

บันทึกคำบรรยายสรุปวิชาฟิสิกส์อุณหภาพ (PH 314) ครั้งที่ 4

เสียงจากผู้ประกาศนำ

“การบันทึกแถบคำบรรยายสรุปกระบวนการเรียนของมหาวิทยาลัยรามคำแหง มุ่งส่งเสริมการศึกษาด้วยตนเองและบริการความรู้มายังนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์พระราชบัญญัติจัดตั้งมหาวิทยาลัยรามคำแหงเป็นตลาดวิชา.....ผลิตโดยสำนักเทคโนโลยีการศึกษา มหาวิทยาลัยรามคำแหง ท่านผู้ฟังครับ ต่อไปนี้เป็นการบรรยายสรุปวิชาฟิสิกส์อุณหภาพหรือเทอร์มัลฟิสิกส์ (PH 314) ครั้งที่ 4 ในหัวข้อ

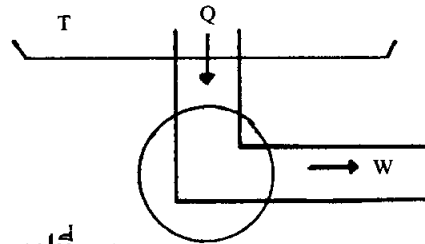
1. กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์
2. เครื่องยนต์คาร์โนต์
3. อสมการของเคลาซิอุส

โดย รศ.อัจฉรา พันธุ์อำไพ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยรามคำแหง

*****บันทึกแถบคำบรรยายสรุปนี้ประกอบการบรรยาย
ด้วยการฉายแผ่นภาพโปร่งใสตลอดคำบรรยาย*****

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

สำหรับกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์อาจกล่าวกันได้หลายแบบ ได้แก่ “กระบวนการที่ทำให้การเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากแหล่งกำเนิดหนึ่งเป็นงานกล โดยที่ปริมาณทั้งสองเท่ากันนั้น **ไม่มี**” หรืออาจกล่าวอีกแบบหนึ่งได้ว่า “กระบวนการที่ทำให้พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ ไปสู่แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงนั้น **ไม่มี**” หรืออาจใช้หลักการเอนโทรปีที่กล่าวว่า “กระบวนการที่ทำให้เอนโทรปีของระบบอิสระลดลงนั้น **ไม่มี**” ซึ่งถ้าพิจารณาจากแผนภูมิแสดงการถ่ายเทพลังงาน (flow chart) (ในรูปที่ 14) โดยใช้สัญลักษณ์ “อ่าง” แทนแหล่งความร้อน ซึ่งนักศึกษาคงจะทราบดีแล้วจากวิชาบูรพบท PH 215 ฟิสิกส์เชิงสถิติว่าแหล่งความร้อนจะต้องมีอุณหภูมิต่ำที่ ไม่ว่าจะมีการรับหรือคายความร้อนเท่าใดก็ตาม จะไม่ทำให้อุณหภูมิต่ำของแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด จึงให้อักขรกำกับไว้ด้วยอักขร “T”

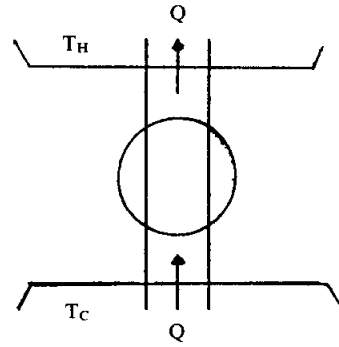


รูปที่ 14

ซึ่งหมายความว่าแหล่งกำเนิดความร้อนมีอุณหภูมิต่ำที่ค่าหนึ่ง คือ อุณหภูมิ T หรือตัวเลขแสดงระดับอุณหภูมิ เมื่อดึงเอาความร้อนจากแหล่งความร้อนเป็นปริมาณ Q โดยอาศัยสารใช้งานหรือสารทำงาน (working substance) รับความร้อนนี้มา ซึ่งโดยทั่วไปจะทำงานตามกระบวนการที่เป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงจะใช้เครื่องหมายวงกลมแทนส่วนนี้ เมื่อผ่านสารใช้งานแล้วปริมาณความร้อน Q จะกลายเป็นงานกล W

ถ้านักศึกษาพิจารณาจากแผนภูมินี้จะต้องเข้าใจด้วยว่า “ขนาด” ของที่นำพลังงานแสดงถึงปริมาณของพลังงาน จะเห็นว่าจากแหล่งความร้อนแล้วกลายเป็นงานกลออกมาหลังจากที่ผ่านสารใช้งาน ด้วยขนาดของที่นำพลังงานที่เท่ากัน จึงหมายความว่า ความร้อนทั้งหมดกลายเป็นงานกล เครื่องยนต์ที่ทำงานแบบนี้เรียกว่า “เครื่องยนต์ความร้อน (heat engine)” การที่ให้ชื่อว่า เครื่องยนต์ความร้อนเพราะว่า มีการรับความร้อนเข้ามาหรือใช้พลังงานความร้อนป้อนเข้าไปให้กับเครื่องยนต์ จึงได้งานกลออกมา และถ้าเครื่องยนต์ใดสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้กลายเป็นพลังงานกลได้ทั้งหมด ก็นับว่ามีประสิทธิภาพร้อยเปอร์เซ็นต์ จะเรียกเครื่องยนต์นี้ว่าเป็น “เครื่องยนต์ความร้อนสมบูรณ์ (Perfect heat engine)” แต่ไม่มีในโลกเพราะขัดแย้งกับกฎข้อที่สองข้างต้น ซึ่งจะได้พิสูจน์ให้เห็นจริงโดยจะใช้หลักการเอนโทรปี

