การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่มีส่วนอโลหะจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรไฟฟ้าเป็นส่วนผสม

Study on the properties of cellular lightweight concrete with non-metallic part from recycling of printed circuit board waste as constituent

กาญจนาวรรณ์ ปัญญาวีร์[1] , สุพพัต ควรพงษากุล[2] , เปรมฤดี กาญจนปิยะ[3] และ จักรพันธ์ เทือกตี๊ะ[4]

[1,4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2]ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ศูนย์ความเป็นเลิศด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมและพิษวิทยา
[3] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
**Corresponding author; E-mail address: kanjanawan.pa@ku.ac.th*

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีแนวคิดและความสนใจเกี่ยวกับการนำขยะพลาสติกที่เหลือทิ้งจากกระบวนการรีไซเคิลซากแผงวงจรไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แนวทางหนึ่งคือการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์คอนกรีต งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของผงส่วนที่เป็นอโลหะ (Non-metallic part, NMP) ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรไฟฟ้า ต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยการนำ NMP มาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนที่ร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก มีการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดที่ 700 และ1,000 กก./ม.^{3} โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 ทุกส่วนผสม และสารทำฟองโฟมที่ได้จากการผสมกับน้ำสะอาดที่อัตราส่วน 1 : 40 มีความหนาแน่นเท่ากับ 50 กก./ม.^{3} ผลการศึกษาพบว่าการแทนที่ทรายด้วยผง NMP ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์มีความแปรปรวนไปจากความหนาแน่นควบคุมของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย และยังส่งผลให้กำลังอัดรวมถึงการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์มีค่าเพิ่มขึ้น การศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยใช้ NMP แทนที่ทรายบางส่วน ซึ่งมีคุณสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ

คำสำคัญ: ส่วนอโลหะ, คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์, การดูดซึมน้ำ, กำลังรับแรงอัด, ความหนาแน่นแห้ง

Abstract

At present, there are idea and interest in the use of plastic waste from the recycling of printed circuit board waste to reduce its impact on the environment. One way is to utilize such plastic waste as an ingredient in concrete products. The objective of this research is to study the effects of non-metallic part (NMP) obtained from PCB on the physical and mechanical properties of cellular lightweight concrete by replacing some fine aggregates with NMP at 10-50 percent by weight. The density of fresh concrete was controlled at 700 and 1,000 kg/m^3 with constant water-cement ratio (w/c) of 0.5, and foaming agent obtained from mixing with water at ratio of 1: 40. The concrete was prepared with a foam generator at a density of 50 kg/m^3. The results showed that replacing sand with NMP resulted in slight variation of dry density of cellular lightweight concrete from the controlled values, and also resulted in increased compressive strength and water absorption. This study suggested that cellular lightweight concrete can be manufactured by using NMP as partial replacement of sand, which meets the TIS specifications for cellular lightweight concrete block.

Keywords: Non-metallic part, Cellular lightweight concrete, Water absorption, Compressive strength, Dry density

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาเกี่ยวกับขยะพลาสติกนับเป็นปัญหาระดับชาติ ซึ่งประเทศไทยได้ติดอันดับ 6 ของโลกเรื่องการทิ้งขยะพลาสติก [1] คิดเป็นประมาณ 2 ล้านตันของปริมาณขยะทั้งหมด โดยสามารถนำขยะพลาสติกมารีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกครั้งได้เพียงปีละ 0.5 ล้านตัน ส่วนที่เหลืออีก 1.5 ล้านตัน [2] ซึ่งเป็นขยะพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ จะถูกนำไปกำจัดโดยการเผาทำลายและฝังกลบ อาจจะส่งผลให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงมี

