บทที่ 5
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้นำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์โดยการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS จากนั้นนำปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ไปใช้ในการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อน ฉะนั้นจึงทำการเสนอผลการทดลองพร้อมทั้งวิจารณ์ผลการทดลองเป็นสองส่วนดังนี้

5.1 การศึกษาการนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วผลิต HAC

การทดลองนี้ได้นำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS โดยทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วกับปูนขาว อุณหภูมิและเวลาในการเผาวัตถุดิบที่เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดที่สูงสุดและได้ทำการวัดค่าความหนาแน่น ระยะเวลาก่อตัว ความถ่วงจำเพาะและความละเอียด ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของปูนซีเมนต์เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาอีกด้วย

5.1.1 สมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ

- ความละเอียด

ทำการทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C 204-96 ได้ค่าความละเอียดของปูนขาว ซิลิกา-อลูมินา และGGBS เท่ากับ 6531 7053 และ 7606 ซม.^{2}/ ก. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าความละเอียดของ GGBS และ HAC กับมาตรฐาน ACI 225R-85 พบว่ามีความละเอียดอยู่ในช่วงเดียวกันทำให้เมื่อนำ GGBS ไปผสมกับ HAC ที่ผลิตได้มีความเหมาะสมมากขึ้น

- ความถ่วงจำเพาะ

ทำการทดสอบตามวิธีมาตรฐานASTM C188-95 ได้ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนขาว ซิลิกา-อลูมินา และGGBS เท่ากับ 3.15 , 2.40 และ 2.91 ตามลำดับ

5.1.2 ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

ตารางที่ 17 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของปูนขาว ซิลิกาอลูมินาที่ใช้แล้ว และ GGBS ที่ใช้ในการทดลองโดยเครื่อง XRF ส่วนประกอบที่สำคัญของปูนขาวคือ CaO ซึ่งมีค่าเป็น 92.85 % ส่วนประกอบที่สำคัญของซิลิกา-อลูมินาคือ Al_2O_3 ซึ่งมีค่าเป็น 88.67 % ส่วนประกอบที่สำคัญของ GGBS คือ CaO SiO_2 Al_2O_3และ MgO มีค่าเป็น 41.8 % 33.8 % 13.14 % และ 6.16 % ตามลำดับ ตารางที่ 18 แสดงส่วนประกอบของ HAC ตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ผสมโดยอัตราส่วน Al_2O_3 / CaO มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9-1.75 ซึ่งครอบคลุมช่วงที่ระบุไว้ใน

มาตรฐานอังกฤษ BS915:Part2 1972 เท่ากับ 0.85-1.3 ส่วนปริมาณ SiO_2 ซึ่งมีอยู่ไม่เกิน 5% นั้นก็อยู่ในมาตรฐานอังกฤษเช่นกัน ปริมาณ Fe_2O_3 มีค่าอยู่ไม่ถึง 1% นั้นทำให้วัตถุดิบแบบนี้เหมาะกับการผลิตปูนซีเมนต์โดยกระบวนการ Sintering ซึ่งเป็นวิธีการผลิตที่ใช้ในการทดลองนี้ ปริมาณเหล็กออกไซด์และไทเทเนียมออกไซด์ในวัตถุดิบที่ใช้พบว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมาตรฐานของอังกฤษในตารางที่ ซึ่งมีค่า 9-12 % และ 1.5-2.5 % ตามลำดับซึ่งออกไซด์ทั้งสองตัวนี้จะมีผลต่อระยะเวลาแข็งตัวของ HAC ทำให้แข็งตัวช้าลงดังนั้น HAC ที่ผลิตได้จากการทดลองนี้จึงมีค่าระยะเวลาก่อตัวเร็วกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน จากการแบ่งประเภทของ HAC ตามมาตรฐาน ACI 225R-85 พบว่า HAC ที่ผลิตในการทดลองนี้จัดเป็นแบบ Low purity สำหรับสัดส่วน ปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 45/55 , 50/50 และเป็น Intermediate purity สำหรับสัดส่วน 35/65 , 40/60 เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบของ GGBS ที่ใช้ในการทดลองนี้กับ GGBS ที่พบในต่างประเทศดังแสดงในตารางที่ 13 พบว่าปริมาณ SiO_2 มีค่าน้อยกว่า 10% Al_2O_3 มีค่ามากกว่า 37.5% CaO มีค่ามากกว่า 14.6% และค่า MgO น้อยกว่า 118% ค่าที่แตกต่างกันอย่างมากของ Al_2O_3 และ MgO อาจมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ที่ผสมกับ GGBS

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุของปูนขาว GGBS และซิลิกา-อลูมินา โดยเครื่อง XRF

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก)													
	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	Cl	K_2O	CaO	TiO_2	MnO_2	Fe_2O_3	SrO	ZrO_2	WO_3
ปูนขาว	trace	1.22	0.04	5.2	0.08	0.08	Trace	92.9	-	-	0.16	trace	-	-
GGBS	trace	6.16	13.14	33.8	2.85	-	0.39	41.8	0.57	0.68	0.3	0.06	0.05	0.2
ซิลิกา-อลูมินา	5.21	-	88.67	4.12	1.29	Trace	Trace	0.71	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 18 ส่วนประกอบของ HAC ตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ผสม

% ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Na_2O	MgO	Fe_2O_3	SO_3
35/65	32.96	57.65	4.50	3.39	0.43	0.06	0.87
40/60	37.57	53.22	4.55	3.13	0.49	0.06	0.81
45/55	42.17	48.79	4.61	2.87	0.55	0.07	0.75
50/50	46.78	44.36	4.66	2.61	0.61	0.08	0.69

ตารางที่ 19 อัตราส่วนของอลูมินาต่อแคลเซียมใน HACที่แต่ละสัดส่วนการผสมวัตถุดิบ

% ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา	CaO	Al_2O_3	Al_2O_3/CaO
35/65	36.38	63.62	1.75
40/60	41.38	58.62	1.42
45/55	46.36	53.64	1.16
50/50	51.33	48.67	0.95

5.1.3 ศึกษาผลของสัดส่วนทางเคมีที่อุณหภูมิและเวลาเผาคงที่

5.1.3.1 ระยะเวลาก่อตัว

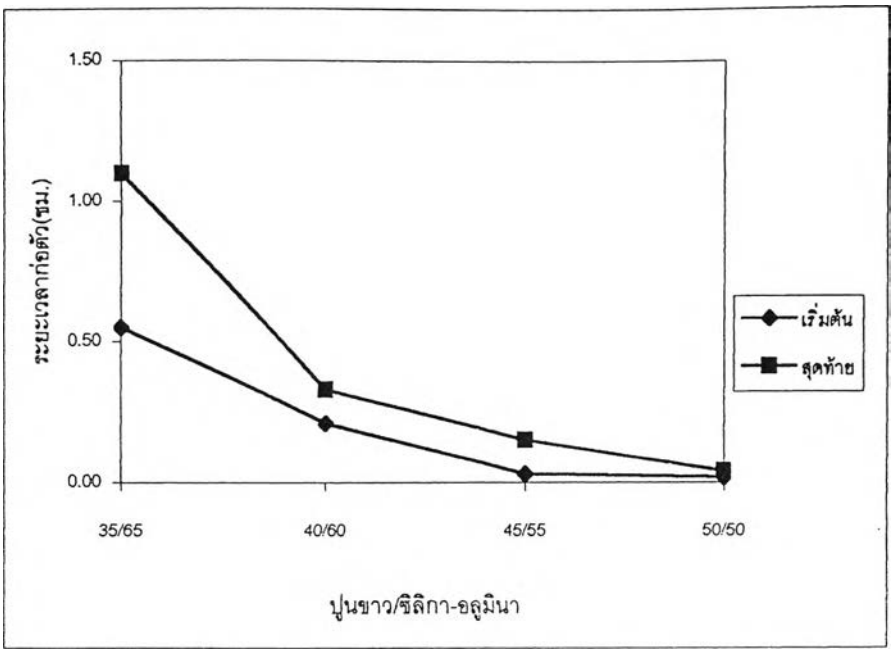
ในการทดสอบระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ตามมาตรฐาน ASTM C191-92 จะต้องทำการหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ทำให้เข็มไวแคตจมลง 10 มม. ในเวลา 30 วินาที แต่เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ไม่เพียงพอที่จะทำได้จึงได้เลือกค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สำหรับ HAC เท่ากับ 0.65 และ HAC ผสม GGBS เท่ากับ 0.40 เพื่อใช้ตลอดการทดลองนี้ ตารางที่ 20 และรูปที่ 15 ,16 แสดงค่าระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาก่อตัวจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา ที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมมีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC และ HAC ผสม GGBS เท่ากับ 21 นาที และ 19 นาที ตามลำดับ จะเห็นว่าเป็นเวลาที่เพียงพอต่อการผสมและเทมอร์ต้าลงแบบหล่อก่อนที่ปูนซีเมนต์จะเริ่มแข็งตัวทำให้กำลังรับแรงอัดของสัดส่วน

ตารางที่ 20 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC+GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2 ชั่วโมง

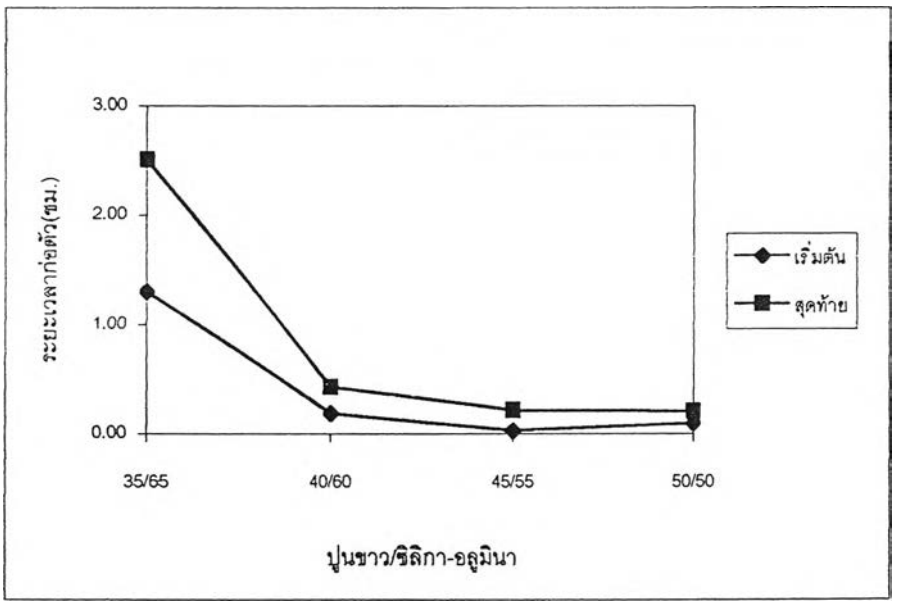
อัตราส่วน	HAC		HAC+GGBS	
L/S	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)
35/65	0.55	1.10	1.30	2.51
40/60	0.21	0.33	0.19	0.43
45/55	0.03	0.15	0.03	0.22
50/50	0.02	0.04	0.10	0.21

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.40



รูปที่ 15 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง



รูปที่ 16 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC+GGBS ณ อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง

นี้สูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์ที่มีค่าอัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินามากกว่า 40/60 จะมีค่าน้อยกว่า 10 นาที ซึ่งทำให้เกิดการแข็งตัวของมอร์ต้าก่อนที่จะเทลงแบบเสร็จทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงไปด้วย ความแตกต่างของระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นกับระยะ

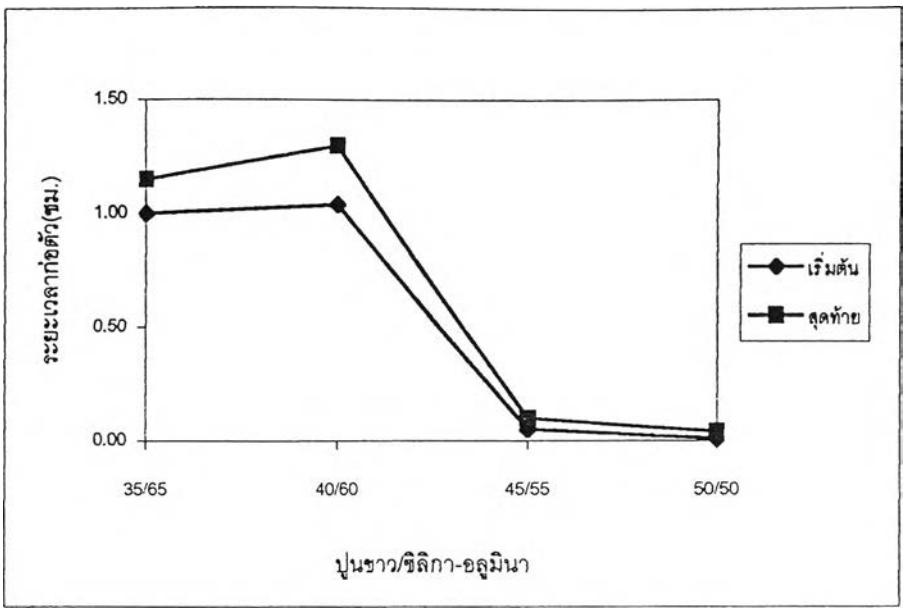
เวลาก่อตัวสุดท้ายของ HAC และ HAC ผสม GGBS อยู่ในช่วง 2-15 นาที และ 11-81 นาที ตามลำดับตารางที่ 21และรูปที่ 17 ,18 แสดงค่าระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาก่อตัวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับที่กล่าวไปข้างต้นคือระยะเวลาก่อตัวจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน ปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา ถึงแม้ว่าที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 35/65 จะมีค่าระยะเวลาก่อตัวต่ำกว่าที่สัดส่วน 40/60 แต่ต่างกันเพียงไม่มาก ที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 มีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC และ HAC ผสม GGBS เท่ากับ 78 นาทีและ 64 นาที ตามลำดับซึ่งเป็นเวลาที่เพียงพอในการผสมและเทมอร์ต้าเข้าแบบเช่นเดียวกันทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สัดส่วนนี้สูงขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับสัดส่วนที่มีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเร็วเกินไป ความแตกต่างของระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของ HAC และ HAC ผสม GGBS อยู่ในช่วง 7-22 นาทีและ 3-26 นาทีตามลำดับ จากรูปที่ 3 แสดงเฟสไดอะแกรมของ CaO และ Al_2O_3 จะเห็นว่าที่ Al_2O_3 เท่ากับ 48.67 % (ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา = 50/50) เฟสที่พบมากคือ $C_{12}A_7$ และพบเฟส C_3A บ้างซึ่งทั้งสองตัวเป็นเฟสที่ทำปฏิกิริยากับน้ำเร็วมากจึงทำให้ระยะเวลาก่อตัวของปูนที่สัดส่วนนี้น้อยมาก ส่วนที่ Al_2O_3 เท่ากับ 53.64 % (ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา = 45/55) เฟสที่พบมากคือ $C_{12}A_7$ และพบเฟส CA บ้างดังนั้นที่สัดส่วนนี้จึงมีระยะเวลาก่อตัวน้อยเช่นกัน ที่ Al_2O_3 เท่ากับ 58.62 % (ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา = 40/60) เฟสที่พบคือ $C_{12}A_7$ และ CA ในปริมาณที่พอ ๆ กันจึงทำให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเพิ่มขึ้นมาเป็น 1.18

