บทที่ 3
ทบทวนเอกสาร

3.1 ปูนซีเมนต์อลูมินาสูง

ปูนซีเมนต์อลูมินาสูงเป็นชนิดหนึ่งของปูนซีเมนต์ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในฝรั่งเศสเมื่อตอนต้นของศตวรรษที่ 20 เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาของการถูกกัดกร่อนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากซัลเฟต

ปูนซีเมนต์อลูมินาสูงมีความแตกต่างอย่างมากจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือเฟสที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต (CS, C_2S) และมีปริมาณของเฟสไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) น้อยโดยมีเฟสเฟอไรท์อยู่ด้วย ส่วนในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงจะมีเฟสโมโนแคลเซียมอลูมิเนต (CA) เป็นส่วนมากและมีเฟสแคลเซียมอลูมิโนเฟอรไรท์ (CAF) ในสัดส่วนรองลงมา เฟส $C_{12}A_7$ ปกติจะพบในปริมาณที่น้อยแต่มันมีความสำคัญต่อปฏิกริยาไฮเดรชันในตอนเริ่มต้นของเฟส CA ซึ่งเป็นเฟสที่สำคัญ ตารางที่ 1 แสดงปริมาณออกไซด์และเฟสต่างๆ ในปูนซีเมนต์อลูมินาสูง ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์อลูมินาสูงที่พบ นอกจาก CA และ $C_{12}A_7$ ยังพบ CA_2 , C_2S, C_2AS และ CT อีกด้วยส่วนตารางที่ 2 แสดงเปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ต่างๆ ในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงตามมาตรฐานอังกฤษ BS915:PART2:1972* ซึ่งมีสัดส่วนของอลูมินาต่อปูนขาวระหว่าง 0.85-1.3

3.1.1 กรรมวิธีในการผลิต

3.1.1.1.<u>วัตถุดิบ</u> วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือ หินปูนหรือหินชอล์ค (ให้ธาตุแคลเซียม) และหินเชลหรือดินเหนียว (ให้ธาตุซิลิกอนและอลูมิเนียม) แต่วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงคือหินปูนและบอกไซด์ (Bauxite) ซึ่งเป็นหินที่มีอลูมินาสูง

3.1.1.2.<u>การให้ความร้อน</u> ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัตถุดิบที่ผสมกันอย่างดีแล้วจะถูกเผาไปจนถึงจุดใกล้หลอมละลายซึ่งเรียกว่าปูนเม็ด (Clinker) แต่ในกรณีของการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูงวัตถุดิบจะถูกเผาไปจนหลอมละลายและผสมกันอย่างสมบูรณ์ กระบวนการเผาของปูนซีเมนต์อลูมินาที่กล่าวข้างต้นเป็นวิธีการผลิตของประเทศอังกฤษซึ่งก็ใช้ในประเทศอื่นๆด้วย แต่ก็มีบางประเทศที่ไม่ได้เผาแบบนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบนั้นๆ

---

* อ้างจาก Neville ,1975

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณของออกไซด์และเฟสต่าง ๆในปูนซีเมนต์อลูมินาสูง (Bames, 1983)

Oxide(%) [a]			Crystaline phase [b]								
Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CA	$C_{12}A_7$	CA_2	A	β-C_2S	C_2AS	Ferrite	Wustite	Pleochroite
38-45	3-8	8-16[c]	M	T	T	-	m	M	M	m	M
48-55	5-7	1.5-3.5	M	T	M	t	m	M	-	-	-
68-73	<0.5	<0.4	M[d]	T	M	m	-	-	-	-	-
78-90	<0.3	<0.2	M	T	m[e]	M	-	-	-	-	-

[a] CaO is the main completement to $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3$

[b] t = trace , M = major phase, m = minor phase

[c] A significant proportion of the iron oxide is in the FeO state

[d] In certain cements CA is a minor phase

[e] In certain cements CA_2 is not detected

ตารางที่ 2 เปอร์เซ็นต์ออกไซด์ต่าง ๆในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงตามมาตรฐานของประเทศอังกฤษ (Neville, 1975)

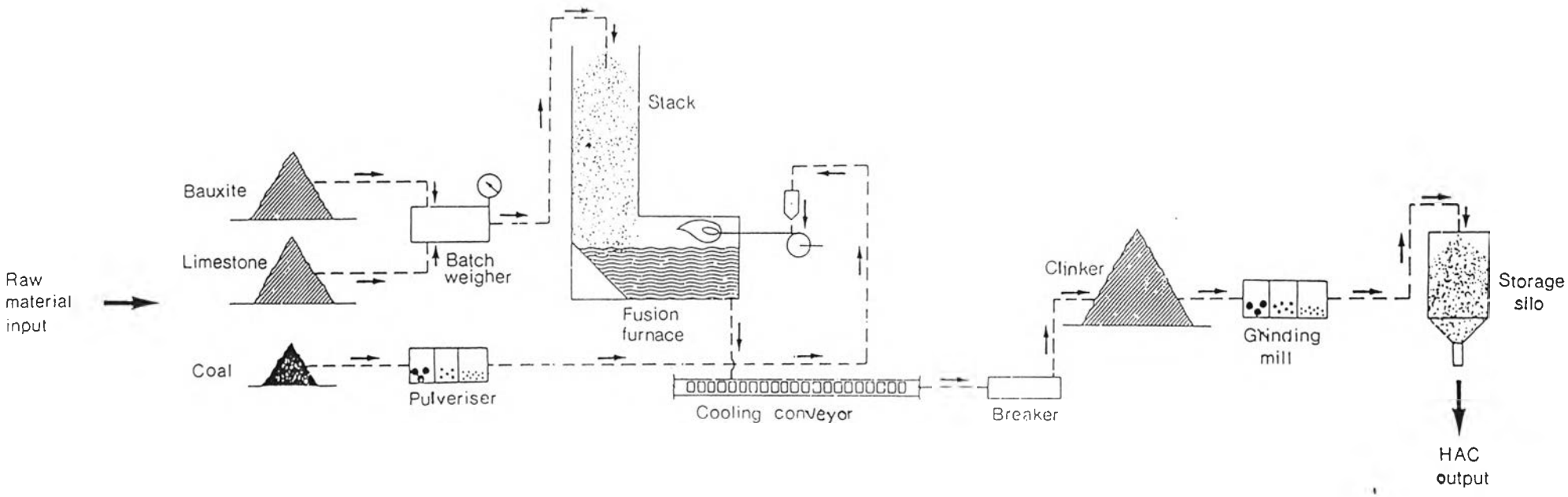
Oxide	Content (%)
CaO	35-39
Al_2O_3	37-41
SiO_2	3.5-5.5
Fe_2O_3	9-12
FeO	4-6
TiO_2	1.5-2.5
MgO	1.5-1
Insoluble residue	1

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1.3. <u>กระบวนการผลิต</u> การผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูงของประเทศอังกฤษ แสดงไว้ในรูปที่ 1 เตาเผาปูนเป็นรูปตัว L (L-shaped) วัตถุดิบ (บอกไซด์และหินปูน) ถูกป้อนเข้าไปในเตาเผาผ่านทางปากปล่องที่อยู่ในแนวดิ่งในรูปของมวลก้อนเพื่อที่จะให้ก๊าซที่ถูกเผาไหม้ผ่านไปได้อย่างอิสระ ดังนั้นวัตถุดิบละเอียดจะต้องถูกผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำปริมาณเล็กน้อยเพื่อให้อยู่ในรูปของมวลก้อนขนาดประมาณ 100 มม. ก่อนที่จะถูกใส่เข้าไปในเตาเผา ที่ส่วนล่างของปล่องไฟวัตถุดิบจะถูกเผาโดยความร้อนจากการเผาถ่านหิน วัตถุดิบจะเกิดการคายน้ำ (Dehydrated) คายคาร์บอน (Decarbonated) และเกิดออกไซด์ของแคลเซียมและอลูมิเนียมขึ้นมา ในที่สุดมันจะหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 1600 ^{o}C และจะทำปฏิกริยาซึ่งกันและกัน ต่อจากนั้นวัตถุดิบที่ถูกหลอมแล้วจะไหลต่อไปสู่เตาเผาส่วนที่อยู่แนวนอนและส่งต่อไปยังสายพานซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของวัตถุดิบ ทำให้ก่อรูปเป็นแผ่นราบซึ่งจะถูกทำให้แตกออกไปอยู่ในรูปของปูนเม็ด ปูนเม็ดจะถูกเก็บไว้ใน Stock Piles เพื่อให้ปูนเม็ดเย็นตัวลงอีกก่อนจะนำไปบดใน Grinding Mills ต่อไป ในกระบวนการผลิตปูนเม็ดอลูมินาสูงไม่มีวัตถุผสมเพิ่มเหมือนอย่างกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งจะถูกเติมยิปซัมเพื่อหน่วงเวลาก่อตัวเพราะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์อลูมินาสูงจะถูกควบคุมได้โดยส่วนประกอบภายในเอง คุณสมบัติของแร่บอกไซด์ในหลายๆ ประเทศแสดงไว้ในตารางที่ 3 ส่วนตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติของส่วนประกอบภายในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงในหลายๆประเทศ

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของแร่บอกไซด์ในหลาย ๆ ประเทศ (Neville,1975)

Source of Bauxite	Percentage content							
	Combined water	Loss on ignition	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	MgO
France	5-10	11.5-12.5	3.5-6	45-55	20-25	0.5-3	2.5-3.5	-
Greece	1-3	11-12.5	2-3.5	50-58	25-30	0.5-3	2.5-3.5	-
Yugoslavia	3-8	18-20	2-3	50-55	20-25	0.5-3	2.5-3.5	-
Mixed(including Surinam)	3.5	24	3.5	56	14	-	2.5	-
Limestone	0.1-2	42-43.5	0.5-1.5	0.25-1	0.2-0.6	53-55.5	-	0.25-1



รูปที่ 1 แสดงกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูง (Neville, 1975)

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติของส่วนประกอบภายใน HAC ในหลายๆประเทศ (Neville,1975)