ส่วนเครื่องยนต์ที่ทำงานโดยดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (ในรูปที่ 15) ซึ่งใช้แผนภูมิแสดงว่ามีแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (T_C) ให้ความร้อนไหลตามท่อนำพลังงาน โดยอาศัยสารทำงานรับความร้อนนี้มา เพื่อถ่ายเทไปให้แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูง (T_H) โดยที่ขนาดของท่อนำพลังงานความร้อนเท่ากันตลอด แสดงว่าปริมาณความร้อนเท่ากันทั้งที่รับมา



รูปที่ 15

และคายออก จากแหล่งความร้อนที่เย็นกว่าไปยังแหล่งความร้อนที่ร้อนกว่า และไม่มีการใช้พลังงานจากภายนอก ในการกระทำให้ความร้อนไหลจากแหล่งความร้อนที่เย็นกว่าไปสู่ที่ร้อนกว่า กรณีนี้ถือได้ว่าเป็น “ตู้เย็นสมบูรณ์ (Perfect refrigerator)” แต่โดยทั่วไปการทำงานของเครื่องทำความเย็น จะต้องใช้พลังงานจากภายนอกมาช่วย ในการดึงเอาความร้อนจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไปยังที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นตู้เย็นสมบูรณ์นี้จะทำงานโดยอัตโนมัติหรือเป็นตู้เย็นที่สมบูรณ์ไม่ได้ ซึ่งจะพิสูจน์ว่าเป็นไปไม่ได้โดยใช้หลักการเอนโทรปีเช่นเดียวกัน

ในการพิสูจน์ถ้าพิจารณาจาก (รูปที่ 14) เครื่องยนต์ความร้อนสมบูรณ์ ก็จะดูจากแต่ละส่วนตามลำดับไป โดยเริ่มจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ T คายความร้อนออก Q ทำให้เอนโทรปีของแหล่งความร้อนเปลี่ยนไป $ds_1 = -Q/T$ ซึ่งความสัมพันธ์นี้นักศึกษาจะต้องทราบมาแล้วจากวิชานูรพบทว่า สามารถหาค่าเอนโทรปีที่เปลี่ยนไป โดยใช้สูตรคำนวณ $ds = dQ/T$

อีกประการหนึ่งก็ขอย้ำเรื่องเครื่องหมายของปริมาณความร้อนด้วยว่า เมื่อเราพิจารณาส่วนใดหรือสิ่งใด สิ่งนั้นจะเป็นระบบในทางอุณหพลศาสตร์หรือเทอร์โมไดนามิกส์ ถ้ามีความร้อนรับเข้ามา โดยระบบเป็นผู้รับความร้อนเข้ามาทำให้มีปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะให้เครื่องหมายเป็นบวกสำหรับปริมาณความร้อนรับโดยระบบ แต่ถ้าระบบคายความร้อนออกทำให้ปริมาณความร้อนของระบบลดลง ก็จะทำให้เครื่องหมายเป็นลบสำหรับปริมาณความร้อนที่ระบบถ่ายออกไป ซึ่งในที่นี้กำลังพิจารณาแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ T คายความร้อนออกจึงมีเอนโทรปีลดลง เพราะเป็นปริมาณติดลบ

และเมื่อพิจารณาที่สารทำงานบ้าง โดยที่สารทำงานเป็นกระบวนการแบบวัฏจักร ดังนั้นเอนโทรปีของสารทำงานไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งเขียนได้ว่า $ds_2 = \oint ds = 0$ เนื่องจากการทำงานเป็นวัฏจักรนั้นจะเริ่มต้นจากจุดหนึ่งแล้วกลับมายังจุดเริ่มต้นใหม่ ฉะนั้น $ds = s_2 - s_1 = 0$

เพราะ S_2 และ S_1 คือเอนโทรปีที่จุดเดียวกัน โดยที่ S เป็นค่าหนึ่งในทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสภาวะ ดังจะพิสูจน์ให้เห็นจริงในการบรรยายครั้งต่อไป

เมื่อหาค่าเอนโทรปีที่เปลี่ยนไปทั้งหมด โดยพิจารณาทั้งแหล่งความร้อนและสารทำงาน เป็นระบบเดียวกัน และเป็นระบบอิสระด้วย ซึ่งขอเน้นว่า “ระบบอิสระ” จะต้องคำนึงถึง ตลอดเวลาว่า ระบบไม่เกี่ยวข้องกับระบบอื่นใดหรือสิ่งแวดล้อมใด ๆ นอกเหนือจากแหล่งความร้อน และสารทำงานในกรณีนี้ ดังนั้นทั้งหมดนี้จึงเป็นระบบอิสระ ก็จะหาได้ว่าเอนโทรปีที่เปลี่ยนไป ทั้งหมด คือ $dS = dS_1 + dS_2 = -Q/T + 0$

