

เทคโนโลยีการทำความเย็นแบบแม่เหล็ก : สถานะปัจจุบันและมุมมองทางวิศวกรรม

Magnetic cooling technology : Current status and engineering perspective

สุรัตน์ ดีรอด

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถ.เพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กทม.10160

E-mail: suratd@sau.ac.th, 0866264106

บทคัดย่อ

ระบบการทำความเย็นแบบแม่เหล็กเป็นเทคโนโลยีทำความเย็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอที่ใช้สารทำความเย็น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนสถานะปัจจุบันของเทคโนโลยีการทำความเย็นแบบแม่เหล็กในมุมมองทางวิศวกรรมเครื่องกล โดยครอบคลุมหลักการพื้นฐานของปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริก การพัฒนาวัสดุแมกนีโตแคลอริก โครงสร้างของระบบ การฟื้นฟูแม่เหล็กแบบแอคทีฟ และผลการพัฒนาระบบต้นแบบ จากงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการทบทวนพบว่า ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กมีศักยภาพในการให้ประสิทธิภาพเชิงทฤษฎีสูง และสามารถลดการสูญเสียของกระบวนการทำความเย็นได้ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดด้านต้นทุนวัสดุ ความซับซ้อนของระบบ และความเสถียรในการใช้งานระยะยาว บทความนี้จะนำเสนอแนวโน้มและทิศทางการวิจัยในอนาคตเพื่อสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีการทำความเย็นแบบแม่เหล็กอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การทำความเย็นแบบแม่เหล็ก, แมกนีโตแคลอริกเอฟเฟกต์, การฟื้นฟูแม่เหล็กแบบแอคทีฟ, ระบบทำความเย็นสถานะของแข็ง

Abstract

Magnetic refrigeration systems are an alternative refrigeration technology that has garnered continuous attention due to their potential for improved energy efficiency and reduced environmental impact compared to vapor compression refrigeration systems using refrigerants. This article aims to review the current state of magnetic refrigeration technology from a mechanical engineering perspective, covering the fundamental principles of the magnetocaloric effect, magnetocaloric material development, system structure, active magnetic regeneration, and the results of prototype system development. From previous research, the review found that magnetic refrigeration systems have the potential to achieve high theoretical efficiency and can reduce refrigeration process losses. However, the technology still has limitations in terms of material cost, system complexity, and long-term operational stability. This article

therefore presents future research trends and directions to support the sustainable development of magnetic refrigeration technology.

Keywords: Magnetic refrigeration, Magnetocaloric effect, Active magnetic regeneration, Solid-state refrigeration system

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบทำความเย็นมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อภาคอุตสาหกรรม พลังงาน และคุณภาพชีวิตของมนุษย์ อย่างไรก็ตาม ระบบทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งใช้อย่างแพร่หลายยังคงเผชิญข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพ พลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการใช้สารทำความเย็นที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนและทำลายชั้นบรรยากาศ ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีทำความเย็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงคือ ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก (Magnetic Refrigeration: MR) ซึ่งอาศัยปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริก (Magnetocaloric Effect: MCE) ของวัสดุแม่เหล็กเป็นกลไกหลักในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1881 โดย Emil Warburg นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน เขาพบว่าเหล็ก (Iron) มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อมัน ต่อมาในช่วงปี ค.ศ. 1920 Peter Debye และ William F. Giauque ได้เสนอวิธีการทำความเย็นเพื่อให้ได้อุณหภูมิต่ำใกล้ศูนย์สัมบูรณ์ (Adiabatic Demagnetization) โดยใช้เกลือพาราแมกเนติก ซึ่ง Giauque ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1949 และในปี ค.ศ. 1997 Karl Gschneidner Jr. และทีมวิจัยจาก Ames Laboratory ได้ค้นพบปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริกยักษ์ (Giant Magnetocaloric Effect) ในสารประกอบ Gadolinium (Gd-Si-Ge) ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญที่ทำให้การทำความเย็นแบบแม่เหล็กสามารถพัฒนามาใช้ในระดับอุณหภูมิห้อง (Room Temperature) ได้

งานทบทวนเชิงพื้นฐานได้อธิบายถึงหลักการของปรากฏการณ์ MCE และบทบาทของวัสดุแม่เหล็กในระบบทำความเย็น โดยชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีและอุณหภูมิของวัสดุภายใต้สนามแม่เหล็กเป็นหัวใจสำคัญของการสร้างวงจรทำความเย็นแบบไม่ใช้สารทำความเย็นฟลูออโรคาร์บอน [1] ขณะเดียวกัน บทความทบทวนในวารสาร Progress in Materials Science ได้รวบรวมพัฒนาการของงานวิจัยด้านวัสดุ MCE ตั้งแต่ระดับโครงสร้างผลึก สมบัติทางแม่เหล็ก ไปจนถึงการประยุกต์ใช้งานจริงในอุปกรณ์ทำความเย็น ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัยพื้นฐานและการพัฒนาเชิงวิศวกรรม [2]

