

คู่มือ THERMODYNAMICS II HANDBOOK อุณหพลศาสตร์ 2

ระดับปริญญาตรี

inspiration starts here

- ตรงตามหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
- เหมาะสำหรับนักศึกษา
ระดับปริญญาตรี
และผู้สนใจทั่วไป

มนตรี พิรุณเกษตร

คู่มือ THERMODYNAMICS II HANDBOOK อุณหพลศาสตร์ 2

SEED

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
inspiration starts here
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



บริษัท ซีเอดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED

คู่มืออุณหพลศาสตร์ 2

โดย มนตรี พิรุณเกษตร

สงวนลิขสิทธิ์ในประเทศไทยตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2556 โดย มนตรี พิรุณเกษตร
ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำการอื่นใด โดยวิธีการใดๆ ในรูปแบบใดๆ
ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ
นอกจากจะได้รับอนุญาต

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

มนตรี พิรุณเกษตร.

คู่มืออุณหพลศาสตร์ 2 (Thermodynamics II handbook). --กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2556.

1. เทอร์โมไดนามิกส์.

I. ชื่อเรื่อง.

621.4021

ISBN(e-book) : 978-616-08-1032-1

ผลิตและจัดจำหน่ายโดย



บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED

อาคารทีซีไอเอฟ ทาวเวอร์ ชั้น 19 เลขที่ 1858/87-90 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา
เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260 โทรศัพท์ 0-2739-8000

[หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ comment@se-ed.com]

คำนำ

หนังสือ “คู่มืออุณหพลศาสตร์ 2 (Thermodynamics II Handbook)” ที่เขียนขึ้นมาจะอยู่ในลักษณะของบทสรุปหลักพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจะเป็นข้อปัญหาและการวิเคราะห์ เหมาะสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี เนื่องจากมีเนื้อหาตรงกับหลักสูตรการเรียนการสอนในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมศาสตร์ สังกัดทบวงมหาวิทยาลัย นอกจากจะใช้เป็นคู่มือเตรียมสอบวัดผลในมหาวิทยาลัยแล้ว ยังสามารถใช้เป็นคู่มือเตรียมสอบเพื่อรับใบประกาศนียบัตรทางวิศวกรรมในสาขาวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อนำไปจดใบ ก.ว. ในสาขาดังกล่าวด้วย

หวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาและผู้สนใจระดับหนึ่ง หากมีข้อบกพร่องใดๆ ผู้เขียนยินดีรับคำติชม และพร้อมที่จะแก้ไขต่อไป

รศ. มนต์รี หิรัณเกษตร

สารบัญ

บทที่ 1 ทบทวนอุณหพลศาสตร์ 1 9

1.1 มวลควบคุม (หรือระบบปิด)	9
1.2 ปริมาตรควบคุม (หรือระบบเปิด)	10
1.3 ระบบโดดเดี่ยว	10
1.4 คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์	11
1.5 สภาวะ กระบวนการ และวัฏจักร	11
1.6 มวล (m), ปริมาตร (V), ความหนาแน่น (ρ) และปริมาตรจำเพาะ (v)	12
1.7 แรง (F) และน้ำหนัก (W)	13
1.8 ความดันสัมบูรณ์ (P) ความดันบรรยากาศ (P_{atm}) และความดันเกจ (P_g)	14
1.9 อุณหภูมิ	15
1.10 สมภาพของอุณหภูมิ	15
1.11 กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์	15
1.12 คุณสมบัติของสารบริสุทธิ์	15
1.13 การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารบริสุทธิ์	16
1.14 แผนภาพ T-v และ P-v ของสารบริสุทธิ์	17
1.15 คุณสมบัติอิสระของสารบริสุทธิ์	18
1.16 นิยามของงาน	19
1.17 รูปแบบของงานในอุณหพลศาสตร์	19
1.18 นิยามและหน่วยของความร้อน	23
1.19 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับมวลควบคุม	23
1.20 พลังงานภายใน (U) และเอนทัลปี (H)	24
1.21 ความร้อนจำเพาะ	25
1.22 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม (CV)	26