จะเห็นว่าเอนโทรปีที่เปลี่ยนไปทั้งหมดเป็นค่าติดลบ แสดงว่าเอนโทรปีมีค่าลดลง ดังนั้น จึงขัดกับหลักการเอนโทรปีที่ว่า “กระบวนการที่ทำให้เอนโทรปีของระบบอิสระลดลงนั้นไม่มี” เพราะฉะนั้นเครื่องยนต์ความร้อนสมบูรณ์ก็จะมีไม่ได้

สำหรับ**ตู้เย็นสมบูรณ์**เมื่อพิจารณาแต่ละส่วน ก็ถือว่าส่วนหนึ่ง ๆ เป็นระบบทางเทอร์โมไดนามิกส์ ถ้าเริ่มจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงก็จะมีเอนโทรปีเพิ่มขึ้นเป็น $dS_1 = +Q/T_H$ โดยในที่นี้กำกับไว้ด้วยอักษร H หมายถึง Hot reservoir ซึ่งเมื่อเทียบกับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจะร้อนกว่าแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น จะกำกับด้วยอักษร C สำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งหมายถึง Cold reservoir

ขอให้สังเกตเครื่องหมายบวกข้างหน้าอัตราส่วนระหว่าง Q/T_H สาเหตุที่ใช้เครื่องหมายบวกเนื่องจากว่า ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดความร้อนที่อุณหภูมิสูงรับความร้อนเข้ามา

ส่วนแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำถูกดึงเอาความร้อนไป จึงได้ว่า $dS_2 = -Q/T_C$ และสำหรับสารทำงานซึ่งทำงานเป็นแบบวัฏจักร จะได้ว่า $dS_3 = \oint dS = 0$

เมื่อพิจารณารวมกันทั้งหมดเป็นระบบเดียวกันและเป็นระบบอิสระ จะหาค่าเอนโทรปีที่เปลี่ยนไปของระบบทั้งหมด คือ

$$dS_{\text{ทั้งหมด}} = dS_1 + dS_2 + dS_3 = \frac{Q}{T_H} - \frac{Q}{T_C} + 0$$

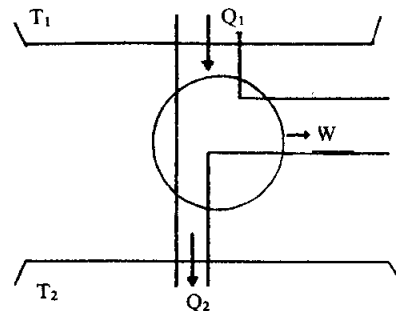
ซึ่งขอให้สังเกตอีกครั้งว่า (ในรูปที่ 15 นั้น) ท่อนำพลังงานเท่ากันตลอด หมายถึงพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ไปสู่แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นปริมาณ Q เดียวกัน เมื่อเทียบอัตราส่วนทั้งสอง คือ Q/T_H กับ Q/T_C จะเห็นว่า Q/T_C มากกว่า Q/T_H เพราะ T_C น้อยกว่า T_H ในเมื่อตัวตั้งเท่ากันแต่ตัวหารไม่เท่ากัน โดยที่ T_C น้อยกว่า T_H เป็นตัวหาร เพราะฉะนั้น ถ้าตัวหารน้อยกว่าก็จะได้ผลลัพธ์มากกว่า จึงทำให้เอนโทรปีที่เปลี่ยนไปทั้งหมดติดลบ คือมีค่าน้อยกว่า 0 นั่นก็คือ เอนโทรปีของระบบนี้ลดลง ดังนั้นจึงขัดกับหลักการ

เอนโทรปีที่ว่า “กระบวนการที่ทำให้เอนโทรปีของระบบอิสระลดลงนั้นไม่มี” จึงกล่าวได้ว่า **ตู้เย็นสมบูรณ์ไม่มีด้วย**

ข้อสังเกต

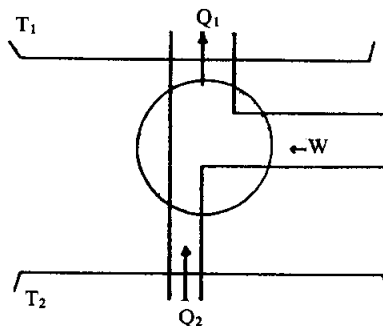
ข้อที่พึงสังเกตในกรณีของการทำงานของเครื่องทำความเย็นหรือตู้เย็นนั้น อุณหภูมิต่ำคืออุณหภูมิภายในตู้เย็น การทำงานของตู้เย็นก็คือการดึงเอาความร้อนจากภายในตู้เย็นออกไปโดยระบายความร้อนออกมาสู่บรรยากาศรอบนอกตู้เย็น นั่นคือบรรยากาศของห้องนั้น (ที่อุณหภูมิสูงกว่า) ภายในตู้เย็นจึงเป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนบรรยากาศรอบนอกตู้เย็นเป็นแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพราะฉะนั้นถ้าหากว่าตู้เย็นสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ จะดึงเอาความร้อนภายในตู้เย็นออกไปสู่ภายนอกได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานใด ๆ มาช่วย ซึ่งจะนับเป็นตู้เย็นสมบูรณ์ แต่ได้พิสูจน์แล้วว่า เป็นไปไม่ได้ตามหลักการเอนโทรปี