Country of Manufacture	Percentage content							
	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	FeO	TiO_2	Color	Remarks
United Kingdom France Spain Yugoslavia	35-39	37-41	3.5-5.5	9	6	1.5-2	Very dark Gray	No additions During grinding
Czenchoslovakia	35-39	39-44	3.5-5.5	9-14	0-1	1.5-2	Yellow-brown	Sintered
Germany	38-42	44-51	5-8	0-1	0.5-2	1-2	Very light grey	Some content Of SO_3 and Metallic iron
United States	35-39	37-41	8-10	4-6	4-6	1.5-2	Ligth grey	Some GGBS Added during Grinding

ระหว่างการผลิตปูนเม็ดจะทำการตรวจสอบส่วนประกอบเคมีของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเสร็จอย่างต่อเนื่องเพื่อจะได้ปรับสัดส่วนของวัตถุดิบให้เหมาะสมก่อน ซึ่งในบางครั้งกระบวนการผลิตจะแตกต่างจากที่กล่าวไว้ข้างต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบที่ใช้ วัตถุดิบที่อ่อนเกินไปอาจเกิดการแตกได้ในขณะที่เคลื่อนผ่านลงไปในปล่อง ดังนั้นในกรณีเช่นนี้จะใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) คล้ายกับการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัตถุดิบจะถูกบดและผสมเข้าด้วยกันก่อนถูกป้อนเข้าไปในเตาเผาแล้วหลอมละลายผ่านไปยังส่วนล่างของเตาเผาซึ่งจะถูกดักและทำให้เย็น ต่อจากนั้นจะถูกบดไปเป็นปูนเม็ด

การผลิต HAC อีกวิธีหนึ่งเป็นการบดวัตถุดิบให้ละเอียดแล้วนำมาผสมกัน นำไปเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลาย ก็จะสามารถผลิต CA ได้ โดยในปี 1924 Decolland* ได้จดลิขสิทธิ์สำหรับการผลิต HAC โดยการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลาย (เกิด Fusion[1] ไม่สมบูรณ์) ในเตาเผา

---

* อ้างจาก Robson, 1962

[1] เป็นการเผาปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายของวัตถุดิบ

แบบหมุนซึ่งเหมือนกับที่ใช้ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ถ้าวัตถุดิบมีแร่เหล็กปนอยู่มากจะทำให้การเผาด้วยทำได้ยากพราะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้น ๆ ลง ๆ เล็กน้อยจะทำให้เกิดวงแหวน (Ring) ไปกั้นแนวการไหลตลอดเตาเผา ดังนั้นการเผาด้วยวิธีนี้มักจะได้ผลดีเมื่อใช้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณแร่เหล็กต่ำเท่านั้น กระบวนการเผาแบบนี้จะใช้กับวัตถุดิบที่บดละเอียดแต่จะต้องใช้เวลาในการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลายนานขึ้นเช่น ใช้เวลา 9-11 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 900-1100 ^{o}C หรือ 6-8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 1000-1100 ^{o}C เป็นต้น การเผาด้วยกระบวนการ Sintering[2] นี้จะเหมาะสมมากขึ้นถ้าวัตถุดิบมีสารจำพวกเกลือของโลหะ (Alkali Metal Salts) แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) แคลเซียม ฟลูออไรด์ (Calcium Fluoride) ไคโอไลด์ (Cryolite) บอเรต (Borate) และออกไซด์หรือเกลือของตะกั่วหรือโครเมียมในปริมาณเล็กน้อย

3.1.2 ปัจจัยที่เหมาะสมของวัตถุดิบ

3.1.2.1. <u>ปริมาณซิลิกาของวัตถุดิบ</u>

ปริมาณซิลิกาเป็นปัจจัยที่สำคัญในการคัดเลือกชนิดของวัตถุดิบสำหรับการนำมาผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูง โดยใช้อัตราส่วนอลูมินาต่อซิลิกาในการพิจารณา การที่ต้องการให้ปูนซีเมนต์อลูมินาสูงมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการด้านการค้า วัตถุดิบจะต้องมีอัตราส่วนอลูมินาต่อซิลิกาที่สูงเพียงพอเพื่อควบคุมให้ปูนเม็ดมีปริมาณซิลิกาไม่เกิน 6%

3.1.2.2 <u>ปริมาณเหล็กออกไซด์, ไทเทเนียม, แมกนีเซียม ของวัตถุดิบ</u>

ปริมาณเหล็กออกไซด์ในแร่บอกไซด์ทั่วไปมักไม่มีความสำคัญเท่าปริมาณซิลิกา สารประกอบเหล็กที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงจะทำให้การพัฒนากำลังช้าแม้ว่ามันจะมีหน้าที่ช่วยให้โลหะหลอมได้ง่ายในการผลิตโดยการหลอมละลายและมีส่วนในการกำหนดเวลาก่อตัวของซีเมนต์ดังนั้นสัดส่วนที่สูงของเหล็กออกไซด์จึงสามารถอนุโลมได้ในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงแต่อัตราส่วนอลูมินาต่อเหล็กออกไซด์ในแร่บอกไซด์ต้องไม่ต่ำเกินควรมิฉะนั้นการหลอมที่ลดลงจะเกิดขึ้นได้ แร่บอกไซด์ที่มีปริมาณเหล็กต่ำจะเหมาะสมสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูงโดยกระบวนการ sintering มากกว่า

---

[2] เป็นการเผาปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมละลายของวัตถุดิบ

โดยทั่วไปบอกไซด์จะมีปริมาณไทเทเนียมประมาณ 3% สารประกอบไทเทเนียมในปูนเม็ด จะถูกมองว่าเป็นสารหน่วงจึงมีขีดจำกัดบนของปริมาณไทเทเนียมอย่างชัดเจน ซึ่งก็ยังอาจจะอนุโลมให้ได้

หินปูนควรจะมีปริมาณแมกนีเซียมไม่เกิน 1% เนื่องจากมีผลต่อการพัฒนากำลังของซีเมนต์ ดังตัวอย่างจากการทดลองของ Eipeltaver (1955)* ซึ่งเตรียมปูนซีเมนต์จากวัตถุดิบที่มีปริมาณซิลิกาสูงและเผาแบบ Sintering พบว่ากำลังลดลงเร็วเมื่อวัตถุดิบมีปริมาณแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นระหว่าง1-3%

3.1.3 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

ก่อนที่จะอธิบายองค์ประกอบทางเคมี ขอกำหนดตัวอักษรย่อแทนออกไซด์ต่าง ๆ ดังนี้

CaO = C	FeO = f	Fe_2O_3 = F	SiO_2 = S
Al_2O_3 = A	TiO_2 = T	H_2O = H	MgO = M

ดังนั้น CA จะแทนสารประกอบ $CaO \cdot Al_2O_3$ หรือ Monocalcium Aluminate และ C_4AF จะแทน $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ หรือ Tetracalcium Aluminoferrite

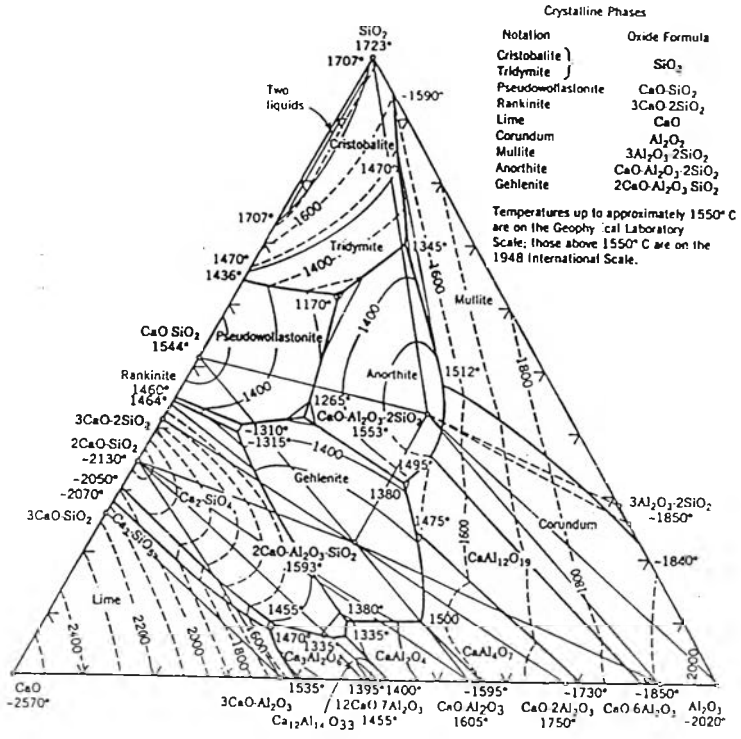
3.1.3.1. <u>ระบบ C-A-S</u>

ระบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Shepherd และคณะ (1915)* ดังแสดงแผนภาพในรูปที่ 2 เฟสที่แสดงในรูปเป็นเฟสที่พบทั้งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปูนซีเมนต์อลูมินาสูง โดยทั่วไปไดอะแกรมนี้จะใช้กับปูนซีเมนต์อลูมินาสูงซึ่งปราศจากสารประกอบเหล็กเท่านั้น แต่สามารถใช้เป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ สำหรับปูนซีเมนต์อลูมินาสูงซึ่งมีปริมาณเหล็กออกไซด์สูงได้โดยให้สมมติฐานที่เหมาะสมเพื่อจะจัดสรรปริมาณเหล็กออกไซด์ให้กับเปอร์เซ็นต์แคลเซียมและอลูมินาได้ถูกต้อง นอกจากนี้อาจจะใช้เฟสไดอะแกรมที่ประกอบด้วยแคลเซียมและอลูมินาเพียงสองอย่างเท่านั้นในการศึกษาเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาวัตถุดิบดังแสดงในรูปที่ 3