แนวคิดที่จะศึกษาการนำขยะพลาสติกที่ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้มาใช้ประโยชน์ใหม่ ซึ่งขยะพลาสติกที่กล่าวถึงนี้คือ ขยะพลาสติกที่ได้มาจากโรงงานรีไซเคิลซากแผงวงจรไฟฟ้า ซึ่งมีเศษพลาสติกที่ไม่สามารถทำลายหรือนำไปรีไซเคิลได้อีก โดยจะศึกษาการนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์บล็อกคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูลาร์ (Cellular Lightweight Concrete, CLC) นิยมนำมาทำเป็นอิฐบล็อกสำหรับก่อเป็นผนัง เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและช่วยลดการนำความร้อนได้ดี ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย จึงได้กำหนดมาตรฐานทางอุตสาหกรรมออกมา 2 มาตรฐาน ได้แก่ มาตรฐาน มอก. 1505 - 2541 สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบฟองอากาศอบไอน้ำ [3] ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ต้องผ่านการอบด้วย ไอน้ำ ส่งผลให้มีต้นทุนในการผลิตสูง ผู้ประกอบการจึงมักเป็นบริษัทขนาดใหญ่ และอีกมาตรฐานคือ มาตรฐาน มอก. 2601 – 2556 สำหรับคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ [4] หรือเรียกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยสามารถแบ่งประเภทได้ตามความหนาแน่นแห้ง เช่น คอนกรีตมวลเบาชนิด C10 ความหนาแน่นแห้งอยู่ระหว่าง 901-1,000 กก./ม.^{3} กำหนดกำลังอัดและการดูดซึมน้ำต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 25.5 กก./ซม.^{2} และร้อยละ 23 ตามลำดับ การผลิตในระบบนี้ใช้ต้นทุนไม่สูงมาก ทำให้ผู้ประกอบการขนาดเล็กสามารถลงทุนในกระบวนการผลิตได้

คอนกรีตมวลเบาระบบเซลลูลาร์เป็นคอนกรีตมวลเบาที่มีส่วนผสมของโฟมผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ ทรายและน้ำ นักวิจัยหลายท่าน [5-12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือใช้ต่างๆมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ เช่น เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย เศษเมลามีน พลาสติกพอลิโพรไพลีน Chaitongrat and Siwadamrongpong [5] นำเศษเมลามีนมารีไซเคิลเป็นส่วนผสมแทนที่วัสดุมวลรวมละเอียด พบว่าการแทนที่ด้วยเศษเมลามีนส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์แบบปกติ การใช้เศษเมลามีนแทนที่ทรายร้อยละ 25 ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงสุด

การศึกษาที่ผ่านมายังไม่พิจารณาถึงคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่มีส่วนผสมของส่วนอโลหะ(Non-metallic part, NMP) ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของ NMP ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการจัดการและเพิ่มมูลค่าให้กับขยะพลาสติกต่อไป

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement; OPC) ประเภท 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150 มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำ ซึ่งผ่านการอบแห้งในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 110±5 องศาเซลเซียส แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 และน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต คือ น้ำประปาสะอาดปราศจากสารที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต

สารก่อโฟม (Foaming agent) หรือน้ำยากักกระจายฟองอากาศที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นสารก่อโฟมชนิดสังเคราะห์ ประเภทประจุลบ สูตรสารเพิ่มฟองเพื่อการผลิตคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ (CLC) จากผู้ผลิตในประเทศไทย

ผง NMP ในการศึกษานี้ได้มาจากกระบวนการรีไซเคิลเศษแผงวงจรไฟฟ้าเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตแผงวงจรไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นออกไซด์หลักของผง NMP จากการทดสอบด้วย X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ได้แก่ SiO_2 (22.5%), CaO (9.91%) และ Al_2O_3 (7.37%) มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.82 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 8 อนุภาคของ NMP มีขนาด 50 ไมครอน (0.05 มิลลิเมตร) แสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้มีรายงานด้วยว่าส่วนประกอบที่เป็นพอลิเมอร์เรซินใน NMP มีการเติมแต่งสารหน่วงไฟประเภทโบรมีน และอาจมีโลหะหนักหลงเหลืออยู่ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม [13] ดังนั้นควรมีความระมัดระวังในการนำไปใช้งาน

