บทที่ 3
แผนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ ตลอดจนแนวทางในการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นของเสียทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุร่วมเพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานก่อสร้าง งานวิจัยสามารถแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 4 การทดลอง ส่วนแรกเป็นการเตรียมวัสดุ ได้แก่ ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว และวัสดุผสมสำหรับการดำเนินงานวิจัย การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ การกระจายของขนาดอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีและความเป็นวัสดุปอซโซลาน การทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เช่น อัตราส่วนวัสดุผสมต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ต่อวัสดุประสาน ตลอดจนระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง และศึกษาประสิทธิภาพในการลดสีที่เกิดจากการชะละลายสารแอนทราควิโนนในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตได้ สุดท้ายเป็นการประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ โดยทำการวิจัยทั้งหมดที่ห้องปฏิบัติการบัณฑิตและวิจัย ห้องปฏิบัติการขยะ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและทดสอบวัสดุของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

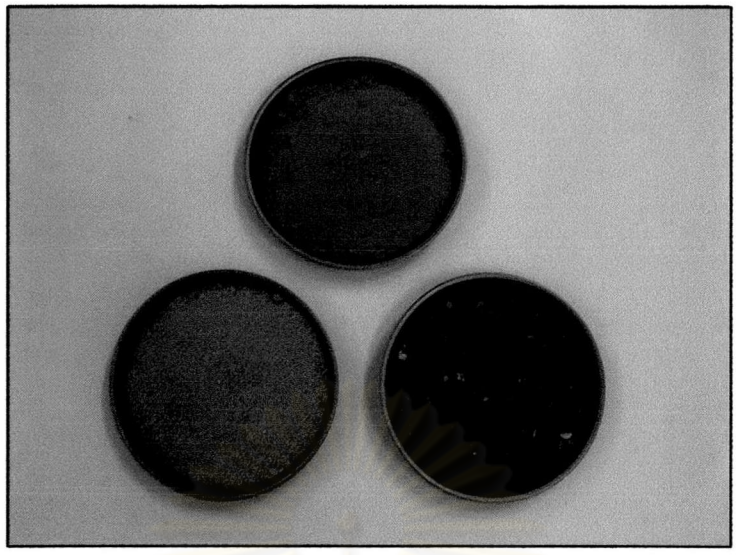
3.1 การเตรียมวัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบ

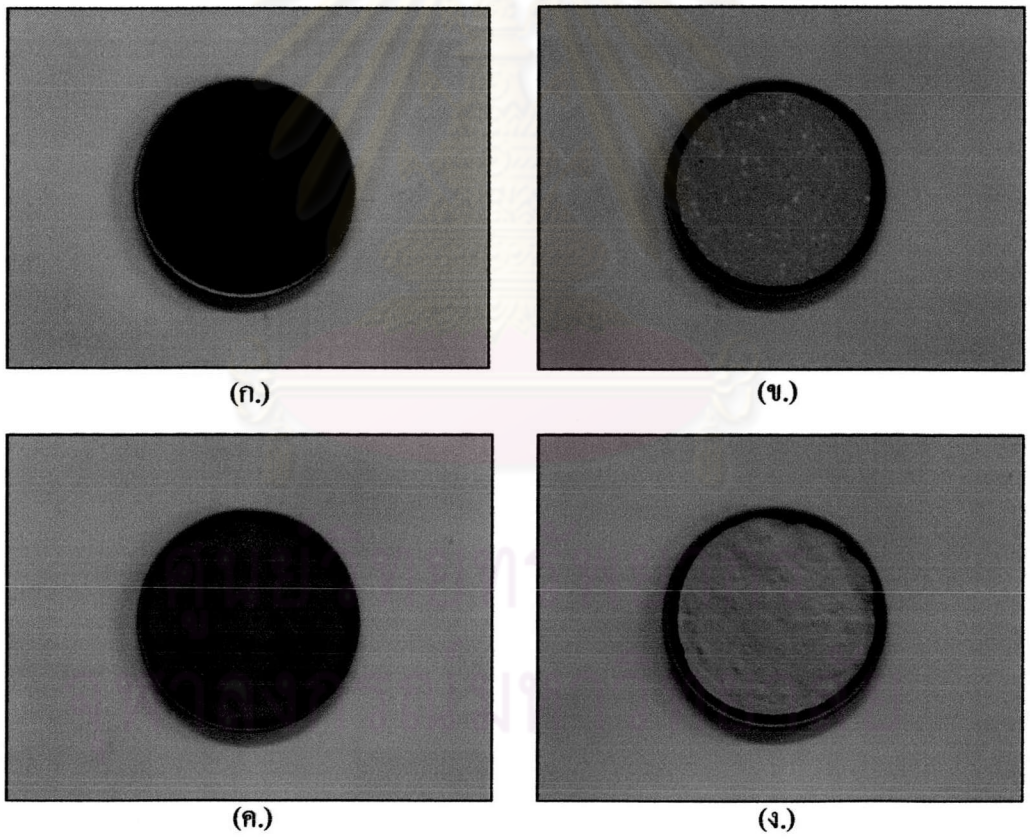
- ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ตราช้าง (Ordinary Portland Cement, OPC) แสดงดังรูปที่ 3.1
- หินเกล็ด และทรายละเอียด แสดงดังรูปที่ 3.1
- ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว (Spent silica-alumina, SA): จากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จังหวัดระยอง แสดงดังรูปที่ 3.2
- น้ำประปา

