

การพัฒนาคอนกรีตพรุนจากส่วนโลหะที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ Development of pervious concrete with non-metallic part from recycling of printed circuit boards as constituent

กชกร ศรีวัฒนกุล¹, สุพัต ควรพงษ์กุล², เปรมฤดี กาญจนปิยะ³ และ จักรพันธ์ เทือกดี⁴

^{1,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมและพิษวิทยา

³ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

*Corresponding author; E-mail address: kotchakorn.sriv@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ส่วนโลหะ (Non - Metallic Part, NMP) จาก การรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นมวลรวมละเอียดเพื่อแทนที่มวลรวม ละเอียดธรรมชาติในการผลิตคอนกรีตพรุนที่ 10% , 20% , 30% , 40% และ 50% ของน้ำหนักมวลรวมละเอียดธรรมชาติ และใช้มวลรวมหยาบ 2 ช่วงขนาด คือ 4 – 8 มิลลิเมตร และ 8 – 16 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาคุณสมบัติ ทางกลและการซึมผ่านน้ำ เปรียบเทียบกับคอนกรีตพรุนทั่วไป จาก การศึกษาพบว่าเมื่อใส่ส่วนโลหะแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนทำให้มี กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นได้ถึง 89 % เมื่อเทียบกับคอนกรีตพรุนที่แทนที่ด้วย มวลรวมละเอียดธรรมชาติ เนื่องจากผงโลหะมีขนาดเล็กจึงเข้าไปแทนที่รู พรุนทำให้มีความพรุนลดลง และเมื่อรูพรุนของคอนกรีตนั้นลดลงจึงทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตลดลงไปด้วย โดยปริมาณส่วนโลหะแทนที่ มวลรวมละเอียดที่เหมาะสม คือ 40% ในมวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร และ 20 % ในมวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร ของน้ำหนักมวลรวม ละเอียด

คำสำคัญ: คอนกรีตพรุน , การซึมผ่านน้ำ , กำลังรับแรงอัด , ผงโลหะ

Abstract

This research studied the use of Non - Metallic Part (NMP) from recycling of printed circuit boards as fine aggregate to partially replace natural fine aggregate in pervious concrete production at 10% , 20% , 30% , 40% and 50% by weight. Two sizes of coarse aggregate were 4 – 8 mm and 8 – 16 mm, to study mechanical property and permeability of pervious concrete compared with conventional pervious concrete. The result indicated that the compressive strength of only pervious concrete with NMP replacement increased as much as 89% when compared to conventional pervious concrete with fine

aggregate because small-sized NMP filled in pore in concrete. In addition, when the porosity decreased, the permeability of concrete decreased as well. The optimal amounts of NMP replacement were 40% for aggregate size 4 – 8 mm and 20% for aggregate size 8 – 16 mm by fine aggregate weight.

Keywords: Pervious Concrete , Permeability , Compressive Strength , NMP

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะเทคโนโลยีเพื่อการสื่อสาร ความก้าวหน้าของอุปกรณ์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารพัฒนาอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบสนองความต้องการด้านต่าง ๆ ของผู้ใช้ปัจจุบัน ที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทุกปี และเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านั้นไม่สามารถใช้งานได้จึงกลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ (E-waste) ซึ่งขยะอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ไม่สามารถกำจัดได้ง่าย จะกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมหากขยะเหล่านี้ไม่ได้รับการกำจัดอย่างเหมาะสม เช่น การกำจัดโดยวิธีฝังกลบหรือเผาไหม้ทำให้สารพิษหลายชนิดที่อยู่ในขยะอิเล็กทรอนิกส์รั่วไหลลงสู่สิ่งแวดล้อม เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศทั้งในระยะสั้นและระยะยาว รวมถึงส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน

แผงวงจรไฟฟ้า (Printed Circuit Boards , PCB) เป็นส่วนสำคัญของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เกือบทั้งหมด ใช้ในการสนับสนุนทางกลและเชื่อมต่อชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ทางไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของ PCB ได้แก่ ส่วนที่เป็นโลหะ 28 – 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนที่เป็นโลหะหลัก ๆ คือ ทองแดง ประมาณ 10 – 20 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนที่เป็นโลหะ (Non - Metallic Part, NMP) ประมาณ 70 – 72 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก [1] หลังจากกระบวนการรีไซเคิลในส่วนที่เป็นโลหะนั้นยังคงเหลืออยู่โดยประกอบด้วย เส้นใยแก้ว เรซิน เซรามิก สารหน่วงไฟโพลีเมต และสารเติมแต่งอื่น ๆ [1, 2] กระบวนการรีไซเคิล PCB นั้นสามารถแบ่งได้

เป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ 1. การปรับสภาพและการถอดแยกชิ้นส่วน โดยวิธี Shredding , Electrostatic , Supercritical extraction และ Pyrolysis 2. การลดขนาดและการคัดแยก 3. การรีไซเคิล [3, 4] เศษของ PCB จะถูกบดเป็นอนุภาคและโลหะมีค่าต่าง ๆ จะถูกคัดแยกออกโดยโต๊ะสั่นเขย่า หลังจากกระบวนการรีไซเคิลจะมีวัสดุตกค้างที่ไม่มีมูลค่าหรือส่วนที่เป็นโลหะประมาณ 60 – 70 เปอร์เซ็นต์ [5] ปริมาณและคุณภาพของโลหะและส่วนที่เป็นโลหะจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับ PCB และกระบวนการรีไซเคิล

คอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตชนิดพิเศษที่มีช่องว่างอย่างต่อเนื่อง คอนกรีตพูนประกอบไปด้วย ซีเมนต์ , น้ำ , มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดในปริมาณที่จำกัดหรือไม่มีมวลรวมละเอียด [6, 7] ดังแสดงในรูปที่ 1 และอาจมีส่วนผสมเพิ่ม เช่น สารลดน้ำพิเศษ สารผสมเพิ่ม หรือวัสดุเพิ่มเข้าไปเล็กน้อย ร่วมกับการใช้มวลรวมขนาดเล็กทำให้คอนกรีตพูนมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 50 เมกะปาสกาล [8] โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตพูนจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นตัวหลักในการเชื่อมประสาน เมื่อเพิ่มปริมาณซีเมนต์จะทำให้การทำงานได้ของคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นและการบดอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นด้วย [9] โดยสามารถใช้วัสดุเสริมซีเมนต์ เช่น ฝ้ายลอย , ฝ้ายตะกรัน และซิลิกาฟูม เสริมเข้าไปในซีเมนต์ได้ [6] คอนกรีตพูนนั้นมีน้ำหนักเบา เนื่องจากมีปริมาณช่องว่างทั้งหมดประมาณ 15 – 35 % โดยรูพูนมีขนาดประมาณ 2 - 8 มิลลิเมตร และมีกำลังรับแรงอัดประมาณ 2.8 - 28 เมกะปาสกาล ส่วนการซึมไหลผ่านของน้ำนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของมวลรวมและความหนาแน่นของส่วนผสม แต่โดยทั่วไปแล้วมีอัตราการซึมไหลผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 0.14 - 1.22 เซนติเมตร/วินาที [6] คอนกรีตพูนมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) อยู่ในช่วง 0.26 - 0.40 [6] อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์นั้นมีความสำคัญมากเนื่องจากคอนกรีตพูนมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป [10] คอนกรีตพูนจะใช้ขนาดมวลรวมหยาบเป็นมวลรวมหยาบขนาดเดียว (Single size) หรือมวลรวมหยาบที่เป็นมีลักษณะเป็นขนาดคละอยู่ในช่วง 9.5 - 19 มิลลิเมตร [6] โดยอัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์ที่ใช้นั้นอยู่ในช่วง 4 : 1 ถึง 6 : 1 เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปแล้วพบว่าคอนกรีตพูนจะมีปริมาณของมวลรวมอยู่ประมาณ 50 – 65% โดยมีอัตราส่วนสารเชื่อมประสานต่อมวลรวมอยู่ในช่วง 0.22 – 0.25 โดยปริมาตรของมวลรวม [9] คอนกรีตพูนนั้นควรจะออกแบบให้มีส่วนผสมที่สมดุล โดยให้มีความการซึมผ่านน้ำและกำลังรับแรงอัดเป็นที่ยอมรับได้ [11]

จากปัญหาขยะอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวการรีไซเคิลเป็นหนึ่งในวิธีที่ดีที่สุดในการรักษาสິงแวดล้อมและทำให้เกิดผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจ ส่งผลให้ผู้วิจัยมีแนวคิดและความสนใจที่จะศึกษาการนำขยะอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนที่ไม่มีมูลค่าหรือส่วนที่เป็นโลหะ (Non – Metallic Part , NMP) มาทำให้เกิดประโยชน์ โดยนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียดทางธรรมชาติบางส่วนในการผลิตคอนกรีตพูน เพื่อเป็นทางเลือกในการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

P	Porosity	15 % – 35 %
w/b	Water	0.26 – 0.40
B	Binder	0.18 – 0.24
	Fill Aggregate	0 % – 20 %
A	Coarse Aggregate	

รูปที่ 1 ส่วนประกอบของคอนกรีตพูน

2. การทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement, OPC) และน้ำ เป็นตัวเชื่อมประสานของคอนกรีตพูน และใช้ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยมวลรวมละเอียดนั้นมีปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมด มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 (0.60 มิลลิเมตร) และค้างตะแกรงเบอร์ 50 (0.30 มิลลิเมตร) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.65 ส่วนมวลรวมหยาบที่ใช้มีทั้งหมด 2 ขนาด คือ 4 – 8 มิลลิเมตร และ 8 – 16 มิลลิเมตร โดยมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7 ศึกษาผลกระทบของ NMP โดยการแทนที่มวลรวมละเอียดที่ 10% , 20% , 30% , 40% และ 50% โดยน้ำหนัก ด้วยผง NMP ที่ได้มาจากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลังจากกำจัดทองแดงออกแล้ว จากโรงงานรีไซเคิลในประเทศไทยดังรูปที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นออกไซด์ใน NMP โดยการใช X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) แสดงไว้ดังตารางที่ 1 มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 50 ไมครอน และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.82



รูปที่ 2 ผงโลหะ (NMP)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของ NMP

Oxide composition	Results (%)
SiO ₂	22.5
CaO	9.91
Al ₂ O ₃	7.37
CuO	0.703
BaO	0.400
Fe ₂ O ₃	0.151
SO ₃	0.181
P ₂ O ₅	0.219
MgO	0.231
TiO ₂	0.188
Other	0.362

จากตารางที่ 1 พบว่าส่วนประกอบที่เป็นออกไซด์หลักในผง NMP คือ SiO₂ ซึ่งมาจากเส้นใยแก้วใน PCB และอาจมีสารอื่น ๆ ที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้มีการรายงานด้วยว่าพอลิเมอร์ใน NMP เป็นเทอร์โมเซตเรซินที่แต่งเติมด้วยสารหน่วงไฟประเภทโบรมีน [12] จึงต้องผ่านกระบวนการที่เหมาะสมก่อนนำมาใช้

