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย .....	26

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 แผนการทดลอง และการดำเนินการวิจัย.....	34
4.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย.....	34
4.2 การดำเนินการวิจัย.....	36
- การทดลองที่ 1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการนำซิลิกา-อลูมินา ที่ใช้แล้วโดยนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูง ร่วมกับ หินปูนและ GGBS .....	36
- การทดลองที่ 2 การตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์อลูมินา สูงที่ผลิตได้ในการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อน .....	38
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	47
5.1 การศึกษาการนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วผลิต HAC.....	47
5.1.1 สมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ.....	47
5.1.2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ.....	47
5.1.3 ศึกษาผลของสัดส่วนทางเคมีที่อุณหภูมิและเวลาเผาครั้งที่ .....	49
5.1.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิเผาที่สัดส่วนและเวลาเผา.....	65
5.1.5 ศึกษาผลของเวลาในการเผาที่สัดส่วนและอุณหภูมิเผาครั้งที่.....	71
5.1.6 สรุปสัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา อุณหภูมิและเวลาเผาที่ เหมาะสมในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS .....	78
5.1.7 องค์ประกอบที่พบใน HAC และ HAC ผสม GGBS.....	80
5.2 การศึกษาการนำปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ไปใช้ในการทำเสถียรตะกอนโลหะ หนักให้เป็นก้อน .....	81
5.2.1 ส่วนประกอบของตะกอนนิกเกิล .....	81
5.2.2 ผลการทดสอบการชะละลายของตะกอนที่มีนิกเกิล .....	81
5.2.3 ผลการศึกษาการนำ HAC และ HAC ผสม GGBS มาใช้ในการทำ เสถียรตะกอนนิกเกิลให้เป็นก้อน .....	82
5.3 ผลการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น .....	83



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6      สรุปผลการศึกษา .....	84
บทที่ 7      ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม.....	85
รายการอ้างอิง .....	86
บรรณานุกรม .....	89
ภาคผนวก .....	91
ภาคผนวก ก. ข้อมูลผลการทดลองปูนซีเมนต์ลูมินาสูงและปูนซีเมนต์ลูมินาสูง ผสมตะกั่วหนัก .....	92
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการวิเคราะห์เฟสด้วย X-Ray Diffraction .....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	121

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงปริมาณของออกไซด์และฟอสต่างๆในปูนซีเมนต์ออลูมินาสูง .....	4
ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์ออกไซด์ต่างๆในปูนซีเมนต์ออลูมินาสูงตามมาตรฐานอังกฤษ .....	4
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของแอมบ็อกไซด์ในหลายๆ ประเทศ .....	5
ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติของส่วนประกอบภายใน HAC ในหลายๆประเทศ .....	7
ตารางที่ 5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบ .....	11
ตารางที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ต่างๆใน HAC ของแต่ละประเทศ .....	13
ตารางที่ 7 ส่วนประกอบทางเคมีและช่วงของคุณสมบัติสำหรับ HAC .....	14
ตารางที่ 8 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ออลูมินาสูง .....	16
ตารางที่ 9 ผลของการทดสอบ Sieve Test ของปูนซีเมนต์ออลูมินาสูง .....	17
ตารางที่ 10 แสดงสารเคมีที่ HAC สามารถต้านทานได้ .....	18
ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดคอนกรีต HAC จาก 39 ตัวอย่าง .....	21
ตารางที่ 12 แสดงส่วนประกอบซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว .....	22
ตารางที่ 13 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ GGBS ที่มาจากแหล่งต่าง ๆ กัน .....	24
ตารางที่ 14 แสดงเฟสที่พบใน HAC ที่ผสมสารปอซโซลานต่างชนิดกัน .....	32
ตารางที่ 15 แสดงวิธีทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์ .....	35
ตารางที่ 16 สัดส่วนโดยน้ำหนัก (%) ของวัตถุดิบที่ใช้ผสม .....	37
ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของปูนขาว GGBS และซิลิกา-อลูมินาโดย เครื่อง XRF .....	48
ตารางที่ 18 ส่วนประกอบของ HAC ตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ผสม .....	48
ตารางที่ 19 อัตราส่วนของอลูมินาต่อแคลเซียมใน HAC ที่แต่ละสัดส่วนการผสมวัตถุดิบ .....	49
ตารางที่ 20 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2 ชั่วโมง .....	49
ตารางที่ 21 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	51
ตารางที่ 22 ค่าระยะเวลาก่อตัวที่เวลาเผา 3.5 ชั่วโมงของสัดส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา เท่ากับ 35/65 และ 40/60 .....	53
ตารางที่ 23 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่สัดส่วน L/S = 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	54
ตารางที่ 24 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง .....	55

