

# การทำความเย็นด้วยคลื่นเสียง

## Thermoacoustic Refrigeration

อิศเรศ ฐชกัลยา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ปทุมธานี 12121

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ ระบบทำความเย็นในครัวเรือนจะอาศัยเทคโนโลยีการอัดไอ (vapor compression) โดยสารทำงานจะทำหน้าที่เป็นตัวส่งถ่ายความร้อนด้วยการอัดและขยายตัว ซึ่งระบบดังกล่าวได้ถูกพัฒนาและใช้งานมาเป็นเวลายาวนาน แต่อย่างไรก็ตาม ระบบการอัดไอจะต้องพึ่งพาสารทำงานชนิดไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (HCFC's) และไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC's) ได้แก่ R-12 และ R-22 ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีผลเป็นอย่างมากต่อการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศโลกและก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน [1] ซึ่งปัญหาดังกล่าว ประชาคมโลกพยายามเร่งแก้ไขอยู่ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านพยายามคิดค้นสารทำงานชนิดใหม่ ๆ มาใช้ทดแทนสารทำความเย็นเดิม โดยคำนึงถึงผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและประสิทธิภาพของระบบเป็นหลัก จึงทำให้เกิดสารทำความเย็นทดแทนขึ้นมาอีกหลายชนิดในช่วงเวลาต่อมา ตัวอย่างเช่น R-134a แอมโมเนีย เมเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองศึกษาของสารทำความเย็นทดแทนเหล่านี้ สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยเหล่านี้ [2-6] แต่อย่างไรก็ตามสารทำความ

เย็นทดแทนเหล่านี้ก็ยังคงมีผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ต่อมา ระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก (thermoacoustic refrigeration) ได้ถูกพัฒนาในระดับที่สูงขึ้น จึงทำให้ระบบทำความเย็นนี้มีศักยภาพที่จะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับระบบทำความเย็นในครัวเรือนในอนาคตที่สะอาด และเป็นมิตรต่อทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยในระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกไม่ต้องอาศัยคอมเพรสเซอร์ในการขับเคลื่อนสารทำงานในระบบ ดังนั้นความ ต้องการ ใช้พลังงานจึงน้อยกว่า จึงช่วยให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น และระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกจะใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นสารทำงาน นั้นแสดงให้เห็นว่า ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมได้ลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับสารทำความเย็น R-134a และ R-22 ที่ใช้อยู่ในระบบทำความเย็นในปัจจุบัน นอกจากนี้อุปกรณ์ในระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกนั้นมีความซับซ้อนไม่มาก ส่งผลให้ราคาต้นทุนของระบบจะถูกกว่าระบบทำความเย็นแบบอัดไอ และที่เห็นได้ชัดเจนอีกประการหนึ่งคือ ค่าซ่อมบำรุงรักษาที่น้อยกว่าเนื่องจากไม่มีชิ้นส่วนใดที่เคลื่อนไหว แต่อย่างไรก็ตาม ประโยชน์ที่แท้จริงของการนำระบบเทอร์โม-

