

การเตรียมบล็อกปูทางเท้าพรมน้ำจากเศษเซรามิกโดยใช้เคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF PERVIOUS PAVING BLOCK FROM CERAMIC PITCHER USING CERAMIC
GLAZE AS BONDING MATERIALS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมบล็อกปูทางเท้าพรมน้ำจากเศษเซรามิกโดยใช้เคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน
โดย	น.ส.พิมพ์รัมภา กิติธรากุล
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.นิธิวัชร นวอัครฐานันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.นิธิวัชร นวอัครฐานันท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จรัสพร มงคลขจิต)

พิมพ์ธรรมา กิติธรรมากุล : การเตรียมบล็อกปูทางเท้าพอร์ซันน้ำจากเศษเซรามิกโดยใช้เคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน. (PREPARATION OF PERVIOUS PAVING BLOCK FROM CERAMIC PITCHER USING CERAMIC GLAZE AS BONDING MATERIALS)

อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.นิธิวัชร นวอักษร
ฐานันท์

ปัญหาน้ำท่วมขังหลังจากที่เกิดฝนตกหนัก มักเป็นปัญหาใหญ่สำหรับพื้นที่ในเขตเมืองหลวง ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับผู้คนที่สัญจรบนท้องถนน การนำบล็อกพอร์ซันที่มีความสามารถในการระบายน้ำได้มาใช้ทำเป็นพื้นสำหรับทางเดินสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ โดยทั่วไปแล้วบล็อกพอร์ซันที่มีความสามารถในการระบายน้ำที่สูงมักจะทำให้ค่าความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากมีรูพอร์ซันอยู่ในโครงสร้างของชิ้นงานมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำเศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ ที่แตกหักเสียหายจากอุตสาหกรรมเซรามิกประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารที่ผ่านการบดและคัดขนาด 2 - 5 มิลลิเมตร มาใช้เป็นมวลรวมหยาบสำหรับการทำบล็อกพอร์ซันและเลือกใช้เคลือบเซรามิกขาวทึบมาเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยมือในแม่พิมพ์ และได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของบล็อกพอร์ซัน พบว่ามีปัจจัยหลัก 4 ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของบล็อกพอร์ซัน ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพอร์ซัน อัตราส่วนระหว่างมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน ขนาดของเศษเซรามิกที่ใช้เป็นมวลรวม และความเข้มข้นของเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน นอกจากนี้ยังได้หาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปบล็อกพอร์ซันที่ให้อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำและค่าความแข็งแรงที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าบล็อกพอร์ซันปูทางเท้าที่ประกอบด้วยเศษเซรามิกขนาด 2 - 5 มิลลิเมตร ปริมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก วัสดุเชื่อมประสานปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในวัสดุเชื่อมประสานประกอบด้วยสัดส่วนผงเคลือบแห้งต่อน้ำ ร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก และเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดที่ 24.57 MPa ความหนาแน่น 1.64 g/cm³ ค่าความพอร์ซันตัว 30.43% และอัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ 897.74 L/m².min

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270079023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: pervious pavement, ceramic scrap, pitcher, porous ceramic

Pimrampa Kititarakul : PREPARATION OF PERVIOUS PAVING BLOCK FROM CERAMIC PITCHER USING CERAMIC GLAZE AS BONDING MATERIALS. Advisor: Asst. Prof. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D. Co-advisor: Nithiwach Nawaukkaratharnant, Ph.D.

Urban flooding always occurs after heavy precipitation which is a serious issue in a big city that impacts on pedestrians. This study focuses on reusing waste products from the ceramic industries called pitcher in order to create pervious paving bricks. It is obvious that the brick using large grain aggregate provides lower strength with high porosity, leading to enhance the permeability rate. Ceramic pitcher from stoneware-grade tableware factory is crushed and sieved between 2-5 mm. Then, crushed pitcher is considered as the large aggregate mixed with white-opaque glaze slurry and hand-formed in a mold. It is found that there are four major factors that affect to strength, bulk density, apparent porosity, and permeability rate of pervious paving brick. Therefore, this research tries to find out the most suitable condition to produce the brick that has both strength and permeability. The optimal condition for this research is 80 wt% of large aggregate (size 2-5 mm) and 20 wt% of glaze slurry. In the term of glaze slurry, the best combination is 71.43 wt% of glaze powder and 28.57 wt% of water and firing at 1200 °C, respectively. The result show that the brick samples have a high compressive strength of 24.57 MPa, a permeability rate at 897.74 L/m²-min, a bulk density of 1.64 g/cm³, and apparent porosity of 30.43%.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับงานวิจัยนี้ข้าพเจ้านางสาวพิมพ์ธรรมา กิติธรรมากุล ขอขอบพระคุณความเมตตาปราณีของอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. นิธิวัชร นวอัครฐานันท์ ที่คอยสั่งสอน ให้ความรู้ คำปรึกษาต่างๆ ตลอดการทำงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ คณะกรรมการทุกท่านที่ช่วยปรับปรุงแก้ไขให้งานวิจัยเล่มนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับความรู้ ความเมตตา ที่มอบให้แก่ניתิติตอย่างข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกอบอุ่นใจที่ได้เข้ามาศึกษาในระดับปริญญาโทที่ภาควิชาแห่งนี้

ขอขอบพระคุณ หน่วยวิจัยเมืองชั้นนำเพื่อรับมือต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Water Resilient City Unit (WRCU) โครงการ GAICCE Research Grant from ASEAN University Network/Southeast Asia Engineering Education Development Network (AUN/SEED-net) และภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเงินทุนอุดหนุนสำหรับการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ พี่จ่อย พี่เหลียง สำหรับความช่วยเหลือ ความรู้ในการใช้เครื่องมือต่างๆ แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการที่คอยช่วยประสานงานด้านเอกสารให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า คุณพ่อ คุณแม่ คุณป้า คุณลุง และน้องๆ ที่น่ารักของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจ คอยส่งเสริมสิ่งต่างๆที่ข้าพเจ้าได้ทำอยู่ให้สำเร็จ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณพี่หมิง รุ่นพี่ทุกท่าน และเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยให้ความรู้ ให้กำลังใจ และคอยผลักดันให้ข้าพเจ้าทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จ

พิมพ์ธรรมา กิติธรรมากุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัย	4
2.1 บล็อกพ룬	4
2.2 เศษเซรามิก.....	6
2.2.1 ประเภทของเซรามิก	6
2.2.2 การกำจัดชิ้นงานที่เสียหายในอุตสาหกรรมเซรามิก	7
2.3 เคลือบเซรามิก	8
2.3.1 ความแข็งแรงของเคลือบเซรามิก	8
2.3.2 ส่วนประกอบของเคลือบเซรามิก	9
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	15

3.1	วัตถุประสงค์สำหรับการทำบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก.....	15
3.1.1	มวลรวม.....	15
3.1.2	วัสดุเชื่อมประสาน	16
3.2	วิธีการขึ้นรูปบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก.....	16
3.3	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของบล็อกพรุน	20
3.3.1	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก.....	20
3.3.2	อัตราส่วนระหว่างมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน	20
3.3.3	ขนาดของเศษเซรามิก.....	20
3.3.4	ความเข้มข้นของน้ำเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	21
3.4	ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน.....	24
3.4.1	การทดสอบความหนาแน่นและความพรุนตัวปรากฏ.....	24
3.4.2	การทดสอบหาอัตราการไหลซึมผ่านน้ำ.....	25
3.4.3	การทดสอบความแข็งแรงของบล็อกพรุน	26
3.5	ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของรูพรุนภายในบล็อกพรุน	27
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	29
4.1	ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมประสานและมวลรวม.....	29
4.1.1	ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมประสาน	29
4.1.2	ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเศษเซรามิก	29
4.2	ผลการทดสอบหาช่วงอุณหภูมิการเผาของวัสดุเชื่อมประสาน.....	30
4.3	ผลการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน	31
4.3.1	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก.....	31
4.3.2	อัตราส่วนระหว่างมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน	33
4.3.3	ขนาดของเศษเซรามิก.....	36
4.3.4	ความเข้มข้นของน้ำเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	39

4.4 สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปบล็อกพรุน	42
4.5 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน	42
4.6 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของรูพรุนภายในบล็อกพรุน	44
4.6.1 การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด	44
4.6.2 การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนในปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก	44
4.6.3 การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนในปัจจัยด้านปริมาณวัสดุเชื่อม ประสาน.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการวิจัย	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
ภาคผนวก.....	53
บรรณานุกรม.....	70
ประวัติผู้เขียน.....	74

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสารประกอบออกไซด์ในแต่ละกลุ่ม	9
ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอิฐเซรามิกพูน	10
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการขึ้นรูปบล็อกพูนในการทดลองสำหรับปัจจัยต่างๆ	21
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดในแต่ละเงื่อนไขของการขึ้นรูปบล็อกพูน	28
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของทางเคมีของเคลือบขาว	29
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเศษเซรามิกเนื้อสีตันแวร์	30
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบช่วงอุณหภูมิการเผาเคลือบขาวที่บ	30
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพูนที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ	32
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพูนที่อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานต่างๆ.....	34
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพูนที่อัตราส่วนในแต่ละขนาดของเศษเซรามิก.....	37
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพูนที่อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวที่บแห้งและน้ำที่สัดส่วนต่างๆ.....	39
ตารางที่ 4.8 สมบัติทางภาพของบล็อกพูนจากเศษเซรามิก	42
ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพูนจากเศษเซรามิก	43
ตารางที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพูนจากเศษเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด	46
ตารางที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพูนที่ศึกษาปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก.....	47
ตารางที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพูนที่ศึกษาปัจจัยด้านปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน	48

ตารางที่ 4.13 ปริมาณรูปพูนในโครงสร้างบล็อกพูน..... 49



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 บล็อกพรุนในแต่ละประเภท ก) Porous asphalt ข) Pervious concrete	5
รูปที่ 2.2 บล็อกพรุนจากเศษเซรามิก.....	5
รูปที่ 2.3 เศษเซรามิกที่แตกหัก.....	7
รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดแรงต้านระหว่างเคลือบและเนื้อดิน.....	8
รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของอิฐพรุน ก) รูปพรุนขนาดเล็กที่เกิดจากการสันดาปของสารอินทรีย์ในโคลน	12
รูปที่ 2.6 อิฐพรุนที่มีอัตราส่วนของโคลนต่อผงแก้วที่ต่างกัน	13
รูปที่ 3.1 เศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ ก) มวลรวมละเอียด ข) มวลรวมหยาบ.....	15
รูปที่ 3.2 เตา Gradient 6 ช่วงอุณหภูมิ ของบริษัท Nabertherm รุ่น GR 1300/13	16
รูปที่ 3.3 เครื่อง Vibrating sieve เบอร์ 304 ขนาด 500 x 100 มิลลิเมตร	17
รูปที่ 3.4 ก) เครื่องมือ High speed ball mill ข) หม้อบดพอร์ซเลน	17
รูปที่ 3.5 เศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ ก) ยังไม่ผ่านการบดแห้ง ข) ผ่านการบดแห้งในหม้อบดพอร์ซเลน ด้วยเครื่องมือ High speed ball mill เป็นเวลา 30 นาที.....	18
รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal lab mixer	18
รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก	19
รูปที่ 3.8 บล็อกพรุนจากเศษเซรามิกก่อนเผา	19
รูปที่ 3.9 เตาเผาไฟฟ้าของบริษัท UTSAKAN จำกัด	19
รูปที่ 3.10 บล็อกพรุนจากเศษเซรามิกขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร.....	24
รูปที่ 3.11 การเตรียมบล็อกพรุนสำหรับการทดสอบอัตราการไหลซึมผ่านน้ำ	25
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ทดสอบอัตราการไหลซึมผ่านน้ำของบล็อกพรุน	26
รูปที่ 3.13 เครื่องมือ Universal testing machine ของบริษัท Instron รุ่น 5843	26

รูปที่ 3.14 เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร(Micro-CT) ของบริษัท Bruker รุ่น SKYSCAN 1173.....	27
รูปที่ 3.15 บล็อกพูนจากเศษเซรามิก ขนาด 2×2×2 เซนติเมตร	27
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพูนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้ อุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกัน	33
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่านของน้ำและความพูนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้ สัดส่วนมวลรวมหยาบและปริมาณเคลือบที่ต่างกัน	34
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพูนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้ สัดส่วนมวลรวมหยาบและปริมาณเคลือบที่ต่างกัน	36
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพูนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้ สัดส่วนมวลรวมละเอียดที่ต่างกัน.....	38
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบอัตราการความพูนตัวปรากฏและการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพูนที่สัดส่วน มวลรวมละเอียดที่แตกต่างกัน	38
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพูนตัวปรากฏของบล็อกพูนใน สัดส่วนการใช้เคลือบแห้งที่ต่างกัน	40
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอัตราการไหลซึมผ่านของน้ำและความพูนตัวปรากฏของบล็อกพูนใน สัดส่วนการใช้เคลือบแห้งที่ต่างกัน	41
รูปที่ 4.8 บล็อกพูน ก) เจือไนเซสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูป ข) เจือไนเซสัดส่วนของปริมาณ มวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด	44
รูปที่ 4.9 บล็อกพูนที่ใช้เจือไนเซสัดส่วนปริมาณวัสดุเชื่อมประสานต่อมวลรวมหยาบ	45
รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพูนจากเศษเซรามิก	50
รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพูนที่ศึกษาในปัจจุบันด้านปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน	50
รูปที่ 5.1 บล็อกพูนจากเศษเซรามิก.....	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาน้ำท่วมซึ่งเกิดจากหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นการระบายน้ำไม่ทัน การอุดตันของท่อระบายน้ำ หรือการวางตำแหน่งของท่อระบายน้ำไม่เหมาะสม ทำให้ไม่สามารถระบายน้ำลงท่อได้ มักพบบ่อยตามผิวทางเดินหลังจากที่เกิดฝนตก พื้นที่ซักล้าง ทางเดินในสวน พื้นที่บริเวณหน้าบ้าน หรือลานจอดรถ ซึ่งก่อให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้ชีวิตประจำวัน อีกทั้งยังสามารถก่อให้เกิดอุบัติเหตุ เช่น การลื่นล้ม รวมทั้งปัญหาจราจรติดขัด ได้อีกด้วย ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้หลากหลายวิธี โดยวิธีที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งก็คือการใช้วัสดุปูพื้นที่มีความสามารถในการระบายน้ำ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 4 ประเภท ได้แก่ Porous asphalt, Pervious concrete, Permeable Interlocking Concrete Pavement (PICP) และประเภทอื่นๆ เช่น Grid Pavement เป็นต้น โดยบล็อกปูทางเท้าพอร์นน้ำทั่วไปมีสมบัติความพรุนตัวที่ค่อนข้างสูงทำให้น้ำผ่านได้เร็ว บล็อกปูทางเท้าพอร์นน้ำที่มีความพรุนในผลิตภัณฑ์มากจะยังมีความสามารถในการระบายน้ำมากยิ่งขึ้น แต่รูพรุนที่เพิ่มมากขึ้นในบล็อกพอร์นส่งผลให้ความหนาแน่นและความแข็งแรงลดน้อยลง

บล็อกพอร์นมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ มวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน ทั้งสองส่วนนี้ส่งผลต่อความแข็งแรง ปริมาณรูพรุน ความสามารถในการซึมผ่านน้ำของบล็อกพอร์น ในวิจัยนี้จึงได้พัฒนาบล็อกปูทางเท้าพอร์นน้ำให้มีความสามารถในการระบายน้ำมากยิ่งขึ้นแต่ยังคงความสามารถในการรับแรงได้ โดยเลือกใช้เศษเซรามิกและเคลือบเซรามิก เป็นมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน โดยเศษเซรามิกที่เลือกใช้เป็นที่เป็เซรามิกเนื้อสโตนแวร์ จากอุตสาหกรรมเซรามิกประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการผลิตและส่งออกมากที่สุด ทำให้มีผลิตภัณฑ์หลังการเผาที่เกิดการเสียหาย การแตกหัก เกิดรอยร้าว รอยบิ่นในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากตาม จึงนำของเสียกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อใช้ประโยชน์อีกครั้งหรือที่เราเรียกว่า การรีไซเคิล อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเศษเซรามิกที่แตกหักอีกด้วย เซรามิกที่ผ่านการเคลือบและเผาจะมีสมบัติความแข็งแรงสามารถรับแรงกดได้ดี ทนทานต่อการขีดถู ทนต่อสารเคมีได้ดี ส่วนเคลือบเซรามิกที่นำมาใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เมื่อมีการเผาที่อุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 800-1300°C เคลือบจะเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน กลายเป็นของไหลที่มีความหนืด ทำให้สามารถเคลือบอยู่บนผิวมวลรวมหยาบได้ดี มีการสร้างพันธะที่แข็งแรงยึดติดกันระหว่างตัวมวลรวมหยาบ เป็นเนื้อแก้วไม่ดูดซึมน้ำ ผิวของเคลือบมีความแข็งแรง ทนทาน ทนต่อการเกิดรอย การเคลือบยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เซรามิกได้อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาบล็อกปูทางเท้าพูนน้ำสำหรับปูทางเดินจากเศษเซรามิกที่แตกหัก โดยนำมาบดหยาบและคัดขนาด โดยเลือกใช้เคลือบเซรามิกมาเป็นวัสดุเชื่อมประสาน เมื่อเคลือบได้รับความร้อนจะเกิดการหลอมเป็นของเหลวทำให้สามารถเชื่อมประสานกับเศษเซรามิกได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการทดลองหาสูตรเคลือบ อุณหภูมิที่การเผาและขนาดมวลรวมที่เหมาะสม แล้วทำการวัดสมบัติทางกายภาพในของชิ้นงานหลังจากการเผา ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำและความแข็งแรงต่อแรงกด โดยชิ้นงานต้องมีสมบัติดังกล่าวที่ผ่านมาตรฐาน ACI 522 (2010) มาตรฐาน GB/T 25993 (2010) และมากกว่าผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ความพรุนตัว ความหนาแน่น และการซึมผ่านของน้ำของบล็อกปูทางเท้าพูนน้ำที่เตรียมจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบเซรามิกเป็นตัวเชื่อมประสาน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงวิธีการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานบล็อกพูนน้ำจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานเพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่ดี ได้แก่ ความแข็งแรง รูพรุน อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำและความหนาแน่นของชิ้นงาน

- 1.) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเคลือบเซรามิก
- 2.) ศึกษาปัจจัยของมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสานที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพูน ขึ้นรูปชิ้นงานในแม่พิมพ์ขนาด 5×5×5 เซนติเมตร โดยปัจจัยที่ศึกษามีทั้งหมด 4 ส่วนด้วยกัน ได้แก่
 - ขนาดของเศษเซรามิก
 - ความเข้มข้นของเคลือบเซรามิก
 - อัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกและเคลือบเซรามิก
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา
- 3.) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพูนจากเศษเซรามิกขนาด 5×5×5 เซนติเมตร ที่ขึ้นรูปโดยใช้สัดส่วน ปริมาณ หรือขนาดของมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกันไป ซึ่งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่สนใจ ได้แก่
 - ค่าความแข็งแรงต่อแรงกด
 - อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ
 - ความพรุนตัว

- ความหนาแน่นของชิ้นงาน

4.) ศึกษาลักษณะของรูพรุนภายในโครงสร้างของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก โดยขึ้นรูปชิ้นงาน 2x2x2 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซเรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร (Micro-CT) และใช้โปรแกรม 3D Slicer ในการประมวลผลออกมาในรูปแบบ 3 มิติและภาพตัดขวางของชิ้นงานในรูปแบบ 2 มิติ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้บล็อกปูทางเท้าพรุนน้ำเพื่อการระบายน้ำโดยมีความแข็งแรงและมีการไหลผ่านของน้ำได้ดี ผ่านมาตรฐาน ACI 522 (2010) มาตรฐาน GB/T 25993 (2010) และมากกว่าผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัย

2.1 บล็อกพรุน

บล็อกพรุน หรือ Permeable pavement system (PPS) มีการใช้งานที่หลากหลายไม่ว่าจะเป็นการใช้งานในที่อยู่อาศัยทางเท้า ลานจอดรถ หรือถนนต่างๆ[1,2] มีความพรุนตัวในชั้นงานสูง ทำหน้าที่ระบายน้ำจากผิวทางเดินลงสู่ชั้นดิน ซึ่งสามารถช่วยแก้ไขปัญหาน้ำท่วมขังในเขตเมืองได้[3,4] บล็อกพรุนโดยทั่วไปจะมีความพรุนตัวในโครงสร้างตั้งแต่ 15% ถึง 30% และมีขนาดของรูพรุนอยู่ที่ 2-8 มิลลิเมตร[5] บล็อกพรุนส่วนประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วนได้แก่ มวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน ชนิดของบล็อกพรุนสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภท[6] ดังรูปที่ 2.1 ได้แก่

1.) Porous asphalt

เป็นการนำมวลรวมที่เป็นมวลรวมหยาบ (ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 หรือขนาดประมาณ 4.75 มิลลิเมตร) มาผสมร้อนกับวัสดุเชื่อมประสานที่เป็นยางมะตอย มีการกำหนดอุณหภูมิและสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผสม โดยพื้นหรือชั้นทางที่ได้ มีความพรุนตัวที่สูงถึง 20% น้ำสามารถไหลซึมผ่านได้ดี[7] อีกทั้งยังมีลักษณะผิวที่ค่อนข้างหยาบ เป็นการเพิ่มความฝืดให้กับพื้นถนนและยังส่งผลให้ไม่เกิดชั้นฟิล์มของน้ำในขณะที่ฝนตกอีกด้วย

2.) Pervious concrete

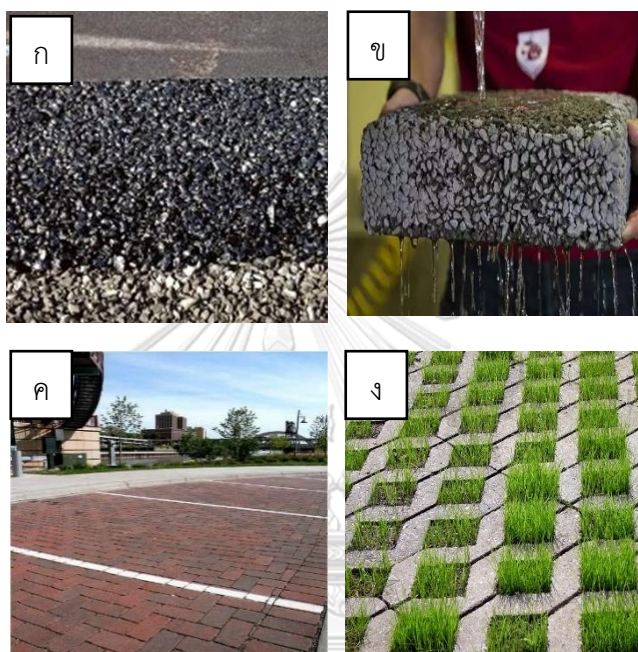
เป็นการนำมวลรวม เช่น หินปูน หินแกรนิต นำมาขึ้นรูปโดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน เช่น ซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งมีความพรุนตัวตั้งแต่ 15% ถึง 20% และมีอัตราการไหลผ่านของน้ำที่ 300 ถึง 2,000 in/h ตามมาตรฐาน ASCE 2015 เป็นพื้นหรือทางเท้าที่ให้ความแข็งแรง และทนทานที่ดี อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับเสียงได้อีกด้วย[8] ซึ่งบล็อกพรุนประเภทนี้ได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยมีการเลือกใช้มวลรวม (Aggregate) และวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ที่ต่างออกไป เช่น เปลี่ยนจากการใช้หินตามธรรมชาติมาใช้เป็นเศษเซรามิกในการทำมวลรวม ดังรูปที่ 2.2 เป็นต้น

3.) Permeable Interlocking Concrete Pavement (PICP)

เป็นการขึ้นรูปบล็อกคอนกรีตแล้วนำมาต่อกันเป็นรูปแบบต่างๆบนพื้นหินบด ซึ่งรูพรุนที่น้ำสามารถไหลผ่านได้จะเกิดจากรอยต่อระหว่างบล็อกพรุน โดยจะมีความพรุนตัวตั้งแต่ 5% ถึง 15 %

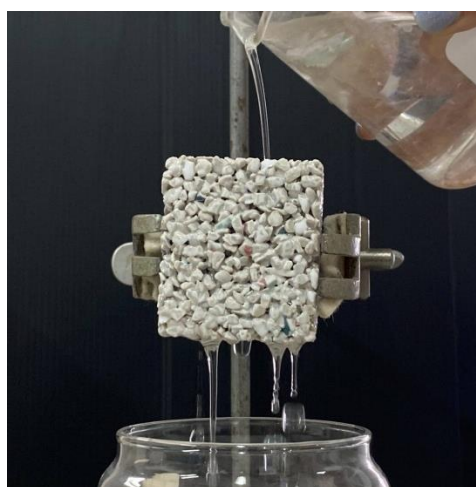
4.) Grid Pavement

เป็นการนำบล็อกคอนกรีตหรือบล็อกพลาสติกมาปูบนพื้นทรายหรือพื้นสนามหญ้า โดยระหว่างรอยต่อของบล็อกจะเป็นส่วนที่น้ำสามารถไหลผ่านลงสู่ดินได้ ซึ่งรอยต่อของบล็อกก่อให้เกิดรูพรุน 20% ถึง 75% ตามมาตรฐาน ASCE 2015



รูปที่ 2.1 บล็อกพรุนในแต่ละประเภท ก) Porous asphalt ข) Pervious concrete
ค) Permeable Interlocking Concrete Pavement (PICP) และ ง) Grid pavement [9-12]

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.2 บล็อกพรุนจากเศษเซรามิก

โดยประสิทธิภาพในการระบายน้ำของบล็อกพรุน มักขึ้นอยู่กับความพรุนตัวในโครงสร้างของชิ้นงาน ขนาดรูพรุน การเชื่อมต่อกันของรูพรุน[13,14] การมีสมบัติความพรุนตัวที่ค่อนข้างสูงทำให้น้ำผ่านได้เร็ว บล็อกพรุนที่มีความพรุนผลิตภัณฑ์มากจะยิ่งมีความสามารถในการระบายน้ำมากยิ่งขึ้น แต่รูพรุนที่เพิ่มมากขึ้นในผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ความหนาแน่นต่ำลง ทำให้ความแข็งแรงลดน้อยลง มีความสามารถในการรับแรงลดลง[15]

2.2 เศษเซรามิก

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย รายได้ต่อปีมีมูลค่าสูงถึง 20,000 ล้านบาทต่อปี ผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตและส่งออกมีหลากหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นสุขภัณฑ์ กระเบื้องบุผนังและโมเสก ลูกถ้วยไฟฟ้า ของชำร่วยและเครื่องประดับ และเซรามิกประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารซึ่งมีมูลค่าการส่งออกมากที่สุด โดยคิดเป็นประมาณ 36.74 % ของสินค้าเซรามิกส่งออกทั้งหมด[16-18] ทำให้มีผลิตภัณฑ์หลังการเผาที่เกิดการแตกหัก เกิดรอยร้าว รอยบิ่นในกระบวนการผลิตก็มีจำนวนมากตาม

2.2.1 ประเภทของเซรามิก

อุตสาหกรรมเซรามิกประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารถือว่าเป็นอุตสาหกรรมเซรามิกแบบดั้งเดิม (Traditional ceramics) ซึ่งสามารถแบ่งประเภทได้ตามชนิดของเนื้อดินที่ใช้ โดยแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลักด้วยกัน[19] ได้แก่

1.) เทอราคอตต้า (Terracotta) ส่วนใหญ่จะเป็นการนำดินเหนียวตามท้องถิ่นนำมาปั้นขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระถางต้นไม้ และอุปกรณ์ตกแต่งสวน เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเนื้อหยาบ มีสีน้ำตาล สีส้มแดง โดยดินชนิดนี้จะมีความพรุนตัวสูง ค่าการดูดซึมน้ำสูง ความแข็งแรงต่ำ

2.) เอิร์ทเธนแวร์ (Earthenware) เป็นผลิตภัณฑ์เนื้อดินขาวที่อาจมีการเติมดินเหนียว แร่ควอตซ์ และแร่เฟลด์สปาร์ เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป นิยมนำมาทำเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารเช่น จาน ชาม เป็นต้น มีอุณหภูมิการเผาที่ 900- 1100 °C มีลักษณะเนื้อแน่นละเอียด ค่าการดูดซึมน้ำสูง

3.) สโตนแวร์ (Stoneware)เป็นการนำเนื้อดินจากธรรมชาติมาผสมกับเนื้อดินที่มีความทนไฟสูง (Fire clays) มีซิลิกาอยู่ในเนื้อดินสูง มีอุณหภูมิการเผาอยู่ในช่วง 1190-1350 °C มีเนื้อวิเทียส (Vitreous ware) ลักษณะชิ้นงานจะมีความหนา เนื้อแน่น ทึบแสง มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ไม่เกิน 3% ตามมาตรฐาน มอก. 602-2546 มีความแข็งแรงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร

4.) พอร์ซเลน (Porcelain) เป็นการนำเนื้อดินขาวมาผสมกับแร่เฟลสปาร์หรือควอตซ์ เมื่อเผาจนถึงจุดสุกตัว เนื้อดินจะหลอมกลายเป็นแก้วที่มีความแข็งแกร่ง ของเหลวหรือแก๊สไม่สามารถซึมผ่านผิวได้ โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้อุณหภูมิการเผา 1250 - 1450 °C เนื้อผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อเนียนขาวใส มีความแข็งแรงที่ดี

5.) โบนไชน่า (Bone china) เป็นเนื้อดินที่มีองค์ประกอบคล้ายกับพอร์ซเลน แต่มีการเพิ่มซีเถ้ากระดูกของสัตว์ลงไปทำให้เนื้อดินมีสีดินขาว โปร่งแสง อีกทั้งยังมีความแข็งแรงดี

2.2.2 การกำจัดชิ้นงานที่เสียหายในอุตสาหกรรมเซรามิก

ในอุตสาหกรรมเซรามิกประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร สุขภัณฑ์ และกระเบื้องต่างๆ เมื่อมีชิ้นงานหลังเผาที่เสียหาย เกิดการแตกหัก เกิดรอยร้าว รอยบิ่น หรือชิ้นงานได้ผ่านคุณภาพตามที่ลูกค้ากำหนด โดยไม่สามารถแก้ไข หรือซ่อมแซมได้ ต้องนำไปกำจัดทิ้ง ซึ่งการกำจัดชิ้นงานที่เสียหายหลังจากการเผาส่วนใหญ่คือการนำชิ้นงานไปทุบทิ้งให้เป็นเศษขนาดเล็กและนำไปฝังกลบดิน ดังรูปที่ 2.3 หรือสามารถนำไปบดละเอียดแล้วนำกลับไปผสมกับดินสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานใหม่ได้ [20] เศษเซรามิกที่แตกหักจะมีสมบัติคล้ายกับชิ้นงานเดิมก่อนที่จะแตกหักเสียหาย[21] มีผลให้เศษเซรามิกที่เกิดจากชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบเผาแล้วยังคงมีความแข็ง สามารถรับแรงกดได้ดี ทนทานต่อการ ชัดถู ทนทานต่อสารเคมีได้ดี ยกเว้นสารเคมีที่มีความเป็นกรดและต่างเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรฟลูออริก[22,23]



รูปที่ 2.3 เศษเซรามิกที่แตกหัก[24]

โดยทั่วไปแล้วเศษเซรามิกที่แตกหักมักมีรูปร่างหลากหลาย มีความแหลมคม พื้นผิวที่แตกหักมักจะมีลักษณะเรียบ แต่ในงานวิจัยของ Liu และคณะ[25] พบว่าเศษเซรามิกหลังจากผ่านกระบวนการบดด้วยเครื่องบดแบบ Jaw crusher มีลักษณะผิวที่ขรุขระ ในงานวิจัย

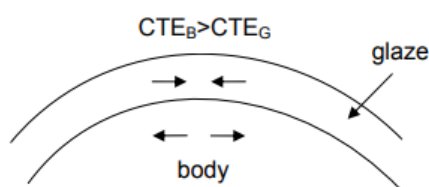
ของ Ray และคณะ[26] ได้นำเศษเซรามิกมาใช้แทนหินจากธรรมชาติในการทำพื้นคอนกรีต เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกัน อีกทั้งเศษเซรามิกยังมีสัดส่วนของซิลิกาถึง 70% อีกด้วย

2.3 เคลือบเซรามิก

วัสดุที่มีลักษณะคล้ายแก้ว เคลือบเป็นชั้นบางๆ อยู่บนผิวของเนื้อผลิตภัณฑ์เซรามิกอย่างต่อเนื่อง เมื่อมีการเผาที่อุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 800-1300°C สารประกอบซิลิเกตในตัวเคลือบจะเกิดการหลอมเหลว ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน กลายเป็นของไหลที่มีความหนืด ทำให้สามารถเคลือบอยู่บนผิวของผลิตภัณฑ์ได้ดี มีการสร้างพันธะที่แข็งแรงยึดติดกันระหว่างตัวเนื้อและเคลือบ มีสมบัติเป็นแก้ว ไม่ดูดซึมน้ำ ผิวของเคลือบมีความแข็ง ทนทาน ทนต่อการเกิดรอย การเคลือบยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เซรามิกได้[27,28]

2.3.1 ความแข็งแรงของเคลือบเซรามิก

ความแข็งแรงของเคลือบเกิดขึ้นจาก ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion; CTE) ที่ไม่เท่ากันระหว่างตัวเคลือบและเนื้อดิน หลังจากกระบวนการเผาเมื่อชิ้นงานเซรามิกมีการเย็นตัวลง จะก่อให้เกิดความเครียดที่ผิวเคลือบและเนื้อดิน เคลือบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่ต่ำกว่าเนื้อดิน ก่อให้เกิดแรงดึงต้านกันระหว่างเคลือบและเนื้อดิน เกิดเป็นแรงอัด (compression) ที่เคลือบเนื่องจากเนื้อดินที่ต้องการจะขยายตัวพยายามที่จะออกแรงดึง (tension) เพื่อให้เคลือบขยายตัวตาม ส่งผลให้เคลือบที่มีความสามารถในการขยายตัวต่ำกว่าเกิดแรงต้านคือแรงอัดขึ้นมามีรูปที่ 2.4 โดยแรงอัดที่เกิดบริเวณเคลือบจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน เพราะสามารถช่วยหยุดยั้งการโตของรอยแตกได้[29,30]



$CTE_B < CTE_G$ - Glaze in tension
-crazing occurs
 $CTE_B > CTE_G$ - Glaze in compression
-this condition is ideal, but there is an optimal level
-if the difference between the two is too great, shivering will occur

รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดแรงต้านระหว่างเคลือบและเนื้อดิน[31]

2.3.2 ส่วนประกอบของเคลือบเซรามิก

ส่วนประกอบของเคลือบเซรามิกสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลัก โดยแบ่งตามสมบัติค่าความเป็นกรดเบสของสารประกอบออกไซด์ ได้แก่

1.กลุ่มที่มีสมบัติเป็นเบส (Alkali Group) ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมในเคลือบ (Flux) ทำให้เคลือบสามารถหลอมละลายได้ในอุณหภูมิที่ต่ำลง ทำหน้าที่ช่วยลดความหนืดของเคลือบ เมื่อเคลือบเกิดการหลอมเหลวทำให้เคลือบสามารถไหลตัวได้ดี ช่วยเพิ่มความเรียบเนียนให้กับผิวเคลือบ[32]

2.กลุ่มที่มีสมบัติเป็นกลาง (Intermediate Group) ทำหน้าที่ให้ความหนืดกับเคลือบ ช่วยในการยึดเกาะระหว่างเคลือบกับเนื้อดิน ไม่ให้เคลือบหลุดเป็นผงในชิ้นงานก่อนเผา

3.กลุ่มที่มีสมบัติเป็นกรด (Acid Group) ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรง และความทนทานต่อการขีดข่วนให้กับเคลือบ เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ในกลุ่มนี้ จะมีอุณหภูมิในการหลอมละลายที่สูง ส่งผลให้เคลือบสามารถเผาในอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ หรือมีความทนไฟยิ่งขึ้น โดยตัวอย่างสารประกอบออกไซด์ของเคลือบในแต่ละกลุ่ม แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสารประกอบออกไซด์ในแต่ละกลุ่ม

สารประกอบออกไซด์	สมบัติ	
1.กลุ่มที่มีสมบัติเป็นเบส	CaO	ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอม ในเคลือบอุณหภูมิกลางและเคลือบอุณหภูมิสูง
	MgO	มีสมบัติเป็นเบส แต่มีจุดหลอมเหลวที่สูงคือ 2800 °C ทำหน้าที่เป็นสารทนไฟให้กับเคลือบ
	Na ₂ O	ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมในเคลือบ ทำให้เคลือบมีการไหลตัวที่ดีขึ้นเมื่อเกิดการหลอม
	K ₂ O	ทำหน้าที่เป็นตัวหลอมในเคลือบ ช่วยลดความหนืดในเคลือบเป็นอย่างมาก
2.กลุ่มที่มีสมบัติเป็นกลาง	Al ₂ O ₃	ทำหน้าที่เพิ่มความหนืดให้กับผิวเคลือบ ทำให้เคลือบสามารถยึดเกาะกับผิวเนื้อดินได้ดี มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 2050 °C
3.กลุ่มที่มีสมบัติเป็นกรด	SiO ₂	ช่วยลดการไหลตัวของน้ำเคลือบเมื่อเกิดการหลอมละลาย ทำหน้าที่เป็นตัวทนไฟ ช่วยเพิ่มความแข็งแรง การทนต่อสารเคมีให้กับเคลือบ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

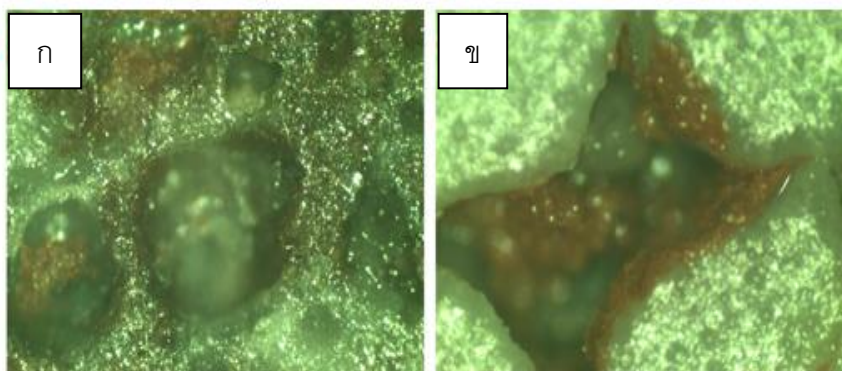
Z. Yang และคณะ (2020)[33] ได้มีการพัฒนาอิฐพรุนจากเซรามิกที่เป็นของเสียในอุตสาหกรรม โดยนำมาบด อัดขึ้นรูป และนำไปเผา พบว่าชิ้นงานมีรูพรุนที่ปรากฏในชิ้นงาน 26 % มีอัตราการซึมผ่านของน้ำอยู่ที่ 3.2×10^2 cm/s และมีความแข็งแรง 6.3 MPa ซึ่งมากกว่าค่าตามมาตรฐาน GB/T 25993-2010 ได้กำหนดไว้ มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอิฐเซรามิกพรุนกับงานวิจัยอื่นๆ ดังตารางที่ 2.2 นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของอิฐเซรามิกพรุนน้ำ ได้แก่ จำนวนครั้งในการอัดขึ้นงาน ขนาดของเศษเซรามิก ปริมาณของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมประสาน และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา โดยการทดลองส่วนที่ 1 ทำการทดลองอัดขึ้นงานพื้นที่หน้าตัด 196 cm^2 เป็นจำนวน 1 2 และ 3 ครั้ง พบว่าจำนวนครั้งในการอัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงและความหนาแน่นของชิ้นงานมากขึ้น เมื่อเทียบค่าความแข็งแรงในการอัดครั้งแรกกับการอัดครั้งที่ 3 พบว่า ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึง 85.7% ความหนาแน่นของชิ้นงาน เพิ่มขึ้น 3.7 % แต่ก็จะทำให้รูพรุนปรากฏในชิ้นงานลดลงเหลือ 8% ส่งผลทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำลดต่ำลง

