

การศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติแม่เหล็กในวัสดุซีเมนต์คอมโพสิต

Mechanical and Magnetic Properties of Cement Composite

ณัฐพงษ์ เชื้อวังคำ (Nattapong Chuewangkam)* ดร.สุปรีย์ พิณิสุนทร (Dr.Supree Pinitsoontorn)*****

ดร.ปริญญ์ จินดาประเสริฐ (Dr.Prinya Chindaprasirt)****

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มสมบัติเชิงกลและสมบัติแม่เหล็กให้กับซีเมนต์ โดยผสมผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน (NdFeB) เข้ากับซีเมนต์เฟส ในการขึ้นรูปซีเมนต์เฟส เติมน้ำผงแม่เหล็ก NdFeB ปริมาณ 10% 20% 30% 40% 50% 60% และ 70% โดยน้ำหนักมวลรวม กำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เป็น 0.5 หรือ 0.6 ศึกษาการไหลตัวพบว่าเมื่อเติมน้ำผงแม่เหล็ก NdFeB ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่าการไหลตัวลดลง ศึกษาความเป็นผลึก พบเฟสแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (C-S-H) และเฟสแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ปริมาณมาก จากการศึกษพบว่าสมบัติเชิงกลและสมบัติแม่เหล็กได้รับการพัฒนาขึ้นเมื่อเติมน้ำผงแม่เหล็ก NdFeB มากขึ้น โดยซีเมนต์เฟสที่เติมน้ำผงแม่เหล็ก NdFeB 70% สามารถรับแรงกดสูงสุดได้ 56.36 Mpa และยังมีเสถียรในด้านสมบัติแม่เหล็กเมื่ออายุซีเมนต์ผ่านไป 300 วัน มีค่าแมกนีไทเซชันและค่าแม่เหล็กคงค้าง เท่ากับ 83.41 emu/g และ 56.31 emu/g ตามลำดับ ดังนั้นซีเมนต์เฟสผสมผงแม่เหล็ก NdFeB จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการขึ้นรูปวัสดุแม่เหล็กคอมโพสิต เพราะมีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติแม่เหล็กที่ดี

ABSTRACT

In this work, the objective is improve the mechanical and magnetic properties of cement by mixing Neodymium Iron Boron (NdFeB) magnetic powder in a cement paste. To form a cement paste, the NdFeB magnetic powder of 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% and 70% by total weight was added. The water/cement ratio of 0.5 and 0.6 for used. The flow of cement paste decreased propotionally with the amount of NdFeB magnetic powder. The phase formation of cement paste was found to be mostly the calcium silicate hydrate (C-S-H) and the high calcium hydroxide (Ca(OH)₂), It was found that the mechanical and magnetic properties were improved with the addition of NdFeB magnetic powder. The cement paste containing the powder of 70% showed the maximum compressive strength of 56.36 Mpa. The magnetic properties were very stable for over 300 days. The saturation magnetization and remanance were 83.41 emu/g and 56.31 emu/g, respectively. Therefore, cement paste mixed with NdFeB magnetic powder was another alternative for forming magnetic composite materials. It showed both improved mechanical properties and magnetic properties.

คำสำคัญ: วัสดุซีเมนต์คอมโพสิต สมบัติแม่เหล็ก สมบัติเชิงกล

Keywords: Magnetic properties, Mechanical properties, Cement paste composite

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์และนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ และนาโนเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*** Institute of Nanomaterials Research and Innovation for Energy (IN-RIE), Research Network of NANOTEC-KKU (RNN), Khon Kaen University

**** ศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ปัจจุบันซีเมนต์มีความสำคัญและใช้งานอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม อีกทั้งยังมีการศึกษาวิธีการเพิ่มสมบัติต่างๆ ให้กับซีเมนต์ เช่น การเพิ่มสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้าง เช่น ใช้ในการละลายหิมะที่เกาะบนถนนเดินรถ ทางรถไฟ หรือสะพาน ซึ่งโดยปกติจะใช้เกลือหรือสารเคมีในการละลาย ทำให้ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม การเพิ่มสมบัติทางด้านไฟฟ้านี้สามารถทำได้โดยการเติมเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ในโครงสร้างซีเมนต์ (Chung, 2000) และมีการศึกษาการเพิ่มความเป็นฉนวนความร้อนให้กับซีเมนต์ โดยการเติมไมโครซิลิกา เพื่อใช้ในการก่อสร้างที่ไม่ต้องการให้ความร้อนผ่านเข้าไปภายในมาก (Fu, Chung, 1997) ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาการเพิ่มสมบัติด้านแม่เหล็กให้กับซีเมนต์ โดยใช้วัสดุผงแม่เหล็กนีโอไดเมียมไอรอนโบรอน $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (NdFeB) ในการผสมกับซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุผงแม่เหล็ก NdFeB เป็นแม่เหล็กถาวร มีความเป็นแม่เหล็กสูง มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย มีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (M_s) ค่าแม่เหล็กคงค้าง (M_r) และค่าโคเออร์ซิวิตี (Coercivity, H_c) ที่สูง ดังนั้นจึงมีการใช้ผงแม่เหล็ก NdFeB ผสมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นแม่เหล็กให้กับวัสดุนั้นๆ

