



MAGNETIC REFRIGERATION SYSTEMS:
TECHNOLOGY TO REPLACE VAPOUR COMPRESSION SYSTEMS SOON

The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก: เทคโนโลยีที่กำลังจะมาแทนระบบอัดไอ
MAGNETIC REFRIGERATION SYSTEMS: TECHNOLOGY TO REPLACE VAPOUR
COMPRESSION SYSTEMS SOON

รจนา ประไพนพ

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จ.ชลบุรี 20230

โทร. 0-3835-4580 ต่อ 2844, โทรสาร 0-3835-4849

E-mail: rotchana@eng.src.ku.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กได้ถูกคาดการณ์ว่าสามารถทดแทนระบบอัดไอได้ และบางหน่วยงานได้วางแผนที่จะผลิตเชิงอุตสาหกรรมภายในปลายปี พ.ศ. 2556 และคาดว่าจะถูกใช้ในเชิงพาณิชย์ภายในปี พ.ศ.2558 เพื่อเตรียมตัวรับมือให้ทันความเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีการทำความเย็น บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กได้แก่แมกนีโตแคลอริกอีฟเฟกต์ (magnetocaloric effect) วัฏจักรการทำงานแบบเบรตัน (Brayton cycle) วัฏจักรแบบอีริคสัน (Ericsson cycle) และแอคทีฟแมกเนติกรีเจนเนอเรชัน (active magnetic regeneration, AMR) และการออกแบบเบื้องต้นที่ครอบคลุมถึงวัสดุแม่เหล็ก ชนิดของแม่เหล็ก และการควบคุมการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กหรือวัสดุแม่เหล็ก

Abstract

The magnetic refrigeration system is expected to replace the vapour compression system soon. Some company has been setting a plan to start manufacturing it by the end of 2013. It is expected that commercialized stage is about to take place within the next two years (2015). To understand the up-coming technology, this paper is to illustrate the working principles, including magnetocaloric effect, Brayton cycle, Ericsson cycle and the active magnetic regeneration. Some basic design parameters such as magnetic materials, types of magnets and movement control of magnetic material or magnets are also briefly reviewed.

1. บทนำ

ถึงแม้ว่าระบบอัดไอ (vapour compression system) จะถูกใช้ในการทำความเย็นและการปรับอากาศอย่างแพร่หลายมายาวนาน ระบบนี้ต้องใช้สารทำความเย็นที่สถานะในระบบเป็นของเหลว-ไอ ปัญหาของการรั่วหรือการปล่อยไอของสารทำความเย็นบางชนิดได้ส่งผลให้เกิดการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ ต่อมาจึงมีความพยายามในการลด ละ เลิกใช้สารทำความเย็นที่ทำลายโอโซนด้วยการทดแทนเป็นสารอื่น

อย่างไรก็ตามสารทดแทนบางชนิดยังคงมีความสามารถในการทำให้โลกร้อนสูง (เช่น R410A [1]) และบางชนิดยังมีความอันตรายจากการติดไฟได้ง่าย (เช่น R600a, R290 [1]) ทำให้นอกจากการค้นคว้าวิจัยหาสารทำความเย็นทดแทนแล้วหน่วยงานบางส่วนได้พัฒนาระบบทำความเย็นรูปแบบอื่นเพื่อทดแทนระบบอัดไอ และระบบที่ถูกคาดการณ์ว่าสามารถทดแทนระบบอัดไอได้คือระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก (Magnetic refrigeration system) เพราะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า [2]