3.1.2 สารเคมี

- กรดซัลฟูริก
- กรดไนตริก
- น้ำกลั่น



รูปที่ 3.1 วัสดุประสาน (ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1) และวัสดุผสม (ทรายและหินเกล็ด)



(ก.) (ข.)

(ค.) (ง.)

รูปที่ 3.2 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเตรียมที่สถานะต่างๆ

(ก.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะดั้งเดิม

(ข.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

(ค.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน

(ง.) ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

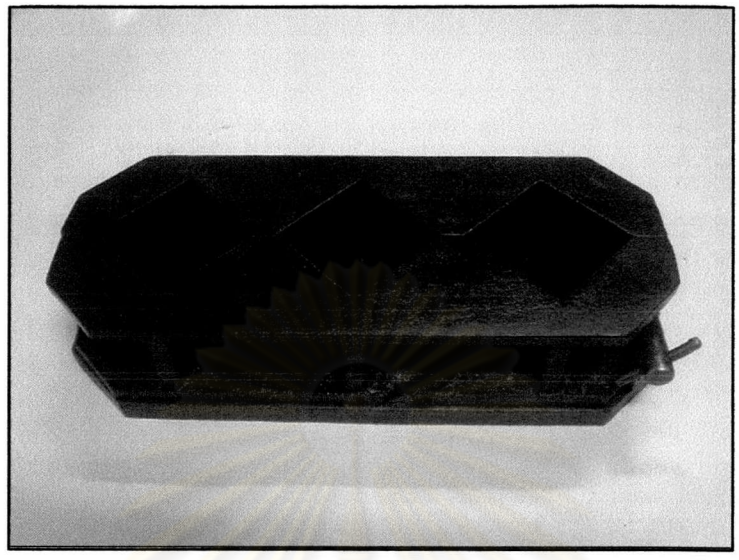
3.1.3.1 การหล่อแบบและทดสอบสมบัติทางกายภาพของก้อนตัวอย่าง

- เครื่องชั่ง: ขนาด 3,100 กรัม อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม
- กระบอกตวง: ขนาด 500 มิลลิลิตร อ่านค่าได้ละเอียด 10 มิลลิลิตร
- แบบหล่อตัวอย่างลูกบาศก์: ขนาด 5 เซนติเมตร หรือ 2 นิ้ว แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก.)
- แบบหล่อบล็อกคอนกรีตประสานปูพื้นหน้าตัด 8 เหลี่ยมกว้างด้านละ 8 เซนติเมตร หนา 6 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 (ข.)
- เครื่องผสม (Mixer) มอร์ตา และคอนกรีต
- แท่งกระทุ้ง (Tamper): ขนาดหน้าตัด 0.5 x 0.5 ตารางนิ้ว ยาว 5 - 6 นิ้ว ปลายตัดเรียบและหน้าตัดตั้งฉากกับแกนมือจับ ทำจากวัสดุไม่ดูดซึมน้ำ
- เกรียง: ทำด้วยเหล็กแบน ขอบสันเกรียงเป็นเส้นตรงยาว 100 ถึง 150 มิลลิเมตร
- เครื่องทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดก้อนตัวอย่าง: น้ำหนักกดสูงสุด 30 ตัน และ 500 ตัน แสดงดังรูปที่ 3.4
- กรวยเหล็กมาตรฐานสำหรับทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ: เส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบน 40 $\pm$ 3 มิลลิเมตร ด้านล่าง 90 $\pm$ 3 มิลลิเมตร สูง 75 $\pm$ 3 มิลลิเมตร หนาอย่างน้อย 0.8 มิลลิเมตร

3.1.3.2 การทดสอบหาประสิทธิภาพในการลดการชะละลาย

- ตะแกรงร่อนขนาด 9.5 มิลลิเมตร
- เครื่องชั่ง: ขนาด 210 กรัม อ่านค่าได้ละเอียด 0.0001 กรัม
- ขวดพลาสติกมีฝาปิด: ขนาด 2 ลิตร
- เครื่องเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator): อัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 3.5
- กระบอกตวง: ขนาด 2,000 มิลลิลิตร อ่านค่าได้ละเอียด 10 มิลลิลิตร
- กระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 - 0.8 ไมครอน
- เครื่องวัดพีเอช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