---

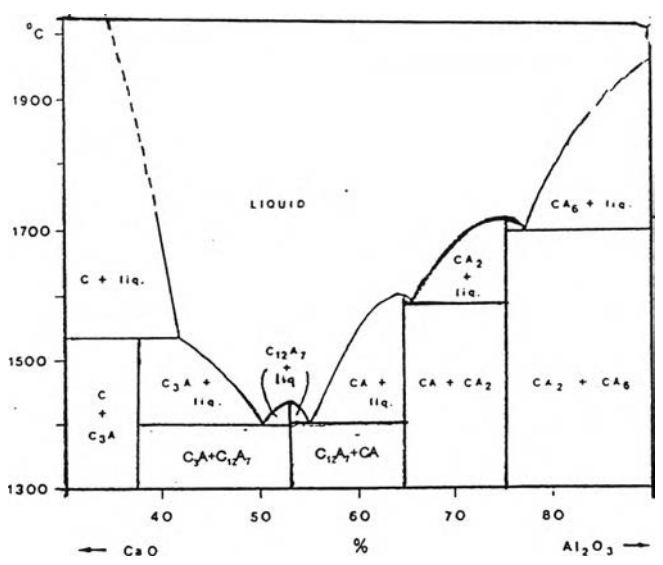
* อ้างจาก Robson, 1962

* อ้างจาก Robson,1962



รูปที่ 2 โซนของซีเมนต์ในระบบ Lime - Alumina - Silica (Kirk และ Donald, 1982)

ช่วงต้นของการศึกษา องค์ประกอบที่เกิดจากการรวมตัวของคัลเซียมและอลูมินาคือ C_3A, CA C_3A_5 , C_5A_3แต่จากการศึกษาในขณะนี้พบว่า C_3A_5 ที่จริงก็คือ CA_2 และ C_5A_3 ก็คือ $C_{12}A_7$ และมีการพบสารประกอบชนิดใหม่อีกก็คือ CA_6 ส่วนสารประกอบของซิลิกาที่น่าสนใจในปูนซีเมนต์อลูมินาสูง ก็มีเพียง βC_2S และ C_2AS (Gehlenite)



รูปที่ 3 เฟสไดอะแกรม แคลเซียม-อลูมินา (Bames P., 1983)

3.1.3.2 สารประกอบในปูนซีเมนต์อลูมินาสูง

3.1.3.2.1 อลูมิเนตและซิลิเกต

C_3A ที่กล่าวไปในตอนต้นโดยปกติไม่ได้เป็นองค์ประกอบในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงแม้ว่าจะมีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และCA_6 ก็ไม่มีอยู่ในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงด้วย แต่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อผลิตคอนกรีตจากปูนซีเมนต์อลูมินาสูงและมวลรวมถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูง องค์ประกอบทางเคมีที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงองค์ประกอบเคมีที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนประกอบ (Robson, 1962)

สารประกอบ	ปริมาณที่พบ	คุณสมบัติ
$C_{12}A_7$	พบปริมาณน้อยแต่ถ้ามีอัตราส่วน C/A สูงขึ้นจะพบมากขึ้น	ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วถ้ามีมากจะทำให้HAC แข็งตัวเร็ว
C_3A	มักไม่ค่อยพบแต่ถ้ามีอัตราส่วน C/A สูงมากจะพบมากขึ้น	ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วถ้ามีมากจะทำให้HAC แข็งตัวเร็วแต่ให้กำลังน้อย
CA	พบปริมาณมากโดยเฉพาะถ้าปูนเม็ดเย็นตัวลงอย่างช้าๆ	เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดใน HAC และทำให้ HAC ก่อตัวเร็ว
CA_2	พบปริมาณน้อยแต่จะพบมากขึ้นเมื่อมีอัตราส่วน C/A ลดลงหรือเมื่อการผสมในขณะหลอมละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันทางเคมีไม่สมบูรณ์	ทำปฏิกิริยากับน้ำช้ามากในช่วงแรกและจะมีอัตราที่เร็วขึ้นเมื่อมี CA อยู่ด้วย
βC_2S	พบเมื่อมีปริมาณซิลิกาไม่เกิน 5%	ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆทำให้กำลังของคอนกรีตในช่วงแรกลดลงได้
C_2AS	พบเมื่อมีปริมาณซิลิกา มากกว่า5%	พบโลหะชนิดอื่นปนอยู่ด้วยเช่น แมกนีเซียมเฟอรัสออกไซด์และเฟอริคออกไซด์ซึ่งเฟสนี้ทำปฏิกิริยากับน้ำช้ามากทำให้คุณสมบัติการแข็งตัวเร็วลดลง

3.1.3.2.2 องค์ประกอบที่มีเหล็กออกไซด์

ปูนซีเมนต์อลูมินาสูงส่วนมากจะมีสัดส่วนของเหล็กออกไซด์สูงถึงประมาณ 18% ทำให้สารประกอบเหล็กเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของซีเมนต์ชนิดนี้ จากการศึกษาของ Akiyama (1934) * พบว่าการเติมเฟอริคออกไซด์ 10% จะทำให้คุณสมบัติทางไฮดรอลิกของปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นและยังได้แนะนำไว้ว่าการมีเหล็กออกไซด์จะทำให้ปูนซีเมนต์ก่อตัวเร็ว ในทางปฏิบัติก็พบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณเหล็กสูงสามารถให้คุณสมบัติด้านกำลังอย่างน้อยก็เทียบเท่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ๆ แต่ถ้ามีปริมาณเหล็กออกไซด์มากเกินไปจะทำให้กำลังลดลงได้

3.1.3.2.3 องค์ประกอบรอง

บอกไซด์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบจะมีปริมาณของไทเทเนียมประมาณ 1-3% ทำให้ไทเทเนียมจะพบอยู่ในซีเมนต์ โดยปกติจะอยู่ในรูปแคลเซียมไทเทเนตต่อมาพบว่าเมื่อปูนซีเมนต์มีปริมาณสารประกอบเหล็กสูงบางส่วนของไทเทเนียมจะถูกรวมเป็นแคลเซียมเฟอโรไทเทเนต Kuhl และ Omar (1925)* พบว่าปริมาณ TiO_2 ที่สูงขึ้นถึง 4-5% จะมีผลกระทบที่เป็นประโยชน์ต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ แมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบหนึ่งในปูนซีเมนต์อลูมินาสูงด้วยแต่สัดส่วนจะต่ำกว่า 1% ค่าความเป็นด่างของปูนซีเมนต์อลูมินาสูงประกอบด้วยโซเดียมและโพแทสเซียมออกไซด์ซึ่งต่ำกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปริมาณทั้งหมดมักไม่เกิน 0.3% (ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 0.5-1.3%) โดยโซเดียมออกไซด์อาจจะอยู่ในรูปของ $2Na_2O{\cdot}3CaO{\cdot}5Al_2O_3$ และสารประกอบ $3Na_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3SiO_2$ อาจจะเข้าไปใน C_2AS ความเป็นด่างบางส่วนจะละลายทันทีเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ซัลเฟอร์จะมีปริมาณไม่เกิน 0.15% ปูนซีเมนต์อลูมินาสูงที่เผาโดย Blast Furnace จะมีปริมาณซัลเฟอร์ที่สูงและอาจจะมีอยู่ถึง 0.5-1.0% ปูนซีเมนต์ที่ถูกผลิตโดยวิธีนี้มักจะมีปริมาณ Free Metallic Iron สูงถึง 1% เนื่องจากการแยกตัวที่ไม่สมบูรณ์ของโลหะซึ่งเกิดจากการหลอมละลายที่ลดลงของวัตถุดิบ ซีเมนต์ที่ผลิตโดยวิธีอื่นก็จะมีปริมาณของ Free Metallic Iron เล็กน้อยเช่นกันแต่มาจากตัวกลางที่ใช้บด นอกจากนี้องค์ประกอบชนิดอื่น ๆ ของปูนซีเมนต์อลูมินาสูง ประกอบด้วยสารประกอบของแมงกานีส ฟอสฟอรัส และอื่น ๆ ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งมาจากวัตถุดิบ สารผสมเพิ่มและเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิต

---

* อ้างจาก Robson, 1962

จากสารประกอบต่างๆ ที่พบใน HAC ได้มีการศึกษาสัดส่วนของออกไซด์ต่างๆ เพื่อที่จะได้ผลิตปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ ตารางที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ต่างๆใน HAC ของแต่ละประเทศและตัวอย่างของสัดส่วนที่ได้มีการแนะนำไว้มีดังนี้

Berl (1953)* SiO_2 : 0-12%, Al_2O_3 : 45-70%, CaO : 28-47%

Biehl (1927)* SiO_2 : 5-10%, Al_2O_3 : 35-55%, CaO : 35-45%, Fe_2O_3 : 5-15%, TiO_2 : 1-3%

Richter (1932)* $SiO_2 < 6\%$ และ $Fe_2O_3 < 15\%$

ตารางที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์ของออกไซด์ต่าง ๆใน HAC ของแต่ละประเทศ (Robson,1962)

Country of origin	Type of Manufacture	Color	SiO_2 %	Al_2O_3 %	CaO %	Fe_2O_3 %	FeO %	TiO_2 %	MgO %	S %	SO_3 %	Metallic iron %
Germany	Blast-furnace Reductive Fusion	Very Light Grey	5-8	48-51	39-42	0.1	<1.0	1.5	1.0	1.0	0.5	1.0
U.S.A.	Rotary kiln Fusion	Light Grey	8-9	40-41	36-37	5-6	5-6	<2.0	1.0	0.2	0.2	Trace
Hungary	Brick kiln Furnace Sintering	Light Brown	6-8	40-45	37-42	12-14	Trace	<2.0	1.0	Trace	0.5	Trace
Yugoslavia	Reverberatory Furnace Fusion	Grey	6-8	38-40	36-39	8-10	4-7	<2.0	1.0	Trace	0.1	Trace
Spain	Reverberatory Furnace Fusion	Grey	4-5	35-38	39-42	10-12	4-5	<2.0	1.0	Trace	0.1	Trace
England	Reverberatory Furnace Fusion	Grey	4-5	38-40	36-39	8-10	5-7	<2.0	1.0	Trace	0.1	Trace
France	Reverberatory Furnace Fusion	Grey	3.5-4.5	38-40	36-39	9-11	4-6	<2.0	1.0	Trace	0.1	Trace

* อ้างจาก Robson, 1962

ในทางปฏิบัติ ปูนซีเมนต์อลูมินาสูงซึ่งมีปริมาณซิลิกาน้อยกว่า 5% จะประกอบด้วย 60% CA 10% C_2S และปริมาณเล็กน้อยของ C_2AS ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณซิลิกาที่สูงขึ้นอาจจะประกอบด้วย 15-25% C_2AS และ C_2S เล็กน้อยซึ่งมักจะปรากฏอยู่ในระบบ ternary eutectic CA-C_2AS-C_2S ปริมาณซิลิกาของปูนซีเมนต์จะมีช่วงที่กว้างมาก โดยทั่วไปประเทศเยอรมัน อเมริกาและยูโกสลาเวีย จะมีสัดส่วนของปริมาณซิลิกาสูงสุด (มากถึง 20%) แต่ในสเปน อังกฤษและฝรั่งเศสมีประมาณ 5-10%

