



โครงการ  
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ      การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุพอร์นั้ที่ทำจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า  
Preparation And Characteristics of Perforated Material made from  
Electric Arc Furnace Slag

ชื่อนิสิต            นาย พงศ์พีระ            ย้งเจริญ            เลขประจำตัว    6033250723  
                          นาย พีระพัศ            เมื่องศิลป์            เลขประจำตัว    6033257123

ภาควิชา            วัสดุศาสตร์  
ปีการศึกษา      2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุพูนน้ำที่ทำจากตะกอนจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

- |                 |             |            |
|-----------------|-------------|------------|
| 1. นาย พงศ์พีระ | ยังเจริญ    | 6033250723 |
| 2. นาย พีระพัศ  | เมื่องศิลป์ | 6033257123 |

อนุมัติโดย

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์)  
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

.....  
(ดร.นิวิษฐ์ นวอัครฐานันท์)  
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุพูนน้ำที่ทำจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า		
โดย	นาย พงศ์พีระ	ยังเจริญ	6033250723
	นาย พีระพัศ	เมื่องศิลป์	6033257123
สาขาวิชา	วัสดุศาสตร์		
แขนงวิชา	เซรามิกและวัสดุศาสตร์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วันทนีย์ พุกกะคุปต์		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.นิธิวัชร นวอัครฐานันท์		
ปีการศึกษา	2563		

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน พื้นที่ทางเท้าที่สามารถระบายน้ำข้างได้โครงสร้างเป็นแบบวัสดุพูน ลักษณะเด่นของโครงสร้างแบบนี้คือ จะมีรูพูนเปิดและต่อเนื่องภายในโครงสร้างอยู่จำนวนมาก ทำให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ดี อย่างไรก็ตามวัสดุพูนมีความแข็งแรงที่ไม่สูงมากนัก งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้าจากอุตสาหกรรมเหล็กเพื่อใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตวัสดุพูน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติและโครงสร้างของตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า ได้แก่ ความแข็งแรงกดอัด ความสามารถในการระบายน้ำ และความพูนตัวด้วยการเตรียมส่วนผสมจากตะกรันที่มีขนาดอนุภาค 2 ขนาดโดยใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เป็นตัวประสานผลการทดสอบของสมบัติดังกล่าวนี้พบว่าความแข็งแรงกดอัดมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาที่บ่มมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนขนาดของตะกรันส่งผลต่อความแข็งแรงกดอัด ในส่วนของความพูนตัวและการไหลผ่านของน้ำพบว่ามีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะโครงสร้างของรูพูน อัตราการไหลผ่านของน้ำอาจจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของรูพูนที่อยู่ภายในโครงสร้างเพียงอย่างเดียว แต่อาจจะขึ้นกับความต่อเนื่องของรูพูนและขนาดของรูพูนด้วย ดังจะเห็นได้จากชิ้นงานที่ประกอบด้วยอนุภาคหยาบ แม้ว่าจะมีสัดส่วนความพูนใกล้เคียงกับชิ้นงานอื่น ๆ แต่การไหลผ่านของน้ำเกิดได้ดีกว่ามาก ดังนั้นงานวิจัยในขั้นต่อไปจึงควรพิจารณาศึกษาความต่อเนื่องในโครงสร้างวัสดุพูนร่วมด้วย

<b>Title</b>	Preparation and characteristics of perforated material made from electric arc furnace slag		
<b>Authors</b>	Mr. Phongpeera Yangcharoen	6033250723	
	Mr. Peerapat Malaungsil	6033257123	
<b>Department</b>	Materials Science		
<b>Field of Study</b>	Ceramic and Materials Science		
<b>Advisor</b>	Associate Professor Dr. Wantanee Buggakupta		
<b>Co Advisor</b>	Dr. Nithiwach Nawaukkaratharnant		
<b>Academic Year</b>	2020		

---

## Abstract

Nowadays, the pavement that can drain water has a porous structure. The outstanding features of the structure include a large fraction of open and connected pores, allowing good water permeability. However, the perforated material has not a very high strength. This research studied the use of electric arc furnace slag from the steel industry as a raw material to produce perforated materials. This aimed to observe the relationship between properties and microstructure of slag-based porous bodies, i.e. compressive strength, water permeability and porosity, by preparing slag mixtures of 2 particle sizes and using portland cement as a binder. The results showed that the compressive strength was greater as a function of curing time. The change in slag size ratio affected the compressive strength. As far as the porosity and water permeability were concerned, it was found they both were truly related to pore characteristics. The water flow rate might not be solely based on pore fraction in the bodies but also depended on the connectivity and the size of the pore. As seen from the samples composed of coarse particles although its pore content was similar to those of other specimens, the flow of which became much better. Therefore, the next step of the research should cover the connectivity of pore structure.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จสมบูรณ์ได้โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก รศ.ดร. วันทนี พุกกะคุปต์ อาจารย์ที่ปรึกษาและ ดร.นิธิวัชร นวอักษรนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ คอยให้ข้อมูลและวิธีการเดินทางในการหาแหล่งวัตถุดิบ รวมไปถึงช่วยวางแผนและวิเคราะห์ผลเพื่อหาแนวทางในการดำเนินการต่อไปในอนาคต

ขอขอบคุณ นายณัฐวุฒิ ชิมกระโทก นิสิตระดับปริญญาโท ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความรู้ทั้งวิธีการทดสอบ วิธีการใช้เครื่องมือในการทดสอบ อีกทั้งข้อมูลและทฤษฎีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลในโครงการนี้ได้

ขอขอบคุณ นายณรงค์ชัย ปักษา นิสิตระดับปริญญาโท และ ศ.ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว ห้องปฏิบัติการทดสอบ วัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณ คุณทวีศักดิ์ จันทร์ดวง ฝ่ายงานช่าง คณะวิทยาศาสตร์ คุณวิรพงษ์ ทรัพย์นวม และเจ้าหน้าที่สายปฏิบัติการสำหรับความเอื้อเฟื้อและการอำนวยความสะดวกในการเตรียมชิ้นงาน

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่เอื้อเฟื้อและให้คำแนะนำต่าง ๆ ในด้านการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้งบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานโครงการวิจัย

อนึ่งคณะผู้จัดทำหวังว่า โครงการฉบับจะมีประโยชน์ไม่มากนักน้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่า คณาจารย์ที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำผลงานโครงการนี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องทั้งในปัจจุบันและในอนาคต อีกทั้งขอมอบความกตัญญูทุกเวทิตาคุณแต่บิดา มารดาและผู้มีพระคุณทุกท่านตลอดจนเพื่อนที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจต่อคณะผู้จัดทำ

พงศ์พีระ      ยังเจริญ  
พีระพัศ      เมลืองศิลป์

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่ออังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า.....	3
2.2 วัสดุพูน.....	6
2.3 วัสดุก่อสร้างพูนน้ำ.....	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	16
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	16
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	16
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	16
3.3.1 การเตรียมตะกรัน.....	16
3.3.2 การการขึ้นรูปวัสดุพูนจากตะกรันเหล็กผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	17
3.3.3 การวิเคราะห์ความแข็งแรง.....	17
3.3.4 การวิเคราะห์ความพูนตัวและความหนาแน่น.....	18
3.3.5 การทดสอบค่าการไหลผ่านของน้ำ.....	19
3.4 ขั้นตอนในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุพูน.....	21

บทที่ 4 ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง.....	24
4.1 ผลการศึกษาขั้นต้น (Preliminary study).....	24
4.1.1 ทดสอบเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีขนาดที่แตกต่างกัน.....	24
4.1.2 ทดสอบเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน.....	24
4.1.3 การใช้สเตรนเกจ ในการตรวจวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในตัววัสดุ.....	25
4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงกดอัด.....	28
4.2.1 ความแข็งแรงกดอัดของวัสดุพูนจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสม.....	28
4.2.2 ลักษณะการแตกของวัสดุพูนจากตะแกรงจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสม.....	29
4.3 ความพรุนตัวและความหนาแน่น.....	30
4.4 การไหลผ่านของน้ำของวัสดุพูน.....	31
4.5 ปัญหาที่พบ.....	32
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	33
5.1 สรุปผล.....	33
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	33
เอกสารอ้างอิง.....	34
ภาคผนวก.....	36

## สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 1 การจัดแบ่งประเภทของวัสดุพูนตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ.....	8
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า.....	37
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มที่แตกต่างกันในการศึกษา Preliminary study.....	37
ตารางที่ 4 ความแข็งแรงของวัสดุพูนจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสม.....	37
ตารางที่ 5 ความพูนตัวและความหนาแน่นของวัสดุพูนจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า.....	38
ตารางที่ 6 การไหลซึมผ่านของน้ำของวัสดุพูนจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า.....	38



## สารบัญรูปลูกภาพ

เรื่อง	หน้า
ภาพที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันในกระบวนการหลอมเหล็กกล้า.....	4
ภาพที่ 2 องค์ประกอบทางแร่ของตะกรัน.....	4
ภาพที่ 3 การนำตะกรันไปใช้งาน.....	5
ภาพที่ 4 กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า.....	6
ภาพที่ 5 รูปร่างรูปแบบต่างๆ (ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกลม (ค) แบบที่เป็นแผ่น และ (ง) แบบที่บิดเป็นเกลียว.....	7
ภาพที่ 6 ขนาดรูพรุนพร้อมตัวอย่างวัสดุประเภทเซรามิกที่อยู่ในช่วงต่าง ๆ กัน.....	7
ภาพที่ 7 วัสดุรูพรุนประเภทโลหะ(ซ่าย) และ อโลหะ(ขวา).....	8
ภาพที่ 8 กลไกการสังเคราะห์ซีโอไลต์และการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์.....	9
ภาพที่ 9 กลไกการเกิดเป็นโครงสร้างของวัสดุรูพรุนแก้ว.....	10
ภาพที่ 10 กลไกการเกิดเป็นโครงสร้างของวัสดุรูพรุนแบบแมคโครพอร์รัส.....	10
ภาพที่ 11 สมบัติของคอนกรีตรูพรุนในการลดมลภาวะทางเสียงและระบายน้ำได้.....	12
ภาพที่ 12 ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพของ HydroSTON.....	12
ภาพที่ 13 เครื่อง Industrial Series HDX Models.....	17
ภาพที่ 14 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบ Porosity.....	19
ภาพที่ 15 เครื่องทดสอบ Water permeability .....	19
ภาพที่ 16 (ก) ตะกรันเล็กขนาด 5-12 มิลลิเมตร (ข) ตะกรันใหญ่ขนาด 12-20 มิลลิเมตร.....	21
ภาพที่ 17 การนำตะกรันและปูนมาทำการผสมแห้งภายในหม้อปั่นผสม.....	21
ภาพที่ 18 เเทน้ำเติมลงไปเพื่อทำการผสมวัตถุดิบทุกอย่างให้เข้ากัน.....	22
ภาพที่ 19 เทส่วนผสมทั้งหมดลงมาภายในถาดเตรียมทำการอัด.....	22
ภาพที่ 20 ตักส่วนผสมลงไปยังแม่พิมพ์เสร็จแล้วทำการอัดส่วนผสมให้มีความแน่นเข้ากัน.....	22
ภาพที่ 21 แกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และนำไปแช่ในน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด.....	23
ภาพที่ 22 นำชิ้นงานหลังจากการบ่มเข้าอบระยะเวลา 1 คืน จากนั้นแล้วเตรียมนำไปทดสอบสมบัติ.....	23
ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุรูพรุนที่มีขนาดแตกต่างกัน.....	24
ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุรูพรุนที่มีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน.....	25
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตชิ้นที่ 1.....	26
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตชิ้นที่ 2.....	27

ภาพที่ 27 (ก) รอยแตกของคอนกรีตชั้นที่ 1 (ข) รอยแตกของคอนกรีตชั้นที่ 2.....	27
ภาพที่ 28 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของวัสดุพูนจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสม.....	29
ภาพที่ 29 ชิ้นงานที่แตกหัก (ก) อัตราส่วนผสม 100 : 0 (ข) อัตราส่วนผสม 75 : 25(ค) อัตราส่วนผสม 50 : 50 (ง) อัตราส่วนผสม 25 : 75 (จ) อัตราส่วนผสม 0 : 100.....	29
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่าง pore content และ water adsorption ของวัสดุพูน จากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า.....	30
ภาพที่ 31 การไหลซึมผ่านของน้ำของวัสดุพูนจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า.....	31

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน ตามพื้นถนน พื้นทางเดินเมื่อมีฝนตกหรือหรือน้ำไหลไปตามพื้น น้ำดังกล่าวจะซึมผ่านพื้นถนนและพื้นทางเดินไปทำให้ไม่เกิดปัญหาน้ำขัง ปัญหานี้สามารถตามพื้นถนน ซึ่งการที่น้ำสามารถซึมผ่านพื้นถนน พื้นทางเดินได้นั้นมีสาเหตุมาจากโครงสร้างของพื้นถนน พื้นทางเดินมีโครงสร้างเป็นวัสดุพอร์ซ (Perforated Materials) ซึ่งสมบัติที่เด่นของวัสดุพอร์ซนี้คือ มีโครงสร้างที่มีช่องว่างเป็นจำนวนมากทำให้มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำดี เมื่อน้ำไหลผ่านพื้นถนน พื้นทางเดินก็จะซึมผ่านพื้น ไหลลงผ่านดินไปและระบายน้ำออกตามธรรมชาติ แต่ด้วยวัตถุดิบเดิมที่นำมาผลิตเป็นวัสดุพอร์ซนั้น มีความแข็งแรงที่ไม่มาก ไม่ทนต่อแรงกระแทก ทำให้เมื่อได้รับแรงกระแทกมาก ๆ จะทำให้วัสดุพอร์ซเกิดการแตกหักหรือชำรุดได้ ส่งผลต่อการระบายน้ำ อาจจะทำให้เกิดปัญหาน้ำขังหรืออุบัติเหตุต่าง ๆ ได้ คณะผู้จัดทำจึงสืบค้นข้อมูลหาวัตถุดิบที่มีความแข็งแรง เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุพอร์ซซึ่งพบว่าในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก มีวิธีในการนำเศษเหล็กที่ถูกหมุนเวียนมาใช้ใหม่ผ่านการหลอมและเปลี่ยนแปลงไปเป็นเหล็กกล้าคุณภาพด้วยการอาร์คไฟฟ้ากำลังสูง โดยกระบวนการผลิตดังกล่าวนี้คือการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace : EAF) ซึ่งสิ่งที่ได้จากวิธีการนี้นั้นนอกจากได้เหล็กบริสุทธิ์ยังได้ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) โดยเกิดในขณะหลอมเศษเหล็ก ตะกรันดังกล่าวนี้คือผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่โลหะแต่เป็นสารประกอบอโลหะที่ประกอบไปด้วยปริมาณเหล็กออกไซด์เจือปนค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 25-40 โดยน้ำหนัก มีแคลเซียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ที่ประมาณร้อยละ 30 และ 15 มีสีดำนค่อนข้างเข้ม จัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษซึ่งในปัจจุบันมีอยู่จำนวนมาก มีการนำตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทาง และวัสดุกรุพื้นถนน สามารถใช้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวม ผสมกับยางมะตอยราดปูพื้นทางได้ เนื่องจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีความแข็งแรง ด้านทานต่อการขีดสีค่อนข้างสูง มีความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุธรรมชาติจึงแข็งแรงกว่า มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงทำให้ ไม่ลื่นไหล อีกทั้งสามารถเก็บความร้อนได้ดี เป็นต้น สมบัติเหล่านี้ทั้งหมดล้วนแล้วทำให้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าเหมาะสมต่อการเป็นวัสดุก่อสร้าง

ทางคณะผู้จัดทำจึงเห็นว่าถ้าหากนำตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้าซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือใช้ ไม่มีพิษ และมีอยู่เป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมเหล็ก มาวิเคราะห์และปรับปรุงโครงสร้างเพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุพอร์ซ ซึ่งเป็นการพัฒนาวัสดุพอร์ซให้มีความแข็งแรง รับแรงกระแทกได้มากขึ้น รวมไปถึงเป็นการนำตะกรันที่เหลือใช้จากการหลอมเหล็กมาใช้ใหม่ สร้างประโยชน์ต่าง ๆ ถือว่าเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาหมุนเวียนใช้ใหม่

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติและโครงสร้างของตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานต่าง ๆ
- 1.2.2 เพื่อปรับปรุงสมบัติและพัฒนาคุณภาพของวัสดุพูนที่มีโครงสร้างทำมาจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า ได้แก่ ความแข็งแรงกดอัด ความสามารถในการระบายน้ำ และความพรุนตัว

