

ความหนาแน่นฟลักซ์จากแม่เหล็กถาวรในต้นแบบ ตู้เย็นแม่เหล็กที่มีโรเตอร์แม่เหล็กอ่อน

Flux Density from Permanent Magnets in Magnetic Refrigerator Prototype with Soft Magnetic Rotor

นวลจุฑา เนียมจันทร์, ชัยโรจน์ ใหญ่ประเสริฐ และชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล*

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ตำบลไทยบุรี อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

Nuanjuta Niamjan, Chairot Yaiprasert and Chitnarong Sirisathitkul*

Department of Physics, School of Science, Walailak University,

Thai Buri, Tha Sala, Nakhon Si Thammarat 80160

Received: August 22, 2018; Accepted: September 14, 2018

บทคัดย่อ

ตู้เย็นแม่เหล็กเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนของวัสดุแมกนีโตแคลอริก (magnetocaloric material) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอก งานวิจัยนี้กำหนดให้ระบบทำความเย็นประกอบด้วย แม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน (neodymium-iron-boron) 4 แท่ง มีแม่เหล็กอ่อนคือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (low-carbon steel) เป็น pole face และเชื่อมแม่เหล็ก 2 แท่ง เข้าด้วยกัน ล้อมโรเตอร์แม่เหล็กอ่อนจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ การจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics สามารถแสดงการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากโครงสร้าง และวิเคราะห์หัวแปรที่เหมาะสมในการออกแบบตู้เย็นแม่เหล็ก ได้แก่ (1) ความกว้างของช่องว่างอากาศที่สามารถบรรจุวัสดุแมกนีโตแคลอริกประมาณ 10 มิลลิเมตร (2) ความกว้างของแม่เหล็กอ่อนเป็น pole face ประมาณ 15 มิลลิเมตร และ (3) ความกว้างของแท่งแม่เหล็กถาวรประมาณ 30 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กโดยรอบบริเวณช่องว่างอากาศมีค่าสูงสุด 1.13 เทสลา และมีค่าต่ำสุด 0.07 เทสลา

คำสำคัญ : ตู้เย็นแม่เหล็ก; ปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริก; นีโอดีเมียมไอรอนโบรอน; เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ; ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

Abstract

Magnetic refrigerator is a new technology that can reduce the temperature beneath the room temperature by virtue of heat transfer from magnetocaloric materials in changing magnetic fields. In this research, the cooling system is composed of 4 neodymium-iron-boron permanent magnets and soft magnetic carbon low-carbon steels acting as pole faces, linkages between 2 bars of permanent

magnets surrounding a soft magnetic rotor. The COMSOL Multiphysics program was used to simulate the distribution in magnetic flux density and analyze the optimum parameters in designing a magnetic refrigerator. The magnetic flux densities as high as 1.13 T and as low as 0.07 T were obtained by using (1) the width of the air gap to be occupied by magnetocaloric materials around 10 mm, (2) the width of the pole faces of about 15 mm, and (3) the approximate width of permanent magnets of 30 mm.

Keywords: magnetic refrigerator; magnetocaloric effect; neodymium-iron-boron; low carbon steel; magnetic flux density

1. คำนำ

ตู้เย็นแม่เหล็กเป็นนวัตกรรมเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจากการวิจัย (รัตติกร และยงยุทธ, 2547; Tura and Rowe, 2011) เพื่อทดแทนตู้เย็นที่ใช้อยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเทคโนโลยีการทำความเย็นในบ้านเรือนทั่วไปและในระดับอุตสาหกรรมมีพื้นฐานมาจากระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (vapor-compression refrigeration system) ที่สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และเป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะเรือนกระจก ต่างจากการลดอุณหภูมิในตู้เย็นแม่เหล็กที่ใช้ปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริก (magnetocaloric effect) (รัตติกร และยงยุทธ, 2547) ซึ่งอุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกที่จัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุแมกนีโตแคลอริก เช่น อัลลอยของแกโดลิเนียมและสารประกอบแลนทานัมแมงกานีสที่เจือแคลเซียมหรือแกโดลิเนียม (Phromchuai *et al.*, 2014) เอนโทรปีที่ลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะดีแมกนีโตเซชัน (demagnetization) ที่โมเมนต์แม่เหล็กที่ขั้วสุดจะทำให้เกิดการคายความร้อนของระบบ ด้วยวิธีการนี้ การเลือกวัสดุแมกนีโตแคลอริกที่มีค่าอุณหภูมิกูรีในช่วงอุณหภูมิต่ำของตู้เย็นทั่วไปจะสามารถลดอุณหภูมิระบบให้ต่ำลง ประยุกต์เป็นเครื่องทำความเย็นด้วยสนามแม่เหล็กได้