1.23	กระบวนการสภาวะคงตัว-การไหลคงตัว (กระบวนการ SSSF)	28
1.24	กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์	29
1.25	กลจักรความร้อนและเครื่องทำความเย็น (ปั๊มความร้อน)	29
1.26	กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์	31
1.27	กระบวนการย้อนกลับได้และกระบวนการย้อนกลับไม่ได้	32
1.28	วัฏจักรคาร์โนต์	33
1.29	อสมการของเคลาซิอุสและเอนโทรปี	34
1.30	ความสัมพันธ์ที่สำคัญสองประการ	36
1.31	การใช้แนวคิดของงานสูญเสียพิสูจน์หาการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี	36
1.32	หลักการเพิ่มเอนโทรปีของระบบปิด	37
1.33	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของของแข็งและของเหลว	37
1.34	กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม	37
1.35	กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับกระบวนการสภาวะคงตัว-การไหลคงตัว (กระบวนการ SSSF)	38
1.36	กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับกระบวนการสภาวะเอกรูป-การไหลเอกรูป (กระบวนการ USUF)	40
1.37	หลักการเพิ่มเอนโทรปีสำหรับปริมาตรควบคุม	40
1.38	ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิก	41
1.39	สมการสภาวะสำหรับก๊าซอุดมคติ	44
1.40	สมการสมการสำหรับก๊าซจริง	45
1.41	ความสัมพันธ์ของ P-V-T สำหรับก๊าซอุดมคติที่เป็นมวลควบคุม	48
1.42	งานและความร้อนสำหรับก๊าซอุดมคติที่เป็นมวลควบคุม	49
1.43	ความจุความร้อนจำเพาะหรือความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติ	50
1.44	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของมวลควบคุม	52
1.45	พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีตามชนิดของกระบวนการต่างๆ ของมวลควบคุม	54
1.46	สรุปตารางการวิเคราะห์ก๊าซอุดมคติสำหรับปริมาตรควบคุม	58
1.47	สภาวะตาย สภาพประโยชน์สูงสุด และงานย้อนกลับได้	59
1.48	งานย้อนกลับได้ (W_{rev})	60
1.49	สภาวะย้อนกลับไม่ได้	61
1.50	งานย้อนกลับได้และสภาวะย้อนกลับไม่ได้สำหรับกระบวนการต่างๆ	62
1.51	สภาพประโยชน์สูงสุด	68
1.52	ประสิทธิภาพกฎข้อที่สอง	70
1.53	ฟังก์ชันเอนทัลปีและฟังก์ชันกิบส์	71

บทที่ 2 วัฏจักรกำลังไอน้ำและวัฏจักรกำลังก๊าซ 73

- 2.1 วัฏจักรแรงดันอย่างง่าย 73
- 2.2 วัฏจักรแรงดันแบบรีฮิต 75
- 2.3 วัฏจักรรีเจนเนอเรทีฟ 76
- 2.4 โคเจนเนอเรชัน 79
- 2.5 วัฏจักรกำลังมาตรฐานของอากาศ 104

บทที่ 3 วัฏจักรการทำความเย็น..... 132

- 3.1 วัฏจักรการทำความเย็นภายใต้การอัดไอในอุดมคติ 132
- 3.2 วัฏจักรการทำความเย็นภายใต้การอัดไอจริง 133
- 3.3 วัฏจักรการทำความเย็นบนแผนภาพความดัน-เอนทัลปี (P-h) 135
- 3.4 วัฏจักรการทำความเย็นแบบแคสเคด (Cascade) 141
- 3.5 วัฏจักรการทำความเย็นโดยการอัดหลายตอน 142
- 3.6 วัฏจักรการทำน้ำแข็งแห้งจากก๊าซ CO_2 143
- 3.7 วัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมแอมโมเนีย 146
- 3.8 วัฏจักรการทำความเย็นแบบดูดซึมลิเทียมโบรไมด์ 148

บทที่ 4 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของอุณหพลศาสตร์..... 192

- 4.1 คณิตศาสตร์ของอุณหพลศาสตร์ที่ควรทราบ 192
- 4.2 สมการของแม็กซ์เวลล์ 193
- 4.3 สมการแคลปีรอน 195
- 4.4 สมการของ du , dh , ds , C_v และ C_p ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของ P , v และ T 196
- 4.5 การสร้างตารางของคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์จากข้อมูลที่เก็บจากการทดลอง 226
- 4.6 ก๊าซจริงและพฤติกรรมของก๊าซจริง 231
- 4.7 สมการสถานะของก๊าซจริง 253
- 4.8 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีและเอนโทรปีของก๊าซจริง 275