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุพูนน้ำคือ ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็ก ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก 2 ขนาด ได้แก่ ตะกรันขนาด 5-12 มิลลิเมตร และตะกรันขนาด 12-20 มิลลิเมตร
- 1.3.2 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับวัสดุพูนน้ำและตัวประสานที่ใช้คือปูนปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ประเภท 1
- 1.3.3 กำหนดสัดส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (w/c ratio) คงที่เท่ากับ 0.30
- 1.3.4 ขึ้นงานเป็นทรงกระบอก และขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยวิธีการหล่อในแม่พิมพ์
- 1.3.5 ศึกษาลักษณะสมบัติและปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของขึ้นงานวัสดุพูนน้ำที่เตรียมได้จากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า ได้แก่ ความแข็งแรงกดอัด การไหลผ่านของน้ำ และความพรุนตัว

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงสมบัติและแนวทางการใช้งานของตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม
- 1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากขึ้น สามารถใช้ทดแทนวัสดุก่อสร้างทางและวัสดุกรุพื้นถนน
- 1.4.3 ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการนำวัสดุหมุนเวียนชนิดอื่น ๆ มาใช้ใหม่

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag)

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2563) ได้กล่าวว่า ตะกรันหลักเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการปรับปรุงสมบัติของน้ำเหล็ก ในการหลอมเศษเหล็ก เศษเหล็กที่เป็นวัตถุดิบมักจะมีปริมาณองค์ประกอบที่เกินกว่ามาตรฐานที่ต้องการเสมอ อาทิ คาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ไททาเนียม ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ การทำให้น้ำเหล็กมีองค์ประกอบตามต้องการ ต้อง มีการกำจัดหรือลดปริมาณสารมลทินเหล่านี้ผ่านปฏิกิริยาทางเคมีด้วยการใส่สารสร้างตะกรัน เช่น หินปูน ม้าหรือปูนขาว ลงไป ตะกรันจึงเป็นสารประกอบโลหะที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา หินปูน แมกนีเซียม เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันน้ำเหล็กค่อนข้างไม่คงที่เท่าใดนัก ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) มีปริมาณเหล็กออกไซด์เจือปนค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 25-40 โดยน้ำหนัก มีแคลเซียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ที่ประมาณร้อยละ 30 และ 15 มีสีดำค่อนข้าง เข้ม จัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษ ในขณะที่ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็ก (Ladle furnace) มีฤทธิ์เป็นด่างกว่ามาก เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (มาจากปูนขาว) ต่อซิลิกาค่อนข้างสูง มี แคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 35-60 โดยน้ำหนัก มีสีเทาเข้ม แฉ่ง และมักมีเหล็กเจือปนมาด้วย ตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็กจัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษ เช่นเดียวกับตะกรันที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้า การนำตะกรันทั้งสองชนิดมาใช้ใหม่ต้องคำนึงถึงปริมาณของแคลเซียมและซิลิกาเป็นหลัก การนำตะกรันกลับมาใช้งานนอกจากการบดย่อยขนาดให้เหมาะสมแล้ว ยังต้องทำให้ส่วนผสมของตะกรันมีความ เสถียรทางเคมีและลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตะกรันเนื่องจากความชื้นด้วยการบ่มก่อนนำไปใช้งาน ตะกรันที่เกิดในเตาอาร์คไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ นิยมใช้เป็นมวลรวมผสมในยางมะตอยสำหรับ งานก่อสร้างถนน และวัสดุกรูพื้นถนนมากกว่าตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็กเพราะมีการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรต่ำกว่า อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยตะกรันที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็กสามารถนำกลับมาใช้ใน รูปของวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นโครงสร้างสำหรับชายฝั่งทะเล และยังสามารถใช้เป็นฟลักซ์ แทนปูนขาวในกระบวนการหลอมเศษเหล็กกล้าได้บางส่วน

ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันแสดงรูปที่ 2.1 ตะกรันทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกันตรงอัตราส่วน ระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ต่อซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) โดยแคลเซียมออกไซด์มีฤทธิ์เป็นด่างในขณะที่ซิลิกามีฤทธิ์เป็นกรด อัตราส่วนนี้บ่งบอกถึงสมบัติความเป็นกรดเบสของตะกรัน กล่าวคือยิ่งอัตราส่วนมีค่าสูง ตะกรันก็มีความเป็นเบสมาก นอกจากนี้ในบางกรณีหากมีแมกนีเซียม (MgO) อยู่มากจะพิจารณาผลรวมของแคลเซียมออกไซด์กับแมกนีเซียมต่อซิลิกา ทั้งแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อได้รับความชื้นของตะกรันทั้งสิ้น ส่วนเฟสองค์ประกอบของตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้า และตะกรันเตาถลุงน้ำเหล็กแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้ามีปริมาณของเหล็กออกไซด์สูงกว่าตะกรันเตาถลุงน้ำเหล็กจะเกิดสารประกอบที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ส่วนองค์ประกอบของตะกรันเตาถลุงน้ำเหล็กจะมีสารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกตและไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นหลัก

Constituents (%)	BF slag	EAF slag	LF slag
CaO	42.0	25-35	48-54
SiO <sub>2</sub>	33.8	8-18	12-18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.4	3-10	1-4
MgO	6.7	2-9	1-4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	20-30	14-19
others	≈ 2	1.7-4.0	2.8-4

รูปที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของตะกรันในกระบวนการหลอมเหล็กกล้า  
(ที่มา The Japan Iron and Steel Federation, Nippon Slag Association, 2006)

Identified phase	Chemical composition	BOF slag	EAFslag	Ladle slag
Dicalcium silicate-calcium phosphate	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> -Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	X	X	
Dicalcium silicate	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>			x
Tricalcium silicate	(Ca,Mg,Mn,Fe) <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	X		x
Wustite	(Fe,Mg,Ca,Mn)O	X	X	
Magnesiowustite	((Mg,Fe,Mn,Ca)O)	X	X	
Dicalciumferrite	Ca <sub>2</sub> (Fe,Al) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	X	X	
Magnetite	Ca(Ti,Si)O <sub>3</sub>			
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	X		
Calcium ferrite	CaFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	X		
Mervinite	3CaO.MgO.2SiO <sub>2</sub>		X	x
Spinel	(Mg,Fe)(Cr,Al) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		X	x
Lime	(Ca,Mg,Mn)O	x	X	
Fluorspar	CaF <sub>2</sub>			x

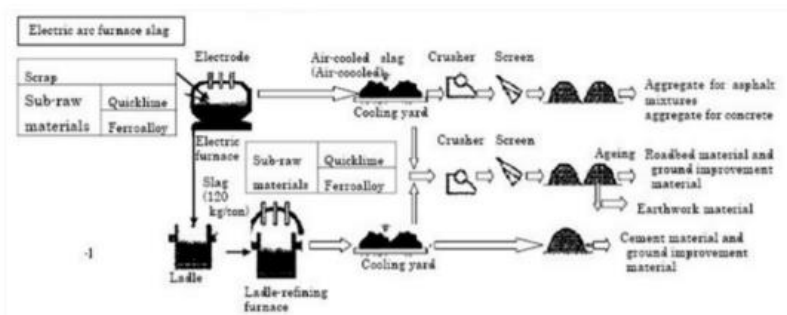
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบทางแร่ของตะกรัน  
(ที่มา Bjoerkman, 1996)

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าหินปูนอิสระสามารถก่อให้เกิดการบวมตัวของตะกรันได้อย่างรวดเร็วในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่เกิดจากการบวมตัวของแมกนีเซียมในระยะเวลา การทำให้ตะกรันดูดซับความชื้นในบรรยากาศและขยายตัวอย่างเต็มที่ก่อนนำไปใช้งานเป็นการเพิ่มความเสถียรของขนาดตะกรัน ได้เรียกว่า การบ่ม (Aging) ซึ่งมีหลายวิธี เทคนิคการบ่มหลักๆ มีดังต่อไปนี้

1. ตากไว้ในกลางแจ้ง (Normal aging) กองทิ้งไว้ในพื้นที่เปิด ให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมอย่างเต็มที่ ใช้ระยะเวลาตั้งแต่ 6 เดือนขึ้นไป
2. บ่มด้วยไอน้ำอิมตัว (Open air steam aging) กองตะกรันเหล็กไว้บนท่อพ่นไอน้ำและปิดไว้ด้วยฉนวนกันความร้อน ใช้ระยะเวลา 1-2 สัปดาห์
3. บ่มด้วยไอน้ำอัดแรงดัน (Pressurized steam aging) ใส่ตะกรันไว้ในหม้ออัดความดันไอน้ำใช้ระยะเวลาตั้งแต่ 1-10 ชั่วโมง

## การนำตะกรันไปใช้งาน

- ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางและวัสดุกรูพื้นถนน สามารถใช้ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าเป็นมวลรวมผสมกับยางมะตอยราดปูพื้นทางได้ ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้ามีสมบัติหลายประการที่จะใช้เป็นมวลรวมได้ สมบัติบางประการเหนือกว่ามวลรวมจากวัสดุธรรมชาติอีกด้วยเช่น มีความแข็งและความต้านทานการขีดสีค่อนข้างสูงกว่า ความหนาแน่นสูงกว่าวัสดุธรรมชาติจึงแข็งแรง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูง ทำให้ไม่ลื่นไหล อีกทั้งสามารถเก็บความร้อนได้ดีทำให้ส่วนผสมยางมะตอยอุ่นอยู่ได้นาน ทำให้การเทราดและปรับระดับพื้นถนนง่ายขึ้น การนำไปใช้งานลักษณะนี้จัดว่าเป็น Best available practice ขั้นตอนการเตรียมตะกรันสำหรับงานก่อสร้างแสดงดังรูปที่ 2.3

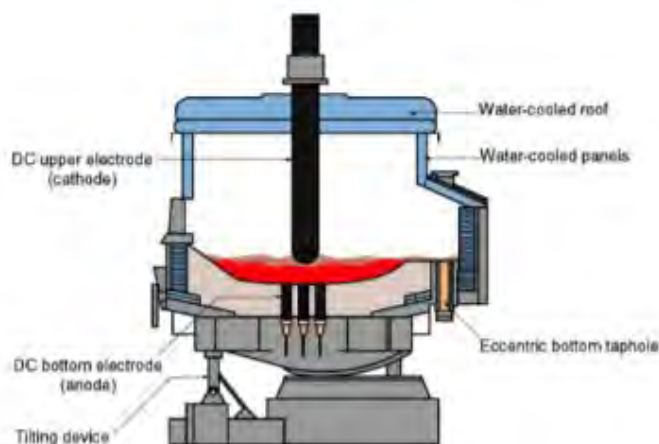


รูปที่ 2.3 การนำตะกรันไปใช้งาน

(ที่มา The Japan Iron and Steel Federation, Nippon Slag Association, 2006)

- ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเม็ดปูน โดยการผสมในเตาเผาปูนร่วมกับส่วนผสมอื่นๆ ในบางกรณีสามารถใช้งานแทน Portland cement ได้เนื่องจากวัสดุทั้งสองชนิดมีส่วนผสมทางเคมีค่อนข้างใกล้เคียงกัน

นภาพร อรุณเกียรติกิจ (สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน) ได้กล่าวว่าการหลอมเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace, EAF) โดยเศษเหล็กผ่านการคัดเลือกขนาดและแยกประเภทแล้ว บรรจุใส่ถังกว้างย้ายเข้าสู่เตาหลอมไฟฟ้าชนิดกระแสตรง ซึ่งมีแท่งกราไฟต์ 1 แท่ง หรือเตาหลอมไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ซึ่งมีแท่งกราไฟต์ 3 แท่ง ข้อดีของเตาหลอมไฟฟ้าชนิดกระแสตรง คือ อายุใช้งานยาวกว่า 1 แท่งเคลื่อนตัวทำให้ส่วนของกันตามีพื้นที่สัมผัสมาก ทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงและกระจายความร้อนได้ดีกว่าและสามารถลดเสียงให้น้อยกว่าเตาหลอมไฟฟ้าชนิดกระแสสลับได้ร้อยละ 15 โดยจะทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (Cathode) และกันเตาทำหน้าที่เป็นขั้วบวก (Anode) ให้ความร้อน 1,600 องศาเซลเซียส ในช่วงการหลอมจะมีการเปิดฝาเตาหลอมเพื่อเติมเศษเหล็ก เมื่อหลอมจนน้ำเหล็กละลายหมดแล้วเติมปูนขาวเพื่อให้น้ำเหล็กสะอาดขึ้น จากนั้นลากตะกรันหรือกากซีเหล็กออกจากเตาหลอมชักตัวอย่างน้ำเหล็กนำไปทดสอบส่วนผสมทางเคมีโดยกระบวนการดังกล่าวมีส่วนประกอบหลักแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า

(ที่มา: กิตติพันธ์ บางยี่ขัน, โลหะกับการพัฒนาประเทศ, กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่)

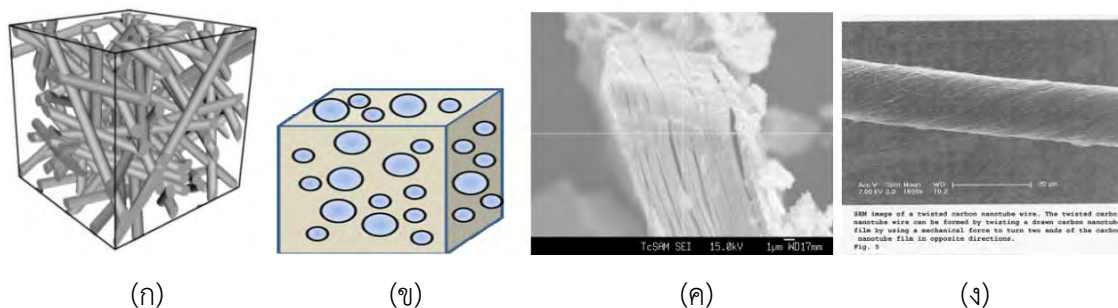
Australasian (iron & steel) Slag Association (Australasian (iron & steel) Slag Association) ได้กล่าวไว้ว่า EAFS (Electric Arc Furnace Slag) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการทำเหล็ก EAFS แข็งตัวในลักษณะที่คล้ายกับลาวาจากภูเขาไฟ โครงสร้างที่ระบายความร้อนได้ดีที่สุดที่สามารถอธิบายออกไซด์ของสารละลายของแข็งได้ EAFS ผลิตในเตาอาร์คไฟฟ้า ตะกรันมีสีเทาเข้มและมีความแข็งมากกว่าตะกรันเตาถลุงเหล็ก (BFS : Blast Furnace Slag) EAFS มีความหนาแน่นมากกว่าหินบะซอลต์หรือ BFS ประมาณ 20-25% EAFS มีลักษณะเป็นรูปทรงลูกบาศก์ EAFS เป็นตะกรันส่วนมากที่พบได้ อาจมีการขยายขนาดเล็กน้อยจนกว่ามันจะให้ความชุ่มชื้นอย่างเต็มที่ ดังนั้นควรระมัดระวังในการเก็บในที่ที่อากาศไม่ถ่ายเท เก็บในที่แคบ ส่วนการใช้งานนั้นจะใช้งานเช่นเดียวกับ Slag ของ Steel Furnace Slag (SFS) EAFS มีลักษณะคล้ายซีเมนต์สำหรับงานทางเท้า สามารถรับแรงอัดแบบไม่กำหนด (UCS) > 5 MPa สำเร็จในเวลา 28 วันที่มีความชื้น ในฐานะที่เป็นวัสดุที่แข็งแรงทนทาน EAFS มีสมบัติด้านการสิ้นเปลืองได้ดีเยี่ยมเมื่อเทียบกับหินบะซอลต์ ทำให้เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานนี้ ความต้านทานจากการเกิดร่องใน EAFS ทำให้ EAFS เหมาะในการใช้ในบริเวณที่ต้องการการหยุดหรือชะลอความเร็ว

## 2.2 วัสดุพรุน (Perforate materials)

ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร (2554) กล่าวว่าวัสดุพรุน มีการนำมาใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน โดยนอกเหนือจากการใช้เพื่อเป็นตัวค้ำแยกโมเลกุลแล้ววัสดุพรุนยังสามารถนำไปใช้ในวัสดุประสมที่แตกต่างจากการเป็นตัวค้ำขนาดของโมเลกุลเช่น เป็นตัวคะตะลิสต์ สารดูดซับ เซ็นเซอร์ หรืออาจนำไปใช้ในเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาตรของที่ว่างในรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุโดยทั่วไป วัสดุพรุนจะมีสัดส่วนความพรุนอยู่ระหว่าง 0.2-0.95 และรูพรุนนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ แบบแรกเป็นแบบที่เป็นรูพรุนแบบเปิดโดยที่รูพรุนมีการเชื่อมต่อไปที่ผิวของวัสดุส่วนแบบที่สองเป็นรูพรุนแบบปิดซึ่งรูพรุนจะปิดและแยกออกจากภายนอก ดังนั้นในการนำวัสดุพรุนไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ เช่น เป็นตัวดูดซับ เป็นคะตะลิสต์และเซ็นเซอร์นั้น จะสามารถใช้งานได้เฉพาะในวัสดุที่มีรูพรุนเป็นแบบเปิดเท่านั้น ส่วนวัสดุที่มีรูพรุนแบบปิดจะไม่สามารถนำมาใช้ในงานตามที่กล่าวมาข้างต้น ได้วัสดุพรุนที่เป็นแบบปิดสามารถนำมาใช้ในงานเป็นวัสดุในการเก็บเสียงการเป็นฉนวนกันความร้อน หรือเป็นวัสดุสำหรับโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา



วัสดุรูพรุนมีโครงสร้างและสัณฐาน แบ่งได้หลายแบบ เช่น รูพรุนแบบทรงกระบอก แบบทรงกลม และแบบที่เป็นแผ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรูพรุนแบบที่เป็นทรงที่ซับซ้อน เช่น รูพรุนแบบหกเหลี่ยม ในรูพรุนอาจเป็นแบบเส้นตรง หรือ โค้ง หรือ เป็นรูพรุนแบบที่บิดเป็นเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 2.5

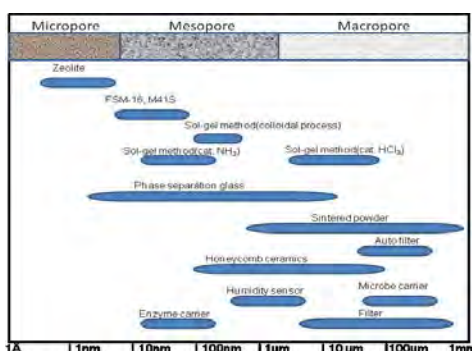


รูปที่ 2.5 รูพรุนรูปแบบต่างๆ (ก) แบบทรงกระบอก (ข) แบบทรงกลม (ค) แบบที่เป็นแผ่น และ (ง) แบบที่บิดเป็นเกลียว (ที่มา Pesak Rungrojchaipon, Porous Materials, 2011)

วัสดุรูพรุนสามารถแบ่งได้ตามขนาดของรูพรุนตามนิยามของสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry) หรือที่มีชื่อย่อเรียกว่า IUPAC โดยจัดแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

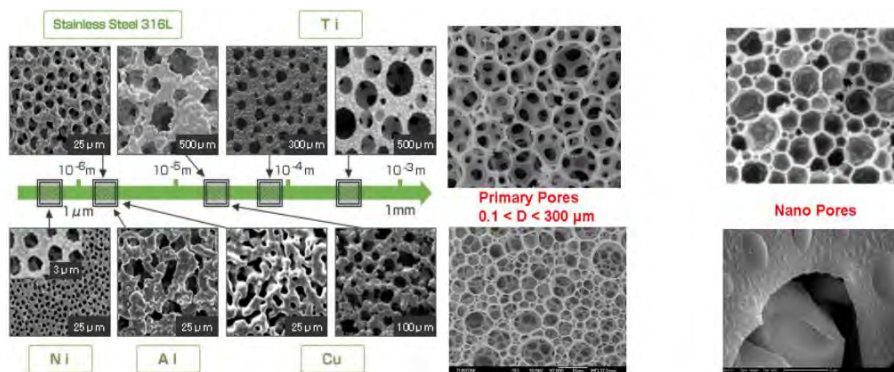
1. ไมโครพอร์ส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
2. เมโซพอร์ส (Mesoporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตร
3. แมโครพอร์ส (Macroporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตรขึ้นไป

เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างระหว่างขนาดของรูพรุนทั้ง 3 แบบ โดยยกตัวอย่างวัสดุประเภทเซรามิกที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงต่าง ๆ กัน พร้อมทั้งแสดงเป็นแผนภาพขนาดรูพรุนพร้อมตัวอย่างประกอบดังในรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าซีโอไลต์ส่วนใหญ่มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงของไมโครพอร์สจนถึงช่วงเมโซพอร์ส จะมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงของเมโซพอร์ส ส่วนพวกตัวกรอง (filter) จะมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงที่เป็นแมโครพอร์ส ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุด



รูปที่ 2.6 ขนาดรูพรุนพร้อมตัวอย่างวัสดุประเภทเซรามิกที่อยู่ในช่วงต่างๆกัน (ที่มา Pesak Rungrojchaipon, Porous Materials, 2011)

สารที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุพอร์นมีอยู่มากมายหลายประเภท โดยสามารถจัดแบ่งได้ตามองค์ประกอบที่อยู่ในโครงสร้าง เช่น เป็นวัสดุพอร์นที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ซึ่งในกลุ่มของวัสดุพอร์นที่เป็นสารอนินทรีย์ยังแบ่งได้เป็นกลุ่มวัสดุพอร์นที่เป็นโลหะกับกลุ่มวัสดุพอร์นที่เป็นอโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วัสดุพอร์นประเภทโลหะ(ซ้าย) และ อโลหะ(ขวา)  
(ที่มา Pesak Rungrojchaipon, Porous Materials, 2011)

ในกลุ่มวัสดุพอร์นที่เป็นอโลหะนั้นส่วนมากจะเป็นพวกเซรามิกและพอลิเมอร์ การจัดแบ่งประเภทของวัสดุพอร์นตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1

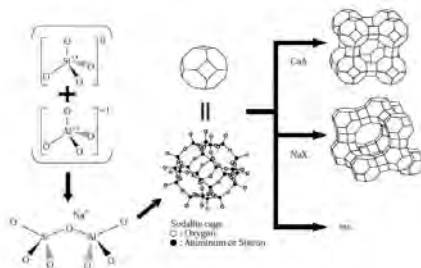
ตารางที่ 1 การจัดแบ่งประเภทของวัสดุพอร์นตามองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ  
(ที่มา Pesak Rungrojchaipon, Porous Materials, 2011)

	พอลิเมอร์	คาร์บอน	กระจก	อะลูมิเนียมซิลิเกต	ออกไซด์	โลหะ
ขนาดรูพอร์น	เมโซ-แมคโคร	ไมโคร-เมโซ	เมโซ-แมคโคร	ไมโคร-เมโซ	ไมโคร-เมโซ	เมโซ-แมคโคร
พื้นที่ผิว	ต่ำ	สูง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความพรุน	>0.6	0.3-0.6	0.3-0.6	0.3-0.7	0.3-0.6	0.1-0.7
ความสามารถในการแพร่ผ่าน	ต่ำ- ปานกลาง	ต่ำ- ปานกลาง	สูง	ต่ำ	ต่ำ- ปานกลาง	สูง
ความแข็งแรง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ต่ำ- ปานกลาง	สูง
ฉนวน	ต่ำ	สูง	ดี	ปานกลาง- สูง	ปานกลาง- สูง	สูง
ทนต่อสารเคมี	ต่ำ- ปานกลาง	สูง	สูง	สูง	สูงมาก	สูง
ราคา	ต่ำ	สูง	สูง	ต่ำ- ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
อายุ	สั้น	ยาว	ยาว	ต่ำ- ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง

ตารางที่ 1 จำแนกประเภทของวัสดุรูพรุนได้แก่ พอลิเมอร์คาร์บอน กระจก อะลูมิโนซิลิเกต ออกไซด์ และโลหะ ตาม IUPAC จะเห็นว่าในวัสดุรูพรุนประเภทที่เป็น คาร์บอน อะลูมิโนซิลิเกต และออกไซด์ ขนาดรูพรุนจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ไมโครพอร์จนถึงเมโซพอร์ ส่วนพอลิเมอร์ กระจกและโลหะจะมีขนาดรูพรุนที่อยู่ในช่วงตั้งแต่เมโซพอร์ถึงแมโครพอร์ หากพิจารณาจากพื้นที่ผิวหรือความพรุนแล้ว เมื่อขนาดของรูพรุนของวัสดุรูพรุนมีขนาดเล็กหรืออยู่ในช่วงเมโซพอร์ลงมาจนถึงไมโครพอร์พบว่าพื้นที่ผิว หรือความพรุนของวัสดุรูพรุนจะมีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามเมื่อขนาดของรูพรุนของวัสดุรูพรุนมีขนาดใหญ่หรืออยู่ในช่วงเมโซพอร์ขึ้นไปจนถึงแมโครพอร์พื้นที่ผิวหรือความพรุนของวัสดุรูพรุนจะมีค่าต่ำ หากพิจารณาถึงความสามารถในการแพร่ผ่านว่ามีค่าสูงหรือต่ำ ปัจจัยสำคัญอยู่ที่ขนาดของรูพรุนของวัสดุโดยพบว่าในวัสดุประเภทกระจกและโลหะจะมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่อีกทั้งการเรียงตัวของโครงสร้างของพื้นที่ผิวภายในรูพรุนค่อนข้างเป็นระเบียบ จึงทำให้ความสามารถในการแพร่ผ่านภายในรูพรุนของวัสดุทั้งสองมีค่าสูง

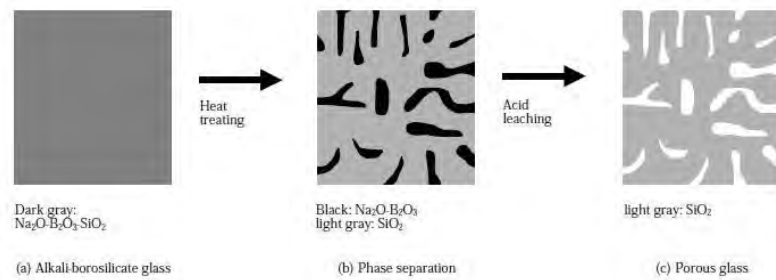
ส่วนความแข็งแรงของวัสดุรูพรุนจะขึ้นอยู่กับพันธะทางเคมีของวัสดุ จากตารางที่ 1 พบว่าในวัสดุประเภทโลหะและกระจกเมื่อทำเป็นวัสดุรูพรุนความแข็งแรงมีค่าสูง ซึ่งตรงกับพันธะทางเคมีของของแข็งของวัสดุประเภทนี้ ความเป็นฉนวนและการทนต่อสารเคมีนั้นก็ขึ้นอยู่กับพันธะทางเคมีเช่นกัน ส่วนราคาและอายุของวัสดุรูพรุนนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับวัสดุรูพรุนในแต่ละประเภทที่ใช้

สำหรับตัวอย่างของวัสดุรูพรุนที่เป็นสารอนินทรีย์ที่รู้จักกันทั่วไปคือ วัสดุรูพรุนจำพวกซีโอไลต์ซึ่งมีพบอยู่มากมายทั้งตามธรรมชาติและที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้น ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate compound) และส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์จำพวกโลหะออกไซด์ของ เตตราไฮดรา  $SiO_4$  และ  $AlO_4$  โดยโมเลกุลทั้งสองจะมีการร่วมใช้ออกซิเจนระหว่างกันและประกอบกันเป็นโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์และมืองค์ประกอบทางเคมีดังนี้  $M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot zH_2O$  โดย x และ y เป็นเลขจำนวนเต็มอัตราส่วนของ  $y/x$  จะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 1 ส่วน n เป็นจำนวนวาเลนซ์ของไอออนบวกของ M สำหรับ z จะเป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำในแต่ละเซลล์หน่วยหรือที่เรียกว่า unit cell ที่ภายในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์จะมีความพรุนสูง ซึ่งจัดอยู่ในจำพวกที่มีความพรุนของโมเลกุลแบบไมโครพอร์ (Microporous molecules) สำหรับวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยทั่วไปวัสดุรูพรุนจำพวกซีโอไลต์จะสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และใช้สารที่มีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและซิลิกาเป็นองค์ประกอบ โดยผสมสารทั้งสองในรูปของสารละลาย จากนั้นจึงใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอลในการทำให้เกิดการตกผลึก (Recrystallization) กลับมาเป็นซีโอไลต์ ซึ่งเป็นกระบวนการของการ สังเคราะห์จนเกิดเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ในการสังเคราะห์จนเกิดเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์ในแบบต่าง ๆ นั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารตั้งต้นระหว่าง อะลูมิเนียม ซิลิกา และสารอินทรีย์แม่แบบ (Organic template) ที่ใช้และยังมีตัวแปรอื่นอีกเช่น อุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ เป็นต้น



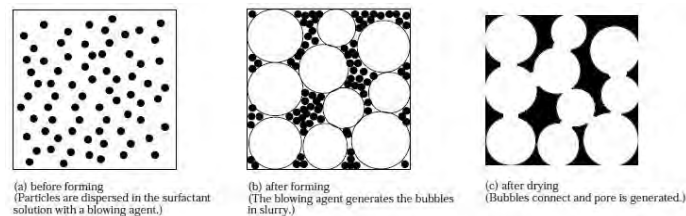
รูปที่ 2.8 กลไกการสังเคราะห์ซีโอไลต์และการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์  
(ที่มา Pesak Rungrojchaipon, Porous Materials, 2011)

สำหรับการสังเคราะห์วัสดุพอร์นแก้วนั้น มีการสังเคราะห์โดยการเริ่มจากสารที่เป็นองค์ประกอบของแก้วคือ บอโรซิลิเกต ด้วยการให้ความร้อนหลายร้อยองศาจนเกิดการแยกเป็นวัฏภาค จากนั้นทำการไล่สารที่เป็นโบรอนและโซเดียมออกจากโครงสร้างของซิลิคอน ด้วยการใช้กรดในการทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของโซเดียมและโบรอน และจากนั้นก็กลายเป็นช่องว่างภายในโครงสร้างของซิลิคอน ในรูปที่ 2.9 การสังเคราะห์วัสดุพอร์นแบบแก้วจะสามารถสังเคราะห์วัสดุที่มีรูพอร์ขนาดกลางถึง ขนาดใหญ่ หรือที่อยู่ในช่วงเมโซพอร์ส จนถึงแมโครพอร์ส



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดเป็นโครงสร้างของวัสดุพอร์นแก้ว  
(ที่มา Pesak Rungrojchaipon, Porous Materials, 2011)

การสังเคราะห์วัสดุพอร์นแบบสุดท้ายที่จะกล่าวถึง เป็นการสังเคราะห์วัสดุพอร์นที่มีขนาดใหญ่ที่สุดหรือที่เรียกว่า วัสดุพอร์นแมโครพอร์ส ซึ่งหลักการของการสังเคราะห์วัสดุพอร์นประเภทนี้จะทำขึ้นโดยการใช้สารตั้งต้นที่เป็นของแข็งเพื่อเป็นโครงสร้างของวัสดุพอร์นและทำการผสมสารอินทรีย์ที่สามารถสร้างโฟมหรือฟองแก๊สภายในวัสดุ จากนั้นทำการเผาด้วยความร้อนเพื่อไล่สารอินทรีย์ เพื่อทำให้เกิดเป็นรูพอร์ภายในโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดเป็นโครงสร้างของวัสดุพอร์นแบบแมโครพอร์ส  
(ที่มา Pesak Rungrojchaipon, Porous Materials, 2011)

เนื่องจากวัสดุพอร์นมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ดังนั้นการที่เราจะเลือกใช้วัสดุพอร์นประเภทใดนั้น ควรจะมีการพิจารณาในแง่ของวัสดุที่จะใช้ความเหมาะสมของขนาดของรูพอร์ ความสามารถในการแพร่ผ่าน และความแข็งแรง รวมถึงราคาและอายุของการใช้งาน

### 2.3 วัสดุก่อสร้างพรุนน้ำ (Perforated construction materials)

วัสดุก่อสร้างพรุนน้ำจัดว่าเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความพรุนตัวสูงทำให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ แต่ยังคงมีความแข็งแรงสูงใกล้เคียงหรือเทียบเท่าวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ โดยคอนกรีตพรุนน้ำและอิฐพรุนน้ำมีลักษณะแตกต่างจากคอนกรีตหรืออิฐทั่วไป คือมีโพรงหรือช่องว่างเชื่อมต่อกันภายใน ขนาดตั้งแต่ 2-8 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดช่องว่างเหล่านี้จะทำให้ของเหลวไหลซึมผ่านได้สะดวก ในส่วนของอิฐพรุนน้ำที่เป็นคอนกรีตมีสมบัติตามข้อเสนอของ American Concrete Institute (ACI) เลขที่ ACI 522R-10 ดังนี้ ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) อยู่ระหว่าง 2.8-28.0 MPa อัตราส่วนโพรง (Void content) อยู่ระหว่าง 15-35 % และมีค่าซึมผ่านน้ำ (Percolation rate) ประมาณ 0.14-1.22 เซนติเมตรต่อวินาที โดยสมบัติของคอนกรีตพรุนจะมีความต่างกับสมบัติของคอนกรีตทั่วไป โดยส่วนใหญ่วัสดุก่อสร้างพรุนน้ำมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ มวลรวมและตัวเชื่อมประสาน ซึ่งคล้ายกับส่วนประกอบคอนกรีตมวลรวม (Aggregate) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของวัสดุ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยให้คอนกรีตหรือวัสดุผสมมีความคงทน มีความทนทานต่อแรงกดอัด และยังช่วยให้ขนาดของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงน้อย โดยสมบัติของมวลรวมเป็นปัจจัยสำคัญที่มีต่อสมบัติของคอนกรีตหรือวัสดุผสมอย่างมาก มวลรวมแบ่งตามขนาดได้เป็น 2 กลุ่ม คือ มวลรวมหยาบ (Coarse aggregate, ขนาด  $\geq 4.75$  มิลลิเมตร) และมวลรวมละเอียด (Fine aggregate, ขนาด 0.075-4.75 มิลลิเมตร) โดยทั่วไปมักใช้เป็นวัสดุจากธรรมชาติ (Natural aggregate) เช่น หิน กรวด และทราย อาจมีบางมวลรวมประเภทที่เกิดจากการสร้างขึ้น (Artificial aggregate) เช่น มวลรวมดินเผา นอกจากนี้ยังรวมถึงกากของเสียเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเซรามิก เช่น เศษแก้ว และเศษผลิตภัณฑ์เซรามิกเครื่องเคลือบ เช่น กระเบื้อง สุขภัณฑ์ และจานชาม สมบัติของมวลรวมที่สำคัญได้แก่ ความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี รูปร่างและลักษณะผิว