ตารางที่ 21 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC+GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง

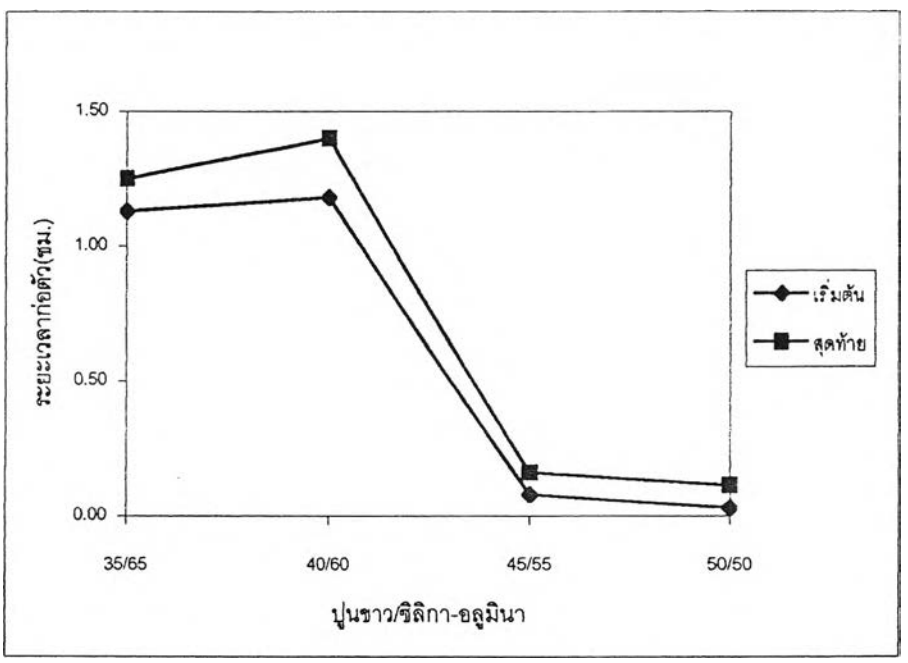
อัตราส่วน	HAC		HAC+GGBS	
L/S	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)
35/65	1.13	1.25	1.00	1.15
40/60	1.18	1.40	1.04	1.30
45/55	0.08	0.16	0.05	0.10
50/50	0.03	0.11	0.01	0.04

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.40



รูปที่ 17 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง



รูปที่ 18 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC+GGBS ณ อุณหภูมิเผา 1300°C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง

ชั่วโมง ที่ Al_2O_3 เท่ากับ 63.62 % (ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา = 35/65) เฟสที่พบมากคือ CA_2 และพบ CA บ้างซึ่งค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นน่าจะมากกว่าที่สัดส่วนปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา = 40/60 แต่ผลปรากฏว่ามีค่าพอกัน อาจเนื่องมาจากเวลาเผา 2.5 ชั่วโมง วัตถุดิบยังไม่สุกดังจะเห็นได้จากตารางที่ 22 ซึ่งแสดงค่าระยะเวลาก่อตัวที่เวลาเผา 3.5 ชั่วโมง ณ สัดส่วนปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา

ตารางที่ 22 ค่าระยะเวลาก่อตัวที่เวลาเผา 3.5 ชั่วโมงของสัดส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา เท่ากับ 35/65 และ 40/60

อัตราส่วน	ระยะเวลาก่อตัวของ HAC(ชม.)		ระยะเวลาก่อตัวของ HAC+GGBS(ชม.)	
L/S	เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
35/65	4.00	5.00	3.00	3.23
40/60	1.02	1.17	0.33	0.45

เท่ากับ 35/65 และ 40/60 จะเห็นว่าค่าระยะเวลาก่อตัวของสัดส่วน 35/65 เท่ากับ 4.00 ชั่วโมง มีค่ามากกว่าที่ สัดส่วน 40/60 เท่ากับ 2.58 ชั่วโมง ดังนั้นเฟสที่น่าจะพบในสัดส่วน 35/65 คือ CA_2 เป็นส่วนมากและ CA เป็นส่วนน้อยสอดคล้องกับเฟสไดอะแกรมด้วย ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC ตามมาตรฐาน ACI 225R-85 มีค่าเท่ากับ 3-9 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 ซึ่งมีค่า 78 นาที จะเห็นว่าปูนที่ผลิตได้มีการแข็งตัวเร็วมาก

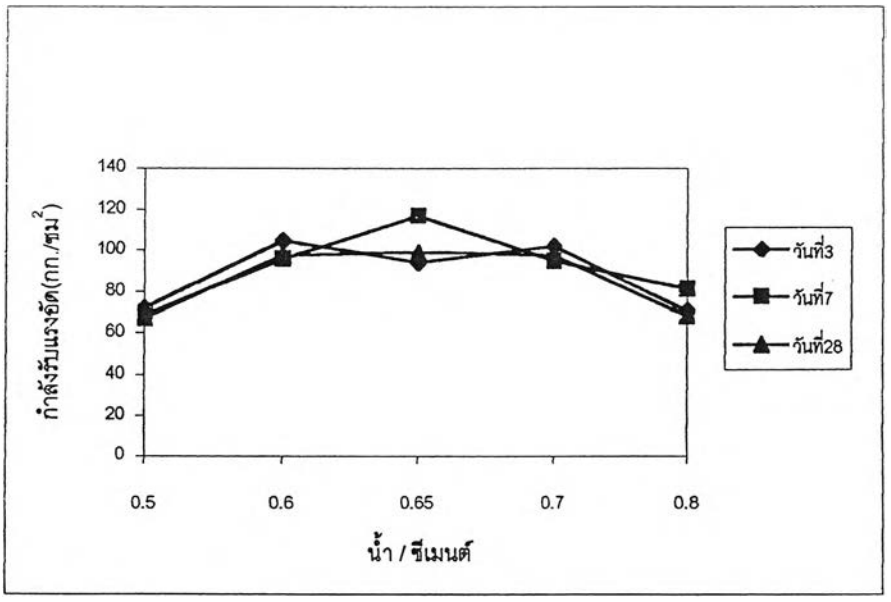
5.1.3.2 กำลังรับแรงอัด

ในการผสมมอร์ต้าเพื่อใช้ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ได้กำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ทั้งนี้เพื่อที่จะป้องกันปัญหาการเกิดคอนเวอร์ชันในภายหลัง แต่เนื่องจากเมื่อทำการหล่อมอร์ต้าด้วยปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 แล้วปรากฏว่ามอร์ต้าแห้งเกินไป จนทำให้ปูนซีเมนต์และทรายไม่เกิดการจับตัวกัน จึงทำการทดลองหาค่าปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมที่ทำให้ก้อนมอร์ต้ามีกำลังรับแรงสูงสุดเพื่อใช้ในการผสมหาค่ากำลังรับแรงอัดต่อไป ตารางที่ 23 และรูปที่ 19 ,20 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC และ HAC ผสม GGBS ณ สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆ ผลการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของ HAC เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จนมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 0.65 ซึ่งมีค่า 120 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 3 วัน หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลง สำหรับ HAC ผสม GGBS พบว่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จนมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 0.60 ซึ่งมีค่า 158.67 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์พบว่ากำลังรับแรงอัดลดลงเช่นกัน ค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกมีผลมาจาก ณ จุดที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำๆมอร์ต้าจะแห้งเกินไปจนทำให้ปูนและทรายไม่เกิดการจับตัวกัน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ขึ้นทำให้มอร์ต้ามีความชื้นมากขึ้นพอที่จะทำให้เกิดการจับตัวและเทลงแบบหล่อได้แน่นขึ้น ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจึงเพิ่มขึ้น ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดที่

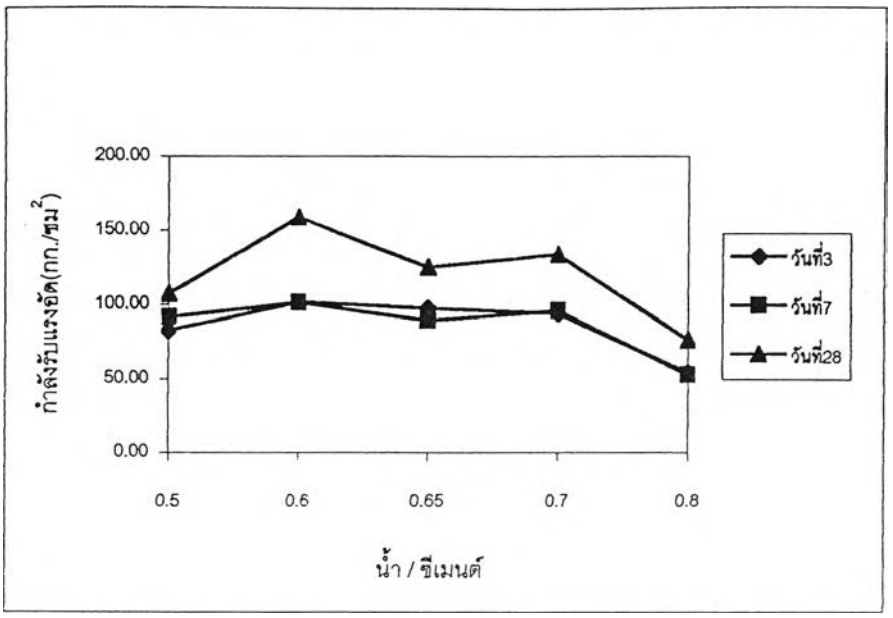
ลดลงในช่วงหลังมีผลมาจากปริมาณน้ำมีมากเกินไปทำให้มอร์ต้าเหลวและอัดลงแบบหล่อได้ไม่แน่น ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจึงลดลง (การที่พิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ที่ 3 วัน เนื่องจากเพื่อหลีกเลี่ยงผลของการคอนเวอร์ชันที่เกิดขึ้นในภายหลังซึ่งทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ลดลง ส่วนค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS พิจารณาที่ 28 วัน เนื่องจาก GGBS จะไปช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาคอนเวอร์ชันแต่กำลังรับแรงอัดในวันแรก ๆ จะลดลงก่อนและจะค่อย ๆ พัฒนากำลังขึ้นมาในภายหลัง)

ตารางที่ 23 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่สัดส่วน L/S = 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง

อัตราส่วน	กำลังรับแรงอัดของ HAC			กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS		
	(กก./ตร.ซม.)			(กก./ตร.ซม.)		
W/c	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
0.5	72.00	68.67	67.33	82.53	92.00	107.47
0.6	104.67	95.73	97.33	102.00	101.33	158.67
0.65	120.00	116.67	98.87	97.33	89.33	124.93
0.7	102.00	94.93	97.33	94.00	96.00	133.33
0.8	70.40	81.33	68.27	54.00	52.67	76.27



รูปที่ 19 ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ 0.5-0.8



รูปที่ 20 ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ณ อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ 0.5-0.8

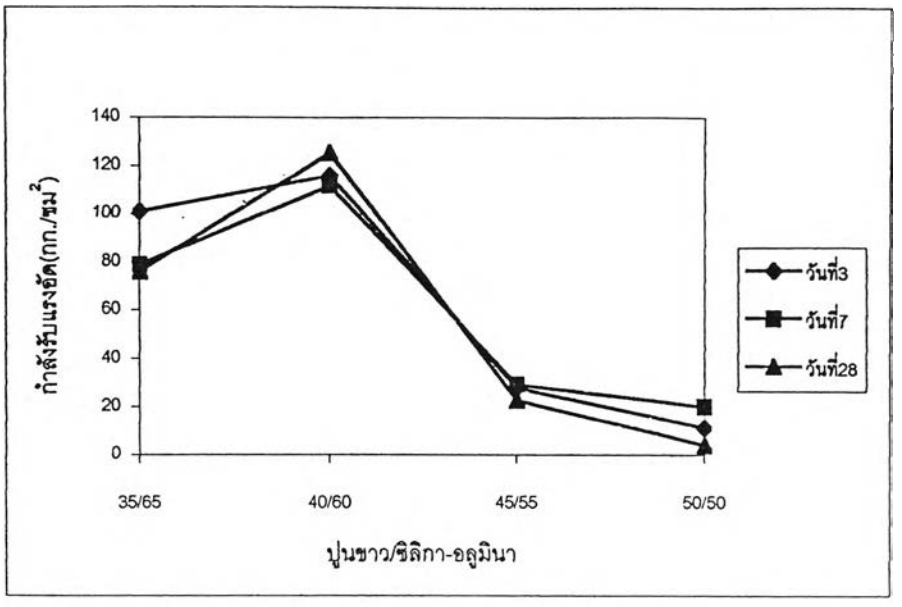
ตารางที่ 24 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง

อัตราส่วน	กำลังรับแรงอัดของ HAC			กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS		
	(กก./ตร.ซม.)			(กก./ตร.ซม.)		
L/S	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
35/65	101.07	78.67	76.00	84.67	70.67	111.07
40/60	116.00	111.60	125.33	80.00	62.00	70.40
45/55	28.00	29.33	22.67	68.67	38.00	51.33
50/50	11.33	20.00	4.00	46.67	22.67	40.67

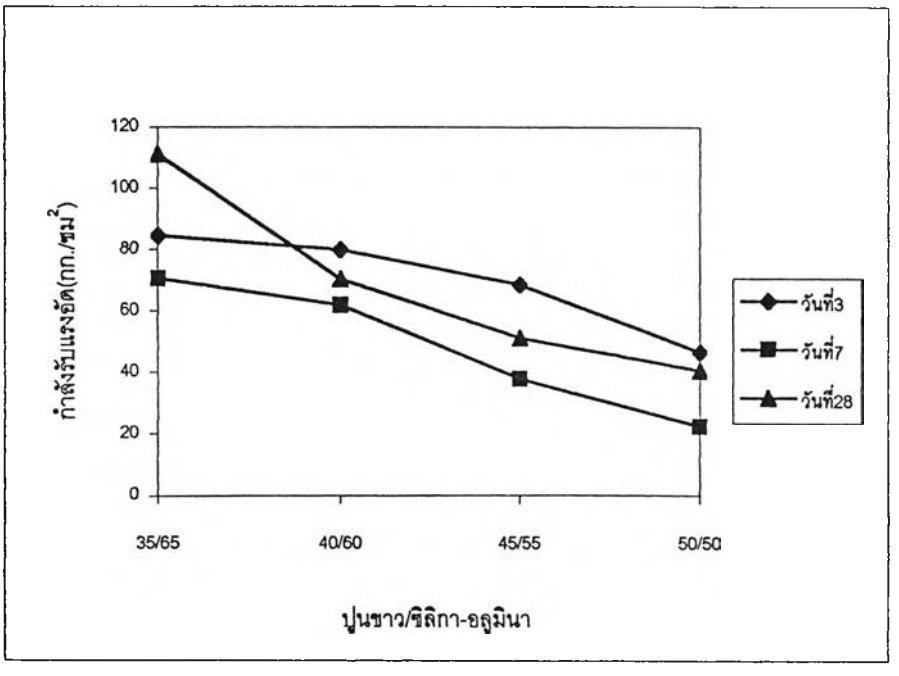
w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.60