การทำความเย็นแบบแม่เหล็กถูกคิดค้นขึ้นตั้งแต่ ค.ศ. 1881 (พ.ศ. 2424) จากการค้นพบของ Warburg [3] ที่พบว่าวัสดุแม่เหล็กที่เข้าและออกสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ [4] สำหรับระยะแรกๆ (ค.ศ.1881-1976) ระบบนี้ได้ถูกสนใจเพื่อนำไปใช้งานทำความเย็นที่อุณหภูมิทำความเย็นต่ำมาก (ต่ำกว่า 20 K) [3] หลังจาก Brown ได้นำเสนอสิ่งประดิษฐ์สำหรับการนำระบบแม่เหล็กไปใช้ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องในปี ค.ศ.1976 (พ.ศ. 2519) หลายหน่วยงานรอบโลกจึงได้มีการค้นคว้าพัฒนาชุดอุปกรณ์สำหรับการใช้งานที่ใกล้เคียงอุณหภูมิห้องตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา [3]

หลายประเทศ อาทิ อเมริกา แคนาดา ฝรั่งเศส สหราชอาณาจักร จีน ญี่ปุ่น ต่างสนใจพัฒนาอุปกรณ์/ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก [3] โดยระบบแม่เหล็กนี้ถูกคาดหวังว่าจะใช้เชิงพาณิชย์ได้ภายในปี ค.ศ. 2015 (พ.ศ. 2558) ความหวังนี้ดูใกล้จะเป็นจริงทุกขณะเมื่อบริษัทหนึ่ง (Cooltech) ในฝรั่งเศสได้ประสบความสำเร็จในการระดมทุนทั้งจากภาครัฐและนักลงทุนกว่า 20 ล้านยูโร (หรือประมาณ 800 ล้านบาท) ในการพัฒนาเครื่องทำความเย็นระบบแม่เหล็กเชิงพาณิชย์ และได้วางแผนการเริ่มผลิตเชิงอุตสาหกรรมในปลายปี พ.ศ.2556 [5] ขณะเดียวกันหลายองค์กรในสหภาพยุโรปก็ได้ร่วมกันจัดตั้งโครงการ FRISBEE เพื่อพัฒนาระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก หน่วยงานในอเมริกา เช่น Astronautics Corporation of America ก็ได้รับทุนสนับสนุนอย่างต่อเนื่องหลายสิบปีจากรัฐบาลสำหรับโครงการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็ก

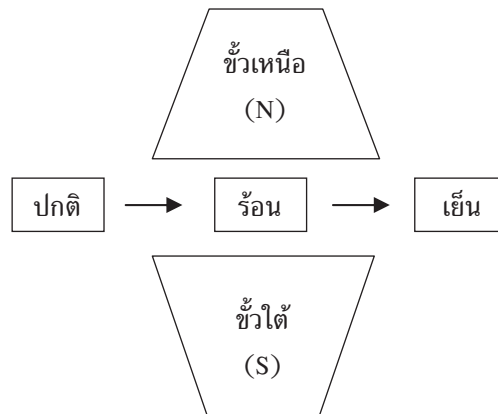
เพื่อเตรียมตัวรับมือให้เท่าทันความเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีการทำความเย็น บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ของหลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กและการออกแบบระบบเบื้องต้น

2. หลักการทำความเย็นระบบแม่เหล็ก

2.1 แมกนีโตแคลอริกอีฟเฟกต์ (magnetocaloric effect)

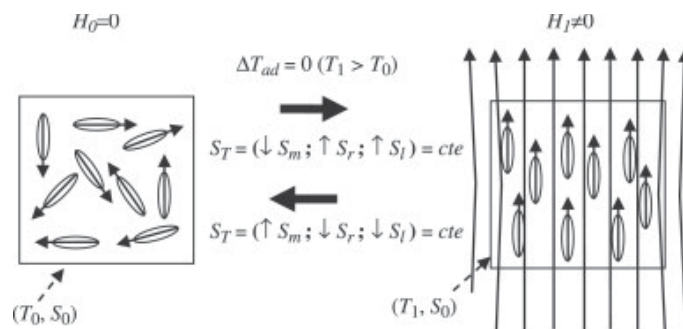
ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กทำงานโดยแมกนีโตแคลอริกอีฟเฟกต์ (magnetocaloric effect) หรือหลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี) ของวัสดุแม่เหล็ก (magnetic material) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก [4, 6] ดังแสดงในรูปที่ 1