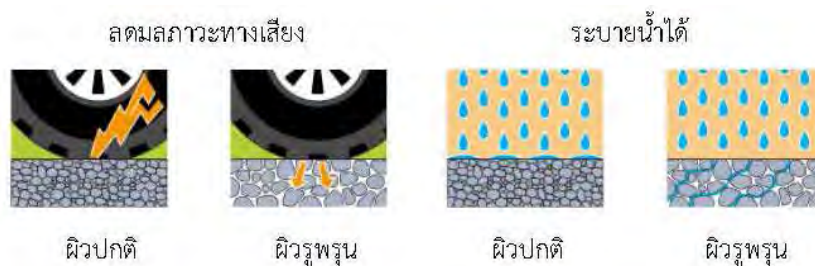
ตัวเชื่อมประสาน (Binder) หมายถึงสารหรือวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมติดอนุภาคมวลรวมหยาบ มวลรวมละเอียดเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ ตัวประสานสามารถจำแนกได้ตามชนิดของวัสดุ ได้แก่

1. ตัวประสานอนินทรีย์ (Inorganic binder) หรืออาจเรียกว่า เพสต์ (Paste) คือวัสดุในกลุ่มสารประกอบอนินทรีย์ เช่น ซีเมนต์ (Cement) และจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ทำหน้าที่ช่วยเชื่อมประสานมวลรวม โดยสร้างความแข็งแรงจากการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุอนินทรีย์กับน้ำหรือสารละลายต่าง ๆ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้อง
2. ตัวประสานอินทรีย์ (Organic binder) ประกอบไปด้วยตัวประสานที่มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สมบัติเด่นของวัสดุประสานอินทรีย์ ได้แก่ การไม่ชอบน้ำ ลดการเกาะติดของน้ำบนพื้นผิวของวัสดุ ทำให้ไม่เกิดตะไคร่น้ำ น้ำหนักเบา กระบวนการนำไปใช้งานในการขึ้นรูปวัสดุพรุนสามารถทำได้ง่าย ไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาที่ต้องใช้พลังงานความร้อนสูง แต่ข้อด้อยของวัสดุประสานอินทรีย์ที่สำคัญคือ ความสามารถในการรับแรง ความต้านทานการขีดสี ได้แก่ พอลิยูรีเทน (Polyurethane) และ อีพอกซี (Epoxy)

สมาคมธุรกิจรับสร้างบ้าน (2560) กล่าวว่า คอนกรีตพรุน เป็นเทคโนโลยีคอนกรีตที่มีรูพรุนต่อเนื่องกันโดยไม่มีมวลละเอียดหรือทรายในส่วนผสม เพื่อต้องการให้เกิดโพรงที่ต่อเนื่อง (Interconnection Void) อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตขนาดตั้งแต่ 2 - 8 มิลลิเมตร โดยทั่วไปจะมีพื้นที่ช่องว่างประมาณร้อยละ 15 - 25 ซึ่งขนาดช่องว่างเหล่านี้จะทำให้ให้น้ำไหลผ่านได้สะดวกดังแสดงในรูปที่ 2.11 อัตราการไหลผ่านของน้ำผ่านคอนกรีตพรุนมักจะอยู่ที่ประมาณ 200 ลิตร / ตารางเมตร / นาที ถึงแม้ว่าความพรุนสูงจะลดความ

แข็งแรงเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป แต่มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานทั่วไปตามปกติ คอนกรีตพูนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมได้อย่างหลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งานทั้งในด้านความแข็งแรง ความสามารถในการระบายน้ำ ความสามารถในการอุ้มน้ำ และความสามารถด้านอื่น ๆ โดยเฉพาะพื้นที่ต้องการการระบายน้ำได้ดี เช่น พื้นลานจอดรถ ลานหน้าอาคาร ลานรอบที่พักอาศัย พื้นบริเวณรอบสระว่ายน้ำ ถนนในหมู่บ้านที่การจราจรไม่หนาแน่น และถนนภายในสนามกอล์ฟ เป็นต้น

คอนกรีตพูนนอกจากมีน้ำหนักเบา ความพูนในเนื้อคอนกรีตยังช่วยเพิ่มการดูดซับเสียงดังแสดงในรูปที่ 2.11 ค่าการนำความร้อนต่ำ และระบายความร้อนได้ดีจึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนรวมถึงเสียงยานพาหนะได้ดี ลดการใช้พลังงานเพราะสะท้อนความร้อนเข้าบ้านน้อยลง ดังนั้นจึงถือได้ว่าคอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ยิ่งไปกว่านั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานออกแบบตกแต่งเพื่อความสวยงามได้อย่างลงตัว



รูปที่ 2.11 สมบัติของคอนกรีตพูนในการลดมลภาวะทางเสียงและระบายน้ำได้  
(ที่มา : <http://www.shutoko.jp/ss/tokyo-smooth/harumi/torikumi.html> )

HydroCon Australasia Pty Ltd (2559) ได้กล่าวว่า HydroSTON เป็นพื้นคอนกรีตที่ทำด้วยหิน ซึ่งมีความแข็งแรงทนทานและกันลื่นได้ สามารถใช้เป็นทางให้รถวิ่งได้ เป็นโรงจอดรถ เป็นลานจอดรถ ทางเดินเท้า สนามหญ้า ลานต้นไม้และที่กักเก็บน้ำในที่พักอาศัยทั้งเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม ซึ่งข้อมูลพื้นฐานของ HydroSTON มีดังรูปที่ 2.12

รูปที่ 2.12 ข้อมูลพื้นฐานของ HydroSTON  
(ที่มา : [http:// https://hydroston.com.au/specifications/](http://https://hydroston.com.au/specifications/))

ITEM	UNIT	H80	H50 BLOCK	H50 FLAG	H50 FLAG XL
Application		Vehicle & pedestrian	Pedestrian only	Pedestrian only	Pedestrian only
Main material			+1 -3mm quartz		
Nominal size	mm	210 x 140 x 80	200 x 100 x 50	300 x 300 x 50	400 x 400 x 50
Work size	mm	206 x 136 x 80	200 x 100 x 50	300 x 300 x 50	400 x 400 x 50
Work size (face) area	m <sup>2</sup>	0.0280	0.0200	0.0900	0.16
Gross plan area (nom.)	m <sup>2</sup>	0.0294	0.0200	0.0900	0.16
Bevels	mm	4	4	5 @ 45°	4 @ 45°
Spacers	mm	none	none	none	2
Dry weight per unit (av.)	kg	4.4	1.9	9	15
Units (work size) per m <sup>2</sup>	no.	35.71	50	11.11	6.25
Units (nom.) per m <sup>2</sup>	no.	34.01	50	11.11	6.25
Units per pallet	no.	405	864	192	108
Units per row	no.	45	96	16	12
Rows per pallet	no.	9	9	12	9
Permeability RMS T377	m/s	0.0017		0.0014	
Breaking Load AS4456.5 mean [SD]	kN	14.5 [2.0]	5.7 [0.3]	7.5 [0.5]	6.2 [0.6]
** Modulus of Rupture mean [SD]	MPa	3.7 [0.5]	5.2 [0.3]	3.7 [0.3]	3.3 [0.3]
** Characteristic Breaking Load	kN	9.0	3.9	4.9	4.0
** Characteristic MoR	MPa	2.3	3.5	2.5	2.1
Compressive Strength AS4456.4 [SD]	MPa	12 [1.5]	16 [0.7]		
Slip Resistance AS4586	rating		Surface Class P5		
Potential to Effloresce AS4456.6	rating		Slight		

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฉัตรชัย จันทนา และคณะ (2554) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของวัสดุปูพื้นหินล้างคอนกรีตพรุนรูปของลักษณะทั่วไปและมิติ กำลังอัด กำลังค้ำ การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการระบายน้ำ และอุณหภูมิที่ผิวน้ำ โดยจัดทำขนาดตัวอย่างการทดสอบ ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตรหนา 4 เซนติเมตร โดยมีรูปแบบของวัสดุปูพื้น 4 รูปแบบคือ ผิวหน้าหินล้างสีขาวที่ฐานคอนกรีตทึบ ผิวหน้าหินล้างสีขาวฐานคอนกรีตพรุน ผิวหน้าหินล้างสีขาวพรุนฐานคอนกรีตทึบ และผิวหน้าล้างสีขาวพรุนฐานคอนกรีตพรุน จากผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างวัสดุปูพื้นหินล้างคอนกรีตพรุน ผิวหน้าหินล้างสีขาวที่ฐานคอนกรีตทึบ สามารถรับกำลังอัดได้สูงสุด และผิวหน้าหินล้างสีขาวที่ฐานคอนกรีตพรุน มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด และวัสดุปูพื้นหินล้างคอนกรีตพรุนผิวหน้าหินล้างสีขาวพรุนฐานคอนกรีตพรุน มีการระบายน้ำได้ดีที่สุด และวัสดุปูพื้นหินล้างคอนกรีตพรุนผิวหน้าหินล้างสีขาวที่ฐานคอนกรีตทึบมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวหน้าต่ำที่สุด และจากตัวอย่างวัสดุปูพื้นหินล้างคอนกรีตพรุนทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าวัสดุปูพื้นผิวหน้าหินล้างสีขาวที่ฐานคอนกรีตพรุน เป็นรูปแบบที่สามารถรับกำลังอัดได้ค่อนข้างสูง ตลอดจนให้สมบัติทางด้านการระบายน้ำ และอุณหภูมิที่ผิวหน้า อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ในการก่อสร้าง และมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปูพื้นภายนอกอาคารได้

สัจจะชาญ พริตมะลิต และคณะ (2559) ได้ศึกษาวิธีการใช้เศษหินพื้มีสพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นสำหรับชุมชน กำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1: ทราย: หินฝุ่น: เศษหินพื้มีส: น้ำประปา รวมทั้งสิ้น 6 อัตราส่วน ขึ้นรูปบล็อกปูพื้น ขนาด 30 เซนติเมตร x 30 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร ทำการทดสอบตามมาตรฐาน มอก.378 – 2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น ผลการทดสอบพบว่า บล็อกปูพื้นที่มีปริมาณเศษหินพื้มีสมาก มีความต้านทานแรงดัดตามขวาง และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าบล็อกปู



พื้นที่มีปริมาณเศษหินพืชมินน้อย ส่วนการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อบล็อกปูพื้นมีปริมาณเศษหินพืชมินมาก อย่างไรก็ตามบล็อกปูพื้นอัตราส่วนที่มีเศษหินพืชมินน้อยกว่าอัตราส่วน 1 : 2 : 2.4 : 0.6 : 0.6 มีคุณสมบัติผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด และมีอุณหภูมิผิวพื้นต่ำกว่าวัสดุอื่น ๆ ที่นำมาทดสอบถึง 2 องศาเซลเซียส

ไพบุรณ แยม์เฟื่อน และคณะ (2555) ได้ศึกษาการทดลองนำซีต๊ะกรันอะลูมิเนียมมาเป็นสารเสริมแรงให้กับโพลีโพรพิลีน โดยการนำซีต๊ะกรันอะลูมิเนียมไปบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดลดขนาดวัตถุด้วยลูกบดจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมครอน จากนั้นมาผสมกับโพลีโพรพิลีน ด้วยขบวนการผสมแบบหลอมละลายโดยการผสมในเครื่องผสมภายใน ที่สัดส่วนการผสมซีต๊ะกรันอะลูมิเนียมในโพลีโพรพิลีน 1 3 5 7 และ 90% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ แล้วทดสอบสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางความร้อน

ยุวดี หิรัญ และคณะ (2551) ได้ศึกษาส่วนผสมของคอนกรีตพูนที่สามารถอัดขึ้นรูปเป็นบล็อกปูถนนได้โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ด้านกำลังรับแรงอัด ความชื้นน้ำ และความสามารถในการอัดขึ้นรูปบล็อกของบล็อกปูถนน ส่วนผสมของคอนกรีตพูนใช้หินกรวดที่ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน ASTM และเลือกใช้หินกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8") เบอร์ 4 และ เบอร์ 8 มาผสมกันโดยใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 18% , 20% และ 22% โดยน้ำหนักหินและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.35 และ 0.40 จากการวิจัยพบว่าส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ใช้สัดส่วนคละ ของหินกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8") และเบอร์ 8 อย่างละเท่าๆกันโดยน้ำหนักหินและส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ใช้สัดส่วนคละของหินกรวดที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 2 (3/8") เบอร์ 4 และเบอร์ 8 อย่างละเท่า ๆ กันโดยน้ำหนักหินและใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 20% หรือ 22% โดยน้ำหนักหินจะมีความสามารถในการอัดขึ้นรูปบล็อกปูถนนได้ดีและสวนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) 0.40 ซีเมนต์เพสต์จะเคลือบผิวมวลรวมได้ดี

อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ และประพัฒน์ สีใส (2558) ได้ศึกษาการใช้กากตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมในการผลิตบล็อกปูถนน โดยการนำของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสมบัติปอซโซลานและคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมมาผสมกับปูนซีเมนต์และทรายหรือดิน ในอัตราที่เหมาะสม แล้วนำส่วนผสมไปผลิตเป็นวัสดุปูพื้นภายนอกอาคารภายนอกอาคารตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปบ่มเป็นระยะเวลา 10-28 วันเพื่อให้มีความแข็งแรงก่อนจะนำไปใช้ในงานก่อสร้างต่อไป การนำของเสียที่ต้องกำจัดมาใช้ประโยชน์ด้วยการเป็นวัสดุผสมผลิตบล็อกปูถนน จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสม เนื่องจากส่งผลดีทั้งต่อสภาพแวดล้อมจากการที่ทำให้มีปริมาณของเสียที่ต้องฝังกลบหรือกำจัดน้อยลง ส่วนในแง่ของผู้ประกอบการโรงงาน นอกจากจะได้รับผลตอบแทนที่มีมูลค่าสูงกว่าเงินลงทุนแล้ว ยังทำให้ภาพลักษณ์ของสถานประกอบการดีขึ้นอีกด้วย

Alenka Rastovčan- Mioč และคณะ (2552) ได้กล่าวว่าจากการทดสอบทางห้องปฏิบัติการของโรงถลุงเหล็กตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้าซึ่งเก็บไว้ที่พื้นดินสำหรับขยะอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตรายของ Tube Rolling Mill เราสามารถสรุปได้ว่าสมบัติเชิงกลทางกายภาพของตะกรันที่สังเกตได้แสดงให้เห็นศักยภาพการใช้งานบนถนนอาคารเพื่อวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้:

- การก่อสร้างเขื่อนและแนวหิน
- ชั้นถนน (ชั้นเบร้งและชั้นบัพเฟอร์)
- ชั้นเบร้งผูกมัดของวัสดุหินเม็ด
- ชั้นแอสฟัลต์ของผิวทางถนนไม่ว่าจะเป็นสารเติมแต่งกับหินและวัสดุดิน



นอกจากนี้โรงกลึงเหล็ก EAF ที่ตรวจสอบแล้วยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน และสามารถแบ่งได้เป็นสารปรับปรุงดินอินทรีย์ นอกจากนี้มันสามารถใช้เป็น 15% ของสารเติมแต่งซีเมนต์

Flora Faleschini และคณะ (2562) ได้กล่าวว่าในงานนี้มีการแสดงผลการทดลองเกี่ยวกับการใช้ ตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้าในวัสดุที่ทำจากซีเมนต์โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับลักษณะที่สำคัญ ของตะกรันและความเข้ากันได้คอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางกลได้ดำเนินการแสดงผลของการ รวมซิลิกาแทนด้วยตะกรันต่อแรงอัดแรงดึงและแรงดึงโมดูลัส ในทุกกรณีมีการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ: จาก งานนี้มีข้อเสนอแนะว่าการปรับปรุงเหล่านี้ได้รับทั้งจากคุณภาพรวมของตะกรัน (ในแง่ของความหนาแน่น และความแข็งแรง) และจากการปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้า และเมทริกซ์ของซีเมนต์ ผลลัพธ์นี้ยังได้รับเมื่อเร็ว ๆ นี้โดยผู้เขียนคนอื่นซึ่งได้รับสัญญาณของ Interfacial transition zone ด้วย) เมื่อใช้ ตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้าซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลคอนกรีต ผลลัพธ์เชิงบวกที่ได้รับในแง่ของความแข็งแรงเชิงกล ช่วยให้สามารถออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่มีความแข็งแรงและระดับความสามารถในการทำงานได้และลด ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ผู้วิจัยมุ่งที่จะศึกษาสมบัติและโครงสร้างของตะกรันที่ได้จากเตาอาร์คไฟฟ้า เพื่อสำหรับใช้พัฒนาและนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นวัสดุพูน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย คือ ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ อุปกรณ์และเครื่องที่ใช้ในการทดลอง แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง การวิเคราะห์ผลและทดสอบวัสดุพูน และ ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