รูปที่ 1 ผง NMP

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 เครื่องร่อนแยกขนาด

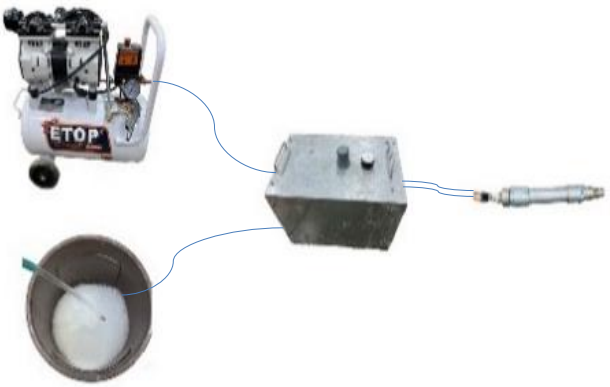
เครื่องร่อนพร้อมชุดตะแกรงร่อนตามมาตรฐาน ASTM E11 ใช้ในการร่อนเพื่อให้ได้ขนาดทรายตามมาตรฐานก่อนนำไปผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

2.2.2 เครื่องผสมคอนกรีต

เครื่องผสม (Mixer) คอนกรีตมวลเบาที่ใช้งานในการศึกษานี้เป็นโม่ผสมแบบผสมเอียง

2.2.3 เครื่องผลิตฟองโฟม

เครื่องผลิตเนื้อโฟมเหลวหรือเครื่องสร้างฟองโฟม (Foam generator) เป็นเครื่องผลิตเนื้อโฟมสำหรับคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญคือ เครื่องยิงฟองโฟม ตัวปรับแรงดันเข้าถังหรือเครื่องอัดอากาศ (รูปที่ 2) เพื่อทำให้ความดันภายในเครื่องสร้างฟองโฟมคงที่ ที่ความดัน 4-6 บาร์ และถังสำหรับผสมสารสร้างฟองโฟมกับน้ำ ซึ่งจะทำให้ได้ฟองโฟมปริมาณมาก โดยจะทำการผสมสารสร้างฟองโฟมต่อน้ำที่อัตราส่วน 1 : 40 โดยน้ำหนัก เทคนิคในการทำให้น้ำกลายเป็นโฟมเหลว (Liquid foam) ก่อนที่จะนำไปผสมกับคอนกรีตสดนี้เรียกว่า Pre-formed foam method ตามมาตรฐาน ASTM C796



รูปที่ 2 เครื่องผลิตฟองโฟม

2.2.4 ภาชนะและเครื่องชั่งน้ำหนักคอนกรีตสด

การทดสอบหาความหนาแน่นของคอนกรีตสด ทำได้โดยชั่งน้ำหนักของคอนกรีตสดในภาชนะที่ทราบปริมาตร ขนาดภาชนะที่ใช้มีปริมาตร 1 ลิตร

2.2.5 แบบหล่อมาตรฐาน

แบบหล่อมาตรฐานทรงกระบอกขนาด 100×200 มม. สำหรับหล่อตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นแห้ง

2.2.6 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ที่มีกำลังสูงสุด 100 ตัน และสามารถควบคุมอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดได้

2.2.7 ตู้อบลมร้อน

ใช้ตู้อบลมร้อนที่สามารถตั้งอุณหภูมิสำหรับการอบตัวอย่างทดสอบหรือวัสดุในการทดสอบการดูดซึมน้ำ

2.3 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

2.3.1 อัตราส่วนผสม

ส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงตาม

ตารางที่ 1 โดยการแทนที่ทรายด้วยผง NMP ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 700 (D1) และ 1,000 (D2) กก./ม.^{3} อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 ทุกส่วนผสม แบ่งเป็น 6 สูตร ได้แก่

1. สูตร A ปริมาณ NMP โดยแทนที่ทราย ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก
2. สูตร B ปริมาณ NMP โดยแทนที่ทราย ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
3. สูตร C ปริมาณ NMP โดยแทนที่ทราย ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
4. สูตร D ปริมาณ NMP โดยแทนที่ทราย ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
5. สูตร E ปริมาณ NMP โดยแทนที่ทราย ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก
6. สูตร F ปริมาณ NMP โดยแทนที่ทราย ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ **1** อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง

รายการ	สัดส่วนผสม(โดยน้ำหนัก)			
	ปูน	ทราย	NMP	น้ำ
A-D1	1	1	0	0.5
B-D1	1	0.9	0.1	0.5
C-D1	1	0.8	0.2	0.5
D-D1	1	0.7	0.3	0.5
E-D1	1	0.6	0.4	0.5
F-D1	1	0.5	0.5	0.5
A-D2	1	1	0	0.5
B-D2	1	0.9	0.1	0.5
C-D2	1	0.8	0.2	0.5
D-D2	1	0.7	0.3	0.5
E-D2	1	0.6	0.4	0.5
F-D2	1	0.5	0.5	0.5