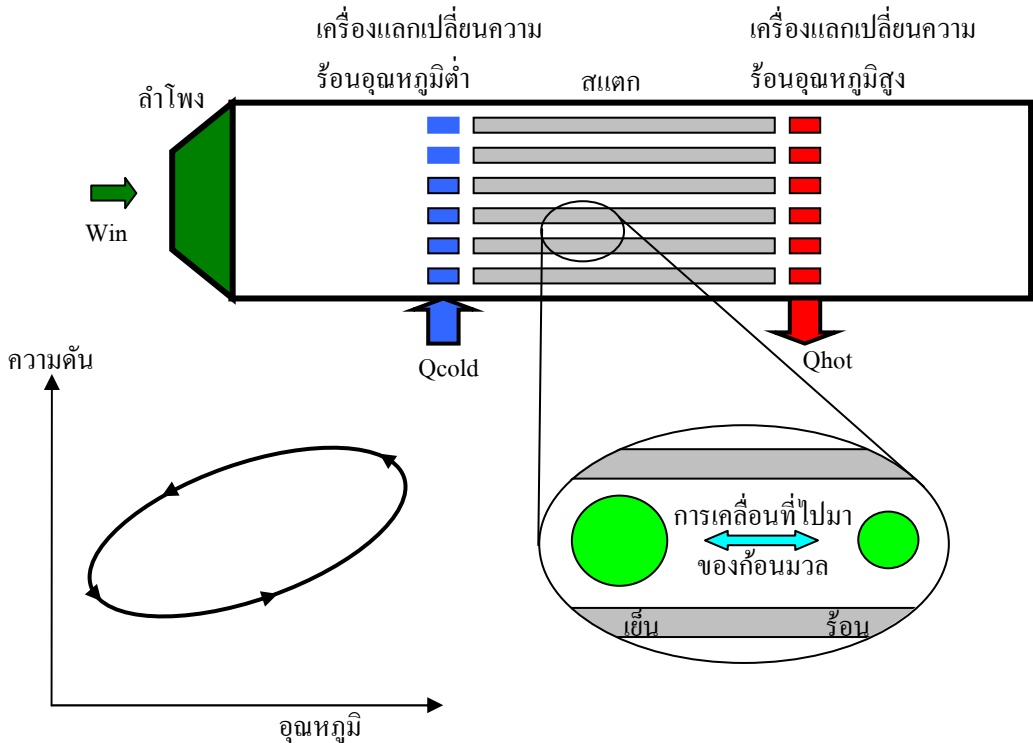
อะคูสติคมาประยุกต์ใช้งานในระบบทำความเย็นก็คือ การนำก๊าซเฉื่อยที่เกิดขึ้นในธรรมชาติมาใช้เป็นสารทำงาน ซึ่งเป็นเหตุผลหลักสำหรับการรักษา สิ่งแวดล้อมให้ยั่งยืนนาน

ในการเคลื่อนที่ของสารทำงานในระบบ เทอร์โมอะคูสติค จะอาศัยคลื่นเสียงที่มีแอมพลิจูดสูง เป็นตัวขับให้เคลื่อนในลักษณะแกว่งไกว (oscillation) โดยที่ก่อนมวลของสารทำงานนี้จะทำหน้าที่ถ่ายเท ความร้อนออกให้กับตัวกลาง (media) ที่บริเวณความ ดันสูง และรับความร้อนจากตัวกลางในบริเวณที่ ความดันต่ำ โดยสารทำงานนี้จะทำงานไปอย่าง ต่อเนื่องตามจังหวะการเคลื่อนที่แกว่งไกวของคลื่น ความดัน ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดความแตกต่างของ อุณหภูมิเกิดขึ้น โดยที่ตัวกลางนี้จะทำหน้าที่เป็นเพียง ที่พัก (buffer) ของพลังงานความร้อน และถูกเรียกว่า สแตก (stack) ซึ่งหลักการทำงานของระบบเทอร์- โมอะคูสติคและการประยุกต์ใช้งานจะถูกกล่าวโดย รายละเอียดในหัวข้อต่อไป

## 2. ระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติค

ในปี ค.ศ. 1980 Scott Backhaus และ Greg Swift แห่งสถาบันวิจัย Los Alamos ได้ทำการทดลอง ศึกษาและพบว่า การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงทำให้เกิด การอัดตัวและขยายตัวของก๊าซ และเมื่อนำแผ่นวัตถุ บางไปวางขวางตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น จะ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้ง สองข้างของแผ่นวัตถุบางดังกล่าว ซึ่งนี่เป็นจุดเริ่มต้น ของการศึกษาศาสตร์ทางด้านเทอร์โมอะคูสติคอย่าง จริงจัง