##### 3.1.1 ตะกรันเหล็ก (EAF Slag)

กากตะกรันเหล็กจากบริษัทสยาม สตีล มิลล์ เซอร์วิสเซส จำกัด

##### 3.1.2 น้ำ

น้ำในการวิจัยจะใช้น้ำประปา

##### 3.1.3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1

เหมาะที่จะนำไปใช้กับงานก่อสร้างงานคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดสูง และงานคอนกรีตทั่วไป

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 หม้อป่นผสม ความจุ 180 ลิตร

3.2.2 ท่อพลาสติก PVC. ใช้ทำแม่พิมพ์เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตรและ 10 เซนติเมตร

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.2.4 เครื่อง Industrial series HDX models

3.2.5 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบ Porosity

3.2.6 อุปกรณ์ทดสอบ Water permeability

#### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.3.1 การเตรียมตะกรัน

นำตะกรันมาแยกขนาดโดยแบ่งแยกเป็น 2 ขนาดคือขนาดเล็ก (ขนาด 5-12 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (ขนาด 12-20 มิลลิเมตร) เตรียมพร้อมทำการทดลองในขั้นต่อไป โดยแบ่งตะกรันออกเป็น 5 สูตรแต่ละสูตร มีอัตราส่วนของตะกรันขนาดใหญ่และขนาดเล็กโดยจะแบ่งออกเป็น 5 สูตร

สูตรที่ 1 อัตราส่วนตะกรันขนาดใหญ่และขนาดเล็ก 100 : 0 โดยน้ำหนัก

สูตรที่ 2 อัตราส่วนตะกรันขนาดใหญ่และขนาดเล็ก 75 : 25 โดยน้ำหนัก

สูตรที่ 3 อัตราส่วนตะกรันขนาดใหญ่และขนาดเล็ก 50 : 50 โดยน้ำหนัก

สูตรที่ 4 อัตราส่วนตะกรันขนาดใหญ่และขนาดเล็ก 25 : 75 โดยน้ำหนัก

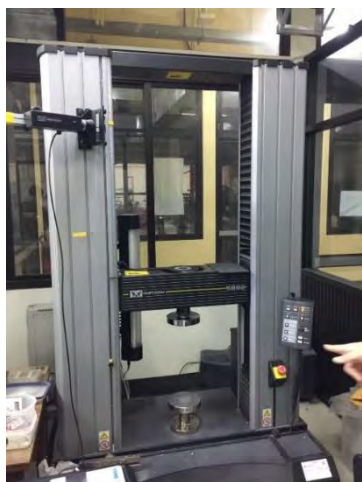
สูตรที่ 5 อัตราส่วนตะกรันขนาดใหญ่และขนาดเล็ก 0 : 100 โดยน้ำหนัก

### 3.3.2 การขึ้นรูปวัสดุพูนจากตะกรันเหล็กผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(OPC)

- 3.3.2.1 ในการขึ้นรูปวัสดุพูนเพื่อทดสอบความพูนตัวและการไหลผ่านของน้ำ เริ่มจากนำตะกรันในแต่ละสูตรมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(OPC) ซึ่งเป็นผงปูนชนิดทั่วไป โดยนำผงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาผสมกับน้ำก่อนในอัตราส่วน 10 : 3 โดยน้ำหนัก
- 3.3.2.2 ผสมผงปูนซีเมนต์และน้ำในหม้อผสมเสร็จแล้วนำผงตะกรันในแต่ละสูตรมาผสมลงไป โดยอัตราส่วนระหว่างตะกรันและผงปูนซีเมนต์มีอัตราส่วนอยู่ที่ 3 : 1 โดยน้ำหนัก
- 3.3.2.3 หากเป็นการขึ้นรูปวัสดุพูนเพื่อทดสอบความแข็งแรง จะทำการใส่ตะกรันลงไป ในหม้อปูน และใส่ซีเมนต์ลงไปทำการผสมกันก่อน เสร็จแล้วค่อยเติมน้ำลงไปผสม ทำการปั่นผสมอีก 2-3 นาที
- 3.3.2.4 นำส่วนผสมที่ผสมเข้ากันเสร็จแล้วนำไปขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตรและ 10 เซนติเมตร
- 3.3.2.5 แบ่งการใส่ส่วนผสมออกเป็น 3 รอบ โดยแต่ละรอบจะต้องทำการกระแทกผิวหน้าด้วยไม้ เพื่อให้ส่วนผสมมีการอัดตัวกันแน่น
- 3.3.2.6 ทิ้งไว้ 1 คืนโดยต้องมีการนำพลาสติกมาคลุมปิดแม่พิมพ์เอาไว้
- 3.3.2.7 เมื่อครบเวลาแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปแช่น้ำ 1 คืนแล้วเข้าอบในเตาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอีก 1 คืน
- 3.3.2.8 นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งแรง ความพูนตัว และการไหลซึมผ่านของน้ำ

### 3.3.3 การวิเคราะห์ความแข็งแรง

การทดสอบความแข็งแรงของวัสดุพูนจากตะกรันเหล็กซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก จะใช้เครื่องมือทดสอบเป็น Industrial Series HDX Models ซึ่งจะอยู่ในมาตรฐาน ASTM C39 เป็นมาตรฐานที่ใช้งานสำหรับอุตสาหกรรมสำหรับการทดสอบแรงอัดของชิ้นงานคอนกรีตทรงกระบอก โดยจะนำชิ้นงานเข้าไปวางให้อยู่กึ่งกลางของเครื่องเสร็จแล้วก็จะทำการกดให้เครื่องดำเนินการทดสอบเสร็จแล้วจะได้ค่า compressive strength



รูปที่ 3.1 เครื่อง Industrial Series HDX Models

### 3.3.4 การวิเคราะห์ความพรุนตัวและความหนาแน่น

การทดสอบความพรุนตัวและความหนาแน่นของวัสดุพรุน โดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส กล่าวคือวัตถุที่จุ่มลงในของเหลวจะระบุดูดสูญเสียน้ำหนักที่ชัดเจนเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่วัตถุนั้นแทนที่ วัตถุที่จุ่มลงในของเหลวบางส่วนหรือทั้งหมดจะมีแรงลอยตัวกระทำกับวัตถุนั้นในทิศทางพุ่งขึ้น โดยที่แรงมีขนาดเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่วัตถุนั้นเข้ามาแทนที่ จะสามารถคำนวณได้ ดังต่อไปนี้

หาค่า water adsorption โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$\%WA = \frac{W2-W1}{W1} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

- เมื่อ %WA คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงาน  
 W1 คือ น้ำหนักชิ้นงานแห้งที่ชั่งในอากาศ (กิโลกรัม)  
 W2 คือ น้ำหนักชิ้นงานที่แช่น้ำ และนำมาชั่งในอากาศ (กิโลกรัม)

หาปริมาณรูพรุนที่อยู่ภายในชิ้นงาน โดยคำนวณจากสมการดังนี้

$$\%porosity = \left( 1 - \left( \frac{\text{actual density}}{\text{theoretical density}} \right) \right) \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

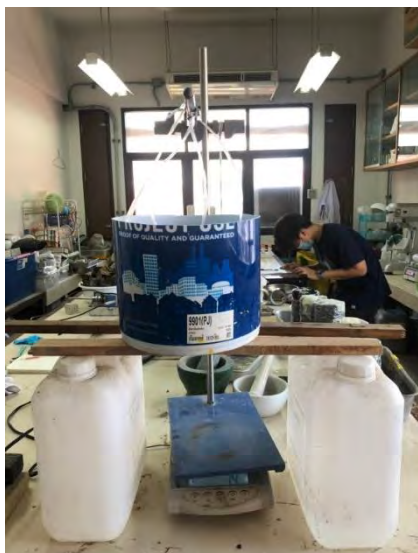
- เมื่อ %porosity คือ ปริมาณรูพรุนที่อยู่ภายในชิ้นงาน  
 Actual density คือ ความหนาแน่นจริงของชิ้นงาน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 Theoretical density คือ ความหนาแน่นตามทฤษฎีของชิ้นงาน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$$\text{Actual density} = \frac{W1}{(W1-W2)} \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

- เมื่อ Actual density คือ ความหนาแน่นจริงของชิ้นงาน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 W1 คือ น้ำหนักชิ้นงานแห้งที่ชั่งในอากาศ (กิโลกรัม)  
 W2 คือ น้ำหนักชิ้นงานที่แช่น้ำ และนำมาชั่งในอากาศ (กิโลกรัม)

$$\text{Theoretical density} = \Sigma(mi \times \rho_i) \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

- เมื่อ Theoretical density คือ ความหนาแน่นตามทฤษฎีของชิ้นงาน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 m คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (mass fraction)  
 ρ คือ ความหนาแน่นของส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 i คือ จำนวนส่วนผสม i ตัว



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบ Porosity

### 3.3.5 การทดสอบค่าการไหลผ่านของน้ำ

การทดสอบค่าการไหลผ่านของน้ำนั้นจะใช้วิธี Constant Head Permeability Test ตามมาตรฐาน ASTM D2434 โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วเป็นแบบหล่อ เป็นการทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำแบบแรงดันคงที่ (Constant Head Test) ค่าการซึมผ่านของน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$k = \frac{QL}{HA t} \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณน้ำ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่วัดในเวลา t (วินาที)

k คือ ค่าการซึมผ่านน้ำ (เซนติเมตร/วินาที)

A คือ ขนาดหน้าตัดตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)

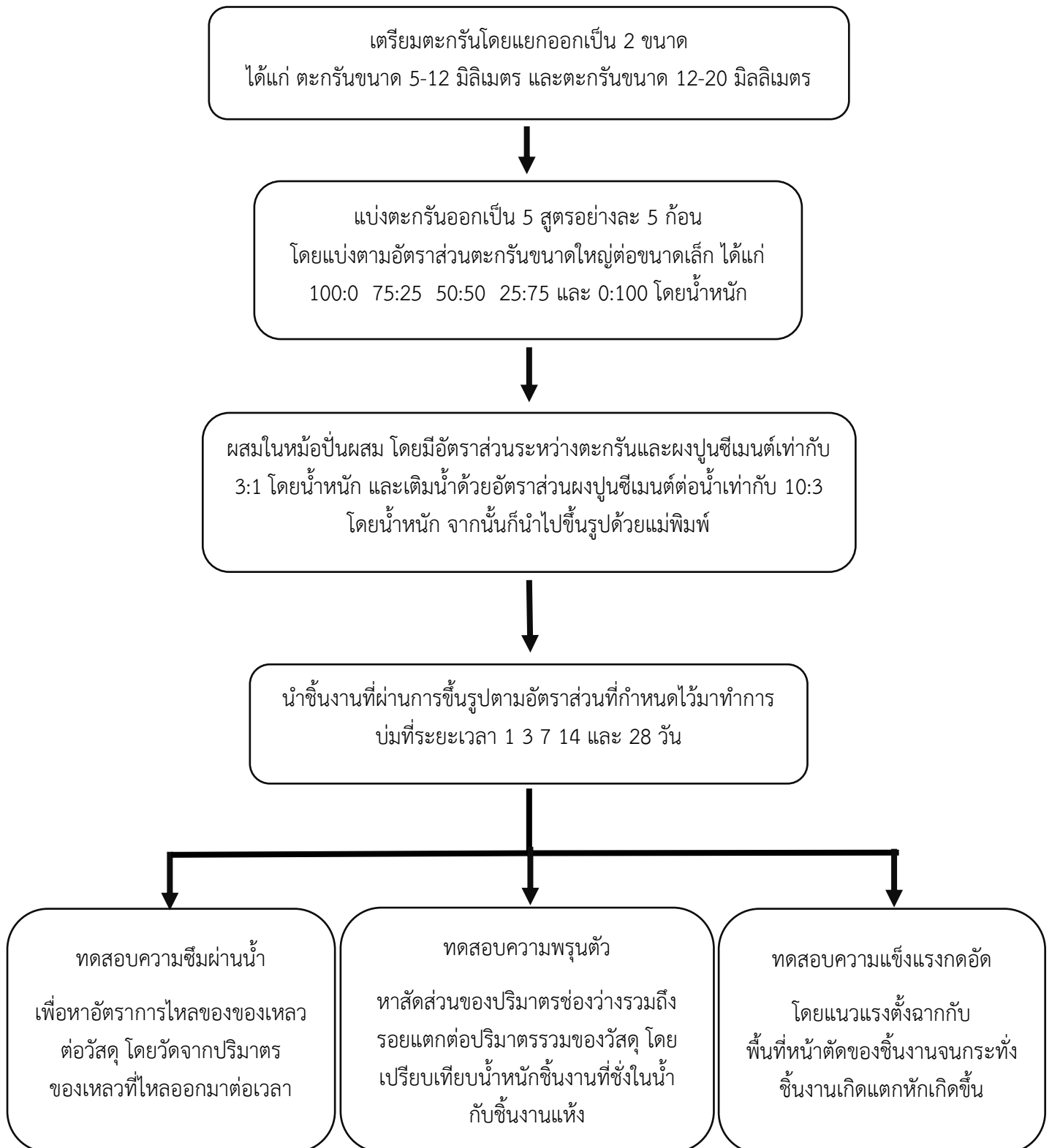
L คือ ความสูงของตัวอย่าง (เซนติเมตร)

H คือ ระยะระหว่างระดับน้ำที่ทางออกทั้งสองทาง (เซนติเมตร)



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ทดสอบ Water permeability

แผนการดำเนินการทดลองเป็นไปตามหัวข้อที่ 3.4



### 3.4 ขั้นตอนในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุพูน

- 3.4.1 เตรียมตะกรันโดยแยกออกเป็น 2 ขนาด ได้แก่ ตะกรันขนาด 5-12 มิลลิเมตร และตะกรันขนาด 12-20 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) ตะกรันเล็กขนาด 5-12 มิลลิเมตร (ข) ตะกรันใหญ่ขนาด 12-20 มิลลิเมตร

- 3.4.2 นำตะกรันและปูนมาทำการผสมแห้งภายในหม้อปั่นผสม เพื่อให้ปูนไปเคลือบที่ผิวตะกรันทั่วทั้งผิว



รูปที่ 3.5 การนำตะกรันและปูนมาทำการผสมแห้งภายในหม้อปั่นผสม



3.4.3 เติมน้ำลงไปผสมเพื่อทำการผสมวัสดุทุกอย่างให้เข้ากัน ทำการปั่นผสมอีก 2-3 นาที



รูปที่ 3.6 เติมน้ำเติมลงไปเพื่อทำการผสมวัสดุทุกอย่างให้เข้ากัน

3.4.4 ตะกรันที่ทำการผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำเศษส่วนผสมทั้งหมดลงมาภายในภาชนะเตรียมทำการอัด



รูปที่ 3.7 เศษส่วนผสมทั้งหมดลงมาภายในภาชนะเตรียมทำการอัด

3.4.5 ทำการอัดส่วนผสมไปยังแม่พิมพ์ให้มีความแน่นเข้ากันจากนั้นทิ้งไว้ 1 คืน



รูปที่ 3.8 ตักส่วนผสมลงไปยังแม่พิมพ์เสร็จแล้วทำการอัดส่วนผสมให้มีความแน่นเข้ากัน



3.4.6 แกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และนำไปแช่ในน้ำตามระยะเวลา 1 3 7 14 และ 28 วัน



รูปที่ 3.9 แกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และนำไปแช่ในน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด

3.4.7 นำชิ้นงานหลังจากการบ่มเข้าอบระยะเวลา 1 คืน เพื่อไม่ให้หลงเหลือน้ำอยู่ภายใน จากนั้นแล้วเตรียมนำไปทดสอบสมบัติ



รูปที่ 3.10 นำชิ้นงานหลังจากการบ่มเข้าอบระยะเวลา 1 คืน จากนั้นแล้วเตรียมนำไปทดสอบสมบัติ