บทที่ 5 ก๊าซผสมอุดมคติ 337

- 5.1 องค์ประกอบของก๊าซผสมอุดมคติ 337
- 5.2 กฎของดาลตัน (Dalton) และกฎของแอมกาต (Amagat) 339
- 5.3 คุณสมบัติของก๊าซผสมอุดมคติ 341
- 5.4 ของผสมอากาศชื้น 359
- 5.5 กระบวนการทำให้อากาศชื้นอิ่มตัวแบบแอเดียแบติก 366
- 5.6 แผนภูมิอากาศชื้น 367

5.7 กระบวนการปรับสภาวะอากาศ	370
5.8 ก๊าซผสมจริง	415
5.9 เอนโทรปีของก๊าซผสมจริง	417

บทที่ 6 ปฏิกิริยาการเผาไหม้461

6.1 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้	461
6.2 การเผาไหม้ทางทฤษฎีและปฏิบัติ	462
6.3 การทำสมดุลกับปฏิกิริยาการเผาไหม้	465
6.4 เอนทัลปีของการรวมตัวและเอนทัลปีของการเผาไหม้	480
6.5 ค่าความร้อนของสารเชื้อเพลิง	486
6.6 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับระบบที่เกิดปฏิกิริยา	487
6.7 อุณหภูมิเปลวแอเดียแบติก	488
6.8 เอนโทรปีของสารทำปฏิกิริยาและสารจากการเผาไหม้	534
6.9 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับระบบที่มีปฏิกิริยา	537
6.10 ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน	538

บทที่ 7 อุณหพลศาสตร์ของของผสมจริง567

7.1 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเฟสของผสม 2 องค์ประกอบ	568
7.2 คุณสมบัติเชิงอุณหพลศาสตร์โดยโมล	569
7.3 การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันกิบส์ (dG) และฟังก์ชันเอนทัลปี (dA), พลังงานภายใน dU และเอนทัลปี (dH)	574
7.4 การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน เอนทัลปี และเอนทัลปี	575
7.5 ΔH_{mix} และ ΔS_{mix} สำหรับก๊าซผสมอุดมคติ	576
7.6 ศักย์ทางเคมีของสาร i ในก๊าซผสมอุดมคติ	578
7.7 ฟังก์ชันของสารบริสุทธิ์ (f)	579
7.8 ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในของผสม	582
7.9 สารละลายอุดมคติ	583
7.10 การกำหนดสภาวะสมดุลสำหรับของผสม	586
7.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระระบุสภาวะ	586
7.12 สมดุลเฟส	588
7.13 กฎของราอูลต์	591
7.14 การคำนวณสมดุลเฟส	593
7.15 ปฏิกิริยาทางเคมีและสมดุลทางเคมี	639
7.16 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพร้อมกัน	679
7.17 การแตกตัวเป็นไอออนของก๊าซ	681

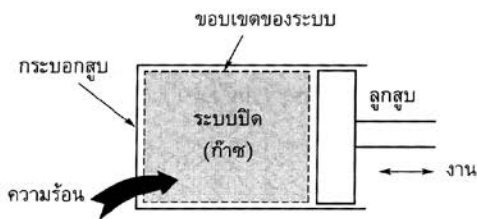
1

ทบทวนอุณหพลศาสตร์ 1

กฎและพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์นั้นได้มาจากการสังเกตการณ์จากการทดลอง วิชาอุณหพลศาสตร์เชิงคลาสสิกที่จะเรียนกันต่อไปนี้ จะศึกษาพฤติกรรมของระบบในระดับมหัพภาคเท่านั้น นิยามและแนวคิดพื้นฐานทางอุณหพลวัตที่ควรทราบคือ

1.1 มวลควบคุม (หรือระบบปิด)

มวลควบคุมหมายถึง ปริมาณที่แน่นอนของสสารหนึ่งๆ ที่ต้องการศึกษาพฤติกรรมทางอุณหพลวัต ซึ่งมีลักษณะดังนี้