ตารางที่ 24 และรูปที่ 21 , 22 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาต่างๆ ผลการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของ HAC มีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 ซึ่งมีค่า 116 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 3 วัน สำหรับ HAC ผสม GGBS พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่ามากที่สุดที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 35/65 ซึ่งมีค่า 111.07 กก/ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC กับมาตรฐาน ACI 225R-85 ซึ่งมีค่า



รูปที่ 21 กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50



รูปที่ 22 กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50

422 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 1 วัน พบว่ามีค่าต่ำกว่าถึง 306 กก./ตร.ซม. ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดคอนเวอร์ชันหรืออุณหภูมิและเวลาที่ใช้เผายังไม่สูงและนานพอ การที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0 .65 ทำให้เกิดการคอนเวอร์ชันตามมาในภายหลังเป็นผลทำให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28

วัน มีแนวโน้มลดลง ค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS จะมีแนวโน้มน้อยกว่าของ HAC ในวันแรกๆแต่เมื่ออายุของก้อนตัวอย่างมากขึ้น กำลังรับแรงอัดจะค่อยๆพัฒนาขึ้นมาในวันหลังๆ ทั้งนี้เนื่องมาจาก GGBS จะช่วยพัฒนากำลังให้เพิ่มขึ้นอีกครั้งหลังจากเกิดปฏิกิริยาคอนเวอร์ชัน แต่จะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงในช่วงแรกซึ่งลักษณะกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่กล่าวมาจะมีลักษณะเช่นเดียวกันตลอดทุกการทดลอง เนื่องจากใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เกินกว่า 0.4 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการคอนเวอร์ชัน เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2 ชั่วโมง มีค่าต่ำทำให้การเปรียบเทียบหาสัดส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมทำได้ไม่ชัดเจนนัก ดังนั้นจึงได้เผาวัตถุดิบอีกครั้งที่อุณหภูมิและเวลาเผาสูงขึ้นเพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบได้ดีขึ้น

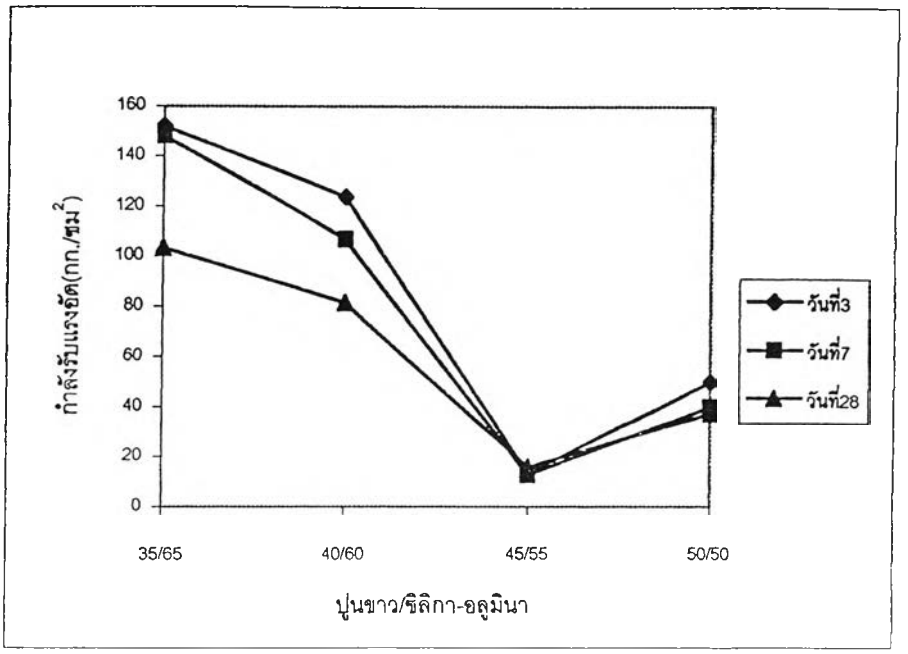
ตารางที่ 25 และรูปที่ 23, 24 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC มีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเป็น 35/65 ซึ่งมีค่า 152 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 3 วัน สำหรับ HAC ผสม GGBS พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเป็น 40/60 ซึ่งมีค่า 180.67 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2 ชั่วโมง ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น 24% และ 39% ตามลำดับ

ตารางที่ 25 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง

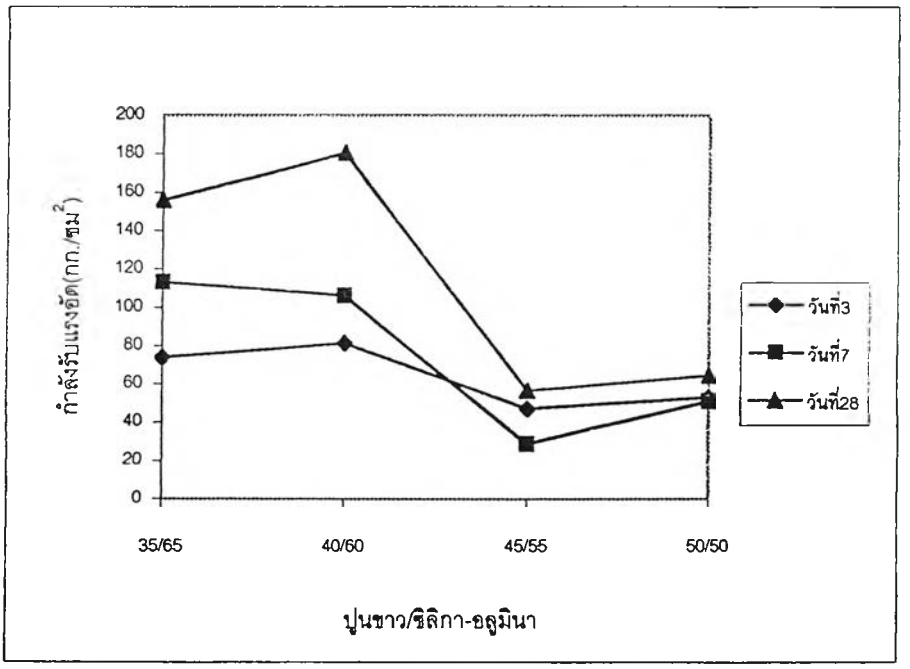
อัตราส่วน	กำลังรับแรงอัดของ HAC			กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS		
	(กก./ตร.ซม.)			(กก./ตร.ซม.)		
L/S	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
35/65	152.00	148.00	103.33	74.00	113.33	156.00
40/60	123.33	106.67	81.33	81.33	106.00	180.67
45/55	13.33	12.67	16.00	47.33	28.67	56.67
50/50	50.00	40.00	37.33	53.33	51.33	64.67

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.60



รูปที่ 23 กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50



รูปที่ 24 กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50

ความเหมาะสมของสัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาจะพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงของ ก้อนตัวอย่าง HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน เป็นหลักทั้งนี้เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดนี้จะมีการ

พัฒนาสูงขึ้นต่อไปอีกเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ต่างกับค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง HAC ที่อายุ 3 วัน ซึ่งจะมีค่าน้อยลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาที่เหมาะสมคือ 40/60

เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดของสัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาที่ 35/65 และ 40/60 มีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของทั้งสองสัดส่วนในภายหลังอีกครั้งหนึ่งเมื่อสามารถหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเผาได้แล้วซึ่งเท่ากับ 1300 °C และ 3.5 ชั่วโมง ตารางที่ 26 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 3.5 ชั่วโมง ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 35/65 และ 40/60 จากตารางพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ณ สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเป็น 35/65 ที่อายุ 3 วัน มีค่า 150 กก./ตร.ซม. น้อยกว่า ณ สัดส่วน 40/60 ที่มีค่า 166 กก./ตร.ซม. อยู่เท่ากับ 16 กก./ตร.ซม. ซึ่งไม่มากนักแต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าถึง 98 กก./ตร.ซม. ดังนั้นสัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 จึงมีความเหมาะสมที่สุด

เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงอัดจากเฟสที่เกิดขึ้นที่ได้กล่าวไปแล้วในเรื่องระยะเวลาก่อตัว จะเห็นว่าที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา 50/50 และ 45/55 จะพบ C_3A และ $C_{12}A_7$ ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงน้อยกว่า CA ที่พบ ณ สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา 40/60 และ 35/65 เนื่องจากแข็งตัวเร็วเกินไปจึงให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาก ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา 40/60 พบ CA ประมาณ 65 % และ $C_{12}A_7$ ประมาณ 35 % ซึ่งเฟส CA เป็นเฟสที่ทำให้ HAC มีกำลังสูงดังนั้นที่สัดส่วนนี้จึงมีกำลังรับแรงอัดสูง ส่วนที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา 35/65 พบ CA_2 มากกว่า CA ซึ่งเฟส CA_2 จะทำปฏิกิริยากับน้ำในช่วงแรกและให้เฟส CAH_{10} ซึ่งเป็นเฟสที่ให้กำลังรับแรงสูง (เป็นเฟสเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ได้จากเฟส CA) ดังนั้นกำลังรับแรงอัดของ HAC ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา 35/65 จึงมีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อผสมกับ GGBS จะเห็นว่ากำลังที่ 28 วัน จะน้อยกว่าที่สัดส่วน 40/60 ทั้งนี้เนื่องมาจากทั้งเฟส CA และ CA_2 จะเกิดการคอนเวอร์ชันไปทำให้กำลังลดลงแล้วจึงพัฒนากำลังขึ้นมาโดย GGBS ที่ผสมลงไปในภายหลัง แต่ที่สัดส่วน 40/60 ซึ่งมีเฟส $C_{12}A_7$ อยู่ด้วยไม่ได้เกิดการคอนเวอร์ชัน ดังนั้นจึงมีกำลังรับแรงที่สูงกว่า

จากผลการทดลองของระยะเวลาก่อตัวและกำลังรับแรงอัดประกอบกับเฟสไดอะแกรมแคลเซียม-อลูมินา สามารถสรุปเฟสที่พบใน HAC ที่สัดส่วนปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา ต่างๆ ได้ดังนี้

สัดส่วน	เฟสที่พบ (เรียงจากมากไปน้อย)
35/65	CA_2 CA
40/60	CA $C_{12}A_7$
45/55	$C_{12}A_7$ CA
50/50	$C_{12}A_7$ C_3A

ตารางที่ 26 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 3.5 ชั่วโมง

อัตราส่วน	กำลังรับแรงอัดของ HAC			กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS		
	(กก./ตร.ซม.)			(กก./ตร.ซม.)		
L/S	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
35/65	150.67	130.00	114.67	50.67	62.00	108.67
40/60	166.67	163.33	139.33	91.33	114.67	206.67

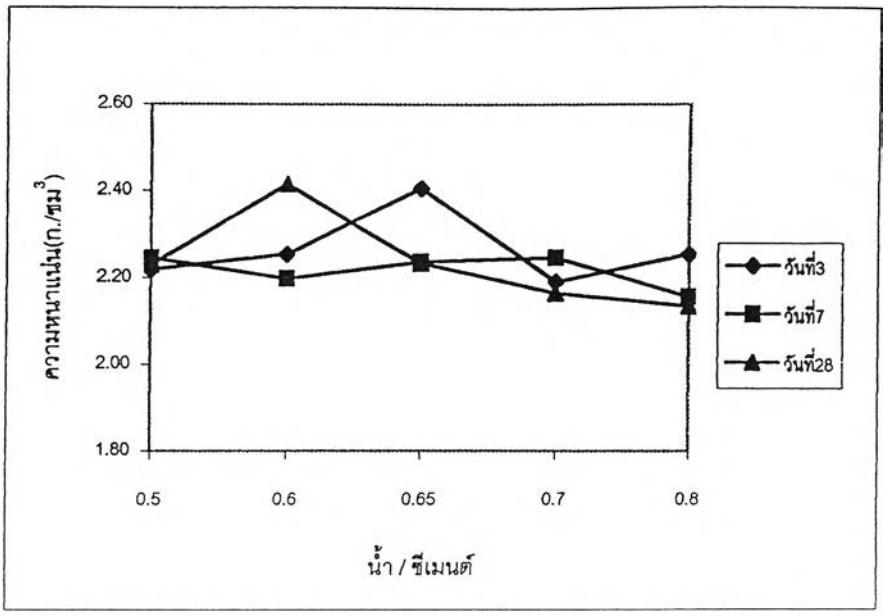
5.1.3.3 ความหนาแน่น

ตารางที่ 27 และรูปที่ 25 , 26 แสดงความหนาแน่นของ HAC และ HAC ผสม GGBS ณ อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา เท่ากับ 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง โดยเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆ ผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.65 ความหนาแน่นของ HAC ที่อายุ 3 วัน มีค่ามากสุดเท่ากับ 2.34 ก/ลบ.ซม. ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.60 ความหนาแน่นของ HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน จะมีค่ามากสุดเท่ากับ 2.42 ก./ลบ.ซม. ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัด ณ จุดนี้ที่มีค่ามากสุดเช่นกัน

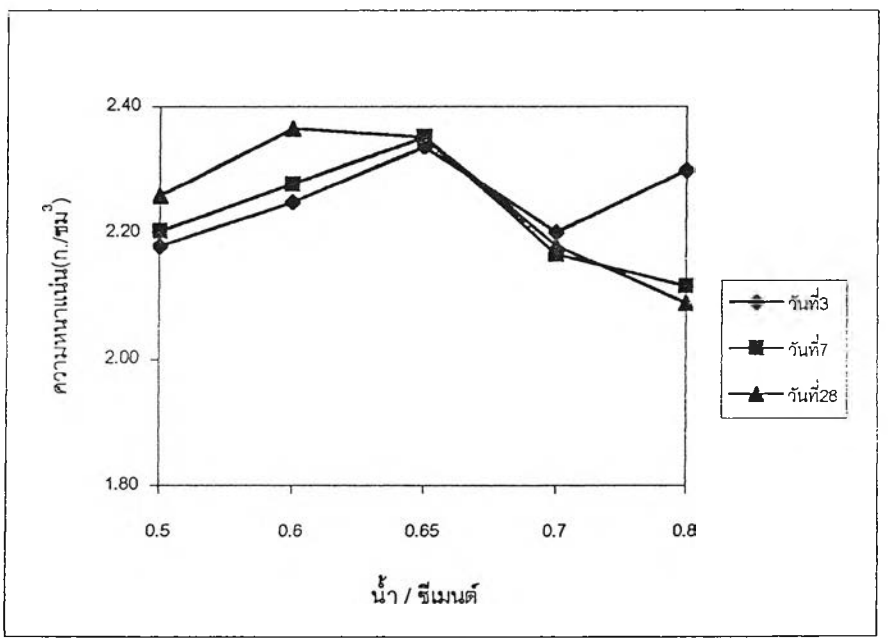
ตารางที่ 28 และรูปที่ 27 , 28 แสดงค่าความหนาแน่นของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 ความหนาแน่นของ HAC ที่อายุ 3 วัน จะมีค่ามากสุดเท่ากับ 2.44 ก./ลบ.ซม. ที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา เท่ากับ 35/65 ความหนาแน่นของ HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน จะมีค่ามากสุดเท่ากับ 2.18 ก./ลบ.ซม. ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่ามากสุด ณ จุดนี้