## บทที่ 4

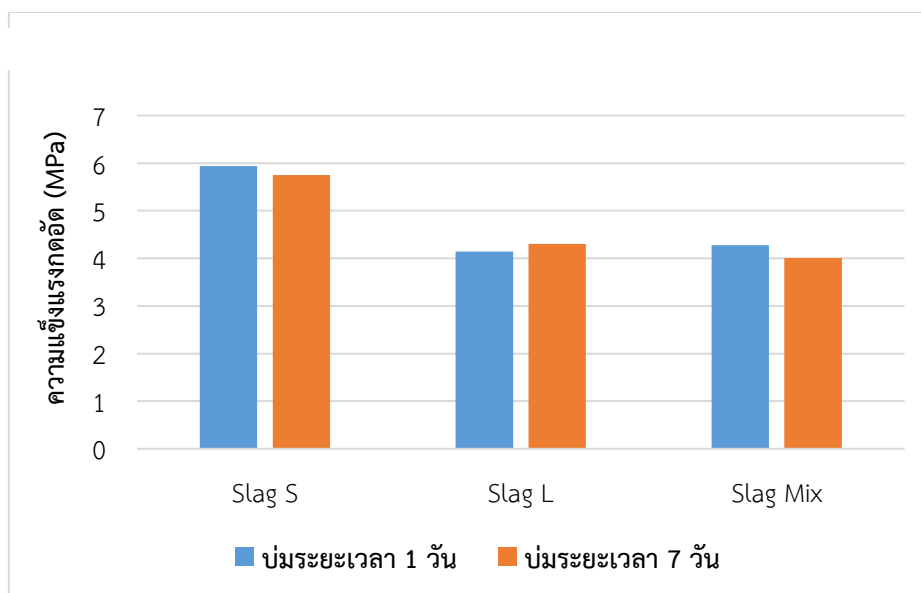
### ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาเรื่อง การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุพูนที่ทำจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า มีผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการศึกษา Preliminary Study

##### 4.1.1 ทดสอบเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีขนาดที่แตกต่างกัน

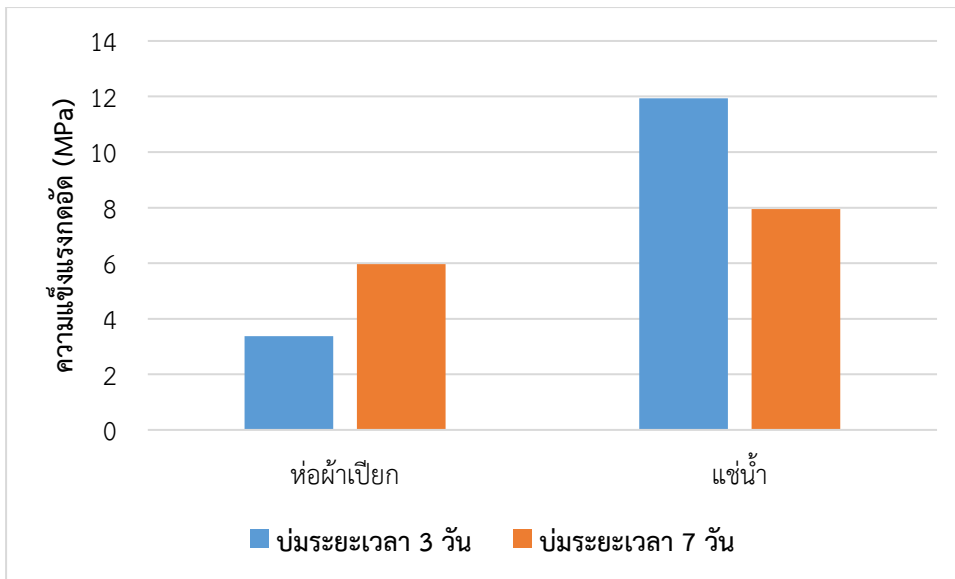
จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีขนาดที่แตกต่างกันดังรูปที่ 4.1 พบว่าความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีส่วนผสมของตะกรันที่มีขนาดเล็กโดยมีค่า ความแข็งแรงกดอัด มากกว่าวัสดุพูนที่มีส่วนผสมของตะกรันที่มีขนาดใหญ่และขนาดผสม เนื่องจากตะกรันขนาดเล็กมีการจัดเรียงตัวกันแน่น และมีพื้นที่ภายในว่างน้อยจึงมีค่าความแข็งแรงมากกว่าวัสดุพูนที่มีส่วนผสมของตะกรันขนาดอื่น



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีขนาดแตกต่างกัน

##### 4.1.2 ทดสอบเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน

พบว่าความแข็งแรงดังรูปที่ 4.2 ของวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มแบบการแช่น้ำมีค่า ความแข็งแรงกดอัดเฉลี่ยอยู่ที่ 11.93 เมกะปาสคาล และ 7.95 เมกะปาสคาล ที่ระยะเวลาในการบ่มเวลา 3 วันและ 7 วัน ซึ่งมีค่าความแข็งแรงมากกว่าวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มแบบการห่อผ้าเปียกที่มีค่า ความแข็งแรงกดอัด เฉลี่ยอยู่ที่ 3.38 เมกะปาสคาล และ 5.97 เมกะปาสคาล ที่ระยะเวลาในการบ่มเวลา 3 วันและ 7 วัน ดังนั้นวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มแบบการแช่น้ำจะสามารถรับกำลังได้มากกว่าแบบห่อผ้าเปียก เนื่องจากวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มแบบการแช่น้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงทำให้วัสดุพูนแข็งตัวและรับกำลังได้สูงมาก



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน

#### 4.1.3 การใช้สเตรนเกจ ในการตรวจวัดความเค้นที่เกิดขึ้นในตัววัสดุ

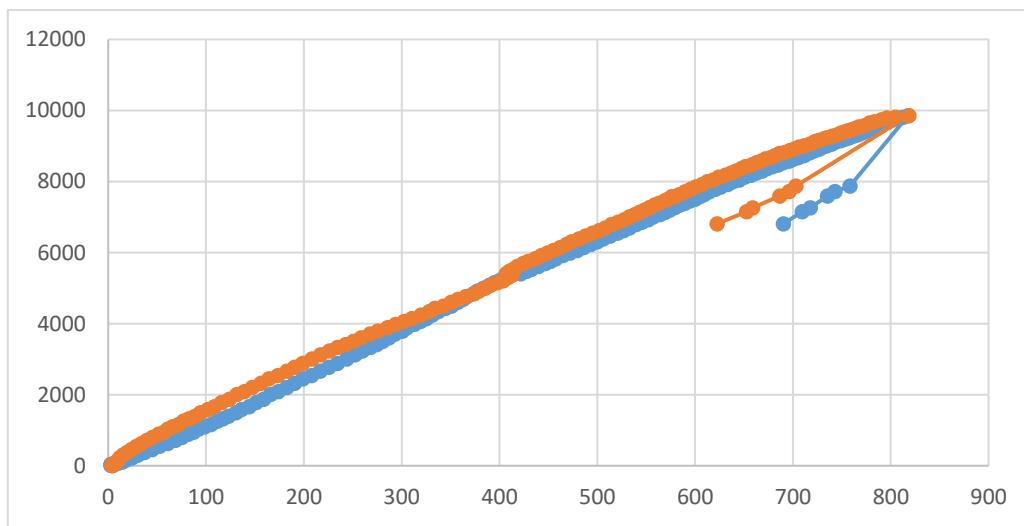
หลังจากที่มีการนำสเตรนเกจติดยังคอนกรีตเพื่อทำการวัดแรงที่ตกลงที่คอนกรีต เพื่อนำไปสู่การทราบค่าความเค้นที่วัสดุได้รับ ซึ่งความเค้นเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้าง โดยสเตรนเกจนั้นมีหลักการทำงานโดยเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ทางกลให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และให้สัญญาณเคลื่อนที่เข้าไปผ่านไปวงจรบริดจ์แบบวีตสโตน เพื่อใช้แสดงการทำงานของวงจรบริดจ์

ในการทดสอบครั้งนี้ จะทดสอบกับคอนกรีต 2 ชั้นโดยจะนำสเตรนเกจมาติดด้านข้างทั้งสองของชิ้น และจะติดตรงข้ามกัน ในการติดทั้ง 2 ด้านและติดตั้งข้ามกันนั้นเพื่อเป็นการศึกษาถึงแรงจากหัวกดที่ตัวคอนกรีตได้รับรวมไปถึงการศึกษาความเค้นคอนกรีตบริเวณดังกล่าวซึ่งข้อมูลที่ได้นั้นสามารถแสดงได้เป็นกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด

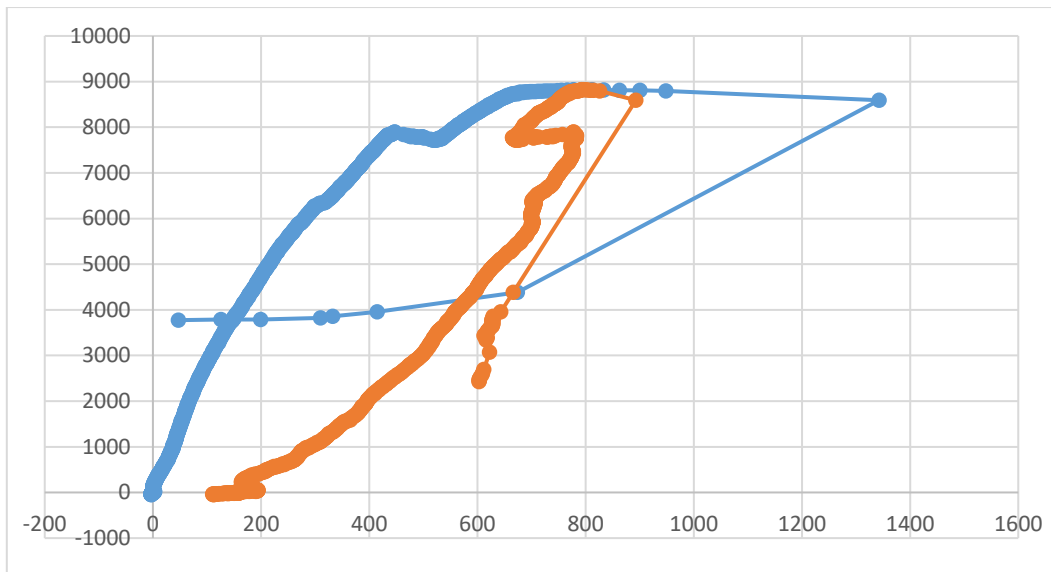
จากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เป็นแกน Y และความเครียดที่เป็นแกน X ของคอนกรีตชั้นที่ 1 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าเมื่อความเค้นในแกน Y มีค่าเพิ่มคือก็จะทำให้ความเครียดในแกน X มีค่าเพิ่มขึ้นตามเช่นกันเป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็นบวก เมื่อมีการให้แรงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่มีแรงกดประมาณ 1000 กิโลกรัม เส้นกราฟมีลักษณะที่ลู่ลง ค่าความเค้นที่แกน Y และค่าความเครียดที่แกน X ลดลง แสดงถึงว่าจุดนั้นมีค่ามีความแข็งแรงลดลงเมื่อถึงจุดนั้นจะทำการเลิกทดสอบความแข็งแรง เมื่อมาพิจารณารูปที่ 4.4 กราฟแสดงความเค้นในแกน Y และความเครียดในแนวแกน X ของคอนกรีตชั้นที่สอง เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าที่ใกล้ๆบริเวณจุดเริ่มต้นที่ยังไม่เริ่มมีการให้แรงกด มีแรงกดประมาณ 0 กิโลกรัม กราฟสีฟ้ามีความเครียดที่ประมาณ 0 แต่กราฟสีส้มมีความเครียดประมาณ 150 ซึ่งแสดงถึงค่าที่มีความต่างกัน และเมื่อมีการให้ความเค้นมากขึ้นไปเรื่อย ๆ ทั้งกราฟสีส้มและสีฟ้าค่อยๆมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 8000 กิโลกรัมพบว่าทั้งกราฟสีส้มและสีฟ้ามีความชันเป็น 0 และเมื่อทำการให้แรงเพิ่มไปอีกกราฟทั้งคู่ก็จะค่อย ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปพร้อมกัน และที่แรงประมาณ

9000 กิโลกรัม ทั้งกราฟสีส้มและสีฟ้ามีค่าความเค้นในแนวแกน Y และค่าความเครียดในแนวแกน X ที่ลดลง แสดงถึงความแข็งแรงมีการลดลงเมื่อถึงจุดนั้นจะเลิกทำการทดสอบ

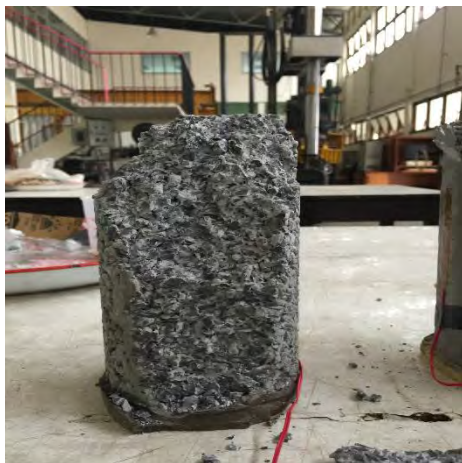
จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตชั้นที่ 1 แสดงดังในรูปที่ 4.3 เป็นกราฟเส้นตรงที่เมื่อเพิ่มความเค้นมากขึ้นและความเครียดก็จะเพิ่มตามแสดงถึงว่าพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตมีความเรียบเท่ากัน พื้นที่หน้าตัดได้รับแรงที่เท่ากันทำให้รอยแตกเกิดขึ้นตรงกลางของคอนกรีตสังเกตได้จากรูปที่ 4.5 (ก) และที่ 10000 กิโลกรัมจุดนั้นคือจุดที่ความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมีค่าลดลงแสดงถึงว่าจุดนั้นคือจุดคราก (Yield Point) และในภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตชั้นที่ 2 ในช่วงแรกที่มีการเพิ่มแรงกดที่น้อยพบว่าความเครียดของกราฟสีส้มและกราฟสีฟ้ามีค่าต่างกันมากแสดงถึงว่าพื้นที่หน้าตัดมีความไม่เท่ากัน โดยด้านกราฟสีส้มมีความสูงที่สูงกว่ากราฟสีฟ้า ทำให้พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตได้รับแรงที่ไม่เท่ากัน และเมื่อให้แรงกดไปมากเรื่อย ๆ จะทำให้ด้านที่สูงแตกหักก่อน สามารถสังเกตรอยแตกได้จากรูปที่ 4.5 (ข) และที่ 8000 กิโลกรัม กราฟทั้งสีส้มและสีฟ้ามีความชันที่ลดลง และเมื่อให้แรงต่อทั้งกราฟสีส้มและสีฟ้ามีการเพิ่มขึ้นไปในแนวโน้มทิศทางเดียวกัน เหตุเป็นเพราะส่วนที่สูงของคอนกรีตนั้นหักและเปรียบเสมือนเป็นการปรับผิวหน้าใหม่ ของคอนกรีตให้มีความเรียบเท่ากัน ส่งผลให้กราฟทั้งสีส้มและสีฟ้ามีการเพิ่มขึ้นที่พร้อมกันและที่ 9000 กิโลกรัม ความเค้นและความเครียดมีค่าลดลง แสดงถึงจุดครากของคอนกรีตชั้นที่ 2 ซึ่งทั้งรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงได้ว่าคอนกรีตที่นำมาทดสอบนั้นไม่พบสภาพพลาสติก (Plasticity) เนื่องจากกราฟของคอนกรีตที่แสดงนั้นเป็นกราฟเส้นตรง มีแนวโน้มที่พุ่งขึ้นอย่างเดียวและเส้นกราฟมีการหักลงเลยเมื่อถึงจุดครากของแต่ละก้อนของคอนกรีต



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตชั้นที่ 1



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตชั้นที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) รอยแตกของคอนกรีตชั้นที่ 1 (ข) รอยแตกของคอนกรีตชั้นที่ 2

จากการศึกษาขั้นต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุพูนที่มีการขึ้นรูปโดยใช้ตะกรันขนาดเล็กเป็นส่วนประกอบ จะมีค่าความแข็งแรงกดอัดที่มากกว่าวัสดุพูนที่ใช้ตะกรันขนาดใหญ่และขนาดผสมเป็นส่วนประกอบในการขึ้นรูป เนื่องจากตะกรันขนาดเล็กมีการจัดเรียงตัวกันแน่น แสดงถึงว่าขนาดของตะกรันที่ใส่ลงในส่วนผสมส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกดอัดของวัสดุพูน เมื่อมีการนำวัสดุพูนไปบ่มแบบนำวัสดุพูนไปแช่น้ำจะทำให้วัสดุพูนที่ค่าความแข็งแรงกดอัดที่มากกว่าการบ่มแบบนำผ้าเปียกชุ่มน้ำมาห่อวัสดุพูน ทั้งนี้มีการนำวัสดุพูนไปติดตั้งสเตรนเกจเพื่อศึกษาพฤติกรรมระหว่างการทดสอบความแข็งแรงกดอัดพบว่า ภายในวัสดุพูนไม่พบสมบัติสภาพพลาสติก ปัญหาในระหว่างการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงกดอัดนั้น จะต้องมีการนำแผ่นไม้มาลองบริเวณผิวหน้าของวัสดุพูนเนื่องจากมีความขรุขระ ไม่เรียบทำให้ผลที่ได้จากการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน และในการวัดค่าความแข็งแรงกดอัดนั้นไม่ได้มีการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเช่นกันดังนั้นในการวิเคราะห์ผลครั้งต่อไปควรมีการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งในการศึกษาขั้นต่อไปจะได้มีการปรับปรุงระเบียบวิธีทดสอบเพื่อแก้ปัญหาที่พบดังกล่าว