**D1 คือ ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 700 กก./ม.^{3}

D2 คือ ควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 1,000 กก./ม.^{3}

2.3.2 การเตรียมฟองโฟม

ฟองโฟมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์นั้นผลิตโดยการนำน้ำยากักกระจายฟองอากาศมาผสมเจือจางกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:40 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำให้เกิดฟองโฟมด้วยเครื่องผลิตฟองโฟม โดยเครื่องยิงฟองต้องต่อเข้ากับเครื่องอัดอากาศ ซึ่งตั้งความดันไว้ที่ 6.0 บาร์ ทำให้ได้ความหนาแน่นของฟองโฟมอยู่ที่ประมาณ 50 กก./ม.^{3}

2.3.3 การควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสด

ทำการผสมโดยเริ่มจากการผสมปูนซีเมนต์กับทรายให้เข้ากัน จากนั้นใส่ผง NMP เข้าไปผสมให้เข้ากัน จึงเติมน้ำเข้าไปและตามด้วยการใส่ฟองโฟม หลังจากการผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้เรียบร้อยแล้ว จึงตรวจสอบค่าความหนาแน่นสดของคอนกรีตว่าเป็นไปตามที่ออกแบบส่วนผสมไว้หรือไม่ โดยการชั่งน้ำหนักของคอนกรีตสดในภาชนะที่มีปริมาตร 1 ลิตร เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของคอนกรีตสด ซึ่งความหนาแน่นของคอนกรีตคืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของคอนกรีตสดต่อปริมาตรของภาชนะ มีหน่วยเป็น กก./ม.^{3}

2.3.4 การหล่อตัวอย่างทดสอบ

ก่อนการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อจะใช้น้ำมันทาบางๆที่ด้านในของแบบหล่อ เพื่อให้สามารถถอดแบบออกได้ง่ายขึ้น แต่ควรระวังอย่าทาน้ำมันมากจนเกินไป เพราะจะทำให้คอนกรีตผสมกับน้ำมันที่เป็นส่วนเกิน ส่งผลให้เกิดปัญหาการแข็งตัวและกำลังของคอนกรีตจะลดลงได้ จากนั้นเทคอนกรีตลงในแบบหล่อทันทีหลังจากทำการผสมคอนกรีตเสร็จเรียบร้อย โดยแบ่งเทเป็นจำนวน 2 ชั้น แต่ละชั้นทำการสั่นด้วยเครื่องสั่นคอนกรีตจากภายนอก กำหนดระยะเวลาการสั่นชั้นละ 15 วินาทีเท่ากันทุกตัวอย่าง เพื่อช่วยลดช่องว่างภายในตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ภายหลังจากการสั่นเรียบร้อย จึงเทคอนกรีตให้พูนปากแบบหล่อแล้วปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ

2.3.5 การถอดแบบและการบ่ม

ภายหลังจากเทคอนกรีตลงในแบบหล่อแล้ว นำตัวอย่างทดสอบไปห่อหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกโพลิเอทีลีนเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ซึ่งแผ่นพลาสติกต้องแนบไปกับผิวของคอนกรีต รอยต่อระหว่างแผ่นจะต้องแนบสนิทกัน เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีต หลังจากนั้น 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบหล่อและนำตัวอย่างทดสอบไปบ่มในน้ำจนกว่าจะถึงกำหนดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C192 [14] รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างหลังถอดออกจากแบบหล่อ

รูปที่ 3 ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์หลังถอดออกจากแบบหล่อ

2.4 การทดสอบตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์

2.4.1 การทดสอบความหนาแน่นแห้ง

ทดสอบความหนาแน่นแห้งของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์รูปทรงกระบอกขนาด 100×200 มม. ที่มีอายุบ่ม 7 และ 28 วัน โดยคำนวณได้จากการนำตัวอย่างทดสอบไปชั่งเพื่อทราบน้ำหนักจากนั้นนำไปหารด้วยปริมาตรของตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C567 [15]