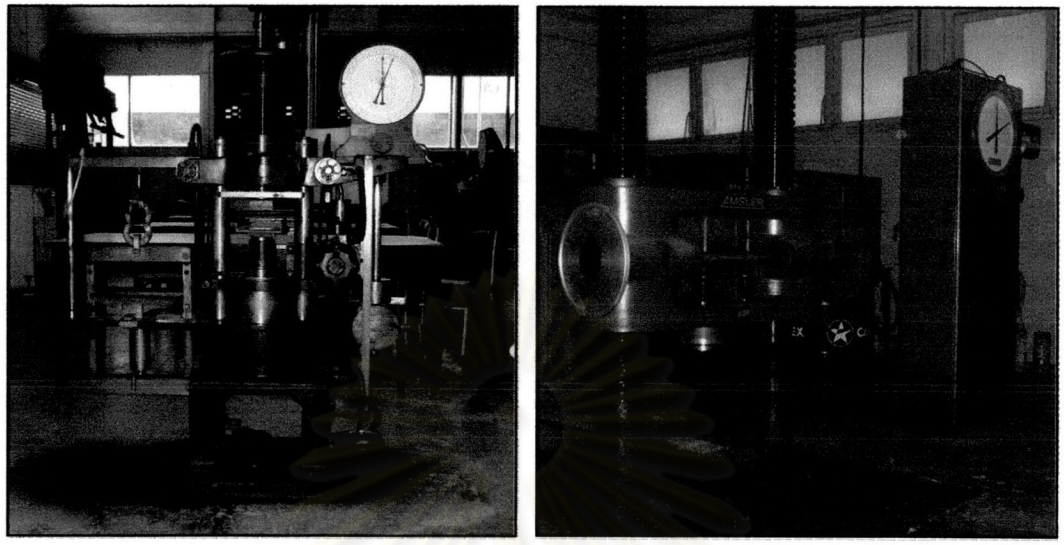
(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.3 แบบหล่อคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย

(ก.) แบบหล่อก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

(ข.) แบบหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นหน้าตัด 8 เหลี่ยม มีชื่อเรียกทางการค้าว่า "อัฐศิลา"



(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด
(ก.) สำหรับก้อนตัวอย่างลูกบาศก์ น้ำหนักกดสูงสุด 30 ตัน
(ข.) สำหรับคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น น้ำหนักกดสูงสุด 500 ตัน

รูปที่ 3.5 เครื่องเขย่าแบบหมุนตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6

3.1.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุ

- เตาเผาอุณหภูมิสูงสุด 1,200 องศาเซลเซียส
- ตะแกรงคัดแยกขนาดมาตรฐานและเครื่องเขย่า
- เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค
- เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-ray fluorescence spectrometer

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ตัวแปรอิสระ

- อัตราส่วนผสมของซิลิกา-อะลูมินาต่อวัสดุประสาน (SA / B)
- อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุผสม (Aggregate) และวัสดุประสาน
- สถานะของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ได้แก่ สถานะดั้งเดิม ($SA_{ORG, UNT}$) ขนาดดั้งเดิมและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ($SA_{ORG, TRT}$) ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอน ($SA_{100, UNT}$) และ ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ($SA_{100, TRT}$) (ดังแสดงในรูปที่ 3.2)
- ระยะเวลาบ่มตัวอย่างคอนกรีต

3.2.2 ตัวแปรตาม

- ความหนาแน่นและค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง
- ปริมาณของสารแอนทราควิโนนในน้ำชะละลาย

3.2.3 ตัวแปรควบคุม

- ชนิดและขนาดของวัสดุ
- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การทดลองที่ 1 การเตรียมวัสดุสำหรับการวิจัย

3.3.1.1 การเผาซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

เตรียมตัวอย่างซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 50 กรัม เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แปรค่าระยะเวลาที่ใช้ ตั้งแต่ 0 ถึง 10 ชั่วโมง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเตรียม

วัสดุ พิจารณาจากค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss on ignition, L.O.I) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C311-96a และ C114-94 (ภาคผนวก ก.4)

3.3.1.2 การบดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

บดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วทั้งชนิดเผาและไม่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Ball mill เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ภาชนะบรรจุเป็นกระป๋องพลาสติกความจุ 3 แกลลอน (ประมาณ 11 ลิตร) บดด้วยลูกบอลอะลูมินาคละขนาด ที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้นร่อนวัสดุที่ผ่านการบดแล้วด้วยตะแกรงขนาดมาตรฐานเบอร์ 100 ซึ่งมีขนาดช่องเปิดเป็น 150 ไมครอน

3.3.1.3 การเตรียมวัสดุผสม

ล้างหินเกล็ดด้วยน้ำสะอาด แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส อบทรายให้แห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน

3.3.2 การทดลองที่ 2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.3.2.1 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี X-ray fluorescence spectrometer ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งองค์ประกอบที่วิเคราะห์จะแสดงผลในรูปของสารประกอบออกไซด์ของธาตุ โดยทำการวิเคราะห์หาธาตุ Al Ca Fe K Mg Na Si และ S เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการอธิบายผลของลักษณะทางกายภาพต่างๆ ของก้อนตัวอย่าง และเปรียบเทียบกับข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-96

3.3.2.2 การทดสอบหาค่าดัชนีกำลัง (Strength activity index) ของวัสดุปอซโซลาน ซึ่งได้แก่ ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ เทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

การทดสอบค่าดัชนีกำลังของวัสดุปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C311-96a โดยหล่อมอร์ตาในสัดส่วนการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ และทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 และ 60 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109-95 เปรียบเทียบกับสัดส่วนควบคุมที่ไม่มีการเติมวัสดุปอซโซลานที่ระยะเวลาการบ่มเดียวกัน รายละเอียดวิธีการทดสอบแสดงในภาคผนวก ก.3 และ ก.5

3.3.2.3 การวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค (Particle size distribution) ของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว และวัสดุผสม

การกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) ที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของหินเกล็ดและทรายใช้การคัดแยกด้วยตะแกรงโดยเครื่องเขย่า (Sieve analysis) ตามมาตรฐาน ASTM C33-93 และ ASTM C136-95a

3.3.2.4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific gravity and absorption)

ทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะ และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ และวัสดุผสมตามมาตรฐาน ASTM C128-93 เพื่อหาความต้องการน้ำของวัสดุ เพื่อเป็นการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลอง (รายละเอียดการหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำแสดงในภาคผนวก ก.1 และ ก.2)

3.3.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นโดยใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

3.3.3.1 การทดลองที่ 3.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น โดยแปรค่าอัตราส่วนของส่วนผสมซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดเท่ากับ 1:0.8:1.2 1:1.2:1.8 1:2:3 1:3:5 1:4:6 และ 1:4:7 โดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมศึกษาโดย Shin และ Sujiwatthana, 1988; ประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ, 2541; ไลทิพย์ อภิธรรม-วิริยะ, 2542) และระยะเวลาในการบ่มที่ 7 และ 28 วัน คำนวณความหนาแน่น ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด เพื่อหาสัดส่วนผสมพื้นฐานที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.1 การแปรค่าซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเกล็ดเพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ซีเมนต์:ทราย:หินเกล็ด	ค่าที่ต้องการทดสอบ
1:0.8:1.2	
1:1.2:1.8	
1:2:3	
1:3:5	
1:4:6	
1:4:7	

3.3.3.2 การทดลองที่ 3.2 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัสดุซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วสถานะต่างๆ ต่อซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยหล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร แปรค่าอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานเป็น 0.05 0.10 0.15

0.25 และ 0.35 โดยใช้ค่าอัตราส่วนของวัสดุประสานต่อทรายต่อหินเกล็ดที่ได้จากการทดลองที่ 3.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 และแปรระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างที่ 7 14 21 และ 28 วัน คำนวณความหนาแน่น ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.2 การศึกษาอัตราส่วนซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วต่อวัสดุประสานและระยะเวลาการบ่มที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง	ค่าที่ต้องการทดสอบ				
	SA / B (4 สถานะ)				
	0.05	0.10	0.15	0.25	0.35
7					
14					
21					
28					

3.3.3.3 การทดลองที่ 3.3 ศึกษาสมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นและความสามารถในการลดการชะละลายของสารแอนทราควิโนนในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในการทำวัสดุปูพื้นเพื่อการก่อสร้าง

หล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นในสภาวะเหมาะสมได้จากการทดลองที่ 3.1 และ 3.2 ทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด และความสามารถในการถูกชะละลายของสารแอนทราควิโนนในคอนกรีตบล็อกรูปแบบเดียวกับที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด โดยใช้ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วชนิดที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ทั้งบดและไม่บด วิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบสีโดย Spectrophotometer ของน้ำชะละลายก้อนตัวอย่างคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ซึ่งการชะละลายใช้มาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 ปี พ.ศ. 2540 แสดงรายละเอียดขั้นตอนวิธีการทดสอบไว้ในภาคผนวก ก.6

3.3.4 การทดลองที่ 4 ประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำเป็นคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นเพื่อการก่อสร้าง และเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกประเภทเดียวกันที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ตลอดจนคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วในหน่วยราคาบาทต่อตันของเสีย ด้วยกระบวนการทำก้อนแข็งและนำมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุปูพื้นถนน และทางเท้า เปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการบำบัดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วของโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน คือการเผาในเตาเผาซีเมนต์ซึ่งมีค่าใช้จ่ายประมาณ 2,000 บาทต่อตันของเสีย