ตารางที่ 27 ค่าความหนาแน่น ที่สัดส่วน L/S = 40/60 อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง

อัตราส่วน	ความหนาแน่นของ HAC			ความหนาแน่นของ HAC+GGBS		
	(ก./ลบ.ซม.)			(ก./ลบ.ซม.)		
w/c	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
0.5	2.18	2.20	2.26	2.22	2.25	2.23
0.6	2.25	2.28	2.37	2.25	2.20	2.42
0.65	2.34	2.35	2.35	2.41	2.23	2.23
0.7	2.20	2.17	2.18	2.19	2.25	2.16
0.8	2.30	2.11	2.09	2.25	2.15	2.13



รูปที่ 25 ความหนาแน่นของ HAC ณ อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ 0.5-0.8



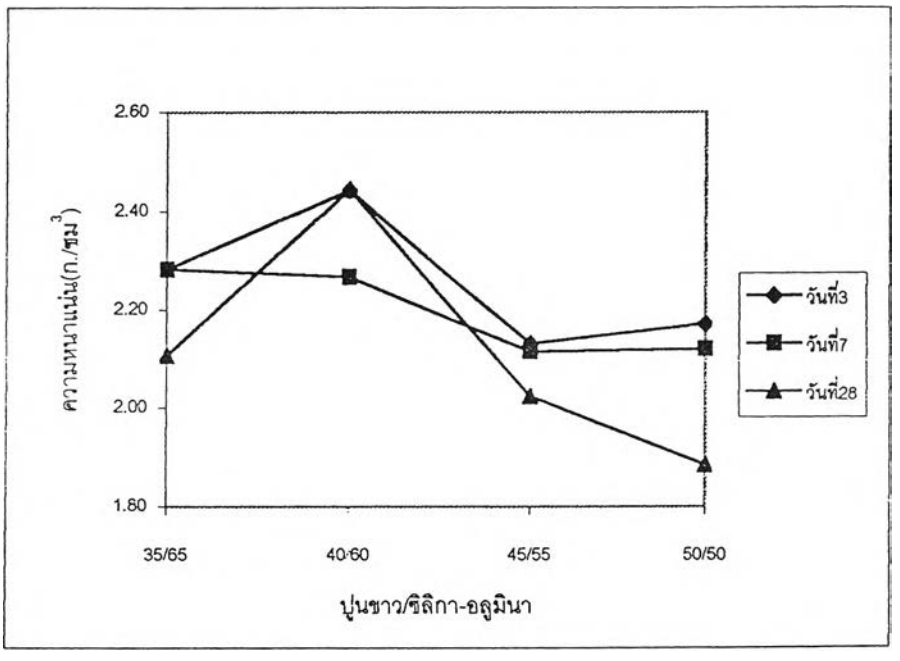
รูปที่ 26 ความหนาแน่นของ HAC+GGBS ณ อัตราส่วน น้ำ/ซีเมนต์ 0.5-0.8

ตารางที่ 28 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1200 °C เวลาเผา 2.0 ชั่วโมง

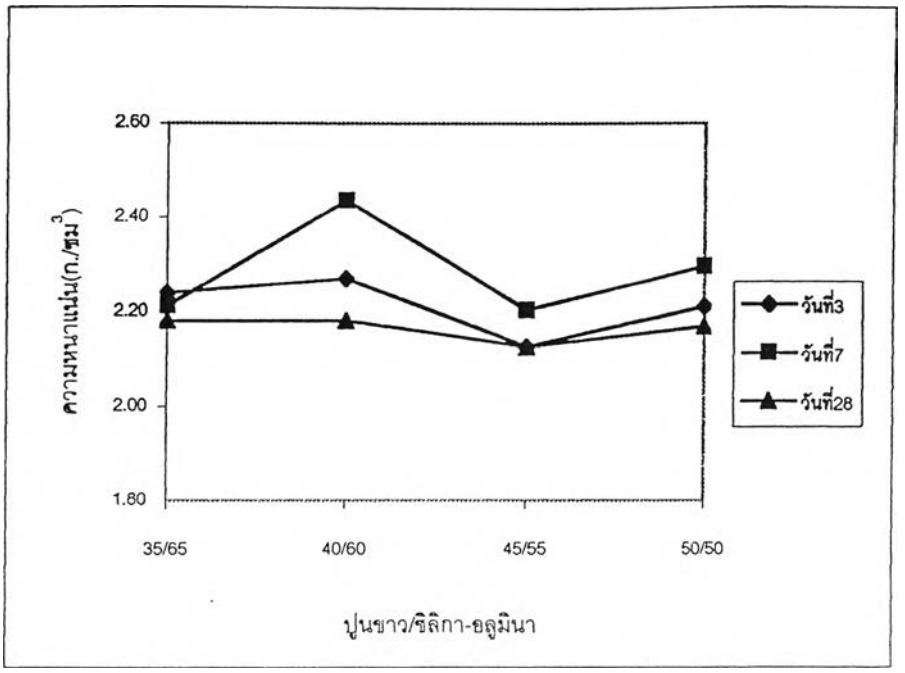
อัตราส่วน	ความหนาแน่นของ HAC			ความหนาแน่นของ HAC+GGBS		
	(ก./ลบ.ซม.)			(ก./ลบ.ซม.)		
L/S	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
35/65	2.28	2.28	2.11	2.24	2.21	2.18
40/60	2.44	2.27	2.45	2.27	2.43	2.18
45/55	2.13	2.11	2.02	2.13	2.20	2.13
50/50	2.17	2.12	1.89	2.21	2.30	2.17

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.60



รูปที่ 27 ความหนาแน่นของ HAC ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50



รูปที่ 28 ความหนาแน่นของ HAC+GGBS ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50

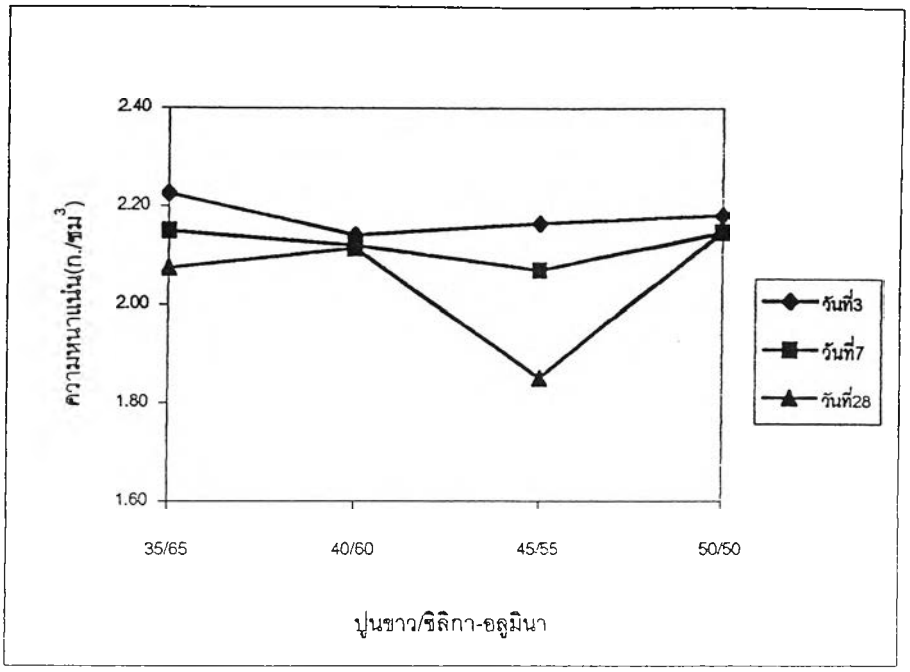
ตารางที่ 29 และรูปที่ 29 , 30 แสดงค่าความหนาแน่นของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มอัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่น ณ จุดที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดจะมีค่ามากตามไปด้วย

ตารางที่ 29 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง

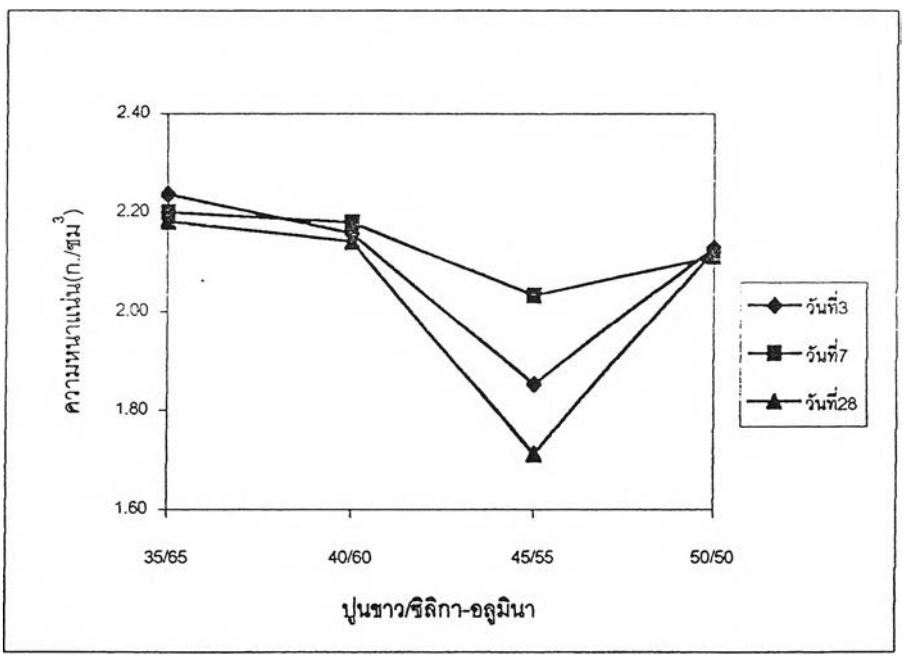
อัตราส่วน	ความหนาแน่นของ HAC			ความหนาแน่นของ HAC+GGBS		
	(ก./ลบ.ซม.)			(ก./ลบ.ซม.)		
L/S	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
35/65	2.24	2.20	2.18	2.23	2.15	2.07
40/60	2.16	2.18	2.14	2.14	2.12	2.11
45/55	1.85	2.03	1.71	2.17	2.07	1.85
50/50	2.13	2.11	2.12	2.18	2.15	2.15

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.60



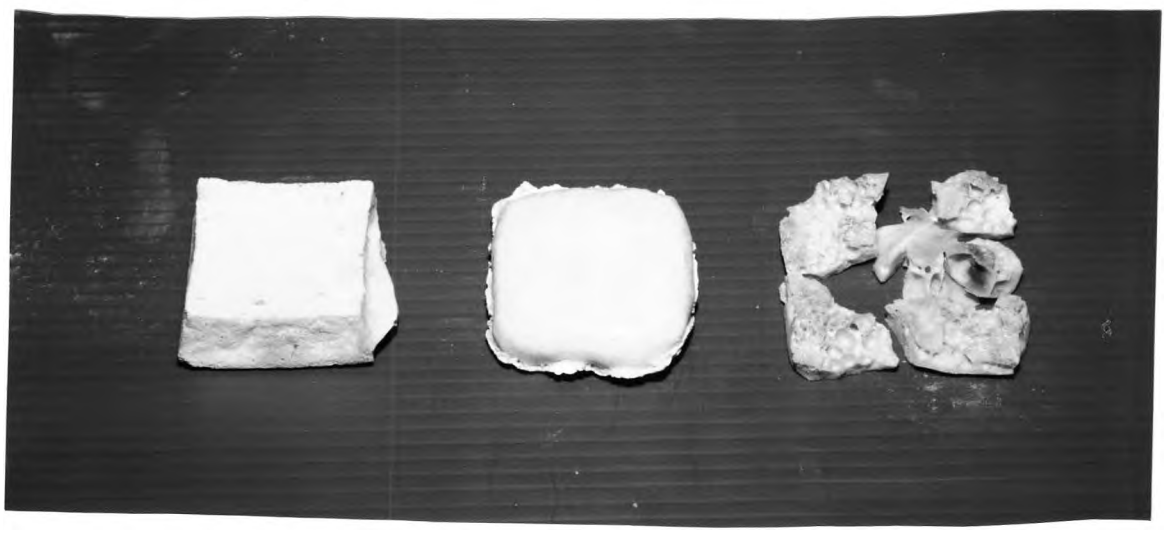
รูปที่ 29 ความหนาแน่นของ HAC ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50



รูปที่ 30 ความหนาแน่นของ HAC+GGBS ณ อัตราส่วน ปูนขาว/ซิลิกา-อลูมินา 35/65-50/50

5.1.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิเผาที่สัดส่วนและเวลาเผาคงที่

การทดลองนี้ได้ทำการหาอุณหภูมิเผาที่เหมาะสมในการผลิต HAC โดยแปรค่าอุณหภูมิเผาเท่ากับ 1200 1300 และ 1400 °C ใช้อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาและเวลาในการเผาคงที่ หลังจากนั้นนำ HAC ที่ผลิตได้ไปผสมกับ GGBS ในอัตราส่วน HAC ต่อ GGBS เท่ากับ1:1 ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ในการเลือกช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมได้ทำการทดลองเผาวัตถุดิบที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 ที่อุณหภูมิ 1500 °C และ 1450 °C เวลา 2.5 ชั่วโมงพบว่าวัตถุดิบเกิดการหลอมละลายแต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C เวลา 2.5 ชั่วโมง พบว่าวัตถุดิบยังไม่เกิดการหลอมละลาย (แสดงในรูปที่ 31) จึงได้เลือกค่าอุณหภูมิในช่วงเหล่านี้ในการทดลอง



รูปที่ 31 แสดงลักษณะปูนที่เผาที่อุณหภูมิ 1300 °C (ซ้าย) 1400 °C (กลาง) 1500 °C (ขวา)

5.1.4.1 ระยะเวลาก่อตัว

ตารางที่ 30 และรูปที่ 32, 33 แสดงค่าระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มค่าอุณหภูมิเผาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC จะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.21 , 1.18 และ 5.20 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิ 1200 , 1300 และ 1400 °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเป็นเวลาที่เพียงพอต่อการผสมและเทมอร์ต้าลงแบบก่อนที่จะแข็งตัว เป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของแต่ละอุณหภูมิที่มีค่าแตกต่างกันน่าจะมีผลมาจากส่วนประกอบของเฟสที่แตกต่างกันโดยเมื่อพิจารณาจากเฟสไดอะแกรมในรูปที่ 3 ที่ Al_2O_3 เท่ากับ 58.62% ที่