¹ FRISBEE = Food Refrigeration Innovations for Safety, consumers' Benefit, Environmental impact and Energy optimisation along the cold chain in Europe



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่เข้าออกสนามแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก (ที่มา: ดัดแปลงจาก www.wikipedia.org)

ตัวอย่างการจัดเรียงของสปินแม่เหล็กดังรูปที่ 2 ภาพ ก แสดงการจัดเรียงสปินในวัสดุแม่เหล็กก่อนนำเข้าสู่สนามแม่เหล็ก และ ภาพ ข แสดงการจัดเรียงสปินในวัสดุแม่เหล็กเมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก



ก) ก่อนจ่ายสนามแม่เหล็ก

ข) ขณะจ่ายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 2 การจัดเรียงของระบบสปินแม่เหล็ก (magnetic spin) ของวัสดุก่อนและหลังการจ่ายสนามแม่เหล็ก ในภาวะแอดิยาแบติก (adiabatic) [6]

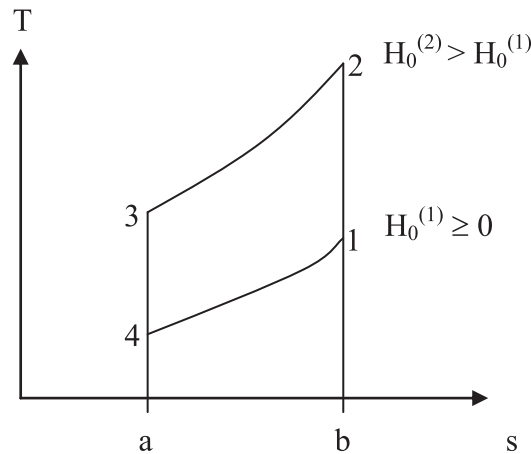
ขณะจ่ายสนามแม่เหล็กภายใต้ภาวะที่ไม่มีการถ่ายโอนความร้อนเข้าหรือออกระบบหรือภาวะแอดิยาแบติก (adiabatic conditions) เมื่อมีการเพิ่มค่าของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอก การจัดเรียงของสปินแม่เหล็ก (magnetic spin) จะเป็นระเบียบมากขึ้นแต่เอนโทรปีแม่เหล็ก (magnetic entropy) ลดลง [6]

ทั้งนี้กระบวนการจ่ายสนามแม่เหล็ก (magnetization) เอนโทรปีรวม (total entropy) (ซึ่งประกอบด้วยเอนโทรปีแม่เหล็ก เอนโทรปีแลตทิซ เอนโทรปีอิเล็กตรอนิก เป็นต้น) จะมีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อเอนโทรปีแม่เหล็ก (magnetic entropy) ถูกทำให้ลดลง เอนโทรปีของแลตทิซและอิเล็กตรอนิก (lattice and electronic entropy) จะเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชย ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น (โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะขึ้นกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ถูกจ่าย) เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกถูกนำออกไป ระบบสปินแม่เหล็ก (magnetic spin) จะกลับมาเรียงตัวอยู่ในภาวะเดิมโดยรับพลังงานมาจากแลตทิซ (lattice) ซึ่งทำให้เอนโทรปีทางความร้อน (thermal entropy) ลดลง ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิที่ลดลง [6]

2.2 วัฏจักรทางเทอร์โมไดนามิกส์

กระบวนการต่าง ๆ ของระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กทำงานเป็นวัฏจักรและเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรรูปแบบต่าง ๆ