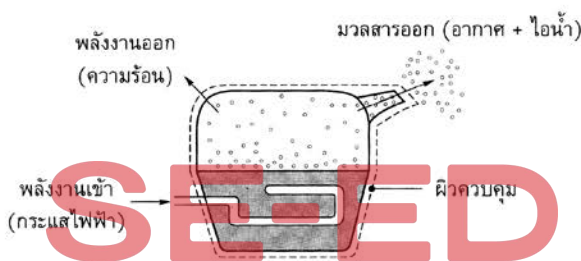
รูปที่ 1.1 มวลควบคุมหรือระบบปิด

1. มวลควบคุมจะแยกออกจากสิ่งแวดล้อมโดยมีขอบเขตของระบบเป็นพรมแดน
2. มวลควบคุมมีเพียงความร้อนและงานที่สามารถถ่ายเทข้ามขอบเขตของระบบ
3. มวลสารภายในระบบไม่เปลี่ยนแปลงและไม่มีมวลสารไหลข้ามขอบเขตของระบบ
4. ขอบเขตของระบบสามารถเคลื่อนที่ได้ (หดหรือขยายตัว)

1.2 ปริมาตรควบคุม (หรือระบบเปิด)

ปริมาตรควบคุมหมายถึง ปริมาณของสสารหนึ่งๆ ที่ต้องการศึกษาพฤติกรรมทางอุณหพลวัต ซึ่งมีลักษณะดังนี้

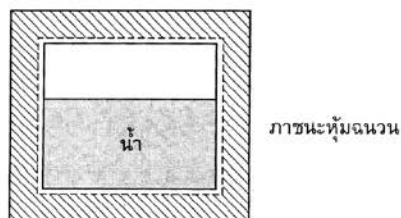
1. ปริมาตรควบคุมจะแยกออกจากสิ่งแวดล้อมโดยผิวควบคุม
2. ปริมาตรควบคุมมีความร้อน งานและมวลสารที่สามารถถ่ายเทข้ามผิวควบคุมได้
3. มวลสารในปริมาตรควบคุมเปลี่ยนแปลงหรือไม่ก็ได้
4. ขอบเขตของปริมาตรควบคุมนั้นอาจคงที่ ขยาย หรือหดได้



รูปที่ 1.2 ปริมาตรควบคุมหรือระบบเปิด

1.3 ระบบโดดเดี่ยว

ระบบโดดเดี่ยวหมายถึง ระบบที่แยกออกจากสิ่งแวดล้อมโดยสิ้นเชิง โดยไม่มีอันตรกิริยากับสิ่งแวดล้อม กล่าวคือไม่มีมวลสาร ความร้อน และงานถ่ายเทข้ามขอบเขตของระบบ ระบบนั้นจะคงสภาวะเดิมตลอดไป



รูปที่ 1.3 ระบบโดดเดี่ยว

1.4 คุณสมบัติทางอุณหพลวัต

คุณสมบัติ หมายถึงปริมาณใดๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของระบบ และไม่ขึ้นอยู่กับกระบวนการหรือเส้นทางของระบบก่อนมาถึงสภาวะดังกล่าว สำหรับสารบริสุทธิ์หนึ่งๆ นั้น สภาวะของสารถูกกำหนดด้วยคุณสมบัติอิสระ 2 ตัว คุณสมบัติดังกล่าวแบ่งออกเป็น

คุณสมบัติไม่ขึ้นกับปริมาณ (intensive properties) หมายถึงคุณสมบัติที่ไม่ขึ้นอยู่กับมวลของสารที่สภาวะหนึ่งๆ ของสารหรือระบบนั้น ตัวอย่างเช่น ความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่น

คุณสมบัติขึ้นกับปริมาณ (extensive properties) หมายถึงคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับมวลของสาร ซึ่งที่สภาวะหนึ่งๆ นั้นคุณสมบัตินี้จะแปรเปลี่ยนโดยตรงกับมวล ตัวอย่างเช่น มวล ปริมาตรทั้งหมด และพลังงาน

สำหรับคุณสมบัติขึ้นกับปริมาณต่อหนึ่งหน่วยมวลก็คือคุณสมบัติไม่ขึ้นกับปริมาณของสารนั้น เช่น ปริมาตรจำเพาะ ($v = V/m$) พลังงานภายในจำเพาะ ($u = U/m$) เป็นต้น

1.5 สภาวะ กระบวนการ และวัฏจักร

เมื่อระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่จุดหนึ่งๆ หรือสภาวะหนึ่ง คุณสมบัติของระบบดังกล่าวสามารถวัดหรือคำนวณได้ ชุดคุณสมบัติ (set of properties) จะใช้กำหนดสภาวะ ถ้าแม้ว่ามีความสมบัติตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนไป ระบบนั้นจะมีสภาวะใหม่ซึ่งแตกต่างไปจากเดิมนั้นคือระบบดำเนินกระบวนการนั่นเอง ถ้าระบบเปลี่ยนแปลงจากสภาวะเริ่มต้นโดยผ่านกระบวนการหลายๆ กระบวนการ แล้วระบบสามารถกลับสู่สภาวะเริ่มต้นเดิมได้ แสดงว่าระบบดำเนินเป็นวัฏจักร