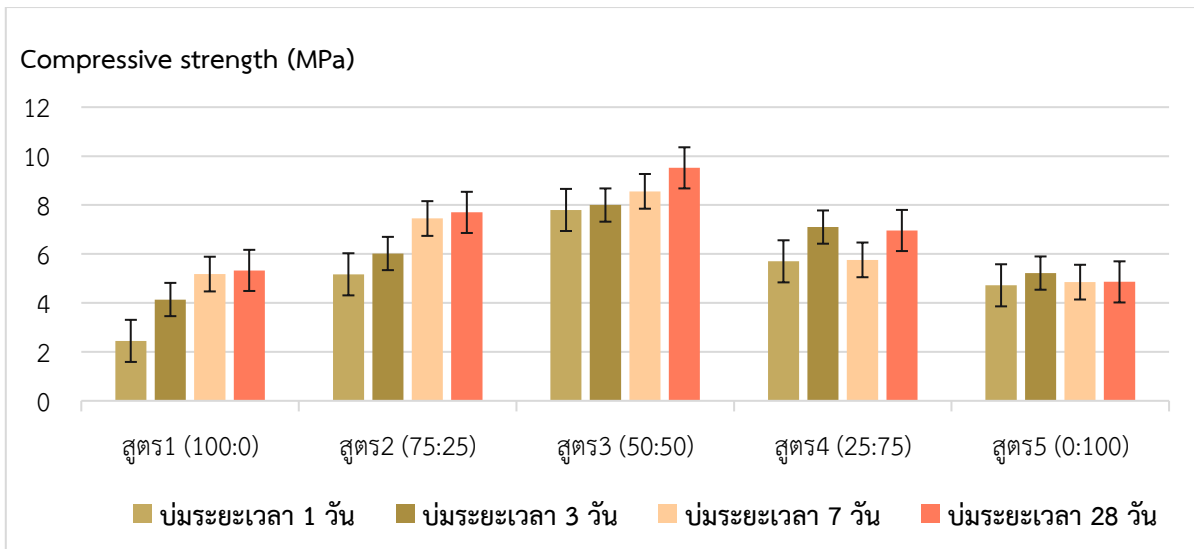
## 4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงกดอัด

### 4.2.1 ความแข็งแรงกดอัดของวัสดุพูนจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสม

จากกราฟแสดงค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกดอัดในแต่ละชั้นงานวัสดุพูนที่ทำจากตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้า โดยแต่ละสูตรนั้นจะมีระยะเวลาในการบ่มอยู่ 1 วัน 3 วัน 7 วัน และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.6 จากข้อมูลหลังการทดสอบค่าความแข็งแรงกดอัดพบว่าสูตร 3 หรือที่อัตราส่วนของตะกรันขนาดใหญ่ต่อตะกรันขนาดเล็กอยู่ที่ 50:50 มีความแข็งแรงสูงที่สุดในระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเท่ากับ 9.52 เมกะปาสคาล ค่าความแข็งแรงกดอัดที่ต่ำที่สุดพบว่าเป็นสูตร 1 หรือที่อัตราส่วนของตะกรันขนาดใหญ่ต่อตะกรันขนาดเล็กอยู่ที่ 100:0 อยู่ที่ 2.45 เมกะปาสคาล

ทั้งนี้หลังจากครบ 28 วันตามระยะเวลาการบ่มที่มีการกำหนดไว้นั้น เมื่อนำข้อมูลค่าความแข็งแรงกดอัดมาพิจารณานั้นพบว่า ระยะเวลาในการบ่มที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงกดอัดมีค่ามากขึ้นตามกันโดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่สูตร 3 ในระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน แสดงได้ว่าระยะเวลาในการบ่มนั้นส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของชั้นงานวัสดุพูนไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนของตะกรันขนาดเล็กที่มีปริมาณมากขึ้นจะพบว่าค่าความแข็งแรงกดอัดมีค่ามากขึ้นเช่นตามกัน เนื่องจากตะกรันขนาดเล็กมีอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้การจัดเรียงตัวของตะกรันแน่นและมีพื้นที่ภายในว่างน้อยจึงมีค่าความแข็งแรงกดอัดที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนของตะกรันขนาดใหญ่ต่อตะกรันขนาดเล็กอยู่ที่ 25:75 และ 0:100 (สูตร 4 และสูตร 5) พบว่าค่าความแข็งแรงกดอัดมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณรูพูนที่พบในสูตร 4 และสูตร 5 ที่มีปริมาณรูพูนเพิ่มมากขึ้น ผลทั้งหมดนี้เกิดเนื่องมาจากเมื่ออัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กที่เพิ่มมากขึ้น ตะกรันขนาดเล็กจะมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ทำให้เกิดปริมาณรูพูนเพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงกดอัดมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าขนาดและปริมาณของตะกรันที่ใส่ลงไปในส่วนผสมนั้นส่งผลต่อขนาด ลักษณะของรูพูนและการเชื่อมต่อของรูพูนซึ่งจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกดอัดที่เปลี่ยนตามไปด้วย แต่ในภาพรวมนั้นชั้นงานวัสดุพูนทำจากตะกรันเตาอาร์คไฟฟ้ามีค่าความแข็งแรงกดอัดอยู่ที่ 2.45-9.52 เมกะปาสคาล ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์วัสดุพูนทั่วไปกำหนดแต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่มีค่ายังต่ำอยู่ เนื่องจากค่าความแข็งแรงกดอัดของวัสดุพูนนั้นทั่วไปจะมีค่าความแข็งแรงอยู่ที่ 2.8-28 เมกะปาสคาล ดังนั้นถ้าหากมีการนำชั้นงานวัสดุพูนไปใช้ควรพิจารณาถึงบริเวณสถานที่และปริมาณแรงกดอัดที่ชั้นงานวัสดุพูนจะได้รับ ทั้งนี้จึงควรมีการศึกษาลักษณะ ขนาดและความเชื่อมต่อของรูพูนที่อยู่ภายในชั้นงานวัสดุพูนเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อเป็นการพัฒนาค่าความแข็งแรงกดอัดให้กับวัสดุพูนให้มีค่าที่มากขึ้น

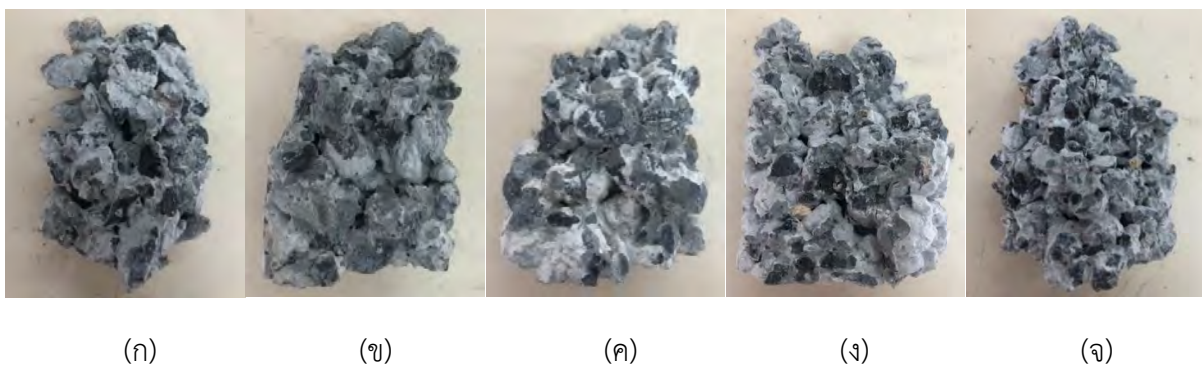




รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของวัสดุพูนจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสม

#### 4.2.2 ลักษณะการแตกของวัสดุพูนจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสม

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงรอยแตกที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทั้ง 5 สูตร หลังนำไปทดสอบวัดค่าความแข็งแรงกดอัดพบว่ารอยแตกในทุกสูตรนั้นมีทิศทางไปในทางเดียวกัน คือมีรอยแตกที่มีทิศทางผ่านกลางชิ้นงานวัสดุพูน สอดคล้องกับผลในขณะทำการทดสอบวัดค่าความแข็งแรงกดอัด มีการสังเกตการแตกของชิ้นงานพบว่าส่วนมากจะไม่มีเศษของชิ้นงานหลุดออกมาจากบริเวณด้านข้างของชิ้นงานในระหว่างการทดสอบ เมื่อไปหยิบชิ้นงานออกจากเครื่องทดสอบ ชิ้นงานจึงค่อยมีการแตกออกจากกัน แสดงให้เห็นว่าซีเมนต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานสามารถสร้างความแข็งแรงให้แก่ชิ้นงาน ยึดให้ตะกรันติดต่อกันได้อย่างแน่น แข็งแรง ไม่เกิดการหลุดได้ออกมาง่าย ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานที่ทำให้ซีเมนต์สามารถเคลือบที่ผิวของตะกรันได้อย่างทั่วถึงทำให้ตะกรันมีการยึดติดกันอย่างหนาแน่น

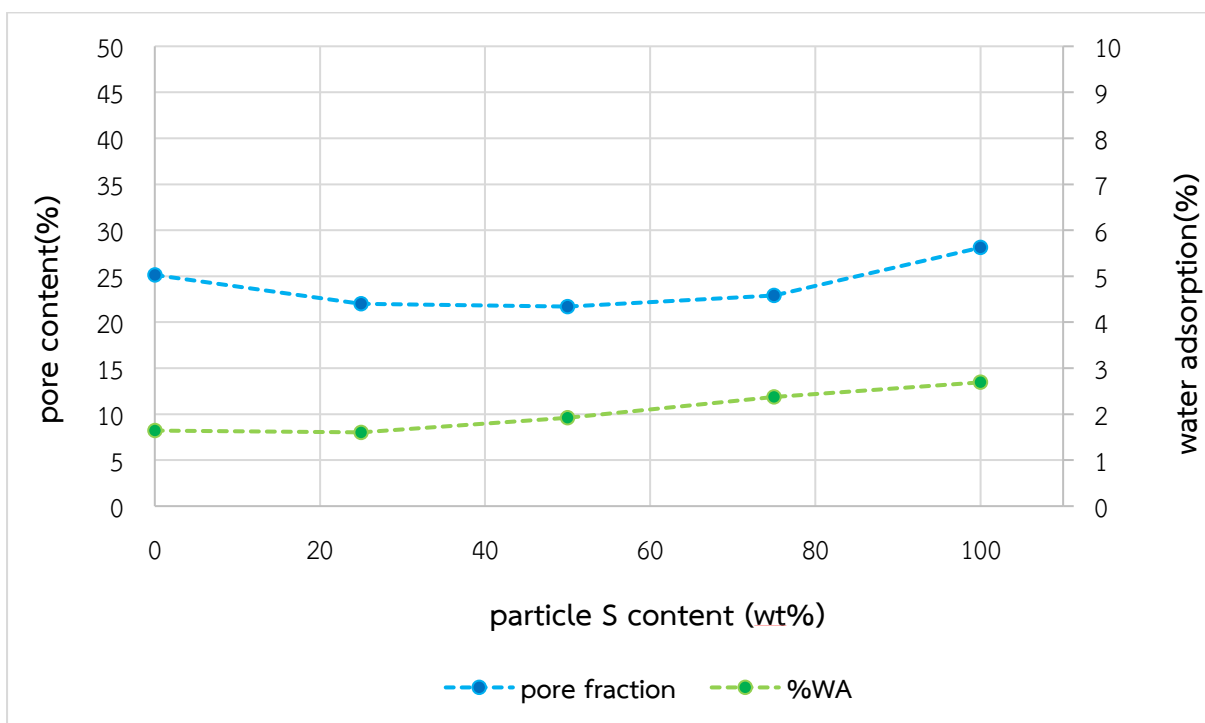


รูปที่ 4.7 ชิ้นงานที่แตกหัก (ก) อัตราส่วนผสม 100 : 0 (ข) อัตราส่วนผสม 75 : 25 (ค) อัตราส่วนผสม 50 : 50 (ง) อัตราส่วนผสม 25 : 75 (จ) อัตราส่วนผสม 0 : 100

### 4.3 ความพรุนตัวและความหนาแน่นของวัสดุพรุน

จากกราฟแสดงค่า pore content ซึ่งอยู่ภายในวัสดุพรุนที่ทำจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสมดังรูปที่ 4.8 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กส่งผลให้รูพรุนมีน้อยลงและลดลงต่ำสุดที่สูตร 3 หรือที่อัตราส่วนของตะกรันขนาดใหญ่ต่อตะกรันขนาดเล็กอยู่ที่ 50:50 โดยน้ำหนัก มีค่า pore fraction เท่ากับ 21.70 และค่า pore content ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่สูตร 4 และสูตร 5 หรืออัตราส่วน 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก จาก รูปที่ 4.8 แสดงกราฟค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุพรุนที่ทำจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสมดัง พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กจะส่งผลทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากตะกรันขนาดเล็กเมื่อเทียบกับตะกรันขนาดใหญ่ พบว่าจะมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า ส่งผลน้ำหรือของเหลวเกาะที่ผิวของตะกรันขนาดเล็กมากขึ้น ทำให้เมื่อมีตะกรันขนาดเล็กมากขึ้น จะทำให้มีค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้นตาม

จากข้อมูลทั้งหมดนั้นพบว่าเมื่อปริมาณอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณรูพรุนที่อยู่ภายในชิ้นงานวัสดุพรุนและค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุพรุนมีค่ามากขึ้นตามเช่นกัน แสดงได้ว่าปริมาณอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กส่งผลต่อปริมาณรูพรุนในชิ้นงานและค่าการดูดซึมน้ำ ในชิ้นงานวัสดุพรุนจะมีค่าปริมาณรูพรุนอยู่ที่ 21.70-28.11 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีที่มาตรฐานวัสดุพรุนได้กำหนดไว้อยู่ในช่วง 15-35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่ทั้งนี้ต้องมีการศึกษาขนาด และลักษณะของรูพรุนเทียบเคียงกับปริมาณรูพรุนเพิ่มไปด้วย



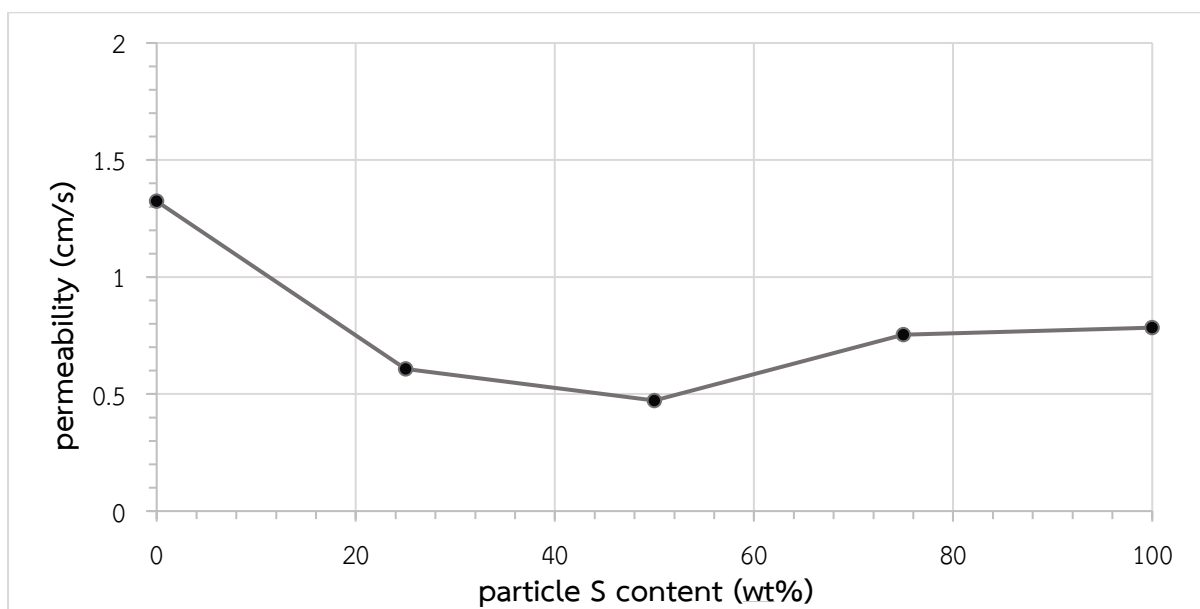
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง pore content และ water adsorption ของวัสดุพรุนจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า



#### 4.4 การไหลผ่านของน้ำของวัสดุพูน

จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการไหลซึมผ่านของน้ำของวัสดุพูนที่ทำจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสมดังรูปที่ 4.9 พบว่าสูตร 3 หรือที่มีอัตราส่วนของตะกรันขนาดใหญ่ต่อตะกรันขนาดเล็กอยู่ที่ 50:50 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าการไหลซึมผ่านของน้ำต่ำที่สุด มีค่าการดูดซึมผ่านของน้ำเท่ากับ 0.472566 เซนติเมตรต่อวินาที เนื่องจากความหนาแน่นของส่วนผสมในอัตราส่วนที่ 50:50 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่นมากและมีรูพูนในพื้นที่ภายในว่างน้อย จึงทำให้มีการไหลซึมผ่านน้ำน้อยกว่าอัตราส่วนผสมอื่น ๆ