เนื่องจากซีเมนต์เป็นตัวประสานที่ดี ยกตัวอย่างในงานคอนกรีต ซีเมนต์สามารถยึดหิน กรวด หินเข้าด้วยกัน และมีความแข็งแรง ดังนั้นซีเมนต์จึงสามารถที่จะใช้เป็นวัสดุประสานเพื่อขึ้นรูปวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตที่มีสมบัติแม่เหล็กได้ ในปัจจุบันมีหลายวิธีที่จะขึ้นรูปวัสดุแม่เหล็ก อย่างเช่น วิธีขึ้นรูปโดยใช้แรงอัดเพียงอย่างเดียว (Cold pressing) และวิธีใช้ทั้งแรงอัดและความร้อน (Hot pressing) ให้กับผงแม่เหล็ก โดยเติมพอลิเมอร์อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) เป็นตัวประสาน โดยวิธีการนี้จะได้วัสดุแม่เหล็กคอมโพสิตที่มีสมบัติแม่เหล็กที่สูง ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย (Dobrzański, Drak, 2004) วิธีขึ้นรูปโดยใช้แรงเหวี่ยง (Centrifugal casting) เป็นวิธีขึ้นรูปวัสดุแม่เหล็กโดยการหลอมโลหะที่มีสมบัติแม่เหล็กให้ละลายแล้วเทใส่ในแม่พิมพ์ของเครื่อง จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยง เมื่อโลหะเย็นตัวลงจึงเกิดเป็นวัสดุแม่เหล็กรูปทรงวงแหวน (Nowosielski, Babilas, 2007) ซึ่งวิธีที่ได้กล่าวมานี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนและมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นการใช้ซีเมนต์ในการขึ้นรูปวัสดุแม่เหล็กคอมโพสิตให้มีความแข็งแรงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากต้นทุนไม่สูงมากและเทคนิคในการทำไม่ซับซ้อน

ในการขึ้นรูปวัสดุซีเมนต์คอมโพสิตจำเป็นต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของซีเมนต์ ปัจจุบันมีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของซีเมนต์ เช่น เติมนีโอซิลิกา (Nano-silica) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube) เส้นใยเหล็ก (Steel-fiber) เป็นต้น (Jeng-Ywan, Ta-Peng, 2006) และยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการเติมผงแม่เหล็ก Fe_2O_3 (Ali, 2012) และผงแม่เหล็ก Fe_3O_4 ในซีเมนต์ (AminEmail, 2013) ผลปรากฏว่าผงแม่เหล็ก Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 สามารถเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดได้ (Compressive strength) ดังนั้นในโครงงานวิจัยนี้จึงมีความคาดหวังว่าการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB จะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากผงแม่เหล็ก NdFeB เป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูง มีค่าความสามารถในการรับกำลังอัดประมาณ 1100 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร และมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัด (Flexural strength) ประมาณ 250 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นการเพิ่มสมบัติด้านแม่เหล็กและสมบัติเชิงกลให้กับซีเมนต์ โดยการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB เข้าไปแทรกในโครงสร้างซีเมนต์ และยังเป็นการขึ้นรูปวัสดุแม่เหล็กคอมโพสิตด้วยต้นทุนที่ถูกและวิธีการไม่ซับซ้อน อีกทั้งสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปพัฒนาด้านวิศวกรรมเพื่อเป็นประโยชน์ในอนาคตต่อไป

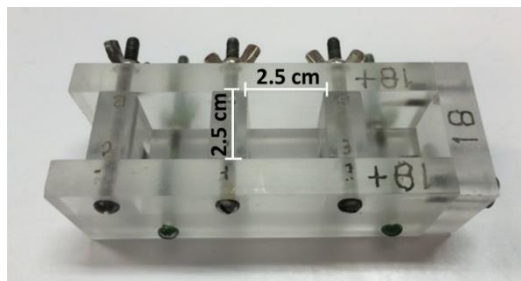
วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติแม่เหล็กและสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB และศึกษาวิธีการขึ้นรูปวัสดุแม่เหล็กโดยใช้ซีเมนต์เพสต์เป็นตัวประสาน

วิธีการวิจัย

วิธีการขึ้นรูปซีเมนต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB

ขึ้นรูปตัวอย่างซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบ โดยผสมผงแม่เหล็ก NdFeB (บริษัท Molycorp magnequench มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 7630 kg/m^3) กับซีเมนต์ในปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70% โดยน้ำหนักต่อมวลรวมซีเมนต์เพสต์ ด้วยมาตรฐานการผสมซีเมนต์ ASTM C305-06 โดยใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ $W/C = 0.5$ แต่เฉพาะตัวอย่างที่มีการผสมผงแม่เหล็ก 70% ใช้ $W/C = 0.6$ โดยจะขึ้นรูปใส่ในแม่พิมพ์อะคริลิกทรงลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร³ แสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงแม่พิมพ์อะคริลิกทรงลูกบาศก์ขนาด $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เซนติเมตร³