สำหรับเครื่องยนต์ความร้อนที่เป็นไปได้จริงจะมีการถ่ายเทความร้อน (ดังแสดงไว้ในแผนภูมิของรูปที่ 16) จากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไปเป็นปริมาณ Q_1 เพื่อให้เกิดงานกล w โดยอาศัยสารทำงานรับความร้อนออกนี้ออกไป แต่จะมีความร้อนส่วนหนึ่งสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ เพราะปริมาณความร้อนนี้จะไม่กลายเป็นงานกล แต่จะไหลไปสู่แหล่งความร้อนอีกแหล่งหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำเป็นปริมาณ Q_2 และได้งาน w ออกมา (เท่ากับผลต่างของ Q_1 กับ Q_2)



รูปที่ 16

ส่วนเครื่องทำความเย็นที่เป็นไปไม่ได้จริงก็จะต้องมีงานกระทำจากภายนอกมาช่วยในการทำให้ความร้อนไหลจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งที่อุณหภูมิสูง (ดังแสดงไว้ในแผนภูมิของรูปที่ 17)



รูปที่ 17

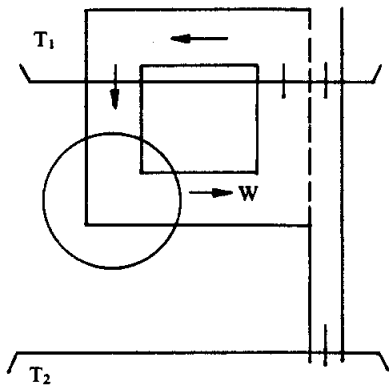
จะเห็นว่า จากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำได้ความร้อน Q_2 ออกมา โดยใช้งาน W ป้อนเข้าไปแล้วจะทำให้ความร้อนที่ถูกดึงออกมาจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำระบายไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูงกว่าเป็นปริมาณ Q_1 ซึ่งเท่ากับผลรวมของ Q_2 กับ W

ขอให้สังเกตด้วยว่าในการเขียนแผนภูมิซึ่งจะสื่อความหมาย หรือช่วยให้นักศึกษาเข้าใจเรื่องราวได้ดียิ่งขึ้นว่า มีการถ่ายเทพลังงานจากไหนไปไหนและอย่างไร ด้วยปริมาณเท่าใดนั้น แสดงให้เห็นได้ตามขนาดของท่อนำพลังงานและลูกศรแสดงทิศทางด้วย ดังจะเห็นว่าจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงในกรณีเครื่องยนต์ความร้อน ขนาดของท่อนำพลังงาน Q_1 ที่ส่งผ่านไปยังสารทำงานซึ่งให้งานกลออกมา จะต้องเท่ากับขนาดของงานกล W รวมกับขนาดของความร้อน Q_2 ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เปลี่ยนแปลงเป็นงานกล แต่สูญหายไปโดยเปล่าประโยชน์ยังแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ T_2

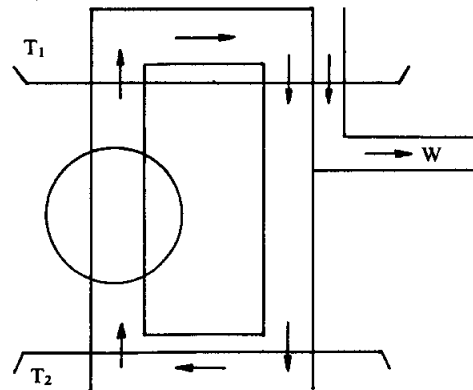
สำหรับเครื่องทำความเย็นก็เช่นเดียวกัน โดยเริ่มต้นจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ มีปริมาณความร้อนถูกดึงออกมาเป็นปริมาณ Q_2 เมื่อรวมกับงาน W ซึ่งใช้ในการดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไประบายออกยังแหล่งที่อุณหภูมิสูงเป็นปริมาณ Q_1 จึงมีขนาดของท่อเท่ากันกับผลรวมของขนาดของท่อนำพลังงานจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกับงานกล W ที่ใช้ไปในการดึงความร้อน Q_2 ออกจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำนั้น