เทอร์โมอะคูสติคเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการ เปลี่ยนแปลงระหว่างพลังงานความร้อนกับพลังงาน คลื่นเสียง (acoustic energy) ซึ่งเกี่ยวพันกับทฤษฎีที่ ซับซ้อนของเทอร์โมไดนามิกส์และอะคูสติค โดยทั่วไปแล้ว ระบบเทอร์โมอะคูสติคสามารถ จำแนกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ เครื่องยนต์ความ ร้อน (heat engine) และเครื่องทำความร้อน (heat pump) โดยหลักการ เครื่องยนต์ความร้อนจะนำ พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนสูง เปลี่ยน พลังงานความร้อนบางส่วนไปเป็นพลังงานเสียง และ ระบายความร้อนส่วนที่เหลือทิ้งไปในแหล่งความ ร้อนต่ำ ส่วนเครื่องทำความร้อนจะใช้พลังงานเสียง ไปขับความร้อนจากแหล่งความร้อนหนึ่ง ไปยังอีก แหล่งความร้อนหนึ่ง ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของ อุณหภูมิระหว่างแหล่งความร้อนทั้งสอง โดยทั่วไป สำหรับระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติคจะใช้ ลำโพง (speaker) หรือเครื่องยนต์ความร้อนเป็นตัวขับ ให้สารทำงานในระบบเกิดการเคลื่อนที่ ในทาง ปฏิบัติ จะนิยมใช้ลำโพงซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงาน ไฟฟ้ามาเป็นพลังงานเสียงมาเป็นตัวขับมากกว่า เนื่องจากง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานและมีราคาถูก แต่ ประสิทธิภาพทางอะคูสติคจะด้อยกว่าเครื่องยนต์ ความร้อน จากอุปกรณ์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมด จะเห็นได้ว่า ไม่มีชิ้นส่วนใดที่เคลื่อนไหว ดังนั้นอายุ การใช้งานของระบบจึงสูงและไม่ต้องการการ บำรุงรักษา



รูปที่ 1 หลักการทำงานของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก

### 3. หลักการทำงานของเทอร์โมอะคูสติก

จากรูปที่ 1 แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก โดยสารทำงานภายในจะถูกกระตุ้นทำให้เกิดคลื่นเสียงขึ้นภายในท่อด้วยแหล่งอะคูสติก เช่น ลำโพง หรือเครื่องขบดความร้อน ซึ่งในท่อจะถูกบรรจุด้วยก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม ไนโตรเจน เป็นต้น ในกรณีที่ปลายอีกด้านหนึ่งของท่อเป็นปลายปิด คลื่นที่เกิดขึ้นจะเป็นคลื่นนิ่ง (standing wave) สแตก (stack) จะถูกวางในท่อในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วสแตกจะถูกทำมาจากวัสดุพรุนหรือแผ่นวัสดุบางจำนวนมากประกอบกันเป็นชั้น ๆ เพื่อให้ก๊าซภายในสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปมาได้ และวัสดุที่ใช้ทำสแตกควรจะมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ เพื่อให้

ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านทางสารทำงานเท่านั้น โดยไม่มีการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนไปตามแผ่นสแตก จากการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในสแตกทำให้อุณหภูมิของสแตกมีความแตกต่างกันตลอดความยาว โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้จะถูกนำไปใช้งานต่อโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ถูกติดตั้งที่ปลายทั้งสองข้างของสแตก สำหรับระบบทำความเย็น ปลายข้างที่อุณหภูมิต่ำจะถูกใช้ในการทำความเย็น ในขณะที่ข้างที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกระบายความร้อนทิ้งอย่างต่อเนื่อง ส่วนระบบทำความร้อนก็จะมีลักษณะการใช้งานที่ตรงกันข้ามกับระบบทำความเย็น