1.5.1 สภาวะสมดุล (Equilibrium State)

สภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์ของระบบประกอบด้วย

1. สมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) พบว่าทั่วทั้งระบบมีอุณหภูมิเดียวกันหมด
2. สมดุลทางกล (mechanical equilibrium) พบว่าทั่วทั้งระบบมีความดันเดียวกันหมด
3. สมดุลทางเฟส (phase equilibrium) ถ้าระบบประกอบด้วย 2 เฟส ระบบจะเข้าสู่สมดุลเฟส เมื่อระบบหยุดแลกเปลี่ยนมวลระหว่างเฟสทั้งสอง

4. สมดุลทางเคมี (chemical equilibrium) ระบบจะอยู่ในสมดุลทางเคมีเมื่อองค์ประกอบทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

1.5.2 กระบวนการ

เมื่อระบบเปลี่ยนแปลงสภาวะ คุณสมบัติหนึ่งอย่างหรือมากกว่าของระบบนั้นย่อมเปลี่ยนแปลงไปเสมอ ระบบที่เปลี่ยนแปลงจากสภาวะเริ่มต้นหนึ่งไปสู่สภาวะสุดท้ายใดๆ เส้นทางที่กำหนดสภาวะทั้งหมดที่ระบบผ่านมานั้นเรียกว่า *กระบวนการ*

กระบวนการสมดุลควอซี เป็นกระบวนการในอุดมคติซึ่งแตกต่างจากสมดุลทางอุณหพลวัตน้อยมาก สภาวะทั้งหมดที่ระบบผ่านบนกระบวนการสมดุลควอซีนั้นพิจารณาให้เป็นสภาวะสมดุล

กระบวนการไม่สมดุล ระบบที่ดำเนินกระบวนการไม่สมดุลนั้น คุณสมบัติของระบบจึงไม่เป็นค่ากำหนดแน่นอนค่าเดียวที่สภาวะหนึ่งๆ ดังนั้นเราจึงไม่สามารถใช้กำหนดสภาวะในแต่ละสภาวะที่ระบบผ่านมาในกระบวนการไม่สมดุลนี้

1.6 มวล (m), ปริมาตร (V), ความหนาแน่น (ρ) และปริมาตรจำเพาะ (v)

มวลหมายถึง คุณสมบัติใช้ต้านการเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือความเฉื่อย มวลเป็นปริมาณสเกลาร์ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือตัน (1 ตัน = 1000 kg) มวลไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง ความดัน หรืออุณหภูมิ และมวลจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเคลื่อนที่ที่มีความเร็วไม่เข้าใกล้อัตราเร็วแสง

กฎการอนุรักษ์มวล มวลทั้งหมดของระบบไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือถูกทำลายลงไปได้

ปริมาตร (V) คือปริภูมิ (space) ที่สสารหรือระบบยึดครองอยู่ มีหน่วย SI เป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) หน่วยของปริมาตรที่นิยมใช้กันมากคือลิตร (L) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยเป็นดังนี้

$$1000 \text{ mm}^3 = 1 \text{ mL (mL = millilitre)}$$

$$1000 \text{ mL} = 1 \text{ L}$$

$$1000 \text{ L} = 1 \text{ m}^3$$

ปริมาตรอาจเปลี่ยนแปลงกับความดันและอุณหภูมิ (โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับก๊าซ)

ความหนาแน่น (ρ) คือมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของระบบ

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1.1)$$

ปกติที่ความดันและอุณหภูมิมาตรฐาน (STP) มีความหนาแน่น $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

ปริมาตรจำเพาะ (v) คือปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยมวลของระบบ ซึ่งเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1.2)$$

ความถ่วงจำเพาะ (SG) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นของสาร (ρ) ต่อความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w) ภายใต้ภาวะมาตรฐาน

$$SG = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1.3)$$

inspiration starts here

1.7 แรง ($\vec{F}$) และน้ำหนัก ($\vec{W}$)