ก่อนที่จะจบเรื่องกฎข้อที่ 2 จะขอแก้อ้อสงสัยว่า ทำไมกฎข้อที่ 2 ถึงสามารถกล่าวได้หลายแบบด้วยกัน โดยที่ถ้ากล่าวในแบบที่ 1 ก็จะมี ความหมายเดียวกันกับการกล่าวในแบบที่ 2 หรือในทางที่กลับกัน การกล่าวกฎข้อที่ 2 ตามแบบที่ 2 ก็จะมี ความหมายเหมือนกันกับการกล่าวตามแบบที่ 1 ดังนั้น ไม่ว่าจะกล่าวแบบใดก็สามารถบรรลุจุดประสงค์เดียวกัน และเมื่อรวมทั้งหลักการเอนโทรปีจึงนับเป็นกฎข้อที่ 2 ด้วยเหมือนกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ว่าการกล่าวแบบที่ 1 ก็เหมือนการกล่าวในแบบที่ 2 หรือในทางที่กลับกันการกล่าวแบบที่ 2 ก็เหมือนกันหรือให้ผลเช่นเดียวกันกับการกล่าวในแบบที่ 1

ก่อนอื่น ขอให้พิจารณาในกรณีแรก ถ้าการกล่าวแบบที่ 1 จะให้ผลเช่นเดียวกันกับการกล่าวในแบบที่ 2 ก็จะมี ความหมายว่า ถ้าสมมติว่าจากแหล่งพลังงานความร้อนเพียงแหล่งเดียว ก็จะสามารถเปลี่ยนให้เป็นงานกลได้ กล่าวคือไม่มีความร้อนสูญหายไปโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นจากปริมาณความร้อน Q_1 กลายเป็นงานกลไป W เสียทั้งหมด ก็จะสามารถนำงานนี้ไปใช้ในเครื่องทำความเย็น ดังจะเห็นว่า (ในรูปที่ 18) มีพลังงานเปลี่ยนแปลงอยู่ในท่อนำพลังงานตามวงกรอบสี่เหลี่ยมมุมฉาก แต่จะมีพลังงานอีกส่วนหนึ่งไหลจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ ไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้ โดยไม่เกี่ยวข้องกับภายในกรอบสี่เหลี่ยม นั่นคือ ถ้าหากแบบที่ 1 เป็นไปได้แล้วแบบที่ 2 ก็เป็นไปได้ด้วย



รูปที่ 18



รูปที่ 19

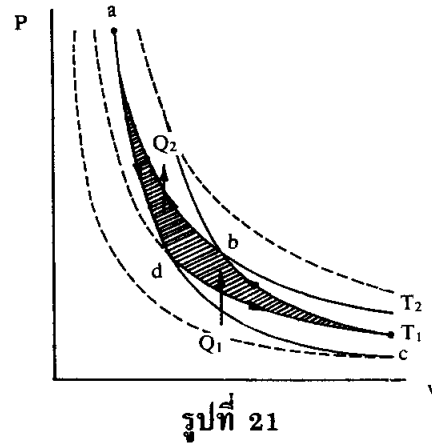
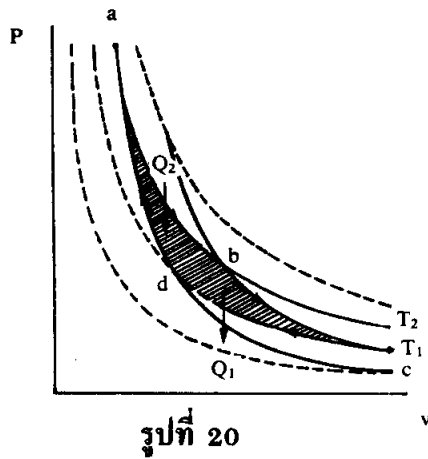
และ (ในรูปที่ 19) ก็จะเห็นว่าถ้าตู้เย็นสมบูรณ์เป็นไปได้จริง โดยเริ่มต้นจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ความร้อนสามารถไหลไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้โดยอัตโนมัติ จากความร้อนนี้ก็จะนำไปใช้ในเครื่องยนต์ความร้อน จะเห็นว่ามีความร้อนถ่ายเทหมุนเวียนอยู่ในท่อนำพลังงาน ภายในวงจรรอบสี่เหลี่ยมมุมฉาก แต่จะมีท่อนำพลังงานอีกส่วนหนึ่งซึ่งจะเห็นว่ามีความร้อนไหลจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกลายมาเป็นงาน โดยไม่มีพลังงานสูญเสียไปเลย นั่นคือ การกล่าวแบบที่ 2 จะนำไปสู่ผลของการกล่าวแบบที่ 1 ได้

เครื่องยนต์คาร์โนต์

ในตอนนี้จะได้นำเสนอให้รู้จักเครื่องยนต์ที่สำคัญแบบหนึ่ง เรียกว่า เครื่องยนต์คาร์โนต์ (Carnot engine) ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่มีสมบัติพิเศษหลายประการ โดยที่เป็นทั้งเครื่องยนต์ที่ผันกลับได้และทำงานเป็นแบบวัฏจักร การที่เป็นวัฏจักรชนิดผันกลับได้ จะทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์ทั่วไป นอกจากนั้น ยังสามารถแสดงได้ว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์นั้นไม่ขึ้นกับชนิดของสารทำงาน ดังนั้นไม่ว่าจะใช้อะไรเป็นสารทำงาน จะได้ประสิทธิภาพเท่ากัน ถ้าให้ทำงานระหว่างแหล่งความร้อนคู่หนึ่งเหมือนกัน