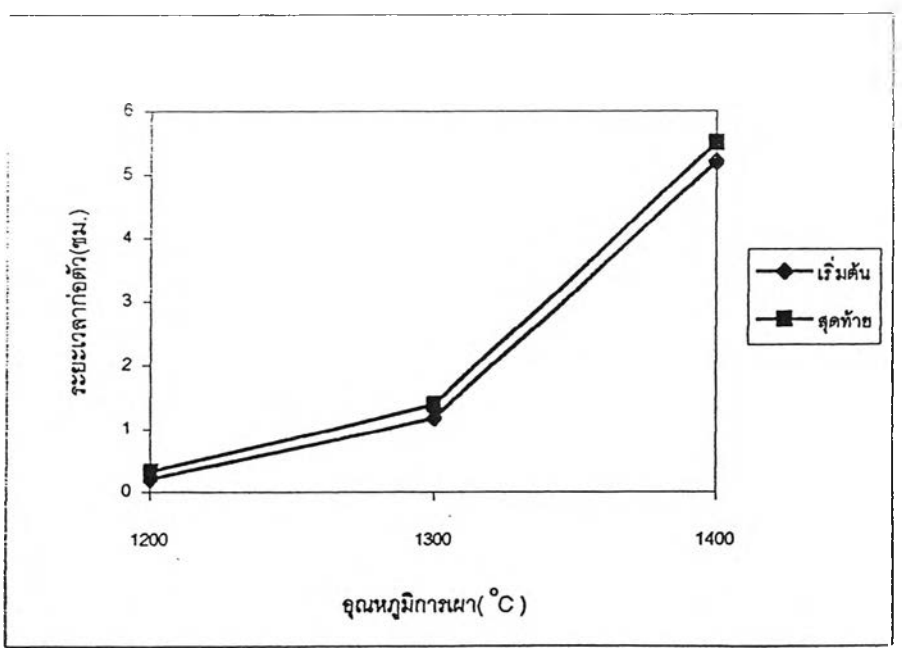
อุณหภูมิต่ำกว่า 1300 °C เฟสที่พบมากคือ $C_{12}A_7$ จึงทำให้มีระยะเวลาก่อตัวเร็วมาก ส่วนที่อุณหภูมิ 1300 °C เฟสที่พบคือ $C_{12}A_7$ และ CA ในสัดส่วนที่พอๆกันดังนั้นระยะเวลาก่อตัวจึงไม่เร็วเหมือนที่อุณหภูมิ 1200 °C แต่ที่อุณหภูมิ 1400 °C จะเป็นช่วงที่เกิดการหลอมเหลวขึ้นพอดีทำให้นอกจากจะพบเฟส CA กับ Liquid แล้วซิลิกาที่มีอยู่ในวัตถุดิบเกิดการรวมเฟสกับแคลเซียมและอลูมินาได้เฟส C_2AS ซึ่งจากตารางที่ 5 กล่าวว่าเฟสนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำช้ามากทำให้คุณสมบัติการแข็งตัวเร็วลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นที่มีค่านานถึง 5.20 ชั่วโมง

ตารางที่ 30 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC และHAC+GGBS ที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง
สัดส่วน L/S = 40/60

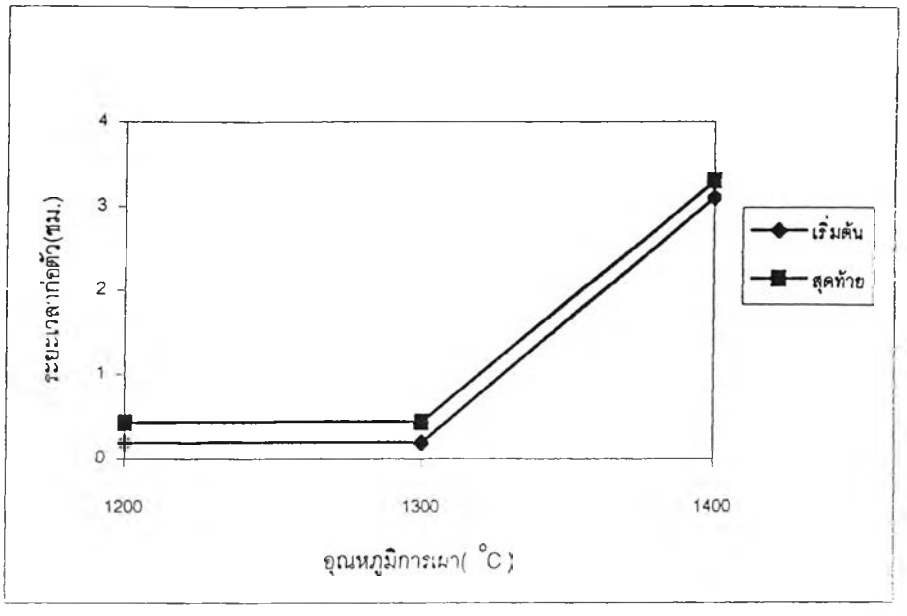
อุณหภูมิเผา	HAC		HAC+GGBS	
(°C)	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)
1200	0.21	0.33	0.19	0.43
1300	1.18	1.40	0.20	0.45
1400	5.20	5.50	3.10	3.30

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.40



รูปที่ 32 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง L/S = 40/60



รูปที่ 33 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC+GGBS ณ เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง L/S = 40/60

ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิ 1200 °C และ 1300 °C จะมีค่าใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 0.19 และ 0.20 ชั่วโมง และมีค่ามากขึ้นที่อุณหภูมิการเผาสูงขึ้นเป็น 1400 °C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.10 ชั่วโมง ในขณะทำการทดลองหาค่าระยะเวลาก่อตัวของ HAC ผสม GGBS ที่อุณหภูมิ 1200 °C และ 1300 °C ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 พบว่ามอร์ต้าที่ผสมเสร็จมีความแข็งตัวค่อนข้างมากอยู่แล้วจึงอาจทำให้ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของทั้งสองอุณหภูมิมีความแตกต่างกันไม่ชัดเจนนัก ต่างกับที่อุณหภูมิ 1400 °C พบว่ามอร์ต้าที่ผสมเสร็จมีความเหลวมากค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นจึงนานถึง 3.10 ชั่วโมง ความแตกต่างของระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นกับระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของ HAC และ HAC ผสม GGBS อยู่ในช่วง 12-30 นาที และ 20-25 นาที ตามลำดับ

5.1.4.2 กำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 31 และรูปที่ 34, 35 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มอุณหภูมิการเผาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC มีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 1300 °C ซึ่งมีค่า 123 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 3 วัน สำหรับ HAC ผสม GGBS พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่ามากสุดที่อุณหภูมิ 1300 °C ซึ่งมีค่า 180.67 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC กับมาตรฐาน ACI 225R-85 ซึ่งมีค่า 422 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 1 วัน พบว่ามีค่าต่ำกว่าถึง 299 กก./ตร.ซม. ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่า 0.4 ทำให้เกิดคอนเวอร์ชัน

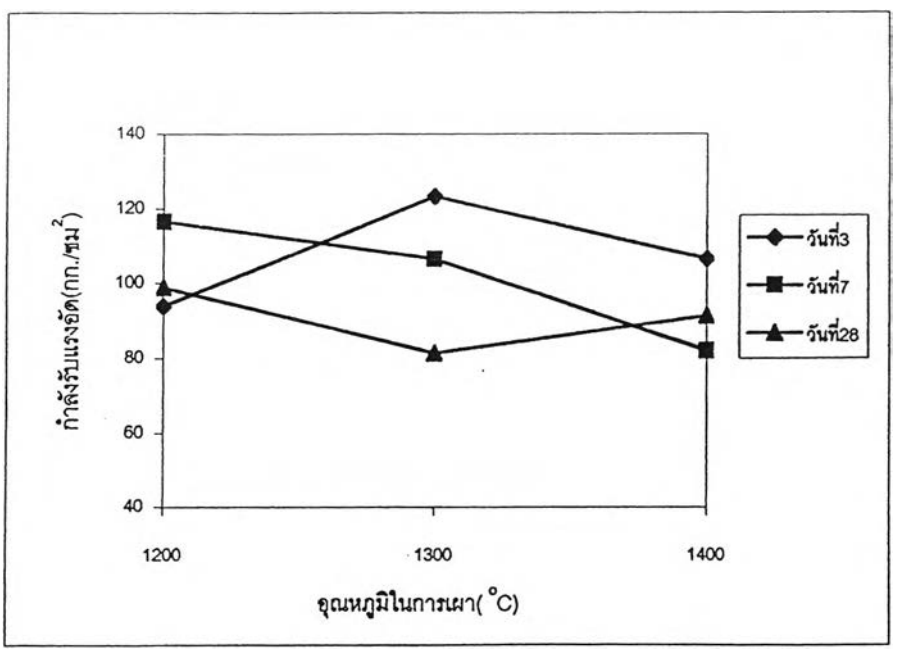
ตามมา กำลังรับแรงอัดจึงต่ำกว่ามากหรือเวลาในการเผายังไม่เพียงพอ ที่อุณหภูมิ 1200 °C กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อายุ 3 วัน และ HAC ผสม GGBS ณ อายุ 28 วัน มีค่า ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 1300 °C เท่ากับ 31% และ 14% ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับที่พิจารณาจากเฟสไดอะแกรมที่กล่าวในเรื่องระยะเวลาก่อตัวจะพบว่าเฟส $C_{12}A_7$ ที่พบในอุณหภูมิ 1200 °C จะทำให้กำลังรับแรงอัดน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 1300 °C ซึ่งพบเฟส $C_{12}A_7$และCA ในสัดส่วนพอๆกัน ที่อุณหภูมิ 1400 °C กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อายุอายุ 3 วัน และ HAC ผสม GGBS ณ อายุ 28

ตารางที่ 31 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่เวลาเผา 2.5 ช.ม. สัดส่วน L/S = 40/60

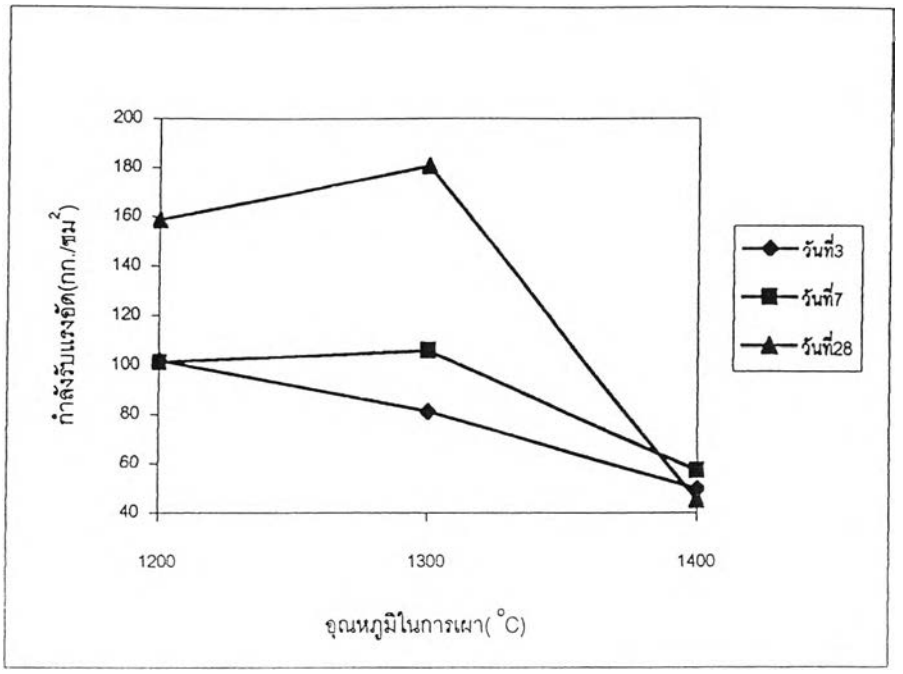
อุณหภูมิ	กำลังรับแรงอัดของ HAC			กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS		
(C)	(กก./ตร.ซม.)			(กก./ตร.ซม.)		
	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
1200	94.00	116.67	98.87	102.00	101.33	158.67
1300	123.33	106.67	81.33	81.33	106.00	180.67
1400	106.67	82.00	91.33	50.00	57.33	45.33

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.60



รูปที่ 34 กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อุณหภูมิในการเผา 1200-1400 °C



รูปที่ 35 กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS ณ อุณหภูมิในการเผา 1200-1400 °C

วัน มีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 1300 °C เท่ากับ 16% และ 300% ตามลำดับซึ่งเป็นผลมาจากการที่พบเฟส C_2AS ณ อุณหภูมิ 1400 °C ซึ่งเป็นเฟสที่ให้กำลังช้าและไม่ได้ทำปฏิกิริยากับ GGBS กำลังรับแรงอัด ณ 28 วันจึงไม่เพิ่มขึ้นต่างกับที่อุณหภูมิ 1300 °C ซึ่งพบเฟส CA เป็นส่วนประกอบมากที่สุดซึ่งเป็นเฟสที่ให้กำลังแก่ HAC และเมื่อเฟสนี้เกิดการคอนเวอร์ชันไปอยู่ในรูป C_3AH_6 (เนื่องจากใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากกว่า 0.4) เฟสนี้จะไปทำปฏิกิริยากับ GGBS ทำให้เกิดเฟส C_2ASH_8 ขึ้นมาในภายหลัง ทำให้เกิดการพัฒนากำลังของ HAC ผสม GGBS จากวันที่ 3 ไปถึงวันที่ 28 เพิ่มขึ้น 122% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1200°C เพิ่มขึ้นเพียง 55% ส่วนที่อุณหภูมิ 1400 °C กลับมีกำลังลดลง 10% แสดงว่าเฟสที่พบในปูนที่อุณหภูมิ 1400 °C นี้ไม่น่าจะเป็น CA

จากผลการทดลองของระยะเวลาก่อตัวและกำลังรับแรงอัดประกอบกับเฟสไดอะแกรมแคลเซียม-อลูมินา สามารถสรุปเฟสที่พบใน HAC ที่อุณหภูมิเผาต่างๆได้ดังนี้

อุณหภูมิเผา	เฟสที่พบ (เรียงจากมากไปน้อย)
1200 °C	$C_{12}A_7$ CA
1300 °C	CA $C_{12}A_7$
1400 °C	C_2AS CA

5.1.4.3 ความหนาแน่น

ตารางที่ 32 และรูปที่ 36 ,37 แสดงค่าความหนาแน่นของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง โดยที่เพิ่มอุณหภูมิเผาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 1300 °C ความหนาแน่นของ HAC ที่อายุ 3 วัน และ HAC

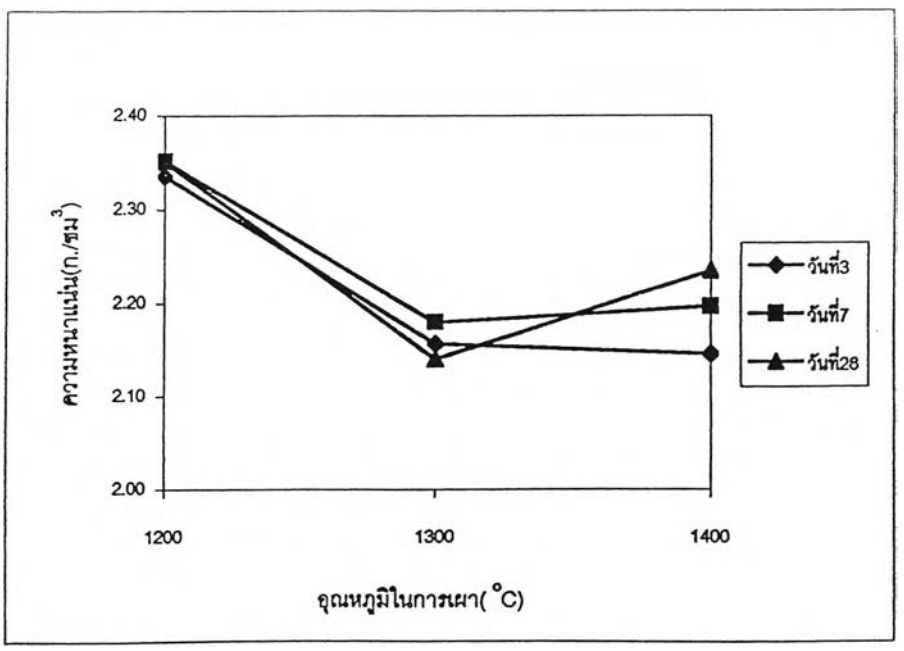
ตารางที่ 32 ค่าความหนาแน่น ที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง สัดส่วน L/S = 40/60