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอิฐเซรามิกพรุน

วัสดุหลัก	อัตราการซึมผ่านของน้ำ (cm/s)	ค่าความแข็งแรง (MPa)	ค่าความหนาแน่น (g/cm^3)	ความพรุนตัวในชิ้นงาน (%)
ของเสียจากการทำเหมืองแร่ (Gangue) เศษเซรามิกและเถ้าลอย	1.64×10^{-2}	-	1.48	23
เศษเซรามิกและวัสดุเชื่อมประสาน 1	3.12×10^{-2}	7.8	-	20
เศษเซรามิกและวัสดุเชื่อมประสาน 2	2.3×10^{-2}	7.3	1.35	-
เศษเซรามิกและวัสดุเชื่อมประสาน (ชิ้นงานจากงานวิจัย)	$3.0 \times 10^{-2} \pm 0.001$	6.3 ± 0.18	1.78 ± 0.02	26 ± 0.02

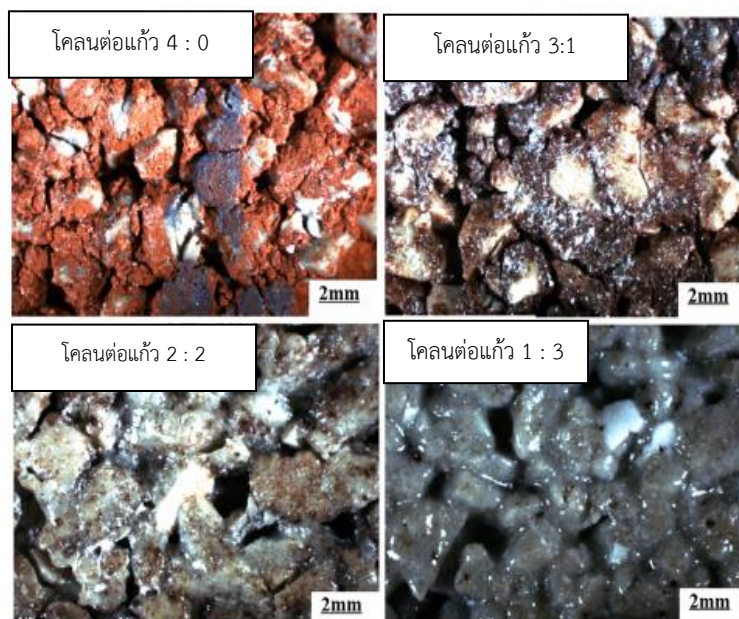
ในการทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดและสัดส่วนเศษเซรามิกที่เป็นมวลรวมในเนื้อชิ้นงาน โดยเลือกใช้เศษเซรามิก 2 ช่วงขนาด คือ 2.36-4 มิลลิเมตร และ 0.88 – 2.36 มิลลิเมตร มาผสมในสัดส่วน 2:1 3:1 และ 1:0 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบที่อัตราส่วน 2:1 และ 1:0 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณของเศษเซรามิกขนาดใหญ่ที่เพิ่มมากขึ้นในชิ้นงาน จะส่งผลให้มีรูพรุนและอัตราการการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นมากถึง 43.7% และ 133.3 % ตามลำดับ แต่ความหนาแน่นและความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงเพียง 3.7% และ 19.0% ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เศษเซรามิกขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวโดยใช้ปริมาณร้อยละ 82 โดยน้ำหนัก ของชิ้นงานทั้งหมด ในการทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณโซเดียมซิลิเกตต่อการซึมผ่านของน้ำและความแข็งแรง โดยใช้สัดส่วนที่ต่างกันคือ ร้อยละ 10 12 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณโซเดียมซิลิเกตที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตเมื่อได้รับความร้อนและเกิดการหลอมละลายจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเศษเซรามิกเข้าด้วยกัน แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปก็จะส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำลดลง จึงเลือกใช้โซเดียมซิลิเกตที่ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก เพื่อให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงระดับหนึ่งแต่ยังคงความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ ในการทดลองส่วนที่ 4 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาที่ 1100 1150 และ 1200 °C พบว่าที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกันก็จะทำให้รูพรุนในชิ้นงานลดต่ำลงด้วย ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เงื่อนไขที่สมดุลระหว่างความแข็งแรงและการซึมผ่านของน้ำ คือ 1150 °C

C. Zhou (2018)[34] ได้พัฒนาอิฐรูพรุนจากเศษเซรามิกพอร์ซเลน เลือกใช้โคลนและผงแก้วเป็นวัสดุเชื่อมประสานในชิ้นงาน ในชิ้นงานจะประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กใหญ่ทำให้มีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงของชิ้นงานและความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ดี โดยรูพรุนขนาดเล็กในโครงสร้างเกิดจากการสันดาปของสารอินทรีย์ในโคลน ส่วนรูพรุนขนาดใหญ่เกิดจากการที่เศษเซรามิกมาเกาะตัวรวมกันดังรูปที่ 2.5 ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง รูพรุนในชิ้นงานและความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในชิ้นงาน ประกอบด้วย 5 ปัจจัยได้แก่ ขนาดของมวลรวม ปริมาณของมวลรวม อัตราส่วนระหว่างโคลนและผงแก้ว แรงอัดขึ้นรูปชิ้นงานและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ในการทดลองส่วนที่ 1 ชิ้นงานที่มีปริมาณของเศษเซรามิกที่ต่างกันคือร้อยละ 60 70 และ 80 โดยน้ำหนัก จะส่งผลต่อรูพรุนในชิ้นงาน จำนวนรูพรุนจะลดน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณมวลรวม ซึ่งปริมาณของเศษเซรามิกจะส่งผลต่อรูพรุนในชิ้นงานมากกว่าปริมาณโคลนและผงแก้วที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของอิฐพูน ก) รูพูนขนาดเล็กที่เกิดจากการสันดาปของสารอินทรีย์ในโคลน
ข) รูพูนขนาดใหญ่เกิดจากการที่เศษเซรามิกมาเกาะตัวรวมกัน

ในการทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาผลของการใช้ขนาดของมวลรวมที่ต่างกันคือ 2.675 – 3.530 มิลลิเมตร 1.237 – 2.675 มิลลิเมตร และ 0.854 – 1.237 มิลลิเมตร พบว่าขนาดของมวลรวมที่ต่างกันจะส่งผลให้จำนวนรูพูนในชิ้นงานต่างกัน มวลรวมที่มีขนาดเล็กจะทำให้พื้นที่ในการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคมีมากขึ้น ส่งผลให้จำนวนรูพูนมีน้อยลง ในการทดลองส่วนที่ 3 ชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของโคลนต่อผงแก้วที่ต่างกันคือ 4:0 3:1 2:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก มาสองด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังรูปที่ 2.6 พบว่าปริมาณของผงแก้วที่เพิ่มมากขึ้นจะช่วยให้ชิ้นงานมีรูพูนมากขึ้น เนื่องจากผงแก้วเมื่อได้รับความร้อนจะหลอมละลายเคลือบผิวของเศษเซรามิก ทำให้จากเดิมที่ช่องว่างระหว่างผิวของมวลรวมหยาบที่มีโคลนและผงแก้วอยู่ก็จะหายไปเนื่องจากจากไปเคลือบอยู่ที่ผิวของเศษเซรามิก ทำให้เกิดเป็นช่องว่างหรือรูพูนในชิ้นงาน ในการทดลองที่ 4 นำวัสดุมาขึ้นรูปด้วยแรงอัดที่ต่างกัน พบว่าการใช้แรงอัดที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของอิฐพูนมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมวลรวมในชิ้นงานมีการจัดเรียงตัวได้แน่นขึ้น แต่ก็ส่งผลให้ปริมาณรูพูนลดต่ำลง ส่วนการทดลองที่ 5 นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาเผาที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าแก้วจะเกิดการหลอมตัวยังไม่ดีมากที่อุณหภูมิ 1140 °C จึงเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 1200 °C พบว่าเกิดการหลอมตัวดีและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำไปทดสอบการซึมผ่านของน้ำพบว่าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1140 °C ขึ้นไปจะมีอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ต่ำลง เนื่องจากแก้วที่เกิดการหลอมตัวที่ดีจะไหลเข้าไปในรูพูนระหว่างมวลรวมทำให้อิฐพูนและความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในชิ้นงานต่ำลง การทดลองสรุปได้ว่า การเลือกใช้เศษเซรามิกขนาด 2.675 – 3.530 มิลลิเมตร ปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างโคลนต่อผงแก้วคือ 3:1 ใช้แรงอัดขึ้นรูป 15 MPa และอุณหภูมิในการเผาคือ 1140 °C จะให้ค่าความต้านทานแรงกดที่ 33 MPa และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำ 0.15 cm/s



รูปที่ 2.6 อีฐพูนที่มีอัตราส่วนของโคลนต่อผงแก้วที่ต่างกัน

D. Sadek และ H. El Nouhy[35] ในงานวิจัยนี้ได้นำเศษเซรามิกมาใช้แทนที่หินบดและทรายจากธรรมชาติ ในการทำบล็อกคอนกรีตปูพื้นแบบ Interlocking ใช้เศษเซรามิก 2 ขนาด คือ เศษเซรามิกมวลรวมละเอียดขนาด 0-2.36 มิลลิเมตร และเศษเซรามิกมวลรวมหยาบขนาด 2.36-10 มิลลิเมตร โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบแทนที่หินบดด้วยเศษเซรามิกมวลรวมหยาบ ส่วนเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดนำไปแทนที่ทรายจากธรรมชาติ พบว่าเศษเซรามิกมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำบล็อกคอนกรีตสำหรับปูทางเนื่องจากให้สมบัติค่าความแข็งแรง การทนต่อสารเคมี หรืออัตรา การดูดซึมน้ำที่ผ่านมาตรฐาน ESS 4382 และมาตรฐาน EN 1338

A. Sivakumar และ S. Srividhya[36] ได้ทำการศึกษาการนำเศษกระเบื้องเซรามิกที่แตกหักมาผสมกับปูนปอร์ตแลนด์เพื่อทำเป็นคอนกรีต โดยทำการศึกษาปัจจัยด้านปริมาณและขนาดของเศษเซรามิกที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลได้แก่ ค่าแข็งแรงในการรับแรงอัด ค่าความแข็งแรงในการรับแรงดึง ในการศึกษาปัจจัยด้านปริมาณของเศษเซรามิกได้ทำการทดลองที่ 0% - 50% พบว่าปริมาณเศษเซรามิกที่เหมาะสมคือ 20% ส่วนปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิกได้ทำการทดลองใช้เศษเซรามิกขนาดใหญ่ (7-25 มิลลิเมตร) และเศษเซรามิกขนาดเล็ก (0-7 มิลลิเมตร) พบว่าปริมาณการใช้เศษเซรามิกที่ 20% และใช้เศษเซรามิกขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุดแต่น้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป เมื่อนำคอนกรีตจากเศษเซรามิกไปทดสอบการทนต่อกรดด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่าเศษเซรามิกในคอนกรีตสามารถเพิ่มความทนทานต่อกรดได้มากขึ้น โดย

สัดส่วนร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของคอนกรีตจากเศษเซรามิกขนาดใหญ่ผสมกับขนาดเล็ก ปริมาณ 40% มีค่าประมาณ 0.3% ซึ่งน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปที่สัดส่วนน้ำหนักหายไปประมาณ 0.6%

O. AlShreedah และ S. Nassiri[2] ได้ทำการศึกษาความแข็งแรงและการไหลผ่านของน้ำในคอนกรีตพรุน พบว่าความแข็งแรงของบล็อกปูทางเท้าพรุนน้ำจะขึ้นอยู่กับมวลรวมหยาบและวัสดุเชื่อมประสานในผลิตภัณฑ์ มวลรวมหยาบขนาดเล็กจะส่งผลให้บล็อกปูทางเท้าพรุนน้ำมีความแข็งแรงที่มากกว่าแต่อัตราการไหลผ่านของน้ำก็จะต่ำลง ในบล็อกปูทางเท้าพรุนน้ำคอนกรีตการผสมมวลรวมหยาบขนาดเล็กปริมาณ 5-10% ของมวลรวมขนาดใหญ่จะทำให้ความแข็งแรงและความทนทานของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น

L.Guoyang และคณะ[37] ได้ทำการพัฒนาวัสดุพรุนที่ใช้ในการปูทางเดินให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้น โดยใช้เศษเซรามิกขนาด 2.0-5.6 มิลลิเมตร ผสมกับทรายจากธรรมชาติ 30% ขนาด 0.0-2.0 มิลลิเมตร เป็นมวลรวมแทนวัสดุจากธรรมชาติและใช้พอลิยูรีเทนเป็นวัสดุเชื่อมประสานแทนยางมะตอย พบว่ามีความแข็งแรง รับแรงอัดสูงและมีความต้านทานต่อการเสีรูปลถาร มีความสามารถในการระบายน้ำได้ดีกว่าวัสดุพรุนทั่วไปเนื่องจากมีรูพรุนในชิ้นงานมากกว่า โดยมีปริมาตรของรูพรุนอยู่ที่ 28.5 % ในขณะที่คอนกรีตพรุนทั่วไปจะอยู่ที่ 26.2%

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

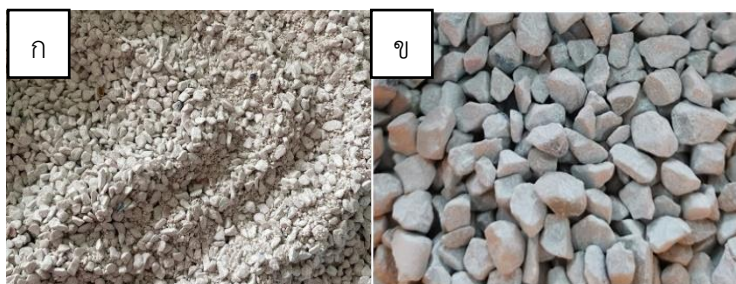
ในงานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการเตรียมและขึ้นรูปบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่ใช้เคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานในแม่พิมพ์ที่ไม่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง รูพรุน ความหนาแน่น และอัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ ซึ่งมีด้วยกัน 4 ปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก อัตราส่วนที่ใช้ระหว่างมวลรวมหยาบกับวัสดุเชื่อมประสาน ขนาดของเศษเซรามิกที่ใช้เป็นมวลรวมหยาบ และความเข้มข้นของเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เพื่อให้ได้เงื่อนไขในการผลิตบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่ให้ความแข็งแรง และอัตราการไหลผ่านของน้ำผ่านมาตรฐาน ACI 522 (2010) มาตรฐาน GB/T 25993 (2010) และมากกว่าผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด

3.1 วัตถุประสงค์สำหรับการทำบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก

ในการทำบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกประกอบด้วยวัตถุประสงค์หลัก 2 ชนิด คือ มวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน นำมาตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องมือ X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) รุ่น S8 TIGER ของบริษัท Bruker

3.1.1 มวลรวม

เลือกใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมเซรามิกประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เนื่องจากอุตสาหกรรมประเภทนี้มีการผลิตและส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศมากที่สุด ในบรรดาอุตสาหกรรมเซรามิกด้วยกัน[16] ทำให้มีจำนวนผลิตภัณฑ์ที่บิ่น หรือแตกหักเสียหายหลังสิ้นสุดกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากไปด้วย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ที่แตกหักเสียหายนำกลับมาใช้ทำเป็นมวลรวมสำหรับบล็อกพรุน หรือที่เรียกว่า “การรีไซเคิล” โดยแบ่งเศษเซรามิกเป็น 2 ขนาด ได้แก่ 0 – 2 มิลลิเมตร ใช้เป็นมวลรวมละเอียด และ 2 -5 มิลลิเมตร ใช้เป็นมวลรวมหยาบ



รูปที่ 3.1 เศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ ก) มวลรวมละเอียด ข) มวลรวมหยาบ

3.1.2 วัสดุเชื่อมประสาน

เลือกใช้เคลือบเซรามิกขาวทึบจาก บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด ช่วงอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมเพื่อให้เคลือบสุกตัว สามารถเชื่อมเกาะพื้นผิวของเศษเซรามิกได้ดี เพื่อช่วยประสานมวลรวมให้บดล็อกพูนมีความแข็งแรงเพิ่มมากยิ่งขึ้น ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 1050 1100 1150 1200 1250 และ 1300 °C อัตราการเผา 5 °C/นาที โดยใช้เตา Gradient 6 ช่วงอุณหภูมิ ของบริษัท Nabertherm รุ่น GR 1300/13 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เตา Gradient 6 ช่วงอุณหภูมิ ของบริษัท Nabertherm รุ่น GR 1300/13

3.2 วิธีการขึ้นรูปบดล็อกพูนจากเศษเซรามิก

กระบวนการขึ้นรูปบดล็อกพูนจากเศษเซรามิกในงานวิจัยนี้ เลือกใช้วิธีการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเศษเซรามิกที่ผ่านการบด ขนาด 0-5 มิลลิเมตร มาคัดขนาดโดยใช้เครื่องมือ Vibrating sieve เบอร์ 304 ขนาด 500 × 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3 เลือกใช้ตะแกรงเบอร์ 10 mesh ในการคัดขนาดเศษเซรามิกเพื่อให้ได้ 2-5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่อง Vibrating sieve เบอร์ 304 ขนาด 500 x100 มิลลิเมตร

2. เศษเซรามิกที่ผ่านการคัดขนาด 2-5 มิลลิเมตร พื้นผิวยังคงมีความแหลมคมซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายสำหรับการนำไปใช้เป็นบล็อกพูน จึงต้องนำมาลดคมบริเวณผิวของเศษเซรามิก ในหม้อบดพอร์ซเลน ด้วยเครื่องมือ High speed ball mill ดังรูปที่ 3.4 เลือกใช้วิธีการบดแห้งโดยไม่ใส่ลูกบด โดยใช้เศษเซรามิกปริมาณ 500 กรัม บดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้พื้นผิวในบริเวณส่วนที่แหลมคมของเศษเซรามิกหายไป ดังรูปที่ 3.5 จากนั้นนำไปผ่านตะแกรง 8 mesh เพื่อคัดผงเศษเซรามิกหลังจากการลดคมออก



รูปที่ 3.4 ก)เครื่องมือ High speed ball mill ข)หม้อบดพอร์ซเลน



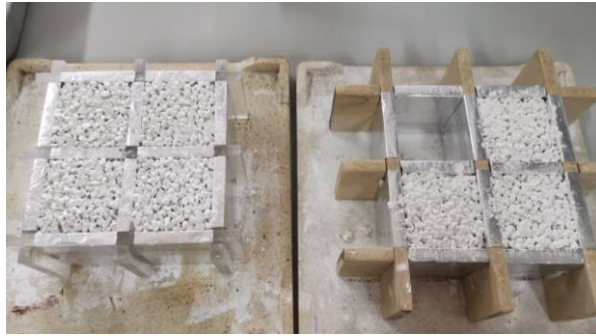
รูปที่ 3.5 เศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ ก)ยังไม่ผ่านการบดแห้ง ข) ผ่านการบดแห้งในหม้อบดพอร์ซเลน ด้วยเครื่องมือ High speed ball mill เป็นเวลา 30 นาที

3. เคลือบขาวที่บจากบริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด นำมาบดละเอียดและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเคลือบแห้งที่ได้ผสมกับน้ำด้วยเครื่อง Universal lab mixer ดังรูปที่ 3.6 เป็นเวลา 20 นาที



รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal lab mixer

4. นำเศษเซรามิกที่ผ่านการคัดขนาด 2-5 มิลลิเมตร และน้ำเคลือบมาผสมกัน แล้วนำมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาด 5 × 5 × 5 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.7 จากนั้นนำบล็อกพรุนออกจากแม่พิมพ์แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก



รูปที่ 3.8 บล็อกพรุนจากเศษเซรามิกก่อนเผา

5. นำบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่แห้งสนิท มาเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ทิ้งไว้ 30 นาที และปล่อยให้เย็นตัวในเตาจนถึงอุณหภูมิห้อง อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 5 °C ต่อนาที โดยใช้เตาเผาไฟฟ้าของบริษัท UTSAKAN จำกัด ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เตาเผาไฟฟ้าของบริษัท UTSAKAN จำกัด

6. นำบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ผ่านการเผา นำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ ความแข็งแรงต้านทานแรงกด อัตราการไหลซึมผ่านรูพรุนของน้ำ และค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน จากนั้นนำมาตรวจสอบลักษณะรูพรุนภายในโครงสร้างแบบ 3 มิติด้วยเครื่อง Micro CT scan รุ่น BRUKER SKYSCAN 1173 โดยขึ้นรูปชิ้นงานขนาด $2 \times 2 \times 2$ เซนติเมตรเพื่อใช้ในการทดสอบ

3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของบล็อกพรุน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานจากบล็อกพรุนเซรามิกที่มีเคลือบเป็นวัสดุเชื่อมประสานให้มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่ดี มีรูพรุนในโครงสร้างสูงเพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลผ่านของน้ำได้มากขึ้น แต่ยังคงความแข็งแรงในการรับแรงอัดได้มากกว่าบล็อกพรุนตามท้องตลาดทั่วไป เนื่องจากรูพรุนที่เพิ่มสูงขึ้นในโครงสร้างของบล็อกพรุนจะส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงโดยปัจจัยที่ต้องการศึกษามี 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก อัตราส่วนที่ใช้ระหว่างมวลรวมหยาบกับวัสดุเชื่อมประสาน ขนาดของเศษเซรามิกที่ใช้เป็นมวลรวมหยาบ และความเข้มข้นของเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

3.3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก

ทดลองหาช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกโดยใช้เคลือบเป็นวัสดุเชื่อมประสาน 3 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ 1150 1200 และ 1250 °C เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้เคลือบสามารถยึดเกาะกับเศษเซรามิกได้ดี ส่งผลให้ความแข็งแรงของบล็อกพรุนมีค่าเพิ่มมากยิ่งขึ้น

3.3.2 อัตราส่วนระหว่างมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน

ทดลองหาอัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ เศษเซรามิกและเคลือบขาวทึบ โดยอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกและเคลือบขาวทึบ ได้แก่ ร้อยละ 85 : 15 80 : 20 และ 75 : 25 โดยน้ำหนัก เพื่อหาอัตราส่วนของเคลือบที่เหมาะสม ไม่มากจนทำให้เคลือบไหลลงไปกองที่ด้านล่างของบล็อกพรุนระหว่างการขึ้นรูปจนทำให้ความสามารถในการระบายน้ำของบล็อกพรุนลดลงและไม่น้อยจนทำให้ความสามารถการยึดเกาะระหว่างเศษเซรามิกของบล็อกพรุนต่ำลง ซึ่งทำให้ความแข็งแรงลดน้อยลงด้วย

3.3.3 ขนาดของเศษเซรามิก

ทดลองหาอัตราส่วนของเศษเซรามิกแต่ละขนาด แบ่งออกเป็น 2 ขนาด ได้แก่ มวลรวมละเอียด 0–2 มิลลิเมตร และ มวลรวมหยาบ 2–5 มิลลิเมตร โดยอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อเศษเซรามิกมวลรวมหยาบได้แก่ ร้อยละ 0 : 100 โดยน้ำหนัก

ร้อยละ 25 : 75 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละ 33.33 : 66.67 โดยน้ำหนัก เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมในการผลิตบล็อกพรุนให้มีความแข็งแรงแต่ยังคงความสามารถในการระบายน้ำได้ดี

3.3.4 ความเข้มข้นของน้ำเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

ทดลองหาอัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเคลือบแห้งขาวทึบและน้ำ ดังนี้ ร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 68.96 : 31.04 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก เพื่อหาอัตราส่วนของเคลือบแห้งและน้ำที่เหมาะสม สามารถเคลือบและเชื่อมติดเศษเซรามิกในบล็อกพรุนได้ดี

โดยรายละเอียดต่างๆที่ใช้สำหรับการทดลองในแต่ละปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกและเคลือบขาวทึบ ขนาดของเศษเซรามิก และความเข้มข้นของเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการขึ้นรูปลอกพรุนในการทดลองสำหรับปัจจัยต่างๆ(1)

การทดลอง	สัดส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (°C)
	วัสดุเชื่อมประสาน (เคลือบ)			เศษเซรามิก			
	รวม	สัดส่วน* ผงเคลือบแห้งต่อน้ำ		รวม	สัดส่วน** มวลรวมหยาบต่อ มวลรวมละเอียด		
1. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	100	1150
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	
	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	100	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	
	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	100	1250
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	

ตารางที่3.1 เงื่อนไขการขึ้นรูปบล็อกพรุนในการทดลองสำหรับปัจจัยต่างๆ (2)

การทดลอง	สัดส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (°C)
	วัสดุเชื่อมประสาน (เคลือบ)			เศษเซรามิก			
	รวม	สัดส่วน* ผงเคลือบแห้งต่อน้ำ		รวม	สัดส่วน** มวลรวมหยาบต่อ มวลรวมละเอียด		
2. อัตราส่วนระหว่างมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน	15	เคลือบแห้ง	71.43	85	มวลรวมหยาบ	100	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	
	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	100	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	
	25	เคลือบแห้ง	71.43	75	มวลรวมหยาบ	100	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	
3. ขนาดของเศษเซรามิกและอัตราส่วนระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบ	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	100	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	
	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	75	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	25	
	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	66.67	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	33.33	

ตารางที่3.1 เงื่อนไขการขึ้นรูปบล็อกพูนในการทดลองสำหรับปัจจัยต่างๆ (3)

การทดลอง	สัดส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (°C)
	วัสดุเชื่อมประสาน (เคลือบ)			เศษเซรามิก			
	รวม	สัดส่วน* ผงเคลือบแห้งต่อน้ำ		รวม	สัดส่วน** มวลรวมหยาบต่อ มวลรวมละเอียด		
4. ความเข้มข้นของน้ำเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	100	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	
	20	เคลือบแห้ง	68.96	80	มวลรวมหยาบ	100	
		น้ำ	31.04		มวลรวมละเอียด	-	
	20	เคลือบแห้ง	66.67	80	มวลรวมหยาบ	100	
		น้ำ	33.33		มวลรวมละเอียด	-	

หมายเหตุ: *สัดส่วนผงเคลือบแห้งต่อน้ำ

5 : 2 แปลงเป็นร้อยละคือ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก

5 : 2.25 แปลงเป็นร้อยละคือ 68.96 : 31.04 โดยน้ำหนัก

5 : 2.5 แปลงเป็นร้อยละคือ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก

**สัดส่วนมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด

1 : 0 แปลงเป็นร้อยละคือ 100 : 0 โดยน้ำหนัก

3 : 1 แปลงเป็นร้อยละคือ 75 : 25 โดยน้ำหนัก

2 : 1 แปลงเป็นร้อยละคือ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก

3.4 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน

ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่ใช้เคลือบขาวที่บ เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ได้แก่ ความหนาแน่นรวม (bulk density) ความพรุนตัวปรากฏ (apparent porosity) อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ (permeability rate) และความแข็งแรงในการรับแรงอัด (compressive strength) ที่ผ่านขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดชิ้นงาน $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.2 แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 บล็อกพรุนจากเศษเซรามิกขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร

3.4.1 การทดสอบความหนาแน่นและความพรุนตัวปรากฏ

การทดสอบหาความหนาแน่นและความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่ใช้เคลือบขาวที่บเป็นวัสดุเชื่อมประสาน เริ่มต้นจากการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้งในอากาศเพื่อหาค่าความหนาแน่น (bulk density) จากนั้นนำชิ้นงานไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนชิ้นงานอิ่มตัว และทิ้งไว้ให้ผิวชิ้นงานแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาความหนาแน่นปรากฏ ตามสมการที่ 1 จากนั้นนำไปความพรุนตัวปรากฏตามสมการที่ 2 ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm}^3\text{)} = \frac{W_{\text{dry}}}{W_{\text{sat}} - W_{\text{water}}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1)$$

กำหนดให้ ค่า $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ มีค่าเท่ากับ 1 g/cm^3

W_{dry} คือ น้ำหนักแห้งของบล็อกพรุนที่ชั่งในอากาศ

W_{sat} คือ น้ำหนักในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งของบล็อกพรุนหลักจากการแช่น้ำ 24 ชั่วโมงและทิ้งไว้ให้ผิวแห้ง 24 ชั่วโมงในอุณหภูมิห้อง

W_{water} คือ น้ำหนักของบล็อกพรุนที่ชั่งในน้ำ

$$\text{ความพรุนปรากฏ (\%)} = \left[1 - \left(\frac{\text{ความหนาแน่นปรากฏ}}{\text{ความหนาแน่นรวม}} \right) \right] \times 100 \quad (2)$$

3.4.2 การทดสอบหาอัตราการไหลซึมผ่านน้ำ

ทดสอบหาอัตราการไหลซึมผ่านน้ำของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก โดยใช้วิธีการทดสอบแบบอย่างง่ายโดยดัดแปลงมาจากวิธีการทดสอบแบบ Falling Head ตามมาตรฐาน ASTM D2434-68 โดยการนำแผ่นพลาสติกพาราฟิล์ม (Parafilm) จากบริษัท Bemis รุ่น PM-996 มาห่อบริเวณด้านข้างของตัวบล็อกให้แน่นเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำไหลผ่านด้านข้างดังรูปที่ 3.11 จากนั้นนำอุปกรณ์ทดสอบอัตราการไหลซึมผ่านน้ำของบล็อกพรุนดังรูปที่ 3.12 มาใช้ในการจับยึดชิ้นงาน แล้ววัดอัตราการไหลซึมของน้ำโดยที่คงระดับน้ำไว้ที่ความสูง 4 เซนติเมตรจากผิวของชิ้นงาน เทน้ำปริมาตร 1 ลิตรและจับเวลา จากนั้นคำนวณอัตราการไหลซึมผ่านน้ำตามสมการที่ 3

$$\text{อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ (L/m}^2 \cdot \text{min)} = \frac{V}{A \times t} \quad (3)$$

V คือ ปริมาตรน้ำ 1 ลิตร

A คือ พื้นที่หน้าตัดของผิวบล็อกพรุน

t คือ เวลาที่น้ำปริมาตร 1 ลิตร ไหลผ่านบล็อกพรุน



รูปที่ 3.11 การเตรียมบล็อกพรุนสำหรับการทดสอบอัตราการไหลซึมผ่านน้ำ



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ทดสอบอัตราการไหลซึมน้ำของบล็อกพูน

3.4.3 การทดสอบความแข็งแรงของบล็อกพูน

ทดสอบความต้านทานแรงอัดมาตรฐาน ASTM C133 โดยใช้เครื่องมือ Universal testing machine จากบริษัท Instron รุ่น 5843 ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องมือ Universal testing machine ของบริษัท Instron รุ่น 5843

3.5 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของรูพรุนภายในบล็อกพรุน

การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างรูพรุนภายในชิ้นงานบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร (Micro-CT) ของบริษัท Bruker รุ่น SKYSCAN 1173 ดังรูปที่ 3.14 โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอ็กซ์ในแต่ละชั้นของชิ้นงาน จากนั้นใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลข้อมูลและสร้างออกมาเป็นภาพสามมิติ ทำให้สามารถเห็นลักษณะรูพรุนภายในโครงสร้างของบล็อกพรุน อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุนภายในโครงสร้างได้อีกด้วย [38,39] ในการตรวจสอบด้วยเครื่อง Micro-CT ดังรูปที่ 3.13 และชิ้นรูปชิ้นงานขนาด 2×2×2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.15 โดยมีการใช้งานร่วมกับโปรแกรม 3D Slicer ในการประมวลผลออกมาในรูปแบบ 3 มิติและภาพตัดขวางของชิ้นงานในรูปแบบ 2 มิติ



รูปที่ 3.14 เครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร (Micro-CT) ของบริษัท Bruker รุ่น SKYSCAN



รูปที่ 3.15 บล็อกพรุนจากเศษเซรามิก ขนาด 2×2×2 เซนติเมตร

โดยในการตรวจสอบนี้สนใจศึกษาปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิกและปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่มีผลต่อปริมาณรูพรุนในโครงสร้างของชิ้นงานบล็อกพรุน โดยนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงาน

บล็อกพรุนที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่ด้านขนาดของเศษเซรามิกและปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งการตรวจสอบเป็น 3 ส่วนดังนี้

- การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด
- การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนในปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก
- การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนในปัจจัยด้านปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน

ซึ่งเงื่อนไขในการขึ้นรูปชิ้นงานในแต่ละการตรวจสอบ มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดในแต่ละเงื่อนไขของการขึ้นรูปบล็อกพรุน

การตรวจสอบ	สัดส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (°C)	
	วัสดุเชื่อมประสาน (เคลือบ)			เศษเซรามิก			
	รวม	สัดส่วน* ผงเคลือบแห้งต่อ น้ำ		รวม	สัดส่วน** มวลรวมหยาบต่อ มวลรวมละเอียด		
1. บล็อกพรุนที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	100	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	
2. ปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก	20	เคลือบแห้ง	71.43	80	มวลรวมหยาบ	66.67	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	33.33	
3. ปัจจัยด้านปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน	25	เคลือบแห้ง	71.43	75	มวลรวมหยาบ	100	1200
		น้ำ	28.57		มวลรวมละเอียด	-	

หมายเหตุ: *สัดส่วนผงเคลือบแห้งต่อ น้ำ

5 : 2 แปลงเป็นร้อยละคือ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก

**สัดส่วนมวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด

1 : 0 แปลงเป็นร้อยละคือ 100 : 0 โดยน้ำหนัก

3 : 1 แปลงเป็นร้อยละคือ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมประสานและมวลรวม

4.1.1 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเชื่อมประสาน

ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเคลือบขาวทึบของบริษัท คอมพิวเตอร์เคลย์ จำกัด ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในบล็อกพูนจากเศษเซรามิก ด้วยเครื่องมือ X-ray fluorescence spectroscopy โดยองค์ประกอบของทางเคมีของเคลือบขาวทึบมีดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของทางเคมีของเคลือบขาว

องค์ประกอบทางเคมีของเคลือบขาวทึบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ZrO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
53.50	18.60	10.60	7.10	4.27	3.22	2.26	0.25

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เคลือบขาวทึบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) มากที่สุด คือ ร้อยละ 53.50 และ 18.60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยซิลิกาหรือทรายแก้วที่พบเป็นสารที่มีจุดหลอมเหลวสูง อยู่ในช่วง 1710 °C ถึง 1750 °C ซึ่งช่วยลดการไหลตัวของเคลือบในขณะที่เผา มีสมบัติการทนไฟที่ดี ให้ความแข็งแรง ความทนทานต่อรอยขีดข่วน ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีทั้งกรดและเบส ส่วนอะลูมินามีสมบัติการไหลตัวที่ต่ำ ความหนืดสูง ช่วยให้เคลือบยึดติดกับตัวชิ้นงานในขณะที่เผาแล้วเคลือบเกิดการหลอม อีกทั้งยังช่วยให้เคลือบไม่หลุดเป็นผงเมื่อมีการจับหรือสัมผัสชิ้นงานก่อนเผา [31,40]

4.1.2 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเศษเซรามิก

ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ที่ผ่านการบด ขนาด 0 - 5 มิลลิเมตร ที่นำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในบล็อกพูน ด้วยเครื่องมือ x-ray fluorescence spectroscopy โดยองค์ประกอบของทางเคมีของเศษเซรามิกแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ที่ใช้เป็น

มวลรวมหายาสำหรับบล็อกพูน มีองค์ประกอบซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มากที่สุด คือ ร้อยละ 53.13 และ 38.58 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ






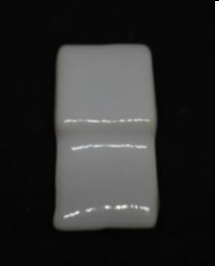
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์

องค์ประกอบทางเคมีของเศษเซรามิกเนื้อสโตนแวร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)							
SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	MgO
53.13	38.58	2.57	1.39	1.38	0.71	0.69	0.65

4.2 ผลการทดสอบหาช่วงอุณหภูมิการเผาของวัสดุเชื่อมประสาน

หาช่วงอุณหภูมิการเผาเคลือบขาวที่บที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยทำการทดสอบการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 1050 °C ถึง 1300 °C เพื่อหาอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมที่ทำให้เคลือบสุกตัว ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบช่วงอุณหภูมิการเผาเคลือบขาวที่บ

อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะเคลือบ	อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะเคลือบ
1050		1200	
1100		1250	
1150		1300	

จากตารางที่ 4.3 พบว่าที่อุณหภูมิ 1050 °C ถึง 1100 °C เคลือบมีลักษณะที่ไม่สุกตัว สังเกตได้จากเคลือบมีลักษณะด้าน ไม่เงา ผิวไม่เรียบเนียน คล้ายเกิดการหลอมที่ยังไม่ดีพอ ส่งผลให้เคลือบมีความพรุนตัวสูง และให้ความแข็งแรงที่ต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากการที่เนื้อแก้วในเคลือบไม่สามารถหลอมหลอมตัวเกิดเป็น Glassy phase ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีอุณหภูมิในการเผาที่ต่ำเกินไป[41] โดยเคลือบขาวที่เริ่มมีลักษณะเคลือบสุกตัว มีความมันเงา ผิวเรียบเนียน และได้สีเคลือบตามที่ต้องการ ตั้งแต่อุณหภูมิที่ 1150 °C จนถึง 1300 °C ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 1150 1200 และ 1250 °C ในการขึ้นรูปบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบขาวที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

4.3 ผลการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน

4.3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก

ทดสอบหาช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกโดยใช้เคลือบเป็นวัสดุเชื่อมประสาน 3 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ 1150 1200 และ 1250 °C โดยใช้เงื่อนไขในการขึ้นรูปดังนี้

- มวลรวมหยาบ (ขนาด 2-5 มิลลิเมตร) ปริมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก
- เคลือบ (เคลือบแห้ง 71.43 โดยน้ำหนัก) ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

โดยใช้ชิ้นงานบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก 5 ชิ้น ต่อการทดสอบอุณหภูมิการเผา 1 ช่วงอุณหภูมิ นำไปทดสอบค่าต่างๆ ดังนี้

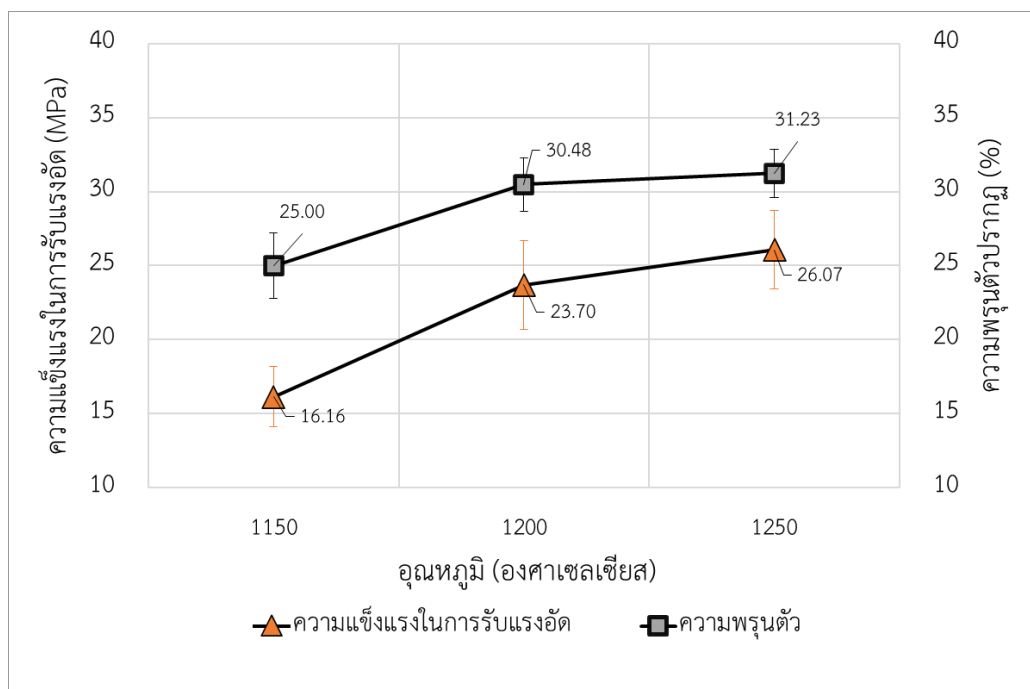
- ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density)
- ค่าความพรุนตัวปรากฏ (apparent porosity)
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ (permeability rate)
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (compressive strength)