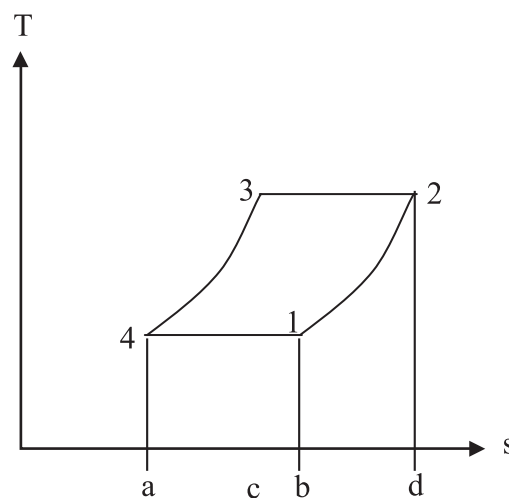
อาทิ วัฏจักรเบรตัน (Brayton cycle) วัฏจักรอีริคสัน (Ericsson cycle) และ วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle) ได้ถูกอธิบายอย่างละเอียดใน [7] ในที่นี้จะยกตัวอย่างเฉพาะวัฏจักรเบรตันและวัฏจักรอีริคสัน ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 วัฏจักรเบรตัน (Brayton cycle) [7]

จากรูปที่ 3 T คือ อุณหภูมิ s คือ เอนโทรปี H_0 คือสนามแม่เหล็ก ระบบที่ใช้วัฏจักรเบรตันในการทำงานจะทำงานระหว่างสนามแม่เหล็กซึ่งมีค่าคงที่สองค่า และกระบวนการเอนโทรปีคงที่สองกระบวนการ เมื่อวัสดุแม่เหล็ก (magnetic or magnetocaloric material) ถูกนำเข้าสู่สนามแม่เหล็ก (กระบวนการ 1-2) เอนโทรปีรวมมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากการจ่ายสนามแม่เหล็กแบบแอดิยาติก (adiabatic magnetization, $\Delta H_0 = H_0^{(2)} - H_0^{(1)}$) อุณหภูมิในวัสดุแม่เหล็กจะเพิ่มสูงขึ้น ที่อุณหภูมิสูงนี้ความร้อนจะถูกระบายออกจากวัสดุ (กระบวนการ 2-3) หลังจากนั้นวัสดุออกจากสนามแม่เหล็ก (หรือนำสนามแม่เหล็กออกจากวัสดุ) แบบแอดิยาติก (กระบวนการ 3-4) วัสดุแม่เหล็กจะเย็นลง กระบวนการสุดท้าย (4-1) ความร้อนจะถูกดูดจากแหล่งความร้อนซึ่งจะเป็นการทำความเย็นให้กับอุปกรณ์ภายนอก [7]

วัฏจักรอีกรูปแบบหนึ่งคือวัฏจักรอีริคสันดังแสดงในรูปที่ 4 หลักการของวัฏจักรนี้จะประกอบด้วยเส้นอุณหภูมิคงที่สองค่าและสนามแม่เหล็กคงที่สองค่า (รูปที่ 4, สนามแม่เหล็กคงที่ระหว่างกระบวนการ 1-2 และ 3-4 ด้วยค่าต่างกัน)



รูปที่ 4 วัฏจักรอีริคสัน (Ericsson cycle) [7]

จากรูปที่ 4 ระหว่างกระบวนการสนามแม่เหล็กคงที่ (1-2) ความร้อนจะถูกดูดโดยการสร้างพลังงานทดแทนหรือรีเจนเนอเรชัน (regeneration) จากฝั่งตรงข้าม (3-4) ดังนั้นสำหรับรีเจนเนอเรชันแบบอุดมคติ (ideal regeneration) พื้นที่ใต้กราฟ 2-1-b-d จะแสดงการดูดซับพลังงานความร้อนจากวัสดุแม่เหล็กที่ต้องสัมพันธ์กับพื้นที่ 3-4-a-c ที่แสดงการนำความร้อนออกของวัสดุทำความเย็น การทดแทนพลังงานนี้จะกระทำด้วยผลต่างของอุณหภูมิเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้และจะลดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยวัฏจักรอีริคสันลง [7]

การสร้างกระบวนการอุณหภูมิคงที่ (isothermal processes, จากรูปที่ 4 ได้แก่ กระบวนการ 2-3 และ 4-1) จะได้มาจากการปรับแต่งค่าสนามแม่เหล็กและการดูดหรือคายความร้อน พื้นที่ 1-2-3-4 แสดงงานที่ต้องการสำหรับวัฏจักรอีริคสันและพื้นที่ 1-4-a-b แสดงพลังงานการทำความเย็น [7] ระบบที่ทำงานด้วยวัฏจักรอีริคสันนี้สามารถให้สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (COP) สูงมากโดยเมื่อพิจารณาทางทฤษฎีคู่กับวัสดุประกอบ (composite material) สามารถให้ค่า COP ใกล้เคียงกับ COP แบบคาร์โนต์ (Carnot COP) [8]

2.3 แอคทีฟแมกเนติกรีเจนเนอเรชัน (Active magnetic regeneration, AMR)

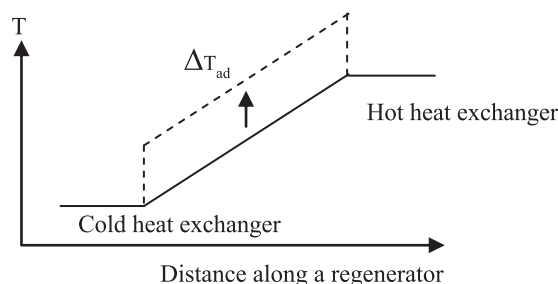
Brown (1976) แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ทำงานอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องสามารถให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (temperature span) ของวัสดุ (จากการผ่านเข้าออกสนามแม่เหล็ก) มากกว่าค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุสูงสุดที่ได้จากแมกนีโตแคลอริกเอฟเฟค (magnetocaloric effect, MCE หรือ adiabatic temperature change, ΔT_{ad}) [3] กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative process) หรือเรียกว่าแอคทีฟแมกเนติกรีเจนเนอเรชัน (active magnetic regeneration, AMR) [3] ดังแสดงในรูปที่ 5 [9] อนึ่ง ในระบบ AMR วัสดุแม่เหล็กจะถูกใช้เป็นตัวสารทำความเย็น (coolant or refrigerant) และรีเจนเนอเรเตอร์ (regenerator) [10]

จากรูปที่ 5 เส้นประแสดงการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนั้น ๆ ระหว่างขั้นตอน (b) และ (c) เส้นอุณหภูมิเชิงเส้นจะกลับมาเป็นค่าเริ่มต้น ในทำนองเดียวกันกับกรณีระหว่างขั้นตอน (d) และ (a) [9]

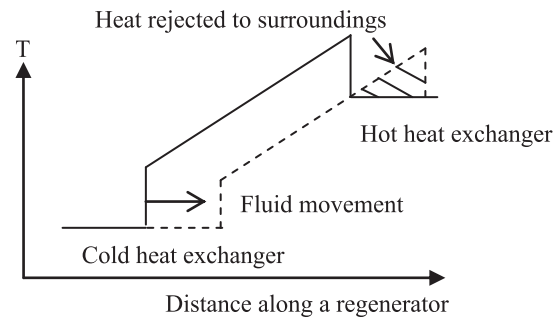
กระบวนการในวัฏจักร AMR เป็นดังนี้ [9]

1. การจ่ายสนามแม่เหล็กให้กับรีเจนเนอเรเตอร์ (regenerator) อุณหภูมิของวัสดุแม่เหล็ก (magnetocaloric material, MCM) จะถูกทำให้สูงขึ้นประมาณ ΔT_{ad} และความร้อนจะถูกถ่ายโอนจาก MCM ให้กับของไหลสำหรับถ่ายโอนความร้อน (heat transfer fluid, HTF) (รูปที่ 5 a)
2. HTF จะถ่ายโอนความร้อนสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านร้อน (hot heat exchanger) (รูปที่ 5 b)
3. การนำสนามแม่เหล็กออกจากรีเจนเนอเรเตอร์ อุณหภูมิของ MCM จะลดลงประมาณ ΔT_{ad} และความร้อนจะถูกถ่ายโอนจาก HTF ให้กับ MCM (รูปที่ 5 c)
4. HTF ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเย็น (cold heat exchanger) และความร้อนถูกดูดซับจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเย็น (รูปที่ 5 d)