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 25 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	57
ตารางที่ 26 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 3.5 ชั่วโมง .....	60
ตารางที่ 27 ค่าความหนาแน่น ที่สัดส่วน L/S = 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	61
ตารางที่ 28 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง .....	62
ตารางที่ 29 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	63
ตารางที่ 30 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง สัดส่วน L/S = 40/60 .....	66
ตารางที่ 31 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง สัดส่วน L/S = 40/60.....	68
ตารางที่ 32 ค่าความหนาแน่น ที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง สัดส่วน L/S = 40/60.....	70
ตารางที่ 33 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1300°C สัดส่วน L/S = 40/60.....	72
ตารางที่ 34 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60 .....	74
ตารางที่ 35 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60 .....	77
ตารางที่ 36 สรุปคุณสมบัติต่างๆของ HAC และ HAC ผสม GGBS ณ สภาพที่ เหมาะสมที่สุด .....	79
ตารางที่ 37 แสดงเฟสที่พบใน HAC และ HAC ผสม GGBS ณ อายุการบ่มต่างๆ.....	81
ตารางที่ 38 ปริมาณโลหะหนักในตะกอนที่มีนิกเกิล .....	82
ตารางที่ 39 ผลการทดสอบการชะละลายของตะกอนนิกเกิล .....	82
ตารางที่ 40 คุณสมบัติของตะกอนนิกเกิลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน.....	83
ตารางที่ 41 แสดงรายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS ต่อ 1 กิโลกรัม .....	83
ตารางที่ ๔๑ ค่าความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด ของ HAC.....	92
ตารางที่ ๔๒ ค่าความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด ของ HAC ผสม GGBS .....	92
ตารางที่ ๔๓ ค่าระยะเวลาก่อตัว ของ HAC โดยที่ w/c = 0.65.....	93
ตารางที่ ๔๔ ค่าระยะเวลาก่อตัว ของ HAC ผสม GGBS โดยที่ w/c = 0.40 .....	94
ตารางที่ ๔๕ ค่ากำลังรับแรงอัด ที่สัดส่วน L/S = 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	95

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ผ6 ค่าความหนาแน่น ที่สัดส่วน L/S = 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	96
ตารางที่ ผ7 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง .....	97
ตารางที่ ผ8 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง .....	98
ตารางที่ ผ9 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	99
ตารางที่ ผ10 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	100
ตารางที่ ผ11 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60 .....	101
ตารางที่ ผ12 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60 .....	102
ตารางที่ ผ14 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง สัดส่วน L/S = 40/60 .....	103
ตารางที่ ผ14 ค่าความหนาแน่น ที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง สัดส่วน L/S = 40/60 .....	104
ตารางที่ ผ15 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลา 3.5 ชั่วโมง .....	105
ตารางที่ ผ16 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลา 3.5 ชั่วโมง .....	106
ตารางที่ ผ17 คุณสมบัติของตะกอนนิกเกิลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน .....	107
ตารางที่ ผ18 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC Non-Hydrated L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	109
ตารางที่ ผ19 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC Hydrated 3 วัน L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	111
ตารางที่ ผ20 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC+GGBS Non-Hydrated L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	113
ตารางที่ ผ21 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC+GGBS Hydrated 3 วัน L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	115
ตารางที่ ผ22 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC+GGBS Hydrated 10 วัน L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	115
ตารางที่ ผ23 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC+GGBS Hydrated 30 วัน L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	118
ตารางที่ ผ24 X-RAY Diffraction Pattern ของสารประกอบต่างๆ .....	120

