บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ โดยการเตรียมวัสดุดังกล่าวนำมาบดให้ละเอียดเพื่อลดขนาดอนุภาคและเพิ่มความสามารถในการทำปฏิกิริยาในกรณีที่เป็นวัสดุปอซโซลาน อีกวิธีหนึ่งคือการเผาเพื่อลดผลกระทบของสารประกอบแอนทราควิโนนซึ่งเป็นสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว วัสดุผสมต้องอบแห้งเพื่อควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสม โดยเฉพาะหินเกล็ดที่ใช้ต้องล้างให้สะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นที่เกาะติดผิวเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อสมบัติคอนกรีตบล็อกที่ผลิต องค์ประกอบทางเคมี สมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลานที่บ่งชี้ด้วยค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดเทียบกับซีเมนต์ปอร์ต-แลนด์ และค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุจะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานอธิบายกลไกปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นตลอดจนลักษณะของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้ สัดส่วนคละ และการดูดซึมน้ำของวัสดุเป็นปัจจัยที่จำเป็นต้องทดสอบเพื่อควบคุมการผลิต

ปัจจุบันการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นไม่มีการกำหนดสัดส่วนผสมที่คงที่แน่นอน จึงจำเป็นต้องศึกษาทดลองหาสัดส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อวัสดุผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา การบำบัดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการทำก้อนแข็ง (Solidification) โดยนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยศึกษาสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสม เพื่อให้บรรลุตามจุดประสงค์ในการบำบัดของเสียอุตสาหกรรมชนิดนี้ คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้ ต้องศึกษาประสิทธิภาพลดการชะละลายสารแอนทราควิโนนเพื่อยืนยันความปลอดภัยในการใช้งาน และสุดท้ายพิจารณาความคุ้มค่าโดยประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัด พร้อมทั้งประเมินราคาต้นทุนการผลิต

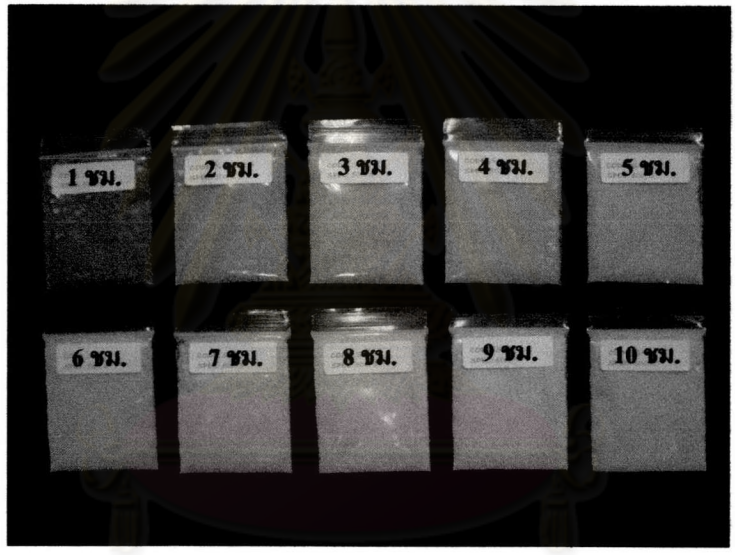
4.1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

สารแอนทราควิโนนเป็นสารอินทรีย์ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดคราบเขม่าหรือคาร์บอนเคลือบที่ผิวซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว คาร์บอนจะดูดน้ำจากส่วนผสมมอร์ตาหรือคอนกรีต ทำให้ปริมาณน้ำสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ส่งผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดทำให้ลดต่ำลง ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (L.O.I.*) เท่ากับ 31.67 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM 618-96 กำหนดอย่างมาก จากรูปที่ 4.1

---

* L.O.I หรือ Loss on ignition คือ การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ในวัสดุนั้นเอง

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วจะมีสีขาวขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาการเผาที่ยาวนานขึ้น สอดคล้องกับค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ที่มีปริมาณลดลงตามระยะเวลาที่นานขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 โดยค่าจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ตั้งแต่ระยะเวลาเผา 5 ชั่วโมงเป็นต้นไป การเผาเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมงทำให้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618-96 ของวัสดุปอซโซลานคุณภาพชั้น N* (10 เปอร์เซ็นต์) ขณะที่การเผาเพียง 1 หรือ 2 ชั่วโมง ทำให้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของวัสดุปอซโซลานคุณภาพชั้น F** และ C*** (6 เปอร์เซ็นต์) ส่วนปริมาณความชื้นในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 4.66 - 5.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเกิน 3 เปอร์เซ็นต์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-96



รูปที่ 4.1 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาต่างๆ

---

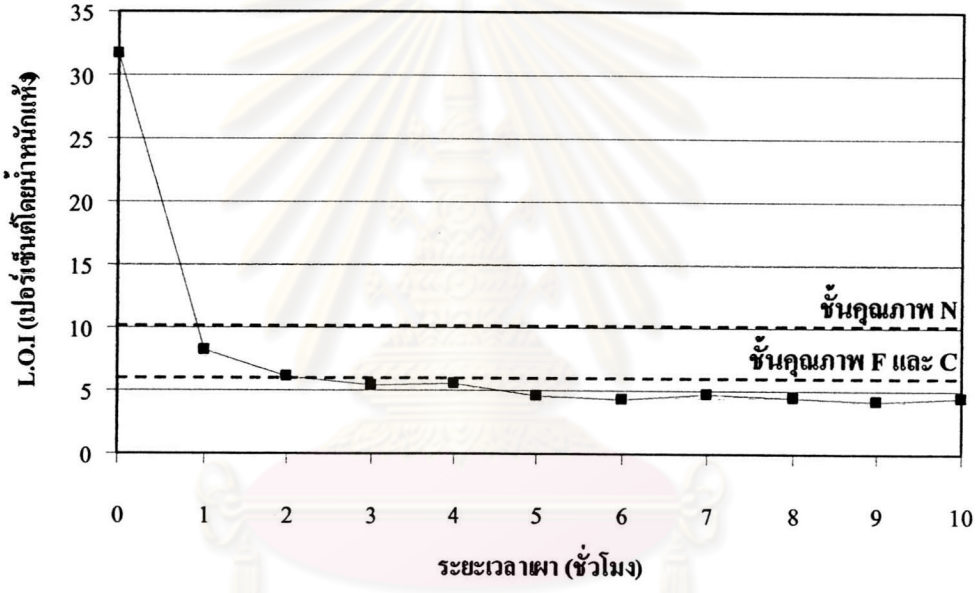
* ชั้นคุณภาพ N คือ วัตถุดิบหรือวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่มีสมบัติตรงตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C618-96 เช่น ดินไดอะตอมเมเชียส หินชนวน หินหรือเถ้าภูเขาไฟ เป็นต้น ซึ่งหินและดินอาจจำเป็นหรือไม่ก็ได้ในการแปรสภาพเพื่อเพิ่มสมบัติในการใช้งาน

** ชั้นคุณภาพ F คือ เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินแอนทราไซต์ หรือ บิทูมินัส ที่มีสมบัติตรงตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C618-96

*** ชั้นคุณภาพ C คือ เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ หรือ ซับบิทูมินัส ที่มีสมบัติตรงตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C618-96 โดยนอกจากสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolans) แล้ว อาจแสดงสมบัติการเป็นตัวเชื่อมประสาน (Cementitious) อีกด้วย

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นและการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเตรียมที่ระยะเวลาการเผาต่างๆ

ระยะเวลาการเผา (ชั่วโมง)	*0*	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	5.40	4.76	4.87	5.08	4.90	5.09	5.09	4.66	5.11	5.50	5.11
L.O.I (เปอร์เซ็นต์)	31.67	8.15	6.07	5.41	5.55	4.64	4.28	4.79	4.42	4.17	4.51



รูปที่ 4.2 การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (L.O.I) ของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเตรียมด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุเพื่อศึกษาผลกระทบของสารแอนทราควิโนนต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น คือ 5 ชั่วโมง เนื่องจากวัสดุมีแนวโน้มการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้เริ่มคงที่ตั้งแต่ระยะเวลาดังกล่าว

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทั้งที่ผ่านกระบวนการเผาและไม่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนจะถูกบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนหรืออนุภาคสามารถลอดผ่านช่องตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ในระหว่างกระบวนการคัดแยกขนาด การ

บดใช้เครื่อง Ball mill ด้วยลูกบอลอะลูมินาคละขนาด 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 1.5 และ 2 เซนติเมตร ในสัดส่วนโดยปริมาตร 1 ต่อ 2 ต่อ 1 ตามลำดับ เพื่อให้เกิดส่วนคละที่ดีและเหมาะสมทำให้ประสิทธิภาพในการบดเพิ่มขึ้น โดยเติมในสัดส่วน 1/3 โดยปริมาตรของกระป๋องและบดครั้งละ 24 ชั่วโมง ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วหลังจากผ่านการบดจะมีปริมาณวัสดุที่มีขนาดตามต้องการประมาณ 60 - 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพในการบดเพื่อให้ได้วัสดุขนาดตามต้องการขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สัดส่วนขนาดของลูกบอลต้องเหมาะสม ระยะเวลาที่ใช้บด รวมถึงวัสดุและขนาดของภาชนะที่ใช้สำหรับกระบวนการ อีกทั้งการผลิตเชิงอุตสาหกรรมยังมีความแตกต่างกับรูปแบบการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งกระบวนการและเทคโนโลยีการผลิต ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดค่าประสิทธิภาพการบดที่แน่นอนได้

ฝุ่นที่ติดอยู่ที่ผิวหินเกล็ดจะทำให้น้ำในส่วนผสมมีความข้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพ และเพิ่มการหดตัวของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตได้ บางครั้งอาจทำให้เกิดคราบที่ผิวหน้าของคอนกรีต ทำให้ผิวดูไม่สวยงาม ดังนั้นหินเกล็ดที่ใช้สำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจึงต้องล้างให้สะอาด การกำจัดน้ำในหินเกล็ดที่ล้างสะอาดแล้วและทรายจะใช้การอบที่อุณหภูมิในช่วง 103 - 105 องศาเซลเซียส เพื่อควบคุมการดูดซึมน้ำและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้คงที่

4.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

4.2.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตและสารเคมีที่ใช้บางชนิด ทำให้อาจส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีบางประการของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและเปรียบเทียบค่ากับผลวิเคราะห์ที่เคยศึกษาผ่านมาดังตารางที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยวิธี Theoretical formulas (Fundamental parameter calculation) ซึ่งแสดงผลในรูปของสารประกอบออกไซด์ด้วยเครื่องมือ X-ray fluorescence spectrometer แสดงให้เห็นว่า การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตไม่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ เนื่องจากค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วิเคราะห์ก่อนหน้านี้ ยกเว้นในงานวิจัยของเปรมฤดี กาญจนปิยะ (2544) ที่มีค่าองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วแตกต่างจากผลวิเคราะห์ในงานวิจัยอื่นๆ เล็กน้อย

สารประกอบ SiO_2 Al_2O_3และ Fe_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอก-ไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ดังนั้นมาตรฐานจึงได้กำหนดสัดส่วนของสารประกอบเหล่านี้ไว้อย่างชัดเจน จากตารางที่ 4.2 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานตรงตามข้อกำหนดวัสดุปอซโซลาน (ASTM C618-96) โดยมีผลรวมของสารประกอบ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ (85.29 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ปริมาณซัลเฟตน้อย

กว่า 5 เปอร์เซ็นต์ (2.68 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) และเมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีสัดส่วนปริมาณค่อนข้างต่ำ (0.21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ซึ่งสารประกอบดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อไปกับ SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ดังนั้นซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วจึงไม่มีสมบัติเป็นตัวเชื่อมประสานในตัวเอง (Self cementitious) เช่นเดียวกันกับเถ้าลอยลิกไนต์หรือเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

สารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)			
	โรงงานอุตสาหกรรม (อ้างถึงใน ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ, 2542)	เปรมฤดี กาญจนปิยะ (2544)	สุจิตรา กันยาวิลาศ (2545)	งานวิจัยนี้
Al_2O_3	55.0-63.0	88.67	67.27	67.94
CaO	-	0.71	0.46	0.21
Cl	-	trace	trace	0.04
Fe_2O_3	-	nd.	nd.	0.03
K_2O	-	trace	trace	0.01
MgO	-	nd.	nd.	nd.
Na_2O	-	5.21	12.92	11.78
SiO_2	12.0-16.0	4.12	16.12	17.32
SO_3	-	1.29	3.23	2.68

หมายเหตุ: nd. หมายถึงตรวจวิเคราะห์ไม่พบสารดังกล่าว (Not detected)

\- หมายถึงไม่มีข้อมูลการวิเคราะห์

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีปริมาณ Na_2O ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-96 ที่กำหนดให้มีไม่มากกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังนั้นการใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วอาจส่งผลเสียกรณีที่ใช้ร่วมกับวัสดุผสมบางประเภทที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอัลคาไล (AAR) ทำให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย

4.2.2 การทดสอบหาค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index) ของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

จากการทดสอบสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยการหาค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C311-96 และเปรียบเทียบกับเถ้าลอยลิกไนต์แม่-

เมาะซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลาย ณ ปัจจุบัน จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.3 พบว่า ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไม่ว่าจะเตรียมที่สถานะใดๆ ไม่แสดงสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่าไม่ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนควบคุม ในขณะที่เถ้าลอยลิกไนต์มีค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันเป็น 77.07 เปอร์เซ็นต์ และจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าสัดส่วนควบคุมเป็น 112.02 เปอร์เซ็นต์ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมไม่เผา ($SA_{ORG,\ UNT}$) และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ($SA_{ORG,\ TRT}$) มีค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เป็น 33.27 และ 47.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจะลดลงเล็กน้อยที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน โดยให้ค่าเป็น 30.25 และ 34.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วให้มีขนาดอนุภาคละเอียดจนสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 จะให้ค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกับ 2 สถานะแรก โดยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนทั้งไม่เผา ($SA_{100,\ UNT}$) และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ($SA_{100,\ TRT}$) มีค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เป็น 45.47 และ 40.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจะลดลงเล็กน้อยเช่นเดียวกันที่ระยะเวลาการบ่ม 60 วัน (37.15 และ 36.07 เปอร์เซ็นต์)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุประสานต่างๆ

	ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)		ค่ากำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)		ดัชนีกำลังรับแรงอัด (เปอร์เซ็นต์)	
	28 วัน	60 วัน	28 วัน	60 วัน	28 วัน	60 วัน
สัดส่วนควบคุม	1.94	2.03	20.32	21.29	-	-
$SA_{ORG,\ UNT}$	1.74	1.87	6.76	6.44	33.27	30.25
$SA_{ORG,\ TRT}$	2.05	1.90	9.62	7.40	47.34	34.76
$SA_{100,\ UNT}$	1.80	1.82	9.24	7.91	45.47	37.15
$SA_{100,\ TRT}$	1.90	1.93	8.22	7.68	40.45	36.07
เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ	1.93	2.02	15.66	23.85	77.07	112.02

4.2.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว และวัสดุผสม

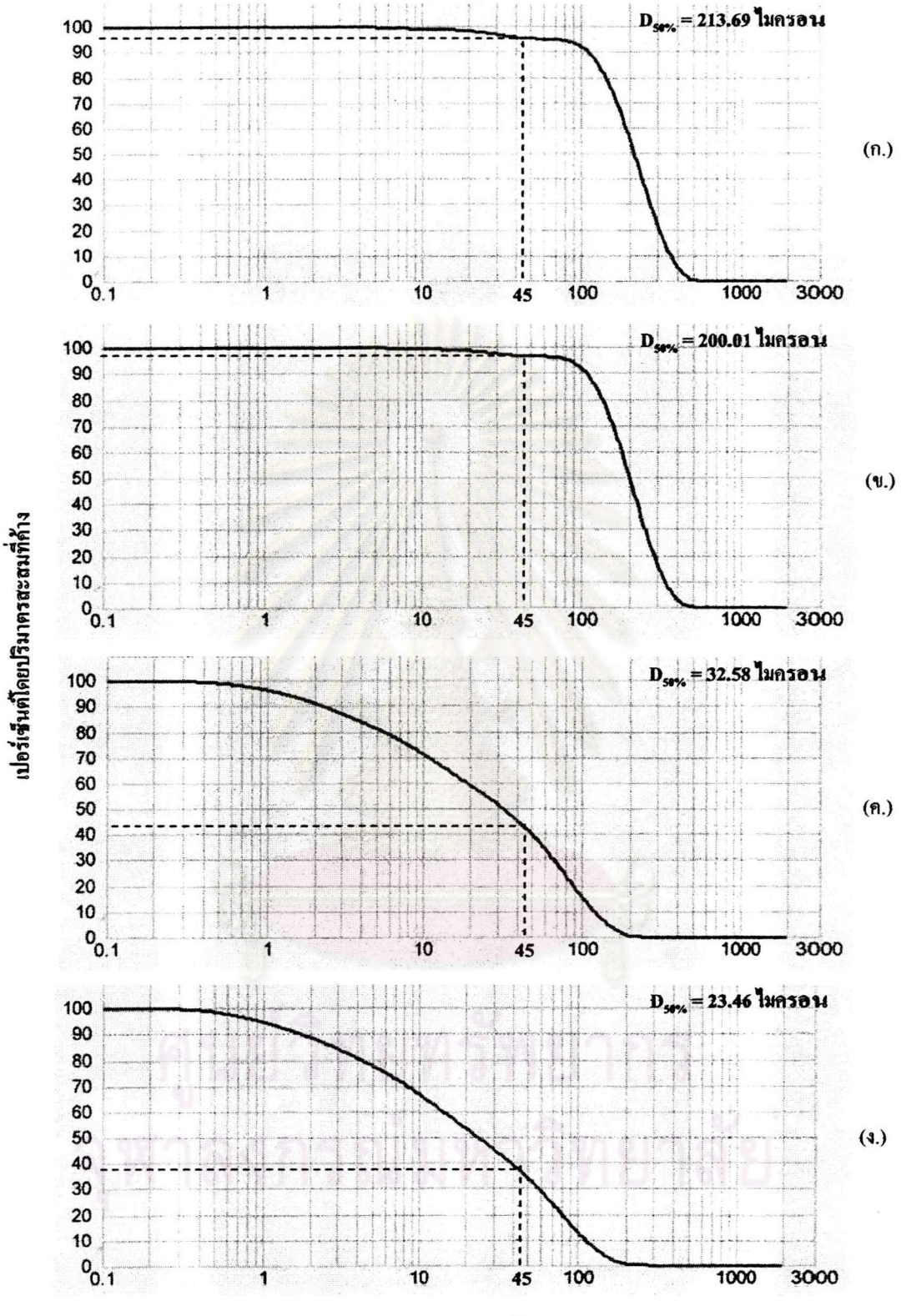
จากผลวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่สถานะดั้งเดิมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ 50 เท่ากับ 213.69 ไมครอน การเผาวัสดุจะทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์เดียวกันจะมีค่า 200.01 ไมครอนเนื่องจากสารปนเปื้อนที่เกาะเคลือบผิววัสดุมีจุดเดือดน้อยกว่าอุณหภูมิเผาจึงถูกระเหยออกไปในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน

ตารางที่ 4.4 ขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและเถ้าลอยลิกไนต์

	$D_{10\%}$	$D_{50\%}$	$D_{90\%}$
	(ไมครอน)		
$SA_{ORG, UNT}$	110.77	213.69	360.75
$SA_{ORG, TRT}$	108.53	200.01	334.10
$SA_{100, UNT}$	2.25	32.58	119.47
$SA_{100, TRT}$	1.73	23.46	112.22
เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ	5.33	60.29	307.77

เมื่อบดวัสดุให้มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพในการทำปฏิกิริยากรณีที่ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน วัสดุที่ผ่านการบดจะมีการกระจายขนาดอนุภาคมากกว่า โดยชนิดที่ไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ 50 เป็น 32.58 และ 23.46 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับวัสดุที่ไม่ผ่านการบด คือ สารปนเปื้อนที่ผิวของวัสดุทำให้วัสดุที่ไม่เผามีขนาดใหญ่กว่าวัสดุที่เผาเล็กน้อย รายงานผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วแสดงในภาคผนวก ค.1 - ค.4

มาตรฐาน ASTM C618-96 ซึ่งเป็นมาตรฐานกำหนดสมบัติทั่วไปของวัสดุปอซโซลาน ได้กำหนดความละเอียด (Fineness) ของวัสดุชนิดนี้ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์สูงสุดที่วัสดุสามารถค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (45 ไมครอน) เมื่อทำการคัดแยกด้วยวิธีแบบเปียก (Wet-sieved) โดยเปอร์เซ็นต์ค้างบนตะแกรงมาตรฐานต้องมีค่าไม่เกิน 34 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุทั้งหมดที่ทำการทดสอบ จากรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงเส้นโค้งการกระจายขนาดอนุภาคสะสมโดยปริมาตรของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ จะเห็นได้ว่า ไม่ว่าจะเป็นซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเตรียมที่สถานะใดก็ตามมีค่าความละเอียดไม่ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด อาจเป็นเพราะในงานวิจัยทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Particle size analyzer ซึ่งใช้กรรมวิธีวิเคราะห์แบบแห้ง ทำให้อนุภาคมีโอกาสจับตัวกัน (Agglomeration) ขนาดอนุภาคที่วัดได้จึงใหญ่กว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบเปียกที่กำหนดตามมาตรฐาน ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิม (ทั้งชนิดไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 45 ไมครอนมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ขณะที่เมื่อบดแล้วซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วจะมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 45 ไมครอนอยู่ประมาณ 43 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเมื่อเตรียมด้วยกระบวนการทั้งบดและเผาจะได้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วใกล้เคียงค่ามาตรฐานที่สุด คือ มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 45 ไมครอน อยู่ 39 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



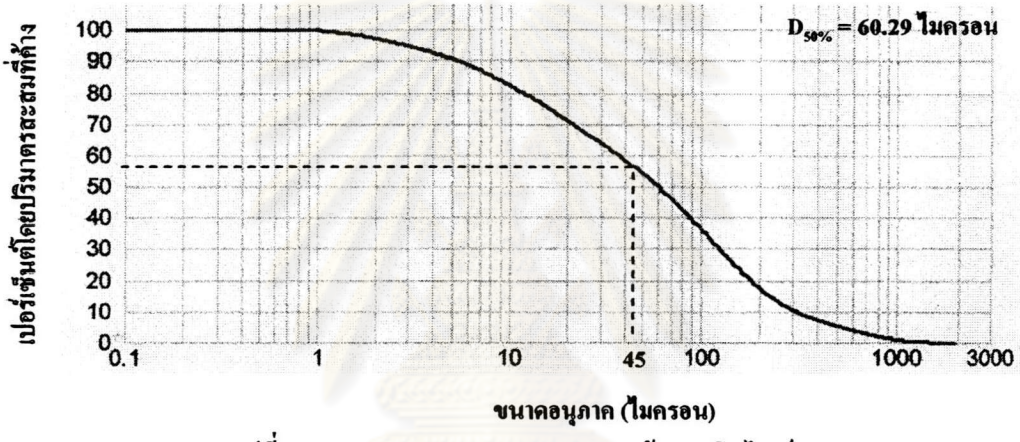
รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ

(ก.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วดั้งเดิม (ข.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน

(ค.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

(ง.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เนื่องจากวิธีวิเคราะห์การกระจายอนุภาคที่แตกต่างจากมาตรฐาน จึงได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมกับเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลาน ด้วยกรรมวิธีแบบแห้งเช่นเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว โดยแสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.4 เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะมีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 45 ไมครอนประมาณ 56 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน และค่าเปอร์เซ็นต์ของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ($SA_{100,\ UNT}$ และ $SA_{100,\ TRT}$) ในขณะที่ยังคงความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานอยู่ ดังนั้นขนาดที่ต่างจากค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อยไม่น่าจะส่งผลกระทบต่อสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลานของวัสดุมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ



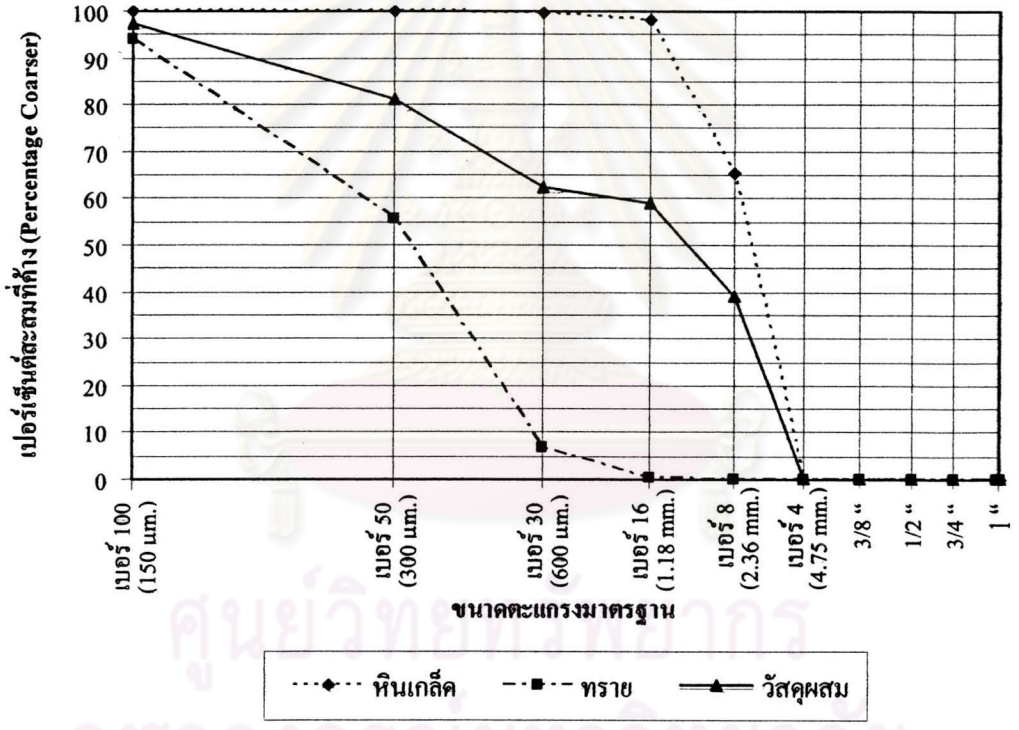
รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์

ส่วนคละ (Gradation) ของวัสดุผสมที่ดีมีผลให้ปริมาณซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ลดลง ความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดดีขึ้น และยังมีส่วนช่วยป้องกันการแยกตัว (Segregation) ของส่วนผสมได้อีกด้วย การวิเคราะห์ส่วนคละของวัสดุผสม แสดงผลด้วยกราฟแบบ Semi-log scale โดยแกนนอนเป็นขนาดตะแกรงมาตรฐาน และแกนตั้งเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสะสมของวัสดุผสมที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐาน (ดังรูปที่ 4.5) หินเกล็ดที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร (ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4) โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียด* (Fineness modulus) เท่ากับ 4.63 ขณะที่ทรายละเอียดที่ใช้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2.36 มิลลิเมตร (ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8) และมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.57 และเมื่อผสมทรายและหินเกล็ดในสัดส่วนทรายต่อหินเท่ากับ 0.67 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงแนะนำ (0.55 - 0.70) โดย ประณต กุลประสูตร (2541) วัสดุผสมที่ได้จะมีค่าโมดูลัสความละเอียดเป็น 3.39

---

* โมดูลัสความละเอียด คือ ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิภาคโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของวัสดุผสม

วินิต ช่อวิเชียร (2539) กล่าวว่า หินและทรายสำหรับผลิตคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดระหว่าง 5.5 - 7.5 และ 2.25 - 3.25 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของหิน และทรายที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าต่ำกว่าของวัสดุผสมที่ใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป อย่างไรก็ตามงานวิจัยเป็นการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ซึ่งมีขนาดเล็กกว่างานโครงสร้างทั่วไปอย่างมาก จึงต้องใช้วัสดุผสมที่มีขนาดเล็กลง ไม่สามารถใช้วัสดุผสมที่มีขนาดตามกำหนดมาตรฐาน (ASTM C33-93) ซึ่งใช้สำหรับงานโครงสร้างได้ ถึงแม้ว่ามาตรฐาน ASTM C936-82 จะกำหนดลักษณะของวัสดุผสมทั่วไปสำหรับผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตัน โดยอ้างให้เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM C33-93 แต่ก็ระบุไว้ชัดเจนว่ายกเว้นส่วนคละของวัสดุผสมที่ไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ดังนั้นงานวิจัยหรือการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นในเชิงอุตสาหกรรมจึงสามารถใช้วัสดุผสมที่มีขนาดเล็กกว่าในค่ามาตรฐานกำหนดได้



รูปที่ 4.5 ส่วนคละของวัสดุผสมที่ใช้ในการวิจัย

4.2.4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของวัสดุวิเคราะห์จากการคำนวณสัดส่วนมวลต่อปริมาตร มวลได้จากการชั่งน้ำหนักและปริมาตรหาโดยการแทนที่น้ำ ความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และความพรุนของอนุภาค จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.5 การเผาจะทำให้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 1.93 เป็น 2.86 เนื่องจาก

สารแอนทราควิโนนเป็นสารอินทรีย์ ($C_{14}H_8O_2$) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะต่ำและมีความพรุนสูงสังเกตได้จากฟองอากาศที่เกิดขึ้นมากในระหว่างการวัดปริมาตรด้วยวิธีแทนที่น้ำ การบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเท่ากับเป็นการลดผลกระทบของความพรุน ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของสารเพิ่มขึ้นเป็น 2.07 แต่เนื่องจากยังมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์จึงยังมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าชนิดที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเมื่อเผาทั้งชนิดไม่บด ($SA_{ORG,TRT}$) และบด ($SA_{100,\ TRT}$) จะมีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันคือ 2.86 และ 2.82 ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมแต่จะอ้างอิงค่าที่แนะนำโดย ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2539) โดยวัสดุผสมหยาบและละเอียดที่ใช้กันโดยทั่วไปในประเทศไทยจะมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.7 และ 2.65 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและวัสดุผสม

	ความถ่วงจำเพาะ	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ
$SA_{(ORG,\ UNT)}$	1.93	25.33
$SA_{(ORG,\ TRT)}$	2.86	54.83
$SA_{(100,\ UNT)}$	2.07	31.01
$SA_{(100,\ TRT)}$	2.82	62.45
หินเกล็ด	2.70	1.06
ทราย	2.65	2.35

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุต่างๆ เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากเพื่อใช้ในการควบคุมปริมาณน้ำของส่วนผสม เพื่อให้น้ำที่เติมลงไปเป็นน้ำสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่มีหน้าที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ช่วยให้คอนกรีตสดทำงานได้ และเคลือบผิววัสดุผสมให้ซีเมนต์เพสต์เข้าจับยึด การวิเคราะห์ใช้วิธีตามมาตรฐาน ASTM C128-93 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สำหรับวัสดุผสมละเอียด และสำหรับหินเกล็ดใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM C127-88 ซึ่งแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก.1 และ ก.2

การบดทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำจึงสูงขึ้น 5.68 เปอร์เซ็นต์ (จาก 25.33 เป็น 31.01 เปอร์เซ็นต์) สารแอนทราควิโนนที่เคลือบที่ผิววัสดุมีสมบัติไม่ละลายน้ำ จึงมีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ โดยจะเห็นได้ว่า วัสดุที่เผา (ทั้งไม่บดและบดให้ละเอียด) จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมาก (มากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่สถานะเดียวกัน การบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วชนิดที่เผาจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ซิลิกา-

อะลูมินาขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจะมีการดูดซึมน้ำ 54.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขณะที่ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจะมีการดูดซึมน้ำ 62.45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (เพิ่มสูงขึ้น 13.90 เปอร์เซ็นต์)

4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกโดยใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

4.3.1 อัตราส่วนวัสดุผสมที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อก

ถึงแม้วัตถุประสงค์ของงานวิจัยจะเป็นการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นเพื่อสามารถใช้งานได้จริงในด้านก่อสร้าง แต่เนื่องจากข้อจำกัดบางประการของงานวิจัยที่ทำในระดับห้องปฏิบัติการแตกต่างกับการผลิตจริง ในห้องปฏิบัติการจะใช้เหล็กกระทุ้งส่วนผสมโดยอาศัยแรงคนเพื่ออัดส่วนผสมให้แน่นในแบบหล่อ ขณะที่การผลิตจริงเชิงอุตสาหกรรมจะใช้เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยระบบไฮดรอลิก ทำให้มวลก้อนที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นสัดส่วนของวัสดุประสานที่สามารถลดลงได้โดยคงค่ากำลังรับแรงอัดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน หรือการลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้น้อยลง เนื่องจากไม่ต้องการน้ำสำหรับเพิ่มความสามารถทำงานได้มากนักทำให้คอนกรีตบล็อกที่ได้มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดแปรผันเป็นส่วนกลับกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (ประณต กุลประสูตร, 2541)

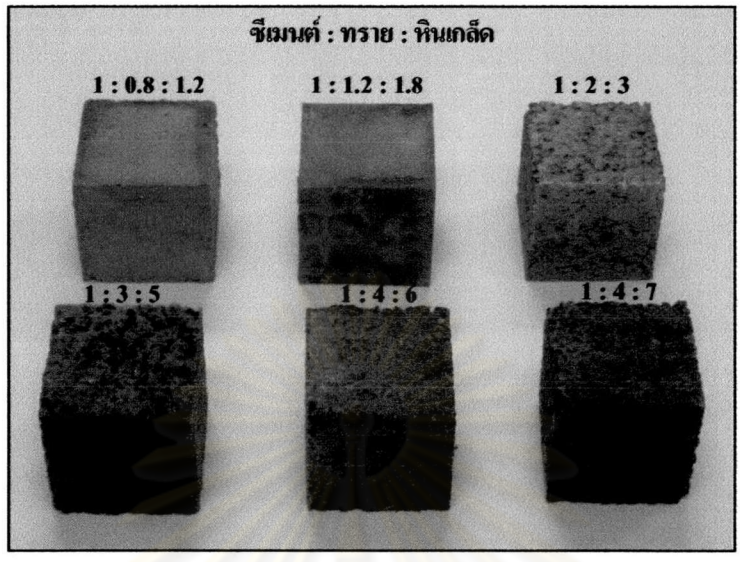
เบื้องต้นการทดลองส่วนนี้ได้ศึกษาแปรค่าสัดส่วนระหว่างซีเมนต์ ทราย และหินเกล็ดให้ใกล้เคียงกับที่ใช้จริงในเชิงอุตสาหกรรม โดยแปรค่าเป็น 1:2:3 1:3:5 1:4:6 และ 1:4:7 แต่พบว่าส่วนผสมดังกล่าวมีลักษณะค่อนข้างแห้งจนยากต่อการเทลงแบบเพื่ออัดแน่นให้คงรูปของมวลก้อน แสดงดังรูปที่ 4.6 ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตในสัดส่วนเหล่านี้มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำและมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (40 เมกะปาสคาล) ที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรมค่อนข้างมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยเฉพาะในสัดส่วน 1:4:7 ซึ่งก้อนตัวอย่างมีลักษณะแห้งมากจนไม่สามารถจับตัวกันเป็นก้อนได้ อาจเนื่องมาจากปริมาณวัสดุประสานไม่เพียงพอในการยึดเกาะกับอนุภาควัสดุผสม จึงได้แปรค่าสัดส่วนวัตถุดิบทั้ง 3 เพิ่มเติมให้มีสัดส่วนของวัสดุประสานมากขึ้น ได้แก่ 1:0.8:1.2 และ 1:1.2:1.8 โดยคงอัตราส่วนระหว่างวัสดุผสมละเอียดต่อวัสดุผสมหยาบให้อยู่ในช่วง 0.55 - 0.7 โดยปริมาตร (ประณต กุลประสูตร, 2541) เช่นเดียวกับ 4 สัดส่วนแรก ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ (0.5) การลดลงของอัตราส่วนวัสดุผสมต่อวัสดุประสานจะทำให้ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วน 1:1.2:1.8 มีความข้นเหลวพอเหมาะ ส่วนผสมมีความยืดหยุ่นดี ในขณะที่ส่วนผสม 1:0.8:1.2 มีลักษณะเหลวเล็กน้อย สังเกตได้จากการเยิ้ม (Bleeding) ที่เกิดขึ้น