วิธีทดสอบการไหลของซีเมนต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB

ทดสอบค่าการไหลตัวของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเสร็จใหม่ ตามมาตรฐาน ASTM C143 แสดงในภาพที่ 2ก โดยเทซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเสร็จลงในกรวยที่ใช้ทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลางฐานของกรวยทดสอบมีขนาด 38 มิลลิเมตร จากนั้นยกกรวยขึ้นและจับเวลาพร้อมกับวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของซีเมนต์เพสต์ แสดงในภาพที่ 2ข โดยจะวัดบนเส้นที่แสดงบนแผนทดสอบดังภาพจำนวน 3 เส้น ทุก 30 วินาที 1 2 3 4 และ 5 นาที จากนั้นคำนวณออกมาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การไหลตัว โดยคำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\text{ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลาง (ม.ม.)} - 38 \text{ (ม.ม.)}}{38 \text{ (ม.ม.)}} \times 100\% = \text{เปอร์เซ็นต์การไหลตัว}$$



ก



ข

ภาพที่ 2 แสดงการทดสอบค่าการไหลตัวตามมาตรฐาน ASTM C143

วิธีการศึกษาสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB

ศึกษาสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์คอมโพสิตที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB โดยทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109 ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น CY-6040A12 บริษัท Chun yen testing machines ซึ่งจะทดสอบทุก ๆ 7 วัน และ 28 วัน

วิธีการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของซีเมนต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB

นำชิ้นส่วนซีเมนต์เพสต์ที่แตกจากการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดมาดเป็นผง แล้วใส่กระเปาะตัวอย่าง (Sample holder) วัดด้วยเครื่อง Versa Lab บริษัท Quantum design โดยมีเงื่อนไขการวัดดังนี้

1. วัด M-H ตามอายุซีเมนต์ 7, 14, 21, 28, 90 และ 300 วัน ให้สนามแม่เหล็กจาก -30,000 Oe ถึง 30,000 Oe โดยวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน
2. วัด M ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ให้สนามแม่เหล็กที่ 30,000 Oe แล้ววัดในช่วงอุณหภูมิ 50-390 เคลวิน

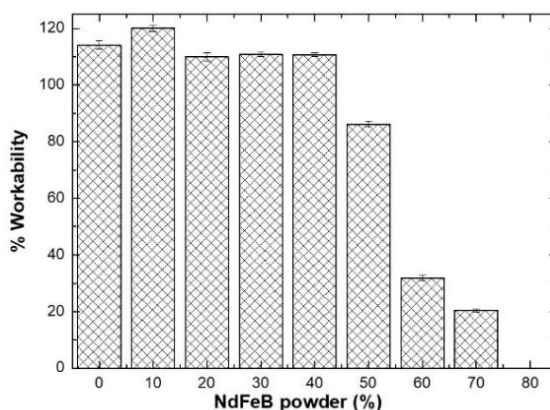
วิธีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์คอมโพสิต

ศึกษาโครงสร้างผลึกและการเกิดเฟสของซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) รุ่น Empryan บริษัท Panalytical ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกของซีเมนต์เพสต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และศึกษาพื้นผิวโครงสร้างทางจุลภาคภายในซีเมนต์เพสต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น LEO-1450 บริษัท Carl zeiss

ผลการวิจัย

ค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB

ผลการทดสอบค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ แสดงในภาพที่ 3 โดยกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมผงแม่เหล็ก 10% จนถึง 40% ค่าการไหลตัวของซีเมนต์เพสต์มีเปอร์เซ็นต์ที่ใกล้เคียงกัน มีค่าประมาณ 110% - 120% แต่เมื่อเติมผงแม่เหล็กเพิ่มเป็น 50% 60% 70% และ 80% ค่าการไหลตัวของซีเมนต์เพสต์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเติมผงแม่เหล็กปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณผงซีเมนต์และน้ำมีปริมาณลดลงตามไปด้วย เพราะปริมาณน้ำคิดตามสัดส่วนน้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักซีเมนต์ เมื่อปริมาณผงซีเมนต์ลดลงจะส่งผลให้ปริมาณน้ำลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นในส่วนผสมที่มีปริมาณผงแม่เหล็กมากจะมีปริมาณน้ำอยู่น้อย และน้ำบางส่วนไปเกาะที่ผิวของผงแม่เหล็กทำให้เหลือน้ำปริมาณน้อยลง ส่งผลให้ค่าการไหลตัวของซีเมนต์เพสต์ลดลง