วัฏจักรคาร์โนต์สามารถเขียนในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตร (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 20 และ 21) ซึ่งประกอบด้วยเส้นไอโซเทอร์มัลคู่หนึ่งที่อุณหภูมิสูง T_1 และอุณหภูมิต่ำ T_2 กับเส้นแอดิแบติกอีกคู่หนึ่ง โดยที่เป็นวัฏจักรชนิดผันกลับได้ ดังนั้น (ตามรูปที่ 20) จะเป็นการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน หรือ (ในรูปที่ 21) การทำงานของตู้เย็น โดยใช้ก๊าซอุดมคติเป็นสารทำงาน

ในการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน จะพิจารณาจากประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยการเทียบอัตราส่วนระหว่างงานที่ได้รับจากการป้อนความร้อนเข้าไป นั่นคือ ประสิทธิภาพเท่ากับ W/Q_H ซึ่ง $W = Q_H - Q_C$ จึงเทียบอัตราส่วนได้ว่าเป็น $1 - Q_C/Q_H$ แต่โดยที่เราสามารถจะแสดงได้ว่า สำหรับเครื่องยนต์คาร์โนต์โดยเฉพาะสามารถหาอัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนจากแหล่งความร้อนทั้งสองเทียบได้กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแหล่งความร้อนนั้น ๆ ดังนั้นจะหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนคาร์โนต์ได้ว่าเท่ากับ $1 - T_C/T_H$



จะเห็นได้ว่า ตามความสัมพันธ์นี้ อุณหภูมิ T_C จะเป็นศูนย์ไม่ได้ เพราะจะขัดกับกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ (เนื่องจาก Q_C จะเป็นศูนย์ไม่ได้) นั่นก็คืออาจจะสรุปได้ว่า อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ไม่มีในโลก หรือ อีกนัยหนึ่งจะต้องมีศูนย์สัมบูรณ์ซึ่งไม่สามารถบรรลุได้

นอกจากนั้น จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนคาร์โนต์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T_C กับ T_H ซึ่งเป็นอุณหภูมิของแหล่งความร้อนคู่ที่เครื่องยนต์นี้ทำงานเท่านั้น จะไม่ขึ้นกับชนิดของสารทำงานแต่อย่างใด

สำหรับการเปรียบเทียบการทำงานตู้เย็น จะเทียบจากสัมประสิทธิ์ของการทำงานหรือเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (C.O.P) ซึ่งหาได้จากการเทียบอัตราส่วนปริมาณความร้อนที่สามารถทำให้ลดลงไปได้จากภายในตู้เย็น คือ Q_C ต่องานที่ต้องใช้ไปคือ W ซึ่งจะเขียนให้อยู่ในรูปของ $T_C/T_H - T_C$ สำหรับตู้เย็นคาร์โนต์ได้ ในทำนองเดียวกันกับประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ความร้อนคาร์โนต์

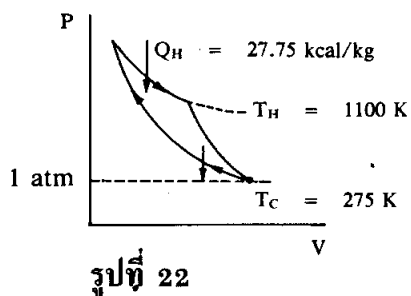
ข้อสังเกตอีกประการหนึ่ง สำหรับตู้เย็นซึ่งเป็นการทำงานของวัฏจักรทวนคาร์โนต์นี้อาจจะทำหน้าที่เป็นเครื่องทำความร้อน (หรือสูบลมร้อน) ได้ ดังจะเห็นว่ามีความร้อนระบาย

ออกจากตู้เย็นสู่บรรยากาศรอบนอก เพราะฉะนั้นการทำงานของตู้เย็นก็อาจนับว่าเป็นเครื่องทำความร้อนด้วย เมื่อต้องการหาความสามารถในการทำงานตามความมุ่งหมายนี้ จึงพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะสำหรับเครื่องสูบลมความร้อน $= Q_H/W = Q_H/Q_H - Q_C$ และอาจหาสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะสำหรับเครื่องสูบลมความร้อนคาร์โนต์ได้จาก $T_H/T_H - T_C$ ในทำนองเดียวกัน

ตัวอย่าง 2-1

วัฏจักรคาร์โนต์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำงานหนึ่งมีความร้อนเข้าสู่อากาศที่อุณหภูมิ 1,100 เคลวิน และออกที่ 275 เคลวิน ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่วัฏจักรมีความร้อนเข้าสู่วัฏจักรมีค่า 27.75 กิโลแคลอรี/ก.ก. ความดันต่ำสุดของวัฏจักรเท่ากับ 1 บรรยากาศ จงหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักร

วิธีทำ



เนื่องจากโจทย์กำหนดแต่ความร้อนเข้าเท่านั้น ไม่ได้ระบุความร้อนออก ดังนั้นจึงไม่อาจหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากปริมาณความร้อนโดยตรง แต่ต้องหาจากอุณหภูมิสัมบูรณ์