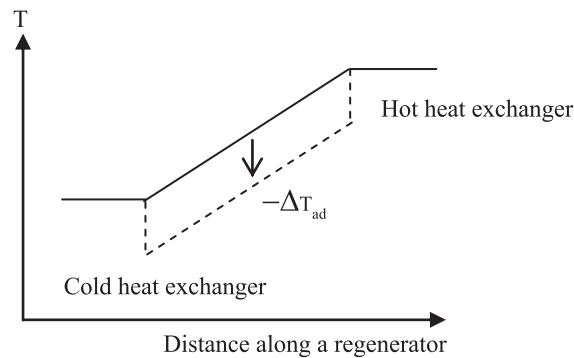
หมายเหตุ อุณหภูมิ (T) ขึ้นกับตำแหน่งของวัสดุแม่เหล็กในรีเจนเนอเรเตอร์ (regenerator) และการกระจายตัวของอุณหภูมิในรีเจนเนอเรเตอร์ไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นตรง [9]



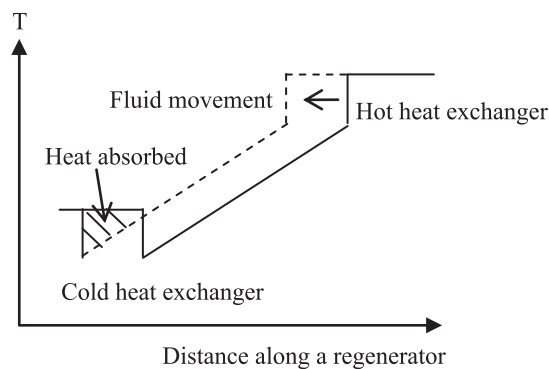
(a) ขั้นตอนการจ่ายสนามแม่เหล็ก



(b) การระบายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม



(c) การออกจากสนามแม่เหล็ก



(d) การดูดซับความร้อนจากภาระการทำความเย็น
รูปที่ 5 ตัวอย่างวัฏจักรการทำงานแบบ AMR [9]

3. ตัวอย่างการออกแบบเบื้องต้น

3.1 วัสดุแม่เหล็ก

วัสดุที่ผ่านเข้าออกสนามแม่เหล็กแล้วมีการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีแม่เหล็กดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมาได้ต้องเป็นวัสดุแม่เหล็ก (magnetic or magnetocaloric material) วัสดุที่มีสมบัตินี้ได้แก่ โลหะหายาก (rare earth materials) เช่น แกโดลิเนียม (Gadolinium) และสารประกอบแกโดลิเนียม (Gadolinium) กับ เทอร์เบียม (Terbium) เป็นต้น [8, 10] อย่างไรก็ตามยังมีราคาสูงและหายาก ทำให้มีการพยายามค้นคว้าหาวัสดุที่เหมาะสมทั้งด้านปริมาณ (เพื่อสามารถใช้เชิงพาณิชย์ได้) และสมบัติที่ต้องการ