ด้านการออกแบบระบบ บทความในวารสารด้านพลังงาน ได้นำเสนอภาพรวมของเทคโนโลยีการออกแบบระบบทำความเย็นแม่เหล็กในปัจจุบัน ทั้งในแง่ของโครงสร้างเครื่อง กลไกการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก และแนวโน้มการพัฒนาในอนาคต โดยเน้นความสำคัญของการเพิ่มความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและประสิทธิภาพ การถ่ายเทความร้อน [3] นอกจากนี้ งานทบทวนเกี่ยวกับ ตัวฟื้นฟูแม่เหล็กแบบแอคทีฟ (Active Magnetic Regenerator: AMR) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของตู้เย็นแม่เหล็กร่วมสมัย ได้รวบรวมผลการศึกษางานวิจัยล่าสุดจำนวนมาก เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะ เช่น วัสดุรีเจนเนอเรเตอร์ รูปแบบการไหลของไหล และประสิทธิภาพการทำงานของระบบ [4] ในส่วนของบทความวิจัยเชิงลึก งานด้านการวิเคราะห์เชิงเทอร์โมไดนามิกได้ศึกษาพฤติกรรมของระบบทำความเย็นแม่เหล็กในเชิงสมดุลพลังงานและเอนโทรปี เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงทฤษฎีและข้อจำกัดของระบบเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรทำความเย็นแบบดั้งเดิม [5] ขณะที่

งานวิจัยด้านการออกแบบเชิงวิศวกรรมได้เสนอการพัฒนาและปรับปรุง ตู้เย็นแม่เหล็กแบบหมุน (Rotary Magnetic Refrigerator) ซึ่งช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของการทำงานและลดการสูญเสียพลังงานจากการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ [6]

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาที่มุ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กกับระบบอัดไอ โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบแม่เหล็กมีศักยภาพในการให้ค่า COP สูงกว่าในบางช่วงอุณหภูมิ พร้อมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ [7] งานวิจัยด้านต้นแบบพื้นฐานยังได้นำเสนอการออกแบบตู้เย็นแม่เหล็กอย่างง่ายโดยใช้ปรากฏการณ์ MCE เพื่อแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้งานจริงและเป็นฐานความรู้สำหรับการพัฒนาระบบที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น [8]

ในมิติของวัสดุแม่เหล็ก งานทบทวนด้านวัสดุขั้นสูงได้อธิบายทั้งหลักการพื้นฐานและประเด็นเชิงปฏิบัติของวัสดุแม่เหล็กเพื่อการทำความเย็น โดยเน้นความท้าทายในการพัฒนาวัสดุที่มีค่า MCE สูง ใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง และสามารถผลิตได้ในระดับอุตสาหกรรม [9] ขณะเดียวกันงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุแม่เหล็กแบบมิติต่ำ (low-dimensional materials) ได้ชี้ให้เห็นแนวโน้มใหม่ในการปรับปรุงสมรรถนะการทำความเย็นและประสิทธิภาพพลังงานของระบบ MR [10] อีกทั้งยังมีการรายงานการใช้วัสดุไฮเลียมซึ่งแสดงสมรรถนะสูงในระบบทำความเย็นแม่เหล็ก โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำ [11] สำหรับบริบทของประเทศไทย งานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารไทยได้ศึกษาการกระจายความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรในต้นแบบตู้เย็นแม่เหล็ก ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงวิศวกรรมที่สำคัญต่อการออกแบบระบบจริง [12] อีกทั้งยังมีความที่อธิบายหลักการทำงานของวงจร Brayton, Ericsson และ AMR ในระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กเพื่อเป็นพื้นฐานความรู้สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวในประเทศ [13] จากการทบทวนงานวิจัยทั้งในระดับสากลและระดับประเทศข้างต้น จะเห็นได้ว่าระบบ

ทำความเย็นแบบแม่เหล็กเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงทั้งในด้านประสิทธิภาพพลังงานและความยั่งยืน อย่างไรก็ตาม ยังมีความท้าทายด้านการออกแบบระบบ วัสดุแม่เหล็ก และต้นทุนการผลิต ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้ทำงานวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในงานค้นคว้าวิจัยด้านนี้

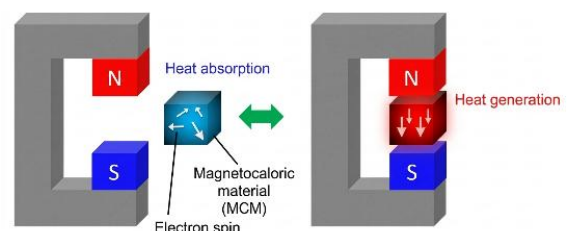
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทำงาน (Working Principle)

การทำความเย็นแบบแม่เหล็กอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าเอนโทรปี (Entropy: S) ของวัสดุแม่เหล็กเมื่อได้รับสนามแม่เหล็กภายนอก โดยมีหลักการทางอุณหพลศาสตร์ดังนี้

2.1.1 ปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริก (Magnetocaloric Effect: MCE)

ในสภาวะปกติ สปิน (Spin) หรือโมเมนต์แม่เหล็กในอะตอมหรือ Magnetic Moments ในวัสดุแม่เหล็กจะมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (High Entropy) เมื่อเราใส่สนามแม่เหล็กเข้าไป สปินเหล่านี้จะพยายามจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความเป็นระเบียบมากขึ้น (Low Entropy) เนื่องจากพลังงานรวมต้องคงที่ พลังงานส่วนที่เกินจากการลดลงของเอนโทรปีแม่เหล็กจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสั่นสะเทือนของโครงสร้างผลึก (Lattice Vibration) ส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่อนำสนามแม่เหล็กออก อุณหภูมิจะลดลง ดังรูปที่ 1 ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญของระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กและได้รับการอธิบายเชิงอุณหพลศาสตร์อย่างกว้างขวางในงานวิจัยด้าน Magnetocaloric materials และ Magnetic refrigeration [14-15]