แรง จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันกล่าวว่า “เมื่อมีแรงลัพธ์ที่มีขนาดไม่เป็นศูนย์มากระทำต่อวัตถุ จะทำให้วัตถุเกิดความเร่งในทิศเดียวกับแรงลัพธ์ที่มากระทำ และขนาดของความเร่งนี้จะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์และแปรผกผันกับมวลของวัตถุนั้น”

$$\vec{a} \propto \frac{\vec{F}}{m}, \quad \vec{F} \propto m\vec{a}$$

$$\text{และ } \vec{F} = k m \vec{a}$$

ในหน่วย SI พบว่า $k = 1$ ดังนั้น

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1.4)$$

แรง 1 นิวตัน หมายถึงแรงที่ทำให้วัตถุซึ่งมีมวล 1 kg เคลื่อนที่ไปด้วยความเร่ง 1 m/s^2 นั่นคือ $1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m/s}^2$

น้ำหนัก หมายถึงน้ำหนักของวัตถุหนึ่งๆ ขณะอยู่บนพื้นโลก ซึ่งเป็นแรงที่โลกดึงดูดวัตถุนั้น ใช้สัญลักษณ์ $\vec{W}$ และมีหน่วยเช่นเดียวกับแรง

$$\vec{W} = m\vec{g} \quad (1.5)$$

ในที่นี้ $\vec{g}$ คือความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงเฉพาะที่ สำหรับความโน้มถ่วงมาตรฐานแนะนำให้ใช้ค่าเท่ากับ 9.80665 m/s^2

1.8 ความดันสัมบูรณ์ (P) ความดันบรรยากาศ (P_{atm}) และความดันเกจ (P_g)

ความดัน คือแรง (หน่วย N) ของของไหลที่กระทำตั้งฉากต่อพื้นที่หรือผืนงานขนาด 1 m^2 ความดันมีหน่วย SI เป็น N/m^2 หรือ Pa บางครั้งใช้หน่วย bar, เมตร-น้ำ ($\text{m-H}_2\text{O}$) หรือมิลลิเมตร-ปรอท (mm-Hg)

ความดันที่พบเสมอแบ่งออกเป็น ความดันเกจ (P_g อ่านได้จากเกจวัดความดัน) ความดันบรรยากาศ (P_{atm} อ่านได้จากบารอมิเตอร์) ความดันสุญญากาศ (P_{vac}) และความดันสัมบูรณ์ (P_{abs} หรือ P) *Inspiration starts here*

ความสัมพันธ์

$$P_{\text{abs}} = P_g + P_{\text{atm}} \quad (\text{เมื่อ } P_{\text{abs}} > P_{\text{atm}}) \quad (1.6)$$

$$P_{\text{atm}} = P_{\text{abs}} + P_{\text{vac}} \quad (\text{เมื่อ } P_{\text{abs}} < P_{\text{atm}}) \quad (1.7)$$

$$P_g = \rho gh \quad (1.8)$$

หน่วยความดันที่ควรทราบ

1 Pa	=	1 N/m ²
1 kg/cm ²	=	735.6 mm - Hg = 10 m - H ₂ O = 0.9807 bar
1 bar	=	10 ⁵ Pa = 0.1 MPa
1 atm	=	1.01325 × 10 ⁵ Pa = 1.033 kg/cm ²
1 atm	=	760 mm - Hg = 10.33 m - H ₂ O

1.9 อุณหภูมิ

อุณหภูมิสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับระดับพลังงานเฉลี่ยของโมเลกุลที่ประกอบขึ้นเป็นสารนั้น อาจกล่าวได้ว่า “อุณหภูมิก็คืออัตราส่วนของพลังงานเฉลี่ยของโมเลกุลของสารหนึ่งต่อจำนวนโมเลกุลของสารนั้น” หน่วยที่ใช้คือ °C และ K โดยมีความสัมพันธ์คือ

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15 \quad (1.9)$$

1.10 สมภาพของอุณหภูมิ

เมื่อวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงสัมผัสกับวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนจะถ่ายเทจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำจนกระทั่งมีอุณหภูมิเดียวกัน ความร้อนจึงหยุดถ่ายเท วัตถุทั้งสองอยู่ในสมดุลทางความร้อน นั่นคือวัตถุทั้งสองมีระดับอุณหภูมิเดียวกัน

1.11 กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์

กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์กล่าวว่า “เมื่อวัตถุทั้งสองมีสภาพของอุณหภูมิกับวัตถุอื่นที่สาม วัตถุทั้งสองนั้นจะมีสภาพของอุณหภูมิกับ” กฎข้อที่ศูนย์นี้ไม่ได้พิสูจน์มาจากกฎอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามได้จากผลการทดลอง