ระบบทำความเย็นด้วยสนามแม่เหล็กจำเป็นต้องออกแบบสนามแม่เหล็กค่าสูงที่สามารถ

จัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็กของวัสดุแมกนีโตแคลอริกให้เกิดสภาวะแมกนีโตเซชัน สลับกับสนามแม่เหล็กค่าต่ำให้เกิดสภาวะดีแมกนีโตเซชัน เพื่อให้เกิดปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริกเป็นวัฏจักร ลดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง การกำเนิดฟลักซ์แม่เหล็กโดยทั่วไปนิยมใช้แม่เหล็กถาวรมากกว่าแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแม่เหล็กจากตัวนำยิ่งยวด เนื่องจากแม่เหล็กถาวรสามารถสร้างสนามแม่เหล็กโดยไม่ต้องให้พลังงานเพิ่มเข้าไปในระบบ งานวิจัยในปัจจุบันสามารถใช้การจำลองชนิดและรูปร่างของโครงสร้างแม่เหล็ก เพื่อกำหนดสนามแม่เหล็กที่ต้องการในระบบทำความเย็นด้วยสนามแม่เหล็กก่อนการสร้างอุปกรณ์จริง

งานวิจัยโครงสร้างที่ทำหน้าที่กำเนิดสนามแม่เหล็กในตู้เย็นแม่เหล็ก ส่วนใหญ่มีการออกแบบที่ดัดแปลงจาก Halbach cylinder (Björk *et al.*, 2010; You *et al.*, 2016; Lorenz and Kevlishvili, 2017; Ryu *et al.*, 2017) ซึ่งเป็นชั้นแม่เหล็กถาวรประกอบขึ้นเป็นทรงกระบอกกลวง ให้มีฟลักซ์แม่เหล็กรั่วออกบริเวณรอบนอกน้อย และมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแกนกลางของทรงกระบอกสูงกว่าการใช้แม่เหล็กเดี่ยว (Halbach, 1980) การกำเนิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงในช่องว่างอากาศ (air gap) ซึ่งจะเป็นบริเวณบรรจุวัสดุแมกนีโตแคลอริก เพียงอย่างเดียว จะไม่สามารถเกิดปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริก

เป็นวัฏจักร ลดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้ จำเป็นต้องดัดแปลงโครงสร้างให้มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำสลับกันไปด้วย ดังตัวอย่างการออกแบบโครงสร้างในปี ค.ศ. 2016 โดย Ryu และคณะ (2017) เป็น Halbach cylinder ซ้อนกัน 2 ชั้น ที่มีแกนร่วมกัน แต่ละชั้นประกอบด้วยแท่งแม่เหล็กถาวร 12 แท่ง จัดเรียงตัวล้อมรอบช่องว่างแกนกลางที่มีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงได้ถึง 2 เทสลา การจำลองให้ทรงกระบอกกลวงชั้นในหมุนได้ ส่วนชั้นนอกตรึงไว้ ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าสูงและต่ำ เกิดการแมกนีโตเซชันและดีแมกนีโตเซชันวัสดุแมกนีโตแคลอริก ได้อย่างต่อเนื่อง ต่อมาในปี ค.ศ. 2017 Lorenz และ Kevlishvili (2017) ได้พัฒนาโครงสร้างที่มีพื้นฐานมาจาก Halbach cylinder ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อยาวที่มีแม่เหล็กถาวร เป็นขั้วยื่นออกมาจากแกนกลางเพื่อให้เกิดบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กสูงและต่ำอยู่ใกล้ ๆ กัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในแนวเชิงมุม ซึ่งมีประโยชน์สำหรับให้วัสดุแมกนีโตแคลอริกหมุนด้วยความถี่ที่มีค่าน้อยลง แต่ยังมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในช่องว่างอากาศสูงสุดได้ถึง 1.5-1.65 เทสลา