3.1.3.3 <u>คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์อลูมินาสูง</u>

HAC สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มดังแสดงในตารางที่ 7 ตามปริมาณอลูมินาและเหล็กออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบ โดยซีเมนต์ที่มีปริมาณอลูมินาสูงกว่าจะเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ

ตารางที่ 7 ส่วนประกอบทางเคมีและช่วงของคุณสมบัติสำหรับ HAC (ACI 225R-85)

	Low purity	Intermediate purity	High purity
Al_2O_3 %	39-50	54-66	70-90
Fe_2O_3 %	7-16	1-3	0.0-0.4
CaO %	35-42	26-36	9-28
SiO_2 %	3-9	3-9	0-0.5
Wangner surface,m^2 /kg	140-180	160-200	>220
Blaine surface,m^2 /kg	260-440	320-1000	360-1150
Setting time			
Vicat initial(hr:min)	3.00-9.00	3.00-9.00	0.30-6.00
Minimum compressive strength (ASTM C 109,50-mm (2-in.) cubes),Mpa (ksc)			
1 day	24.1 (246)	41.4 (422)	17.2 (175)
7 days	41.4 (422)	58.6 (597)	34.5 (352)
28 days	48.3 (492)	68.9 (702)	-

3.1.4 ความต้านทานต่อสารเคมี

ได้มีการศึกษาและพัฒนา HAC สำหรับการใช้ในสภาพที่มีซัลเฟตสูงอย่างเช่นในน้ำทะเลหรือใช้ในสภาพที่ต้องเผชิญกับกรดอ่อนๆ ซึ่งผลการศึกษาพบว่ามีความต้านทานสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตารางที่ 10 แสดงสารเคมีที่ HAC สามารถต้านทานได้ ค่าความพรุนในคอนกรีตเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความต้านทานต่อสารเคมี จากการทดสอบ หาค่าความพรุนเมื่อมอร์ตาและคอนกรีตอยู่ในสภาพปกติและอยู่ในสภาพที่มีสารเคมี พบว่า HAC จะมีค่าความพรุนที่เปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เดียวกัน แต่ความพรุนของ HAC ที่เกิดจากการคอนเวอร์ชัน (Conversion) จะทำให้ความต้านทานต่อสารเคมีลดลง สาเหตุที่ทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความต้านทานสารเคมีต่ำคือ การที่ $Ca(OH)_2$ ที่มีในซีเมนต์สามารถละลายในสภาพกรดได้ แต่สำหรับ HAC ซึ่งมี AH_3 จะยังไม่สามารถละลายออกมาได้ ซึ่งจากเหตุผลนี้จึงทำให้ HAC มีความต้านทานสารเคมีสูงกว่า ในทางกลับกัน HAC จะมีความต้านทานต่อสารเคมีต่ำในสภาพด่างเช่น โซเดียม และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจาก AH_3 สามารถละลายออกมาได้ ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีความต้านทานสูงกว่า เพราะ $Ca(OH)_2$ จะไม่ละลาย การที่ CA ใน HAC ไม่ปล่อย Free Lime ออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเหมือนอย่าง CS ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สิ่งนี้ทำให้ HAC มีความต้านทานต่อสารเคมีสูง ความต้านทานต่อซัลเฟตใน HAC จะลดลงเมื่อเกิดคอนเวอร์ชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นแมกนีเซียมซัลเฟต โดยผลของปฏิกิริยานี้จะทำให้ค่าความซึมได้ของน้ำเพิ่มขึ้น เหตุผลสำหรับเรื่องนี้น่าจะเกิดจากความพรุนที่เพิ่มขึ้นหลังเกิดคอนเวอร์ชัน ส่วนความต้านทานต่อกรดยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเหตุผลน่าจะมาจากการไม่มีปฏิกริยาเคมีเกิดขึ้นเลย

ตารางที่ 8 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์อลูมินาสูง (Robson, 1962)

คุณสมบัติ	ค่าทั่วไป	หมายเหตุ
สี		ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต ชนิดของแร่บอกไซด์และปริมาณเหล็กในซีเมนต์ โดยถ้ามีมากสีจะเข้มมากแต่ถ้ามีน้อยสีจะสว่างขึ้น
ความถ่วงจำเพาะ	3-3.25	สัมพันธ์กันกับสารประกอบเหล็กเนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะ (3.7-4.0) สูงกว่าพวกอลูมิเนตและซิลิเกต (ต่ำกว่า3)
ความหนาแน่น (Loose bulk density)	60-65 ปอนด์/ฟุต^3	ถ้ามีปริมาณสารประกอบเหล็กสูงก็มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นด้วย
ความละเอียด	2500-4000 ซม.^{2}/ก.	HAC ที่เผาแบบ fusion จะมีความแน่นและแข็งมากดังนั้นจะเปลืองพลังงานในการบดสูง ประมาณ 50% โดยน้ำหนักจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 30 ไมครอน (ดูตารางที่ 9 ประกอบ)
ความอยู่ตัว	ต่ำกว่า 0.05%	เป็นการหาปริมาณการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตซึ่งอาจปนมาจากเชื้อเพลิง
กำลังรับแรงอัด	1วัน: >42 นิวตัน/มม.^{2} 3วัน: >49 นิวตัน/มม.^{2}	ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:3
เวลาก่อตัว	เริ่มต้น : 2-6 ชั่วโมง สุดท้าย : < 2 ชั่วโมง หลังจากการก่อตัวเริ่มต้น	
การเก็บรักษา		การดูดความชื้นของปูนซีเมนต์อลูมินาสูงจะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก

ตารางที่ 9 ผลของการทดสอบ Sieve Test ของปูนซีเมนต์อลูมินาสูง (Robson,1962)

Sieve	% Retained
Aperture 0.10 mm	1-5
B.S. No 170 (0.089 mm)	2-6
A.S.T.M No 200 (0.074 mm)	5-10
A.S.T.M No 325 (0.044 mm)	14-20

3.1.5 ปฏิกริยาไฮเดรชัน

HAC เมื่อเกิดปฏิกริยาเคมีกับน้ำจะแข็งตัวและจะคงความอยู่ตัวเมื่อมีน้ำอยู่ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ CA ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ มีอัตราเร็วของปฏิกิริยาการพัฒนากำลังสูงสุด โดยผลที่ได้จะอยู่ในรูป CA.10H, $C_2A.8H$ ปริมาณเล็กน้อย และ $Al_2O_3 \cdot aq$ (Alumina Gel) โครงสร้างผลึกของ CA.10H จะอยู่ในรูป hexagonal ซึ่งมีผลต่อการคอนเวอร์ชัน เพราะรูปผลึกนี้ไม่มีความอยู่ตัวทั้งในอุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูงโดยจะเปลี่ยนรูปมาเป็น $C_3A \cdot 6H$ และ $Al_2O_3 \cdot aq$ ซึ่งมีโครงผลึกแบบ cubic การเปลี่ยนรูปของ CA.10H จะมากขึ้นเมื่อปริมาณความเป็นด่างสูงขึ้น ส่วนประกอบ C_5A_3 หรือ $C_{12}A_7$ เมื่อทำปฏิกริยากับน้ำแล้ว จะเปลี่ยนรูปเป็น $C_2A \cdot 8H$ ส่วน C_2S ที่เกิดการไฮเดรชันแล้วจะเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งจำนวนโมเลกุลของน้ำยังไม่เป็นที่ทราบ ปริมาณน้ำของการไฮเดรชันใน HAC จะใช้ประมาณ 50% ของน้ำหนักซีเมนต์ ค่านี้เกือบจะเป็นสองเท่าของน้ำที่ใช้ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.1.6 Conversion และผลที่เกิดขึ้น

ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับ HAC ก็คือการคอนเวอร์ชันซึ่งผลของปฏิกิริยานี้จะทำให้กำลังของปูนซีเมนต์ลดลงอย่างมากในภายหลังภายใต้สภาพอากาศร้อนชื้นและอุณหภูมิสูง ส่วนประกอบที่สำคัญใน HAC ก็คือ CA เมื่อคอนกรีตถูกเทเข้าแบบในรูปของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ปฏิกริยาเคมีจะ

เกิดขึ้นโดยจะผลิต Al_2O_3·aq ขึ้นก่อน ต่อจากนั้นไม่กี่ชั่วโมง CA.10H ก็จะเกิดตามมา บางส่วนของ C_2A·8H จะเกิดขึ้นด้วย แต่แทบจะไม่เกิน 1 หรือ 2% ซึ่งปริมาณขึ้นกับค่าความเป็นด่างที่มี และถ้าปฏิกริยาไฮเดรชันดำเนินต่อเนื่องไปที่อุณหภูมิสูงขึ้น (45 °C) สารประกอบ C_3A·6H ก็จะเกิดมากขึ้น

ตารางที่ 10 แสดงสารเคมีที่ HAC สามารถต้านทานได้ (Neville,1975)

Type of acid	Industrial use	Concentration
Sulphuric	Gas-washing plant	Above pH 4
Sulphurous	Bleaching chambers	Above pH 4
Lactic	Dairy	Up to 1%
Tannic	Tannery	Up to 1%
Humic	Peaty waters	Up to 1%
Carbonic	Mineral waters	Up to 1%
Butyric	Brewery	Up to 1%

โครงผลึกของสารประกอบ CA.10H และ C_2A·8H จะมีรูปร่างเป็น hexagonal ณ อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ C_3A·6H มีรูปเป็น cubic แต่ ณ อุณหภูมิสูงโครงผลึกรูป cubic เท่านั้นที่จะคงรูปอยู่ได้ ซึ่งโดยธรรมชาติรูปผลึก hexagonal จะเปลี่ยนรูปไปเป็น cubic เอง ดังนั้นสารประกอบสุดท้ายของปฏิกริยาไฮเดรชันจะอยู่ในรูป cubic ปฏิกริยาการคอนเวอร์ชันแสดงได้ดังสมการดังนี้

$$3[CaO\cdot Al_2O_3\cdot 10\,H_2O\,] \longrightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6\,H_2O + 2[Al_2O_3\cdot 3\,H_2O] + 18\,H_2O$$

ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดในสภาพที่มีน้ำอยู่เท่านั้นแม้ว่าผลของปฏิกริยาจะมีน้ำเกิดขึ้นก็ตาม ตัวอย่างของมอร์ตาที่หนากว่า 2.5 เซนติเมตร ความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ภายในจะยังคงมีเทียบเท่า 100% โดยไม่

คำนึงถึงความชื้นในอากาศรอบนอก ดังนั้นการคอนเวอร์ชันสามารถเกิดขึ้นได้ รูปผลึก hexagonal ของ $C_3A{\cdot}6H$ จะคงตัวในสารละลาย $Ca(OH)_2$ แต่ทำปฏิกริยากับสารละลายผสมระหว่าง $Ca(OH)_2$ และ $CaSO_4$ ซึ่งเกิดสารประกอบใหม่คือ $3CaO{\cdot}\ Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}31H_2O$ ที่อุณหภูมิ 25 °C และสูงกว่า

การลดลงของกำลังในซีเมนต์เนื่องจากการคอนเวอร์ชันยังไม่เป็นที่ทราบอย่างแน่นอนนักแต่ได้มีการให้เหตุผลที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้อย่างใกล้เคียงในเทอมของความหนาแน่นของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต และความหนาแน่นของส่วนประกอบที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

$CA{\cdot}10H$	มีความหนาแน่น	1.72 - 1.78	ก./มล.
$C_2A{\cdot}8H$	มีความหนาแน่น	1.95	ก./มล.
$C_3A{\cdot}6H$	มีความหนาแน่น	2.52 - 2.53	ก./มล.
$Al_2O_3{\cdot}3H_2O$	มีความหนาแน่น	2.40	ก./มล.

พิจารณาสมการการเกิดคอนเวอร์ชัน คือ

$$3[CaO{\cdot}\ Al_2O_3{\cdot}10\ H_2O] \longrightarrow 3CaO{\cdot}\ Al_2O_3{\cdot}6\ H_2O + 2[Al_2O_3{\cdot}3\ H_2O]+18\ H_2O$$

พิจารณาน้ำหนักที่สอดคล้องกับสมการนี้คือ

$$1014 \longrightarrow 378 + 312 + 324$$

หารแต่ละน้ำหนักด้วยความหนาแน่นจะได้สัดส่วนประกอบโดยปริมาตร

$$1 \longrightarrow 0.261 + 0.228 + 0.568$$

จะเห็นว่า 1 มิลิลิตร ของ Ca·10H จะเปลี่ยนเป็นส่วนที่เป็นของแข็ง 0.489 มิลิลิตร และส่วนที่เป็นน้ำ 0.568 มิลิลิตร สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปผลึก hexagonal ไปเป็น cubic ภายใต้สภาพปริมาตรรวมทั้งหมดคงที่ทำให้ความพรุนในเฟสมากขึ้น จากการศึกษาซีเมนต์เฟสพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำๆปูนซีเมนต์จะมีค่าความพรุนในซีเมนต์เฟสลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่าการเกิดคอนเวอร์ชันในซีเมนต์เฟสจะถูกชะลอด้วยการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์แห้งไปพร้อมๆกันหรือกล่าวได้อีกแบบหนึ่งว่าน้ำจะถูกใช้ไปในปฏิกริยาไฮเดรชันแทน นอกจากนี้ยังมีเหตุผลอีกข้อหนึ่งก็คือผลึกของอลูมินาที่ถูกคอนเวอร์ชันแล้วซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่าจะมีขนาดเล็กกว่าผลึกอลูมินาที่มีอัตราส่วนน้ำ

ต่อซีเมนต์สูงกว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคอนเวอร์ชันอีกตัวหนึ่งก็คือ อุณหภูมิซึ่งถ้าอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นการเกิดคอนเวอร์ชันก็มากขึ้นตามไปด้วยซึ่งส่งผลทำให้กำลังของปูนซีเมนต์ลดลง

ส่วนประกอบส่วนใหญ่ของ HAC มักจะประกอบด้วย 50% CA 30% C_2A และ 20% สารเจือย สามารถอธิบายปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดังนี้

- ที่อุณหภูมิต่ำ (10 °C)

$CA + 10H \longrightarrow CAH_{10}$

158 180 338 โดยน้ำหนัก

ปริมาณน้ำ/ปริมาณซีเมนต์ = 180/158 = 1.14

- $C_2A + 15H \longrightarrow 2C_3AH_6 + AH_3$

642 270 756 156 โดยน้ำหนัก

ปริมาณน้ำ/ปริมาณซีเมนต์ = 270/642 = 0.421

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์/ปริมาณซีเมนต์ = 0.50*1.14+0.30*0.421 = 0.7

- ที่อุณหภูมิสูง (50 °C)

$3CA + 12H \longrightarrow C_3AH_6 + 2AH_3$

474 216 378 312 โดยน้ำหนัก

ปริมาณน้ำ/ปริมาณซีเมนต์ = 216/474 = 0.456

- $C_2A + 15H \longrightarrow 2C_3AH_6 + AH_3$

642 270 756 156 โดยน้ำหนัก

ปริมาณน้ำ/ปริมาณซีเมนต์ = 270/642 = 0.421

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์/ปริมาณซีเมนต์ = 0.50*0.456+0.30*0.421 = 0.354

จะเห็นว่าปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่ไม่ทำให้เกิดการคอนเวอร์ชันของเฟส CA ที่อุณหภูมิสูงมีค่าเท่ากับ 0.354 และจากตารางที่ 11 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต HAC ที่อุณหภูมิสูงและต่ำที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 กำลังรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 40 MPa ซึ่งเป็นค่าน้อยสุดที่ยอมให้ของการออกแบบ ดังนั้นในการผสม HAC จึงมักจะกำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่เกิน 0.40

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดคอนกรีต HAC จาก 39 ตัวอย่าง(Bames,1983)

Total w/c ratio	Curing	
	24 hr, 18 °C	5 days,38 °C
	Average(Mpa)	Average(Mpa)
0.35	74.8	51
0.4	66.8	40.5
0.5	59.4	25.6

3.1.7 **การพัฒนาปูนซีเมนต์อลูมินาสูง เพื่อป้องกันการเกิด** Conversion

เป็นที่ทราบกันดีว่าการลดลงของกำลังในคอนกรีต HAC ในสภาพอากาศร้อนและชื้นมีสาเหตุมาจากปฏิกริยาทางเคมีที่เรียกว่าคอนเวอร์ชัน คือการเปลี่ยนรูปจากผลึก CAH_{10} กับ C_2AH_8 ไปเป็น C_3AH_6

ดังนั้นจึงได้มีการเติม Ground Granulated Blast Furnace Slags (GGBS) ลงใน HAC เพื่อแก้ไขหรือยับยั้งการเกิดคอนเวอร์ชันซึ่งปูนซีเมนต์ที่เกิดจากการผสม HAC กับGGBS มีชื่อทางการค้าใหม่ว่า BRECEM (สถาบัน The Building Research Establishment (BRE) ได้ทำการวิจัยนี้) ผลการวิจัยพบว่า GGBS จะกระตุ้นก่อให้เกิด C_2ASH_8 ใน BRECEM ซึ่งจะช่วยขัดขวางการเกิดคอนเวอร์ชันและเป็นเฟสที่ให้กำลังแก่คอนกรีตด้วย โดยได้ทำการทดลองวิจัยอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 ปี พบว่า C_2ASH_8 ก็ยังคงอยู่ในซีเมนต์เพสต์ แสดงว่าเฟสนี้มีความคงตัวที่ดี

3.2 ขยะอุตสาหกรรมที่ใช้ในการวิจัยนี้

3.2.1 ซิลิกา - อลูมินาที่ใช้แล้ว (Spent Silica - Alumina)

ซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วเป็นของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ซึ่งกระบวนการผลิตนั้นเกิดจากก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนทำปฏิกิริยากันโดยมีสาร

Working Solution (EQ) ซึ่งเป็นสารละลายที่เกิดจากสารประกอบในกลุ่มแอนทราควินโนน โดยที่สาร Working Solution เป็นสารที่ทำให้เกิดการรวมตัวของก๊าซทั้งสอง ในขณะที่สาร Working Solution เมื่อใช้ครบ 1 รอบ จะก่อให้เกิดความชื้นและสิ่งสกปรกจึงต้องใช้สารซิลิกา-อลูมินาในการดูดความชื้นและสิ่งสกปรก ในกระบวนการนี้เองทำให้เกิดซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วขึ้น ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องเป็นดังนี้

ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน

$$EQ + H_2 \longrightarrow EQH$$

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

$$EQH + O_2 \longrightarrow EQ + H_2O_2$$

ปฏิกิริยา

$$EQ+\text{silica-alumina power} \longrightarrow EQ+\text{spent silica-alumina}$$

ตารางที่ 12 แสดงส่วนประกอบซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว

(ข้อมูลจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จ. ระยอง)

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	
	มก./ก.	%
Aluminium oxide	550-630	55.0-63.0
Silicium oxide	120-160	12.0-16.0
Water soluble salt	70-130	7.0-13.0
Humidity	100	10
Ethyl tetrahydro anthraquinone	23.08	2.31
Ethyl anthraquinone	9.85	0.99
Ethyl dihydroxy anthraquinone	6.61	0.66

สารแอนทราควินโนนมีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ $C_{14}H_8O_2$ มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม มีจุดหลอมเหลวที่ 286 °C ถูกใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสีย้อมและเม็ดสี เป็นสารเพิ่ม (additive) ในการผลิตกระดาษ เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันพืช เป็นตัวเร่งในการเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าและใช้

เป็นสารไล่นก NTP Board of Scientific Counselor's Technical Report Review Subcommittee on May 21,1999 รายงานการศึกษาความเป็นพิษของแอนทราควินโนน โดยนำสารแอนทราควินโนนให้หนูและลูกหนูทั้งเพศผู้และเพศเมียกินในปริมาณและระยะเวลาต่างๆพบว่า สารแอนทราควินโนนไม่มีความเป็นพิษ