2.4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

ทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์โดยการแช่ตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกขนาด 100×200 มม. ที่อายุบ่ม 28 วัน เมื่อครบกำหนด จึงนำตัวอย่างทดสอบไปอบให้แห้งจนได้มวลคงที่ที่อุณหภูมิ 105±5 °C เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ ค่าที่ได้คือมวลของตัวอย่างทดสอบเมื่อแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบแช่ในน้ำสะอาดให้ท่วมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำใช้ผ้าชุ่มน้ำซับน้ำส่วนเกินที่ผิวของตัวอย่างทดสอบทีละก้อนและชั่งน้ำหนักภายในเวลา 3 นาที ค่าที่ได้คือมวลตัวอย่างทดสอบเมื่อเปียก ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1) โดยทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างเป็นอย่างน้อยสำหรับแต่ละกลุ่มตัวอย่าง รายละเอียดวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C67 [16] ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$A = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ A คือการดูดซึมน้ำ (%), W_{sat} คือน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง (ก.) และ W_{dry} คือนำหนักของตัวอย่างทดสอบหลังอบแห้ง 24 ชั่วโมง (ก.)

2.4.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์รูปทรงกระบอกขนาด 100×200 มม. ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน โดยใช้หน้าที่เรียบของชิ้นทดสอบ 2 ด้านตรงข้ามกันเป็นด้านที่รับแรงอัด (ผิวด้านหน้าเคลือบด้วยซัลเฟอร์ให้เรียบและตั้งฉากกับแนวแกนของแรงกด) ให้น้ำหนักกระทำด้วยการควบคุมความเร็วของหัวกดที่อัตราคงที่เท่ากับ 0.1 มม.ต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการพิบัติและไม่สามารถรับแรงอัดที่สูงขึ้นได้อีกตามมาตรฐาน ASTM C39 [17] ค่ากำลังรับแรงอัดคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

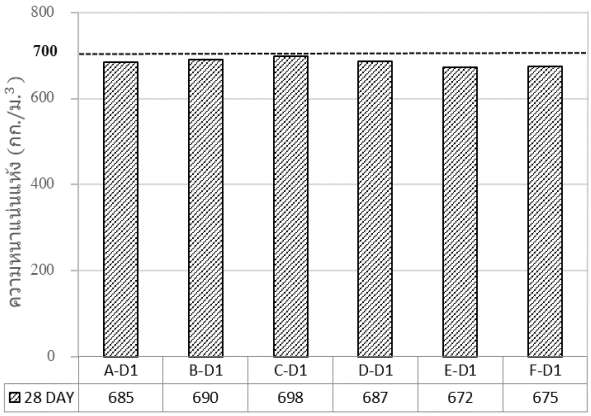
$$C_s = \frac{P_u}{A} \qquad (2)$$

เมื่อ C_s คือ กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2}), P_u คือ น้ำหนักกดสูงสุดของชิ้นทดสอบ (กก.) และ A คือพื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของตัวอย่างทดสอบ (ซม.^{2}) ทั้งนี้มาตรฐาน มอก. 2601 - 2556 [4] กำหนดให้ทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 150x150x150 มม. จึงต้องทำการปรับเทียบค่ากับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของรูปทรงลูกบาศก์

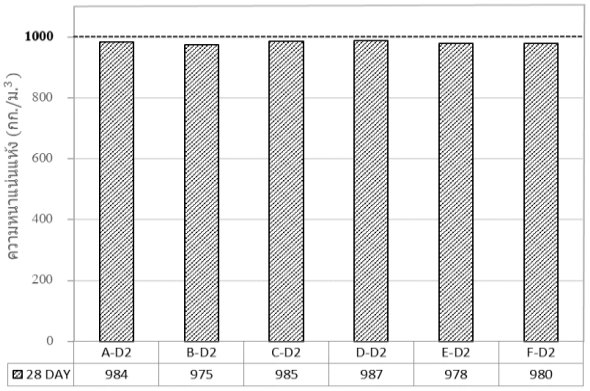
3. ผลการทดสอบและวิจารณ์

3.1 ความหนาแน่นแห้ง

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรสำคัญตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ รูปที่ 4 และ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ ที่อายุ 28 วัน มีการควบคุมความหนาแน่นของคอนกรีตสดเท่ากับ 700 กก./ม.^{3} และ 1,000 กก./ม.^{3} ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ทุกสูตรมีความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกันและมีความแปรปรวนเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นควบคุมของคอนกรีตสด (ไม่เกิน ±28 กก./ม.^{3})



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ควบคุมความหนาแน่นสดเท่ากับ 700 กก./ม.^{3}

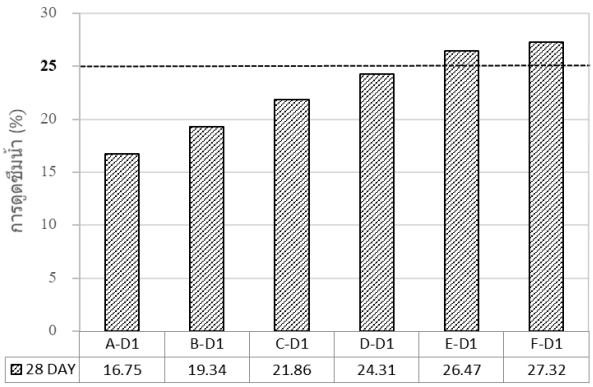


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ควบคุมความหนาแน่นสดเท่ากับ 1,000 กก./ม.^{3}

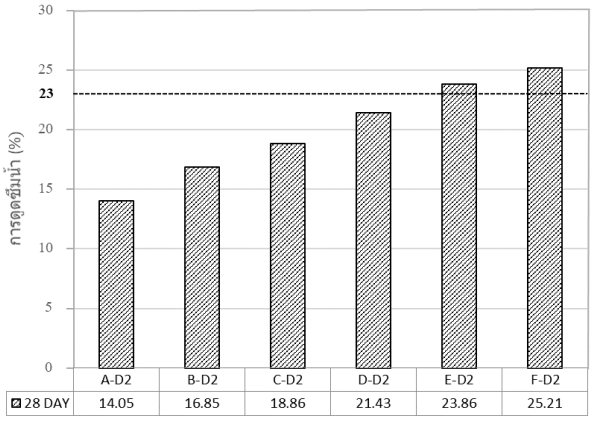
จากผลการทดลอง พบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่มีส่วนผสมของ NMP มีความหนาแน่นแห้งแปรปรวนเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นควบคุมของคอนกรีตสด สอดคล้องกับผลการทดสอบของ Chaitongrat and Siwadamrongpong [5] (น้อยกว่า ±100 กก./ม.^{3})ความแปรปรวนของความหนาแน่นแห้งอาจเป็นผลจากอิทธิพลของ NMP ที่ผสมในคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ เนื่องจากการดูดซึมน้ำของ NMP (ร้อยละ 8) มีค่าสูงกว่าทราย (ร้อยละ 1.32) ทำให้ปริมาณน้ำในการผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์มีความเปลี่ยนแปลง ประกอบกับอนุภาคของ NMP มีความละเอียดถึง 50 ไมครอน ซึ่งแตกต่างไปจากรูปร่างขนาดอนุภาคของทราย ซึ่งมีความเป็นกลมมนทำให้ NMP กระจายตัวได้ไม่ดีเท่าทราย เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ผสม NMP มีความแปรปรวนไปจากความหนาแน่นควบคุมของคอนกรีตสด

3.2 การดูดซึมน้ำ

รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบาที่อายุ 28 วัน ที่ความหนาแน่นสดควบคุมเท่ากับ 700 และ 1,000 กก./ม.^{3} ตามลำดับ พบว่าการแทนที่ทรายบางส่วนด้วย NMP ส่งผลให้การดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์แบบปกติ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วย NMP ในปริมาณมากขึ้น เป็นผลมาจากค่าการดูดซึมน้ำและปริมาณ NMP ที่มากกว่า



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ควบคุมความหนาแน่นเท่ากับ 700 กก./ม.^{3}

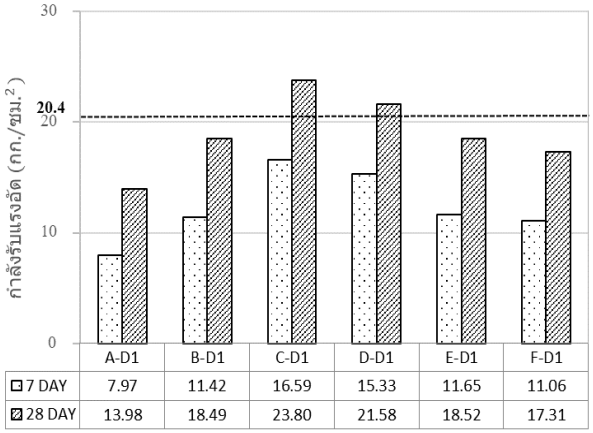


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ควบคุมความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 กก./ม.^{3}

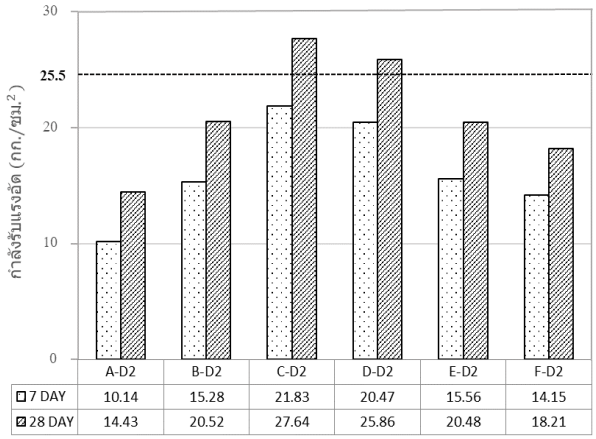
เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.2601-2556 [4] ที่ยอมให้การดูดซึมของน้ำมีค่าไม่เกินร้อยละ 25 และ 23 พบว่าค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่างสูตร A, B, C และ D ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน จากผลการเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำกับตัวอย่างสูตร A ที่ไม่มี NMP พบว่าที่ความหนาแน่นเท่ากับ 700 กก./ม.^{3} สูตร B, C และ D มีการดูดซึมน้ำสูงกว่าร้อยละ 15.46, 30.51 และ 45.13 ตามลำดับ ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 กก./ม.^{3} มีค่าสูงกว่าร้อยละ 19.93, 34.23 และ 52.52 ตามลำดับ

3.3 กำลังรับแรงอัด

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ โดยได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 ช่วง คือช่วงระยะเวลาการบ่มที่ 7 วันและ 28 วัน ที่ความหนาแน่น 700 (D1) กก./ม.^{3} และ 1,000 (D2) กก./ม.^{3} รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบา พบว่าคอนกรีตมวลเบาที่ผสม NMP มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้นตามปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำ [12]



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ควบคุมความหนาแน่นเท่ากับ 700 กก./ม.^{3}



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและปริมาณ NMP ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่ควบคุมความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 กก./ม.^{3}

จากรูปที่ 8 และ 9 จะเห็นได้ว่าการใส่ผง NMP ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่ใส่ผง NMP อาจมีสาเหตุมาจากขนาดของ NMP ที่เล็กกว่าทรายมาก ทำให้เข้าไปอุดช่องว่างภายในคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น อย่างไรก็ดีกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์จะมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ NMP เกินกว่า 20% สำหรับความหนาแน่นเท่ากับ 700 และ 1,000 กก./ม.^{3} น่าจะมีสาเหตุจากการที่ NMP ไปจับตัวกับปูนซีเมนต์มากขึ้น จึงไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้สมบูรณ์และส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง ซึ่งที่ความหนาแน่นเท่ากับ 700 และ 1,000 กก./ม.^{3} สูตร C จะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.2601-2556 [4] ที่ยอมให้กำลังอัดมีค่าไม่น้อยกว่า 20.4 และ 25.5 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน พบว่าสูตร C และ D ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 700 กก./ม.^{3} มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานร้อยละ 16.67 และ 5.27 ตามลำดับ ส่วนที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 กก./ม.^{3} มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานร้อยละ 8.39 และ 5.27 ตามลำดับ

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่มีส่วนอโลหะจากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรไฟฟ้าเป็นส่วนผสม สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ความหนาแน่นแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์มีความแปรปรวนเล็กน้อยเมื่อใส่ NMP เมื่อเทียบกับความหนาแน่นควบคุมของคอนกรีตสด
2. การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่มีผง NMP เป็นส่วนผสมมีค่าสูงสุดเท่ากับ 27.32% และ 25.21% ที่ความหนาแน่นควบคุมเท่ากับ 700 และ 1,000 กก./ม.^{3} ตามลำดับ
3. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่มีผง NMP เป็นส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่ NMP โดยจะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อใส่ NMP 20% สำหรับความหนาแน่นควบคุม 700 และ 1,000 กก./ม.^{3}
4. จากการศึกษาทั้งสูตร C และ D ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.2601-2556 เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นแห้ง อัตราการดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัดตามเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาขึ้นรูปผลิตเป็นคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ที่มีส่วนอโลหะจากกระบวนการรีไซเคิลแผงวงจรไฟฟ้าเป็นส่วนผสม คือสูตร D โดยการแทนที่ทรายด้วย NMP 30% อย่างไรก็ดี จำเป็นต้องมีการทดสอบการชะล้าง (Leaching) ของโลหะหนัก และสารที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมอื่นๆก่อนนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความกรุณาอย่างสูงจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์และพื้นที่ห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัย EHT ของศูนย์ความเป็นเลิศด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมและพิษวิทยา หน่วยงานวิชาการ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

เอกสารอ้างอิง

[1] Jenna R., Roland G., Chris W. and Theodore R. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, pp. 768-771.

[2] สุจิตรา วาสนาดำรงดี (2562). ภาพรวมมาตรการลดขยะพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งในต่างประเทศ. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, หน้า 1-10.

[3] มอก. 1505-2541, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ. *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม*, ปี 2541, ฉบับที่ 2411, หน้า 1-12.

[4] มอก. 2601-2556, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ, *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม*, ปี 2556, ฉบับที่ 4562, หน้า 1-9.

[5] Chaitongrat C. and Siwadamrongpong S. (2018). Recycling of melamine formaldehyde waste as fine aggregate in lightweight concrete. *Songklanakarin J. Sci. Technol*, 40(1), pp. 39-45.

[6] Rebeiz K.S. and Craft A.P. (1995). Plastic Waste Management in Construction: Technological and Institutional Issues. *Resources, Conservation and Recycling*, 15, pp. 245-257.

[7] Rukzon S. and Chindaprasirt C. (2013). Strength, porosity and chloride resistance of mortar using combination of two kinds of the pozzolanic materials. *International Journal of Mineral, Metallurgy and Materials*, 20, pp. 808-814.

[8] เฉลิมชัย ไชยธงรัตน์ และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ (2558). การรีไซเคิลเศษเมลามีนโดยใช้เป็นวัสดุมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29*, นครราชสีมา, 30 มิถุนายน-2 กรกฎาคม 2559, หน้า 323-330.

[9] อภิวิชญ์ พูลสง (2556). การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาผสมผงฝุ่นหินจากโรงโม่หิน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 94-102.

[10] วันโชค เครือหงษ์ และ อภิวิชญ์ พูลสง (2560). สมบัติทางกลโครงสร้างจุลภาค การนำความร้อนและการหดตัวแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าผสมเถ้าชานอ้อย. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, หน้า 22-38.

[11] ธนภร ทวีวุฒิ และ นท แสงเทียน (2558). กำลังรับแรงอัดและการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า. *วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 91-102.

[12] ปิติ สุคนธสุขกุล (2558). คอนกรีตพิเศษ. ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 1-13.

[13] มงคลชัย อัศวดิษฐเลิศ และ เจริศา จำปา (2561). การใช้ประโยชน์จากชากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ส่วนอโลหะ) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 22(7), pp. 34-43.

[14] American Society for Testing and Materials. (20 1 9). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM C192/C192M-02C495*. Annual Book of ASTM Standards:

[15] American Society for Testing and Materials. (2 0 1 9). *Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete. ASTM C567/C567M–19*. Annual Book of ASTM Standards

[16] American Society for Testing and Materials. (2003). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. ASTM C6 7-03a*. Annual Book of ASTM Standards.

[17] American Society for Testing and Materials. (2 0 2 0). *Standard Method of Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39 / C39M-20*. Annual Book of ASTM Standards.