นอกจากการดัดแปลง Halbach cylinder ข้างต้นแล้ว ยังมีงานวิจัยต้นแบบที่มีเอกลักษณ์แตกต่างออกไป เช่น ระบบทำความเย็นด้วยสนามแม่เหล็กที่ออกแบบและสร้างขึ้นที่ Federal University of Santa Catarina โดย Lozano และคณะ (2017) ซึ่งใช้แม่เหล็กถาวรประกบกับแม่เหล็กอ่อนเป็นโรเตอร์ (rotor) หมุนปรับให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเฉลี่ยสูงถึง 0.892 เทสลา ใน 2 บริเวณของช่องว่างอากาศ และมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำประมาณ 0.011 เทสลา ใน 2 บริเวณของช่องว่างอากาศ สำหรับแนวคิดการใช้โรเตอร์ที่เป็นแม่เหล็กอ่อนทั้งชั้น แล้วใช้แท่งแม่เหล็กถาวรตั้งล้อม ซึ่งเสนอโดย Tušek และคณะ

(2009) มีความน่าสนใจ คือ ลดการใช้แม่เหล็กถาวรที่มีราคาสูงและน้ำหนักมาก และลดพลังงานในการหมุนโรเตอร์ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาต่อยอดตัวแปรในโครงสร้างที่ออกแบบโดย J. Tušek และคณะ ทั้งส่วนแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กอ่อน ที่มีผลต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในช่องว่างอากาศที่สามารถบรรจุวัสดุแมกนีโตแคลอริก ในการใช้งานในตู้เย็นแม่เหล็ก เพิ่มเติมจากการจำลองการกระจายฟลักซ์แม่เหล็กในทุกส่วนของโครงสร้าง และการเปลี่ยนแปลงตามแนวเส้นรอบวงการหมุนของโรเตอร์ เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมในการพัฒนาเครื่องต้นแบบต่อไป

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์ปัญหาแบบจำลองระบบแม่เหล็กไฟฟ้าอาศัยสมการของแมกซ์เวลล์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพื้นฐานในแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{กฎของแอมแปร์}) \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{กฎของฟาราเดย์}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{กฎของเกาส์สำหรับไฟฟ้า}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็ก}) \quad (4)$$

เมื่อ \mathbf{E} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น V/m ; \mathbf{D} คือ การกระจัดทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็น C/m^2 ; \mathbf{H} คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น A/m ; \mathbf{B} คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น T ; \mathbf{J} คือ ความหนาแน่นกระแส มีหน่วยเป็น A/m^2 ; ρ คือ ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น C/m^3

สมการ (4) กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็ก ทำให้สามารถแก้ปัญหาของระบบผ่านศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก ดังสมการ

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

เมื่อ \mathbf{A} คือ ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb/m และอาศัยสมการของความต่อเนื่อง

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (6)$$

ระบบปิดของการจำลองวัสดุแม่เหล็กมีสมการที่ใช้อธิบายสมบัติของตัวกลาง ได้แก่

$$D = \epsilon_0 E + P \tag{7}$$

$$B = \mu_0 (H + M) \tag{8}$$

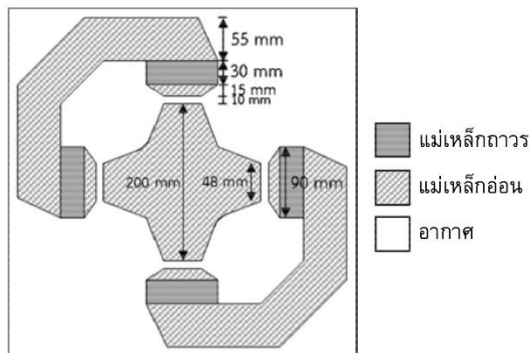
$$J = \sigma E \tag{9}$$

เมื่อ ϵ_0 คือ permittivity of free space ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m}$); μ_0 คือ permeability of free space ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$); σ คือ ค่าการนำไฟฟ้าของตัวกลาง มีหน่วยเป็น S/m; P คือ electric polarization vector; M คือ magnetization vector