วัฏจักรการทำงานของสารทำงานภายในสแตกแสดงในรูปที่ 1 ในขณะก่อนมวลของก๊าซ

เคลื่อนที่ไปทางขวาซึ่งมีความดันที่สูงกว่า ส่งผลให้ปริมาตรของก้อนมวลมีขนาดเล็กลง ทำให้อุณหภูมิภายในก้อนมวลสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิของแผ่นสแตก ดังนั้นความร้อนในก้อนมวลจะถูกถ่ายเทไปที่แผ่นสแตก ส่งผลให้อุณหภูมิที่แผ่นสแตกทางด้านขวาสูงขึ้น ในจังหวะต่อไป ก้อนมวลถูกดันให้เคลื่อนที่มาทางซ้าย ถอยกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นซึ่งมีความดันที่น้อยกว่า ทำให้ปริมาตรของก้อนมวลมีค่าเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของก้อนมวลก็มีค่าลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิของแผ่นสแตก จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นสแตกสู่ก้อนมวล ทำให้อุณหภูมิที่แผ่นสแตกทางด้านซ้ายลดลง จากวัฏจักรดังที่ได้อธิบายไปแล้ว จะเห็นได้ว่า ก้อนมวลทำหน้าที่เป็นเพียงตัวกลาง ในการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง วัสดุที่ใช้ทำสแตกโดยทั่วไปจะมีความจุความร้อนสูง แต่มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ตัวอย่างเช่น พลาสติก เซรามิก สแตนเลส เป็นต้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองเนื่องจากการนำความร้อนผ่านตัวสแตกจะมีค่าน้อยมาก เมื่อกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องไปตามจังหวะการเคลื่อนที่แกว่งไกวของคลื่นความดัน โดยที่มีก้อนมวลตัวอื่นมาทำหน้าที่ต่อจากจุดนั้นไปตลอดความยาวของแผ่นสแตกทั้งทางด้านซ้ายและด้านขวา จะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองข้างของ สแตก [7]

สารทำงานที่ใช้ในระบบเทอร์โมอะคูสติก โดยส่วนใหญ่จะใช้ ก๊าซฮีเลียม ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซเฉื่อยผสม เช่น ฮีเลียม-อาร์กอน ฮีเลียม-ซีนอน เป็นต้น โดยสารทำงานที่ดีควรมีค่าความเร็วของเสียง และค่าการนำความร้อนที่สูง [8] จากการเปรียบเทียบในบรรดาก๊าซเฉื่อยทั้งหลาย พบว่า ฮีเลียม

จะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด โดยค่าความเร็วของเสียงที่สูงจะทำให้ระบบสามารถทำงานได้ด้วยความถี่ของเสียงสูงๆ ส่งผลให้ขนาดของระบบมีขนาดเล็ก ส่วนค่าการนำความร้อนที่สูงจะช่วยเพิ่มค่า thermal penetration depth ( $\delta_k = \sqrt{2k/\rho c_p \omega}$ ) ของ สแตก เมื่อ  $k$ ,  $c_p$  และ  $\omega$  คือค่าการนำความร้อน ค่าความจุความร้อน และความถี่ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรนี้มีความสำคัญมากในการออกแบบตัวสแตก โดยทั่วไปแล้ว ระยะห่างของแผ่นวัตถุบางในแต่ละชั้นของตัวสแตกที่เหมาะสมจะมีค่าประมาณ  $2\delta_k$  ถึง  $4\delta_k$  [9] ดังนั้นถ้าเลือกสารทำงานที่มีค่า  $\delta_k$  สูงจะทำให้ระยะห่างของช่องใน สแตกมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างสแตก ถูกลง นอกเหนือจากบรรดาก๊าซเฉื่อยที่ได้กล่าวมาแล้ว อากาศก็สามารถนำมาใช้เป็นสารทำงานได้ แต่จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงประมาณ 46% เมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซฮีเลียม [10] แต่สำหรับการใช้อากาศเป็นสารทำงาน จะลดปัญหาทางด้านค่าใช้จ่ายลง จึงมีความเหมาะสมกับระบบทำความเย็นต้นทุนต่ำ [11, 12] นอกจากนี้ ความดันของสารทำงานภายในระบบที่สูงขึ้นก็จะช่วยเพิ่มความสามารถในการทำความร้อน แต่ความปลอดภัยก็เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงด้วย จากที่ได้วิจารณ์มา จะพบว่า ข้อ ได้เปรียบจากการนำก๊าซเฉื่อยมาเป็นสารทำงานในระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกเมื่อเปรียบกับระบบแบบอัดไอ สามารถสรุปได้ดังนี้