เมื่อพิจารณาจากค่ากำลังรับแรงอัด สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ ซีเมนต์ 1 ส่วน ทราย 1.2 ส่วน และหินเกล็ด 1.8 ส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตบล็อกขนาด 5 เซนติเมตร เป็น 53.60 เมกะปาสคาล ที่ระยะเวลาบ่ม 28

วัน คิดเป็น 134.00 และ 116.09 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐานและสัดส่วนควบคุม ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมวัสดุผสมจะทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น เนื่องจากโดยทั่วไปวัสดุผสมไม่ว่าหินหรือทรายจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์อยู่แล้ว (700 - 3,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ของตัวอย่างบล็อกคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามการลดลงของปริมาณวัสดุประสานในก้อนตัวอย่าง โดยก้อนตัวอย่างที่มีวัสดุผสมมากกว่าสัดส่วนที่เหมาะสม (1:1.2:1.8) จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานอย่างมาก ซึ่งมีค่าเป็น 20.35 3.31 1.17 และ 0.93 เมกะปาสคาล ในสัดส่วน 1:2:3 1:3:5 1:4:6 และ 1:4:7 ตามลำดับ ในทางกลับกันที่สัดส่วน 1:0.8:1.2 ตัวอย่างมีสัดส่วนวัสดุประสานมากกว่าแต่กลับให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมีความพรุนในเนื้อคอนกรีตที่เกิดจากการระเหยของน้ำส่วนเกิน (Excess water) ที่มากกว่า Rusch, 1960 (อ้างถึงโดย Nilson, 1997) กล่าวว่า ความต้องการน้ำสำหรับให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของซีเมนต์มีค่าเพียง 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณซีเมนต์ (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.25) แต่ที่ต้องเพิ่มน้ำเข้าไปในสัดส่วนให้มากขึ้นเพื่อช่วยในการทำงานได้ของคอนกรีตสด และเคลือบผิววัสดุผสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์จับตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสมได้ดี เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่สัดส่วน 1:0.8:1.2 และ 1:1.2:1.8 เห็นได้ว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ (เท่ากับ 0.5) ความต้องการน้ำสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีค่าเท่ากัน สัดส่วนที่มีวัสดุผสมน้อยต้องการน้ำสำหรับความสามารถทำงานได้และเคลือบผิววัสดุผสมน้อยกว่า ทำให้เกิดน้ำส่วนเกินในสัดส่วนที่มากกว่า ความพรุนเนื่องจากการระเหยของน้ำจึงมาก ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจึงลดลงเป็น 49.40 เมกะ-ปาสคาล อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างที่สัดส่วนผสม 1:0.8:1.2 ก็ยังมีค่าสูงกว่าสัดส่วนควบคุมและค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น คิดเป็น 123.5 และ 107.0 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐานและสัดส่วนควบคุม ตามลำดับ

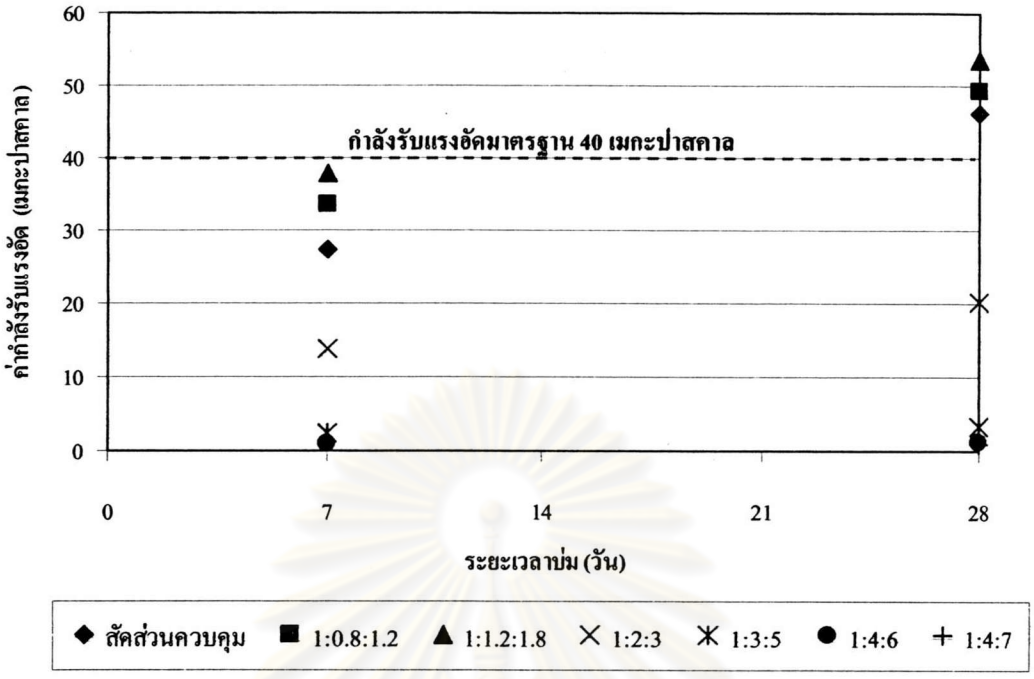
การเติมวัสดุผสมทำให้ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 จะเห็นว่า ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่ยาวนานขึ้น และสัดส่วนที่มีการเติมวัสดุผสมจะมีความหนาแน่นเป็นส่วนกลับกับปริมาณวัสดุผสมที่เติม ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตจะผันแปร หรือถูกกระทบโดยตรงกับช่องว่างที่ปรากฏในเนื้อคอนกรีตที่อัดแน่น ดังนั้นควรทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด (1:1.2:1.8) จากค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีต พบว่าเป็นสัดส่วนที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดด้วย (2.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)



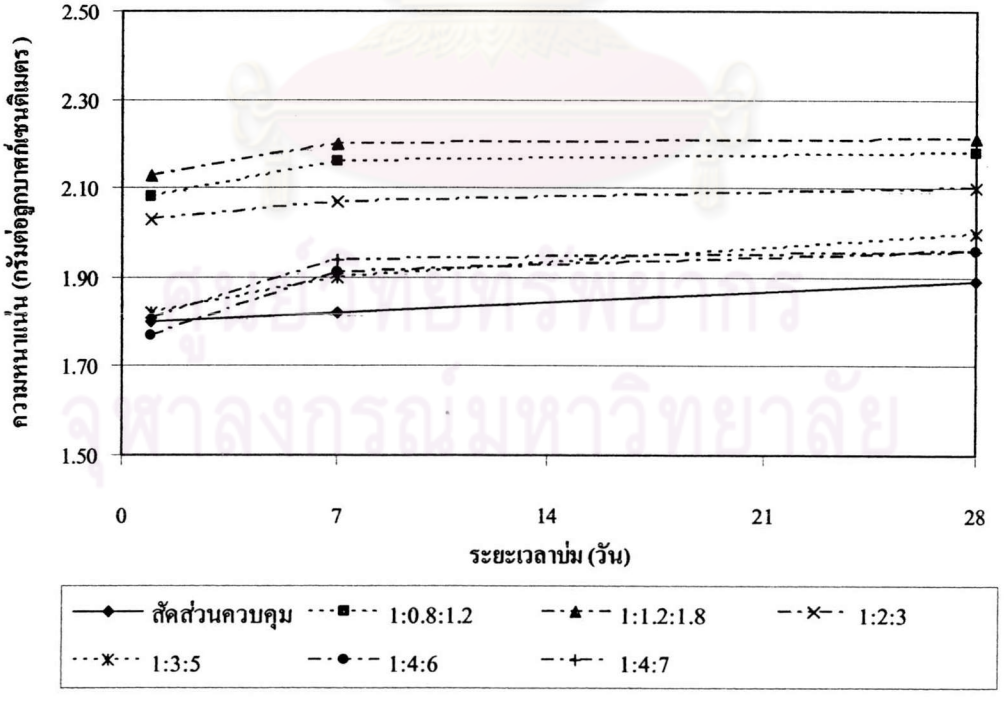
รูปที่ 4.6 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ดที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 4.6 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตอายุ 7 และ 28 วัน ที่ค่าสัดส่วนผสมต่างๆ

ซีเมนต์:ทราย:หินเกล็ด	ค่ากำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)		ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	
	7 วัน	28 วัน	7 วัน	28 วัน
1:0:0	27.43	46.17	1.82	1.89
1:0.8:1.2	33.69	49.40	2.16	2.18
1:1.2:1.8	37.82	53.60	2.20	2.21
1:2:3	13.84	20.35	2.07	2.10
1:3:5	2.31	3.31	1.90	2.00
1:4:6	1.07	1.17	1.91	1.96
1:4:7	1.12	0.93	1.94	1.96



รูปที่ 4.7 ค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ที่แปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดต่างๆ



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ที่แปรค่าสัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดต่างๆ

4.3.2 อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสาน และระยะเวลาบ่มที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อก

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ตลอดจนผลกระทบต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ แทนที่บางส่วนในซีเมนต์ โดยศึกษาจากตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีต ผสมที่สัดส่วนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดเท่ากับ 1:1.2:1.8 และ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 พบว่า คอนกรีตสดแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีความสามารถทำงานได้ลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว สอดคล้องกับคำกล่าวของ Lea (1970) ที่ว่า ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์คงที่ คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานจะมีค่าการยุบตัว (Slump) ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยการเติมวัสดุปอซโซลานจะเกิดผลกระทบต่อโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ใน 2 ลักษณะด้วยกัน คือ ซีเมนต์เจลที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานทำให้อนุภาคยึดติดกันแน่นยิ่งขึ้น เรียกว่า Pozzlanic effect และการเติมเต็มของรูพรุนในเนื้อซีเมนต์เพสต์ด้วยอนุภาคขนาดเล็ก ที่เรียกว่า Filler effect (Isaia และคณะ, 2003) ทั่วไปแล้วค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตสัดส่วนควบคุมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่ม โดยอัตราการพัฒนากำลังจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลา มีค่าเป็น 39.73 42.14 46.52 และ 53.60 เมกะปาสคาลที่ระยะเวลาบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดจะมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม (40 เมกะปาสคาล) ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 14 วัน แต่มีค่าน้อยกว่า 55 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานตาม ASTM C936-82 ดังนั้นการพิจารณาสัดส่วนที่เหมาะสมจากค่ากำลังรับแรงอัดจะใช้เกณฑ์มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมที่ใช้ในประเทศไทย โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นสำคัญ กรณีที่ค่ากำลังรับแรงอัดไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จะถือว่าสัดส่วนที่ให้กำลังสูงที่สุดเป็นสัดส่วนที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตมากที่สุด

ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างสัดส่วนควบคุมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่ากำลังรับแรงอัด โดยมีค่าเป็น 2.14 2.20 2.22 2.23 และ 2.21 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ระยะเวลาบ่ม 1 7 14 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม

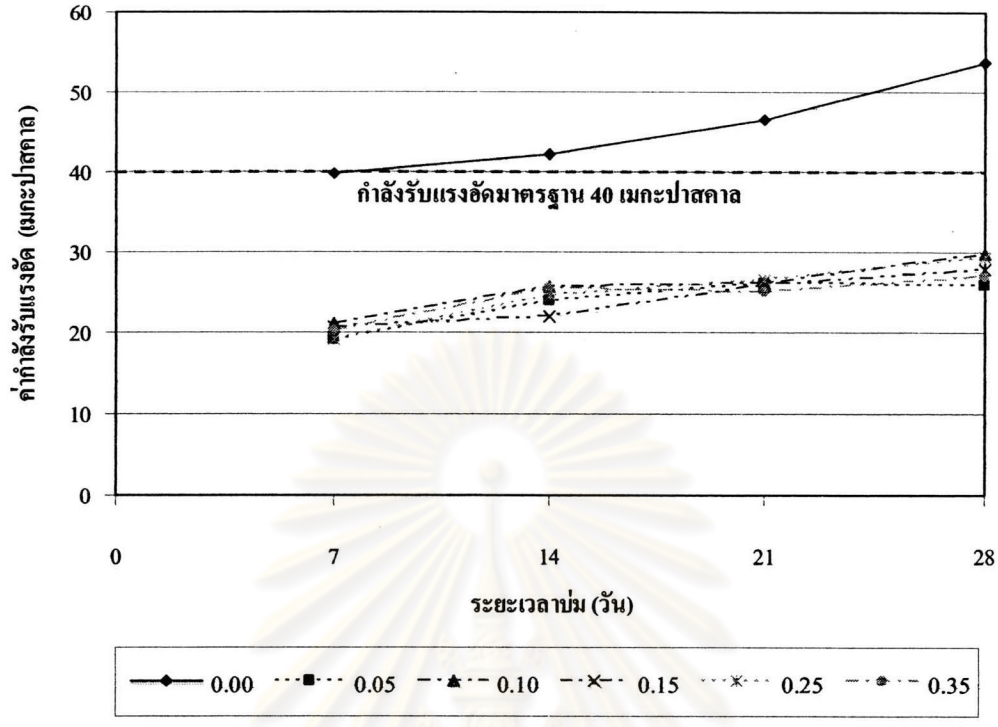
ถึงแม้การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน $SA_{ORG,\ UNT}$ ต่อวัสดุประสานทำให้ส่วนผสมคอนกรีตมีความสามารถทำงานได้ลดลงดังที่กล่าวข้างต้น แต่เนื่องจาก $SA_{ORG,\ UNT}$ ดูดซึมน้ำน้อยกว่าสถานะอื่นๆ ทำให้มีความข้นเหลวเพียงพอสำหรับการเทลงแบบเพื่อหล่อเป็นมวลก้อน ตัวอย่างคอนกรีตที่สัดส่วนการแทนที่น้อยกว่า 0.25 ไม่แสดงสีของ $SA_{ORG,\ UNT}$ ขณะที่ตัวอย่างจะมีสีชมพูเล็กน้อยที่สัดส่วน 0.25 และ 0.35 ของ $SA_{ORG,\ UNT}$ ต่อวัสดุประสาน

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 อัตราส่วน $SA_{ORG,\ UNT}$ ต่อวัสดุประสานมีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตไม่ชัดเจน ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน อยู่ในช่วง 25.91 - 29.76 เมกะปาสคาล โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน $SA_{ORG,\ UNT}$ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.10 ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานคิดเป็น 74.40 และ 55.52 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐานและสัดส่วนควบคุม ตามลำดับ ค่ากำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าสัดส่วนควบคุมเป็นผลเนื่องจากสารแอนทราควิโนนที่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งทำให้กำลังของคอนกรีตลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกซีเมนต์เพสต์ผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะเดียวกัน ที่อัตราส่วน $SA_{ORG,\ UNT}$ ต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.25 และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากัน (ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ, 2542) พบว่า การเติมวัสดุผสมในซีเมนต์เพสต์ทำให้ความสามารถในการทำก้อนแข็งลดลง เห็นได้จากสัดส่วนของ $SA_{ORG,\ UNT}$ ที่สามารถเติมในก้อนตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากส่วนหนึ่งของซีเมนต์เพสต์ต้องทำหน้าที่ยึดประสานวัสดุผสมด้วย แทนที่จะจับยึดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัด พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตสภาวะเหมาะสมมีค่าคิดเป็น 79.42 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงอัดซีเมนต์เพสต์ที่ศึกษาโดยไลทิพย์

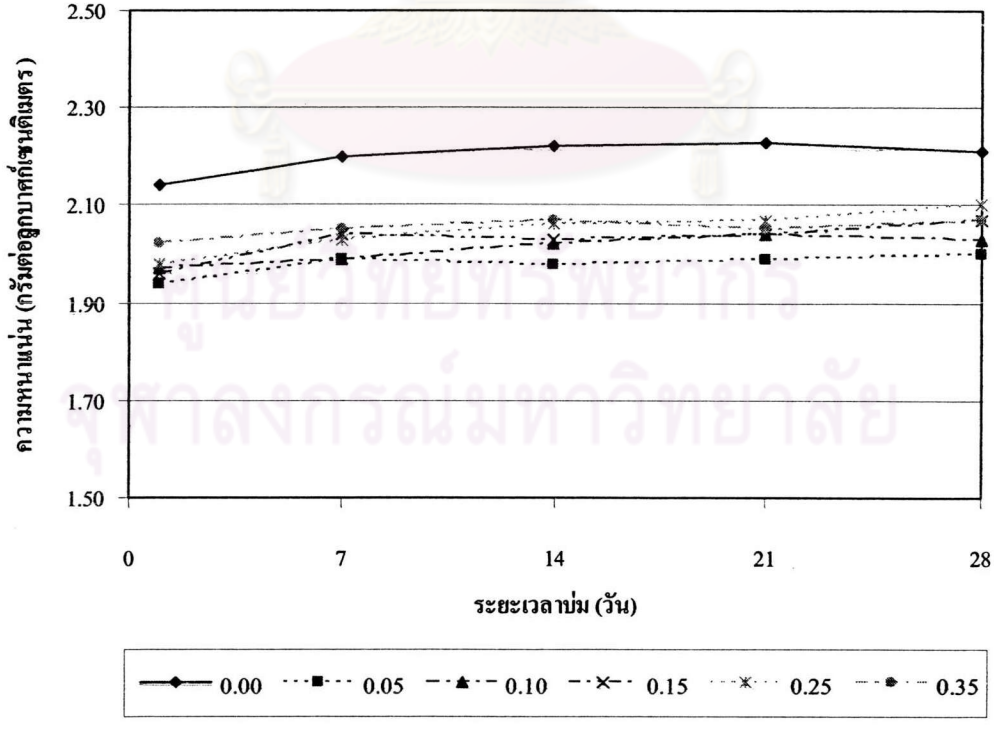
ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่ยาวนานขึ้นสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน พบว่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของ $SA_{ORG,\ UNT}$ ต่อวัสดุประสาน แสดงให้เห็นว่าวัสดุทำหน้าที่เสมือนอนุภาคขนาดเล็กเติมเต็มช่องว่างในเนื้อคอนกรีตทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนควบคุม การเติม $SA_{ORG,\ UNT}$ จะทำให้ความหนาแน่นลดลงเนื่องจากผลกระทบของสารอินทรีย์ที่รบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่ลดลงเมื่อเติมวัสดุในส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ 4.7 ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม

SA / B	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)				ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)				
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)								
	7	14	21	28	1	7	14	21	28
0.05	19.17	23.83	26.00	25.91	1.94	1.99	1.98	1.99	2.00
0.10	21.05	25.58	26.03	29.76	1.97	1.99	2.02	2.04	2.03
0.15	20.76	21.86	25.92	27.92	1.96	2.04	2.03	2.04	2.07
0.25	19.04	24.55	26.56	29.25	1.98	2.03	2.06	2.07	2.10
0.35	20.21	25.38	25.03	26.95	2.02	2.05	2.07	2.05	2.07



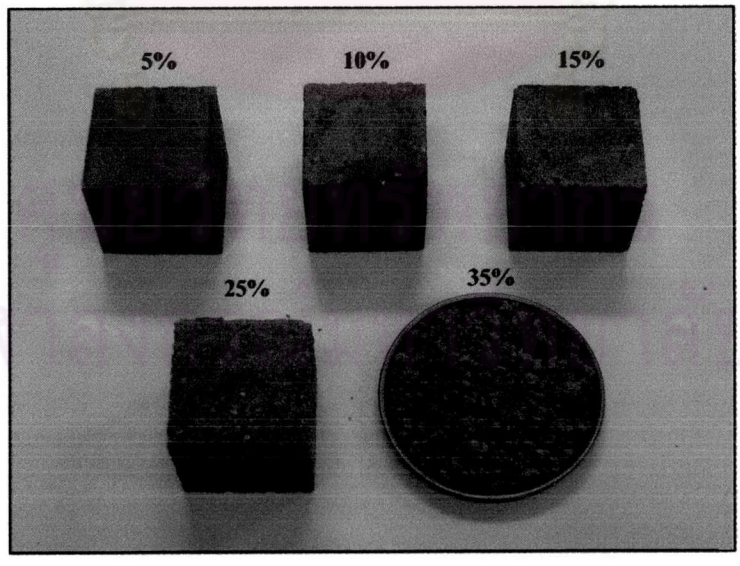
รูปที่ 4.9 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ



รูปที่ 4.10 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

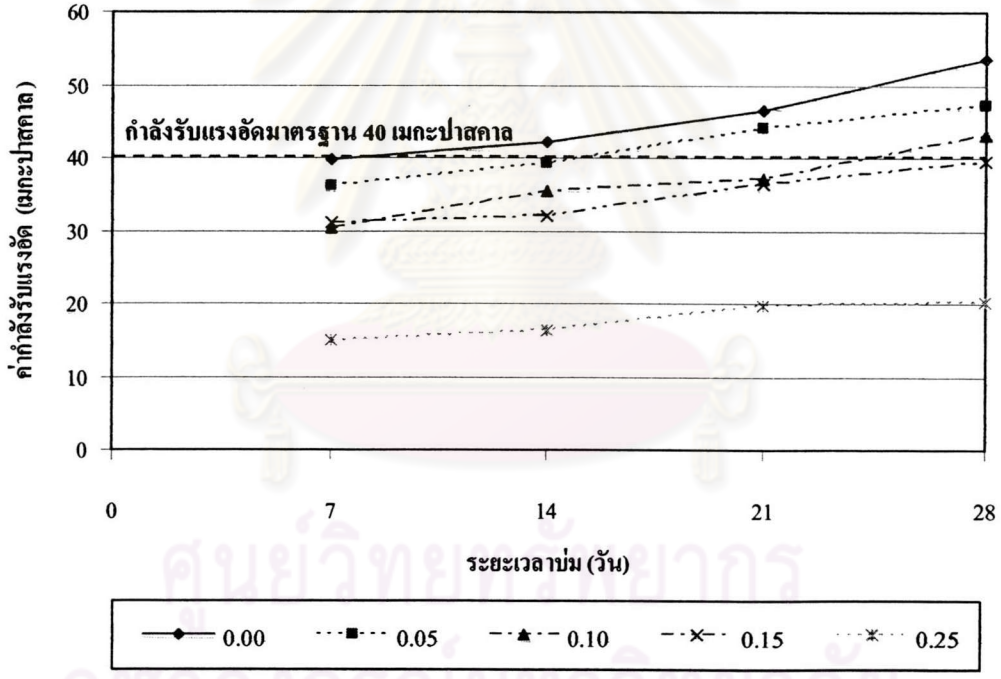
คอนกรีตสดในสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{ORG, TRT}$ เป็นอัตราส่วน 0.35 เท่าของวัสดุประสาน มีความสามารถทำงานได้ต่ำจนไม่สามารถขึ้นรูปเป็นมวลก้อนได้ ขณะที่สัดส่วน 0.25 มีลักษณะแห้ง ทำให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อจับตัวกันไม่ดี กำลังรับแรงอัดจึงมีค่าต่ำกว่าสัดส่วนอื่นๆ อย่างมาก แสดงดังรูปที่ 4.11 อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงระยะเวลาบ่มน้อยกว่า 21 วัน มีค่าใกล้เคียงกับสัดส่วนควบคุม และจะลดลงจนมีค่าน้อยกว่าเมื่อระยะเวลาบ่มยาวนานขึ้น ดังรูปที่ 4.12 การเติม $SA_{ORG, TRT}$ จะทำให้ก้อนตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง โดยที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ $SA_{ORG, TRT}$ ในส่วนผสม และมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่อัตราส่วน $SA_{ORG, TRT}$ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.05 ที่ระยะเวลาบ่ม 21 วัน (44.20 เมกะปาสคาล) คิดเป็น 110.50 และ 95.01 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐานและสัดส่วนควบคุม (ที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน) ตามลำดับ ขณะที่การเติมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วในสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 0.10 จะต้องใช้ระยะเวลาบ่มนานขึ้นเป็น 28 วัน เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (43.16 เมกะปาสคาล) คิดเป็น 107.90 และ 80.52 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐานและสัดส่วนควบคุม ตามลำดับ ดังนั้นสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นด้วย $SA_{ORG, TRT}$ คือ อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.10 ที่ระยะเวลาบ่มอย่างน้อย 28 วัน