3. อุปกรณ์และวิธีการ

โปรแกรม COMSOL Multiphysics สามารถสร้างแบบจำลองโดยนิยามปริมาณทางฟิสิกส์ และคำนวณเขตของสมการที่เกี่ยวข้องด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์และวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณในระบบที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของวัสดุในโครงสร้างที่ซับซ้อน โดยแบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ มีลักษณะเป็นตาข่ายหรือ mesh และเชื่อมต่อกันที่จุดร่วมของสองชิ้นส่วนขึ้นไป จุดรวมดังกล่าวเรียกว่า node ในการจำลองโครงสร้างสองมิติซึ่งมีต้นแบบมาจากโครงสร้างของ Tušek และคณะ (2009) ประกอบด้วยแม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียมไอรอนโบรอน (neodymium-iron-boron) 4 แห่ง มีแม่เหล็กอ่อนคือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (low-carbon steel) เป็น pole face และเชื่อมแม่เหล็ก 2 แห่งเข้าด้วยกัน ล้อมโรเตอร์แม่เหล็กอ่อนจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ดังการกำหนดขนาดตัวอย่างในรูปที่ 1 ภายใน model wizard เลือก space dimension เป็น 2D เนื่องจากแบบจำลองเป็นโครงสร้างที่ไม่สมมาตรในแนวแกนใด ๆ และใช้โมดูล AC/DC เลือก rotating machinery, magnetic (rmm) ที่เหมาะสำหรับใช้

แก้ปัญหาในการจำลองระบบแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 1 โครงสร้างแม่เหล็กตามแบบของ Tušek และคณะ (2009) ที่มีแม่เหล็กถาวร 4 ชั้น แสดงด้วยสีทึบ ส่วนที่เหลือ ได้แก่ pole face แท่งเชื่อม และโรเตอร์ตรงกลาง ทำจากแม่เหล็กอ่อน

สำหรับ linear material ในโมดูล rotating machinery, magnetic (rmm) เลือก Ampère's law และกำหนด constitutive relation เป็น relative permeability ซึ่งมีค่าแมกนีโตเซชันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามแม่เหล็ก $M = \chi_m H$ เมื่อมีสนามแม่เหล็กกระทำต่อวัสดุ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$B = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu_0 \mu_r H = \mu H \tag{10}$$

เมื่อ χ_m คือ magnetic susceptibility; μ_r คือ relative permeability; μ คือ สภาพซึมซาบได้ (permeability) มีหน่วยเป็น H/m

สำหรับ nonlinear material หรือแม่เหล็กถาวร ต้องคำนึงถึงผลจากฮีสเทอรีซิส และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง B_r ซึ่งเป็นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก ในโมดูล rotating machinery, magnetic (rmm) เลือก Ampère's law และกำหนด constitutive relation เป็น remanent flux density คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างของ

แม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียมโอรอนโบรอน กำหนดค่า เป็น 1.44 เทสลา และ relative permeability เป็น 1.05 สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังสมการ

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (11)$$

เมื่อ B_r คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กคงค้าง มีหน่วยเป็น T

สำหรับแม่เหล็กอ่อน คือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เลือกว่าวัสดุเป็น low carbon steel 1010 มีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก B และสนามแม่เหล็ก H ไม่เป็นเส้นตรง ในโมดูล rotating machinery, magnetic (rmm) เลือ ก Ampère's law และกำหนด constitutive relation เป็น HB curve สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังสมการ

$$H = f(|B|) \frac{B}{|B|} \quad (12)$$

แบบจำลองประกอบด้วยโดเมนของแม่เหล็กถาวร แม่เหล็กอ่อน และอากาศ เป็นวัสดุต่างชนิดกัน แต่ขอบเขตของแต่ละโดเมนมีสนามต่อเนื่องกัน จึงเลือกวิธีการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมเป็น form assembly และสร้าง pairs ขึ้นเพื่อเชื่อมต่อขอบเขตของ 2 โดเมน ที่ต่างกันแต่อยู่ติดกัน ในโมดูล rotating machinery, magnetic (rmm) กำหนด continuity on interior boundary โดยเลือก pairs หรือคู่ของขอบเขตโดเมนทั้งหมดภายในโครงสร้างของแบบจำลอง และเพื่อความถูกต้องในการคำนวณ ต้องกำหนดขนาดของ mesh ให้เหมาะกับขนาดของแบบจำลอง เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากโครงสร้างที่จำลองมีขนาดเล็ก เริ่มต้นกำหนดขนาดของ mesh เป็น extremely fine และตรวจสอบว่าในบริเวณที่เล็กที่สุดของแบบจำลอง ต้องมีขนาดของ mesh น้อยกว่า หนึ่งในส่วนของขนาดโครงสร้างดังกล่าว เช่น กรณีช่องว่างมีความกว้าง 1 มิลลิเมตร กำหนดให้ mesh ภายในช่องว่างมีขนาดไม่เกินกว่า 0.2 มิลลิเมตร เพื่อให้จุด node ครอบคลุมข้อมูลของ