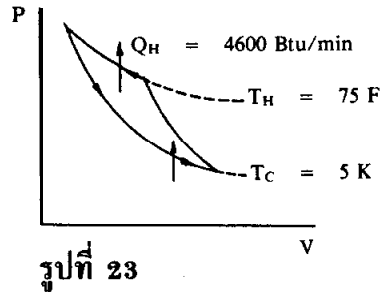
$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพ, } \eta &= \frac{T_H - T_C}{T_H} = \frac{1100 - 275}{1100} \\ &= 0.75 \end{aligned}$$

จึงได้ว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์นี้เป็นร้อยละ 75

ตัวอย่าง 2-2

วัฏจักรทวนคาร์โนต์หนึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบลมความร้อน (heat pump) สำหรับให้ความร้อนแก่บรรยากาศในอัตรา 4600 บีทียู/นาที่ ที่อุณหภูมิ 75 ฟาเรนไฮต์ และวัฏจักรทวนนี้ได้รับความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิ 5 ฟาเรนไฮต์ จงหางานและ ส.ป.ส.ของสมรรถนะ

วิธีทำ



โดยที่ตัวอย่างนี้กล่าวถึงเฉพาะปริมาณความร้อนที่ระบายออกให้แก่บรรยากาศ แต่ไม่ทราบว่ามีปริมาณที่รับเข้ามาเป็นเท่าใด จึงต้องหา ส.ป.ส. ของสมรรถนะจากอุณหภูมิตัมบูรณ์เช่นเดียวกับตัวอย่างข้างต้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่กำหนดให้เป็นองศา

ฟาเรนไฮต์ จึงต้องเปลี่ยนเป็นองศาฟาเรนไฮต์สัมบูรณ์ คือ แรนคีน ดังนี้

$$T = 460 + 75 = 535 \text{ R}; \quad T = 460 + 5 = 465 \text{ R}$$

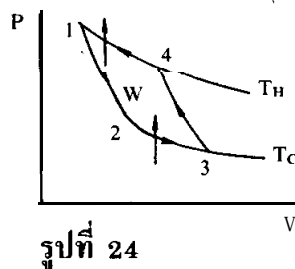
$$\text{สำหรับเครื่องทำความร้อนมี ส.ป.ส. ของสมรรถนะ (C.O.P.)} = \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{535}{535 - 465} = 1.61$$

$$\begin{aligned} \text{ส่วนงานจะให้ความสัมพันธ์จาก } W &= \frac{\text{ความร้อนที่ระบายออกสู่ภายนอก}}{\text{ส.ป.ส. ของสมรรถนะ}} \\ &= \frac{4600 \text{ บีทียู/นาที}}{(7.67)(42.4 \text{ บีทียู/นาที-กิโลวัตต์})} \\ &= 14.15 \text{ กิโลวัตต์} \end{aligned}$$

ตัวอย่าง 2-3

วัฏจักรทวนคาร์โนต์หนึ่งใช้อากาศเป็นสารทำงาน โดยทำหน้าที่เป็นเครื่องทำความเย็นซึ่งมีความร้อนระบายออกสู่อากาศภายนอกที่ 37°C. และรับความร้อนเข้าที่ -3°C. ความดันของอากาศก่อนเข้าส่วนดูดความร้อน 2.0 ก.ก./ซม.² (สัมบูรณ์) และออกด้วยความดัน 1.0 ก.ก./ซม.² (สัมบูรณ์) จงหางานและ ส.ป.ส. ของสมรรถนะ

วิธีทำ



สำหรับเครื่องทำความเย็น,

$$\begin{aligned} \text{ส.ป.ส. ของสมรรถนะ} &= \frac{T_C}{T_H - T_C} \\ &= \frac{(273 - 3)}{(273 + 37) - (273 - 3)} \\ &= 6.75 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{งาน, } W &= \Sigma Q = Q_{12} + Q_{23} + Q_{34} + Q_{41} \\ &= 0 + nRT_2 \ln(V_3/V_2) + 0 - nRT_1 \ln(V_4/V_1) \end{aligned}$$