รูปที่ 1 ปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริก (MCE)

หัวใจสำคัญของเรื่องนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Entropy) หรือค่าความจัดระเบียบในระบบในวัสดุแม่เหล็ก เอนโทรปีประกอบด้วยสองส่วนหลัก ๆ คือ

1. Lattice Entropy (S_{lat}) ความวุ่นวายที่เกิดจากการสั่นของอะตอมในโครงสร้างผลึก (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ)

2. Magnetic Entropy (S_{mag}) ความวุ่นวายที่เกิดจากการจัดเรียงทิศทางของสปิน (Spin) หรือโมเมนต์แม่เหล็กในอะตอม

2.1.2 ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี

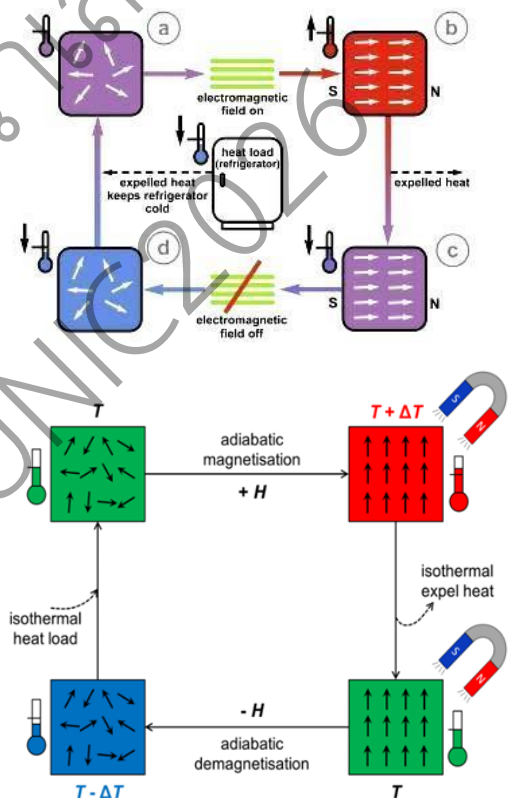
กระบวนการนี้ทำงานเป็นวงจร โดยมีมีการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีแม่เหล็ก เป็นไปตามวัฏจักรการทำความเย็น (Magnetic Refrigeration Cycle) โดยในมุมมองของวิศวกรรมเครื่องกล และ อุณหภูมิจิตศาสตร์ (Thermodynamics) ปรากฏการณ์แมกนีโตคัลลอร์ริก (Magnetocaloric Effect :MCE) ถูกมองในฐานะ สารทำงาน (Working Substance) ที่สามารถนำมาสร้างเป็น วัฏจักรทำความเย็น (Refrigeration Cycle) เพื่อทดแทนระบบอัดไอแบบเดิมโดยเปรียบเทียบระบบแม่เหล็กกับระบบก๊าซดังนี้ สนามแม่เหล็ก(H) เปรียบได้กับความดัน (P) สภาพแม่เหล็ก(M) เปรียบได้กับปริมาตรจำเพาะ(v) การเพิ่มสนามแม่เหล็ก (Magnetization) เปรียบได้กับการอัดตัวของก๊าซ (Compression) ซึ่งทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และการลดสนามแม่เหล็ก(Demagnetization) เปรียบได้กับการขยายตัวของก๊าซ(Expansion) ซึ่งทำให้อุณหภูมิลดลง ในเชิงวิศวกรรม ปรากฏการณ์นี้คือการใช้สนามแม่เหล็กเพื่อเปลี่ยนสถานะพลังงานของวัสดุของแข็ง ให้เกิดวัฏจักรการถ่ายเทความร้อน ที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มาทำหน้าที่แทนคอมเพรสเซอร์ ในการอัดตัวของสารทำความเย็นในระบบอัดไอ ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ตามรูปที่ 2 และรูปที่ 3

ขั้นตอนที่ 1: การให้สนามแม่เหล็กแบบอะเดียแบติก (Adiabatic Magnetization) (รูปที่ 2 a-b)

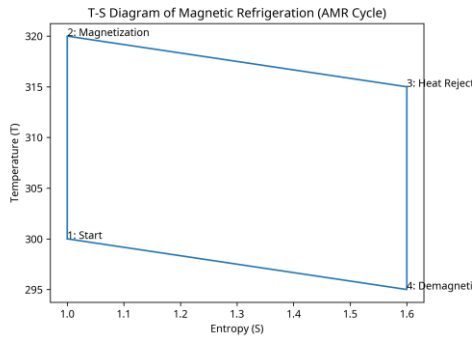
เมื่อเราใส่สนามแม่เหล็กให้กับวัสดุอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนกับภายนอก ($Q=0$) เข้าไปในสปินของอะตอมที่เคยกระจัดกระจายอย่างไร้ระเบียบ