ภาพที่ 3 แสดงการทดสอบค่าการไหลตัวตามมาตรฐาน ASTM C143

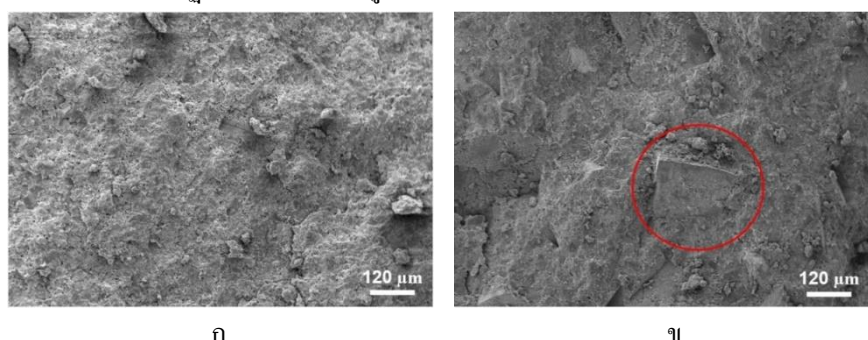
ปริมาณผงแม่เหล็ก NdFeB ที่เดิมในการขึ้นรูปตัวอย่างซีเมนต์เพสต์สามารถอ้างอิงได้จากผลการทดสอบค่าการไหลของซีเมนต์เพสต์ โดยในซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าการไหลตัวที่สูง แสดงในภาพที่ 4ก ทำให้ขึ้นรูปได้รูปทรงตามแม่พิมพ์ที่กำหนดได้ดี ส่วนซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าการไหลตัวที่ต่ำ แสดงในภาพที่ 4ข ขึ้นรูปได้ไม่ดีเท่าที่ควร ส่วนซีเมนต์เพสต์ที่การเติมผงแม่เหล็ก NdFeB ปริมาณ 80% แสดงในภาพที่ 4ค ได้ค่าการไหลตัวของซีเมนต์เพสต์เป็น 0% นั่นแสดงว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ เกิดจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับผงซีเมนต์ ทำให้ผงซีเมนต์ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวประสานยึดเกาะกับผงแม่เหล็กได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดผงแม่เหล็ก NdFeB ที่เติมลงในซีเมนต์เพสต์ได้สูงสุดที่ปริมาณ 70% โดยน้ำหนักมวลรวม



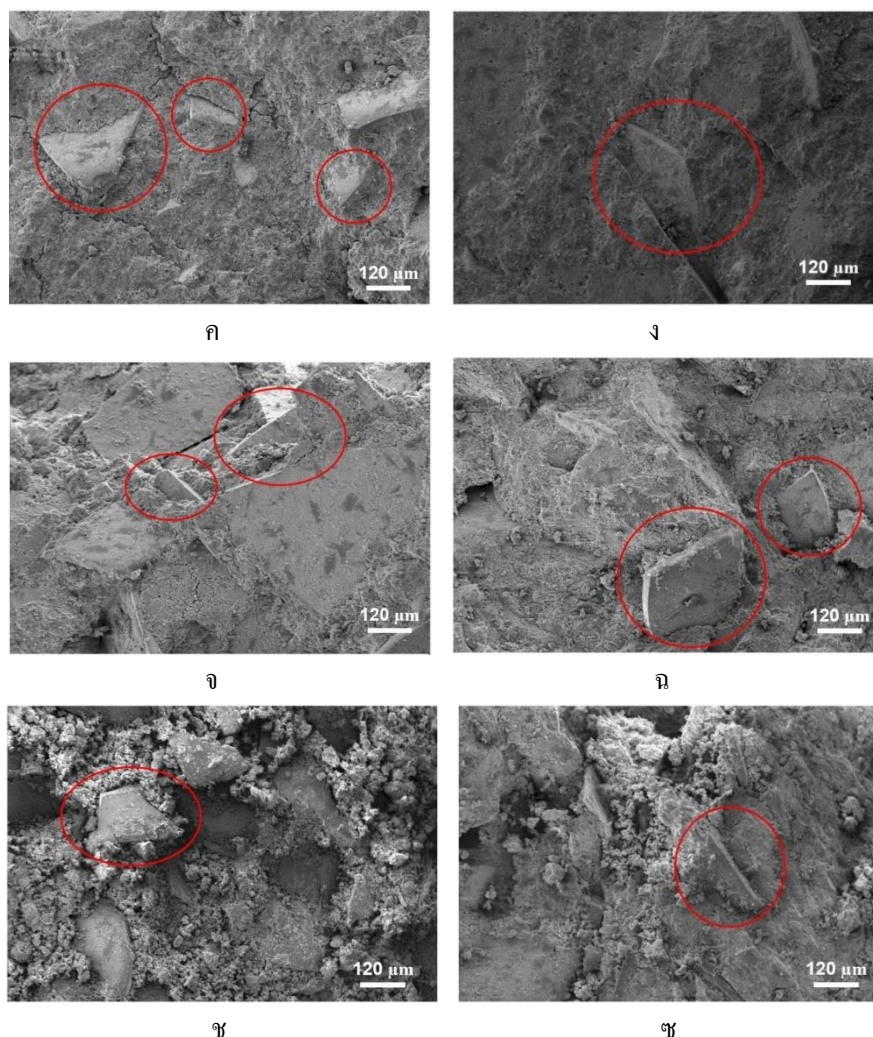
ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการไหลตัวของซีเมนต์เพสต์ (ก) ค่าการไหลสูง (ข) ค่าการไหลต่ำ (ค) ไม่มีการไหล

โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB

ข้อมูลภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่า ถ่ายชิ้นส่วนที่แตกของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกล แสดงในภาพที่ 5 จากภาพจะสังเกตเห็นผงแม่เหล็กมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมดังที่วงกลมไว้ในภาพที่ 5ข - 5ค โดยมีขนาดประมาณ 200 ไมโครเมตร มีการกระจายตัวอยู่บนเนื้อของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งในซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB ตั้งแต่ 0% - 50% ลักษณะของเนื้อซีเมนต์มีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อผงซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างเพียงพอจนซีเมนต์แข็งตัวและช่วยยึดเกาะประสานผงแม่เหล็กที่ขึ้นรูปให้มั่นคงได้ แต่ในกรณีที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB 60% - 70% จะสังเกตเห็นเม็ดเล็ก ๆ เกาะตามพื้นผิวซีเมนต์เพสต์ตามที่เห็นในภาพ 5ข และ 5ค ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำไม่สมบูรณ์ เกิดจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา จึงเหลือผงปูนซีเมนต์ที่เป็นเม็ดเล็กดังที่เห็นในภาพ