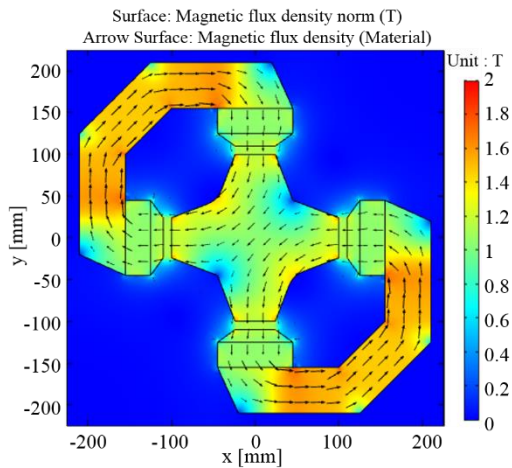
แบบจำลอง ผลการจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อน 10^{-6}

หลังจากนั้นแก้ปัญหาในแต่ละจุด node เพื่อนำมาสู่ปริมาณทางฟิสิกส์ คือ ศักย์สเกลาร์ไฟฟ้า V ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก A และศักย์สเกลาร์แม่เหล็ก V_m ทำให้สามารถคำนวณและจำลองความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กทั้งภายในและรอบโครงสร้างแม่เหล็ก โดยเปลี่ยน (1) ความกว้างของช่องว่างอากาศ (2) ความกว้างของวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่เป็น pole face และ (3) ความกว้างของแท่งแม่เหล็กถาวร เพื่อศึกษาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป

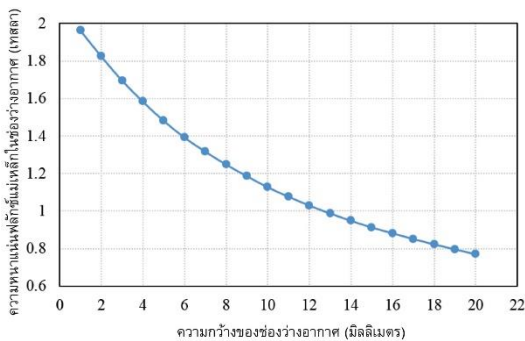
4. ผลการวิจัยและวิจารณ์

การจำลองโดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics สามารถแสดงการกระจายของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในและโดยรอบโครงสร้าง ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 การใช้สี่ระบุถึงขนาดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก โดยบริเวณสีแดงมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูง 2 เทสลา ส่วนสีเหลือง เขียว ฟ้ำ และน้ำเงิน คือ บริเวณที่มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กลดต่ำลง ตามลำดับ ส่วนลูกศรในภาพแสดงทิศสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียมโอรอนโบรอน 4 แท่ง ส่งผลให้วัสดุแม่เหล็กอ่อนตอบสนองโดยมีการจัดเรียงโมเมนต์แม่เหล็ก เกิดแนวเส้นแรงแม่เหล็กวนตามลูกศรเป็นสองลูปที่สมมาตรตามโครงสร้าง การใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเพราะเป็นวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่มีค่าสภาพซึมซาบได้สูง เหนียวทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กที่นำทางภายในโครงสร้างและลดการกระจายออกนอกโครงสร้าง ซึ่งยืนยันได้จากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กรอบโครงสร้างมีขนาดไม่เกิน 0.4 เทสลา ต่างจากบริเวณช่องว่างอากาศ ที่เกิดการเหนี่ยวนำให้เส้นแรงที่ขนานและใกล้กัน โดยสามารถใช้สนามแม่เหล็กที่สูงและสม่ำเสมอใน

การทำความเข้าใจด้วยสนามแม่เหล็กได้



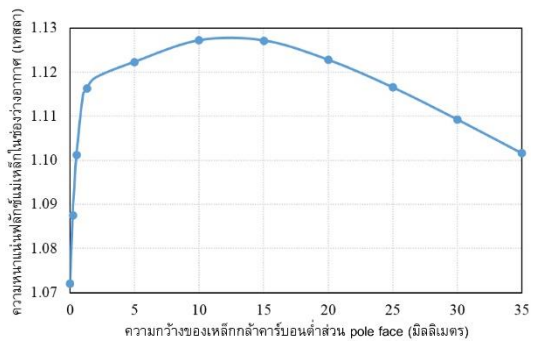
รูปที่ 2 การแสดงผลการจำลองความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจากโครงสร้างแม่เหล็กตามแบบของ Tušek และคณะ (2009)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างช่องว่างอากาศกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายใน

การจำลองให้ความกว้างของช่องว่างอากาศเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1-20 มิลลิเมตร พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในช่องแคบลดลงจากประมาณ 1.96 จนถึง 0.77 เทสลา ดังแสดงในรูปที่ 3 ส่วนของแม่เหล็กอ่อนที่ประกบกับแม่เหล็กถาวรเป็น pole face ทั้ง 4 ชั้น มีบทบาทในการบีบเส้นแรงแม่เหล็กเข้าสู่ช่องว่าง แสดงด้วยรูป

ที่ 4 เมื่อกำหนดความกว้างของแท่งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นศูนย์ จะให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศ มีค่าเท่ากับ 1.07 เทสลา แต่สังเกตในรูปที่ 5 ได้ว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากไม่มีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่เป็น pole face บีบเส้นแรงแม่เหล็กให้มีทิศทางขนานกัน เมื่อเพิ่มความกว้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็น 10-15 มิลลิเมตร พบดังรูปที่ 4 ว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศ สูงเกือบ 1.13 เทสลา ขนาดดังกล่าวจึงเหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ใช้ในตู้เย็นแม่เหล็ก

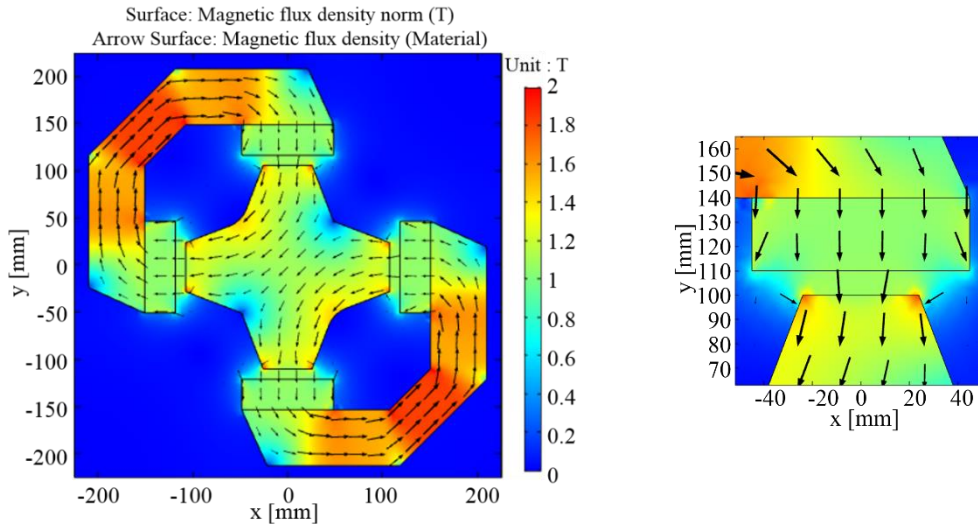


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ pole face และสนามแม่เหล็กภายในช่องว่างอากาศ

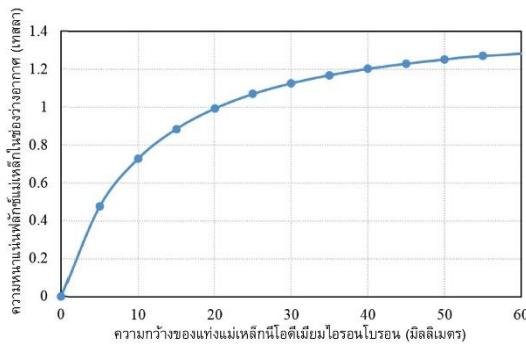
ส่วนของวัสดุแม่เหล็กถาวรมีความสำคัญ คือ เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กให้กับโครงสร้าง รูปที่ 6 แสดงผลของความกว้างของวัสดุแม่เหล็กถาวรต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กภายในช่องแคบในช่วงแรกเมื่อเพิ่มความกว้างของวัสดุแม่เหล็กถาวรหรือเพิ่มพื้นที่ของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องแคบเพิ่มขึ้นและเข้าสู่ค่าฟลักซ์แม่เหล็กคงค้างของวัสดุแม่เหล็กถาวรนี้โอดีเมียมไอรอนโบรอนเท่ากับ 1.44 เทสลา โดยเมื่อความกว้างของวัสดุแม่เหล็กถาวรมากกว่า 30 มิลลิเมตร ความหนาแน่นฟลักซ์