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมของคอนกรีตพูนในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2 มีการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วย NMP 10% , 20% 30% , 40% และ 50% โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และอัตราส่วนมวลรวมต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.30 และ 5.48 : 1 ตามลำดับ เนื่องจากคอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียดหรือมีในปริมาณที่น้อยมาก ดังนั้นขั้นตอนการผสมคอนกรีตพูนเริ่มจากการผสมแห้งก่อนโดยการผสมซีเมนต์และมวลรวมละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นจึงเริ่มใส่ส่วนผสมที่เปียกลงไป โดยเริ่มจากการผสม NMP ลงไปโดยการทำให้ NMP กระจายตัวให้เป็นเนื้อเดียวกับส่วนผสมก่อนหน้า ต้องระวังไม่ให้ NMP จับตัวกันเป็นก้อน จากนั้นใส่มวลรวมหยาบลงไปแล้วผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 60 วินาที หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ เติมน้ำเข้าไปในส่วนผสมโดยใช้เวลาในการผสมเป็นเวลา 120 วินาที ลักษณะส่วนผสมคอนกรีตพูนที่ได้จะมีเพสต์เคลือบผิวมวลรวมดีและคอนกรีตที่ได้จะมีความเหนียวคล้ายคอนกรีตที่มีความชื้นมาก ๆ ที่เรียกว่าคอนกรีตไม่มีค่ายุบตัว (Zero Slump) จากนั้นนำส่วนผสมใส่ในแบบหล่อ แล้วทำการบดอัดตัวอย่างโดยใช้แท่งเหล็กกระทุ้งทั้งหมด 3 ชั้น ชั้นละ 25 ครั้ง จากนั้นคลุมตัวอย่างด้วยพลาสติกเป็นเวลา 1 วัน แล้วถอดแบบ และนำไปบ่มคอนกรีตในน้ำตามเวลาที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3 ตัวอย่างคอนกรีตพูนที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัด

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตพูน

ลำดับที่	Mix	W/C	ซีเมนต์ (kg)	น้ำ (kg)	หิน (kg)	ทราย (kg)	NMP (kg)
1	NPC-0-L	0.3	235	74	1364	149	0
2	NPC-10-L	0.3	235	74	1364	134	15
3	NPC-20-L	0.3	235	74	1364	119	30
4	NPC-30-L	0.3	235	74	1364	104	45
5	NPC-40-L	0.3	235	74	1364	89	60
6	NPC-50-L	0.3	235	74	1364	74	75
7	NPC-0-S	0.3	235	74	1364	149	0
8	NPC-10-S	0.3	235	74	1364	134	15
9	NPC-20-S	0.3	235	74	1364	119	30
10	NPC-30-S	0.3	235	74	1364	104	45
11	NPC-40-S	0.3	235	74	1364	89	60
12	NPC-50-S	0.3	235	74	1364	74	75

* NPC = Pervious Concrete with NMP

ตัวเลข = ปริมาณ NMP (%)

L = ขนาดของมวลรวมหยาบ 8 - 16 มิลลิเมตร

S = Small ขนาดของมวลรวมหยาบ 4 - 8 มิลลิเมตร

2.3 ความหนาแน่นและความพรุน

หาความหนาแน่นของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วตามมาตรฐาน ASTM C1754 [13] ที่อายุ 7 วัน โดยชั่งน้ำหนักของคอนกรีต (M_d) และทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง เมื่อคำนวณปริมาตรของตัวอย่าง (V) โดยความหนาแน่นของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วหาได้จาก M_d/V และหาความพรุนของคอนกรีตที่ 28 วัน โดยทำการแช่ตัวอย่างลงในน้ำเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่จมอยู่ใต้น้ำ (M_w) คำนวณความพรุนของคอนกรีตได้จากสมการที่ 1

$$\phi = 1 - \frac{M_d - M_w}{\rho_w V} \quad (1)$$

โดย ϕ คือ ความพรุน (%) และ ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

2.4 กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

หากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันตามมาตรฐาน ASTM C39 [14] โดยคอนกรีตที่ทำการทดสอบจะเป็นทรงกระบอกขนาด 100×200 มิลลิเมตร ทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวกดที่อัตรา 0.1 mm/sec