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 แสดงกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูง.....	6
รูปที่ 2 โชนของซีเมนต์ในระบบ Lime - Alumina – Silica .....	10
รูปที่ 3 เฟสไดอะแกรมของ แคลเซียม-อลูมินา.....	10
รูปที่ 4 ปูนขาว ซิลิกา-อลูมินาที่เผาและไม่เผา.....	40
รูปที่ 5 ตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์แห้งที่ไม่บดและบดแล้ว.....	40
รูปที่ 6 ขวดผสมและลูกบดอลูมินา .....	41
รูปที่ 7 เครื่องผสม Ball Mill .....	41
รูปที่ 8 เตาเผาที่อุณหภูมิสูง (Electrical Muffle Kiln).....	42
รูปที่ 9 เครื่องมือทดสอบบนเลนแอร์เพอร์มิอะบิลิตี้ ความถ่วงจำเพาะ ระยะเวลาก่อตัว.....	42
รูปที่ 10 เครื่องผสมและแบบหล่อมอร์ต้า.....	43
รูปที่ 11 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	44
รูปที่ 12 แบบหล่อทรงกระบอกทำจากท่อพีวีซี.....	45
รูปที่ 13 เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน ( Rotary Agitator) .....	45
รูปที่ 14 วัตถุดิบที่ผสมและขึ้นรูปโดยเครื่อง Hydraulic Press.....	46
รูปที่ 15 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง .....	50
รูปที่ 16 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ผสม GGBS ณ อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง.....	50
รูปที่ 17 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง .....	52
รูปที่ 18 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ผสม GGBS ณ อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง.....	52
รูปที่ 19 ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ 0.5-0.8 .....	54
รูปที่ 20 ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ณ อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ 0.5-0.8.....	55
รูปที่ 21 กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50.....	56
รูปที่ 22 กำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ณ อัตราส่วนปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50.....	56
รูปที่ 23 กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50.....	58
รูปที่ 24 กำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ณ อัตราส่วนปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50.....	58
รูปที่ 25 ความหนาแน่นของ HAC ณ อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ 0.5-0.8.....	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 26 ความหนาแน่นของ HAC ผสม GGBS ณ อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ 0.5-0.8 .....	61
รูปที่ 27 ความหนาแน่นของ HAC ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50.....	62
รูปที่ 28 ความหนาแน่นของ HAC ผสม GGBS ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50.....	63
รูปที่ 29 ความหนาแน่นของ HAC ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50.....	64
รูปที่ 30 ความหนาแน่นของ HAC ผสม GGBS ณ อัตราส่วนปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50.....	64
รูปที่ 31 แสดงลักษณะปูนที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	65
รูปที่ 32 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง L/S = 40/60 .....	66
รูปที่ 33 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ผสม GGBS ณ เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง L/S = 40/60.....	67
รูปที่ 34 กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อุณหภูมิในการเผา 1200-1400 °C.....	68
รูปที่ 35 กำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ณ อุณหภูมิในการเผา 1200-1400 °C ....	69
รูปที่ 36 ความหนาแน่นของ HAC ณ อุณหภูมิในการเผา 1200-1400 °C.....	70
รูปที่ 37 ความหนาแน่นของ HAC ผสม GGBS ณ อุณหภูมิในการเผา 1200-1400 °C ....	71
รูปที่ 38 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60 .....	73
รูปที่ 39 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC+GGBS ณ อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60.....	73
รูปที่ 40 กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ เวลาในการเผา 1.5-4.5 ชั่วโมง .....	75
รูปที่ 41 กำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ณ เวลาในการเผา 1.5-4.5 ชั่วโมง.....	75
รูปที่ 42 ความหนาแน่นของ HAC ณ เวลาในการเผา 1.5-4.5 ชั่วโมง .....	77
รูปที่ 43 ความหนาแน่นของ HAC ผสม GGBS ณ เวลาในการเผา 1.5-4.5 ชั่วโมง.....	78
รูปที่ ๗1 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC Non-Hydrated L/S=40/60 1300°C 3.5 ชั่วโมง .....	110
รูปที่ ๗2 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC Hydrated 3 วัน L/S=40/60 1300°C 3.5 ชั่วโมง .....	112
รูปที่ ๗3 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC+GGBS Non-Hydrated L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	114

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ๘4 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC ผสม GGBS Hydrated 3 วัน L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	116
รูปที่ ๘5 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC ผสม GGBS Hydrated 10 วัน L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	117
รูปที่ ๘6 X-Ray Diffraction Pattern ของ HAC ผสม GGBS Hydrated 30 วัน L/S=40/60 1300 °C 3.5 ชั่วโมง .....	119

## สัญลักษณ์

---

A	$\text{Al}_2\text{O}_3$
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Gibbsite
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminium oxide
C	CaO
$\text{C}_2\text{AS}$	Gehlenite
$\text{C}_3\text{A}$	Tricalciumaluminate
$\text{C}_4\text{AF}$	Tetracalciumaluminoferrite
CA	Monocalciumaluminate
$\text{CA}_2$	Calciumdialuminate
CAF	Monocalciumaluminoferrite
CaO	Calcium oxide
CS , $\text{C}_2\text{S}$	Calcium silicate
F	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Iron oxide
GGBS	Ground granulated blast furnace slag
HAC	High alumina cement
MgO	Magnesium oxide
S	$\text{SiO}_2$
$\text{SiO}_2$	Silicadioxide
$\text{TiO}_2$	Titaniumdioxide
XRD	X-Ray diffraction