จะถูกบังคับให้หันไปทิศทางเดียวกัน Magnetic Entropy (S_{mag}) ลดลงอย่างรวดเร็ว (เพราะระบบเป็นระเบียบมากขึ้น) เมื่อเอนโทรปีแม่เหล็กลดลง แต่พลังงานรวมต้องคงที่ (ในสภาวะ Adiabatic) พลังงานจะถูกถ่ายโอนไปที่การสั่นของอะตอม (S_{lat}) แทน ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีแม่เหล็ก (ΔS_{mag}) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (T) สนามแม่เหล็ก (H) และสภาพแม่เหล็ก (M) ตามสมการของ Maxwell ในสมการที่ (1) ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์สมบัติแมกนีโตคัลลอร์ริกของวัสดุแม่เหล็ก [16]

$$\Delta S_{mag}(T, \Delta H) = \int_{H_i}^{H_f} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (1)$$



รูปที่ 2 วัฏจักรการทำความเย็นแบบแม่เหล็กตามหลัก Active Magnetic Regenerator (AMR) (ดัดแปลงจาก



รูปที่ 3 T-S diagram ของวัฏจักร AMR

ขั้นตอนที่ 2: การคายความร้อนที่สนามแม่เหล็กคงที่ (Isomagnetic Enthalpy Transfer) (รูปที่ 2 b-c)

เราจะระบายความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ออกไปโดยใช้ของเหลวตัวกลาง (Heat Transfer Fluid) ไหลผ่านวัสดุเพื่อให้อุณหภูมิของวัสดุลดลงมาเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแต่ยังคงสนามแม่เหล็กไว้และสปีนยังเป็นระเบียบอยู่ ความร้อนจากวัสดุถูกถ่ายเทออกไปยังแหล่งความร้อนสูง (Heat Sink) จนอุณหภูมิของวัสดุลดลงมาอยู่ที่อุณหภูมิเริ่มต้น ภายใต้สภาวะ Isomagnetic ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT_{ad}) และสนามแม่เหล็ก (dH) เป็นไปตามสมการที่ (2)

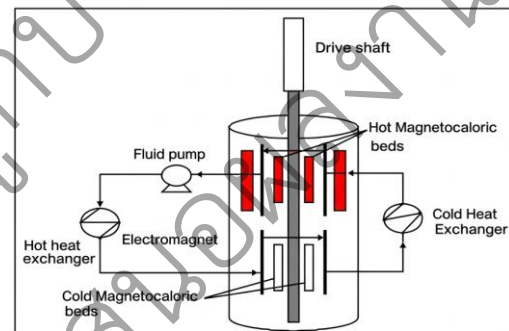
$$\Delta T_{ad} = - \int_{H_0}^{H_1} \frac{T}{C_{p,H}} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 3: การลดสนามแม่เหล็กแบบอะเดียแบติก (Adiabatic Demagnetization) (รูปที่ 2 c-d)

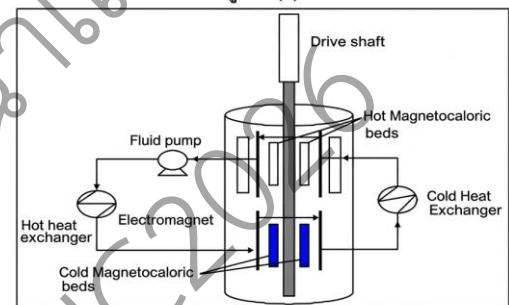
เมื่อเรานำสนามแม่เหล็กออกอย่างรวดเร็วสปีนของอะตอมจะพยายามกลับไปสู่ระเบียบตามธรรมชาติ (ตามแรง สั่นสะเทือนจากความร้อน) Magnetic Entropy เพิ่มขึ้น (เพราะระบบกลับมาไร้ระเบียบ) ผลที่เกิดขึ้นคือการที่สปีนจะกลับมาขยับได้อีกครั้ง มันต้องดูดกลืนพลังงาน จากการสั่นของอะตอมในตัวมันเอง โดยการดึงพลังงานความร้อนจากโครงผลึกมาใช้ทำให้อุณหภูมิของวัสดุลดลงอย่างรวดเร็วจนต่ำกว่าสภาพแวดล้อม

ขั้นตอนที่ 4: การดูดซับความร้อนที่ไม่มีสนามแม่เหล็กหรือการนำความร้อนออก (Isomagnetic Heat Absorption) (รูปที่ 2 d-a)

เป็นการดึงความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ออกไปใช้ประโยชน์ โดยให้ของเหลว (เช่น ใช้น้ำหรืออากาศ) จากบริเวณที่ต้องการทำความเย็นไหลผ่านวัสดุที่เย็นจัด วัสดุดูดซับความร้อนจากภายนอก (Q_{in}) เข้ามา วัสดุจะกลับสู่สภาวะเริ่มต้น ระบบพร้อมสำหรับวัฏจักรใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 4(n)



รูปที่ 4(ข)

รูปที่ 4 โครงสร้างของระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก

ตัวอย่างโครงสร้างของระบบในรูปที่ 4 จัดอยู่ในประเภท Active Magnetic Regenerative (AMR) Cycle แบบ Reciprocating (การเคลื่อนที่กลับไปกลับมา) เพราะวัสดุแม่เหล็กไม่ได้เป็นแค่ตัวทำให้เย็น แต่ยังทำหน้าที่เป็นตัวเก็บสะสมความร้อน (Regenerator) ในตัวเองด้วย มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear) โดยใช้ Stepper Motor หมุนให้เพลาลิ้น ลง เลื่อนวัสดุเข้าและออกจากสนามแม่เหล็กสลับกัน ใช้วัสดุแมกนีโตคัลอริก (เช่น Gadolinium หรือโลหะผสม Gd-Ge-Si) ซึ่งจะเปลี่ยนอุณหภูมิเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นชุดแม่เหล็กถาวรที่จัดเรียงตัวเป็นพิเศษเพื่อให้ได้สนามแม่เหล็กที่มี