รูปที่ 4.11 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนต่างๆ

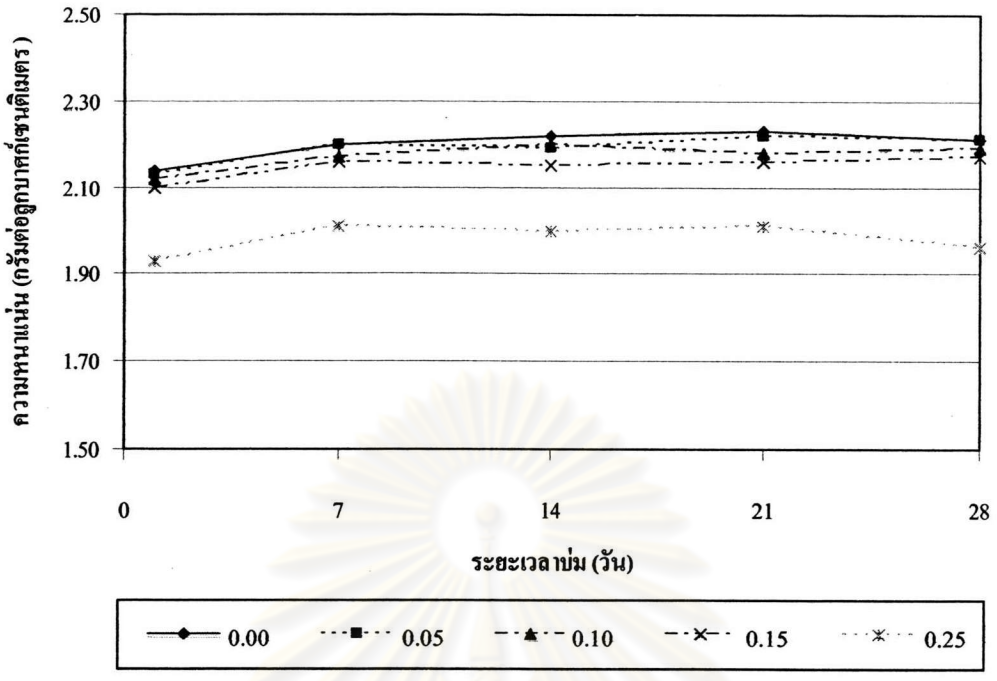
ตารางที่ 4.8 ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

SA / B	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)				ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)				
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)								
	7	14	21	28	1	7	14	21	28
0.05	36.19	39.30	44.20	47.25	2.13	2.20	2.19	2.22	2.21
0.10	30.38	35.34	37.11	43.16	2.12	2.17	2.20	2.18	2.19
0.15	31.08	31.97	36.35	39.57	2.10	2.16	2.15	2.16	2.17
0.25	15.05	16.42	19.64	20.22	1.93	2.01	2.00	2.01	1.96



รูปที่ 4.12 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

จากรูปที่ 4.13 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน $SA_{ORG,\ TRT}$ ซึ่งแทนที่ซีเมนต์ในก้อนตัวอย่างคอนกรีต เนื่องจากวัสดุมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.86 ซึ่งน้อยกว่าซีเมนต์ ประกอบกับปริมาณซีเมนต์ที่ลดลงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นลดลงตามไปด้วย



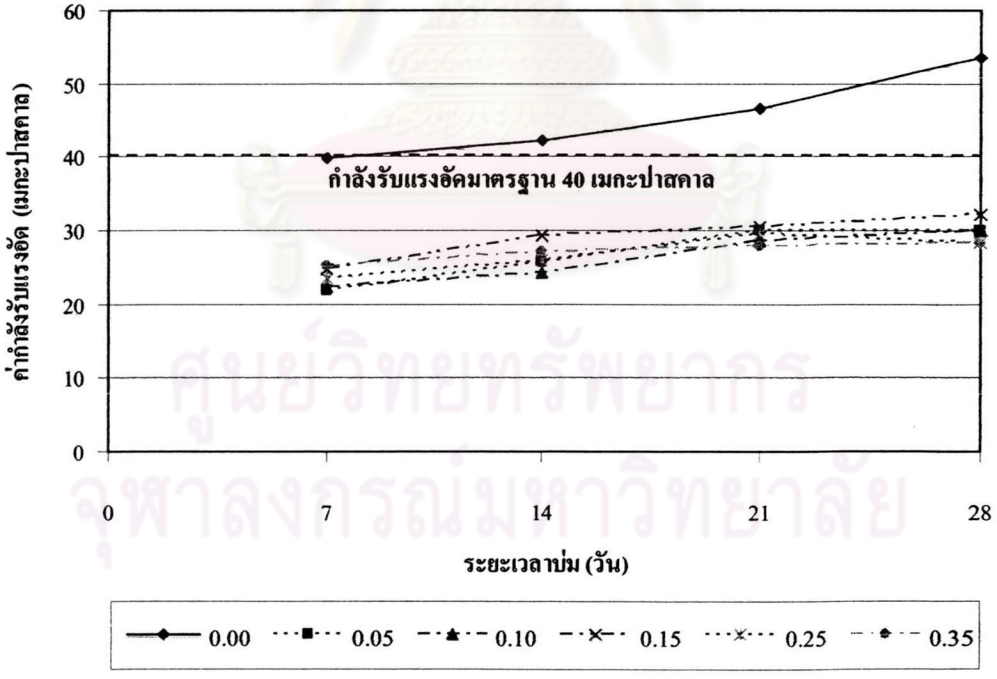
รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน

ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ $SA_{ORG, UNT}$ เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น จึงเหลือปริมาณน้ำสำหรับเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดน้อยลง และจากการสังเกตลักษณะภายนอก ก้อนตัวอย่างมีสีชมพูมากขึ้นตามปริมาณของ $SA_{100, UNT}$ ที่เติมลงไป และสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่าในคอนกรีตตัวอย่างซึ่งแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{ORG, UNT}$ จากค่ากำลังรับแรงอัดตามตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.14 ที่ค่าสัดส่วนการแทนที่และระยะเวลาบ่มเดียวกัน กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{100, UNT}$ จะสูงกว่า $SA_{ORG, UNT}$ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดและอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานไม่ชัดเจนเช่นเดียวกับ $SA_{ORG, UNT}$ แต่อนุภาคที่เล็กลงทำให้ตัวอย่างคอนกรีตมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้น โดยที่ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน มีค่าอยู่ในช่วง 28.27 - 32.08 เมกะปาสคาล ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นสัดส่วนที่เหมาะสมจึงเลือกตามค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดนั้นก็คือที่อัตราส่วน $SA_{100, UNT}$ ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.15 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เท่ากับ 32.08 เมกะปาสคาล คิดเป็น 80.20 และ 59.85 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐานและสัดส่วนควบคุม ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าขนาดที่เล็กลงจะเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการทำก้อนแข็ง ทั้งในด้านกำลังรับแรงอัดและปริมาณของเสียที่สามารถจัดการได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.9 ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

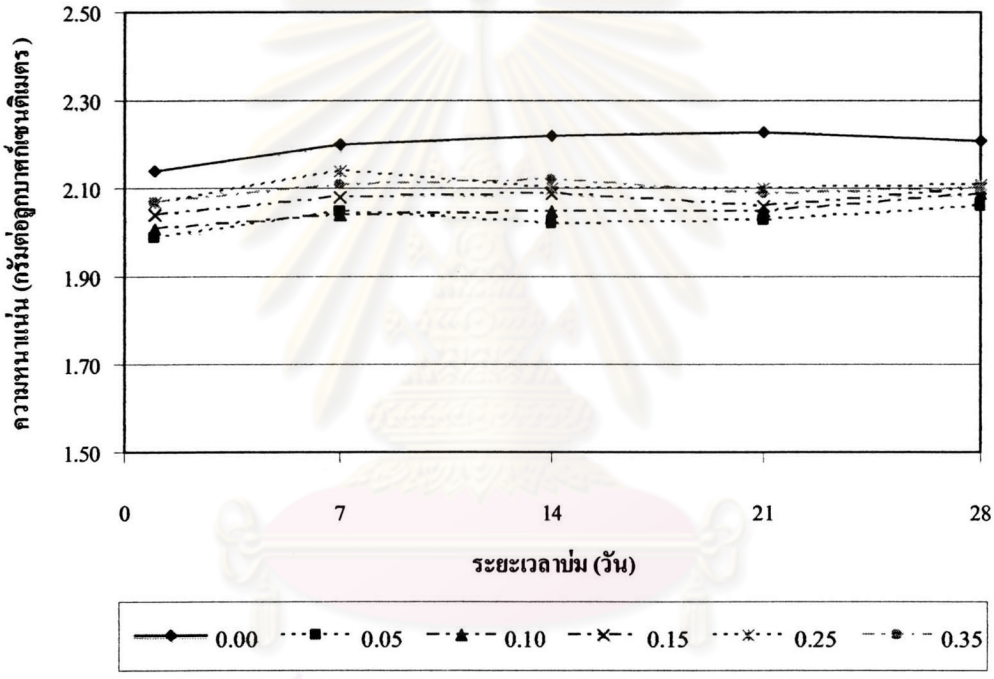
SA / B	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)				ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)				
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)								
	7	14	21	28	1	7	14	21	28
0.05	21.84	25.69	30.10	29.90	1.99	2.05	2.02	2.03	2.06
0.10	22.23	24.12	28.59	29.94	2.01	2.04	2.05	2.05	2.09
0.15	24.81	29.26	30.58	32.08	2.04	2.08	2.09	2.06	2.10
0.25	23.59	25.80	29.47	29.47	2.07	2.14	2.10	2.10	2.11
0.35	25.24	27.06	27.93	28.27	2.07	2.11	2.12	2.09	2.10



รูปที่ 4.14 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติม $SA_{100, UNT}$ เช่นเดียวกับ $SA_{ORG, UNT}$ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.06 - 2.11 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นขึ้นอยู่กับการเติมเต็มของอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเห็นได้จากปริมาณ $SA_{100, UNT}$ ในก้อนตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่บด ($SA_{ORG, UNT}$) พบว่า ความหนาแน่นที่ระยะเวลาและอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานหนึ่งๆ ก้อนตัวอย่างซึ่งแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{100, UNT}$ จะมีความหนาแน่นสูงกว่าตัวอย่างแทนที่ด้วย $SA_{ORG, UNT}$ และสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัด โดยที่สัดส่วนซึ่งเหมาะสมที่สุดมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

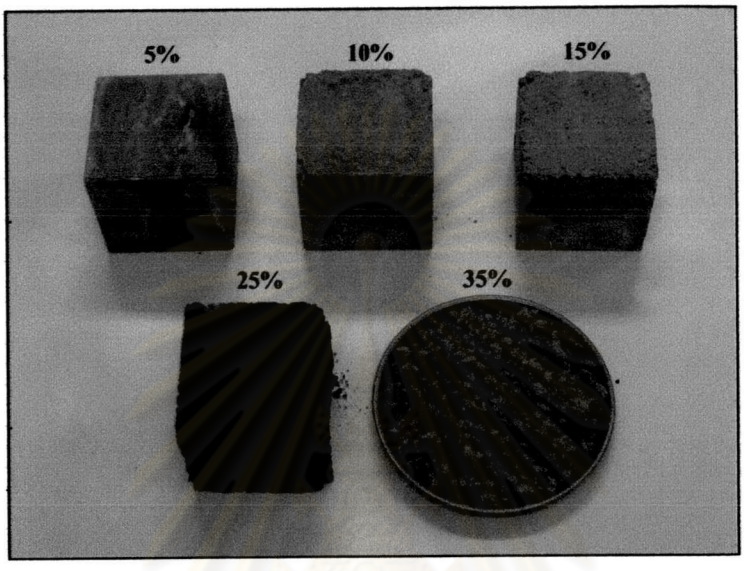


รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

$SA_{100, TRT}$ เป็นวัสดุที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสถานะอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กทำให้สามารถเติมเต็มช่องว่างของรูพรุนในเนื้อคอนกรีตได้ อีกทั้งไม่มีสารอินทรีย์ที่รบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของซีเมนต์ ทำให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่นานขึ้น และลดลงตามสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วในก้อนตัวอย่าง ความสามารถทำงานได้ของคอนกรีตสดผสม