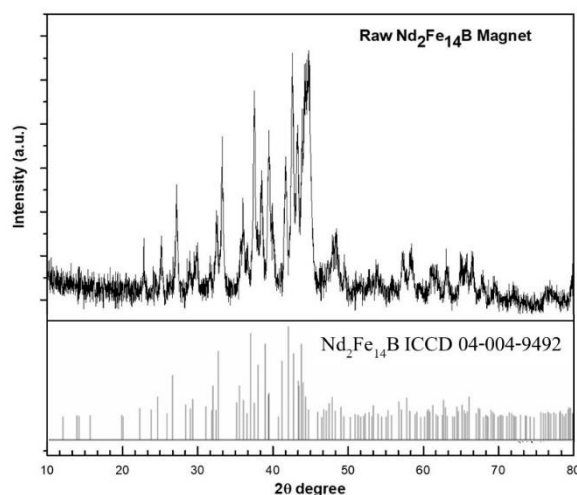
ภาพที่ 5 แสดงภาพถ่าย SEM โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB (ก) 0% (ข) 10%



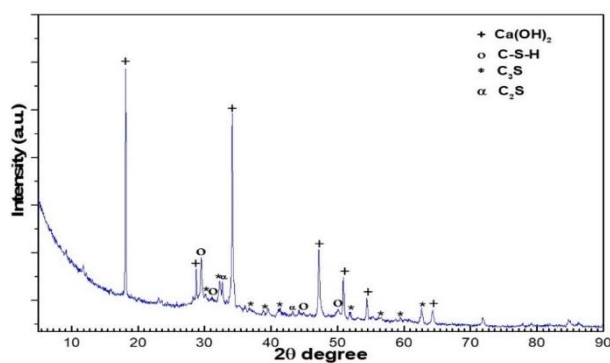
ภาพที่ 5 แสดงภาพถ่าย SEM โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB (ค) 20% (ง) 30% (จ) 40% (ฉ) 50% (ช) 60% (ซ) 70%

ความเป็นผลึกของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB

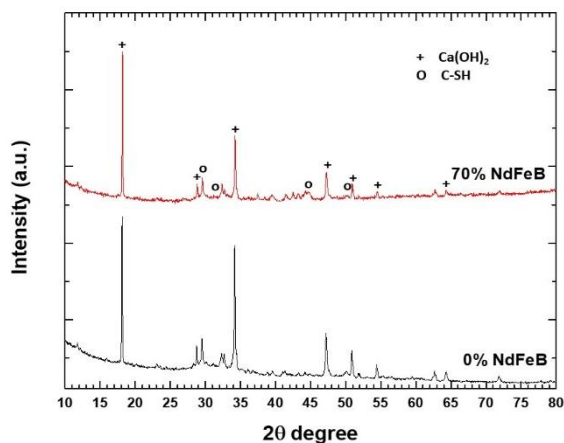
ผลึกของผงแม่เหล็ก NdFeB แสดงในภาพที่ 6 พบว่ามีส่วนประกอบทางเคมีของผลึกเป็น $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) เทียบจากฐานข้อมูล ICDD (International Center for Diffraction Data) หมายเลข 04-004-9492 และศึกษาความเป็นผลึกของซีเมนต์เพสต์ที่ขึ้นรูปโดยไม่ได้เติมผงแม่เหล็ก (ซีเมนต์+น้ำ) แสดงในภาพที่ 7 เมื่อเทียบจากฐานข้อมูลจากงานวิจัยของ Tkaczewska (Tkaczewska, 2013) พบว่ามีส่วนประกอบทางเคมีของผลึก 4 ชนิด ประกอบไปด้วย $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ (C-S-H), C_3S และ C_2S เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาลักษณะผลึกของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงแม่เหล็ก 70% กับซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการเติมผงแม่เหล็ก แสดงในภาพที่ 8 พบว่าตำแหน่งพิกของเฟส $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ (C-S-H) ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงแม่เหล็ก 70% มีค่า Intensity ต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ได้เติม นั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ (C-S-H) ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมผงแม่เหล็ก 70% น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการเติมผงแม่เหล็ก เป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าการไหลตัวและภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



ภาพที่ 6 การศึกษาความเป็นผลึกของผงแม่เหล็ก NdFeB

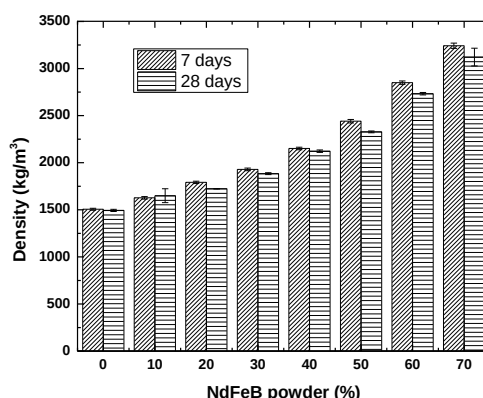


ภาพที่ 7 การศึกษาความเป็นผลึกของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB



ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความเป็นผลึกของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB 70% และไม่ได้เติมผงแม่เหล็ก
ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB

ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์หาจากมาตรฐาน ASTM C642 จากภาพที่ 9 แสดงค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB พบว่าทั้งอายุซีเมนต์ 7 และ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงแม่เหล็ก NdFeB ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผงแม่เหล็ก NdFeB มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 7630 kg/m^3 ซึ่งสูงกว่าปูนซีเมนต์มาก โดยซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก 70% ที่อายุซีเมนต์ 28 วัน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 3384.00 kg/m^3 ซึ่งมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่เติมผงแม่เหล็กที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1680.95 kg/m^3 ถึง 50.33 เปอร์เซ็นต์

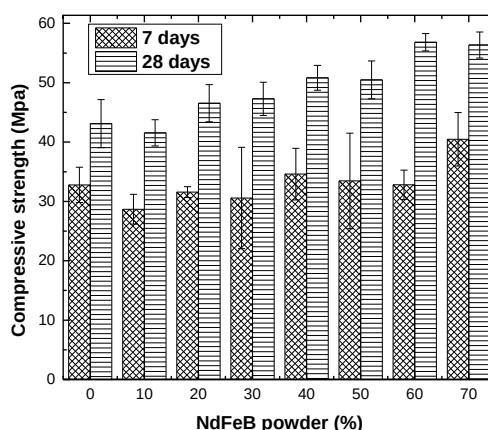


ภาพที่ 9 ความหนาแน่นของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB 0%-70% ที่อายุซีเมนต์ 7 วัน และ 28 วัน

ตามมาตรฐาน ASTM C642

สมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB

ความสามารถในการรับกำลังอัดที่อายุซีเมนต์เพสต์ 7 วัน และ 28 วัน แสดงในภาพที่ 10 พบว่าที่อายุซีเมนต์ 28 วัน มีค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์สูงกว่า 7 วัน เนื่องจากที่อายุซีเมนต์ 7 วัน การเกิดปฏิกิริยาระหว่างผงซีเมนต์กับน้ำยังไม่สมบูรณ์ทำให้โครงสร้างภายในซีเมนต์ยังไม่แข็งแรงและไม่สามารทำหน้าที่ยึดเกาะผงแม่เหล็กได้อย่างเต็มที่ และข้อมูลยังแสดงให้เห็นอีกว่าซีเมนต์เพสต์อายุ 7 วัน ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนของการพัฒนา กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เมื่อเติมผงแม่เหล็ก NdFeB เพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากอายุซีเมนต์เพสต์ 28 วัน ที่ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำสมบูรณ์กว่า ส่งผลให้ซีเมนต์มีการยึดเกาะผงแม่เหล็กได้ดี และการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผงแม่เหล็ก NdFeB มีค่าความสามารถในการรับกำลังอัดที่สูง (1100 เมกะปาสกาล (wikipedia, 2017)) ซึ่งจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างภายในซีเมนต์เพสต์ได้มากยิ่งขึ้น

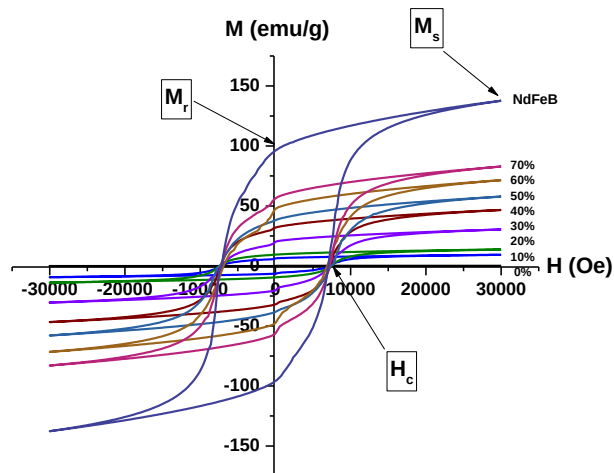


ภาพที่ 10 ความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB ที่อายุซีเมนต์ 7 วัน และ 28 วัน

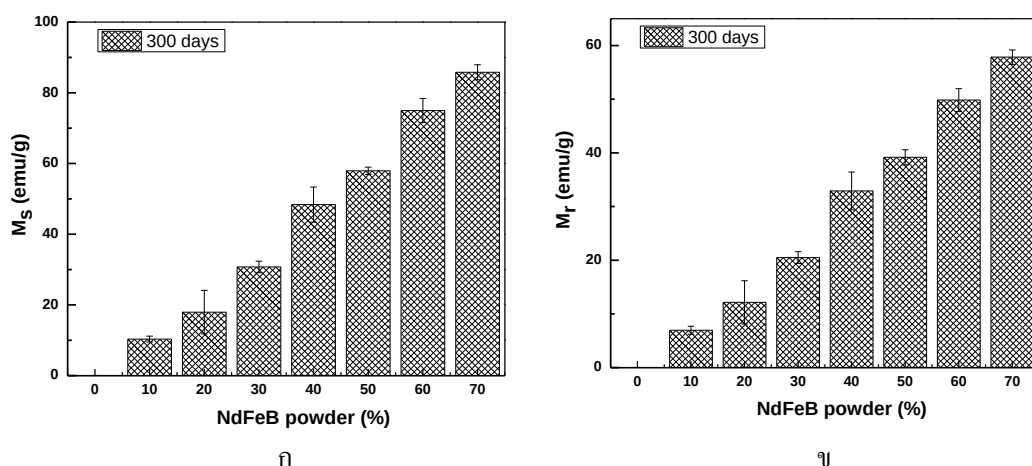
ผลการศึกษาสมบัติแม่เหล็กของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB

สมบัติแม่เหล็กของซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB ที่อายุซีเมนต์ 28 วัน แสดงข้อมูลออกมาในรูปของกราฟฮิสเตอร์ิซิสระหว่างค่าโมเมนต์แม่เหล็ก (M) และค่าสนามแม่เหล็ก (H) ซึ่งบ่งบอกถึงสมบัติแม่เหล็กที่ตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกของซีเมนต์เพสต์แสดงในภาพที่ 11 ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวสูงสุดและค่าแม่เหล็กคงค้างของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB 0% - 70% ที่อายุซีเมนต์ 300 วัน มีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวสูงสุดและค่า

แม่เหล็กคงค้างมากขึ้นตามลำดับ แสดงในภาพที่ 12ก และ 12ข ตามลำดับ โดยผงแม่เหล็ก NdFeB มีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวสูงที่สุดเท่ากับ 138.54 emu/g จากค่าความเป็นแม่เหล็กที่สูงของผงแม่เหล็ก NdFeB จึงส่งผลให้เมื่อเติมในซีเมนต์เพสต์ปริมาณมากค่าความเป็นแม่เหล็กก็จะมากขึ้นเช่นเดียวกัน

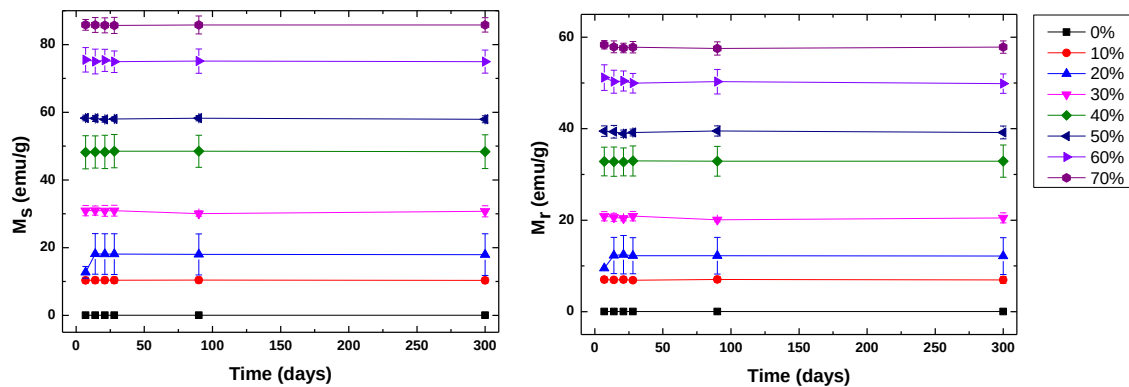


ภาพที่ 11 แสดงกราฟฮิสเทอรีซิสของผงแม่เหล็ก NdFeB และซีเมนต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB ที่อายุซีเมนต์ 28 วัน



ภาพที่ 12 (ก) ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (ข) ค่าแม่เหล็กคงค้างของซีเมนต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB ที่อายุซีเมนต์ 300 วัน

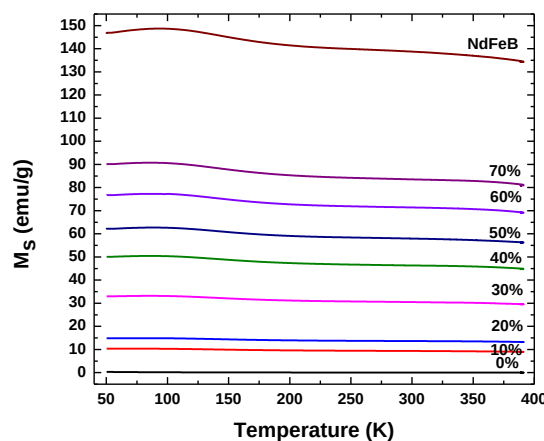
เมื่อสมบัติแม่เหล็กของซีเมนต์เพสต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB ที่อายุซีเมนต์ 7 14 21 28 90 และ 300 วัน พบว่าเมื่อซีเมนต์เพสต์ผ่านไปถึง 300 วัน ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวและค่าแม่เหล็กคงค้างของซีเมนต์เพสต์ในแต่ละความเข้มข้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถกล่าวได้ว่าซีเมนต์เพสต์มีค่าความเป็นแม่เหล็กที่มีความเสถียรสูงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึง 300 วัน แสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวและค่าแม่เหล็กคงค้างของซีเมนต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB ที่อายุซีเมนต์ 7 14 21 28 90 และ 300 วัน

ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติแม่เหล็กของซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB

อุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อความเป็นแม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็ก จากภาพที่ 14 แสดงกราฟผลของอุณหภูมิต่อค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของผงแม่เหล็ก NdFeB และซีเมนต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB จากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิในช่วง 50 – 100 เคลวิน ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของกราฟแต่ละเส้นมีค่าสูง จากนั้นเส้นกราฟเริ่มโค้งลงเรื่อยๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำผงแม่เหล็ก NdFeB และซีเมนต์เพสต์ที่มีการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB มีความเป็นแม่เหล็กที่สูง แสดงถึงการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของทิศทางโมเมนต์แม่เหล็ก จนเมื่อมีพลังงานความร้อนเข้ามากระทำส่งผลให้ค่าความเป็นแม่เหล็กลดลง เหตุนี้เนื่องจากพลังงานความร้อนส่งผลต่อทิศทางโมเมนต์แม่เหล็กของผงแม่เหล็ก NdFeB เกิดการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวลดลง (Smit, Wijn, 1959)



ภาพที่ 14 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติแม่เหล็กของผงแม่เหล็ก NdFeB และซีเมนต์ที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB 0%-70%

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถขึ้นรูปซีเมนต์เพสต์คอมโพสิตให้มีสมบัติแม่เหล็กได้ โดยการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB ตั้งแต่ 10%-70% โดยน้ำหนักมวลรวม ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5 (และ 0.6 ในกรณีเติม 70%) ได้ค่าการไหลตัวที่เหมาะสมสามารถขึ้นรูปตามแบบแม่พิมพ์ที่กำหนดได้ โครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์พบว่าการเติมผงแม่เหล็ก NdFeB 60% และ 70% ปฏิกริยาระหว่างน้ำกับซีเมนต์ไม่สมบูรณ์ ยังเหลือส่วนของผงซีเมนต์ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อศึกษา

ความเป็นผลึกของซีเมนต์พบว่ามีซีเมนต์เฟสที่ประกอบไปด้วยเฟสของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C-S-H, C_3S และ C_2S จากมากไปน้อยตามลำดับ และผงแม่เหล็ก NdFeB มีเฟสตรงตามสารประกอบ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

สมบัติเชิงกลพบว่าความสามารถในการรับกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมผงแม่เหล็ก NdFeB ในปริมาณมากขึ้นอย่างชัดเจนที่อายุซีเมนต์ 28 วัน และค่าความหนาแน่นของซีเมนต์เฟสที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงแม่เหล็ก NdFeB ที่เติมมากขึ้นเช่นเดียวกัน

สมบัติแม่เหล็กพบว่าค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวและค่าแม่เหล็กคงค้างของซีเมนต์เฟสที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เฟสที่ไม่ได้เติมอยู่มาก และเมื่อเติมผงแม่เหล็ก NdFeB ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าแมกนีไทเซชันและค่าแม่เหล็กคงค้างมากขึ้นเช่นเดียวกัน อุณหภูมิส่งผลต่อค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวของซีเมนต์เฟสที่เติมผงแม่เหล็ก NdFeB โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัวมีค่าลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทแม็กนิควอนซ์โคราช จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงแม่เหล็กในการทำวิจัยในครั้งนี้ และงานวิจัยนี้สนับสนุนโดย Thailand Research Fund (TRF) in cooperation with Khon Kaen University (RSA5980014), and the Institute of Nanomaterials Research and Innovation for Energy (IN-RIF), Khon Kaen University and the National Nanotechnology Center (NANOTEC), NSTDA, Ministry of Science and Technology, Thailand, through its program of Research Network of NANOTEC (RNN).

เอกสารอ้างอิง

- Ali Khoshakhlagh. Effects of Fe_2O_3 Nanoparticles on Water Permeability and Strength Assessments of High Strength Self-Compacting Concrete: Journal of Materials. Science and Technology 2012; 28(1): 73-82.
- Amin Email M. S, El-Gamal M. A, Hashem F. S. Effect of addition of nano-magnetite on the hydration characteristics of hardened Portland cement and high slag cement pastes: Thermal Analysis and Calorimetry 2013; 112(3): 1253–1259.
- Chung D.D.L. Cement reinforced with short carbon fibers a multifunctional material: Composites Part B: Engineering 2000; 31(6-7): 511-526.
- Dobrzański L.A, Drak M. Structure and properties of composite materials with polymer matrix reinforced Nd–Fe–B hard magnetic nanostructured particles: Materials Processing Technology 2004; (157-158): 650-657.
- Ewelina T.. Mechanical Properties of Cement Mortar Containing Fine-Grained Fraction of Fly Ashes: Civil Engineering 2013; 3: 54-68.
- Fu X, Chung D.D.L. 'Cement and Concrete Research: ADVANCED MATERIALS 1997; 27(12): 1799-1804.
- Jeng-Ywan Shih, Ta-Peng Chang, Tien-Chin Hsiao. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite: Materials Science and Engineering A 2006; 424: 266–274.
- Nowosielski R, Babilas R. 'Fabrication of bulk metallic glasses by centrifugal casting method: Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2007; 20(1-2): 487-490.
- Rikard Y., Ulf J., Britt-Marie S., Itai P.. Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques: Cement and Concrete Research 2009; 39(5): 433-439.

Smit J, Wijn H.P.J. Ferrites. Holland: Phillips Technical Library; 1959.

Wikipedia. Neodymium magnet [online] 2017 [cited 4 December 2017]. Available

from: https://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet.

Yuyang B., Shuqiang G., Lan J., Kai T., Weizhong D.. Extraction of Rare Earth Elements from Permanent Magnet

Scraps by FeO–B₂O₃ Flux Treatment: Springer 2015.