ความเข้มสูงและสม่ำเสมอในพื้นที่จำกัด มีชุดระบายความร้อนออกจากระบบ และชุดดูดซับความร้อนจากพื้นที่ที่ต้องการทำความเย็น ของเหลว (มักเป็นน้ำผสมสารกันเยือกแข็ง) ที่ทำหน้าที่พาความร้อนจากวัสดุแม่เหล็กไปยังตัวแลกเปลี่ยนความร้อน มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัสดุเข้า-ออกจากสนามแม่เหล็ก และควบคุมจังหวะการไหลของของเหลวให้สัมพันธ์กัน การทำงานจะครบ 1 รอบ (Cycle) มี 4 ขั้นตอน การทำงานของอุปกรณ์ต่างๆเพื่อให้เกิดขั้นตอนดังกล่าว มีดังนี้

1. การใส่สนามแม่เหล็ก (Magnetization) มอเตอร์จะเลื่อนวัสดุแม่เหล็กไนโตะคาลอริกเข้าไปในจุดที่มีสนามแม่เหล็กเข้มข้น ตามรูปที่ 4(ก) ทันใดนั้นสปินอะตอมของวัสดุจะจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้อุณหภูมิของวัสดุ สูงขึ้น (ความร้อนพุ่งขึ้นทันที)

2. การคายความร้อน (Heat Rejection) ในขณะที่วัสดุยังอยู่ในสนามแม่เหล็ก ปัมป์จะฉีดของเหลวไหลผ่านวัสดุที่กำลังร้อนนั้นไปยัง Hot Heat Exchanger เพื่อระบายความร้อนทิ้งสู่ภายนอก ทำให้อุณหภูมิของวัสดุ ลดลงมาอยู่ที่ระดับอุณหภูมิห้องแต่ยังคงอยู่ในสถานะที่ถูกแม่เหล็กดูดอยู่

3. การดึงสนามแม่เหล็กออก(Demagnetization) มอเตอร์เลื่อนวัสดุแม่เหล็กไนโตะคาลอริกออกไปยังจุดที่ไม่มีสนามแม่เหล็กตามรูปที่ 4(ข) สปินอะตอมของวัสดุจะกลับมาไร้ระเบียบ (Disorder) เหมือนเดิม ในขั้นตอนนี้วัสดุจะต้องการพลังงานเพื่อการเคลื่อนตัวของสปินจึงดึงพลังงานโดยรอบ ทำให้อุณหภูมิตัวเอง ลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว (เย็นจัด)

4. การดูดซับความร้อนหรือทำความเย็น (Heat Absorption) ของเหลวจะถูกปั๊มให้ไหลผ่านวัสดุที่เย็นจัดนี้ ของเหลวจะเย็นตัวลงและไหลไปยัง Cold Heat Exchanger เพื่อไปปรับความร้อนจากจุดที่ต้องการทำความเย็น

2.2 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรม

ตัวชี้วัดประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมโดยทั่วไปจะประเมินประสิทธิภาพของระบบผ่านสัมประสิทธิ์ของ

สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) คือ อัตราส่วนระหว่างความเย็นที่ทำได้ ต่องานทางกลที่ใช้เคลื่อนที่วัสดุแม่เหล็กและหรืองานทางไฟฟ้าที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก(ถ้าไม่ใช่แม่เหล็กถาวร) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดหลักของระบบทำความเย็นเชิงวิศวกรรม [17] ดังสมการที่ (3)

$$COP_{mag} = \frac{Q_c}{W} = \frac{T_c \Delta S_m}{\int (M dH)} \quad (3)$$

นอกจากนี้ การออกแบบรูปร่างของวัสดุ Magnetocaloric Material Geometry ให้เป็นแผ่นบาง, เม็ดกลม, หรือทรงกระบอก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการถ่ายเทความร้อนและลดการสูญเสียความดัน (Pressure Drop) ของของเหลวก็เป็นอีกตัวชี้วัดประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรม

2.3 ระบบฟื้นฟูแม่เหล็กแบบแอคทีฟ (Active Magnetic Regenerative: AMR)

ในทางปฏิบัติ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ของวัสดุแม่เหล็กเพียงขึ้นเดียวหรือชุดเดียวมักจะไม่เพียงพอต่อการใช้งาน (เช่น อาจเปลี่ยนได้แค่ 2-4 เคลวิน) วิศวกรเครื่องกลจึงใช้แนวคิด AMR (Active Magnetic Regenerative) หรือการฟื้นฟูความร้อนแบบแม่เหล็กเชิงรุก คือวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ในระบบทำความเย็นด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Refrigeration) คือการใช้สารแม่เหล็กเป็นทั้งแหล่งกำเนิดความเย็นและ ตัวกลางเก็บสะสมความร้อนไปพร้อมกัน กระบวนการนี้พัฒนาขึ้น เพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดของปรากฏการณ์แม่เหล็กความร้อน (Magnetocaloric Effect - MCE) แบบปกติที่มักจะเปลี่ยนอุณหภูมิได้เพียงเล็กน้อย ให้สามารถทำความเย็นได้ในระดับที่ใช้งานจริงได้ในภาคอุตสาหกรรมหรือครัวเรือน แนวคิด AMR ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มช่วงอุณหภูมิการทำความเย็นให้กว้างขึ้นและเป็นโครงสร้างหลักของระบบ Magnetic Refrigerator สมัยใหม่ [18] ดังนี้