แม่เหล็กในช่องแคบเป็น 1.13 เทสลา ที่จุดดังกล่าว กราฟมีความชันน้อยกว่า 0.01 เทสลาต่อมิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการขยายขนาดแท่งแม่เหล็กถาวรที่

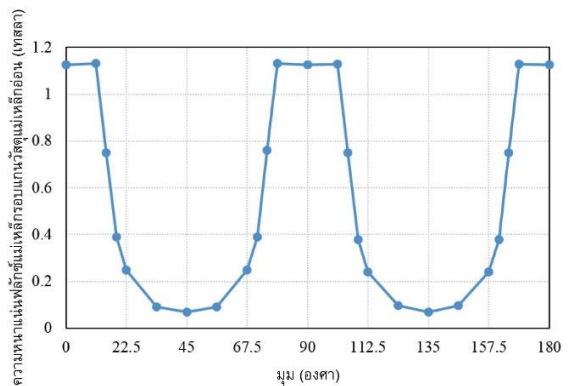
มีราคาสูงและน้ำหนักมาก ไม่ควรเกินความกว้าง 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 5 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อเหล็กกล้าคาร์บอนดำมีขนาดเท่ากับศูนย์



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแท่งแม่เหล็กนีโอติเมียมไอรอนโบรอนและสนามแม่เหล็กภายในช่องว่างอากาศ



รูปที่ 7 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนววงแหวนรอบโรเตอร์

โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริกต้องให้สนามแม่เหล็กภายนอกมีความแตกต่างกันในแต่ละบริเวณเพื่อให้วัสดุแมกนีโตแคลอริกมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อหมุนผ่านบริเวณดังกล่าว รูปที่ 7 แสดงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแนววงแหวนรอบแกนวัสดุ

แม่เหล็กอ่อนผ่านบริเวณช่องแคบ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างอากาศระหว่างวัสดุแม่เหล็กอ่อนมีความสม่ำเสมอ มีค่าสูงสุด 1.13 เทสลา และโดยรอบมีค่าต่ำสุด 0.07 เทสลา โครงสร้างแบบ Tušek และคณะ (2009) ที่ศึกษาต่อยอดในงานวิจัยนี้ จึงเป็น โดยมีจุดเด่นที่

แตกต่างจากโครงสร้างแบบ Halbach cylinder เพราะลดการใช้วัสดุแม่เหล็กถาวรในบริเวณที่มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่ำ และคงไว้เฉพาะบริเวณที่มีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงเท่านั้น

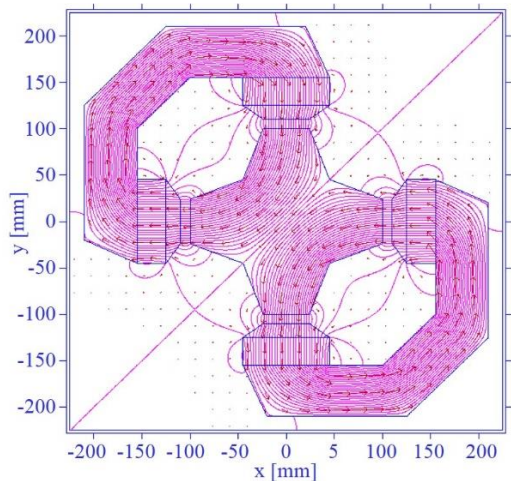
การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจำลอง ทำโดยเปรียบเทียบผลความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กตามแนวเส้นรอบวงการหมุนของโรเตอร์ในรูปที่ 7 กับการจำลองและการวัดจากเครื่องต้นแบบ โดย Tušek และคณะ (2009) พบว่ามีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้การกระจายฟลักซ์แม่เหล็กในโครงสร้างที่ออกแบบ รูปที่ 2 ให้ผลเทียบเท่ากับการจำลองด้วยโปรแกรม Poisson Superfish รูปที่ 8