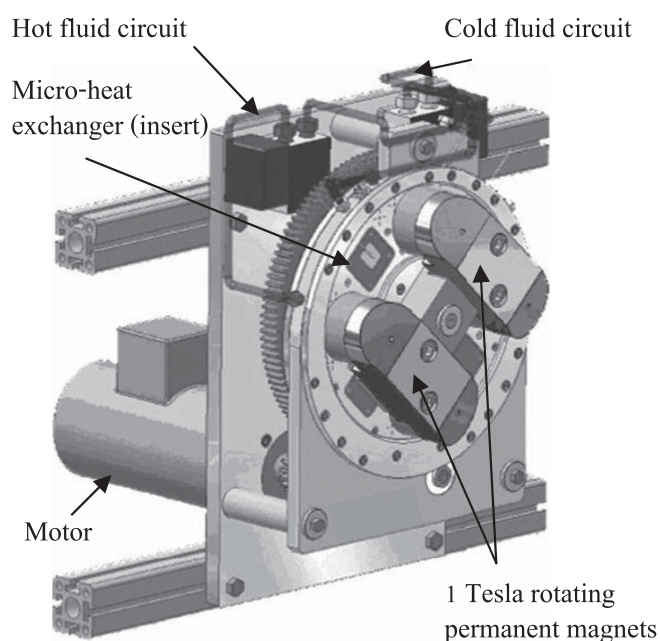
(มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามที่ต้องการ) โลหะเจือหรือโลหะผสม (alloy) จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความสนใจ วัสดุต่างๆ ที่ได้รับการศึกษา อาทิ สารประกอบ MnFePGe หรือ MnFeGeSi [11] และอื่นๆอีกหลายชนิด สำหรับการพัฒนาวัสดุที่เหมาะสมเชิงพาณิชย์ ควรพิจารณาศึกษาให้รอบด้านรวมถึงต้นทุนการเตรียมวัสดุ การผลิต รวมถึงความปลอดภัยต่อคนและสิ่งแวดล้อมร่วมกัน [3, 9]

3.2 ชนิดของแม่เหล็ก

ลักษณะของแม่เหล็กที่ต้องการใช้ในระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กได้แก่แม่เหล็กที่สร้างสนามแม่เหล็กได้มากโดยใช้ปริมาณแม่เหล็กเพียงเล็กน้อย [9] ในระยะเริ่มแรกของการพัฒนาต้นแบบระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กมักใช้แม่เหล็กไฟฟ้าตัวนำยวดยิ่ง (superconducting electromagnets) ซึ่งสามารถสร้างความเข้มของสนามแม่เหล็กได้สูง แต่ปัญหาคือต้องการระบบขนาดใหญ่ และการระบายความร้อนที่ดีพอ [9] แม่เหล็กไฟฟ้าแบบที่ไม่ใช่ตัวนำยวดยิ่ง เป็นอีกวิธีหนึ่งในการสร้างสนามแม่เหล็ก แต่ปัญหาคือต้องใช้ไฟฟ้าเช่นกัน [9] สำหรับการออกแบบระบบให้มีขนาดกะทัดรัดและไม่ต้องใช้ไฟฟ้าในการสร้างสนามแม่เหล็ก การใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent magnets) จึงเป็นทางเลือกที่ดี โดยจะเห็นได้ว่าระบบที่พัฒนาในระยะหลังๆ มักใช้แม่เหล็กถาวร [9, 12] เช่น NdFeB [13]

3.3 การควบคุมการทำงาน

การควบคุมวัสดุแม่เหล็กให้มีการผ่านเข้าออกสนามแม่เหล็กอาจแบ่งคร่าวๆ เป็นสองวิธีได้แก่แบบลูกสูบ (Reciprocating) และแบบโรตารี (Rotary) โดยแบบลูกสูบวัสดุแม่เหล็กและแม่เหล็กจะถูกทำให้เคลื่อนที่ในทางตรงออกจากกันในช่วงตอนการเอาสนามแม่เหล็กออก (demagnetization step) และเคลื่อนที่เข้าหากันในช่วงตอนการจ่ายสนามแม่เหล็ก (magnetization step) ส่วนวิธีแบบโรตารีอาจเป็นวัสดุแม่เหล็กหรือแม่เหล็กที่จะหมุนเพื่อให้เกิดการจ่ายสนามแม่เหล็ก (magnetization) และ เอาสนามแม่เหล็กออก (demagnetization) จากวัสดุแม่เหล็ก [9] โดยทั่วไป การให้แม่เหล็กหมุนขณะที่วัสดุแม่เหล็กอยู่กับที่จะควบคุมได้ง่ายกว่าการให้วัสดุแม่เหล็กหมุนแล้วให้แม่เหล็กอยู่กับที่ ตัวอย่างระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กที่ถูกพัฒนาโดย Vasile and Muller [13] ถูกแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กที่ถูกพัฒนาโดย Vasile and Muller [13]