2.3.1 Regenerator

วัสดุแม่เหล็กจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูพรุน (Porous media) เพื่อให้ของเหลวไหลผ่านและทำหน้าที่เป็นตัวเก็บสะสมความร้อนในตัวเอง

2.3.2 Thermal Gradient

การไหลกลับไปกลับมาของของเหลวควบคู่กับการเปิด-ปิดสนามแม่เหล็ก จะสร้างความต่างอุณหภูมิสะสมจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง ทำให้เราสามารถทำความเย็นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้นมาก (เช่น จาก 30°C ลงไปถึง 0°C) แม้ตัววัสดุเองจะเปลี่ยนอุณหภูมิได้ที่ล้นดิกก็ตาม ในระบบทำความเย็นทั่วไป สารทำความเย็นจะเปลี่ยนสถานะ แต่ใน AMR สารแม่เหล็กจะสร้าง การกระจายอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ตามแนวการไหล ขอบด้านหนึ่งของเครื่องจะเย็นมาก และอีกด้านจะร้อนมาก การไหลย้อนไปมาของของเหลวช่วยให้เกิดการสะสมความเย็นที่สะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละรอบจนสามารถสร้างความต่างอุณหภูมิที่สูงพอจะใช้งานแทนคอมเพรสเซอร์แบบเดิมได้

2.4 การพัฒนาวัสดุแมกนีโตแคลอริก (Development of Magnetocaloric Materials)

ส่วนสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กคือการพัฒนาวัสดุที่มีค่า ΔS_m (การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีแม่เหล็ก) สูงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน โดยสามารถแบ่งการพัฒนาได้ตามลักษณะการเปลี่ยนเฟสทางแม่เหล็กของวัสดุดังนี้

2.4.1 วัสดุที่มีการเปลี่ยนเฟสอันดับที่สอง (Second-order Phase Transition: SOPT)

วัสดุกลุ่มนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับสนามแม่เหล็ก มีข้อดีคือไม่มีปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) หรือความหน่วงของอุณหภูมิ ทำให้สูญเสียพลังงานต่ำในแต่ละวัฏจักร Gadolinium (Gd) เป็นวัสดุมาตรฐาน (Benchmark) สำหรับอุณหภูมิห้องมีอุณหภูมิคูรี (Curie Temperature: Tc) คือ อุณหภูมิวิกฤตที่วัสดุจะสูญเสียคุณสมบัติการเป็น

แม่เหล็กถาวร) อยู่ที่ประมาณ 294K อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดเรื่องราคาที่สูงและไวต่อการเกิดออกซิเดชัน

2.4.2 วัสดุที่มีการเปลี่ยนเฟสอันดับที่หนึ่ง (First-order Phase Transition: FOPT)

นักวิจัยหันมาให้ความสนใจวัสดุกลุ่มนี้เนื่องจากให้ปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริกยักษ์ (Giant MCE) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกพร้อมกับการเปลี่ยนเฟสทางแม่เหล็ก แยกได้ดังนี้

1. Gd - Si - Ge ค้นพบโดย Gschneidner และ Pecharsky ให้ค่า MCE สูงกว่า Gd บริสุทธิ์ถึง 2 เท่า
2. La - Fe - Si และอนุพันธ์ สารประกอบกลุ่มแลนทานัม-เหล็ก-ซิลิคอน มีข้อดีคือใช้วัตถุดิบราคาถูก และสามารถปรับช่วงอุณหภูมิใช้งานได้กว้างโดยการเติมไฮโดรเจน (Hydrating) หรือโดปด้วยสารอื่น
3. MnFe(P, As) ให้ปรากฏการณ์ MCE ที่รุนแรงในช่วงอุณหภูมิห้อง แต่มีความท้าทายเรื่องความเป็นพิษของสารหนู (Arsenic) จึงมีการพัฒนาสูตรที่เป็น MnFe(P, Si) แทนในปัจจุบัน
4. Heusler Alloys (Ni-Mn-Ga/In) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติจัดจำรูปร่างทางแม่เหล็ก (Magnetic Shape Memory) ซึ่งให้ค่า MCE ที่สูงมากจากการเปลี่ยนเฟสแบบมาร์เทนซิติก (รูปแบบการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของวัสดุในสถานะของแข็งอะตอมจะขยับตัวพร้อมกันทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ขึ้นทันที) วัสดุกลุ่มที่ 2.4.2 ดังกล่าวได้รับความสนใจอย่างมากในงานวิจัยปัจจุบัน เนื่องจากวัสดุกลุ่มนี้สามารถให้ค่า Magnetocaloric effect สูงใกล้อุณหภูมิห้องและมีศักยภาพในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม [19] ปกติวัสดุแม่เหล็กทั่วไปจะมีค่า MCE สูงสุดที่อุณหภูมิต่ำมาก (ใกล้ศูนย์องศาสัมบูรณ์) แต่สำหรับวัสดุกลุ่มนี้ มันถูกออกแบบมาให้เกิดปรากฏการณ์นี้ที่ช่วง 20°C ถึง 30°C (MCE สูงหมายถึงค่า ΔS_m มีค่ามาก ซึ่งส่งผลให้วัสดุสามารถคายความร้อนออกมาได้มากเมื่อใส่สนามแม่เหล็ก และดูดซับความร้อนกลับไปได้มากเช่นกันเมื่อเอาสนามแม่เหล็กออก)