- ไม่มีผลต่อสภาวะโลกร้อน
- ไม่มีผลต่อการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ
- ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม
- ไม่ติดไฟ

- ทำงานที่ความดันต่ำกว่า ส่งผลให้ระบบมีขนาดที่เล็กกว่า

#### 4. การพัฒนาเทคโนโลยีเทอร์โมอะคูสติก

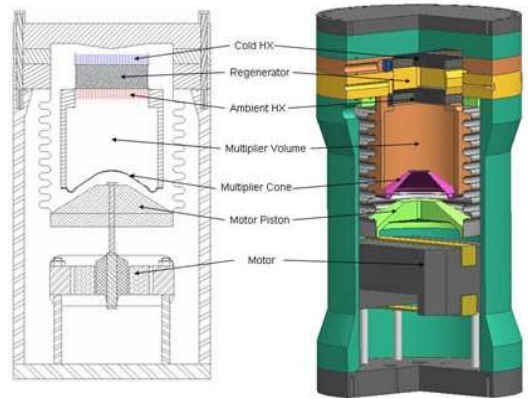
จากข้อได้เปรียบที่ว่า สารทำงานในระบบเทอร์โมอะคูสติกไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม และระบบไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว จึงไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับวาล์ว แหวนกระบอกสูบ หรือข้อต่อต่าง ๆ ส่งผลให้ไม่ต้องการการหล่อลื่น ประกอบกับกลไกการทำงานที่ไม่ซับซ้อนที่ใช้ในระบบ จึงทำให้เทอร์โมอะคูสติกเป็นเทคโนโลยีทางเลือกที่น่าสนใจ ที่จะนำมาใช้ทดแทนเทคโนโลยีที่ก่อให้เกิดมลพิษที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกนั้น จะต่ำกว่าของระบบอัดไอประมาณ 20-30% ซึ่งประสิทธิภาพที่ต่ำนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอะคูสติกที่ไม่เหมาะสม (ความแตกต่างของอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มากเกินไป) [13] ดังนั้นถ้ามีการปรับปรุงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอุปกรณ์บางอย่างในระบบ จะช่วยให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นทัดเทียมกับระบบทำความเย็นแบบอัดไออย่างแน่นอนในอนาคต

ทฤษฎีทางเทอร์โมอะคูสติกได้เริ่มศึกษาและพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1970 และระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกตัวแรกได้ถูกสร้างในปี ค.ศ. 1985 ดังนั้นเทคนิคนี้จึงค่อนข้างใหม่สำหรับวงการวิจัย ดังนั้นเครื่องจักรเหล่านี้ จึงยังอยู่ในระดับขั้นพัฒนาโดยต้นแบบของระบบทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกตัวแรกถูกใช้ในยานอวกาศเพื่อใช้ระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของระบบเรดาร์ และระบบทางเทอร์โมอะคูสติกได้ถูกพัฒนา

มาอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้งานในเชิงพาณิชย์ ในปัจจุบันนี้ เครื่องยนต์ความร้อนแบบเทอร์โมอะคูสติกได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถผลิตกำลังอะคูสติกได้ถึง 30 kW เพื่อใช้ขับเคลื่อนทำความเย็นขนาด 7 kW ที่อุณหภูมิ -150°C ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อใช้ในการแยกก๊าซธรรมชาติ



รูปที่ 2 เครื่องยนต์ความร้อนและเครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติก [14]



รูปที่ 3 เครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกของ Penn State ร่วมกับบริษัท Ben & Jerry [15]

ที่มหาวิทยาลัยแห่ง Penn State เครื่องทำความเย็นแบบเทอร์โมอะคูสติกดังแสดงในรูปที่ 3 ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวเก็บไอศกรีมยี่ห้อ Ben &

Jerry โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดก๊าซที่ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน โดยเครื่องต้นแบบนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 ซม. และสูง 48.3 ซม. สามารถทำความเย็นได้ 119 W ที่อุณหภูมิ -24.6 °C ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องทำความเย็นนี้เท่ากับ 19% ของค่า COP ของวัฏจักรคาร์โนต์