3.2.2 Blast Furnace Slags

เป็น By-Products จากกระบวนการผลิตเหล็กจากสินแร่เหล็ก โดยเกิดขึ้นในระหว่างที่แร่เหล็ก (Iron Ore) เปลี่ยนรูปไปเป็นเหล็ก (Pig Iron) ซึ่งในตอนแรก Blast Furnace Slag จะออกมาจากเตาหลอมในลักษณะของเหลวก่อน และต่อมาถ้าถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆในอากาศจะได้ผลึกที่แน่นซึ่งเรียกว่า Air-Cooled Slag แต่ถ้าทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการฉีดน้ำจะสร้างผลึกที่เบากว่าซึ่งเรียกว่า Foamed Slag

Foamed Slag มักจะถูกบดให้เป็นผงเพื่อใช้เติมในปูนซีเมนต์ โดยการเติมมีได้ 2 แบบ คือ การบดร่วมกับปูนเม็ดหรือการบดก่อนแล้วค่อยนำไปผสมในปูนซีเมนต์ ข้อดีของซีเมนต์ที่ผสมSlag นี้ก็คือมีความต้านทานต่อซัลเฟตและค่าความเป็นด่างสูงขึ้น ราคาถูกและค่าความชื้นต่ำ นอกจากนี้การผลิต Slag ชนิดนี้จะช่วยลดปัญหามลภาวะทางอากาศอีกด้วย การใช้งาน GBBS ปริมาณการใช้จะอยู่ในช่วง 25-65% แต่สำหรับปูนซีเมนต์ที่ทนซัลเฟตสูงจะผสม Slag สูงถึง 85%

ในงานวิจัยนี้จะใช้ Foamed Slag ซึ่งจะนำไปบดให้ละเอียดก่อนผสมกับปูนซีเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้าว่า Ground Granulated Blast-Furnace Slags (GGBS) ตารางที่ 13 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ GGBS ที่มาจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ กัน โดยชนิด A มาจาก Sault Ste. Marie, Ontario ชนิด B มาจาก U.S.A. และชนิด C มาจาก Hamiltan , Ontario

<u>ข้อคำนึงการใช้ GGBS</u>

1) เวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมด้วย GGBS จะช้ากว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

2) กำลังอัดในช่วงต้นจะพัฒนาช้าและการบ่มจะมีผลอย่างมาก

ตารางที่ 13 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ GGBS ที่มาจากแหล่งต่าง ๆ กัน (Douglas และ Brandstetr, 1990)

Description of test		Slag A	Slag B	Slag C
Fineness				
Passing,45 μm,%		97	99	83
Surface area ,Blaine, m^2 / kg		460	540	418
Chemical analysis,%				
SiO_2		38.00	35.10	38.8
Al_2O_3		8.74	9.34	6.55
Fe_2O_3		0.55	0.98	1.30
CaO		32.00	40.10	35.10
MgO		18.60	9.62	12.10
SO_3		2.45	2.90	3.30
K_2O		0.76	0.22	0.47
Na_2O		0.22	0.18	0.37
Loss on ignition		1.98	1.84	0.84
Glass content		90.3	88.1	88.3
Compressive strength of	7 days	18.7	27.8	16.5
Mortars (50%PC)	28 days	31.4	39.5	27.7
ASTM C989 ,Mpa				
Slag activity index,	7 days	69.8	104.1	61.6
% (ASTM C 989)	28 days	100.0	125.8	88.2

3.2.3 ตะกอนโลหะหนัก

ใช้ตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการตกตะกอนโลหะในน้ำเสียจากการชุบอุปกรณ์ยึดจับหรือคลิปของโรงงานผลิตแฟ้ม มีกระบวนการผลิตคือ การเตรียมชิ้นงานโดยทำความสะอาดด้วยการล้างน้ำก่อนที่จะนำไปทำการชุบหรือเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า โดยสารละลายที่ใช้ในการชุบมีสาร

ละลายนิกเกิลเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.7H_2O$) และนิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2.6H_2O$) โดยมีกรดบอริค (H_3BO_3) เป็นตัวควบคุมพีเอช ซึ่งตะกอนโลหะหนักนี้จะใช้เพื่อตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้นตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมในการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อน

กาญจนา (2542) ได้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของตะกอน ด้วยการวิเคราะห์ EDX ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ผลดังนี้

C 17.04%	S 0.41%	O 47.52%
Ca 7.77%	Na 0.45%	Fe 0.91%
Mg 0.39%	Ni 22.89%	Al 0.42%
Si 1.96%	P 0.24%	

ขวัญเรือน (2540) ได้ทำการวิเคราะห์ตะกอนโดยการย่อยด้วยกรดแก่ 5 ชนิด ตามมาตรฐาน ASTM E 841–81 ได้ปริมาณโลหะหนักเป็นดังแสดงด้านล่างและจากการวิเคราะห์ครั้งสุดท้ายพบว่ามีปริมาณนิกเกิลในตะกอนทั้งหมด 48.81%

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณ (มิลลิกรัมต่อกรัมของตะกอน)
โครเมียม	1.15
ปรอท	1.14
เหล็ก	143.2
ทองแดง	35.0
นิกเกิล	488.1

ธนียา (2540) ได้ทำการวิเคราะห์ตะกอนโดยการย่อยด้วยกรดแก่ 5 ชนิด ตามมาตรฐาน ASTM E 841-81 ภายหลังจากการล้างด้วยน้ำกลั่นและกรดอ่อน ได้ผลดังนี้

สารชะตะกอน	pH	%นิกเกิลในตะกอน
ตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่น	8.62	43.2
ตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นและล้างด้วย 0.1N H_2SO_4	7.42	42.3

เมื่อพิจารณาตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 นิกเกิลไม่จัดเป็นของเสียอันตราย แต่ได้กำหนดเป็นประเภทของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดไม่จำเพาะประเภทหรือไม่จำเพาะชนิดซึ่งรวมถึงกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียจากการชุบโลหะทุกชนิดเป็นสิ่งปฏิกูลที่ต้องดำเนินการกำจัดตามที่กำหนดรวมถึงต้องแจ้งชนิดรายละเอียด พร้อมทั้งวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์ตามประกาศ ดังนั้นตะกอนที่มีนิกเกิลนี้ควรจะทำการบำบัดให้ได้ตามมาตรฐานก่อนนำไปทิ้งต่อไป

3.3 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

จากการรวบรวมผลงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตและพัฒนาปูนซีเมนต์อลูมินาสูง โดยการนำ GGBS มาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม สามารถสรุปผลงานวิจัยในช่วงปี 1988-1999 ได้ดังนี้

Edmonds และ Majumdar (1988) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของการผสม CA กับ GGBS ซึ่งเชื่อว่าจะสามารถยับยั้งการเกิดคอนเวอชันได้โดยการศึกษาจะใช้เครื่องมือ Conduction Colorimetry, X-ray Diffraction (XRD) และ Thermal Analysis วิธีการทดลองเริ่มจากการเตรียม CA จากของผสมระหว่าง $CaCO_3$ กับ Corundum แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1350 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์โดย XRD พบว่าเกิดสารประกอบ CA ซึ่งบริสุทธิ์แต่อาจจะมีปริมาณ $C_{12}A_7$ จำนวนเล็กน้อย (< 2%) ส่วน GGBS จะถูกบดจนมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 4400 ซม.^{2}/ก. แล้วนำไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบ นำ CA กับ GGBS มาผสมกันที่อัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 5 กรัม แล้วผสมน้ำในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ที่อุณหภูมิ 4 °C , 20 °C และ 40 °C ใน Conduction Colorimeter โดยข้อมูลจะถูกเก็บและประมวลผลในไมโครคอมพิวเตอร์ วัดปริมาณของ CA CAH_{10} ,C_3AH_6 และ C_2ASH_8 โดยวิธี Quantitative X-ray Diffraction Analysis (QXRD) ณ เวลาต่างๆระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันหลังจากที่ตัวอย่างถึงเวลาก่อตัวแล้วตัวอย่างจะถูกบดใน Micronising Mill พร้อมกับอะซิโตน ปริมาณของส่วนประกอบต่าง ๆ ที่มีอยู่จะถูกหาโดยวิธี XRD ผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมน้ำให้ส่วนผสม CA / GGBS ปฏิกิริยาแรกของการไฮเดรชันที่เกิดขึ้นคือ CA เปลี่ยนรูปเป็น CAH_{10} ต่อจากนั้น GGBS จะทำปฏิกริยากับแคลเซียมไอออนแล้วเกิดผลึกที่ไฮเดรตซึ่งมีซิลิการวมอยู่ด้วย แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ามากในช่วงเดือนแรก ที่อุณหภูมิ 4 °C และ 20 °C ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ slag จะผลิต CAH_{10} ในขณะที่ อุณหภูมิ 40 °C จะผลิต C_2ASH_8 สารประกอบเหล่านี้จะไปดึงแคลเซียมไอออนออกมาจากสาร

ละลายดังนั้นจะไปหยุดการคอนเวอชันของ CAH_{10}, C_2AH_8 ไปเป็น C_3AH_6 จากผลการทดลองข้างต้นทำให้สามารถคาดได้ว่าการเติม GGBS ลงไปผสมใน HAC จะช่วยลดการเกิดคอนเวอร์ชันได้