4. สรุป

ระบบทำความเย็นแบบแม่เหล็กถูกประยุกต์มาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุแม่เหล็ก (magnetic or magnetocaloric material) เมื่อผ่านเข้าออกสนามแม่เหล็ก อุปกรณ์ของระบบนี้ได้แก่เรื่องวัสดุและช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงที่ได้ ที่ผ่านวัสดุแม่เหล็กที่ใช้มักเป็นโลหะหายาก (rare earth materials) จึงได้มีความพยายามค้นคว้าพัฒนาหาวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะเจือหรือโลหะผสม (alloy) เพื่อให้ได้ช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง วัสดุสามารถในการทำความเย็น และสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่สูงขึ้น สำหรับการออกแบบระบบเบื้องต้นชนิดของแม่เหล็กที่ใช้สำหรับการทำความเย็นทั่วไปที่อุณหภูมิใกล้อุณหภูมิห้องมักเป็นแม่เหล็กแบบถาวร ระบบขับเคลื่อนแบบโรตารีจะทำให้ขนาดอุปกรณ์กะทัดรัดกว่าแบบลูกสูบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ร. ประไพพนพ, แนวทางในการเลือกสารทำความเย็นทดแทน, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา (วสท.), 24 (2556) 22-28.
- [2] B.F. Yu, Q. Gao, B. Zhang, X.Z. Meng, Z. Chen, Review on research of room temperature magnetic refrigeration, International Journal of Refrigeration, 26 (2003) 622-636.
- [3] K.A. Gschneidner Jr, V.K. Pecharsky, Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects, International Journal of Refrigeration, 31 (2008) 945-961.
- [4] J. Dikeos, A. Rowe, Validation of an active magnetic regenerator test apparatus model, International Journal of Refrigeration, 36 (2013) 921-931.
- [5] A. Gaved, Magnetic refrigeration technology set to break through, Refrigeration and air conditioning magazine (RAC), 30 May 2013 (2013).
- [6] J. Romero Gmez, R. Ferreira Garcia, A. De Miguel Catoira, M. Romero Gmez, Magnetocaloric effect: A review of the thermodynamic cycles in magnetic refrigeration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 17 (2013) 74-82.
- [7] A. Kitanovski, P.W. Egolf, Thermodynamics of magnetic refrigeration, International Journal of Refrigeration, 29 (2006) 3-21.
- [8] G. Diguët, G. Lin, J. Chen, Performance characteristics of a regeneration Ericsson refrigeration cycle using a magnetic composite as the working substance, International Journal of Refrigeration, 36 (2013) 958-964.
- [9] R. Bjork, Designing a magnet for magnetic refrigeration, in: Fuel Cells and Solid State Chemistry Division, Technical University of Denmark, Denmark, 2010.
- [10] K.A. Gschneidner Jr, V.K. Pecharsky, Rare Earths and Magnetic Refrigeration, Journal of Rare Earths, 24 (2006) 641-647.
- [11] E. Brck, O. Tegus, D.T. Cam Thanh, N.T. Trung, K.H.J. Buschow, A review on Mn based materials for magnetic refrigeration: Structure and properties, International Journal of Refrigeration, 31 (2008) 763-770.
- [12] B. Yu, M. Liu, P.W. Egolf, A. Kitanovski, A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010, International Journal of Refrigeration, 33 (2010) 1029-1060.
- [13] C. Vasile, C. Muller, Innovative design of a magnetocaloric system, International Journal of Refrigeration, 29 (2006) 1318-1326.