อุณหภูมิ	ความหนาแน่นของ HAC			ความหนาแน่นของ HAC+GGBS		
(°C)	(ก./ลบ.ซม.)			(ก./ลบ.ซม.)		
	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
1200	2.34	2.35	2.35	2.25	2.20	2.42
1300	2.16	2.18	2.14	2.14	2.12	2.11
1400	2.15	2.20	2.23	2.09	2.22	2.02

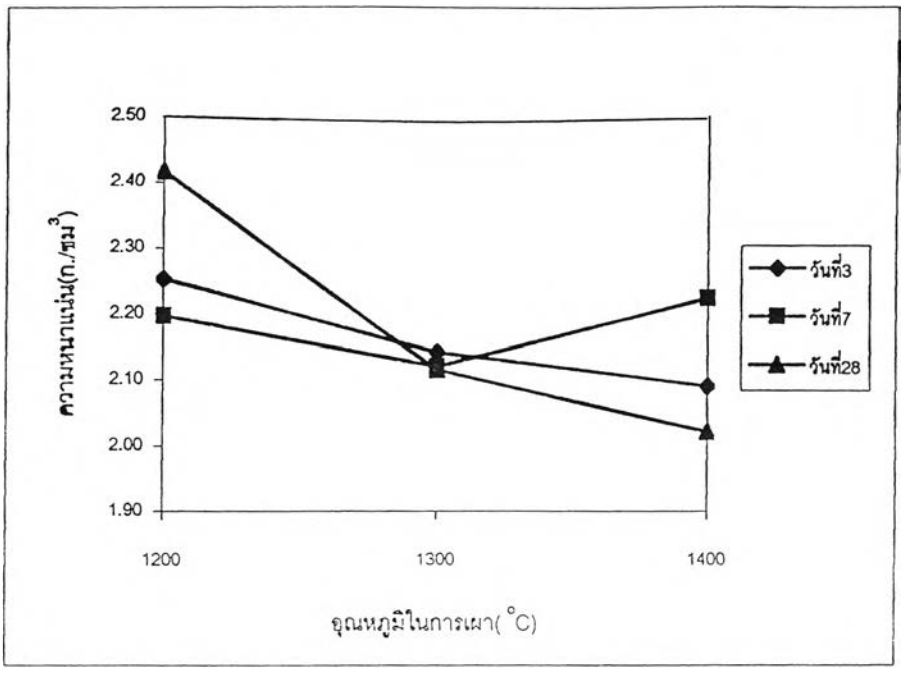
w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.60

ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 2.16 ก./ลบ.ซม. และ 2.11 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับซึ่งไม่สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัด ณ จุดนี้ที่มีค่าสูงสุด ค่าความหนาแน่นที่มากที่สุดจะปรากฏที่อุณหภูมิ 1200 °C ซึ่งมีค่า 2.34 ก./ลบ.ซม.สำหรับ HAC ที่อายุ 3 วัน และมีค่า 2.42 ก./ลบ.ซม. สำหรับ HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัด ณ จุดนี้ไม่ได้มีค่ามากสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ปูนซีเมนต์ไม่ทำให้เกิดการยึดเกาะประสานกันของเนื้อมอร์ต้าได้ดีเท่าที่ควรถึงแม้มีความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างสูงก็ตาม จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดต่ำลงไป ที่อุณหภูมิ 1300 °C ค่าความหนาแน่นของ HAC ณ อายุ 3 วัน และ HAC ผสม GGBS ณ อายุ 28 วัน มีค่า



รูปที่ 36 ความหนาแน่นของ HAC ณ อุณหภูมิในการเผา 1200-1400 °C



รูปที่ 37 ความหนาแน่นของ HAC+GGBS ณ อุณหภูมิในการเผา 1200-1400 °C

ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 1200 °C เท่ากับ 8% และ 15% ตามลำดับซึ่งมีค่าไม่สูงมากนักทำให้การยึดเกาะประสานกันของมอร์ต้าอันเนื่องมาจากซีเมนต์เฟสเป็นปัจจัยสำคัญต่อค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าค่าความหนาแน่น ค่ากำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 1300 °C จึงสูงกว่าที่อุณหภูมิ 1200 °C

5.1.5 ศึกษาผลของเวลาในการเผาที่สัดส่วนและอุณหภูมิเผาคงที่

การทดลองนี้ได้ทำการหาเวลาเผาที่เหมาะสมในการผลิต HAC โดยแปรค่าเวลาเผาเท่ากับ 1.5, 2.5, 3.5 และ 4.5 ชั่วโมง ใช้สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาและอุณหภูมิเผาคงที่ หลังจากนั้นนำ HAC ที่ผลิตได้ไปผสมกับ GGBS ในอัตราส่วน HAC ต่อ GGBS เท่ากับ 1:1 ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

5.1.5.1 ระยะเวลาก่อตัว

ตารางที่ 33 และรูปที่ 38 , 39 แสดงค่าระยะเวลาก่อตัวของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 อุณหภูมิเผา 1300 °C โดยที่เพิ่มเวลาการเผาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการเผาจาก 1.5 ชั่วโมงไปเป็น 2.5 ชั่วโมง ต่อจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเวลาการเผาจาก 2.5 ชั่วโมงไปถึง 4.5 ชั่วโมง ระยะเวลาก่อตัวอยู่ในช่วง 0.33-1.18 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นเวลาที่เพียงพอต่อการผสมและเทมอร์ต้าลงแบบเสร็จเป็นผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของแต่ละเวลาที่มีค่าแตกต่างกันน่าจะมีผล

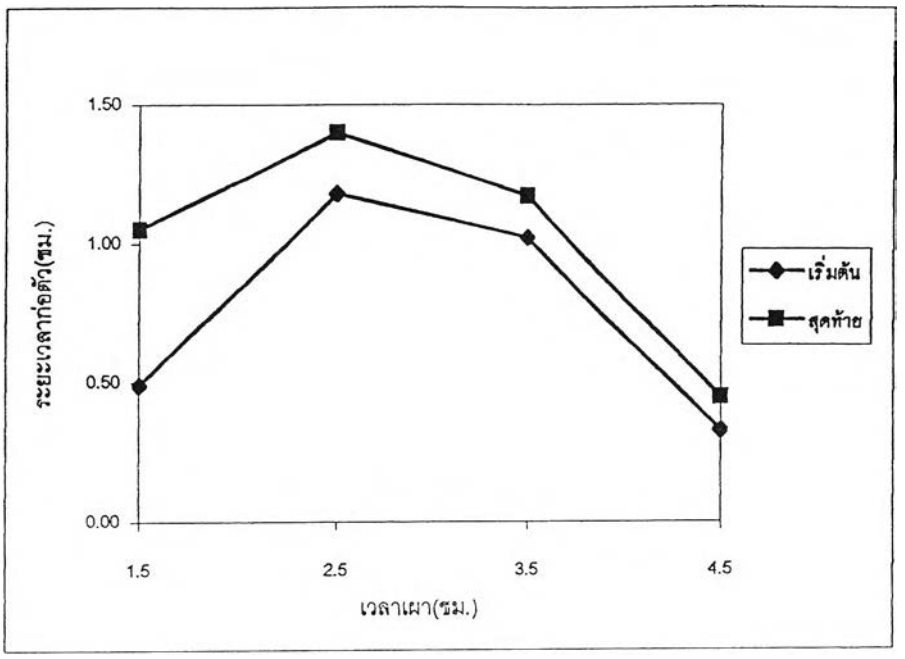
มาจากส่วนประกอบของเฟสที่แตกต่างกัน จากเฟสไดอะแกรมจะพบว่าเฟสที่เกิดขึ้นที่เปอร์เซ็นต์ Al_2O_3 เท่ากับ 58.62 % ที่อุณหภูมิ 1300 °C คือ CA และ $C_{12}A_7$ ในสัดส่วนที่พอๆกันแต่การที่จะเกิดเฟสเหล่านี้ได้สมบูรณ์จะต้องใช้เวลาในการเผาให้เพียงพอวัตถุดิบจึงจะสุกได้ ดังนั้นที่เวลาเผาเพียง 1.5 ชั่วโมงวัตถุดิบยังไม่สุกดีนักจึงเกิดเฟส $C_{12}A_7$ เป็นส่วนมากทำให้ระยะเวลาก่อตัวน้อยสุด เมื่อเพิ่มระยะเวลาเผามาเป็น 2.5 ชั่วโมง เฟส CA จึงเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาก่อตัวนานขึ้นแต่เมื่อเพิ่มเวลาการเผาเป็น 3.5 หรือ 4.5 ชั่วโมง จะเห็นว่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มลดลงอีกครั้งซึ่งอาจจะมาจาก Na_2O และ SO_3 ที่มีในวัตถุดิบเริ่มทำปฏิกิริยาเกิดเป็นเฟสที่ต่างออกไปจากในไดอะแกรมจึงทำให้แนวโน้มของระยะเวลาก่อตัวเปลี่ยนไป ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC ผสม GGBS มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเวลาการเผาจาก 1.5 ชั่วโมง ไปถึง 4.5 ชั่วโมง ซึ่งในช่วงเวลา 1.5 ชั่วโมง ถึง 2.5 ชั่วโมงค่าระยะเวลาก่อตัวจะตรงข้ามกับของ HAC ที่มีค่าเพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุมาจาก GGBS ที่ผสมจะไปหน่วงการทำปฏิกิริยาของ $C_{12}A_7$ ทำให้การแข็งตัวช้าลงค่าระยะเวลาก่อตัวจึงเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นกับระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของ HAC และ HAC ผสม GGBS อยู่ในช่วง 12-22 นาที และ 12-25 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 33 ระยะเวลาก่อตัวของHACและHAC+GGBS ที่อุณหภูมิเผา 1300°C สัดส่วน L/S = 40/60

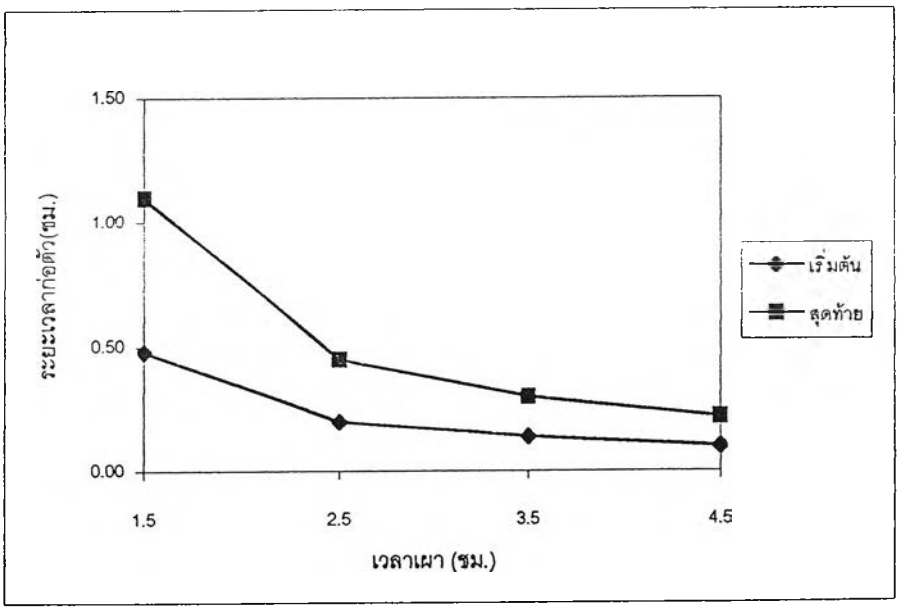
เวลาเผา	HAC		HAC+GGBS	
(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)
1.5	0.49	1.05	0.48	1.10
2.5	1.18	1.40	0.20	0.45
3.5	1.02	1.17	0.14	0.30
4.5	0.33	0.45	0.10	0.22

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.40



รูปที่ 38 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC ณ อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60



รูปที่ 39 ระยะเวลาก่อตัวของ HAC+GGBS ณ อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60

5.1.5.2 กำลังรับแรงอัด

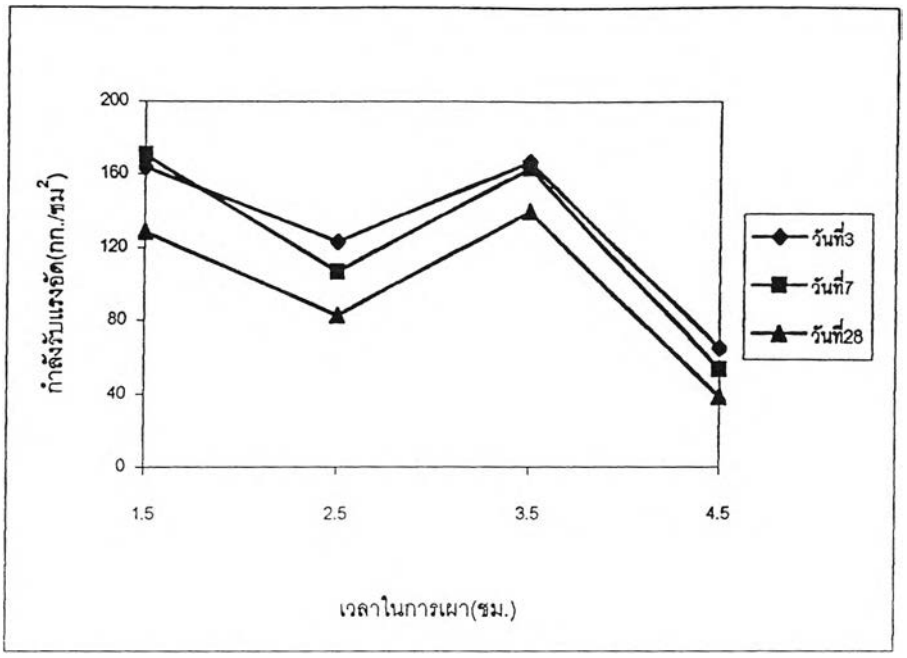
ตารางที่ 34 และรูปที่ 40 , 41 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่อัตราส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 อุณหภูมิเผา 1300 °C โดยที่เพิ่มเวลาการเผาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC มีค่ามากที่สุดที่เวลาเผา 3.5 ชั่วโมง ซึ่งมีค่า 167 กก./ตร.ซม.ที่อายุ 3 วัน สำหรับ HAC ผสม GGBS พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่ามากที่สุดที่เวลาเผา 3.5 ชั่วโมง ซึ่งมีค่า 206.67 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC กับมาตรฐาน ACI 225R-85 ซึ่งมีค่า 422 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 1 วัน พบว่ามีค่าต่ำกว่าถึง 255 กก./ตร.ซม. ที่เวลาในการเผา 1.5 ชั่วโมง กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ อายุ 3 วัน มีค่าสูงกว่าที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมง เท่ากับ 25% ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของ HAC ผสม GGBS ณ อายุ 28 วัน มีค่าต่ำกว่าเท่ากับ 12% แสดงว่าที่เวลาเผา 1.5 ชั่วโมง เฟสที่พบมากน่าจะเป็น $C_{12}A_7$ ซึ่งเป็นเฟสที่ทำปฏิกิริยากับน้ำเร็วมากและมีเฟส CA บ้างจึงทำให้กำลังรับแรงในช่วงแรกสูงกว่า แต่เมื่อผสม HAC กับ GGBS เฟสที่จะทำปฏิกิริยากับ GGBS แล้วให้กำลังที่สูงขึ้นคือ CA ซึ่งมีน้อยเมื่อเทียบกับ $C_{12}A_7$ ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดพัฒนาน้อยกว่าที่เวลาเผา 2.5 ชั่วโมงในช่วงหลัง ที่เวลาเผาเป็น 2.5 ชั่วโมง เฟสที่น่าจะพบมากขึ้นคือ CA และมีเฟส $C_{12}A_7$ ลดลง จึงทำให้กำลังรับแรงในช่วงแรกต่ำกว่าที่เวลา 1.5 ชั่วโมง แต่ก็ยังสูงอยู่ และเมื่อผสม HAC กับ GGBS เฟส CA ที่มีมากกว่า $C_{12}A_7$ จะทำปฏิกิริยากับ GGBS ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดพัฒนามากกว่าที่เวลา 1.5 ชั่วโมง ค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นจากวันที่ 3 ถึง วันที่ 28 ของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่เวลา 1.5 และ 2.5 ชั่วโมง เท่ากับ 53% และ 122% ตามลำดับจะเห็นว่าสอดคล้องกับที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเผามากขึ้นเป็น 3.5 ชั่วโมง พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดกลับมาสูงขึ้นอีก