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก ในปัจจัยด้านอุณหภูมิการเผาที่เงื่อนไขต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิการเผา	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ (L/m ² ·min)	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1150	1.65 ± 0.01	25.00 ± 2.23	735 ± 83.77	16.16 ± 2.02
1200	1.65 ± 0.05	30.48 ± 1.81	939.33 ± 45.22	23.70 ± 3.01
1250	1.60 ± 0.02	31.23 ± 1.64	951.81 ± 57.37	26.07 ± 2.64

จากผลการทดสอบเงื่อนไขในการเผาบล็อกพรุนที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 1150 1200 และ 1250 °C เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพรุนตัวของบล็อกพรุนที่ใช้อุณหภูมิในการเผาที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.1 พบว่าที่อุณหภูมิการเผาที่สูงมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงและความพรุนตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 1150 และ 1200 °C พบว่า ที่อุณหภูมิ 1150 °C มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 16.16 MPa ส่วนชิ้นงานบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 23.70 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 46% แต่ที่อุณหภูมิ 1150 °C ชิ้นงานความพรุนตัวที่ต่ำกว่า เนื่องจากการทดสอบปริมาณรูพรุนในชิ้นงานบล็อกพรุนสำหรับงานวิจัยนี้ จะคิดจากน้ำหนักของน้ำที่ค้างอยู่ในรูพรุน ซึ่งชิ้นงานบล็อกพรุนที่เผาด้วยอุณหภูมิ 1150 °C เคลือบยังมีความสุกตัวและหลอมตัวที่ไม่ดีพอ ภายในชิ้นงานบล็อกพรุนบางส่วนยังมีความเป็นผงเคลือบอยู่ ซึ่งดูดซึมน้ำได้ดี ทำให้น้ำหนักของชิ้นงานที่แช่ในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อคิออกมาเป็นปริมาณรูพรุนจะทำให้ชิ้นงานบล็อกพรุนมีค่าความพรุนตัวที่ต่ำลง เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงและปริมาณรูพรุนของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1500 °C เปรียบเทียบที่การเผาบล็อกพรุนที่อุณหภูมิ 1200 และ 1250 °C พบว่า ค่าความแข็งแรงและความพรุนตัวของบล็อกพรุนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซียสมีค่าความแข็งแรง และความพรุนเพิ่มขึ้นประมาณ 9% และ 2% เท่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่อุณหภูมิ 1200 °C เพื่อเป็นการลดต้นทุนในส่วนของพลังงาน



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่ใช้ อุณหภูมิในการเผาที่แตกต่างกัน

4.3.2 อัตราส่วนระหว่างมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน

ทำการทดสอบหาอัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ เศษเซรามิก และเคลือบขาวทึบ โดยอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกและเคลือบขาวทึบได้แก่

- ร้อยละ 75 : 25 โดยน้ำหนัก
- ร้อยละ 80 : 20 โดยน้ำหนัก
- ร้อยละ 85 : 15 โดยน้ำหนัก

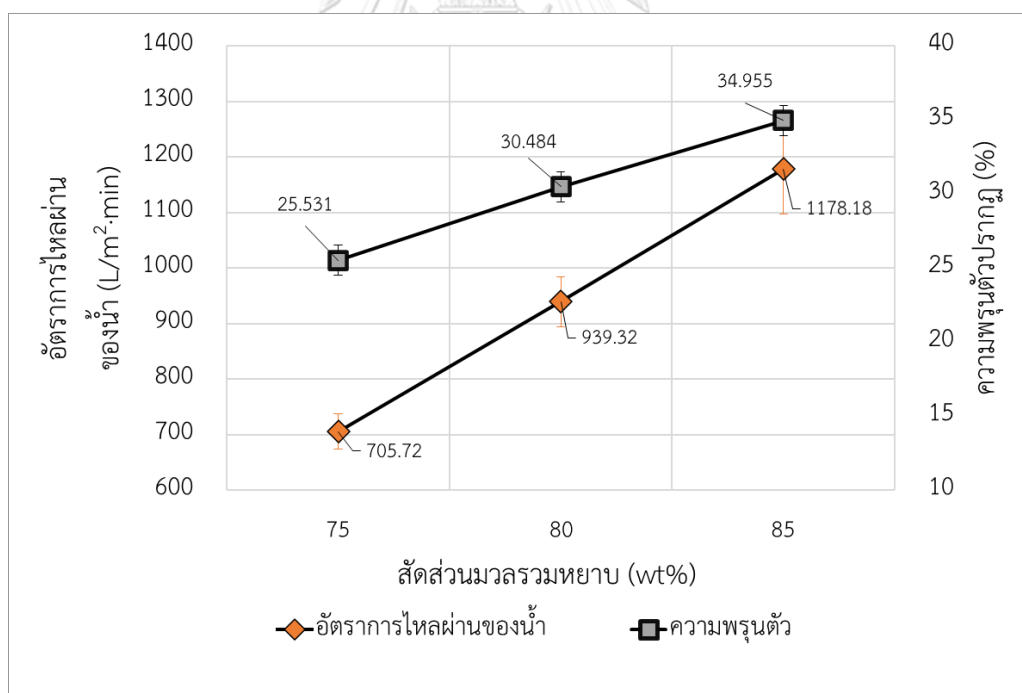
โดยใช้เงื่อนไขในการขึ้นรูป คือ มวลรวมหยาบขนาด 2-5 มิลลิเมตรเพียงอย่างเดียว ใช้ สัตส่วนเคลือบแห้ง ร้อยละ 71.43 ต่อน้ำ ร้อยละ 28.57 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ทำการขึ้นรูปบล็อกพรุนจำนวน 5 ชิ้นต่ออัตราส่วนจากนั้นนำบล็อกพรุนที่ได้ไปทดสอบค่าต่างๆดังนี้

- ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density)
- ค่าความพรุนตัวปรากฏ (apparent porosity)
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ(permeability rate)
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (compressive strength)

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก ในปัจจัยด้านอัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.5

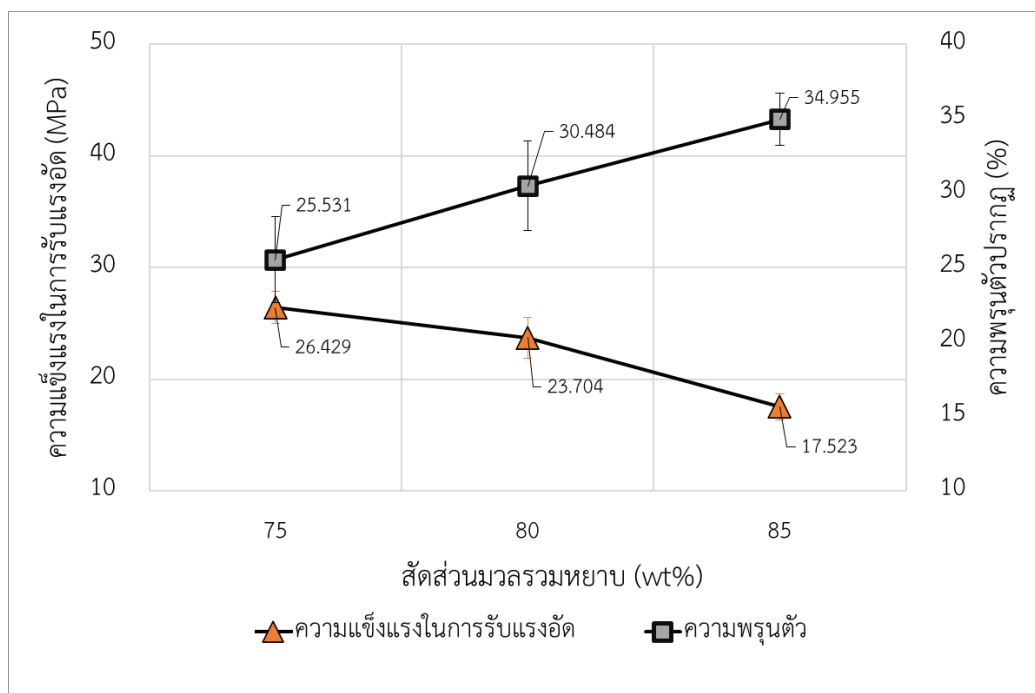
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุนที่อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานต่างๆ

อัตราส่วนระหว่างมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ ($\text{L/m}^2 \cdot \text{min}$)	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
75 : 25	1.72 ± 0.02	25.53 ± 1.47	705.72 ± 31.89	26.43 ± 2.91
80 : 20	1.65 ± 0.05	30.48 ± 1.81	939.33 ± 45.22	23.70 ± 3.01
85 : 15	1.55 ± 0.02	34.96 ± 1.16	1178.18 ± 81.59	17.52 ± 1.75



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่านของน้ำและความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่ใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบและปริมาณเคลือบที่ต่างกัน

จากการทดสอบอัตราส่วนระหว่างปริมาณมวลรวมหยาบและปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ต่างกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่านของน้ำและความพรุนตัวของบล็อกพรุนที่ใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบและปริมาณเคลือบที่ต่างกันดังรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณมวลรวมหยาบที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความพรุนตัวและอัตราการไหลผ่านน้ำของบล็อกพรุนมีค่าสูงมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 80 และ 85 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความพรุนตัวและอัตราการไหลผ่านน้ำของบล็อกพรุนที่สัดส่วนมวลรวมหยาบ ร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 14% และ 25% แต่เมื่อมาพิจารณาค่าความแข็งแรงโดยทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพรุนตัวของบล็อกพรุนที่ใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบและปริมาณเคลือบที่ต่างกันดังรูปที่ 4.3 พบว่าที่สัดส่วนมวลรวมหยาบร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงมากกว่าสัดส่วนมวลรวมหยาบร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ถึง 35% เนื่องจากปริมาณเคลือบที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เศษเซรามิกที่ใช้เป็นมวลรวมหยาบสามารถยึดเกาะกันได้ดียิ่งขึ้น เมื่อลดสัดส่วนมวลรวมหยาบลงไปที่ร้อยละ 75 จากร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และเพิ่มสัดส่วนเคลือบเป็นร้อยละ 25 จากร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจาก 23.70 MPa เป็น 26.43 MPa แต่อัตราการไหลผ่านของน้ำและความพรุนตัวของชิ้นงานก็มีค่าต่ำลง เนื่องจากปริมาณของเคลือบที่มากเกินไป ส่งผลให้เคลือบอาจเกิดการไหลกึ่งที่ด้านล่างของชิ้นงานในขณะที่ขึ้นรูป รูปพรุนในบล็อกพรุนถูกแทนที่ด้วยวัสดุเชื่อมประสาน ทำให้ชิ้นงานมีค่าความพรุนตัวที่ต่ำลงและส่งผลการอัตราการไหลผ่านของน้ำมีค่าต่ำลงอีกด้วย ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก และสัดส่วนวัสดุเชื่อมประสานที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่ให้ค่าความแข็งแรงที่ดีและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ดี



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่ใช้สัดส่วนมวลรวมหยาบและปริมาณเคลือบที่ต่างกัน

4.3.3 ขนาดของเศษเซรามิก

ทำการทดสอบหาอัตราส่วนในแต่ละขนาดของเศษเซรามิก แบ่งออกเป็น 2 ขนาด ได้แก่ มวลรวมละเอียด 0–2 มิลลิเมตร และ มวลรวมหยาบ 2–5 มิลลิเมตร โดยอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อเศษเซรามิกมวลรวมหยาบได้แก่

- ร้อยละ 0 : 100 โดยน้ำหนัก
- ร้อยละ 25 : 75 โดยน้ำหนัก
- ร้อยละ 33.33 : 66.67 โดยน้ำหนัก

โดยใช้เงื่อนไขในการขึ้นรูป คือ เศษเซรามิกปริมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก เคลือบ (เคลือบแห้งร้อยละ 71.43 โดยน้ำหนัก) ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ทำการขึ้นรูปบล็อกพรุนจำนวน 5 ชิ้นต่ออัตราส่วน จากนั้นนำบล็อกพรุนที่ได้ไปทดสอบหาค่าต่างๆ ดังนี้

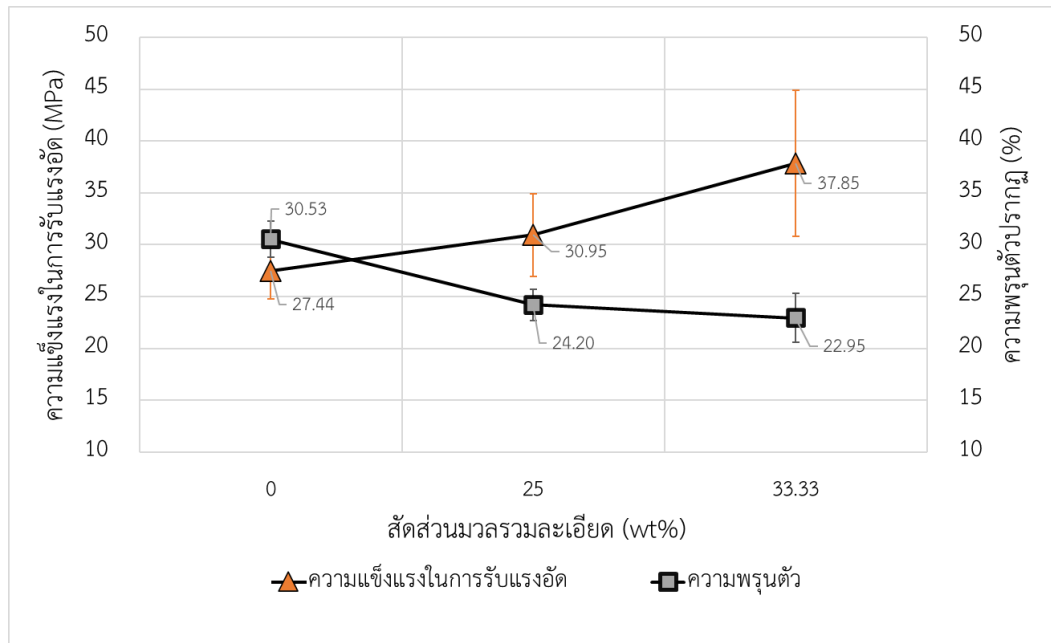
- ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density)
- ค่าความพรุนตัวปรากฏ (apparent porosity)
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ (permeability rate)
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (compressive strength)

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานบล็อกพรุนจาก
เศษเซรามิก ในปัจจัยด้านอัตราส่วนในแต่ละขนาดของเศษเซรามิก แสดงดังตารางที่ 4.6

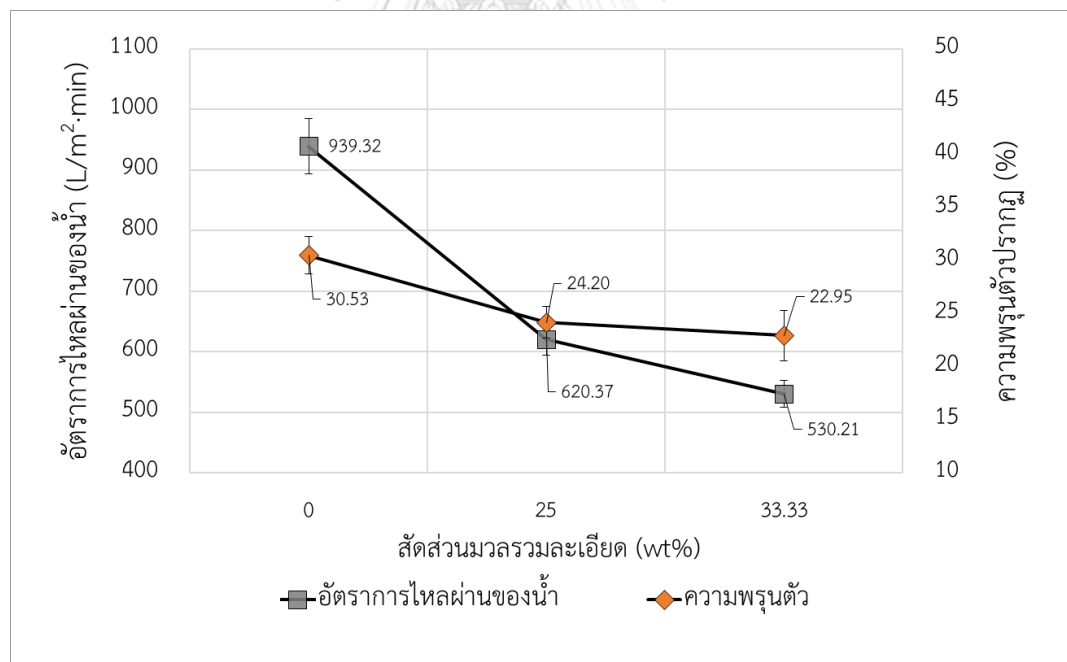
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุนที่อัตราส่วนในแต่ละ
ขนาดของเศษเซรามิก

อัตราส่วนระหว่าง มวลรวมหยาบกับ มวลรวมละเอียด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น รวม (g/cm ³)	ความพรุนตัว ปรากฏ (%)	อัตราการไหลซึม ผ่านของน้ำ (L/m ² ·min)	ค่าความแข็งแรง ต่อแรงอัด (MPa)
0 : 100	1.65 ± 0.05	30.53 ± 1.75	939.33 ± 45.22	27.44 ± 2.64
25 : 75	1.75 ± 0.03	24.20 ± 1.50	620.37 ± 25.73	30.95 ± 3.98
33.33 : 66.67	1.76 ± 0.04	22.95 ± 2.35	530.21 ± 21.87	37.85 ± 7.02

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่
อัตราส่วนต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพรุนของบล็อกพรุนที่ใช้
สัดส่วนมวลรวมละเอียดที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเศษเซรามิกมวลรวม
ละเอียด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดมีค่าที่สูงขึ้น แต่ในทางกลับกันความพรุนตัวชิ้นงานบล็อก
พรุนมีค่าต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบบล็อกพรุนที่ไม่ผสมมวลรวมละเอียดกับบล็อกพรุนที่มีสัดส่วนมวลรวม
ละเอียดร้อยละ 33.33 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจาก 27.44 MPa เป็น 37.85 MPa
หรือคิดเป็นประมาณ 38% แต่เมื่อพิจารณาอัตราการไหลผ่านของน้ำของการใช้สัดส่วนมวลรวม
ละเอียดร้อยละ 33.33 และ 25 โดยน้ำหนัก เทียบกับบล็อกพรุนที่ใช้แต่มวลรวมหยาบเพียงอย่าง
เดียว พบว่ามีค่าลดลงประมาณ 43% และ 34% เนื่องจากสัดส่วนเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดขนาด
0-2 มิลลิเมตร ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สามารถจัดเรียงตัวในแม่พิมพ์ได้ดียิ่งขึ้น บล็อกพรุนมีความพรุนตัว
น้อยลง เนื่องจากมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กจะมีการจัดเรียงตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างมวลรวม
หยาบที่มีขนาดใหญ่ ทำให้เศษเซรามิกมีการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น [42] เมื่อเปรียบเทียบความพรุนตัวและ
อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพรุนที่สัดส่วนมวลรวมละเอียดที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.5 พบว่า
รูพรุนในโครงสร้างที่น้อยลงซึ่งส่งผลให้อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำมีค่าต่ำลงไปด้วยเช่นกัน
ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เพียงเศษเซรามิกมวลรวมหยาบ ขนาด 2-5 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้บล็อกพรุน
ที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่เหมาะสมคือมีความแข็งแรงที่ดีแต่ยังคงความสามารถใน
การระบายน้ำ