รูปที่ 5 ตัวอย่างคอนกรีตพรุนที่ใช้ในการทดสอบการซึมผ่านน้ำ

2.5 อัตราการซึมผ่านน้ำ

หาอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพรุนตามมาตรฐาน ASTM C1701 โดยวิธี Constant head ทำการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ทดสอบและตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยทำการห่อหุ้มตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 100×100 มิลลิเมตร ไว้เพื่อที่จะให้น้ำไหลผ่านได้ตามแนวตั้งเท่านั้น โดยไม่มีการสูญเสียน้ำไปทางด้านข้าง จากนั้นนำตัวอย่างติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบ แล้วปล่อยน้ำเข้าเครื่องทดสอบไหลผ่านตัวอย่างและไหลไปสู่อีกฝั่งไล่ฟองอากาศจากตัวอย่างออกให้หมด จากนั้นปรับระดับน้ำให้คงที่ตามที่กำหนดไว้ เมื่อระดับน้ำคงที่แล้วจึงเริ่มจับเวลาเพื่อหาปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านตัวอย่าง ณ ช่วงเวลาที่กำหนดไว้ [8] โดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำได้จากเวลาและปริมาณน้ำที่ใช้ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2

$$k = \frac{QL}{tHA} \quad (2)$$

โดย k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ (cm/s) , Q คือ ปริมาตรของน้ำที่ซึมผ่านคอนกรีต (cm^3) , L คือ ความสูงของตัวอย่าง (cm) , t คือ เวลาที่ต้องการสำหรับการออกแบบปริมาตรน้ำที่ซึมผ่านก่อนตัวอย่าง (sec) , H คือ ระยะระหว่างระดับน้ำที่ทางออกทั้งสอง (cm) และ A คือ หน้าตัดของตัวอย่าง (cm^2)



รูปที่ 4 อุปกรณ์ทดสอบการซึมผ่านน้ำ

3. ผลการทดลองและอภิปราย

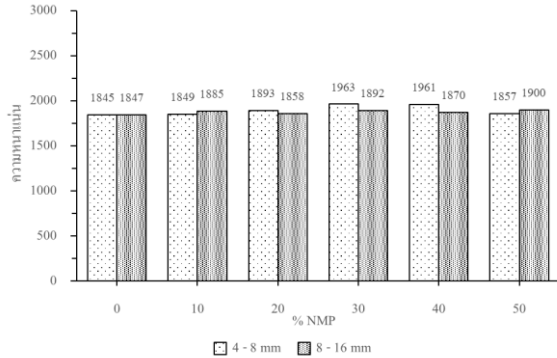
3.1 ความหนาแน่นและความพรุน

เนื่องจากคอนกรีตพรุนเป็นคอนกรีตที่มีความพรุนสูงจึงทำให้ความหนาแน่นค่อนข้างน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป จากรูปที่ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ NMP แล้ว ความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก NMP มีขนาดที่เล็กกว่ามวลรวมละเอียด ทำให้ NMP สามารถเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมได้ จึงทำให้มีความทึบแน่นของคอนกรีตมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนเพิ่มขึ้น และพบว่าคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวม $4 - 8$ มิลลิเมตร และ $8 - 16$ มิลลิเมตร นั้นมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการใช้ขนาดของมวลรวมที่แตกต่างกันนั้นมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง $1845 - 1963$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

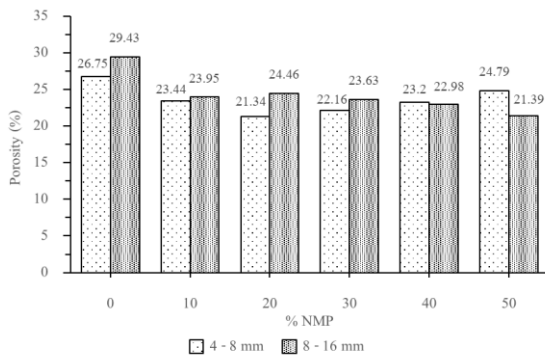
เมื่อคอนกรีตพรุนใช้ขนาดของมวลรวมแตกต่างกัน จะทำให้ค่าความหนาแน่นที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะแตกต่างจากการใช้มวลรวมที่มีชนิดของมวลรวมที่แตกต่างกัน ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับที่รายงานไว้ใน [7] คือ ความหนาแน่นของคอนกรีตพรุนนั้นขึ้นอยู่กับความพรุนที่ออกแบบไว้ และชนิดของมวลรวมที่ใช้ เมื่อคอนกรีตมีความพรุนสูง จะทำให้ความหนาแน่นลดลง และเมื่อคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีความหนาแน่นของมวลรวมสูง จะทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงไปด้วย