หากนำรูปที่ 4.8 และ 4.9 มาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าการไหลซึมผ่านของสูตร 3 มีความสอดคล้องกับปริมาณรูพูนที่พบในชิ้นงานซึ่งเป็นสูตรที่พบรูพูนน้อยที่สุด ดังนั้นปริมาณอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กที่พบในชิ้นงานส่งผลต่อค่าการไหลซึมผ่านของน้ำ โดยเมื่อมีปริมาณอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กมากขึ้นจะทำให้ค่าการไหลผ่านของน้ำลดลง แต่เมื่อสังเกตสูตร 5 พบว่าสูตร 5 มีปริมาณรูพูนภายในชิ้นงานที่มากที่สุดแต่เมื่อดูผลค่าการไหลผ่านของน้ำพบว่าไม่ใช่มีค่าที่มากที่สุด เนื่องจากการไหลผ่านของน้ำในวัสดุพูนนั้นค่าการไหลผ่านของน้ำจะสัมพันธ์กับปริมาณรูและลักษณะของรูภายในวัสดุพูน สูตร 5 มีปริมาณรูพูนภายในชิ้นงานมากที่สุดแต่อาจจะลักษณะรูหรือความเชื่อมต่อของรูที่ไม่เหมาะสมเลยส่งผลให้มีค่าการไหลผ่านของน้ำที่ไม่สัมพันธ์กัน ชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นนั้นมีค่าการไหลผ่านของน้ำอยู่ที่ 0.47-1.32 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งถือว่ามีค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานวัสดุพูนกำหนดไว้ซึ่งอยู่ในช่วง 0.14-1.22 เซนติเมตรต่อวินาที แต่ควรต้องมีการศึกษาลักษณะขนาดและความเชื่อมต่อของรูพูนที่อยู่ภายในชิ้นงานวัสดุพูนเทียบเคียงไปด้วยเพื่อเป็นการพัฒนาค่าการไหลผ่านของน้ำในชิ้นงานวัสดุพูนให้ดีขึ้น



รูปที่ 4.9 การไหลซึมผ่านของน้ำของวัสดุพูนจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า

ในด้านการเลือกวัสดุพุนไปใช้งานในชีวิตประจำวันเพื่อให้วัสดุพุนนั้นมีประสิทธิภาพนั้นต้องพิจารณาถึงบริเวณที่นำวัสดุพุนไปใช้ ปริมาณน้ำที่ต้องการระบาย ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงลักษณะแรงและปริมาณของแรงที่วัสดุพุนจะต้องรับการกระทำ เนื่องจากถ้าหากเลือกใช้วัสดุพุนที่มีค่าการไหลผ่านของน้ำที่มาก มีปริมาณพุนภายในชิ้นงานมากส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีการระบายน้ำที่ดีแต่จะทำให้บริเวณนั้นมีความแข็งแรงที่ต่ำอาจจะเกิดความชำรุดได้ง่ายส่งผลเสียต่อบริเวณที่ใช้งานและเสียค่าบำรุงรักษา แต่ถ้าหากเลือกใช้วัสดุพุนที่มีความแข็งแรงมากจะทำให้บริเวณดังกล่าวทนรับแรงกระแทกได้ดี แต่อาจจะทำให้มีการระบายน้ำที่ไม่ค่อยได้มากเนื่องจากมีปริมาณพุนที่ต่ำ ดังนั้นต้องมีการศึกษาข้อมูลค่าความแข็งแรงกอดอัด ความพุนตัว และค่าการไหลผ่านของน้ำในวัสดุพุนด้วยเนื่องจากค่าเหล่านี้มีความสัมพันธ์กัน อีกทั้งค่าเหล่านี้ต้องสัมพันธ์กับการนำไปใช้งานด้วยเพื่อให้วัสดุพุนมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากที่สุด

#### 4.5 ปัญหาที่พบ

- ในขณะที่ทำการขึ้นรูปคอนกรีตไม่ได้มีการปรับผิวหน้าให้มีความเท่ากันและการอัดที่แน่นเกินไป ส่งผลให้เมื่อนำไปวัดค่าความแข็งแรง ผิวหน้าของคอนกรีตได้รับแรงไม่เท่ากันส่งผลถึงกราฟที่แสดงออกมาและความแข็งที่ได้จากคอนกรีตอาจจะมีค่าที่คลาดเคลื่อน  
แก้ไข : ในขั้นตอนขึ้นรูปคอนกรีต ต้องทำการปาดผิวหน้าให้เรียบและเท่ากันมากที่สุด
- ตะกรันมีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ทำให้ส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตที่ได้หลังจากการแข็งตัว  
แก้ไข : จัดหาแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีขนาดที่เหมาะสมของการขึ้นรูปตะกรันที่มีขนาดใหญ่
- เมื่อคอนกรีตมีการแข็งตัว ไม่ได้ไปทำการหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ความแข็งแรงที่วัดออกมาได้มีความคลาดเคลื่อน  
แก้ไข : นำชิ้นงานคอนกรีตพุนเข้าไปอบอยู่ในตู้อบ 60 องศาเซลเซียสก่อนเพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากนั้นจึงนำไปวัดค่าความแข็ง
- ในขณะที่ทำการขึ้นรูปคอนกรีตไม่ได้มีการปรับผิวหน้าให้มีความเท่ากัน ทำให้เมื่อนำไปวัดค่าความแข็งแรง ผิวหน้าของคอนกรีตได้รับแรงไม่เท่ากันส่งผลถึงกราฟที่แสดงออกมาและความแข็งที่ได้จากคอนกรีตอาจจะมีค่าที่คลาดเคลื่อน  
แก้ไข : ในขั้นตอนขึ้นรูปคอนกรีต ต้องทำการปาดผิวหน้าให้เรียบและเท่ากัน

## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเรื่อง การเตรียมและลักษณะสมบัติของวัสดุพูนที่ทำจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติและโครงสร้างของตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้ในงานต่าง ๆ และ ปรับปรุงสมบัติและพัฒนาคุณภาพของวัสดุพูนที่มีโครงสร้างทำมาจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า ได้แก่ ความแข็งแรง ความสามารถในการระบายน้ำ และความพรุนตัว โดยในงานวิจัยนี้จะมีการทดสอบสมบัติของชิ้นงาน ได้แก่ ความแข็งแรงกดอัด ความพรุนตัวและการไหลผ่านของน้ำ โดยการทดลองเสร็จสมบูรณ์ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้

#### 5.1 สรุปผล

ชิ้นงานวัสดุพูนที่ขึ้นรูปมานั้นมีปริมาณรูพูน ลักษณะรูพูนและการใส่วัสดุดิบที่เติมลงไป ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดและปริมาณของตะกรัน ส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน อีกทั้งอัตราส่วนของตะกรันขนาดใหญ่ต่อตะกรันขนาดเล็กมีผลต่อสัดส่วนรูพูน และการดูดซึมน้ำของชิ้นงานพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานที่มีอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กเพิ่มขึ้นและมีพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนตะกรันขนาดเล็กที่เพิ่มมากขึ้น แต่การมรูพูนมากไม่ได้แสดงถึงการไหลผ่านของน้ำจะมีค่าที่ดี เนื่องจากการไหลผ่านของน้ำจะแปรผันตามปริมาณรูพูนและโครงสร้างของรูพูน

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการขึ้นรูปชิ้นงานนั้นควรมีการอัดด้วยแรงที่ทำให้การอัดในทุกชิ้นงานนั้นมีค่าคงที่ จะได้ไม่ส่งผลต่อค่าที่คลาดเคลื่อนมาก อีกทั้งควรมีการปรับผิวหน้าชิ้นงานให้มีความเรียบที่เท่ากันทำให้เวลานำชิ้นงานไปวัดความแข็งแรงจะได้ค่าที่ไม่คลาดเคลื่อน

จากการทดสอบพบยังไม่มีการนำชิ้นงานทั้ง 5 สูตรไปวิเคราะห์เพื่อดูลักษณะและขนาดรูพูนที่มีอยู่ภายในชิ้นงาน ดังนั้นจึงควรมีการนำชิ้นงานไปทดสอบเพื่อตรวจดูลักษณะ ปริมาณ ขนาด และความเชื่อมต่อของรูพูน เนื่องจากสมบัติการซึมผ่านของน้ำนั้นจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของรูพูนและความต่อเนื่องของรูพูน เมื่อเราวิเคราะห์จะได้มีข้อมูลที่สามารถนำไปปรับใช้พัฒนากับชิ้นงานที่ทดสอบขึ้นมาได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2563. ตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้าและตะกรันจากเตา  
อุ้นน้ำเหล็ก. (22 เมษายน 2563). <http://www.dpim.go.th/>
- [2] ฉัตรชัย จันทนา และคณะ. 2554. การศึกษาเพื่อพัฒนาความสามารถในการระบายน้ำของวัสดุปู  
พื้นหินล้างคอนกรีตพรุน. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลรัตนโกสินทร์, นครปฐม:มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์; หน้า 78-86.
- [3] นภาพร อรุณเกียรติก้อง. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กรณีศึกษา : อุตสาหกรรมเหล็ก และ  
อุตสาหกรรมตะกั่ว. (24 เมษายน 2563).  
<http://www1.dpim.go.th/dt/pper/000001262917909.pdf>
- [4] บริษัท ANES – Thailand จำกัดมหาชน (ANES (THAILAND) CO., LTD.). 2560. ตะกรัน คือ  
อะไร ?. (20 เมษายน 2563).  
<https://www.facebook.com/1618665568147013/posts/1706419889371580/>.
- [5] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. มปป. ตะกรัน. (17 เมษายน 2563).  
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0340/fouling>.
- [6] ไพบุรณ์ แยมเผื่อน และคณะ. 2555. การศึกษาอิทธิพลของซีตะกรันอลูมิเนียมจากโรงหล่อที่มีผลต่อ  
สมบัติของวัสดุผสมพอลิเมอร์-พื้นหลักพอลิพรอพิลีน. (25 เมษายน 2563).  
<http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/handle/123456789/2111>.
- [7] ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร. Porous Materials?. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. 2554;1:61-69.
- [8] ยุวดี หิรัญ และคณะ. บล็อกปูถนนคอนกรีตพรุน. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี  
ครั้งที่ 4. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ, สกลนคร; 2551. หน้า 1.
- [9] สมาคมธุรกิจรับสร้างบ้าน. 2560. คอนกรีตพรุน (Porous Concrete) คอนกรีตที่เป็นมิตรกับ  
สิ่งแวดล้อม. (24 เมษายน 2563). [https://www.hba-th.org/บ้านน่ารู้/  
คอนกรีตพรุน-porous-concrete-คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม](https://www.hba-th.org/บ้านน่ารู้/คอนกรีตพรุน-porous-concrete-คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม)
- [10] สัจจะชาญ พรัดมะลิ และคณะ. 2559. การใช้เทคโนโลยีสำหรับชุมชนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกปู  
พื้นลดอุณหภูมิจากเศษหินพัมมิช. (25 เมษายน 2563).  
[https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle  
/123456789/2219/ENG\\_60\\_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/2219/ENG_60_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- [11] อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ และประพัฒน์ สีใส. 2558. วัสดุปูพื้นภายนอกอาคารจากขยะอุตสาหกรรม  
ประเภทกากตะกรันเหล็ก. (25 เมษายน 2563).  
[http://repository.rmutr.ac.th/bitstream/handle  
/123456789/489/Fulltext.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repository.rmutr.ac.th/bitstream/handle/123456789/489/Fulltext.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

- [12] Alenka Rastovčan- Mioč, Tahir Sofilić, Boro Mioč. APPLICATION OF ELECTRIC ARC FURNACE SLAG [ Metallurgical Faculty, Aleja narodnih heroja 3, 44 103 Sisak , CMC Sisak d.o.o., Braće Kavurić 12, 44 010 Sisak and The Town of Sisak, Rimska ulica 26, 44 000 Sisak]. Sisak : University of Zagreb 2552.
- [13] Australasian (iron & steel) Slag Association. มปป. Electric Arc Furnace (EAFS). (22 เมษายน 2563). <https://www.asa-inc.org.au/products/electric-arc-furnace-slag>
- [14] Flora Faleschini, Katya Brunelli, Mariano Angelo Zanini, Manuele Dabala`, Carlo Pellegrino. 2559. Electric Arc Furnace Slag as Coarse Recycled Aggregate for Concrete Production. Thematic section 2:44-50
- [15] HydroCon Australasia Pty Ltd. 2559. HydroSTON. (24 เมษายน 2563). <https://hydroston.com.au/specifications/>
- [16] Rainbow Nursery. 2559. ตะกรันคืออะไร. (17 เมษายน 2563). <http://www.rainbow-youchien.com/uncategorized/ตะกรันคืออะไร/>.
- [17] K. Čosic , L. Korat, V. Ducman and I. Netinger. 2558. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete, Construction and Building Materials (pp. 69–76)
- [18] ACI committee 522. 2553. Report on pervious concrete, (pp. 9–20)
- [19] MATSUNAGA Hisahiro, TANISHIKI Kazuho and TSUZIMOTO Kazuhito. 2552. Environment-Friendly Block, “Ferroform,” Made from Steel Slag, JFE TECHNICAL REPORT No.13
- [20] Guofang Zhang and Min Wu. 2563. Mechanical strengths and durability properties of pervious concretes with blended steel slag and natural aggregate, Journal of Cleaner Production

ภาคผนวก

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า

ส่วนประกอบทางเคมี	สัญลักษณ์	ปริมาณ, ร้อยละโดยน้ำหนัก
Wuestite	FeO	34.341
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	24.637
Larnite	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	9.218
C3S monoclinic (NISHI)	-	17.360
Brownmillerite	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7.048
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	4.675
Akermanite	Ca <sub>2</sub> Mg(Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	2.359
Lime	CaO	0.359

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุพูนที่มีวิธีการบ่มที่แตกต่างกันในการศึกษา

Preliminary study

วิธีการบ่ม	บ่มระยะเวลา 3 วัน	บ่มระยะเวลา 7 วัน
ห่อผ้าเปียก	N/A	3.98
	4.77	6.96
	1.99	6.96
เฉลิย	3.38	5.97
แช่น้ำ	11.93	5.97
	N/A	10.94
	N/A	6.96
เฉลิย	11.93	7.95

ตารางที่ 4 ความแข็งแรงของวัสดุพูนจากเตาอาร์คไฟฟ้าในแต่ละอัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสม	ค่าความแข็งแรงต่อแรงกด (MPa)				
	บ่มระยะเวลา 1 วัน	บ่มระยะเวลา 3 วัน	บ่มระยะเวลา 7 วัน	บ่มระยะเวลา 14 วัน	บ่มระยะเวลา 28 วัน
100 : 0	2.45±0.7	4.41±0.83	5.18±0.86	5.21±0.97	5.33±0.87
75 : 25	5.17±1.78	6.02±1.82	7.45±0.85	9.27±1.46	7.7±1.69
50 : 50	7.8±2.33	8.00±2.94	8.56±2.19	7.39±1.15	9.52±1.82
25 : 75	5.7±1.05	7.10±1.78	5.76±0.59	6±1.24	6.96±1.82
0 : 100	4.72±1	5.22±0.6	4.85±0.67	5.09±0.74	4.86±1.09

ตารางที่ 5 ความพรุนตัวและความหนาแน่นของวัสดุพูนจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า

อัตรา ส่วนผสม	น้ำหนัก (g)				water adsorption	pore fraction
	ก่อนแช่ใน อากาศ	หลังแช่ใน อากาศ	แช่ในน้ำ	น้ำในรูพูน		
100 : 0	3878.6	3942.3	2288.6	63.7	1.642345176	25.13
75 : 25	4431.3	4502.4	2679.4	71.1	1.604495295	22.00
50 : 50	4155.7	4235.6	2532.4	79.9	1.922660442	21.70
25 : 75	4394.2	4498.6	2669.4	104.4	2.375859087	22.91
0 : 100	4056.3	4165.5	2355	109.2	2.692108572	28.11

ตารางที่ 6 การไหลซึมผ่านของน้ำของวัสดุพูนจากตะกรันจากเตาอาร์คไฟฟ้า

อัตรา ส่วนผสม	Q (cm <sup>3</sup> )	L (cm)	H (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	t (s)	K (cm/s)
100 : 0	2000	18.73	13.43	90.01248	23.40667	1.323882
75 : 25	2000	19.6	13.43	93.52208	51.38	0.607438
50 : 50	2000	18.37	13.43	92.26906	62.74	0.472566
25 : 75	2000	19.43	13.43	91.53261	41.94667	0.753622
0 : 100	2000	19.37	13.43	90.79911	40.53	0.783836