3. การวิเคราะห์ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก

ในปี 2026 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนผ่านจากงานวิจัยในห้องปฏิบัติการสู่การใช้งานเชิงพาณิชย์จริง โดยมีรายละเอียดที่น่าสนใจดังนี้

3.1 สถานะปัจจุบัน (Current State - 2026)

เทคโนโลยีนี้ใช้ปรากฏการณ์ Magnetocaloric Effect (MCE) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนอุณหภูมิของวัสดุแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง ส่วนใหญ่ใช้ระบบ Active Magnetic Regenerator (AMR) ซึ่งใช้วัสดุแข็ง (Solid-state) แทนสารทำความเย็น วัสดุที่ใช้คือสารประกอบ Gadolinium (Gd) ยังคงเป็นมาตรฐานหลักสำหรับอุณหภูมิห้อง แต่เริ่มมีการใช้โลหะผสม Lanthanum-Iron-Silicon (La-Fe-Si) ที่ราคาถูกลงกว่า และลดการกัดกร่อนด้วยเทคโนโลยีการเคลือบผิวระดับสูง การใช้งานที่มีอยู่จริง เริ่มเห็นในตู้แช่ไวน์ระดับพรีเมียม, ตู้แช่เครื่องดื่มในเชิงพาณิชย์ และระบบทำความเย็นขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการที่ต้องการความเงียบและแรงสั่นสะเทือนต่ำ

3.2 ทิศทางในอนาคต (Future Outlook)

ในอีก 5-10 ปีข้างหน้า ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กจะมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาข้อจำกัดด้านต้นทุนและประสิทธิภาพ โดยประสิทธิภาพพลังงาน คาดว่าจะสูงกว่าระบบคอมเพรสเซอร์ปัจจุบัน (Vapor-Compression) ประมาณ 20-30% เนื่องจากไม่มีความสูญเสียจากการเปลี่ยนสถานะของก๊าซ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม 100% จะกลายเป็นจุดขายหลักเพราะไม่ต้องใช้สาร HFCs หรือสารทำความเย็นที่มีค่า GWP (Global Warming Potential) สูง ซึ่งกำลังถูกแบนทั่วโลก การลดการใช้แร่หายาก (Rare Earth) งานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การสร้างสนามแม่เหล็กแรงสูงโดยใช้แม่เหล็กถาวรที่ใช้แร่หายากน้อยลง หรือใช้ระบบแม่เหล็กไฟฟ้าตัวนำยิ่งยวดในระบบขนาดใหญ่ (Industrial Scale) การใช้ AI Integration เข้ามาควบคุมจังหวะการเคลื่อนที่และการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้ได้ค่า COP (Coefficient of Performance) สูงสุดในสถานะที่ต่าง

4. บทสรุป

เทคโนโลยีการทำความเย็นแบบแม่เหล็ก (Magnetic Refrigeration: MR) ถือเป็นแนวทางการทำความเย็นทางเลือกที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเพื่อทดแทนระบบทำความเย็นแบบอัดไอแบบดั้งเดิม เนื่องจากอาศัยปรากฏการณ์ แมกนีโตแคลอริก (Magnetocaloric Effect: MCE) ของวัสดุแม่เหล็กในการสร้างวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนโดยไม่ต้องใช้สารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กสามารถให้ประสิทธิภาพเชิงทฤษฎีที่สูง และมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ [1, 14, 17] บทความนี้ได้ทบทวนองค์ความรู้ที่สำคัญ ตั้งแต่พื้นฐานของปรากฏการณ์แมกนีโตแคลอริก กลไกการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของวัสดุแม่เหล็ก วัฏจักรการทำความเย็นแบบแม่เหล็ก ตลอดจนโครงสร้างของระบบทำความเย็นแบบ Active Magnetic Regenerator (AMR) ซึ่งเป็นแนวคิดหลักที่ช่วยเพิ่มช่วงอุณหภูมิการทำความเย็นให้กว้างขึ้นและทำให้ระบบสามารถนำไปใช้งานจริงได้ (4,18) นอกจากนี้ ยังได้กล่าวถึงการพัฒนาวัสดุแมกนีโตแคลอริกทั้งในกลุ่มที่มีการเปลี่ยนเฟสอันดับที่สอง เช่น Gadolinium และกลุ่มที่มีการเปลี่ยนเฟสอันดับที่หนึ่ง เช่น สารประกอบ Gd-Si-Ge, La-Fe-Si และ MnFe(P, Si) ซึ่งแสดงศักยภาพในการให้ค่า Magnetocaloric Effect สูงใกล้อุณหภูมิห้อง [2, 9, 19] แม้ว่าระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กจะมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น การใช้สารทำความเย็นสถานะของแข็ง การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และศักยภาพในการให้ค่า Coefficient of Performance (COP) ที่สูง แต่เทคโนโลยีดังกล่าวยังคงเผชิญความท้าทายสำคัญในด้านต้นทุนของวัสดุแม่เหล็กถาวรและวัสดุแมกนีโตแคลอริก ความซับซ้อนของการออกแบบระบบ AMR และความเสถียรของวัสดุในระยะยาวภายใต้การทำงานแบบวัฏจักร [3] ในอนาคต การพัฒนาเทคโนโลยีการทำความเย็นแบบแม่เหล็กคาดว่าจะมุ่งเน้นไปที่การค้นคว้า