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่ใช้สัดส่วนมวลรวมละเอียดที่ต่างกัน



รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบอัตราการความพรุนตัวปรากฏและการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพรุนที่สัดส่วนมวลรวมละเอียดที่แตกต่างกัน

4.3.4 ความเข้มข้นของน้ำเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

ทำการทดลองหาอัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเคลือบแห้งขาวทึบและน้ำ ดังนี้

- ร้อยละ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก
- ร้อยละ 68.96 : 31.04 โดยน้ำหนัก
- ร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก

โดยใช้เงื่อนไขในการขึ้นรูป คือ เศษเซรามิก ขนาด 2-5 มิลลิเมตร ปริมาณร้อยละ 80 และเคลือบปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ทำการขึ้นรูปบล็อกพรุนจำนวน 5 ชิ้นต่ออัตราส่วนจากนั้นนำบล็อกพรุนที่ได้ไปทดสอบหาค่าต่างๆ ดังนี้

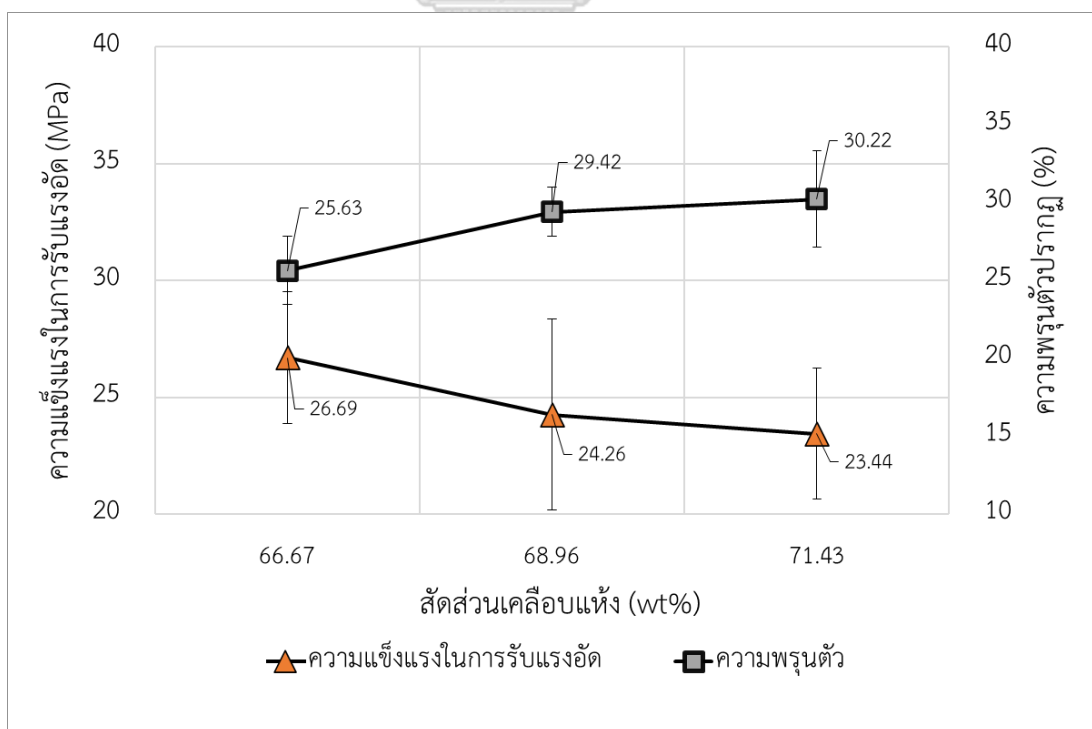
- ค่าความหนาแน่นรวม (bulk density)
- ค่าความพรุนตัวปรากฏ (apparent porosity)
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ (permeability rate)
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (compressive strength)

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นงานบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก ในปัจจัยด้านอัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.7

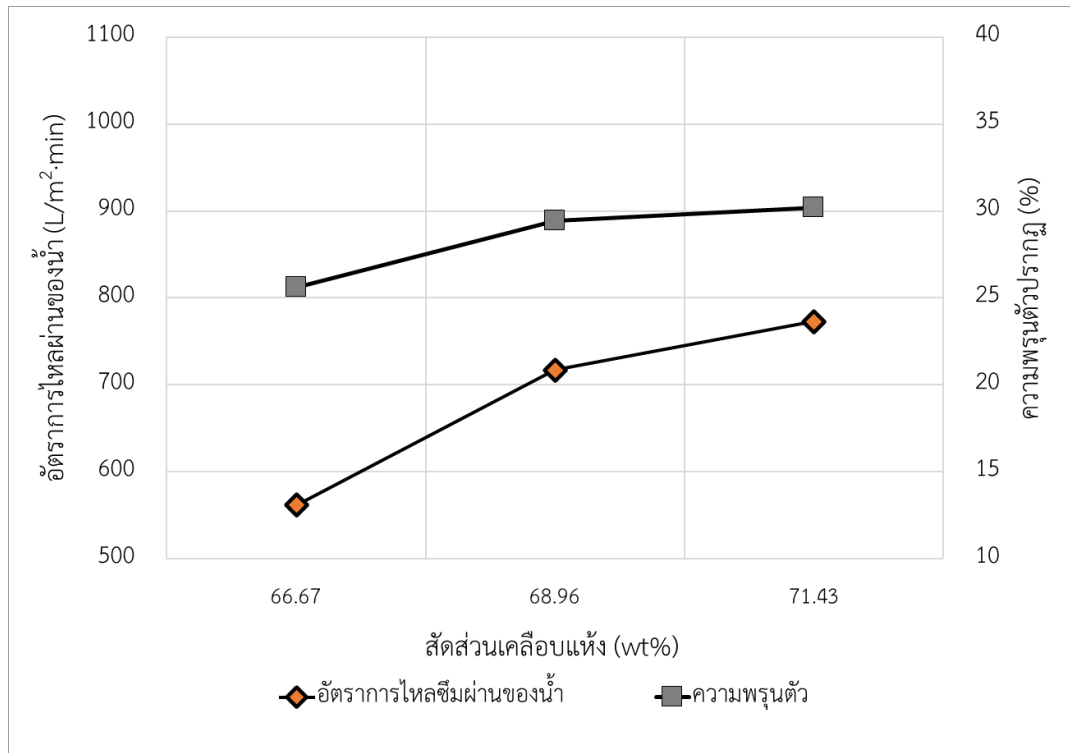
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุนที่อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนต่างๆ

อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ (L/m ² ·min)	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
66.67 : 33.33	1.72 ± 0.03	25.63 ± 2.19	561.84 ± 53.08	26.70 ± 2.83
68.96 : 31.04	1.64 ± 0.03	29.42 ± 1.57	716.91 ± 14.89	24.26 ± 4.09
71.43 : 28.57	1.60 ± 0.06	30.22 ± 3.10	773.00 ± 87.56	23.44 ± 2.80

จากการทดสอบหาสัดส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำของเคลือบขาวทึบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าสัดส่วนของผงเคลือบขาวทึบที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของเคลือบมีค่ามากขึ้น มีความหนืดมากขึ้น สามารถยึดเกาะเศษเซรามิกในระหว่างการขึ้นรูปได้ดีกว่า เนื่องจากปริมาณผงเคลือบที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการไหลตัวของเคลือบมีค่าต่ำลง ซึ่งช่วยลดปัญหาที่อาจเกิดการไหลกองกันที่ด้านล่างของชิ้นงานได้ในระหว่างการขึ้นรูปได้ [27] ทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพรุนตัวของบล็อกพรุนในสัดส่วนการใช้เคลือบแห้งที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.6 พบว่าที่สัดส่วนเคลือบแห้งที่น้อยลงชิ้นงานบล็อกพรุนจะมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบสัดส่วนเคลือบแห้งที่ร้อยละ 66.67 และ 71.43 โดยน้ำหนัก บล็อกพรุนมีค่าความแข็งแรงลดลงจาก 26.70 MPa เป็น 23.44 MPa หรือคิดเป็นประมาณ 12% แต่เมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลซึมผ่านของน้ำและความพรุนตัวของบล็อกพรุนในสัดส่วนการใช้เคลือบแห้งที่ต่างกัน ดังรูปที่ 4.7 พบว่าที่สัดส่วนเคลือบแห้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลผ่านของน้ำมาค่าสูงขึ้น เนื่องจากชิ้นงานมีความพรุนตัวที่สูงขึ้น เมื่อเทียบอัตราการไหลผ่านของน้ำในสัดส่วนเคลือบแห้งร้อยละ 66.67 และ 71.43 โดยน้ำหนัก จากตารางที่ 4.43 และตารางที่ 4.51 สัดส่วนเคลือบแห้งร้อยละ 71.43 โดยน้ำหนัก มีอัตราการไหลผ่านของน้ำมากกว่าถึง 40% ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สัดส่วนเคลือบแห้งร้อยละ 71.43 โดยน้ำหนัก ในการขึ้นรูปบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดและความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนในสัดส่วนการใช้เคลือบแห้งที่ต่างกัน



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอัตราการใช้คลือบแห้งของน้ำและความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนในสัดส่วนการใช้คลือบแห้งที่ต่างกัน

4.4 ลัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปบล็อกพรุน

จากการทดสอบปัจจัยการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกพบว่าปัจจัยทั้ง 4 ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก อัตราส่วนที่ใช้ระหว่างเศษเซรามิกกับวัสดุเชื่อมประสาน ขนาดของเศษเซรามิกที่ใช้เป็นมวลรวมหยาบ และความเข้มข้นของเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน โดยเงื่อนไขการขึ้นรูปชิ้นงานที่ให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุด คือ

- อุณหภูมิการเผา 1200 °C
- ลัดส่วนเศษเซรามิกต่อวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 80 : 20 โดยน้ำหนัก
- มวลรวมหยาบขนาด 2-5 มิลลิเมตร
- ลัดส่วนผงเคลือบแห้งต่อน้ำ คือ ร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก

โดยบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบขาวทึบเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้เงื่อนไขดังกล่าวในการขึ้นรูป มีสมบัติทางดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก

บล็อกพรุนจาก เศษเซรามิก	ความหนาแน่น รวม (g/cm ³)	ความพรุนตัว ปรากฏ (%)	อัตราการไหลซึม ผ่านของน้ำ (L/m ² -min)	ค่าความแข็งแรง ต่อแรงอัด (MPa)
ค่าต่ำสุด	1.55	25.25	647.75	19.79
ค่าสูงสุด	1.70	32.46	985.75	30.69
ค่าเฉลี่ย	1.64	30.43	897.74	24.57
ค่า SD	0.05	2.02	91.46	3.13

4.5 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน

สิริพรรณและคณะ (2556) [43] ได้ทำการพัฒนาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่มีผงแก้วและดินตะกอนสุขภัณฑ์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน และได้มีการนำบล็อกพรุนคอนกรีตตามท้องตลาดนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำข้อมูลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุนคอนกรีตตามท้องตลาดและบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกจากงานวิจัยดังกล่าว มาใช้ในการเปรียบเทียบกับบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานวิจัยนี้ และนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 522 (2010) สำหรับบล็อกคอนกรีตพรุน และมาตรฐาน

GB/T 25993 (2010) สำหรับบล็อกพรุนจากเซรามิก โดยสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่สนใจ ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ และค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก

ชิ้นงาน	ควาหนาแน่น รวม (g/cm ³)	ความพรุนตัว ปรากฏ (%)	อัตราการไหลซึม ผ่านของน้ำ (L/m ² ·min)	ค่าความแข็งแรง ต่อแรงอัด (MPa)
1.บล็อกพรุนคอนกรีต	2.26	17.21	448.36	6.33
2.บล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่มีผงแก้วและดินตะกอนสุกัณฑ์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน	1.99	19.01	589.25	6.32
3.บล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบขาวทึบเป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานวิจัยนี้	1.64	30.43	897.74	24.57
มาตรฐาน ACI 522 (2010)	-	-	*83.83 – 730.54	2.8 - 28
มาตรฐาน GB/T 25993 (2010)	-	-	11.97	3

*กำหนดให้ 0.00167 cm/sec = 1 L/m²·min

พบว่าบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบขาวทึบเป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานวิจัยนี้มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่ดีกว่าตามมาตรฐานทั้ง 2 แบบกำหนด และมากกว่าบล็อกพรุนคอนกรีตตามทั่วไปตามท้องตลาด โดยมีค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดมากกว่าถึงประมาณ 4 เท่า และอัตราการไหลซึมผ่านของน้ำมากกว่าประมาณ 2 เท่า เมื่อเทียบกับบล็อกพรุนคอนกรีตตามท้องตลาด

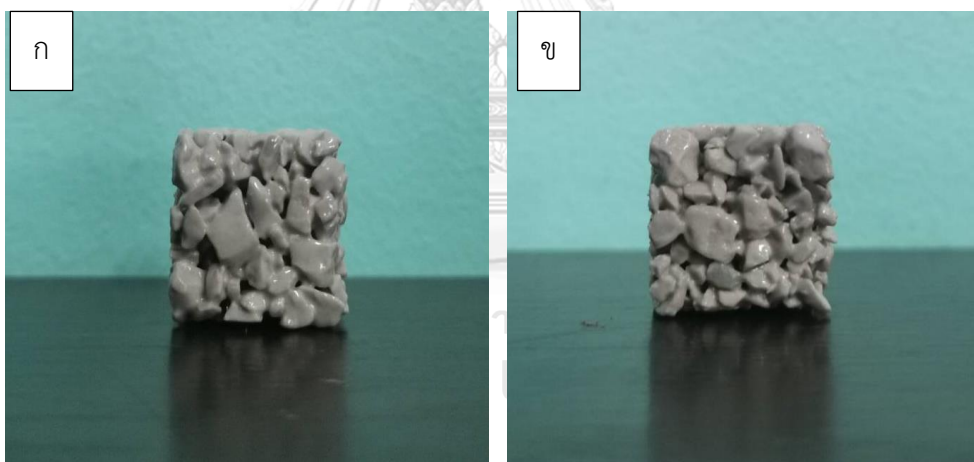
4.6 ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของรูปทรงภายในบล็อกพรุน

ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างและปริมาณรูปทรงของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก ในปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่มีผลต่อปริมาณรูปทรงในโครงสร้าง ของชิ้นงานบล็อกพรุน และบล็อกพรุนที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่ด้านขนาดของเศษเซรามิกและ ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมที่สุดตามหัวข้อที่ 4.4

4.6.1 การตรวจสอบโครงสร้างรูปทรงของบล็อกพรุนที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เงื่อนไขในการขึ้นรูปบล็อกพรุนดังนี้

- อุณหภูมิการเผา 1200 °C
- สัดส่วนเศษเซรามิกต่อวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนัก
- มวลรวมหยาบขนาด 2-5 มิลลิเมตร
- สัดส่วนผงเคลือบแห้งต่อน้ำ คือ ร้อยละ 71.43:28.57 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงานบล็อกพรุนที่นำมาตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 4.8ก) และผลการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างภายในของบล็อกพรุนแสดงดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.8 บล็อกพรุน ก) เงื่อนไขสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูป ข) เงื่อนไขสัดส่วนของปริมาณ มวลรวมหยาบต่อมวลรวมละเอียด

4.6.2 การตรวจสอบโครงสร้างรูปทรงของบล็อกพรุนในปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก โดยใช้เงื่อนไขในการขึ้นรูปบล็อกพรุนดังนี้

- อุณหภูมิการเผา 1200 °C
- สัดส่วนเศษเซรามิกต่อวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 80 : 20 โดยน้ำหนัก
- มวลรวมหยาบขนาด 2 - 5 มิลลิเมตร ปริมาณร้อยละ 66.67 โดยน้ำหนัก และ มวลรวมละเอียดขนาด 0 – 2 มิลลิเมตร ปริมาณร้อยละ 33.33 โดยน้ำหนัก

- สัดส่วนผงเคลือบแห้งต่อน้ำ คือ ร้อยละ 71.43:28.57 โดยน้ำหนัก
ชิ้นงานบล็อกพรุนที่นำมาตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 4.8ข) และผลการตรวจสอบลักษณะ
โครงสร้างภายในของบล็อกพรุนแสดงดังตารางที่ 4.11

4.6.3 การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนในปัจจุบันด้านปริมาตรวัสดุเชื่อม
ประสาน

โดยใช้เงื่อนไขในการขึ้นรูปบล็อกพรุนดังนี้

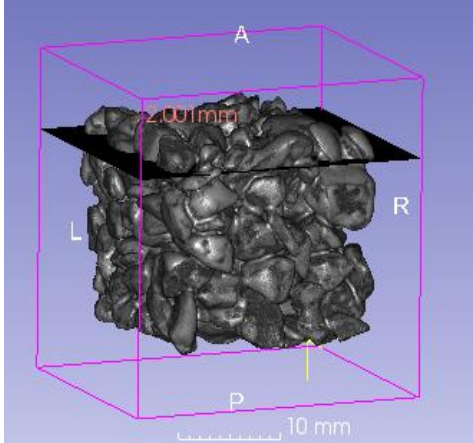
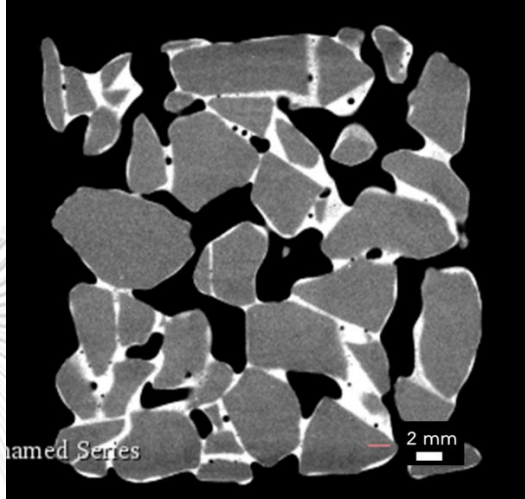
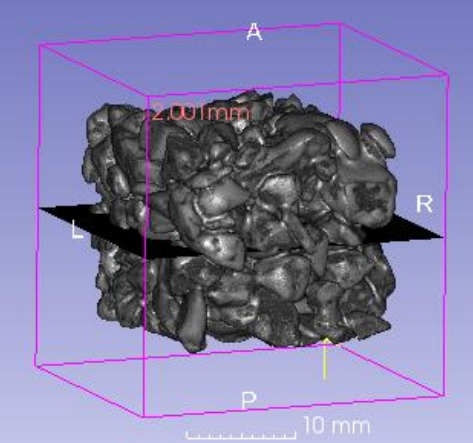
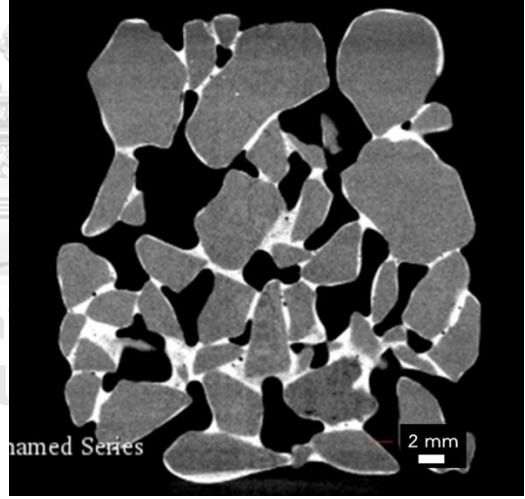
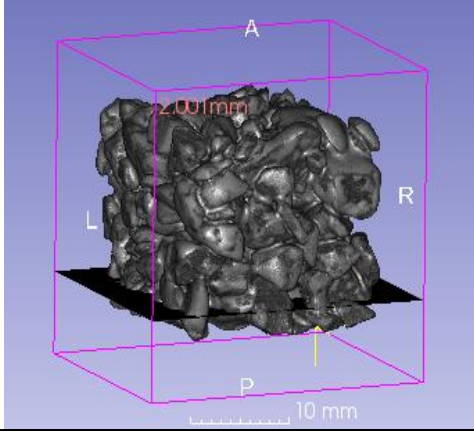
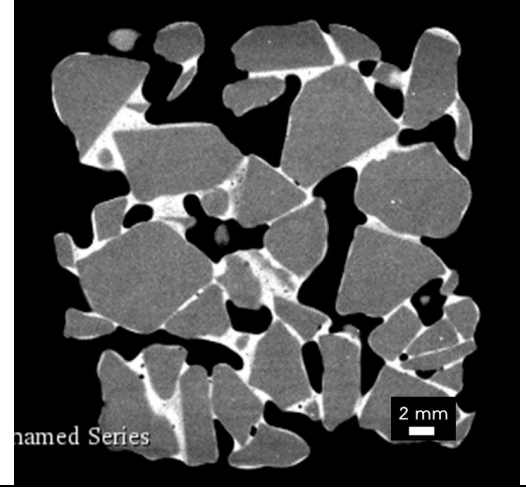
- อุณหภูมิการเผา 1200 °C
- สัดส่วนเศษเซรามิกต่อวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 75:25 โดยน้ำหนัก
- มวลรวมหยาบขนาด 2-5 มิลลิเมตร
- สัดส่วนผงเคลือบแห้งต่อน้ำ คือ ร้อยละ 71.43:28.57 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงานบล็อกพรุนที่นำมาตรวจสอบแสดงดังรูปที่ 4.9) และผลการตรวจสอบลักษณะ
โครงสร้างภายในของบล็อกพรุนแสดงดังตารางที่ 4.12