ตารางที่ 34 ค่ากำลังรับแรงอัด ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60

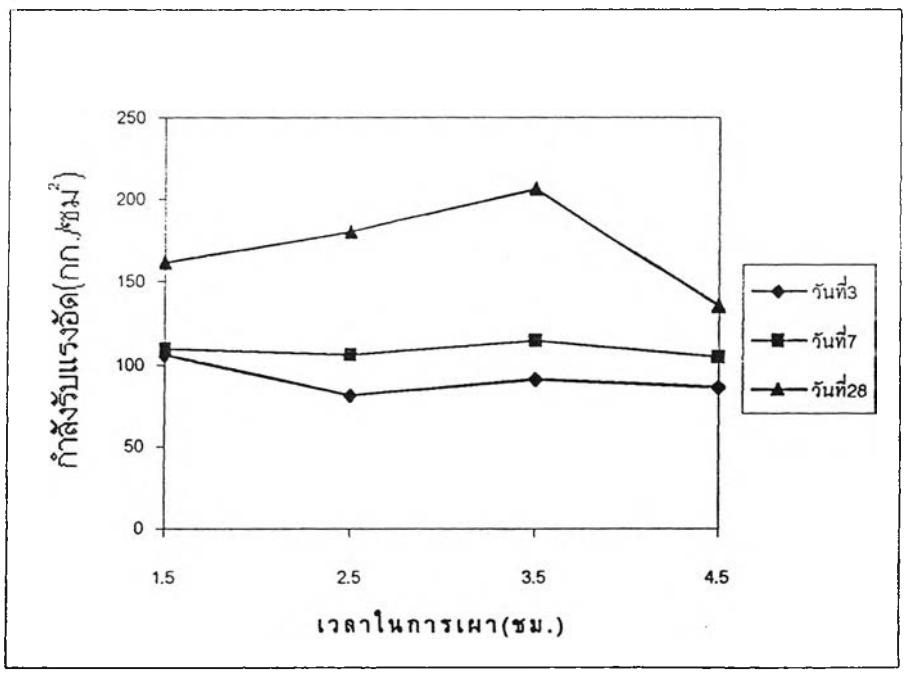
เวลา	กำลังรับแรงอัดของ HAC			กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS		
(ชม.)	(กก./ตร.ซม.)			(กก./ตร.ซม.)		
	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
1.5	164.00	170.67	128.67	105.33	109.33	161.33
2.5	123.33	106.67	82.67	81.33	106.00	180.67
3.5	166.67	163.33	139.33	91.33	114.67	206.67
4.5	65.33	54.00	38.67	85.33	104.67	136.00

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.40



รูปที่ 40 กำลังรับแรงอัดของ HAC ณ เวลาในการเผา 1.5-4.5 ชม.



รูปที่ 41 กำลังรับแรงอัดของ HAC+GGBS ณ เวลาในการเผา 1.5-4.5 ชม.

ให้เฟสที่น่าจะพบมากที่สุดคือ CA และเริ่มพบเฟสอื่นที่ไม่ใช่ $C_{12}A_7$ บ้าง (เป็นเฟสที่น่าจะเกิดจากการทำปฏิกิริยากับ Na_2O และ SO_3) ซึ่งเป็นเฟสที่ทำให้ HAC แข็งตัวเร็วจึงทำให้มีกำลังรับแรงอัด ณ วันที่ 3 สูงสุดและเมื่อผสม HAC กับ GGBS เฟส CA จะทำปฏิกิริยากับ GGBS ทำให้มีการพัฒนากำลังจากวันที่ 3 ถึงวันที่ 28 มีค่าเท่ากับ 126% ส่วนที่เวลาการเผา 4.5 ชั่วโมง ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ที่อายุ 3 วัน และ HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน ต่ำสุดเท่ากับ 65 กก./ตร.ซม. และ 136 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ เฟสที่น่าจะพบคือ เฟสอื่นที่ไม่ใช่ CA และ $C_{12}A_7$ มากขึ้น (เป็นเฟสที่น่าจะเกิดจากการทำปฏิกิริยากับ Na_2O และ SO_3) จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของ HAC ต่ำกว่าที่เวลาเผา 3.5 ชั่วโมงและมีการพัฒนากำลังของ HAC ผสม GGBS ในภายหลังน้อย ซึ่งเท่ากับ 60% จากความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้น ณ ระยะเวลาการเผาต่างๆ โดยที่อุณหภูมิการเผาคงที่ แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเผาที่ต่างกันเพียง 1 ชั่วโมง สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสที่แตกต่างกันไปมากได้

จากผลการทดลองของระยะเวลาก่อตัวและกำลังรับแรงอัดประกอบกับเฟสไดอะแกรมแคลเซียม-อลูมินา สามารถสรุปเฟสที่พบใน HAC ที่เวลาเผาต่างๆได้ดังนี้

เวลาเผา	เฟสที่พบ (เรียงจากมากไปน้อย)
1.5 ชั่วโมง	$C_{12}A_7$ CA
2.5 ชั่วโมง	CA $C_{12}A_7$
3.5 ชั่วโมง	CA $C_{12}A_7$ เฟสอื่นๆ ที่มี Na_2O กับ SO_3
4.5 ชั่วโมง	เฟสอื่นๆ ที่มี Na_2O กับ SO_3

5.1.5.3 ความหนาแน่น

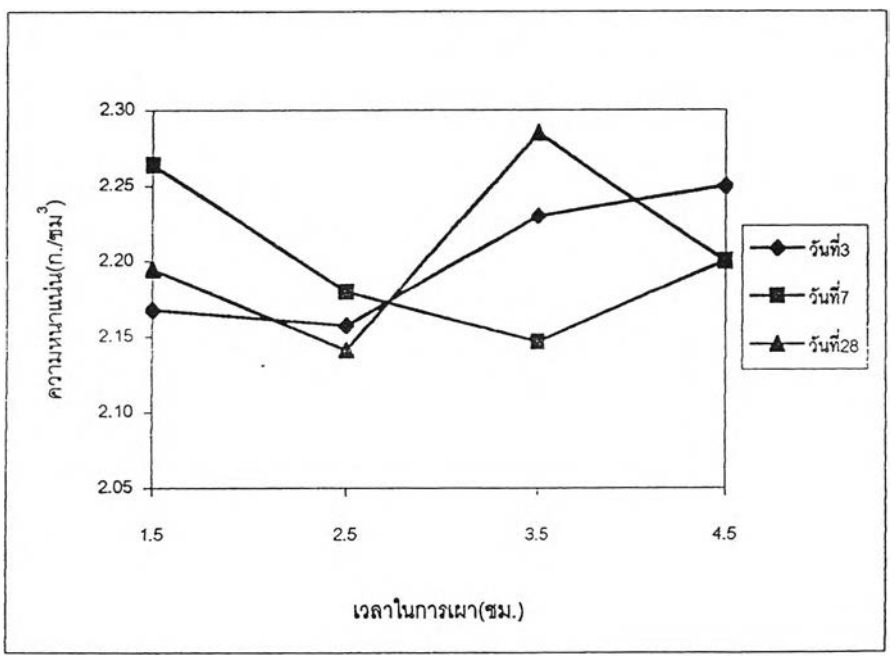
ตารางที่ 35 และรูปที่ 42, 43 แสดงค่าความหนาแน่นของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 อุณหภูมิเผา 1300 °C โดยที่เพิ่มเวลาการเผาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าที่เวลาการเผา 3.5 ชั่วโมงความหนาแน่นของ HAC ที่อายุ 3 วัน เท่ากับ 2.23 ก/ลบ.ซม. ซึ่งมีค่าเกือบมากที่สุด (น้อยกว่าค่ามากที่สุดเพียง 0.02 ก./ลบ.ซม.) สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัด ณ จุดนี้ที่มีค่ามากที่สุด และที่เวลาการเผาเดียวกันนี้ค่าความหนาแน่นของ HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.22 ก./ลบ.ซม. ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัด ณ จุดนี้ที่มีค่ามากสุดด้วยเช่นกัน ที่เวลาเผา 4.5 ชั่วโมง ค่าความหนาแน่นของ HAC ที่อายุ 3 วัน และ HAC ผสม GGBS ที่อายุ 28 วัน มีค่า 2.25 ก./ลบ.ซม. และ 2.18 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับ ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่าต่ำสุด ณ จุดนี้ อาจเนื่องมาจากการที่ปูนซีเมนต์ไม่ทำให้เกิดการยึดเกาะประสานกันของเนื้อมอร์ต้าได้ดีเท่าที่ควร ถึงแม้จะมีความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างสูงก็ตาม ทำให้กำลังรับแรงอัดลดต่ำลงไปด้วย

ตารางที่ 35 ค่าความหนาแน่น ที่อุณหภูมิเผา 1300 °C สัดส่วน L/S = 40/60

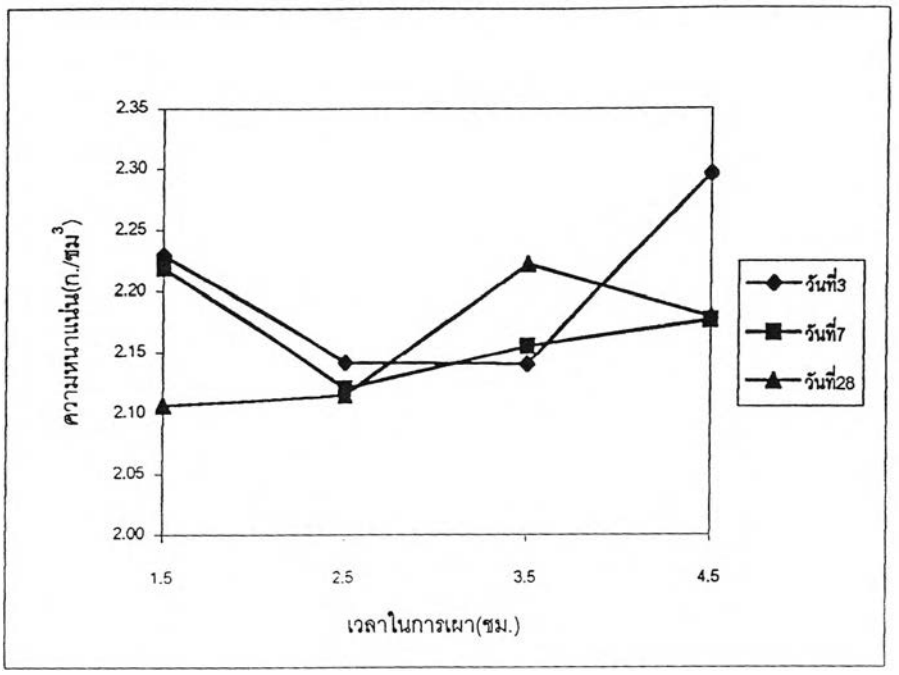
เวลา	ความหนาแน่นของ HAC			ความหนาแน่นของ HAC+GGBS		
(ชม.)	(ก./ลบ.ซม.)			(ก./ลบ.ซม.)		
	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28	วันที่ 3	วันที่ 7	วันที่ 28
1.5	2.17	2.26	2.19	2.23	2.22	2.11
2.5	2.16	2.18	2.14	2.14	2.12	2.11
3.5	2.23	2.15	2.29	2.14	2.15	2.22
4.5	2.25	2.20	2.20	2.30	2.18	2.18

w/c ของ HAC = 0.65

w/c ของ HAC+GGBS = 0.60



รูปที่ 42 ความหนาแน่นของ HAC ณ เวลาในการเผา 1.5-4.5 ชั่วโมง



รูปที่ 43 ความหนาแน่นของ HAC+GGBS ณ เวลาในการเผา 1.5-4.5 ชั่วโมง

5.1.6 สรุปสัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินา อุณหภูมิและเวลาเผาที่เหมาะสมในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS

จากการศึกษาหาความเหมาะสมในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS โดยพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างเป็นอันดับแรกและค่าระยะเวลาก่อตัวเป็นลำดับรองพบว่าที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 อุณหภูมิการเผา 1300 °C และเวลาการเผา 3.5 ชั่วโมง มีความเหมาะสมที่สุด ตารางที่ 36 แสดงคุณสมบัติต่างๆของ HAC และ HAC ผสม GGBS ที่ความเหมาะสมนี้ จากตารางพบว่ากำลังรับแรงอัดของ HAC และ HAC ผสม GGBS เท่ากับ 167 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 3 วัน และ 206 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ที่อายุ 3 วัน กับมาตรฐาน ACI 225R-85 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 422 กก./ตร.ซม. พบว่าไม่ผ่านมาตรฐานและมีค่าน้อยกว่าถึง 255 กก./ตร.ซม. เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C109-95 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับ 85 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 3 วัน และ 245 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 วัน ที่อายุ 3 วัน HAC มีค่ามากกว่าถึง 82 กก./ตร.ซม. แต่ที่อายุ 28 วัน น้อยกว่าถึง 106 กก./ตร.ซม. ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการคอนเวอร์ชัน แต่เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของ HAC ผสมGGBS กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่าที่อายุ 3 วัน HAC ผสม GGBS มีค่ามากกว่า 6 กก./ตร.ซม. ส่วนที่อายุ 28 วัน จะมีค่าน้อยกว่าเพียง 39 กก./ตร.ซม. และเมื่ออายุของ HAC ผสม GGBS เป็น 60 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดจะมีค่าเป็น 260 กก./ตร.ซม. ดังนั้นการผลิตปูน HAC ผสม