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงสร้างตู้เย็นแม่เหล็กที่ประกอบด้วยแท่งแม่เหล็กถาวรนีโอดีเมียมไอโรนโบรอนทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำซึ่งเป็นแม่เหล็กอ่อน มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกสูง ทำหน้าที่ควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กและเป็นโรเตอร์ สามารถลดต้นทุนและน้ำหนักจากการใช้แม่เหล็กถาวรทั้งโครงสร้างลงได้ จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics พบว่าเมื่อกำหนดให้ความกว้างของช่องว่างอากาศเป็น 10 มิลลิเมตร ความกว้างของวัสดุแม่เหล็กอ่อนเป็น 15 มิลลิเมตร และความกว้างของแท่งแม่เหล็กถาวรเป็น 30 มิลลิเมตร จะได้การกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในบริเวณช่องว่างอากาศที่เหมาะสม คือ มีบริเวณค่าสูงสุด 1.13 เทสลา สลับกับบริเวณค่าต่ำสุด 0.07 เทสลา ในแนวเส้นรอบวงของโรเตอร์ เพื่อให้เกิดสถานะแมกนีโตเซชันและดีแมกนีโตเซชันสลับกันต่อเนื่อง การปรับชนิดและขนาดของโครงสร้างวัสดุแม่เหล็กที่นำมาใช้ ส่งผลต่อการกระจายฟลักซ์แม่เหล็ก โดยช่องว่างอากาศที่จะบรรจุวัสดุแมกนีโตเคลอริกมีข้อกำหนดสำคัญ คือ จะต้องเป็นบริเวณที่มีกว้าง

เพียงพอ ในขณะที่เดียวกัน จะต้องมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูง

ผลการจำลองนี้สามารถนำไปใช้สร้างเครื่องต้นแบบตามขนาดที่เหมาะสมในแนวทางที่ดำเนินการในหลายกลุ่มวิจัยทั่วโลก เพื่อพัฒนาสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ต่อไป ข้อจำกัดในปัจจุบัน คือ โครงสร้างที่จำลองขึ้นและเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น ยังมีขนาดค่อนข้างเล็ก การวิจัยและพัฒนาในประเทศไทย จึงควรมุ่งประยุกต์ในการใช้เป็นแผ่นหรือกล่องทำความเย็น ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการหรือใช้จำเพาะทางการแพทย์และการแพทย์ก่อนในขั้นแรก



รูปที่ 8 การแสดงผลการจำลองความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กจากโครงสร้างแม่เหล็ก โดยใช้โปรแกรม Poisson Superfish

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทนเรียนดี กระทรวงวิทยาศาสตร์ และโปรแกรมนวัตกรรมทางฟิสิกส์สำหรับอุตสาหกรรมทำความเย็นเชิงแม่เหล็ก ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ รวมถึง คุณวรกฤษฎี ธิธา ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปรับปรุงบทความเกี่ยวกับโปรแกรม COMSOL Multiphysics

7. รายการอ้างอิง

- รัตติกร ยิ้มนิรันดู และยงยุทธ เหล่าศิริถาวร, 2547, ตู้เย็นแม่เหล็ก, ว.ฟิสิกส์ไทย 21: 21-22.
- Bjørk, R., Bahl, C.R.H., Smith, A. and Pryds, N., 2010, An optimized magnet for magnetic refrigeration, *Int. J. Refrig.* 33: 437-448.
- Halbach, K., 1980, Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material, *Nucl. Instrum. Meth.* 169: 1-10.
- Lorenz, L. and Kevlishvili, N., 2017, Designing of Halbach cylinder based magnetic assembly for a rotating magnetic refrigerator, *Int. J. Refrig.* 73: 246-256.
- Lozano, J.A., Capovilla, M.S., Trevizoli, P.V., Engelbrecht, K., Bahl, C.R.H. and Barbosa Jr., J.R., 2016, Development of a novel rotary magnetic refrigerator, *Int. J. Refrig.* 68: 187-197.
- Phromchuai, S., Sirisathitkul, C. and Jantaratana, P., 2014, Effect of gadolinium substitution on magnetocaloric properties of lanthanum strontium manganites, *Dig. J. Nanomater. Bios.* 9: 245-250.
- Ryu, K.S., Nahm, S.H., Jung, J.K. and Baek, S.W., 2017, Design and fabrication of 2-T rotating Halbach magnet for magnetic refrigerator, *J. Magn.* 22: 65-68.
- Tura, A. and Rowe, A., 2011, Permanent magnet magnetic refrigerator design and experimental characterization, *Int. J. Refrig.* 34: 628-639.
- Tušek, J., Sarlah, A., Poredos, A. and Fefer, D., 2009, Optimization of the magnetic field in a magnetic refrigerator, *Informacije Midem* 39: 105-110.
- You, Y., Guo, Y., Xiao, S., Yu, S., Ji, H. and Luo, X., 2016, Numerical simulation and performance improvement of a multi-polar concentric Halbach cylinder magnet for magnetic refrigeration, *J. Magn. Mater.* 405: 231-237.