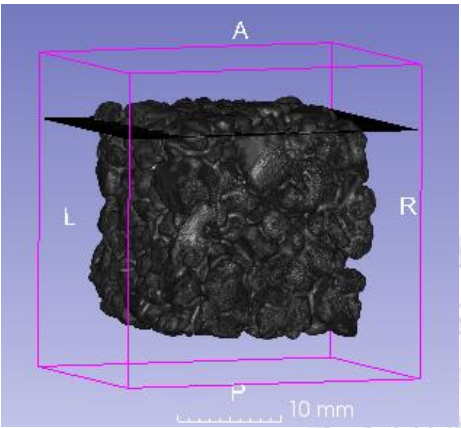
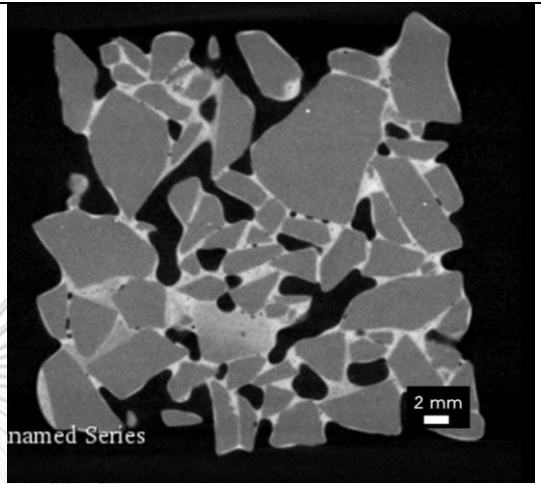
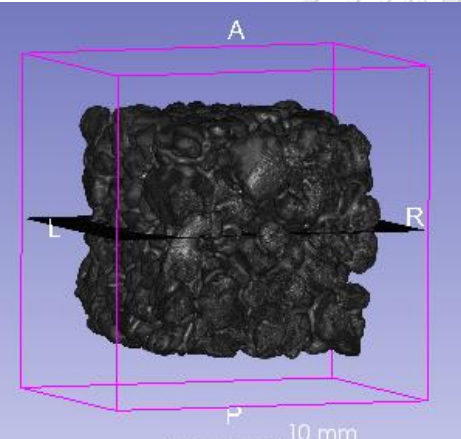
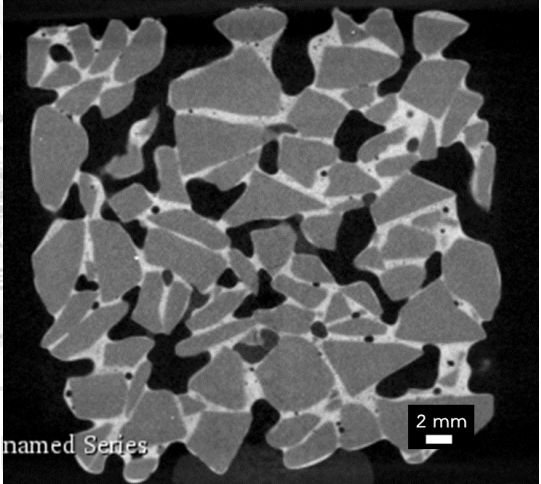
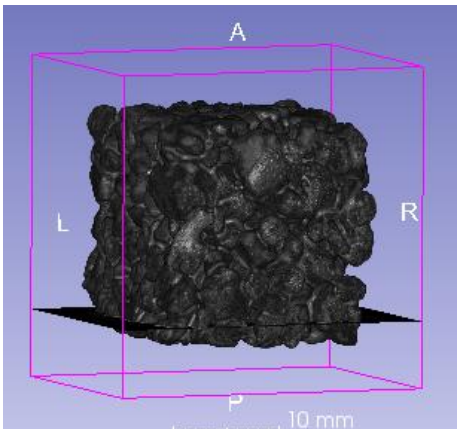
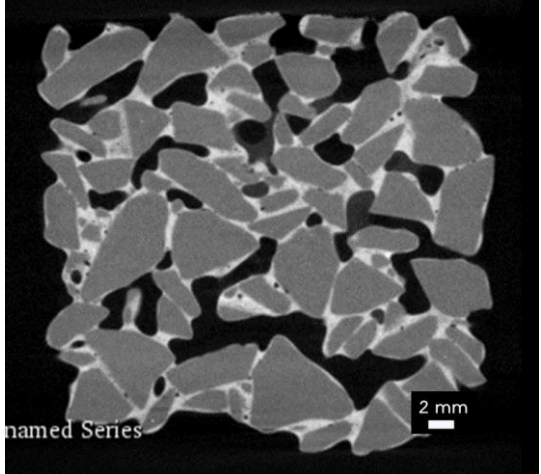


รูปที่ 4.9 บล็อกพรุนที่ใช้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาตรวัสดุเชื่อมประสานต่อมวลรวมหยาบ

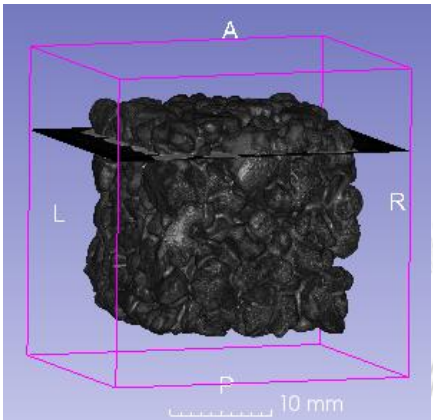
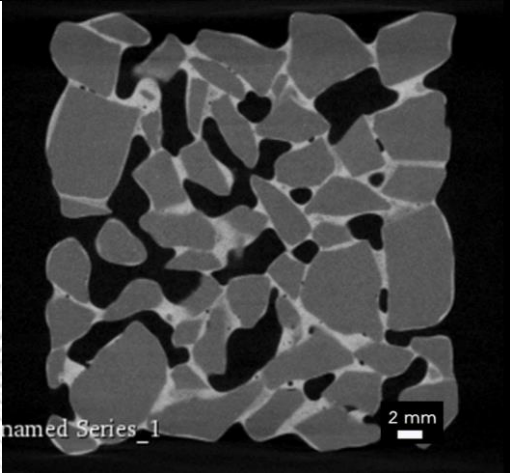
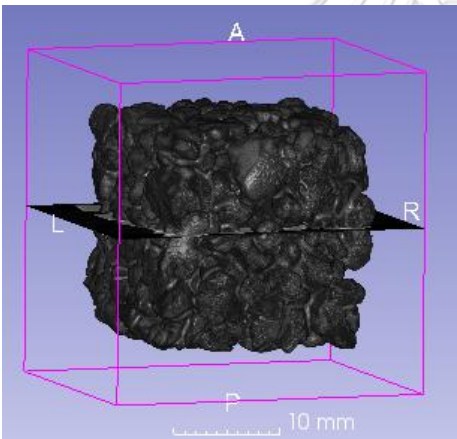
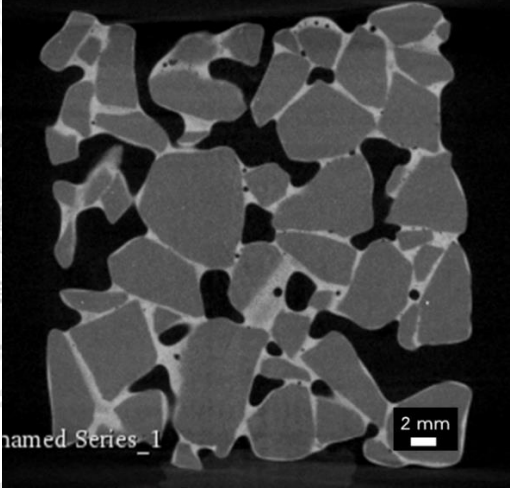
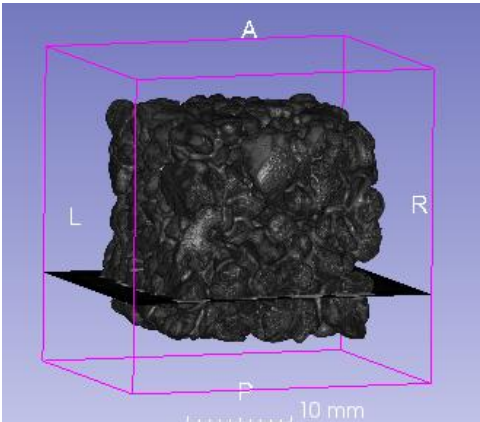
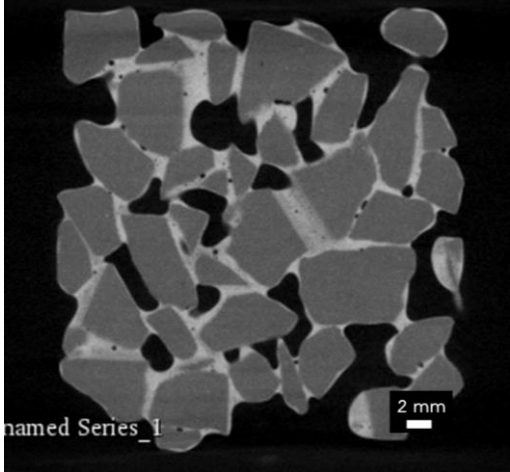
ตารางที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพูนจากเศษเซรามิกที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพูนที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด	
ตำแหน่งชิ้นงาน	ภาพตัดขวาง
<p>1. ตำแหน่งบน</p> 	
<p>2. ตำแหน่งกลาง</p> 	
<p>3. ตำแหน่งล่าง</p> 	

ตารางที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพรุนที่ศึกษาปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก

การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนในปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก	
ตำแหน่งชิ้นงาน	ภาพตัดขวาง
<p>1. ตำแหน่งบน</p> 	
<p>2. ตำแหน่งกลาง</p> 	
<p>3. ตำแหน่งล่าง</p> 	

ตารางที่ 4.12 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพรุนที่ศึกษาปัจจัยด้านปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน

การตรวจสอบโครงสร้างรูพรุนของบล็อกพรุนในปัจจัยด้านปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน	
ตำแหน่งชิ้นงาน	ภาพตัดขวาง
<p>1. ตำแหน่งบน</p> 	
<p>2. ตำแหน่งกลาง</p> 	
<p>3. ตำแหน่งล่าง</p> 	

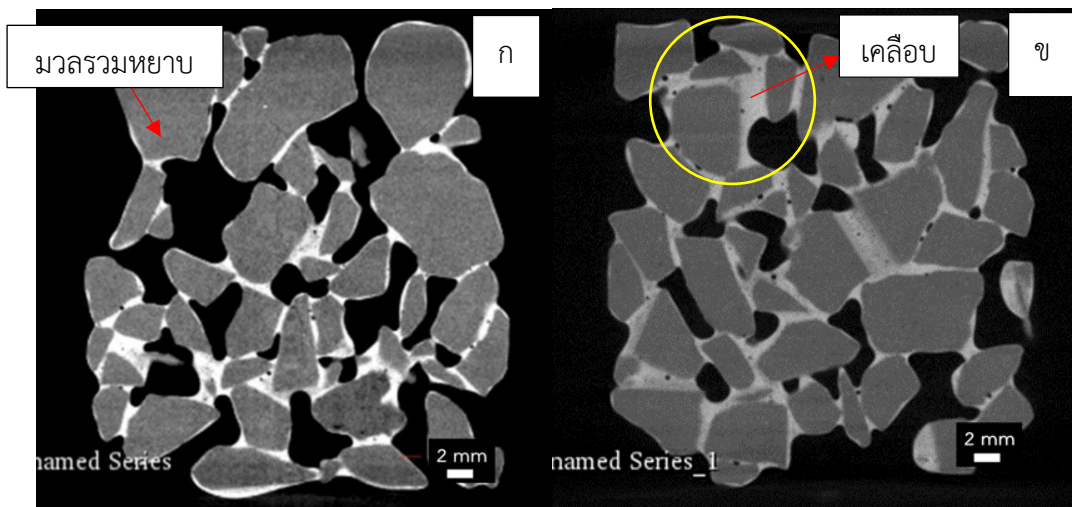
จากตารางที่ 4.10 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด สังเกตได้ว่ารูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตรขึ้นไป แต่เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.11 และตารางที่ 4.12 เป็นชิ้นงานที่มีการผสมสัดส่วนมวลรวมละเอียดเพิ่มลงไปและชิ้นงานที่เพิ่มปริมาณเคลือบ พบว่าขนาดของรูพรุนจะมีขนาดที่เล็กลง ในตารางที่ 4.11 รูพรุนขนาดใหญ่มักจะถูกแทนที่ด้วยมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กทำให้ขนาดรูพรุนในชิ้นงานลดลง ส่วนตารางที่ 4.12 ตำแหน่งชิ้นงานด้านล่างพบว่ารูพรุนจะถูกเติมเต็มด้วยวัสดุเชื่อมประสานหรือเคลือบ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณรูพรุนที่ตรวจสอบได้ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 ปริมาณรูพรุนในโครงสร้างบล็อกพรุน

การตรวจสอบ	ปริมาณรูพรุนเปิด (%)	ปริมาณรูพรุนปิด (%)	ปริมาณรูพรุนทั้งหมด (%)
1. บล็อกพรุนที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด	26.36	0.08	26.41
2. ปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก	18.15	0.53	18.59
3. ปัจจัยด้านปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน	22.52	0.16	22.64

จากตารางที่ 4.14 พบว่าชิ้นงานบล็อกพรุนที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจสอบที่ 1 มีจำนวนรูพรุนในโครงสร้างทั้งหมด 26.41% ซึ่งเป็นรูพรุนเปิดหรือรูพรุนที่เชื่อมต่อกับผิวชิ้นงาน 26.36% และมีรูพรุนปิดหรือรูพรุนที่ไม่เชื่อมต่อกับผิวชิ้นงาน[44] เพียง 18.59% ซึ่งเพิ่มสมบัติด้านการไหลซึมผ่านของได้ดี เมื่อพิจารณาบล็อกพรุนในการตรวจสอบที่ 1 เทียบกับบล็อกพรุนที่มีการเพิ่มปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในการตรวจสอบที่ 3 พบว่าความพรุนตัวของชิ้นงานมีค่ามากกว่า เนื่องจากปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เคลือบไหลลงที่ด้านล่างของชิ้นงาน ซึ่งอาจเกิดในขณะที่ทำการขึ้นรูปด้วยมือในแม่พิมพ์ เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก ดังรูปที่ 4.10ข) ในบริเวณที่ที่มีการรวมลงจะสังเกตเห็นเคลือบที่ไหลเข้าไปแทนที่รูพรุนในชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.10ก) ปริมาณของเคลือบที่พอดีจะทำให้เกาะติดกับผิวเศษเซรามิกได้ดีโดยไม่แทนที่รูพรุนในโครงสร้างของชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก ชิ้นงานที่มีการผสมสัดส่วนมวลรวมละเอียดเพิ่มลงไป จากตารางที่ 4.14 พบว่าส่งผลให้ค่าความพรุนตัวในชิ้นงานมีค่าต่ำลงจากการที่ใช้มวลรวมหยาบในการขึ้นรูปเพียงอย่างเดียว เมื่อสังเกตลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกดังรูปที่ 4.11 พบว่าช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบจะถูกแทรกตัวด้วยมวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่าในบริเวณที่มีการรวมกลม ซึ่งช่วยให้ชิ้นงานบล็อกพรุนมีการจัดเรียงตัวของเศษเซรามิกได้แน่นขึ้น ส่งผลให้ปริมาณรูพรุนในโครงสร้างมีค่าต่ำลงด้วย

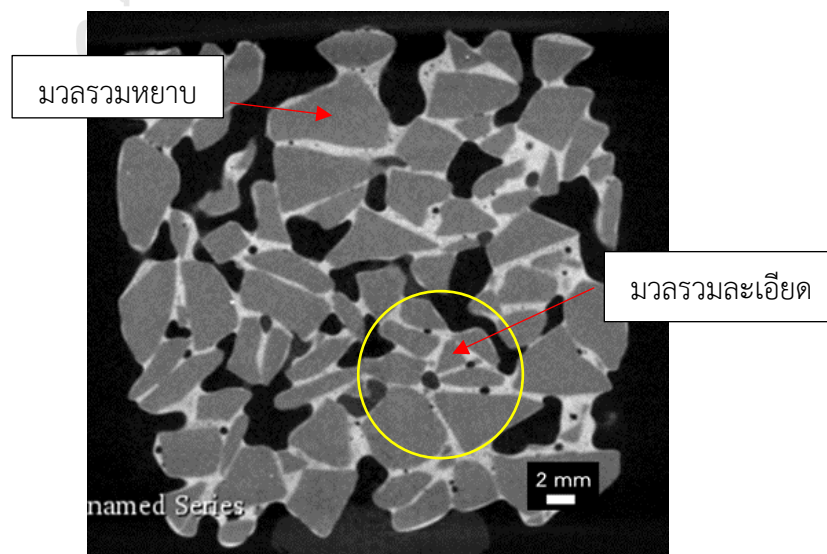


รูปที่ 4.10 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก

ก) บล็อกพรุนที่ขึ้นรูปด้วยปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด

ข) บล็อกพรุนที่ศึกษาปัจจัยด้านขนาดของเศษเซรามิก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ลักษณะโครงสร้างภายในของบล็อกพรุนที่ศึกษาในปัจจัยด้านปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน

บทที่ 5

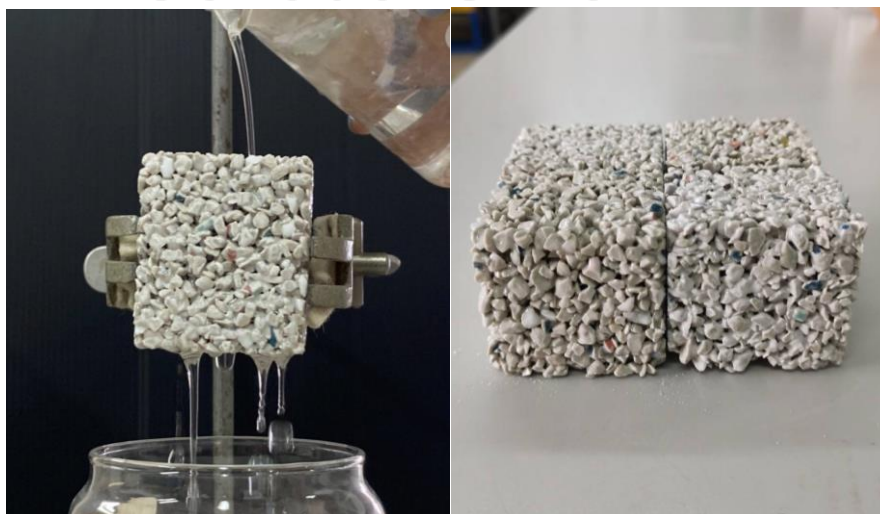
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยการเตรียมบล็อกปูทางเท้าพอร์นน้ำจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสาน ได้ทำการขึ้นรูปบล็อกปูทางเท้าพอร์นน้ำโดยการนำเศษเซรามิกที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมประเภทเครื่องใช้บนโต๊ะอาหารมาใช้เป็นมวลรวม และเลือกใช้เคลือบเซรามิกขาวที่มาเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ขนาดของเศษเซรามิก ความเข้มข้นของเคลือบเซรามิก และอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกและเคลือบเซรามิก ได้ข้อสรุปดังนี้