จากทั้งหมดดังที่ได้กล่าวมา จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีเทอร์โมอะคูสติกเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ที่สะอาดและน่าสนใจ ต้องการการบำรุงรักษาที่ต่ำ และไม่มีสารเคมีอันตราย เนื่องจากใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นสารทำงาน ซึ่งเป็นมิตรกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเทคโนโลยีนี้จึงเป็นที่ดึงดูดนักวิจัยทั้งหลายเพื่อมาพัฒนาเทคโนโลยีนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และจากที่วิจารณ์มาข้างต้น พบว่า เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายประเภท เช่น เครื่องทำความเย็น เครื่องปรับอากาศ ระบบแช่แข็ง การแยกก๊าซในอุตสาหกรรม การระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกเหนือจากที่ใช้งานแล้ว ในยานอวกาศและตู้เก็บไอศกรีม และในอนาคตอันใกล้ เทคโนโลยีสะอาดนี้ จะเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเรา โดยจะมาแทนที่เทคโนโลยีการทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมในที่สุด

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dossat, R.J., Principles of Refrigeration, 4 ed., Prentice Hall, Inc., N.J., 1997.
- [2] Jung, D., Kim, C.B., Lim, B.H., and Lee, H.W., "Testing of a Hydrocarbon Mixture in Domestic Refrigerators", ASHRAE Transactions, Vol. 3, pp. 1077-1084, 1996.
- [3] Tian, H., Yang, Z., Li, M., and Ma, Y., "Research and Application of CO2 Refrigeration and Heat Pump Cycle", Science in China Series E: Technological Sciences, Vol. 52, pp. 1563-1575, 2009.
- [4] Brown, J.S., Yana-Motta, S.F., and Domanski, P.A., "Comparitive Analysis of an Automotive Air Conditioning Systems Operating with CO2 and R-134a", International Journal of Refrigeration, Vol. 25, pp. 19-32, 2002.
- [5] Dalkilic, A.S., and Wongwises, S., "A Performance Comparison of Vapour-Compression Refrigeration System using Various Alternative Refrigerants", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, pp. 1340-1349, 2010.
- [6] Ciconkov, R., and Ayub, Z.H., "New Technologies in Ammonia Refrigerating and Air-Conditioning Systems", Heat Transfer Engineering, Vol. 30, pp. 324-329, 2009.
- [7] Swift, G.W., "Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators", Acoustical Society of America, Melville, NY, 2002.
- [8] Tijani, M.E.H., Loudspeaker-Driven Thermo-Acoustic Refrigeration, Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, 2001.
- [9] Swift, G.W., Thermoacoustic Engines, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 84, pp. 1145-1180, 1988.

- [10] Ward, B., Clark, J. and Swift, G.W., Design Environment for Low-Amplitude Thermoacoustic Energy Conversion, DELTAEC version 6.2: Users Guide, Los Alamos National Laboratory, 2008.
- [11] Zoontjens, L., Howard, C.Q., Zander, A.C., and Cazzolato, B.S., "*Development of a Low-Cost Loudspeaker-Driven Thermoacoustic Refrigerator*", in Proceedings of ACOUSTICS 2005, Busselton, Western Australia, 2005.
- [12] Gardner, C., and Lawn, C., "*Design of a Standing-Wave Thermoacoustic Engine*", in 16th International Congress on Sound and Vibration, Krakow, Poland, 2009.
- [13] Gardner, D.L. and Swift, G.W., A Cascade Thermoacoustic Engine, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 114, pp. 1905-1919, 2003.
- [14] Wollan, J.J., Swift, G.W., Backhaus, S.N. and Gardner, D.L., Development of a Thermoacoustic Natural Gas Liquefier, AIChE Meeting, New Orleans LA, March 11-14, 2002.
- [15] Sounds Cool! The Ben & Jerry's Project, Retrieved: 1 August 2010, from Penn State University, <http://www.acs.psu.edu/thermoacoustics/refrigeration/benandjerrys.htm>.