$SA_{100,\ TRT}$ ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนอื่นๆ เนื่องจากวัสดุสามารถดูดน้ำได้มากกว่า จากรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า ก้อนตัวอย่างที่สัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 0.25 มีลักษณะร่วน อนุภาคไม่จับยึดกัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำมาก และที่สัดส่วน 0.35 ส่วนผสมมีลักษณะแห้งมากจนไม่สามารถหล่อขึ้นรูปเป็นมวลก้อนได้



รูปที่ 4.16 ก้อนตัวอย่างคอนกรีตแปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสต่อวัสดุประสานที่อัตราส่วนต่างๆ

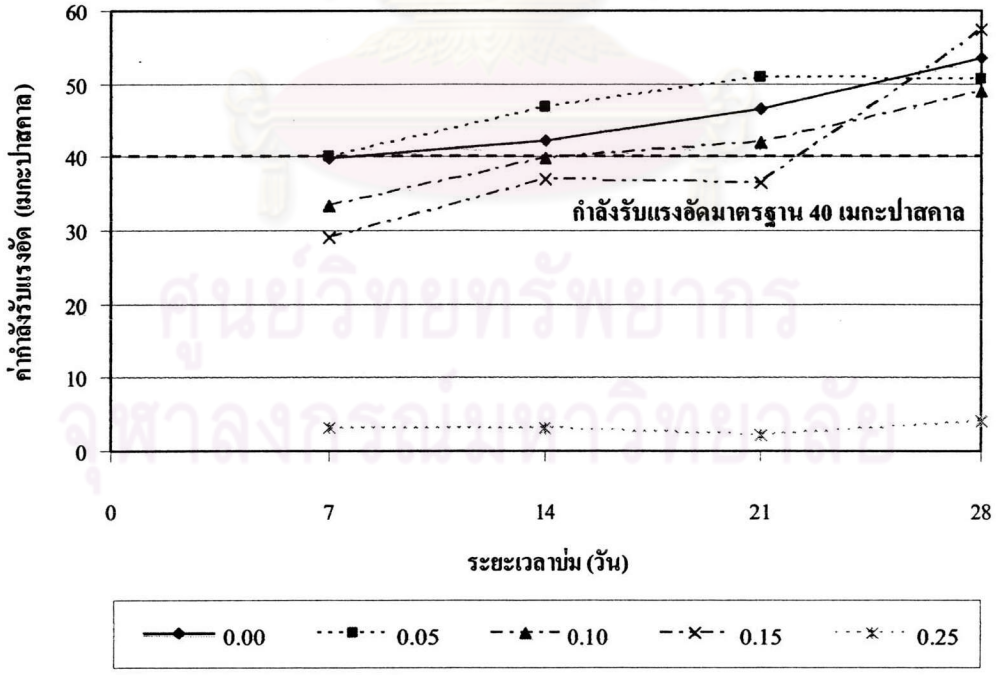
ในช่วงแรกของระยะเวลาบ่ม (7 - 14 วัน) อัตราการพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างจะสูงกว่าสัดส่วนควบคุม แต่เมื่อเวลานานขึ้นในช่วงการบ่ม 14 - 21 วัน ที่อัตราส่วนการแทนที่ซีเมนต์เท่ากับ 0.05 และ 0.10 การพัฒนากำลังจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับสัดส่วนควบคุมและจะลดลงจนมีค่าต่ำกว่าที่ระยะเวลาบ่มมากกว่า 21 วัน ต่างกับที่สัดส่วน 0.15 ซึ่งการพัฒนากำลังรับแรงอัดค่อนข้างคงที่ในระยะแรกแต่จะเพิ่มสูงขึ้นกว่าสัดส่วนควบคุมที่ระยะเวลาบ่มมากกว่า 21 วัน จนทำให้ค่ากำลังรับแรงที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันสูงกว่าก้อนตัวอย่างสัดส่วนควบคุมและถือเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด มีค่ากำลังรับแรงอัดเป็น 57.35 เมกะปาสคาล และผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คิดเป็น 143.38 และ 107.00 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐานและสัดส่วนควบคุมตามลำดับ ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.17 สังเกตได้ว่าการเติม $SA_{100,\ TRT}$ ในปริมาณเพียงเล็กน้อยจะทำให้ได้คอนกรีตที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าสัดส่วนควบคุม

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.18 ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาบ่มที่นานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงอัดที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาบ่มเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของสัดส่วน $SA_{100,\ TRT}$ ต่อวัสดุประสาน มีแนวโน้มเป็น

เช่นเดียวกับก้อนตัวอย่างซึ่งแทนที่ด้วย $SA_{ORG.\ TRT}$ แต่จะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยอันเนื่องมาจากอนุภาคที่เล็กกว่าสามารถเติมในช่องว่างทำให้เนื้อคอนกรีตอัดแน่นกว่า

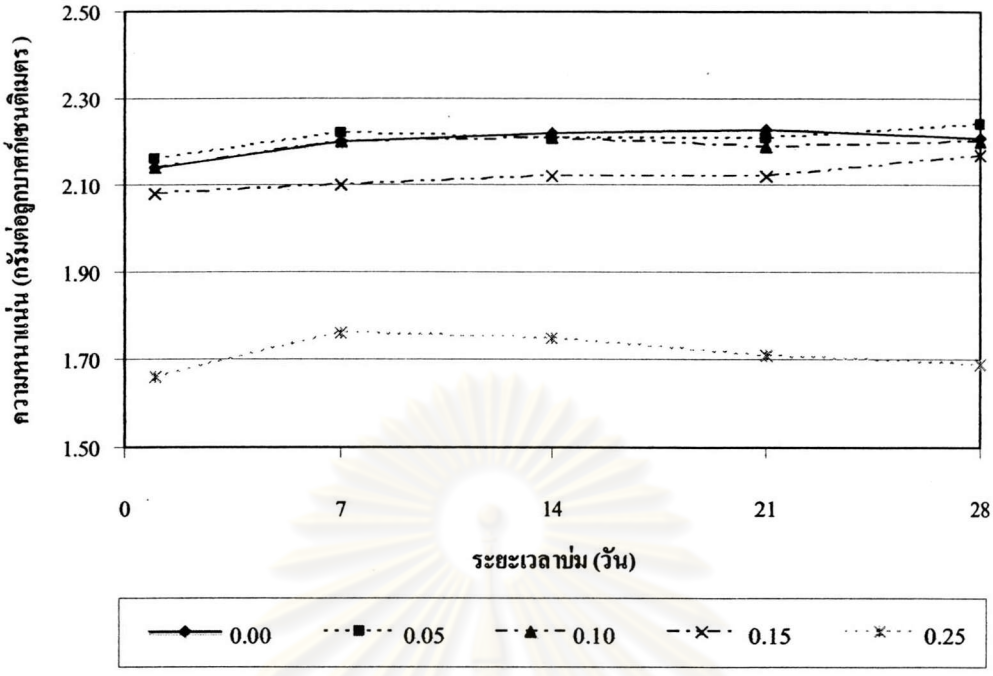
ตารางที่ 4.10 ค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

SA / B	กำลังรับแรงอัด (เมกะปาสคาล)				ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)				
	ระยะเวลาบ่ม (วัน)								
	7	14	21	28	1	7	14	21	28
0.05	39.98	46.75	50.99	50.63	2.16	2.22	2.21	2.21	2.24
0.10	33.46	39.86	41.98	48.93	2.14	2.20	2.21	2.19	2.20
0.15	28.69	36.99	36.58	57.35	2.08	2.10	2.12	2.12	2.17
0.25	3.19	3.05	2.18	4.02	1.66	1.76	1.75	1.81	1.69



รูปที่ 4.17 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



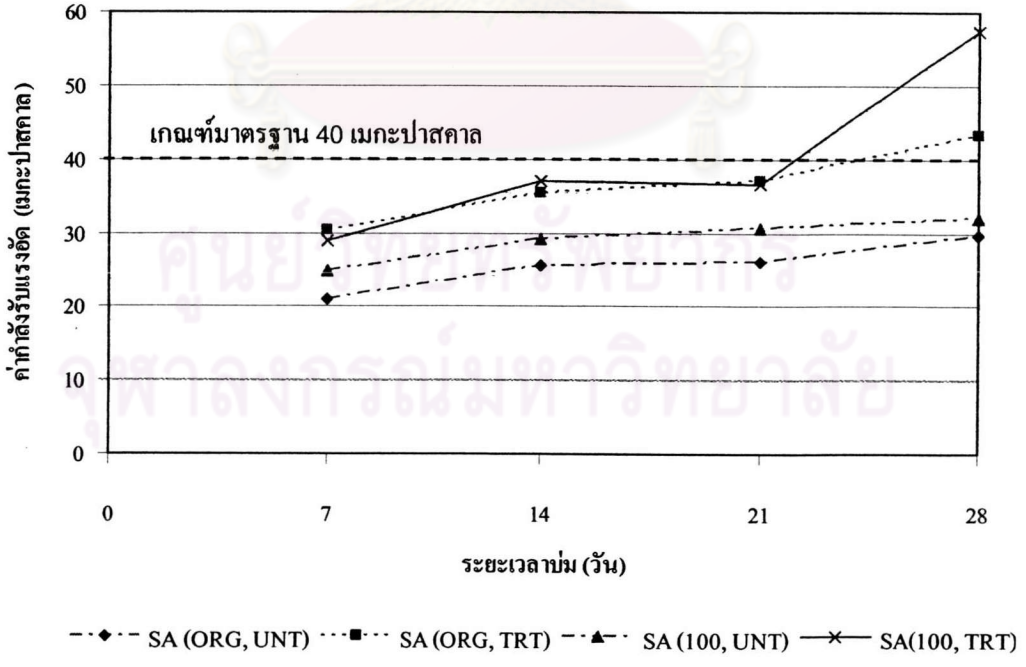
รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างคอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนและระยะเวลาบ่มต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ผลิตที่สภาวะเหมาะสมในแต่ละสถานะของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว พบว่า การบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วจะทำให้สามารถผสมวัสดุในซีเมนต์เพื่อหล่อคอนกรีตในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น และทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงขึ้นในทุกระยะเวลาบ่ม แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด การเผาวัสดุเพื่อลดผลกระทบที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของสารแอนทราควิโนน ทำให้ก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด แต่ต้องบ่มเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 28 วัน จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าที่ระยะเวลาบ่มตั้งแต่ 7 - 14 วัน ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างแทนที่ด้วย $SA_{ORG,\ TRT}$ และ $SA_{100,\ TRT}$ มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่หลังจากระยะเวลาบ่ม 21 วัน ก้อนตัวอย่างซึ่งแทนที่ด้วย $SA_{100,\ TRT}$ จะมีอัตราการพัฒนากำลังสูงกว่า ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด

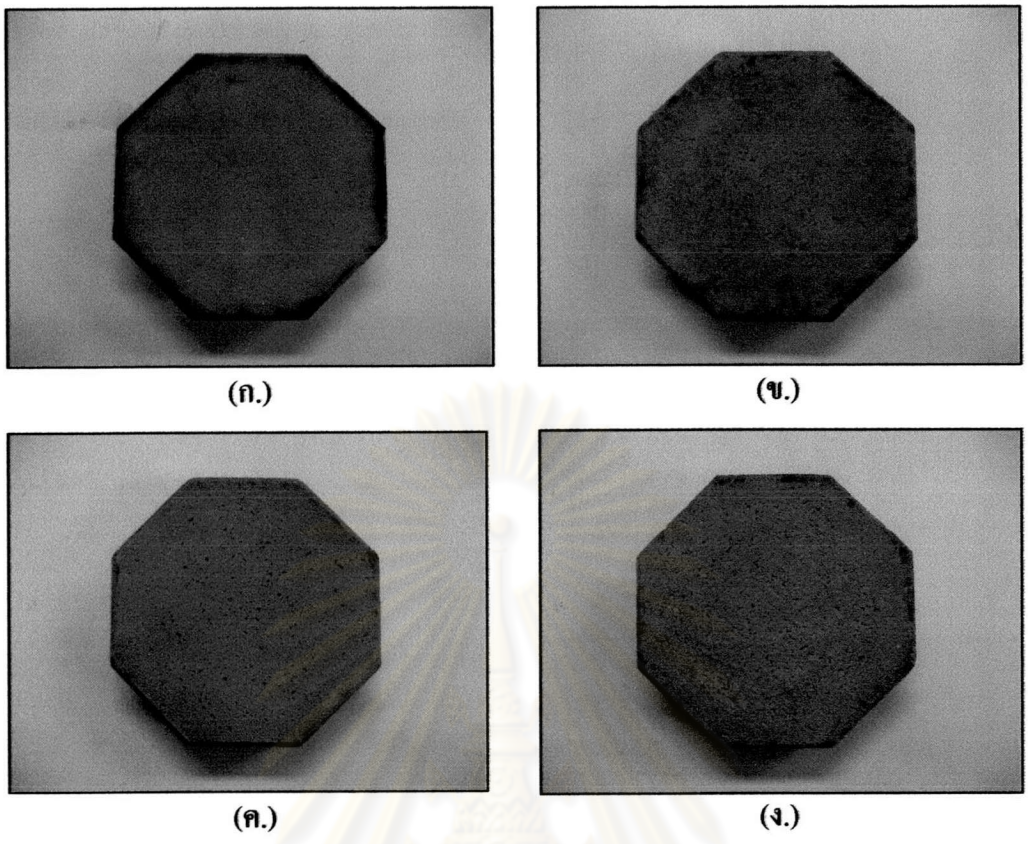
4.3.3 ความสามารถในการลดการชะละลายของคอนกรีตบล็อก

เมื่อหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่สภาวะเหมาะสมต่อการผลิตโดยใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้บล็อกประสานปูพื้นหน้าตัด 8 เหลี่ยม หนา 6 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 4.40 กิโลกรัมต่อก้อน มีชื่อเรียกทางการค้าว่า “อัฐศิลา” จากการทดลอง พบว่าความสามารถทำงานได้ของส่วนผสมคอนกรีตสดที่แตกต่างกันจะทำให้ได้

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีลักษณะผิวหน้าไม่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยสำหรับส่วนผสมที่มีความสามารถทำงานได้ต่ำสังเกตได้จากความพรุนของเนื้อและผิวหน้า แต่อย่างไรก็ตามลักษณะความพรุนที่สังเกตเห็นนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมากนัก คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซึ่งแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{ORG,\ UNT}$ $SA_{ORG,\ TRT}$ $SA_{100,\ UNT}$ และ $SA_{100,\ TRT}$ มีค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน เป็น 39.68 62.38 55.53 และ 72.06 เมกะปาสคาล ตามลำดับ สูงกว่าตัวอย่างลูกบาศก์โดยมีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดเป็น 33.33 44.53 73.10 และ 25.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐาน พบว่า มีเพียงคอนกรีตที่สัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{ORG,\ UNT}$ เท่านั้นที่มีค่าไม่ผ่านเกณฑ์ คิดเป็น 99.20 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐาน ขณะที่คอนกรีตแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุสถานะอื่นๆ ให้ค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{ORG,\ TRT}$ $SA_{100,\ UNT}$ และ $SA_{100,\ TRT}$ มีค่าคิดเป็น 155.95 138.83 และ 180.15 เปอร์เซ็นต์ของค่ามาตรฐาน ตามลำดับ และเมื่อลองเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ทั่วไปที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดซึ่งไม่ทราบระยะเวลาบ่มที่แน่นอน พบว่า คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{ORG,\ UNT}$ $SA_{ORG,\ TRT}$ $SA_{100,\ UNT}$ และ $SA_{100,\ TRT}$ ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะมีค่ากำลังรับแรงอัดเทียบกับของผลิตภัณฑ์ทั่วไป เป็น 47.53 74.72 66.51 และ 86.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างคอนกรีตขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่สภาวะเหมาะสมในแต่ละสถานะของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว



(ก.) (ข.)

(ค.) (ง.)

รูปที่ 4.20 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ

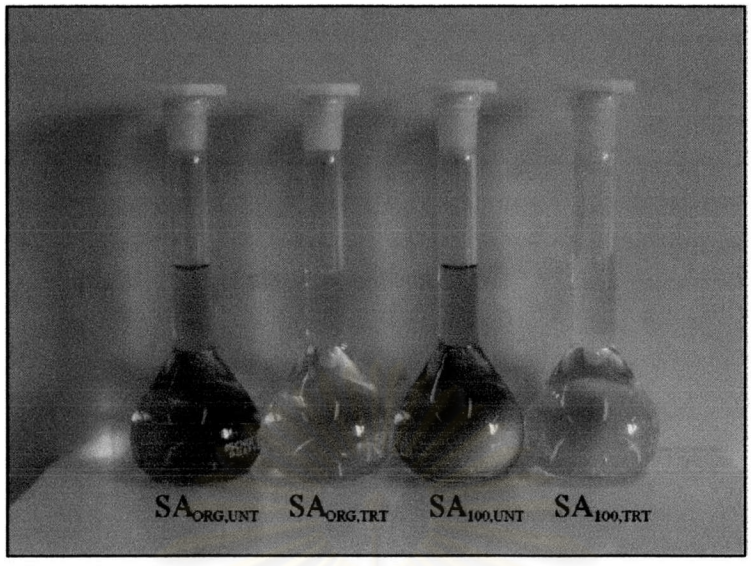
(ก.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม

(ข.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

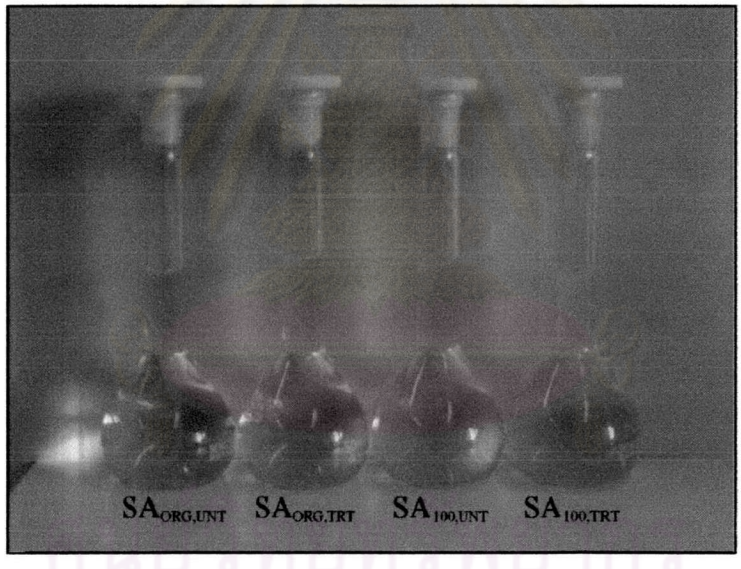
(ค.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน

(ง.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

จะเห็นได้ว่าซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนมีความเหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมากที่สุด ทั้งค่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานและไม่จำเป็นต้องสิ้นเปลืองพลังงานสำหรับการเผา และจากผลวิเคราะห์ประสิทธิภาพลดการชะละลายสารแอนทราควิโนนด้วยเมธานอลในตัวอย่างหลังจากผ่านการทำก้อนแข็งแล้ว โดยประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ (2541) และ ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ (2542) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ และการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 โดยใช้น้ำกลั่นที่ปรับค่าพีเอชเป็น 5 พบว่าน้ำชะละลายไม่ปรากฏสีของสารแอนทราควิโนนเลย ดังรูปที่ 4.21 เนื่องจากสารอินทรีย์ดังกล่าวไม่สามารถละลายได้ในน้ำ ประกอบกับสารแอนทราควิโนนไม่จัดเป็นสารอันตรายตามรายชื่อในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ. ศ. 2540) จึงสามารถยืนยันได้ว่าผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้นั้นสามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับปูพื้นได้จริง



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 4.21 สีของน้ำชะละลายซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (ก.) และคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ (ข.)

4.4 ประมาณค่าใช้จ่ายคอนกรีตบล็อกผลิตโดยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ราคาของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นทั่วไปขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบ และสีของผิวหน้า อัฐศิลาสีเทาจะมีราคาประมาณก้อนละ 8 บาท (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่มและค่าขนส่ง) สำหรับในงานวิจัยนี้ การคิดราคาค่าใช้จ่ายของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจะรวมค่าใช้จ่ายที่ใช้สำหรับ

การเตรียมวัสดุในระดับห้องปฏิบัติการไม่ว่าจะเป็นการบดอนุภาคให้ละเอียดหรือการเผาเพื่อกำจัดสารแอนทราควิโนนที่ปนเปื้อน ดังนั้นต้นทุนในการผลิตจึงขึ้นกับสัดส่วนและสถานะของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่เติมทดแทนซีเมนต์ โดยคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีราคาต้นทุนการผลิตอยู่ในช่วง 2.32 - 9.44 บาทต่อก้อน การเตรียมวัสดุโดยกระบวนการเผาเพื่อลดผลกระทบของสารอินทรีย์มีผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคของวัสดุ อีกทั้งขนาดที่เล็กลงทำให้สามารถลดปริมาณซีเมนต์จากการเติมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วในสัดส่วนที่มากขึ้น คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตจาก $SA_{ORG, UNT}$ จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นการประเมินราคาจะพิจารณาจากสัดส่วนที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยมีราคาต้นทุนเท่ากับ 2.32 บาทต่อก้อน ขณะที่การบดวัสดุจนมีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน ($SA_{100, UNT}$) สามารถใช้ทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีตได้มากขึ้นอีกทั้งค่ากำลังรับแรงอัดยังคงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีราคาต้นทุนเท่ากับ 2.74 บาทต่อก้อน ขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากการแทนที่ซีเมนต์ด้วย $SA_{ORG, TRT}$ และ $SA_{100, TRT}$ จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่ามาตรฐานเช่นกัน และมีราคาต้นทุนเป็น 6.80 และ 9.44 บาทต่อก้อน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่าการเตรียมซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วให้มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในการใช้เพื่อผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เนื่องจากให้ราคาต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าราคาผลิตภัณฑ์ทั่วไปที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด (รายละเอียดการคำนวณค่าใช้จ่ายแสดงในภาคผนวก ก.7)

ตารางที่ 4.11 ค่าใช้จ่ายของคอนกรีตบล็อกที่ผลิตจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ

	$SA_{ORG, UNT}$	$SA_{ORG, TRT}$	$SA_{100, UNT}$	$SA_{100, TRT}$
ต้นทุนการผลิต (บาทต่อก้อน)	2.32	6.80	2.74	9.44
ค่าใช้จ่ายในการบำบัด (บาทต่อตัน)	23,844.96	70,325.60	18,755.30	65,287.04
มูลค่าของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ (บาทต่อตัน)	82,224	82,736	54,760	55,328

วัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการบดสามารถเติมทดแทนซีเมนต์ได้น้อย (ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิมต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.10) โดยมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดประมาณ 23,800 บาทต่อตันของเสีย ซึ่งถ้าบดวัสดุให้มีขนาดเล็กลงจะสามารถแทนที่ซีเมนต์ในสัดส่วนที่มากขึ้น (ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.15) ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดลดลงถึงแม้ว่าจะต้องเพิ่ม

ค่าใช้จ่ายในกระบวนการบดวัสดุก็ตาม โดยมีค่าประมาณ 18,700 บาทต่อตันของเสีย และการเตรียมวัสดุโดยกระบวนการเผาอาจไม่เหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการเตรียมด้วยกระบวนการบด ขณะที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานเหมือนกัน อย่างไรก็ตามราคาค่าใช้จ่ายคำนวณได้อาจสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ทางโรงงานใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมีราคาค่าใช้จ่ายประมาณ 2,000 บาทต่อตันของเสีย แต่เมื่อพิจารณาในเชิงความคุ้มค่าแทนที่จะจัดการกับของเสียด้วยวิธีการเดิมซึ่งมีแต่ค่าใช้จ่าย คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตขึ้นจากของเสียดังกล่าวที่ได้มาตรฐานสามารถจำหน่ายได้ในท้องตลาดทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีมูลค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย