

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสกับการบ่มไอน้ำความดันต่ำ

Compressive Strength of Cellular Lightweight Concrete with Low Pressure Steam Curing

กัณธร ทิพย์โยธา¹, นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา², คำภี จิตชัยภูมิ^{3,*}

^{1,2}ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*Corresponding author; Email address : khamphreej@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส (CLC) ทำจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมสารเพิ่มฟองอากาศ วิธีผลิต CLC เป็นชนิดเติมฟองอากาศและผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C ภายใต้แรงดันไม่เกิน 0.4 ± 0.1 MPa เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่แข็งตัวแล้วมีน้ำหนักแห้งประมาณ 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คงที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 และ 0.6 ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสให้กำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 1.4 MPa และ 2.6 MPa และการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 23 ถึง 43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส, ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก, กำลังรับแรงอัด, ไอน้ำความดันต่ำ

Abstract

This article investigated the properties of the compressive strength and water absorption of cellular lightweight concrete (CLC) made from hydraulic cement mixed with foaming agent. The CLC produced by Pre-Formed Foam Method and cured with steam at temperature of 60°C, 70 °C, and 90 °C, under pressure not exceeding of 0.4 ± 0.1 MPa for 6 hours. The hardened CLC had a dry unitweight of approximately 500 kg/m³ and 800 kg/m³. The constant water-to-cement ratio of 0.5 and 0.6 were used. The testing results found that the compressive strength of CLC between 1.4 MPa and 2.6 MPa and the water absorption of CLC between 23 % and 43 % by weight.

Keywords: Cellular lightweight concrete, Hydraulic cement, Compressive strength, Steam curing

1. บทนำ

คอนกรีต คือ วัสดุผสมที่ได้จากการนำเอา ปูนซีเมนต์ น้ำ หยาบ และ หิน มารวมเข้าด้วยกัน โดยมีปูนซีเมนต์และน้ำเกิดปฏิกิริยาเคมีไฮเดรชันเมื่อปูนซีเมนต์และน้ำผสมกันเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ เรียกสั้น ๆ ว่า เพสต์ สามารถแข็งตัวในน้ำได้ ทำหน้าที่เป็นเสมือนกาวในการเชื่อมยึดประสานรับ

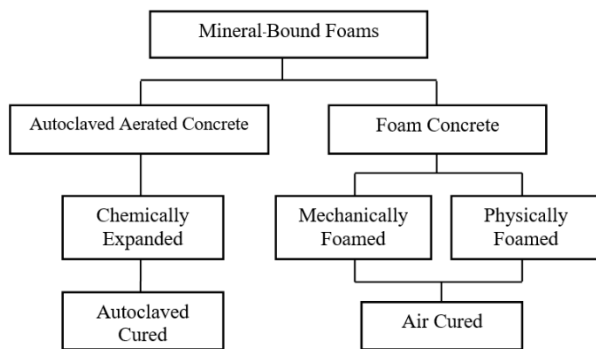
กำลังได้ โดยมีทรายและหินซึ่งเรียกวามวลรวมทำหน้าที่ในการอัดแทรกเพสต์เพื่อให้คอนกรีตมีราคาถูก การพัฒนา กำลังของซีเมนต์เพสต์เป็นไปตามปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน สามารถรับกำลังได้สูงขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นตราบดีที่มีน้ำในการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้กำลังและความทนทานของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ตามกฎของอาบรามส์ (Abram's law) คือ ปริมาณของปูนซีเมนต์ น้ำ และ อากาศ

ขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำมาจากวัตถุดิบที่มีสารซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก ผ่านการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส จนหลอมเข้าด้วยกันเป็นปูนเม็ด (clinker) ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงเริ่มตั้งแต่การระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผา ตลอดจนการบดปูนเม็ดผสมกับยิปซัมให้ละเอียดในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อหน่วงการก่อตัวอย่างเฉียบพลัน

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาคอนกรีตอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้เป็นอย่างดี อีกทั้งมีความทนทานและสามารถหล่อขึ้นรูปต่าง ๆ ได้ง่าย โดยปกติคอนกรีตมีน้ำหนักมากเมื่อเทียบกับวัสดุไม้ คอนกรีตใช้ทำโครงสร้าง เช่น ฐานราก ตอม่อ คาน และเสา การมีน้ำหนักบรรทุกมากทำให้โครงสร้างต้องมีขนาดใหญ่ ทำให้ต้องสิ้นเปลืองวัสดุในการก่อสร้าง แนวโน้มวัสดุก่อสร้างในอนาคตต้องการวัสดุทดแทน เช่น ผนังก่ออิฐ ฉาบปูนที่มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงใช้งานได้ ปัจจุบันจึงมีการนำเอาคอนกรีตมวลเบา (lightweight concrete) มาใช้ในงานก่อสร้างมากขึ้น จุดประสงค์เพื่อต้องการลดน้ำหนักบรรทุกต่อโครงสร้าง อีกทั้งยังช่วยให้ประหยัดต้นทุนในงานก่อสร้าง เนื่องจากการที่มีน้ำหนักเบาทำให้การเคลื่อนย้าย การยกติดตั้งทำได้สะดวกรวดเร็ว คอนกรีตมวลเบาถูกนำมาใช้งานในต่างประเทศมานานมากกว่า 50 ปี เนื่องจากคอนกรีตมวลเบา มีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา น้ำหนักเบากว่าคอนกรีตทั่วไป (คอนกรีตทั่วไปมีน้ำหนักแห้งหนักประมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) คอนกรีตมวลเบา มีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อน การดูดซับเสียง และการทนไฟไหม้ได้นานกว่าอิฐมวลเบา [1]

คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตปกติทั่วไป คอนกรีตมวลเบา มีความหนาแน่นระหว่าง 400 kg/m³ ถึง 1,800 kg/m³ [2] แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามวิธีการผลิต คือ 1) ประเภทใช้มวลรวมพรุนที่มีน้ำหนักเบาเป็นวัสดุผสม ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมพรุนต่ำกว่ามวลรวมปกติ จึงเรียกว่า คอนกรีตมวลรวมน้ำหนักเบา (lightweight aggregate concrete) 2) ประเภทไม่ใช้มวลรวมละเอียด (fine aggregate) เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ซึ่งมีแต่มวลรวมหยาบน้ำหนักปกติที่

มีขนาดใกล้เคียงกันหรือขนาดเดียว (single size) คอนกรีตชนิดนี้มีการใช้ปริมาณซีเมนต์และน้ำที่ต่ำ ดังนั้นช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างมวลรวมหยาบจึงมีจำนวนมาก คอนกรีตประเภทนี้อาจเรียกว่า คอนกรีตพรุน (porous concrete) หรือเรียกว่า คอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียด (No-fines concrete) 3) ประเภททำให้เกิดโพรงอากาศหรือช่องว่าง (void) ขนาดเล็กประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายในเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ โพรงเหล่านี้มีขนาดใกล้เคียงกันกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ โดยการกักกระจายของอากาศ (air entrainment) คอนกรีตประเภทนี้อาจมีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น คอนกรีตอัดอากาศ (aerated concrete) หรือคอนกรีตเซลลูล่า (cellular concrete) หรือโฟมคอนกรีต (foamed concrete) หรือก๊าซคอนกรีต (gas concrete) เป็นต้น ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจำแนกประเภทของโฟมคอนกรีต [3]

ปัจจุบันคอนกรีตมวลเบามีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างผนังอาคาร เนื่องจากมีหน่วยน้ำหนักเบาแต่รับแรงใช้งานได้ ส่งผลให้ประหยัดเวลาในการก่อสร้าง คอนกรีตมวลเบา มีคุณสมบัติเด่นทางด้านค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ช่วยลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ คอนกรีตมวลเบาประเภททำให้เกิดโพรงอากาศอาจแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ตามกระบวนการผลิต คือ ระบบที่ 1 คอนกรีตมวลเบาชนิดผ่านการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (autoclave aerated concrete มีชื่อย่อเป็น AAC) มีส่วนผสมของปูนขาว ยิปซัม น้ำ และผงอลูมิเนียม ซึ่งผงอลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนดันให้คอนกรีตขยายตัวมีปริมาตรเพิ่มขึ้น จากนั้นนำไปอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงจนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง และระบบที่ 2 คอนกรีตมวลเบาชนิดเติมฟองอากาศ (cellular lightweight concrete มีชื่อย่อเป็น CLC) มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ น้ำ หยาบและสารเพิ่มฟอง ซึ่งสารเพิ่มฟอง (foaming agent) ได้ต่อผ่านเครื่องกำเนิดฟองเพื่อให้ได้ฟองอากาศก่อน (Pre-Formed Foam) ที่จะนำไปเติมลงในน้ำปูนหรือมอร์ตาร์ที่ผสมแล้ว (slurry) จากนั้นจึงผสมให้เข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสม เมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้วจะได้คอนกรีตมวลเบาที่เต็มไปด้วยฟองหรือเซลล์อากาศขนาดเล็กจำนวนมากที่ไม่ต่อเนื่องกันแทรกอยู่ภายใน คอนกรีตมวลเบาประเภทนี้อาจมีชื่อเรียกว่า โฟมคอนกรีต (foamed concrete) [4] การลดลงของหน่วยน้ำหนักคอนกรีตทำให้คุณสมบัติคอนกรีตเปลี่ยนไปตามสัดส่วนของปริมาณอากาศที่เข้ามาแทนที่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์ แต่นั่นเป็นสิ่งที่ต้องยอมแลกเพื่อให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา เช่น การมีหน่วยน้ำหนักต่ำ การนำความร้อนต่ำ การทนการลามไฟได้นานขึ้น เป็นต้น แต่ปัญหาที่ตามมาของคอนกรีตมวลเบา ระบบเซลลูล่าแบบเติมฟองอากาศที่มักเกิดขึ้นคือ การมีกำลังรับแรงอัดต่ำ ในช่วงอายุต้น การดูดซึมน้ำสูงและการหดตัวแห้งสูง ซึ่งตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ได้กำหนดไว้ว่าคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศชนิด C6 และ C8 สำหรับหน่วยน้ำหนักแห้งไม่เกิน 600 kg/m³

และ 800 kg/m³ ตามลำดับ ต้องมีกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 2 MPa ส่วนอัตราการดูดซึมน้ำต้องไม่สูงกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าปัญหาการเกิดสภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ส่วนหนึ่งมาจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะว่ากระบวนการเผาปูนซีเมนต์ได้ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เพิ่มขึ้นตามความต้องการปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 1 ตัน ที่ได้จากการผลิตต้องแลกกับการปลดปล่อยก๊าซ CO₂ ออกไปมีปริมาณมากถึง 0.80 ตัน โดยประมาณ เชื่อว่าเป็นเหตุให้เกิดปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อน (global warming) ดังจะเห็นได้จากอุทกภัยและวาทภัยที่มีความรุนแรงมากขึ้น จนกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมระดับโลก นักวิจัยทั่วโลกได้ตระหนักถึงผลกระทบดังกล่าว จึงพยายามแสวงหาวัสดุมาทดแทนปูนซีเมนต์โดยการนำเอาวัสดุพอลิซิลาน (วัสดุที่มี SiO₂ หรือมีทั้ง SiO₂ และ Al₂O₃ ในปริมาณสูง) มาแทนที่ปูนซีเมนต์เพียงบางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงเป็นที่มาของการมี “ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก”

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (hydraulic cement) คือ ปูนซีเมนต์ที่สามารถก่อตัวและแข็งตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยการนำเอาสารผสมเพิ่มมาเติมหรือแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ได้แก่ สารลดน้ำ หินปูนบดละเอียด วัสดุพอลิซิลานต่าง ๆ เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็ก (blast furnace slag) เถ้าลอยถ่านหิน (coal fly ash) ซิลิกาฟุ้ง (silica fume หรือ micro silica) ในปริมาณร้อยละ 15 – 20 โดยประมาณ เพื่อช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซ CO₂สู่ชั้นบรรยากาศตามข้อตกลงที่ประเทศไทยได้ให้สัตยาบันของการเป็นสมาชิกภายใต้กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) และข้อตกลงปารีส (Paris Agreement) เมื่อปี พ.ศ. 2558 ว่าด้วยการมีส่วนร่วมในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas: GHG) ลงร้อยละ 20 ภายในปี พ.ศ. 2573 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2550

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างได้ทั่วไป งานก่อสร้างขนาดใหญ่ที่ต้องการกำลังอัด ความทนทานสูงเช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากข้อมูล CEMBUREAU (The European Cement Association) แสดงให้เห็นว่าในสหภาพยุโรปมีการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (ตามมาตรฐาน EN 197-1) มากกว่าร้อยละ 75 ของปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ทั้งหมด หลายประเทศในภูมิภาคเอเชียมีการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเพิ่มมากขึ้น เช่น บังคลาเทศ อินโดนีเซีย และเวียดนาม ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 (คล้ายกับมาตรฐาน ASTM C 1157/C 1157M ของประเทศสหรัฐอเมริกา) มี 6 ชนิด ได้แก่ Type GU เป็นชนิดใช้งานทั่วไป Type HE เป็นชนิดใช้งานที่ให้อายุการใช้งานในช่วงอายุต้น Type MS เป็นชนิดใช้งานที่ต้องการความทนซัลเฟต ปานกลาง Type HS เป็นชนิดใช้งานที่ต้องการความทนซัลเฟตสูง และ Type LH เป็นชนิดใช้งานที่ต้องการความทนต่ำ ส่วนงานวิจัยนี้ใช้ Type GU ชนิดใช้งานทั่วไป (general use) สำหรับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปมีคุณสมบัติเทียบเท่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกที่ผลิตและมีจำหน่ายในประเทศไทย ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 2594-2556) Type GU ได้แก่ ปูนงานโครงสร้างคาร์บอนต่ำหรือสูตรไฮบริด SCG อินทรีเพชรพลัส ปูนแดง 299 ทีพีไอ และปูนซีเมนต์บัวแดงไฮเทคเอ็กซ์ตร้า เป็นต้น

การเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมทำให้เกิดสิ่งปลูกสร้างรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว การเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือวัสดุที่ลดการปล่อยก๊าซ CO₂ จึงเป็นสิ่งที่ดี คอนกรีตมวลเบาเป็นหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างมากในประเทศไทย เพราะคอนกรีตมวลเบา

สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างต่าง ๆ ได้อย่างหลากหลาย เช่น ผนังกันห้อง ฉนวนกันความร้อนพื้นลาดฟ้า ตลอดจนวัสดุอุดรูโพรงใต้พื้นดิน เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสทำจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและสารเพิ่มฟองแบบเติมฟองอากาศโดยมีการอบไอน้ำภายใต้แรงดันต่ำ เพื่อต้องการปรับปรุงให้คอนกรีตสามารถรับกำลังได้เร็วขึ้นในช่วงอายุต้น

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษากำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสทำจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมสารเพิ่มฟองอากาศ การผลิตคอนกรีตมวลเบาเป็นแบบวิธีเติมฟองอากาศ (Pre-Formed Foam Method) คอนกรีตมวลเบาที่แข็งตัวแล้วมีการนำปอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60°C, 70 °C, และ 90 °C ภายใต้แรงดันไม่เกิน 0.4 ±0.1 MPa ก่อนการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ต้องการประมาณ 500 kg/m³ และ 800 kg/m³ คงที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกยี่ห้อหนึ่งในท้องตลาดที่ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2594-2556 และ ASTM C 1157 ส่วนน้ำผสมคอนกรีตใช้น้ำประปา และสารเพิ่มฟองที่ใช้เป็นชนิดสังเคราะห์แบบประจุลบ

3.2 ปฏิภาณส่วนผสมและการทดสอบ

ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.6 โดยมีส่วนผสมควบคุม (control mix) ใช้สัญลักษณ์เป็น CON ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 หน่วยน้ำหนักแห้งที่ต้องการ 500 kg/m³ ส่วนผสมอื่นใช้สัญลักษณ์ 0.6D500, 0.5D800, และ 0.6D800 ยกตัวอย่างเช่น 0.5D800 หมายถึง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 หน่วยน้ำหนักแห้งที่ต้องการ 800 kg/m³

การผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเริ่มจากการหาค่าความหนาแน่นของโฟมเหลวที่เจือจางแล้ว โดยใช้อัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อน้ำเปล่าในอัตราส่วน 1 ต่อ 40 เมื่อนำไปผ่านเครื่องสร้างโฟม (รูปที่ 2) ฉีดออกมาได้โฟมมีความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 45 kg/m³ (รูปที่ 3) มีการควบคุมค่าความหนาแน่นแห้งของของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเท่ากับ 500 kg/m³ และ 800 kg/m³ วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM C 796 [5]



รูปที่ 2 เครื่องสร้างฟอง



รูปที่ 3 การทดสอบความหนาแน่นโฟมเหลว

คอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสผลิตโดยวิธี Preformed-Foam Method ใช้เครื่องกำเนิดโฟมหรือเครื่องสร้างฟอง (foam generator) แบบถังแรงดัน ในการให้ฟองโฟมก่อนที่จะนำไปผสมกับคอนกรีตสด ซึ่งมีช่องเติม

สารเพิ่มฟองที่เจือจางกับน้ำตามสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องกำเนิดฟองประกอบด้วยอุปกรณ์ปรับลดแรงดันเข้าถังเพื่อให้ความดันภายในถังคงที่ 0.6 MPa ทำงานร่วมกับเครื่องอัดอากาศและมีอุปกรณ์ผสมของเหลวกับอากาศในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยให้ฟองในปริมาณมาก

ตารางที่ 1 ส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่าต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

หมายเหตุ : CON = Control mix, 0.6D800 หมายถึง W/C = 0.6 หน่วยน้ำหนักแห้งคอนกรีตที่ต้องการ 800 kg/m³

การผสมเริ่มจากการเตรียมวัสดุซึ่งน้ำหนัก น้ำและสารเพิ่มฟอง โดยน้ำหนักส่วนหนึ่งแยกเจือจางกับสารเพิ่มฟองในอัตราส่วนสารเพิ่มฟองต่อ น้ำ 1 : 40 เทใส่ลงในเครื่องสร้างฟอง จากนั้นเทปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกลงไปจนถึงผสมตามด้วยเทน้ำลงไปพร้อมทั้งเติมเครื่องผสมจะได้ซีเมนต์เพลสตัน จากนั้นฉีดฟองจากเครื่องสร้างฟองที่เตรียมไว้ ผสมต่อไปอีกจนส่วนผสมทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน ตั้งแต่เริ่มผสมใช้เวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นเทคอนกรีตสดลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร พร้อมทั้งเคาะแบบหล่อเล็กน้อยเพื่อให้คอนกรีตแน่นทั่วถึงกัน เมื่อครบ 24 ชั่วโมงจึงทำการแกะแบบออก ห่อด้วยพลาสติกกันน้ำระเหยออกจนถึงวันทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนักแห้งที่อายุบ่มต่าง ๆ

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อน ที่มีอายุบ่ม 3, 7, และ 28 วัน สำหรับส่วนผสมควบคุม (CON), 0.6D500, 0.5D800, และ 0.6D800 และแห้งทดสอบที่ผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70°C, และ 90 °C ภายใต้แรงดันไม่เกิน 0.4 ±0.1 MPa เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมง ภายหลังกอนกรีตมีอายุ 24 ชั่วโมง จำนวน 3 ก้อน สำหรับส่วนผสม CON, 0.6D500, 0.5D800, และ 0.6D800 ก่อนนำไปทดสอบได้ทำการปล่อยก้อนตัวอย่างให้เย็นตัวลงแล้วจึงทดสอบ เพื่อหาแรงกดสูงสุดหรือแรงอัดประลัย (ultimate) ทหารด้วยพื้นที่หน้าตัดขวางจึงได้กำลังรับแรงอัดประลัยเฉลี่ยตามสมการที่ 1 วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน BS 1881-116 [6]

$$\text{Compressive strength (MPa)} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

3.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร ที่มีอายุ 28 วัน แขน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำขึ้นจากน้ำ จากนั้นใช้ผ้าแห้งซับน้ำส่วนเกินที่ผิว นำไปชั่งน้ำหนักภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งค่าที่ได้คือน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่ารวมกับน้ำหนักน้ำที่ก้อนตัวอย่างดูดซึมเข้าไป จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ±5°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำก้อนตัวอย่างออกจากเตาอบ ปล่อยให้เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้องพร้อมทั้งชั่งน้ำหนัก ค่าที่ได้คือน้ำหนักอบแห้ง จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการดูดซึมน้ำหรือดูดกลืนน้ำของแต่ละก้อนตามสมการที่ 2 นำค่าที่ได้มาเฉลี่ยกันจากจำนวนแห้งทดสอบ 3 ก้อน วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน BS 1881-122 [7]

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{W_{\text{sat}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100 \quad (2)$$

3.5 การทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง

การทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง (dry unitweight) หรือความหนาแน่นแห้ง (dry density) ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร ที่ครบอายุบ่ม 28 วัน อบแห้งเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 4) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) ทหารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่างมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร (m³) หน่วยน้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³) ตามสมการที่ 3

$$\text{Dry density (kg/m}^3\text{)} = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Mix No.	Symbol	Hydraulic cement, C (kg)	Water, W (kg)	Foaming agent (kg)	W/C
1	CON	415	168.3	39.2	0.5
2	0.6D500	415	209.8	39.2	0.6
3	0.5D800	664	296.4	35.6	0.5
4	0.6D800	664	362.4	35.6	0.6

ตารางที่ 2 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงอัดสัมพัทธ์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูล่า

Mix No.	Symbol	Compressive strength (MPa)						Relative compressive strength to CON (%)					
		60°C	70°C	90°C	3-Day	7-Day	28-Day	60°C	70°C	90°C	3-Day	7-Day	28-Day
1	CON	1.6	1.9	2.1	1.1	1.6	2.2	100	100	100	100	100	100
2	0.6D500	1.4	1.7	1.9	0.8	1.4	1.9	88	89	90	73	88	86
3	0.5D800	2.2	2.4	2.6	1.5	2.0	2.7	138	126	124	136	125	123
4	0.6D800	2.0	2.2	2.3	1.2	1.8	2.4	125	116	110	109	113	109



รูปที่ 4 การทดสอบหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

4.1 กำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยและกำลังรับแรงอัดสัมพัทธ์ของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่อายุบ่มต่าง ๆ พบว่าส่วนผสมควบคุม (CON) ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.1 MPa, 1.6 MPa, และ 2.2 MPa สำหรับอายุบ่ม 3, 7, และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้น [8] เนื่องจากผลของดิกิริปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5 ส่วนผสม CON เมื่อผ่านการอบไอน้ำพบว่าให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.6 MPa, 1.9 MPa, และ 2.1 MPa สำหรับอุณหภูมิไอน้ำ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C ตามลำดับ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอุณหภูมิบ่มที่เพิ่มขึ้น การบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าการบ่มแบบป้องกันการสูญเสียน้ำ (ห่อด้วยพลาสติก) ที่อายุไม่เกิน 7 วัน แต่การบ่มไอน้ำทั้ง 3 อุณหภูมิให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าการบ่มแบบป้องกันการสูญเสียน้ำที่อายุ 28 วัน

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสส่วนผสม 0.6D500 เท่ากับ 0.8 MPa, 1.4 MPa, และ 1.9 MPa สำหรับอายุบ่ม 3 วัน, 7 วัน, และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้น แต่ให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าส่วนผสม CON เนื่องจากผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของส่วนผสม 0.6D500 ที่สูงกว่าส่วนผสม CON

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสส่วนผสม 0.5D800 เท่ากับ 1.5 MPa, 2.0 MPa, และ 2.7 MPa สำหรับอายุบ่ม 3 วัน, 7 วัน, และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้น แต่ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าส่วนผสม CON และ 0.6D500 เนื่องจากผลของหน่วยน้ำหนักส่วนผสม 0.5D800 ที่มีมากกว่าส่วนผสม CON และ 0.6D500

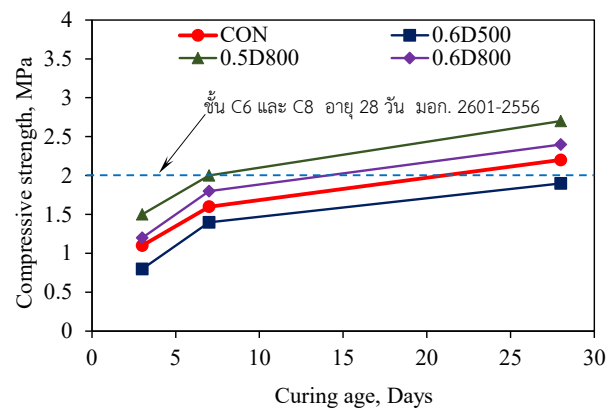
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสส่วนผสม 0.6D800 เท่ากับ 1.2 MPa, 1.8 MPa, และ 2.4 MPa สำหรับอายุบ่ม 3 วัน, 7 วัน, และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งกำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุบ่มที่

เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับทุกส่วนผสม (รูปที่ 5) แต่ให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าส่วนผสม 0.5D800 เนื่องจากผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของส่วนผสม 0.6D800 ที่สูงกว่าส่วนผสม 0.5D800

ส่วนกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเมื่อผ่านการอบไอน้ำพบว่าส่วนผสม 0.6D500 ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 1.4 MPa, 1.7 MPa, และ 1.9 MPa สำหรับอุณหภูมิไอน้ำ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C ตามลำดับ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอุณหภูมิบ่มที่เพิ่มขึ้น แต่ให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าส่วนผสม CON

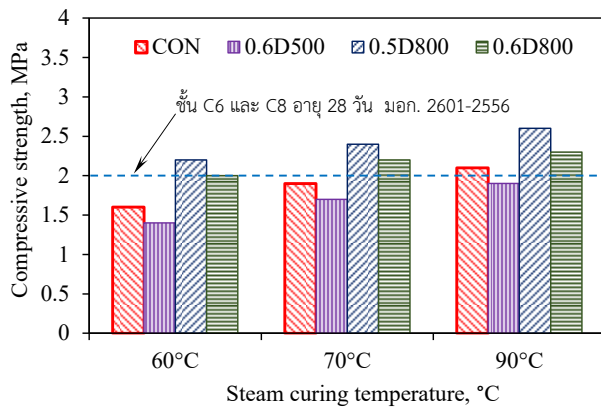
ส่วนผสม 0.5D800 เมื่อผ่านการอบไอน้ำพบว่าให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.2 MPa, 2.4 MPa, และ 2.6 MPa สำหรับอุณหภูมิไอน้ำ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C ตามลำดับ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอุณหภูมิบ่มที่เพิ่มขึ้น และส่วนผสม 0.6D800 ให้กำลังรับแรงอัดเท่ากับ 2.0 MPa, 2.2 MPa, และ 2.3 MPa สำหรับอุณหภูมิไอน้ำ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C ตามลำดับ ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามอุณหภูมิบ่มที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่าส่วนผสม 0.5D800 ดังรูปที่ 6

การอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C ได้ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นในช่วงอายุต้น เนื่องจากเป็นการเร่งดิกิริปฏิกิริยาไฮเดรชันให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (C-A-H) คล้ายกับผลงานวิจัยที่พบโดย Kilincarslan et al. (2023) [9]



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสและอายุบ่ม 3, 7, และ 28 วัน

Mix No.	Symbol	Water absorption (%)			
		60 °C	70 °C	90 °C	28-Day
1	CON	42	36	35	30
2	0.6D500	43	40	39	32
3	0.5D800	33	31	27	23
4	0.6D800	35	34	29	26



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสและอุณหภูมิอบไอน้ำ 60, 70, และ 90 °C

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ศึกษานี้เมื่อเทียบกับมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ชั้นคุณภาพ C6 และ C8 สำหรับหน่วยน้ำหนักแห้งไม่เกิน 600 kg/m³ และ 800 kg/m³ ตามลำดับ พบว่าส่วนผสม 0.6D500 ให้กำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำกว่า 2 MPa ส่วนการบ่มด้วยไอน้ำพบว่าส่วนผสม CON ต้องบ่มที่อุณหภูมิ 90 °C ส่วนผสม 0.5D800 และ 0.6D800 ต้องบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C หรือ 70 °C หรือ 90 °C จึงจะให้กำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน มอก. (ไม่น้อยกว่า 2 MPa)

4.2 การดูดซึมน้ำ

ตารางที่ 3 แสดงการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสความหนาแน่นแห้งประมาณ 500 kg/m³ และ 800 kg/m³ พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำของส่วนผสม CON ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 30 % โดยน้ำหนัก และเมื่อผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C มีอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 42 %, 36 %, และ 35 % โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งลดลงตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่วนการดูดซึมน้ำของส่วนผสม 0.6D500 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 32 % โดยน้ำหนัก ซึ่งสูงกว่า CON และเมื่อผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C มีอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 43 %, 40 %, และ 39 % โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งลดลงตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้นและการดูดซึมน้ำสูงกว่า CON เนื่องจากส่วนผสม 0.6D500 มีอัตราส่วน W/C ที่สูงกว่าจึงดูดซึมน้ำมากกว่า

ส่วนผสม 0.5D800 มีอัตราการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 23 % โดยน้ำหนัก และเมื่อผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C มีอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 33 %, 31 %, และ 27 % โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งดูดซึมน้ำลดลงตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น และส่วนผสม 0.6D800 มีอัตราการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 26 % โดยน้ำหนัก และเมื่อผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C มีอัตราการดูดซึมน้ำเท่ากับ 35 %, 34 %, และ 29 % โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งดูดซึมน้ำสูงกว่าส่วนผสม 0.5D800 เนื่องจากส่วนผสม 0.6D800 มีอัตราส่วน W/C ที่สูงกว่าจึงดูดซึมน้ำมากกว่า คล้ายกับผลงานวิจัยโดย Kilincarslan et al. (2023) [9] ที่พบว่า การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาลดลงได้ด้วยวิธีการบ่มอบไอน้ำโดยคอนกรีตความหนาแน่นต่ำ (300 kg/m³) ดูดซึมน้ำต่ำกว่าคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง (500 kg/m³)

การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสที่ศึกษานี้เมื่อเทียบกับมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ชั้นคุณภาพ C6 และ C8 พบว่าส่วนผสม

0.5D800 ผ่านมาตรฐาน (มอก. กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 25) ส่วนวิธีการบ่มด้วยไอน้ำทำให้ผลการดูดซึมน้ำทุกส่วนผสมไม่ผ่านมาตรฐาน มอก.

ตารางที่ 3 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

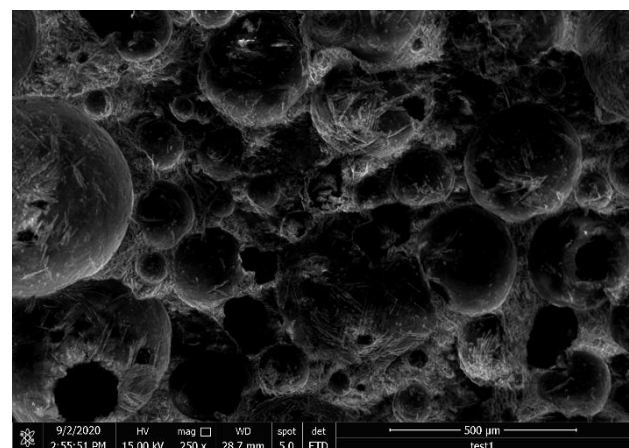
4.3 หน่วยน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของส่วนผสม CON ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 510 kg/m³ และเมื่อผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 487 kg/m³, 492 kg/m³, และ 497 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งสูงขึ้นตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่วนหน่วยน้ำหนักแห้งของส่วนผสม 0.6D500 ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 506 kg/m³ ซึ่งต่ำกว่า CON และเมื่อผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 481 kg/m³, 489 kg/m³, และ 494 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งสูงขึ้นตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น และมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำกว่า CON เนื่องจากส่วนผสม 0.6D500 มีอัตราส่วน W/C ที่สูงกว่าจึงมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำกว่า

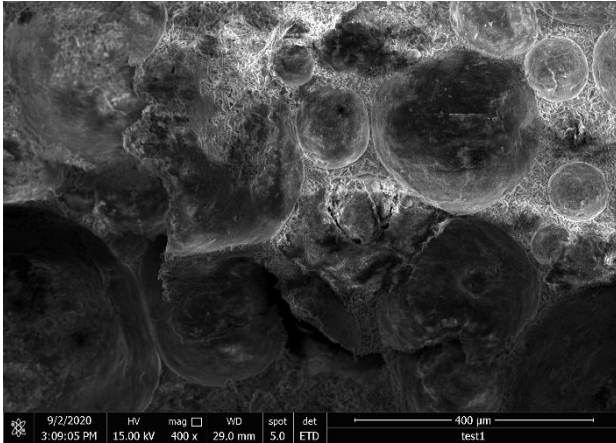
ส่วนผสม 0.5D800 มีหน่วยน้ำหนักแห้งที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 821 kg/m³ และเมื่อผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 790 kg/m³, 796 kg/m³, และ 813 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งหน่วยน้ำหนักแห้งสูงขึ้นตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น และส่วนผสม 0.6D800 มีหน่วยน้ำหนักแห้งที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 808 kg/m³ และเมื่อผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C มีหน่วยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 787 kg/m³, 791 kg/m³, และ 805 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำกว่าส่วนผสม 0.5D800 เนื่องจากส่วนผสม 0.6D800 มีอัตราส่วน W/C ที่สูงกว่าจึงมีหน่วยน้ำหนักแห้งต่ำกว่า เช่นเดียวกับก่อนตัวอย่างของหน่วยน้ำหนักแห้ง 500 kg/m³

ตารางที่ 4 หน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลส

Mix No.	Symbol	Dry unitweight (kg/m ³)			
		60 °C	70 °C	90 °C	28-Day
1	CON	487	492	497	510
2	0.6D500	481	489	494	506
3	0.5D800	790	796	813	821
4	0.6D800	787	791	805	808



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ภาพ SEM ของ CLC บ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 90 °C ของส่วนผสม 0.5D800 ก) ขยาย 250 เท่า ข) ขยาย 400 เท่า

ตัวอย่างส่วนผสม 0.5D800 ที่ผ่านการบ่มไอน้ำอุณหภูมิ 90 °C ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าทุกส่วนผสมสำหรับกรณีบ่มด้วยไอน้ำ เมื่อนำเศษชิ้นตัวอย่างไปถ่ายภาพขยายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคปรากฏโพรงอากาศมีการกระจายสม่ำเสมอ ผังโพรงไม่ทะลุเชื่อมต่อกัน (รูปที่ 7ก) และเมื่อขยายภาพเข้าใกล้พบว่าเนื้อเพสต์มีความหนาแน่น (รูปที่ 7ข) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำต่ำและหน่วยน้ำหนักสูงอย่างมีนัยสำคัญ

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสทำจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสมสารเพิ่มฟอง อายุบ่มเกิน 28 วันและอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C ภายใต้แรงดันไม่เกิน 0.4 ± 0.1 MPa อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.5 และ 0.6 ความหนาแน่นแห้งประมาณ 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สรุปได้ดังนี้

- กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามอายุบ่มและอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น
- หน่วยน้ำหนักแห้งของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นแต่หน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น
- การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นแต่ดูดซึมน้ำลดลงตามอุณหภูมิอบไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการบ่มด้วยไอน้ำให้ผลการดูดซึมน้ำไม่ผ่านมาตรฐาน มอก. 2601-2556

แนะนำว่าการบ่มไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 °C, 70 °C, และ 90 °C ภายใต้แรงดันไม่เกิน 0.4 ± 0.1 MPa ที่ศึกษานี้ให้ผลการดูดซึมน้ำยังไม่เป็นที่น่า

พอใจเนื่องจากไม่ผ่านมาตรฐาน มอก. ที่กำหนดไว้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมระยะเวลาในการบ่มไอน้ำนานขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ประเทจเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 และได้รับความอนุเคราะห์สถานที่วิจัยและเครื่องมือทดสอบจากสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Karakurt, C., H. Kurama and Topçu İ. B. (2010). Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. *Cement and Concrete Composites*. 32(1), pp.1-8.
- [2] Neville, A. M., and Brooks, J. J. (1990). *Concrete technology*. Longman Singapore publishers, pp.339-340.
- [3] Just, A., and Middendorf, B. (2009). Microstructure of high-strength foam concrete. *Materials Characterization*. 60(7), pp.741-748.
- [4] Nambiar, E. K. K. and Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*. 28(5), pp.475-480.
- [5] ASTM C 796, (2004). Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam, *Annual Book of ASTM Standards*.
- [6] BS 1881-116, (1983). Method of Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes, *British Standards Institute*.
- [7] BS 1881-122, (2011). Method of Determination of Water Absorption Test for Concrete, *British Standards Institute*.
- [8] Suryanita, R., Maizir, H., Zulapriansyah, R., Subagiono, Y. and Arshad, M. F. (2022). The effect of silica fume admixture on the compressive strength of the cellular lightweight concrete. *Results in Engineering*, 14, pp.100445.
- [9] Kilincarslan, S., Davraz, M. and Isildar, N. (2023). Investigation of the effect of autoclaving on foam concrete properties. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(4), pp.100722.