Majumdar และคณะ(1989) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาเคมีของการไฮเดรชันและคุณสมบัติทางกลของการผสม HAC กับ GGBS โดยการศึกษาจะใช้เครื่องมือ Conduction Colorimetry และ XRD วิธีการทดลองเริ่มจากการวัดส่วนประกอบทางเคมีและเฟส CA กับ $C_{12}A_7$ ด้วยเครื่อง QXDA ส่วน GGBS ที่ใช้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 4380 ซม.^{2}/ก เตรียมตัวอย่างผสมอัตราส่วน 1:1 โดยมวลของ HAC กับ GGBS และผสมน้ำในอัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.3 ที่อุณหภูมิ 4 °C , 20 °C และ 40 °C ภายใต้ไนโตรเจนใน Conduction Colorimeter พร้อมทั้งมีการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยใช้ QXDA เพื่อหาปริมาณ CA, $C_{12}A_7$,CAH_{10} ,C_2AH_8 ,C_3AH_6 และ C_2ASH_8 ส่วนการทดสอบคุณสมบัติทางกลจะใช้ตัวอย่างที่อัตราส่วน 1:1 โดยมวลรวมของ HAC กับ GGBS ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.3 กับ 0.4 นำมาหล่อเป็นลูกบาศก์ซีเมนต์เพสต์ขนาด 10 มม. ลูกบาศก์จะถูกบ่มในอากาศชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะถอดแบบนำไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 20 °C และ 40 °C เมื่อครบเวลาที่กำหนดจะนำมาหาค่ากำลังอัด เปรียบเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่ทำจาก HAC อย่างเดียว และหล่อลูกบาศก์ซีเมนต์มอร์ต้าขนาด 70.7 มม. อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1:3 และ HAC ต่อ GGBS 1:1 นำไปบ่มในอากาศชื้น 24 ชั่วโมง แล้วนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 20 °C เมื่อครบกำหนดนำมาวัดกำลังรับแรงอัด สำหรับการทดสอบคอนกรีตได้หล่อลูกบาศก์คอนกรีตขนาด 100 มม. ที่อัตราส่วน 1:2.4:3.6 ของซีเมนต์ : ทราย : มวลรวม ซึ่งใช้ซีเมนต์ผสม 1:1 โดยมวลของ HAC : GGBS โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อของแข็ง 0.45 กับ 0.56 นำไปบ่มในอากาศชื้น 24 ชั่วโมง ต่อจากนั้นจึงนำไปบ่มใต้น้ำ ที่อุณหภูมิ 20 °C และ 38 °C เมื่อครบกำหนดนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติม GGBS ลงใน HAC จะทำให้การลดลงของกำลังในคอนกรีต HAC ภายใต้สภาพอากาศร้อนและชื้นหมดไป นอกจากนี้ผลการทดลองยังยืนยันว่าการลดลงของกำลังที่อุณหภูมิสูง เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของความพรุนดังเช่น ที่อุณหภูมิ 40 °C ซีเมนต์เพสต์ผสมจะมีกำลังเพิ่มขึ้นในขณะที่ความพรุนลดลง การเติม GGBS ในแคลเซียมอลูมิเนตที่มีน้ำอยู่จะทำให้เกิดการก่อตัวขึ้นของ C_2ASH_8 ซึ่งเป็นเฟสที่ตรวจพบในการทดลองก่อนหน้านี้เหมือนกัน โดยที่อัตราส่วน 1:1 โดยมวล HAC : GGBS ที่อัตราส่วน w/s 0.3 และเก็บใต้น้ำ

อุณหภูมิ 40 °C จะพบเฟส C_3AH_6 ซึ่งก่อตัวขึ้นในช่วงแรกแต่จะน้อยลง ในเวลาต่อมา โดยเปลี่ยนรูปไปเป็น C_2ASH_8 จนในเวลา 180 วัน C_2ASH_8 จะกลายเป็นเฟสส่วนใหญ่ในซีเมนต์ และใน 1 ปี C_3AH_6 จะไม่พบในซีเมนต์เพสต์อีกเลย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความพรุนจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไปและกำลังจะเพิ่มขึ้นภายหลัง 28 วัน ที่อุณหภูมิ 20°C ซีเมนต์ผสมจะไม่พบผลึก CAH_{10} หลังจาก 6 เดือน เพราะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูป C_2ASH_8 อย่างรวดเร็วภายในเวลา 6 เดือน และผลการทดลองยังได้แสดงว่าปัญหาการคอนเวอร์ชันในคอนกรีตจะไม่เกิดขึ้นหลังจากการหล่อเนื่องจากไม่พบเฟสที่ไม่คงตัว จากผลการทดลองจึงคาดได้ว่าการก่อรูปของผลึก C_2ASH_8 ในที่ที่มี CAH_{10} มากมาย จะเป็นปัจจัยสำคัญในการขจัดปัญหาการลดลงของกำลังของHACแต่กลไกในการเกิดยังคงซับซ้อนมากเพราะมีปริมาณส่วนประกอบที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Amorphas Gels) ในซีเมนต์เพสต์มากซึ่งต้องทำการศึกษาทางด้าน Micro Structure ต่อไป

Singh และ Majumdar (1992) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์ผสมระหว่าง HAC กับสารปอซโซลานต่าง ๆ รวมทั้งผลของการผสม HAC กับ GGBS ที่เก็บตัวอย่างมาเป็นเวลา 5 ปี โดยการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่าง HAC กับสารปอซโซลานต่างๆจะใช้วิธี Conduction Colorimetry, XRD , Thermograrimetry และ Electron Beam Microanalysis วิธีการทดลองเริ่มจากการวิเคราะห์ส่วนประกอบของสารปอซโซลานต่างๆ ที่จะนำมาผสมกับ HAC ซึ่งได้แก่ GGBS , Gasifier slags, Fly ash และ Metakaolin แล้วนำไปเตรียมตัวอย่างดังเช่นการทดลองก่อนหน้านี้ นำไปวิเคราะห์เฟสที่เกิดขึ้น ลักษณะของ Micro Structure อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดและความต้านทานต่อซัลเฟต ซึ่งใช้สารละลาย $NaSO_4$ และ $MgSO_4$ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่ทำจาก HAC ผสมกับ GGBS ที่อัตราส่วน 1:1 มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตลอด 5 ปี ภายใต้น้ำที่อุณหภูมิ 20 °C และ 38 °C และยังคงพบเฟส C_2ASH_8 ในปริมาณมากดังนั้นเฟสนี้น่าจะเป็นเฟสที่คงตัวถาวรของปฏิกริยาไฮเดรชัน อุณหภูมิที่สูงขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในกรณีของคอนกรีตที่ผสม GGBS จะต่ำกว่าที่ไม่ผสม GGBS ความต้านทานต่อซัลเฟตของ HAC ที่ผสม GGBS จะสูงกว่าที่ไม่ผสมด้วย สารปอซโซลานที่ใช้ผสมกับ HAC และทำให้เกิด C_2ASH_8 ได้ง่ายคือ Silica Fume และ Metakaolin ผลการตรวจพบเฟสไฮเดรชันของสารปอซโซลานกับ HAC แสดงในตารางที่ 14 ซึ่ง

แสดงให้เห็นว่าสารปอซโซลานที่ก่อให้เกิดเฟส C_2ASH_8 ในเวลาต่อมาจะเหมาะสมที่จะนำมาผสมกับ HAC มากกว่า

Singh และ Majumdar (1992) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของ CA_2 (Calcium Dialuminate) ซึ่งผสมและไม่ผสมกับ GGBS ผลการทดลองพบว่า CA_2 ทำปฏิกิริยากับน้ำช้ามากที่อุณหภูมิ 20 °C แต่จะเร็วขึ้นที่อุณหภูมิ 40 °C โดยผลของปฏิกิริยาที่ทั้งสองอุณหภูมิคือ C_2AH_8 , AH_3 (Gibbsite) และอลูมินาเจล จะเห็นว่าไม่พบ C_3AH_6 ที่อุณหภูมิ 40 °C เมื่อผสม CA_2 กับ CA พบว่าที่อุณหภูมิ 20 °C ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นจะเป็นของเฟสCA ส่วนเฟส CA_2 จะไปเป็นตัวหน่วงการทำปฏิกิริยาของ CA กับน้ำและเมื่อผสม GGBS เข้าไปด้วยใน CA_2 หรือ CA_2ผสม CA จะทำให้เกิดการก่อตัวของ C_2ASH_8 ที่อุณหภูมิ 40 °C ที่เวลา 3 วัน การเติม GGBS จะช่วยลดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง

Rayment และ Majumdar (1993) ได้ศึกษาส่วนประกอบทางเคมีที่แท้จริงของเฟส CA,C_2S Ferrite และ Pheochroite ในปูนเม็ด HAC โดยวิธี Electron Probe Microanalysis และส่วนประกอบของ Stratlingite ซึ่งเตรียมจากการผสม HAC กับ GGBS เป็นเวลา 5 ปี ก็ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยโดยวิธี Scanning Electron Microscope ซึ่งใช้กับ Energy Dispersive X-ray Analyser นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบหาปริมาณ Fe และ Mg ใน C_2ASH_8 ด้วย ผลการทดลองพบการแทนที่ Al โดย Fe ใน CA มีเพียงแค่ 4% และพบว่าในโครงสร้างของ C_2S อาจจะมี Al และ Fe เล็กน้อย เฟส Stratlingite ที่พบในปูนซีเมนต์ผสมนี้น่าจะมีสูตรโครงสร้างเป็น $[Ca_2Al(OH)_6][Al\ SiO_3(OH)_2 \cdot 4H_2O]$ แต่ยังพบ Fe, Mg, S, Ti ในโครงสร้างอีกด้วย

Jian Ding และคณะ(1995)ได้ทำการศึกษาผลของ Na_2SO_4 (Sodium Sulphate) ที่มีต่อการก่อตัวของเฟส C_2ASH_8 ใน HAC ที่ผสมซิลิกาฟูม (Silica Fume) เพื่อป้องกันการเกิดคอนเวอร์ชันของเฟส CAH_{10}หรือ C_2AH_8 ไปเป็น C_3AH_6 วิธีทำการทดลองเริ่มจากการผสม HAC, Silica Fume, Sodium Sulphate, Calcium Hydroxide, Sodium Tripolyphosphate (Superplasticizer) และน้ำที่อัตราส่วนต่างๆกันแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิและเวลาที่ต่างกันด้วยจากนั้นนำไปตรวจสอบเฟสด้วยเครื่อง XRD และทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ผลการทดลองพบว่าโซเดียมไอออนมีบทบาทสำคัญต่อ

การก่อตัวของเฟส C_2ASH_8 ในระบบ HAC-Silica Fume โดย C_2ASH_8 เป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาที่ไฮเดรตแล้วกับเฟส CAH_{10} หรือ C_2AH_8 โซเดียมไอออนจะไปส่งเสริมให้ปริมาณซิลิกาที่ไฮเดรตมีมากขึ้นทำให้การก่อตัวของ C_2ASH_8 มากขึ้นตามไปด้วย การไฮเดรชันของซิลิกาฟูมใน HAC ที่ปราศจากการเติมเกลือโซเดียมจะช้ามากทำให้ปริมาณซิลิกาที่ยังไม่ได้ไฮเดรตมีมากและจะไปเกาะอยู่บนผิวของ HAC ที่ไฮเดรตแล้วซึ่งอาจจะส่งผลทำให้กำลังของ HAC ลดต่ำลง กลไกการทำปฏิกิริยาของโซเดียมไอออนกับ HAC และซิลิกาฟูมเป็นดังนี้