1. เงื่อนไขการขึ้นรูปบล็อกปูทางเท้าพอร์นน้ำจากเศษเซรามิกที่มีเคลือบเซรามิกเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ การใช้เศษเซรามิกขนาด 2-5 มิลลิเมตร ใช้สัดส่วนร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ต่อเคลือบขาวที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (สัดส่วนผงเคลือบแห้งต่อน้ำคือ ร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก) และทำการเผาที่อุณหภูมิการเผา 1200 °C ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดที่ 24.57 MPa ความหนาแน่น 1.64 g/cm³ ความพรุนตัว 30.43% และอัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ 897.74 L/m²·min โดยบล็อกปูทางเท้าพอร์นน้ำจากเศษเซรามิกในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.1

2. เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลกับคอนกรีตพอร์น พบว่ามีความแข็งแรงและมีอัตราการไหลซึมผ่านของน้ำได้มากกว่าคอนกรีตพอร์นตามท้องตลาดมากถึง 4 เท่าและ 2 เท่าตามลำดับ มากกว่ามาตรฐาน ACI 522 (2010) และ GB/T 25993 (2010) ที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 5.1 บล็อกปูทางเท้าพอร์นน้ำจากเศษเซรามิก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การขึ้นรูปบล็อกพรุนด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยมือในแม่พิมพ์ อาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอของสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน

2. ควรมีการศึกษาปัญหาการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำเมื่อมีการใช้งานระยะยาวเพิ่มเติม เนื่องจากน้ำที่ไหลผ่านบล็อกพรุนจะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ได้ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

3. ควรมีการทดลองในการใช้เศษเซรามิกชนิดอื่นๆ และเคลือบสูตรอื่นๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของชิ้นงานบล็อกพรุนที่ดีขึ้น และอาจให้รูปลักษณะ สีที่สวยงาม ซึ่งเป็นการเพิ่มทางเลือกให้แก่ผู้คนที่ต้องการใช้งาน



ภาคผนวก

ผลการทดสอบปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของบล็อกพรุน

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาบล็อกพรุนจากเศษเซรามิก

1.1) ผลการทดสอบเผาบล็อกพรุนที่อุณหภูมิ 1150 °C

ผลการทดสอบบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่ใช้เคลือบขาวที่บเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยเผาที่อุณหภูมิ 1150 °C

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 1
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 2
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1150 °C

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.66	25.40
2	1.67	22.14
3	1.64	27.86
4	1.66	23.53
5	1.64	26.06

ตารางที่ 2 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1150 °C

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ ($\text{L/m}^2\cdot\text{min}$)
1	0.5	18.46	24.95	651.39
2	0.5	17.84	24.99	672.66
3	0.5	17.37	24.55	703.45
4	0.5	14.56	24.95	825.83
5	0.5	14.59	24.95	824.15

ตารางที่ 3 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1150 °C

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	13.51
2	16.06
3	15.14
4	18.80
5	17.27

1.2) ผลการทดสอบเผาบล็อกพรุนที่อุณหภูมิ 1200 °C

ผลการทดสอบบล็อกพรุนจากเศษเซรามิกที่ใช้เคลือบขาวทึบเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 4
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 5
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 4 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.60	32.46
2	1.66	30.01
3	1.70	28.36
4	1.60	32.25
5	1.68	29.36

ตารางที่ 5 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพูนที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	อัตราการไหลซึมผ่าน ของน้ำ (L/m ² ·min)
1	0.5	13.25	24.55	922.23
2	0.5	13.18	24.45	930.84
3	0.5	14.05	24.35	876.74
4	0.5	12.48	24.50	981.07
5	0.5	13.21	23.04	985.75

ตารางที่ 6 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพูนที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 °C

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	20.88
2	21.27
3	28.40
4	24.22
5	23.76

1.3) ผลการทดสอบเผาบล็อกพูนที่อุณหภูมิ 1250 °C

ผลการทดสอบบล็อกพูนจากเศษเซรามิกที่ใช้เคลือบขาวทึบเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 7
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 8
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 7 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.58	30.68
2	1.60	32.28
3	1.62	29.98
4	1.62	29.67
5	1.58	33.55

ตารางที่ 8 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	อัตราการไหลซึมผ่านของ น้ำ (L/m ² ·min)
1	0.5	13.43	23.96	932.27
2	0.5	12.74	23.91	984.83
3	0.5	13.42	24.15	925.55
4	0.5	11.96	24.30	1032.11
5	0.5	13.57	24.99	884.31

ตารางที่ 9 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพรุนที่เผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	23.10
2	25.65
3	29.79
4	24.33
5	27.50

2. อัตราส่วนระหว่างมวลรวมและวัสดุเชื่อมประสาน

2.1) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 75 : 25 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 10
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 11
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 10 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานคือ ร้อยละ 75 : 25 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.71	26.62
2	1.76	23.79
3	1.72	25.82
4	1.70	27.18
5	1.73	24.26

ตารางที่ 11 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานคือ ร้อยละ 75 : 25 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ ($\text{L/m}^2 \cdot \text{min}$)
1	0.5	18.69	24.01	668.57
2	0.5	18.16	23.13	714.14
3	0.5	17.94	23.04	725.85
4	0.5	16.38	24.65	742.99
5	0.5	17.98	24.64	677.05

ตารางที่ 12 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 75 : 25 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	24.03
2	27.96
3	22.64
4	29.23
5	28.29

2.2) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 80 : 20 โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบบล็อกพูนจากเศษเซรามิกที่ใช้เคลือบขาวทึบเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 80 : 20 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 13
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 14
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 13 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 80 : 20 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.60	32.46
2	1.66	30.01
3	1.70	28.35
4	1.60	32.25
5	1.68	29.36

ตารางที่ 14 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 80 : 20 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	อัตราการไหลซึมผ่านของ น้ำ (L/m ² ·min)
1	0.5	13.25	24.55	922.23
2	0.5	13.18	24.45	930.84
3	0.5	14.05	24.35	876.74
4	0.5	12.48	24.50	981.07
5	0.5	13.21	23.04	985.75

ตารางที่ 15 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 80 : 20 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	20.88
2	21.27
3	28.40
4	24.22
5	23.76

2.3) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 85:15 โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบบล็อกพูนจากเศษเซรามิกที่ใช้เคลือบขาวทึบเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 85 : 15 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 16
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 17
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 16 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 85 : 15 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.56	33.50
2	1.55	35.49
3	1.58	33.93
4	1.54	35.81
5	1.53	36.04

ตารางที่ 17 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 85 : 15 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ ($\text{L/m}^2\cdot\text{min}$)
1	0.5	11.20	24.55	1091.01
2	0.5	10.57	24.75	1146.74
3	0.5	10.77	24.35	1143.75
4	0.5	10.19	24.45	1204.00
5	0.5	9.67	23.77	1305.41

ตารางที่ 18 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน คือ ร้อยละ 85 : 15 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	15.81
2	16.83
3	19.93
4	16.29
5	18.75

3. ขนาดของเศษเซรามิก

3.1) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ สัดส่วนร้อยละ 0 : 100 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 19
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 20
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 21

ตารางที่ 19 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง เศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 0 : 100 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.60	32.45
2	1.66	29.86
3	1.70	28.35
4	1.60	32.20
5	1.68	29.79

ตารางที่ 20 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวม ละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 0 : 100 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ ($\text{L/m}^2 \cdot \text{min}$)
1	0.5	13.25	24.55	922.23
2	0.5	13.18	24.45	930.84
3	0.5	14.05	24.35	876.74
4	0.5	12.48	24.50	981.07
5	0.5	13.21	23.04	985.75

ตารางที่ 21 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 0 : 100 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	30.69
2	24.18
3	25.91
4	26.97
5	29.46

3.2) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่สัดส่วนร้อยละ 25:75 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 22
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 23
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 24

ตารางที่ 22 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 25 : 75 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.71	26.12
2	1.77	24.19
3	1.78	22.51
4	1.73	25.20
5	1.74	22.98

ตารางที่ 23 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวม
ละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 25 : 75 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	อัตราการไหลซึมผ่านของ น้ำ (L/m ² ·min)
1	0.5	20.40	24.11	610.02
2	0.5	19.09	23.71	662.70
3	0.5	21.01	24.06	593.50
4	0.5	19.86	24.55	615.26
5	0.5	20.06	24.11	620.38

ตารางที่ 24 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวม
ละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 25 : 75 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	34.98
2	24.90
3	33.87
4	31.43
5	29.59

3.3) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ สัดส่วนร้อยละ 33.33 : 66.67 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 25
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 26
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 27

ตารางที่ 25 ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง เศษเซรามิกมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 33.33 : 66.67 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.72	24.29
2	1.77	23.16
3	1.80	19.09
4	1.72	25.26
5	1.78	22.95

ตารางที่ 26 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิกมวลรวม ละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 33.33 : 66.67 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	อัตราการไหลซึมผ่านของ น้ำ (L/m ² ·min)
1	0.5	22.47	24.30	549.23
2	0.5	25.43	23.37	504.65
3	0.5	22.88	23.62	555.17
4	0.5	24.47	23.86	513.73
5	0.5	23.76	23.92	528.25

ตารางที่ 27 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างเศษเซรามิก มวลรวมละเอียดต่อมวลรวมหยาบที่ร้อยละ 33.33 : 66.67 โดยน้ำหนัก

ชั้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	32.09
2	33.74
3	49.88
4	36.66
5	36.89

4. ความเข้มข้นของน้ำเคลือบที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

4.1) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 28
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 29
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 30

ตารางที่ 28 ค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก

ชั้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.75	23.32
2	1.72	27.10
3	1.66	28.64
4	1.74	24.21
5	1.73	24.87

ตารางที่ 29 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	อัตราการไหลซึมผ่าน ของน้ำ (L/m ² ·min)
1	0.5	22.16	23.86	567.45
2	0.5	20.1	23.72	629.31
3	0.5	20.82	24.30	592.85
4	0.5	25.07	24.06	497.42
5	0.5	23.98	23.96	522.18

ตารางที่ 30 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 66.67 : 33.33 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	29.09
2	27.98
3	24.87
4	22.65
5	28.89

4.2) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 68.96 : 31.04 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพูนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 31
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 32
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 33

ตารางที่ 31 ค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 68.96 : 31.04 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.64	29.38
2	1.67	27.83
3	1.60	31.58
4	1.63	30.27
5	1.67	28.00

ตารางที่ 32 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 68.96 : 31.04 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ ($\text{L/m}^2\cdot\text{min}$)
1	0.5	17.67	23.81	712.95
2	0.5	17.31	23.62	733.78
3	0.5	17.46	24.50	701.25
4	0.5	17.36	24.50	705.28
5	0.5	16.71	24.55	731.25

ตารางที่ 33 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพรุนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 68.96 : 31.04 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	22.34
2	29.38
3	26.41
4	18.57
5	24.61

4.3) ผลการทดสอบอัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก

- ค่าความหนาแน่นรวมและค่าความพรุนตัวปรากฏ แสดงดังตารางที่ 34
- อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ แสดงดังตารางที่ 35
- ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด แสดงดังตารางที่ 36

ตารางที่ 34 ค่าความหนาแน่นปรากฏและค่าความพรุนตัวปรากฏของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	ความพรุนตัวปรากฏ (%)
1	1.57	32.03
2	1.61	29.08
3	1.55	32.34
4	1.69	25.25
5	1.56	32.38

ตารางที่ 35 อัตราการไหลผ่านของน้ำของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวทึบแห้งและน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ปริมาตรน้ำ (L)	เวลาเฉลี่ย (sec)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	อัตราการไหลซึมผ่านของน้ำ ($\text{L/m}^2 \cdot \text{min}$)
1	0.5	14.47	25.00	829.31
2	0.5	14.85	24.01	841.40
3	0.5	14.61	24.65	832.98
4	0.5	17.8	23.62	713.56
5	0.5	18.75	24.70	647.75

ตารางที่ 36 ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัดของบล็อกพูนที่ใช้อัตราส่วนระหว่างผงเคลือบขาวที่บแห้ง และน้ำที่สัดส่วนร้อยละ 71.43 : 28.57 โดยน้ำหนัก

ชิ้นงาน	ค่าความแข็งแรงต่อแรงอัด (MPa)
1	27.44
2	23.17
3	19.79
4	24.36
5	22.43



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

1. Scholz, M. and P. Grabowiecki. 2007. Review of permeable pavement systems. Building and Environment 42: 3830-3836.
2. AlShareedah, O. and S. Nassiri. 2020. Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. Journal of Cleaner Production
3. Freni, G., G. Mannina, and G. Viviani. 2010. Urban storm-water quality management: Centralized versus source control. Journal of Water Resources Planning and Management 136: 268-278.
4. Koohmishi, M. 2019. Hydraulic conductivity and water level in the reservoir layer of porous pavement considering gradation of aggregate and compaction level. Construction and Building Materials 203: 27-44.
5. Deo, O. and N. Neithalath. 2010. Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. Materials Science and Engineering: A 528: 402-412.
6. Board, T.R., (2017), Guidance for Usage of Permeable Pavement at Airports, The National Academies Press: Washington, DC.
7. Putman Bradley, J. and C. Kline Laura. 2012. Comparison of Mix Design Methods for Porous Asphalt Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering 24: 1359-1367.
8. Pereira, M., et al. 2021. Improving the sound absorption behaviour of porous concrete using embedded resonant structures. Journal of Building Engineering 35: 102015.
9. Minnesota Pollution Control Agency. 2021 "Types of permeable pavement" [Online]. Available: https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Types_of_permeable_pavemet.
10. Kvach, M. 2012 "The Year of Porous Asphalt" [Online]. Available: <https://www.prnewswire.com/news-releases/the-year-of-porous-asphalt-salem-oregon-proves-trend---water-absorbing-pavement-is-vogue-in-2012->

174214341.html.

11. The Paver Company. 2018 "Paver Stone Grid Driveways" [Online]. Available: <https://thepavercompany.com/paver-stone-grid-driveways/>.
12. FLUENCE NEWS TEAM. 2018 "Recycled Carbon Fiber Strengthens Pervious Concrete" [Online]. Available: <https://www.fluencecorp.com/pervious-concrete-with-recycled-carbon-fiber/>.
13. Chandrappa, A.K. and K.P. Biligiri. 2016. Influence of mix parameters on pore properties and modulus of pervious concrete: an application of ultrasonic pulse velocity. Materials and Structures 49: 5255-5271.
14. Alemu, A.S., et al. 2021. Practical considerations of porosity, strength, and acoustic absorption of structural pervious concrete. Case Studies in Construction Materials 15: e00764.
15. Magesvari, M.U. and V.L. Narasimha. 2013. Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. Procedia - Social and Behavioral Sciences 104: 198-207.
16. Riyakad, P. and S. Chiarakorn. 2015. Energy Consumption and Greenhouse Gas Emission from Ceramic Tableware Production: A Case Study in Lampang, Thailand. Energy Procedia 79: 98-102.
17. Lathulee T, T.S., Thongprasert M. 2007. Energy efficiency study in ceramic industry. IE Network 345-350.
18. รักเร่ เกลี่ออนเมฆ, อุตสาหกรรมเซรามิก. 2547, กรุงเทพฯ: กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาธุรกิจ สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐานกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
19. สมศักดิ์ ชาวลาวัลย์, (2541), เซรามิกส์เบื้องต้น, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
20. คชินทร์ อินทวงศ์. 2551 "แนวทางการกำจัดของเสียในอุตสาหกรรมเซรามิก" [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.thaiceramicsociety.com/ts_waste.php.
21. Zimbili, O., W. Salim, and J. Ndambuki. 2014. A Review on the Usage of Ceramic Wastes in Concrete Production. International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering 8: 91-95.
22. Shipley, G.S., (1994). Stoneware, in Corrosion (Third Edition), Oxford: Butterworth-Heinemann.
23. Hennicke, H.W. and A. Hesse, (1991). Traditional Ceramics, in Concise

Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials. Oxford: Pergamon.

24. Amin, M., B.A. Tayeh, and I.S. Agwa. 2020. Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete. Journal of Cleaner Production 273: 123073.
25. Liu, F., et al. 2015. Basic properties of concrete incorporating recycled ceramic aggregate and ultra-fine sand. Journal of Wuhan University of Technology. 30: 352-360.
26. Ray, S., et al. 2021. Experimental investigation and SVM-based prediction of compressive and splitting tensile strength of ceramic waste aggregate concrete. Journal of King Saud University - Engineering Sciences
27. ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, (2530), เคลือบเซรามิกส์. กรุงเทพฯ: อักษรเจริญทัศน์.
28. Cai, J., et al. 2018. Development of spinel opaque glazes for ceramic tiles. Journal of the European Ceramic Society 38: 297-302.
29. Duke, D., et al. 2006. Strengthening Glass-Ceramics by Application of Compressive Glazes. Journal of the American Ceramic Society 51: 98-101.
30. Bell, W. and J. Koenig. 2006. EFFECT OF GLAZE FILM ON PROPERTIES OF A VITREOUS CHINA BODY. Journal of the American Ceramic Society 24: 341-348.
31. Jennifer L. Benson. 2013 Effect of glaze variables on the mechanical strength of whitewares, Master's Thesis, Department of ceramic engineering, Alfred University.
32. Torres, F.J. and J. Alarcón. 2004. Mechanism of crystallization of pyroxene-based glass-ceramic glazes. Journal of Non-Crystalline Solids 347: 45-51.
33. Yang, Z., et al. 2020. Pilot and industrial scale tests of high-performance permeable bricks producing from ceramic waste. Journal of Cleaner Production 254: 1-9.
34. Zhou, C. 2018. Production of eco-friendly permeable brick from debris. Construction and Building Materials 188: 850-859.
35. Sadek, D.M. and H.A. El Nouhy. 2014. Properties of paving units incorporating crushed ceramic. HBRC Journal 10: 198-205.
36. Sivakumar, A., et al. 2021. Impact of waste ceramic tiles as partial replacement

- of fine and coarse aggregate in concrete. Materials Today: Proceedings
37. Lu, G., et al. 2019. Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder. Journal of Cleaner Production 220: 1052-1060.
38. Ying, X., N.J. Barlow, and M.H. Feuston, (2017), Reproductive and Developmental Toxicology (Second Edition), Academic Press.
39. Chappard, D., (2010), Bone Cancer, San Diego: Academic Press.
40. ไพจิตร อังศิริวัฒน์, (2547), รวมสูตรเคลือบเซรามิกส์. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
41. คชินทร์ อินทวงศ์. 2551 "ตำหนิที่เกิดจากการเผา" [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.thaiceramicsociety.com>.
42. อัจฉราพร ศรีอ่อน. 2552. การเตรียมเซรามิกอะลูมินาพูนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม. สาขาเคมีอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
43. สิริพรรณ นิลไพรัช และคณะ. 2556. การพัฒนาเซรามิกพูนจากดินแดงท้องถิ่นและวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
44. ปาจริย์ ถาวรนิติ, 2545. เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปพูนหรือความพูนตัวสำหรับเซรามิกส์. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ (มกราคม-มีนาคม): 26-28.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิมพ์รัมภา กิติธรรากุล
วัน เดือน ปี เกิด	21 พฤศจิกายน 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	428/1 ซ.อ่อนนุช17 แยก16 แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กทม. 10250
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation ใน การประชุมทางวิชาการ The 47th International Congress on Science Technology and Technology-based Innovation 2021 ระหว่างวันที่ 5-7 ตุลาคม 2564 โดยเป็นการนำเสนอแบบออนไลน์ และได้รับการตีพิมพ์ ในรูปแบบ E-Proceeding หัวข้อเรื่อง “Preparation of Pervious Paving Brick from Ceramic Pitcher using Ceramic Glaze as Bonding Material”