รูปที่ 7 แสดงความพรุนของคอนกรีตพรุนเมื่อเพิ่มปริมาณ NMP การเพิ่มปริมาณ NMP ทำให้ความพรุนมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจาก NMP เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มขึ้น ความพรุนจึงลดลง อย่างไรก็ตามความพรุนของคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมขนาด $4 - 8$ มิลลิเมตร ไม่ได้ลดลงตามแนวโน้มเสมอไป โดยเฉพาะตัวอย่างที่ใช้ปริมาณ NMP เท่ากับ 50% อาจเนื่องมาจากปริมาณ NMP ที่มากเกินไป ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของ NMP จึงไม่สามารถกระจายตัวไปอุดช่องว่างได้ดีเท่ากับกรณีที่มี NMP น้อยกว่า และจากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อคอนกรีตพรุนใช้มวลรวมขนาด $8 - 16$ มิลลิเมตร มีความพรุนสูงกว่าคอนกรีตพรุนที่ใช้มวลรวมขนาด $4 - 8$ มิลลิเมตร เนื่องจากมวลรวมขนาดเล็กทำให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมมีขนาดเล็กลง ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมก็ทำให้มวลรวมมีการซ้อนทับ

กันมากขึ้น จึงทำให้ความพรุนของคอนกรีตนั้นลดลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มขนาดของมวลรวม จะทำให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความหนาแน่นของคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร และ 8 – 16 มิลลิเมตร

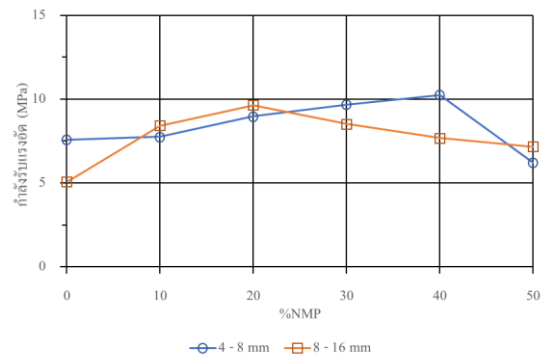


รูปที่ 7 ความพรุนของคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร และ 8 – 16 มิลลิเมตร

3.2 กำลังรับแรงอัด

กำลังรับแรงอัดนั้นเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของคอนกรีตพูน แต่เนื่องจากคอนกรีตพูนเป็นคอนกรีตที่มีช่องว่างสูง จึงทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อไม่ได้ใส่ NMP คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร แต่เมื่อใช้ NMP ที่ 30% - 40% พบว่าคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ามวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร แต่เมื่อใส่ NMP ที่ 10% - 20% พบว่าคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่ามวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร โดยรวมสรุปได้ว่าคอนกรีตพูนที่ใส่ NMP มีกำลังมากกว่าคอนกรีตพูนที่ไม่มี NMP เป็นส่วนผสมทั้งสองขนาดมวลรวม อาจมีสาเหตุจากการที่ NMP มีขนาดเล็กกว่าทรายมาก จึงเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมได้ดีกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความพรุน

ลดลง และกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดนั้นแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ การใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร เมื่อใส่ NMP ค่ากำลังรับแรงอัดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงที่ปริมาณ 40% แล้วค่ากำลังอัดจึงลดลงและการใช้มวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร เมื่อใส่ NMP ค่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 20% หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดลง สาเหตุอาจเนื่องจาก NMP นั้นมีความแข็งแรงของวัสดุน้อยกว่าทราย เมื่อใส่ไปในปริมาณมากเกินไปจึงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง ดังนั้นการใส่ NMP ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตพูนที่ไม่ใส่ NMP ยกเว้นคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร ที่ใส่ปริมาณ NMP ที่ 50% จะเห็นได้ว่ากำลังรับแรงอัดนั้นขึ้นอยู่กับความพรุนของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีความพรุนมากทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าน้อยลง