วัสดุแม่เหล็กไนโตแคลอริกรุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีต้นทุนต่ำ การออกแบบโครงสร้าง AMR ที่เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและลดการสูญเสียของระบบ รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคการควบคุมขั้นสูงและการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยรวม นอกจากนี้ การพัฒนาแม่เหล็กถาวรประสิทธิภาพสูงที่ใช้แร่หายากในปริมาณต่ำ และการปรับปรุงการออกแบบระบบต้นแบบให้เหมาะสมกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยผลักดันให้เทคโนโลยีการทำความเย็นแบบแม่เหล็กสามารถก้าวจากงานวิจัยในห้องปฏิบัติการไปสู่การใช้งานเชิงพาณิชย์ได้อย่างแพร่หลายในอนาคต โดยสรุป เทคโนโลยีการทำความเย็นแบบแม่เหล็กเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการจัดการความร้อนที่มีแนวโน้มสำคัญสำหรับระบบพลังงานยุคใหม่ เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อความต้องการด้านประสิทธิภาพพลังงานและความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในด้านวัสดุ ระบบ และการออกแบบทางวิศวกรรม จึงมีบทบาทสำคัญต่อการผลักดันเทคโนโลยีนี้สู่การใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวันในอนาคต.

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pecharsky, V. K., & Gschneidner, K. A. (1999). Magnetocaloric effect and magnetic refrigeration. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30(24), R1–R18.
- [2] Franco, V., Blázquez, J. S., Ipus, J. J., Law, J. Y., Moreno-Ramírez, L. M., & Conde, A. (2018). Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices. *Progress in Materials Science*, 93, 112–232.
- [3] Alahmer, A., Al-Amayreh, M., Mostafa, A. O., & Al-Dabbas, M. (2021). Magnetic refrigeration design technologies: State of the art and general perspectives. *Energies*, 14(23), 7808.
- [4] Engelbrecht, K., & Bahl, C. R. H. (2010). Active magnetic regenerators: A review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 373001.
- [5] Tishin, A. M., & Spichkin, Y. I. (2003). *The Magnetocaloric Effect and Its Applications*. Institute of Physics Publishing.
- [6] Bjørk, R., Bahl, C. R. H., Nielsen, K. K., & Christensen, D. V. (2010). Design and construction of a rotary magnetic refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 30, 2640–2649.
- [7] Dorin, B., Plesca, A., & Avsec, J. (2018). The efficiency of magnetic refrigeration and comparison with compressor systems. *Journal of Energy Technology*, 11(2), 15–23.
- [8] Zimm, C., Jastrab, A., Sternberg, A., Pecharsky, V. K., Gschneidner, K. A., Osborne, M., & Anderson, I. (1998). Description and performance of a near-room temperature magnetic refrigerator. *Advances in Cryogenic Engineering*, 43, 1759–1766.
- [9] Gschneidner, K. A., & Pecharsky, V. K. (2000). Magnetocaloric materials. *Annual Review of Materials Science*, 30, 387–429.
- [10] Lyubina, J. (2017). Magnetocaloric materials for energy efficient cooling. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50, 053002.
- [11] Nikitin, S. A., et al. (2021). High-efficiency magnetic refrigeration using holmium. *Nature Communications*, 12, 4793.
- [12] การวิเคราะห์ความหนาแน่นพลังจากแม่เหล็กถาวรในต้นแบบตู้เย็นแม่เหล็ก. (2563). *Thai Journal of Science and Technology*, 9(2), 123–134.

[13] ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก. (2561).

Engineering Journal of Research and Development, 29(3), 45–58.

[14] Kitanovski, A., Tušek, J., Tomc, U., Plaznik, U., Ožbolt, M., & Poredoč, A. (2015).

Magnetocaloric Energy Conversion: From Theory to Applications. Springer

[15] Tegus, O., Brück, E., Buschow, K. H. J., & de

Boer, F. R. (2002). Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications. *Nature*, 415, 150–152.

[16] Franco, V., Blázquez, J. S., & Conde, A.

(2006). Field dependence of the magnetocaloric effect in materials with a second order phase transition. *Applied Physics Letters*, 89, 222512.

[17] Rowe, A. (2011). Thermodynamics of active

magnetic regenerators. *International Journal of Refrigeration*, 34(3), 1026–1033.

[18] Yu, B., Liu, M., Egolf, P. W., & Kitanovski, A.

(2010). A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010. *International Journal of Refrigeration*, 33(6), 1029–1060.

[19] Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen,

C. H., Sankar, S. G., & Liu, J. P. (2011). Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials*, 23(7), 821–842.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายสุรัตน์ ดีรอด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

งานวิจัยที่สนใจ : การออกแบบเครื่องจักรกล,
เครื่องจักรกลการเกษตร, หม้อไอน้ำ และภาชนะรับความ
ดัน, พลังงานทดแทน