$$\text{แต่เนื่องจาก } V_3/V_2 = V_4/V_1 = P_2/P_3$$

$$\text{ดังนั้น จะได้ งาน, } W = nR(T_2 - T_1) \ln(P_2/P_3)$$

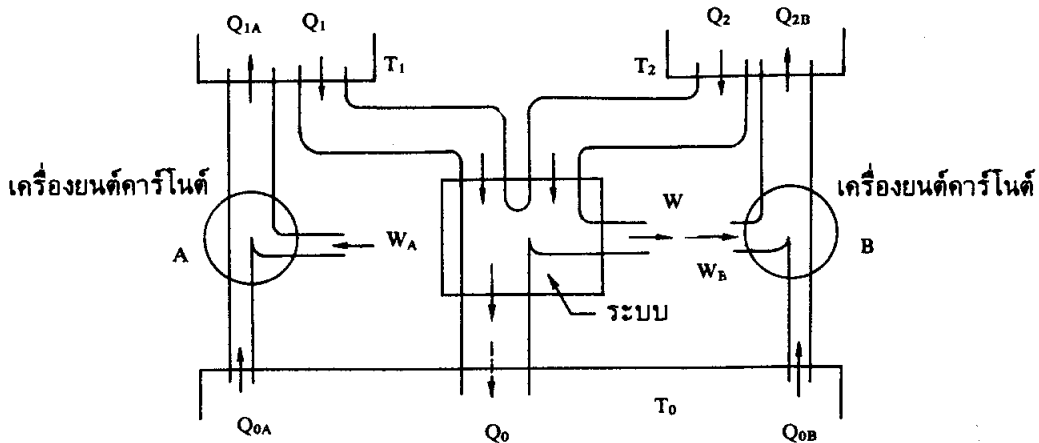
$$\text{ถ้าให้ } n = 1 \text{ kg/kg และ } R = 29.24 \text{ kg-m/kgK}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } W &= (1 \text{ kg/kg})(29.24 \text{ kg-m/kgK})(270-310)\text{K} \ln\left(\frac{2 \text{ kg/cm}^2}{1 \text{ kg/cm}^2}\right) \\ &= -809.36 \text{ kg-m/kg} \end{aligned}$$

อสมการเคลลาซิอุส

อีกเรื่องหนึ่งที่จะกล่าวไปพร้อมกันในที่นี้คือ อสมการเคลลาซิอุส โดยที่ $\oint dQ/T < 0$ ซึ่งสามารถพิสูจน์ให้เห็นจริงได้ โดยการแบ่งเครื่องยนต์ออกเป็นหลายส่วน หรือให้มีการทำงานของเครื่องยนต์ระหว่างอุณหภูมิคู่ต่าง ๆ ประกอบเป็นวัฏจักรปิด (closed cycle) ตามรูปที่ 25 ซึ่งนักศึกษาจะเห็นว่า เมื่อพิจารณาวัฏจักรนี้

$$Q_0 + Q_{0A} + Q_{0B} < 0$$



รูปที่ 25

เมื่อนำกฎข้อที่หนึ่งมาใช้กับกรณีนี้จะได้ว่า ปริมาณความร้อนที่แหล่งความร้อนสูญเสียไปเท่ากับงานที่ระบบได้รับ และปริมาณความร้อนที่แหล่งความร้อนได้รับจะเท่ากับงานที่ระบบกระทำ แต่จากกฎข้อที่สองว่าความร้อนจะกลายเป็นงานทั้งหมดไม่ได้ และโดยเฉพาะสำหรับเครื่องยนต์

คาร์โนต์ที่เราได้ว่า ปริมาณความร้อนที่แหล่งความร้อนสูญเสียไปเท่ากับงานที่ระบบได้รับ และ ปริมาณความร้อนที่แหล่งความร้อนได้รับจะเท่ากับงานที่ระบบกระทำ แต่จากกฎข้อที่สองว่าด้วย ความร้อนจะกลายเป็นงานทั้งหมดไม่ได้ และโดยเฉพาะสำหรับเครื่องยนต์คาร์โนต์เราได้ว่า $Q_C/Q_H = T_C/T_H$ หรือ $Q_C/T_C = Q_H/T_H$ เมื่อพิจารณาที่เครื่องยนต์ A กับเครื่องยนต์ B จะได้ว่า $Q_{oA} = (Q_A/T_1)$ และ $Q_{oB} = (Q_B/T_2)T_0$ เมื่อแทนค่าลงในความสัมพันธ์ข้างต้น จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนระหว่าง Q/T รวมตลอดวัฏจักรจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ดังนั้น ถ้าหากภายในวัฏจักรปิดนี้ประกอบด้วยเครื่องยนต์หลาย ๆ ส่วน และมีการแบ่ง ปริมาณความร้อนออกเป็นส่วนย่อย ๆ จะสามารถใช้เครื่องหมายอินทิเกรชันแทนเครื่องหมายรวม Σ (summation) ได้ และก็สามารถจะแสดงได้ว่า ในกรณีของวัฏจักรปิดชนิดผันกลับได้เท่านั้น ที่ผลรวมของอัตราส่วนระหว่าง Q/T จะเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าไม่ใช่วัฏจักรปิดชนิดผันกลับได้ นั่นคือ เป็นวัฏจักรชนิดผันกลับไม่ได้ก็จะใช้เครื่องหมาย “=” ศูนย์ไม่ได้ จึงต้องเป็นน้อยกว่าศูนย์แทน

สำหรับอสมการของเคลาซิอุสนี้จะนำไปใช้ศึกษาเรื่องเอนโทรปี และการหาค่าเอนโทรปี ที่เปลี่ยนแปลงได้ ดังจะได้กล่าวต่อไปในคราวหน้า

เสียงจากผู้ประกาศ “ที่จบลงไปนั่นคือการบรรยายสรุปวิชาเทอร์มัลฟิสิกส์หรือ PH 314 ครั้งที่ 4 โดย รศ.อัจฉรา พันธุ์อำไพ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง”

.....การบันทึกแถบคำบรรยายสรุปกระบวนการของมหาวิทยาลัยรามคำแหง มุ่งส่งเสริม การศึกษาด้วยตนเองและบริการความรู้มายังนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป โปรดส่งคำถามและ ข้อข้องใจไปยังคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ 10240.....