- การคอนเวอร์ชันในระบบ HAC

$$CA \xrightarrow{H_2O} CAH_{10} \text{ หรือ } C_2AH_8 \xrightarrow{H_2O} C_3AH_6 \text{ (ผลึกที่เสถียร)}$$

- การคอนเวอร์ชันในระบบ HAC-Microsilica-Sodium Salt

$$CA \xrightarrow{H_2O} CAH_{10} \text{ หรือ } C_2AH_8 + Na^+ + \text{Silicate Anion } (H_{n+2}Si_nO_{3n+1})^{n-}$$

$$SiO_2 + OH^- + Na^+ \longrightarrow Na^+ + \text{Silicate Anion}$$

$$(H_{n+2}Si_nO_{3n+1})^{n-} \xrightarrow{H_2O} C_2ASH_8 \text{ (ผลึกที่เสถียร)}$$

จากสมการข้างบนพบว่าการเติม Na_2SO_4 จะเปลี่ยนผลของการเกิดคอนเวอร์ชันโดยจะก่อให้เกิด C_2ASH_8 แทน C_3AH_6 โดยโซเดียมไอออนจะไปกระตุ้นบริเวณพื้นที่ผิวของซิลิกาให้ทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น นอกจากนี้พบว่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่เติมใน HAC จะไปกระตุ้นให้เกิดการคอนเวอร์ชันไปเป็น C_3AH_6 ที่อุณหภูมิต่ำได้แต่ปฏิกิริยานี้จะถูกยับยั้งโดย Na_2SO_4 ที่เติมเข้าไปเนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนที่ปล่อยออกมาระหว่างการไฮเดรตของ HAC ได้ ในด้านกำลังรับแรงอัดเกลือโซเดียมยังช่วยป้องกันการลดลงของกำลังเนื่องจากการคอนเวอร์ชัน กำลังรับแรงอัดของมอร์ต้า

HAC ที่เวลา 1 วัน มีค่าประมาณ 70 MPa และจะลดลงไปเหลือ 32 MPa ที่เวลา 14 วัน ส่วนมอร์ต้าที่ผสม 20% ซิลิกาฟูมและ 2% Na_2SO_4 จะมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 28 MPa ในวันแรกแล้วจะมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 50 และ 60 MPa ที่เวลา 14 และ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณของซิลิกาฟูมในมอร์ต้าเป็น 30% จะทำให้กำลังลดลงซึ่งเหตุผลอาจเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จาก 0.40 ไปเป็น 0.46 เพื่อให้ความสามารถเทได้ (Workability) เทียบเท่ากันหรือมาจากผลกระทบของอนุภาคซิลิกาที่ยังไม่ไฮเดรตทำให้โครงสร้างของเฟสในปูนซีเมนต์ไม่แข็งแรง

Majumdar และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของ BRECEM ณ เวลา 10 ปี โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วน w/c 0.45 และ 0.56 ซึ่งเก็บไว้ใต้น้ำที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}$C และ 38 $^{\circ}$C ผลการทดลองพบว่าการพัฒนากำลังอัดกับเวลาของ BRECEM จะเพิ่มขึ้นน้อยมากที่เวลา 10 ปี เปรียบเทียบกับเมื่อ 5 ปี ทั้งที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}$C และ 38 $^{\circ}$C การตรวจสอบเฟสของปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีต 10 ปี โดยวิธี XRD พบว่ามีลักษณะเฟสเหมือนกันทั้งในอัตราส่วน w/c 0.45 และ 0.56 ใน HAC ที่ไม่ผสม GGBS จะพบ C_3AH_6 และ AH_3 มาก ส่วนใน BRECEM จะไม่พบเฟสเหล่านี้ แต่จะพบ C_2ASH_8 แทนทั้งที่อุณหภูมิ 20 $^{\circ}$C และ 38 $^{\circ}$C การตรวจสอบเฟสโดยวิธี Thermogravimetric ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากผลการทดลอง 10 ปี ของ BRECEM คอนกรีต พบว่า C_2ASH_8 น่าจะเป็นเฟสที่คงตัวและทำให้เกิดการพัฒนากำลังในคอนกรีต

Singh และคณะ (1997) ได้ทำการทดลองผลิตปูนซีเมนต์ชนิดพิเศษชื่อ Iron Rich Cement โดยใช้ Red Mud ซึ่งเป็นกากแร่ที่เกิดจากการผลิตแร่อลูมินา นำไปผสมกับปูนขาว บอกไซด์ และยิปซัม เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบแล้วทำการศึกษาผลกระทบของส่วนประกอบ เวลาในการเผาและอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อสมบัติของซีเมนต์ วิธีการทดลองเริ่มจากการนำวัตถุดิบแต่ละชนิดมาผสมกันตามสัดส่วนที่จะทดลองแล้วบดผสมเข้าด้วยกันใน Ball Mill เป็นเวลา 45 นาที แล้วผสมน้ำให้ข้นขึ้น นำไปหล่อในแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 5*5*5 ซม^3. จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}$C ก่อนแล้วจึงเผาต่อไปให้เป็นปูนเม็ดใน Electric-Furnace ให้ความร้อนเฉลี่ย 200 $^{\circ}$C / ชั่วโมง รักษาระดับไว้ในช่วง 1150-1350 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากเผาเสร็จปูนเม็ดจะถูกทำให้เย็นลง 1 คืนในเตาเผาจนมีอุณหภูมิห้องแล้วนำมาบดรวมกับยิปซัมและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 ไมโครเมตร เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนทางเคมี

ตารางที่ 14 เฟสใน HAC ที่ผสมสารปอซโซลานต่างชนิดกัน (Singhและ Majumdar,1992)

Mass Ratio	Material	Age	Water at 20 °C			Water at 40 °C		
			CAH_{10}	C_3AH_6	C_2ASH_8	CAH_{10}	C_3AH_6	C_2ASH_8
40/ 60	HAC/ Gasifier slag	7 d	/	-	Tr	/	/	Tr
		28 d	/	-	Tr	/	/	/
		180 d	/	-	/	/	/	/
		1 yr	/	-	/	/	/	/
60/ 40	HAC/ PFA (UK)	7 d	/	/	Tr	-	/	Tr
		28 d	/	/	/	-	/	Tr
		1 yr	/	/	Tr	-	/	-
50/ 50	HAC/ PFA (USA)	7 d	/	-	-	/	-	-
		28 d	/	-	-	/	Tr	-
		180 d	/	Tr	Tr	/	/	/
		1 yr	/	-	/	No determined	No determined	No determined
50/ 50	HAC/ Italian pozzolana	7 d	/	-	-	/	/	Tr
		28 d	/	/	Tr	/	/	/
		1 yr	/	Tr	/	/	/	/
60/ 40	HAC/ Silica fume	7 d	/	-	-	-	/	/
		28 d	/	/	/	-	/	/
		180 d	/	/	/	-	/	/
50/ 50	HAC/ Metakaolin	7 d	/	-	/	/	Tr	/
		28 d	/	-	/	/	Tr	/
		180 d	/	-	/	/	Tr	/
		1 yr	/	-	/	/	Tr	/
50/ 50	HAC/ GGBS	7 d	/	-	-	-	/	/
		28 d	/	-	/	-	/	/
		180 d	/	-	/	-	/	/
		1 yr	Tr	-	/	-	Tr	/

/ - detected , Tr – Traces

ได้ใช้ตัวอย่างที่มีส่วนผสมของวัตถุดิบต่างกันไป 2 ชุด โดยคงอุณหภูมิและเวลาการเผาไว้ที่ 1250 °C 2 ชั่วโมง และเพื่อที่จะศึกษาผลกระทบของเวลาและอุณหภูมิในการเผาที่มีต่อคุณสมบัติซีเมนต์ได้ใช้ตัวแทนของตัวอย่างในแต่ละชุดนำมาเผาที่อุณหภูมิต่างกัน (1150, 1200, 1250, 1300, 1350 °C) สำหรับเวลาคงที่ 2 ชั่วโมง และเปลี่ยนช่วงเวลาจาก 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ1250 °C คงที่ โดยตัวอย่างของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ในแต่ละชุดจะนำไปทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดและชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ ผลการทดลองพบว่า Iron Rich Cement มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันที่ยอมรับได้ส่วนคุณสมบัติของซีเมนต์ขึ้นกับส่วนผสมเป็นอย่างมาก เฟสที่เกิดขึ้นในซีเมนต์ขึ้นกับปริมาณยิปซัมในวัตถุดิบโดยถ้ามียิปซัม 7.5 % เฟสที่เกิดขึ้นคือ $C_4(AF)_3$ S, C_4AF และ C_2F เมื่อเพิ่มถึง 12.5% เฟสที่เกิดขึ้นคือ $C_4(AF)_3S$ และ CT ส่วนเวลาและอุณหภูมิที่ทำให้กำลังสูงสุดคือ 1-1.5 ชั่วโมง และ 1250 °C

สุนันท์ (2524) ทำการศึกษาการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยใช้กากหินน้ำมันเป็นวัตถุดิบร่วมกับหินปูนและดินเหนียวโดยก่อนทำการผลิตได้ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบแต่ละชนิดเพื่อที่จะคำนวณหาสัดส่วนที่เหมาะสม ส่วนอุณหภูมิและเวลาที่จะใช้เผาวัตถุดิบผสม ได้ทำการทดสอบเบื้องต้นโดยนำปูนเม็ดที่เผา ณ อุณหภูมิและเวลาต่างๆ มาทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ Free Lime จากผลการทดสอบเบื้องต้นจึงได้ผลิตซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 1400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำปูนเม็ดที่ผลิตได้ไปบดให้ละเอียดพร้อมกับเติมยิปซัม 5% ผสมเข้าด้วยกัน แล้วจึงนำซีเมนต์ผงนี้ไปทดสอบ คุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ รวมทั้งใช้ XRD ตรวจสอบด้วย ผลที่ได้พบว่าปูนซีเมนต์ที่ผลิตโดยใช้กากหินน้ำมันนี้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และมีคุณภาพดี