GGBS ที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาเท่ากับ 40/60 อุณหภูมิการเผา 1300 °C และเวลาการเผา 3.5 ชั่วโมงจึงมีความเหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานASTM C 109-95 ส่วนระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นของ HAC และ HAC ผสม GGBS ซึ่งได้ทำการทดลองใหม่อีกครั้งตามมาตรฐาน ASTM C 191-92 จากตารางที่ 36 มีค่าเท่ากับ 45 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ACI 225R-85 ซึ่งมีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 3-9 ชั่วโมง พบว่าไม่ผ่านมาตรฐานซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณเหล็กออกไซด์และไทเทเนียมออกไซด์ในวัตถุดิบที่ใช้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมาตรฐานของอังกฤษในตารางที่ 2 ซึ่งมีค่า 9-12 % และ 1.5-2.5 % ตามลำดับซึ่งออกไซด์ทั้งสองตัวนี้จะมีผลต่อระยะเวลาแข็งตัวของ HAC ทำให้แข็งตัวช้าลง ดังนั้น HAC ที่ผลิตได้จากการวิจัยนี้จึงมีค่าระยะเวลาก่อตัวเร็วกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน ASTM C 191-92 ซึ่งมีค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง พบว่า HAC มีค่าไม่ผ่านมาตรฐานแต่ HAC ผสม GGBS มีค่าผ่านมาตรฐานพอดี ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของ HAC และ HAC ผสม GGBS มีค่า

ตารางที่ 36 สรุปคุณสมบัติต่าง ๆของ HAC และ HAC ผสม GGBS ณ สภาพที่เหมาะสมที่สุด

คุณสมบัติ	HAC	HAC+GGBS
กำลังรับแรงอัด(กก./ตร.ซม.)		
อายุ 3 วัน	167	91
อายุ 7 วัน	163	115
อายุ 28 วัน	139	207
อายุ 60 วัน	120	260
ความหนาแน่น(ก./ลบ.ซม.)		
อายุ 3 วัน	2.23	2.14
อายุ 7 วัน	2.15	2.15
อายุ 28 วัน	2.29	2.22
อายุ 60 วัน	2.25	2.20
ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น(ชม.)	0.45	1.00
ระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย(ชม.)	1.06	1.31
ความถ่วงจำเพาะ	2.93	2.92
ความละเอียด(ตร.ซม./ก.)	5320	6463

เท่ากับ 1.06 ชั่วโมง และ 1.31 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีค่าไม่เกิน 10 ชั่วโมงพบว่ามีค่าผ่านมาตรฐาน

5.1.7 องค์ประกอบที่พบใน HAC และ HAC ผสม GGBS

การทดลองนี้ได้ทำการตรวจสอบเฟสที่เกิดขึ้นของ HAC และ HAC ผสม GGBS ซึ่งทำการผลิตที่สัดส่วนปูนขาวต่อซิลิกา-อลูมินาอุณหภูมิและเวลาเผาที่เหมาะสมทั้งก่อนและหลังทำปฏิกิริยากับน้ำโดยวิธี XRD ซึ่งผลการทดสอบแสดงอยู่ในภาคผนวก ข ตารางที่ 37 แสดงเฟสที่พบใน HAC และ HAC ผสม GGBS ผลการทดลองพบว่า เฟสที่พบใน Non Hydrate HAC คือ CA, CA_2 , C_2AS และ $C_{12}A_7$ จากรูปของ XRD Pattern ในรูปที่ ผ1 จะเห็นว่าเฟส CA มีมากที่สุด และการที่พบเฟส $C_{12}A_7$ ซึ่งทำให้ปูนแข็งตัวเร็วมากซึ่งสอดคล้องกับค่าระยะเวลาก่อตัวที่มีค่าน้อย

ส่วน Hydrate HAC ที่เวลา 3 วัน จะพบเฟส C_2AS , C_2ASH_8 , C_2AH_8 และ AH_3 จะเห็นว่ายังไม่เกิดการคอนเวอร์ชันจากเฟส CAH_{10} ไปเป็นเฟส C_3AH_6 ส่วนเฟส C_2AH_8 คือเฟสที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของเฟส CA, $C_{12}A_7$ และ CA_2 โดยปฏิกิริยานี้ทำให้เกิด AH_3 ขึ้นพร้อมกันซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นกว่า 3 วัน เฟส C_2AS นี้จะเกิดการคอนเวอร์ชันไปเป็นเฟส C_3AH_6 นอกจากนี้ยังมีบางส่วนของเฟส C_2AS เริ่มทำปฏิกิริยากับน้ำได้เป็นฟส C_2ASH_8

เฟสที่พบใน Non Hydrate HAC ผสม GGBS คือ CA, CA_2, C_2AS, $C_{12}A_7$และสารอสัณฐาน (Amorphous) ของซิลิกาทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จาก Base Line ของ XRD Pattern ในรูปที่ ผ3 ในช่วงมุม 20-40 °C มีลักษณะเป็นรูปเนินเขาซึ่งเป็นรูปแบบของอสัณฐาน สารอสัณฐานนี้มาจากส่วนประกอบของ GGBS นั่นเอง

ส่วนเฟสที่พบใน Hydrate HAC ผสม GGBS ที่เวลาต่างๆจะเหมือนกันหมดคือพบ C_2AS , C_2ASH_8 และ Amorphous จะเห็นว่ายังไม่พบการคอนเวอร์ชันจากเฟส CAH_{10} เป็นเฟส C_3AH_6 ซึ่งอาจเนื่องจากการมีปริมาณ Na_2O ในวัตถุดิบสูงถึง 3.126% ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส C_2AH_8 ไปเป็น C_2ASH_8 ได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนเฟสไปเป็น C_3AH_6 ก่อน จากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Jain Ding , Yan FU และ Beaudoin J.J. ได้แสดงผลกระทบของการมีโซเดียมไอออนใน HAC มีผลทำให้การคอนเวอร์ชันหมดไปโดยโซเดียมไอออนจะไปเร่งปฏิกิริยาของ Silicate Anion กับ C_2AH_8 ทำให้เกิดเฟส C_2ASH_8 ขึ้นเร็วขึ้นมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดไม่ลดลงเมื่อเวลามากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ ปริมาณเฟส C_2ASH_8 ที่พบจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเวลานานขึ้นส่วนปริมาณ Amorphous จะมีค่าลดลงเมื่อเวลานานขึ้นซึ่งแสดงว่าเกิดการเปลี่ยนรูปไปเป็น C_2ASH_8 โดยใช้ซิลิกาซึ่งเป็น Amorphous จาก GGBS ในการทำปฏิกิริยา

ตารางที่ 37 แสดงเฟสที่พบใน HAC และ HAC ผสม GGBS ณ อายุการบ่มต่างๆ

Material	Age	Phase								
		CA	CA_2	C_2AS	$C_{12}A_7$	Amor phous	CAH_{10}	C_2AH_8	C_2ASH_8	AH_3
Non Hydrate HAC	-	/	/	/	/	-	-	-	-	-
Hydrate HAC	3 d	-	-	/	-	-	-	/	/	/
Non Hydrate HAC+GGBS	-	/	/	/	/	/	-	-	-	-
Hydrate HAC+GGBS	3 d	-	-	/	-	/	-	-	/	/
	10 d	-	-	/	-	/	-	-	/	/
	30 d	-	-	/	-	/	-	-	/	/

/ detected - no detected

5.2 การศึกษาการนำปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ไปใช้ในการทำเสถียรตะกอนโลหะหนักให้เป็นก้อน

5.2.1 ส่วนประกอบของตะกอนนิกเกิล

ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่มีนิกเกิลด้วยการย่อยด้วยกรดซัลฟูริกและวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แบบเปลวเพลิงได้ปริมาณโลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ได้แก่นิกเกิลส่วนโลหะหนักชนิดอื่นไม่พบ

ตารางที่ 38 ปริมาณโลหะหนักในตะกอนที่มีนิกเกิล

โลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนัก(มก./ล.)
นิกเกิล (Ni)	7575
โครเมียม(Cr)	-
ตะกั่ว (Pb)	-

5.2.2 ผลการทดสอบการชะละลายของตะกอนที่มีนิกเกิล

การทดสอบการชะละลายตะกอนที่มีนิกเกิลตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำสกัดดังแสดงในตารางที่ 39 พบว่าน้ำชะมีปริมาณนิกเกิลเท่ากับ 820 มก./ล. ส่วนโครเมียมและตะกั่วไม่พบ

ตารางที่ 39 ผลการทดสอบการชะละลายของตะกอนนิกเกิล

คุณสมบัติที่ทดสอบ	ค่าที่วัดได้
พีเอชของน้ำชะ	11
ความนำไฟฟ้าของ blank(ไมโครซีเมนต์/ซม.)	8.3
ความนำไฟฟ้าของน้ำชะ(มิลลิซีเมนต์/ซม.)	1.33
ปริมาณ นิกเกิลของblank (มก./ล.)	0.25
ปริมาณ นิกเกิลของน้ำชะ(มก./ล.)	820

5.2.1 ผลการศึกษาการนำ HAC และ HAC ผสม GGBS มาใช้ในการทำเสถียรตะกอนนิกเกิลให้เป็นก้อน

การทดลองนี้ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อตะกอนเท่ากับ 1:1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.65 สำหรับ HAC และ 0.60 สำหรับ HAC ผสม GGBS และเผื่อค่าอัตราส่วนน้ำต่อตะกอนนิกเกิลแห้งอีกเท่ากับ 0.40 เนื่องจากตะกอนแห้งจะดูดน้ำเข้าไปด้วย ใช้ระยะเวลาบ่ม 7 วัน หลังจากนั้นนำตะกอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อนแล้วไปทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพและทดสอบการชะละลาย ตารางที่ 40 แสดงคุณสมบัติของตะกอนนิกเกิลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ผลการทดลองพบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างตะกอนที่ผสม HAC และ HAC กับ GGBS มีค่าเท่ากับ 9.60 กก./ตร.ซม. และ 5.84 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2535 ซึ่งกำหนดไว้ที่ 3.5 กก./ตร.ซม. พบว่ามีค่าผ่านมาตรฐาน กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างตะกอนที่ผสม HAC มีค่ามากกว่าที่ผสม HAC กับ GGBS เท่ากับ 3.76 กก./ตร.ซม. ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของปูนทั้งสองชนิดนี้คือ HAC เป็นปูนที่ให้กำลังรับแรงอัดเร็วในระยะแรกแต่จะลดลงในภายหลังเนื่องจากการคอนเวอร์ชัน ส่วนปูน HAC ผสม GGBS จะให้กำลังต่ำในระยะแรกและจะค่อยๆพัฒนาขึ้นในช่วงหลัง ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างตะกอนที่ผสม HAC และ HAC กับ GGBS มีค่าเท่ากับ 1.36 ตัน/ลบ.ม. และ 1.28 ตัน/ลบ.ม. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดไว้ที่ 1.15 ตัน/ลบ.ม. พบว่ามีค่าผ่านมาตรฐาน ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างตะกอนที่ผสม HAC มีค่ามากกว่าที่ผสม HAC กับGGBS เท่ากับ 0.08 ตัน/ลบ.ม. ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่มีค่ามากกว่าด้วยเช่นกัน ปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดของตะกอนที่ผสม HAC และ HAC กับ GGBS มีค่าเท่ากับ 0.26 มก./ล. และ 0.33 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานกระทรวงซึ่งกำหนดไว้ที่ 5 มก./ล. พบว่ามีค่าผ่านมาตรฐาน ปริมาณนิกเกิลในน้ำสกัดของตะกอนที่ผสมHAC มีค่าน้อยกว่าที่ผสม HAC กับ GGBS เท่ากับ 0.07 มก./ล. ซึ่งเนื่องมาจาก HAC สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้เร็วกว่า HAC ผสม GGBS จึงสามารถยึดจับนิกเกิลไว้ได้ดีกว่าในช่วงอายุบ่ม 7 วัน ประสิทธิภาพในการลดการถูกชะละลายของนิกเกิลในการทำให้เป็นก้อนเท่ากับ 99.99 % สำหรับ HAC และ HAC ผสม GGBS

ตารางที่ 40 คุณสมบัติของตะกอนนิกเกิลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน

คุณสมบัติที่ทดสอบ	Ni ผสม HAC	Ni ผสม (HAC+GGBS)
กำลังรับแรงอัด(กก./ตร.ซม.)	9.60	5.84
ความหนาแน่น(ตัน/ลบ.ม.)	1.36	1.28
พีเอชของน้ำชะ	11.06	10.68
ความนำไฟฟ้าของน้ำชะ(มิลลิซีเมนต์/ซม.)	2.53	1.56
ปริมาณนิกเกิลของน้ำชะ(มก./ล.)	0.26	0.33

5.3 ผลการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

ตารางที่ 41 แสดงรายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS โดยใช้ซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วซึ่งจะคิดราคาจากค่าไฟฟ้าของเตาเผาและเครื่องผสม Ball Mill ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักในการผลิตรวมถึงค่าวัสดุร่วมที่ใช้ด้วยได้แก่ ปูนขาว และ GGBS

ตารางที่ 41 แสดงรายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS ต่อ 1 กิโลกรัม

วัสดุที่ใช้		HAC		HAC+GGBS	
ส่วนประกอบ	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนขาว	5	0.48	2.4	0.24	1.2
ซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว	-	0.72	-	0.36	-
GGBS	3	-	-	0.5	1.5
เชื้อเพลิงในการเผา * (บาท/ยูนิต)	2.55	55	140.25	27.5	70.125
รวมค่าใช้จ่าย	-	-	142.65	-	72.825

* กำลังไฟฟ้าของเตาเผา = 9 กิโลวัตต์ ใช้เวลาเผา 9 ชม. ต่อปูนที่ผลิตได้ 1.5 กก.
กำลังไฟฟ้าของ Ball Mill = 0.75 กิโลวัตต์ ใช้เวลา 12 ชม. ต่อปูนที่ผลิตได้ 8 กก.

จากตารางจะเห็นว่าค่าใช้จ่ายในการผลิต HAC และ HAC ผสม GGBS 1 กก. เท่ากับ 142.65 และ 72.825 บาท ตามลำดับ เมื่อเทียบกับราคาของปูนซีเมนต์ HAC ในท้องตลาดเดือนตุลาคม 2543 ราคากิโลกรัมละ 46 บาท จะเห็นว่าราคาปูนที่ผลิตได้แพงกว่ามากเป็นผลมาจากการคิดราคาไฟฟ้าจากเตาเผาที่ใช้กันในห้องแล็บซึ่งมีความจุน้อยกว่าเตาเผาที่ใช้งานจริงในโรงงานผลิตปูน