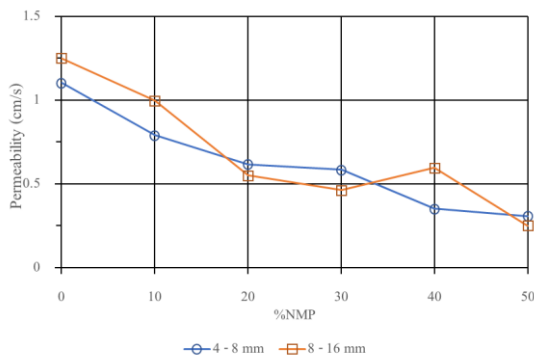


รูปที่ 8 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนที่ 28 วัน ที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร และ 8 – 16 มิลลิเมตร

3.3 อัตราการซึมผ่านน้ำ

จากรูปที่ 9 พบว่าเมื่อใส่ปริมาณ NMP ที่ 0% - 10% ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่าขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร และเมื่อใส่ปริมาณ NMP ที่ 20% - 30% ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่ามวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ NMP มากขึ้น ทำให้แนวโน้มการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนลดลง เนื่องจาก NMP เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวมทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น น้ำจึงซึมไหลผ่านคอนกรีตพูนได้น้อยลง แต่อย่างไรก็ดี คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร ที่ปริมาณ NMP 40% มีแนวโน้มแตกต่างจากที่กล่าวมา เมื่อเทียบกับกรณีอื่นของตัวอย่างที่ใช้มวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร เนื่องจากความคดเคี้ยวของช่องว่างที่ต่อเนื่องกันในคอนกรีตและการกระจายตัวของ NMP ที่กระจายตัวได้ไม่ดี จึงจับตัวกันเป็นก้อนเข้าไปอุดช่องว่างอยู่บริเวณเดียว และจากรูปที่ 9 พบว่าเมื่อไม่มี NMP คอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 8 – 16 มิลลิเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำมากกว่าคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร เนื่องจากคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่มี

พื้นที่ผิวสัมผัสน้อยทำให้การยึดเกาะระหว่างมวลรวมน้อยไปด้วย ช่องว่างจึงมีขนาดใหญ่ เมื่อช่องว่างระหว่างมวลรวมมีขนาดใหญ่จึงทำให้ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอนกรีตพูนมีมากขึ้น นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนขึ้นอยู่กับค่าความพรุนของคอนกรีตพูน เมื่อคอนกรีตมีความพรุนสูง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำก็จะสูงตามไปด้วย ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนเป็นเช่นเดียวกับปัจจัยของความพรุนของคอนกรีตพูน



รูปที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูน ที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร และ 8 – 16 มิลลิเมตร

4. บทสรุป

จากผลการทดลองสมบัติของคอนกรีตพูนจากส่วนอโลหะที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ได้ผลสรุปดังนี้

1. ขนาดคละของมวลรวมหยาบและปริมาณ NMP ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีตพูนอย่างมีนัยสำคัญ
2. เมื่อใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ความพรุนของคอนกรีตพูนก็มากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากมวลรวมขนาดใหญ่ทำให้ช่องว่างระหว่างมวลรวมมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ NMP ทำให้ความพรุนลดลง เนื่องจาก NMP เข้าไปอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น
3. เมื่อมวลรวมหยาบมีขนาดเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตพูนจะลดลง เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างมวลรวมที่ใหญ่ขึ้น การยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมจึงไม่ดี ทำให้รับกำลังได้น้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณ NMP แล้ว ทำให้คอนกรีตพูนมีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น เมื่อใส่ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจาก NMP เข้าอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ทำให้มีการเชื่อมกันระหว่างมวลรวมมากขึ้น
4. เมื่อขนาดคละของมวลรวมหยาบเพิ่มขึ้น การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลรวมขนาดใหญ่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างมวลรวมมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ

NMP ทำให้การซึมผ่านน้ำของคอนกรีตพูนลดลง ดังนั้นการซึมผ่านน้ำแปรผันตรงกับความพรุนของคอนกรีตพูน

จากผลการทดลองสัดส่วนปริมาณ NMP ที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตพูนที่ใช้มวลรวมขนาด 4 – 8 มิลลิเมตร และ 8 – 16 มิลลิเมตร โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงอัด และการซึมผ่านน้ำ คือที่ปริมาณ 40% และ 20% ตามลำดับ เนื่องจากมีกำลังรับแรงอัดที่สูงที่สุด และการซึมผ่านน้ำอยู่ในช่วงที่กำหนดตามข้อกำหนดของ ACI 522R-10 อย่างไรก็ดีเนื่องจากส่วนประกอบของ NMP นั้นมีโลหะหนักและสารหน่วงไฟประเภทโบรมีนหลงเหลืออยู่ เมื่อเกิดการชะล้างลงสู่ลำน้ำได้ดินจะทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ จึงจำเป็นต้องจะทำการศึกษาการชะล้างของคอนกรีตพูนที่มี NMP แทนที่มวลรวมละเอียดเพิ่มเติมก่อนนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และพื้นที่

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัย EHT ของศูนย์ความเป็นเลิศด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมและพิษวิทยา หน่วยงานวิชาการ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, R., Zhang, T., and Wang, P. (2012). Waste printed circuit boards nonmetallic powder as admixture in cement mortar. *Materials and Structures*, 45, pp. 1439-1445.
- [2] Clyde, F. and Coombs, J. (2008). *Printed circuits handbook*. McGraw-Hill Companies, Inc.
- [3] Guo, J. and Xu, Z. (2009). Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 168, pp. 567-590.
- [4] Zeng, X., Zheng, L., Xie, H., Lu, B., Xia, K., Chao, K., Li, W., Yang, J., Lin, S., and Li, J. (2012). Current Status and Future Perspective of Waste Printed Circuit Boards Recycling. *Procedia Environmental Sciences*, 16, pp. 590-597.
- [5] Kwonpongsagoon, S., Jareemit, S., and Kanchanapiya, P. (2017). Environmental impacts of recycled nonmetallic fraction from waste printed circuit board. *International Journal of GEOMATE*, 12(13), pp. 8-14.

- [6] American Concrete Institute. (2010). *ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete*. ACI Manual of Concrete Practice.
- [7] Grubeša, I.N., Barišić, I., Ducman, V., and Korat, L. (2018). Draining capability of single-sized pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 169, pp. 252-260.
- [8] วันชัย สะตะ และ ปริญา จินดาประเสริฐ (2560). คอนกรีตพรุน : คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. *วารสารคอนกรีตสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย*
- [9] Kevern, J.T., Schaefer, V.R., and Wang, K. (2009). Design of Pervious Concrete Mixtures. *National Pervious Concrete Pavement Association*, Version 3.0.
- [10] Chandrappa, A.K. and Biligiri, K.P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 111, pp. 262-274.
- [11] Meininger, R.C. (1998). No-fines pervious concrete for paving. *Concrete International*, 10, pp. 20-27.
- [12] มงคลชัย อัครวิษณุเลิศ และ เจริศ จำปา (2561). การใช้ประโยชน์จากซากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ส่วนอโลหะ) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 22(7), pp. 34-43.
- [13] American Society for Testing and Materials. (2015). *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM C138/C138M-16a*. Annual Book of ASTM Standard, 4(2).
- [14] American Society for Testing and Materials. (2014). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Annual Book of ASTM Standard.