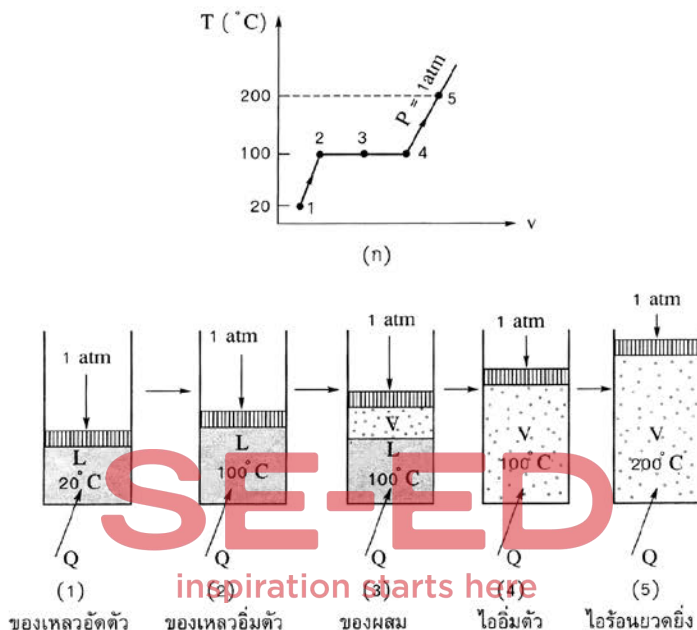
1.12 คุณสมบัติของสารบริสุทธิ์

ลักษณะของคุณสมบัติของสารบริสุทธิ์คือ

1. สารบริสุทธิ์เป็นสารที่มีเนื้อเดียวกันตลอดและมีองค์ประกอบทางเคมีคงที่ (fixed chemical composition)
2. องค์ประกอบทางเคมีของสารบริสุทธิ์จะเหมือนกันในทุกๆ เฟสที่เกิดขึ้น
3. ในแต่ละเฟสของสารบริสุทธิ์นั้น ธาตุในองค์ประกอบจะอยู่ในปริมาณสัดส่วนเดียวกันเสมอ

ในกรณีที่พิจารณาสารบริสุทธิ์เป็นสารอัดตัวได้เชิงเดียว (simple compressible substance) นั้น จะไม่คำนึงถึงผลทางพื้นผิว (surface effect) ที่เนื่องมาจากผลทางแม่เหล็กและไฟฟ้า แต่จะคำนึงถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของสารอัดตัวได้เชิงเดียวเท่านั้น

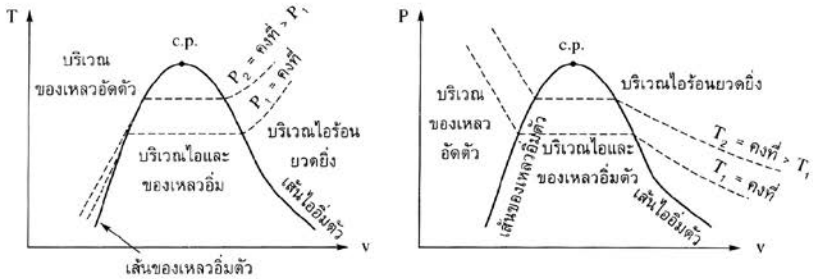
1.13 การเปลี่ยนแปลงเฟสของสารบริสุทธิ์



รูปที่ 1.4 การเปลี่ยนแปลงเฟสของน้ำภายใต้ความดัน 1 atm

เมื่อสารบริสุทธิ์ เช่น น้ำ ได้รับความร้อนภายใต้ความดันคงที่ (1 atm) น้ำจะเปลี่ยนแปลงเฟสของมันดังแผนภาพ $T-v$ และรูปที่ 1.4 จากสภาวะเริ่มต้นของน้ำอยู่ที่ 20°C และ 1 atm (ของเหลวอัดตัว) ในกระบอกสูบได้รับความร้อนในอัตราสม่ำเสมอภายใต้ความดัน 1 atm ทำให้เปลี่ยนแปลงสภาวะดังรูปที่ 1.4 ช่วง 1-2 น้ำเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเดียวกจาก 20°C (เฟสเป็นของเหลว) เป็น 100°C (อุณหภูมิอิ่มตัวที่ 1 atm) ในช่วงที่ 2-3 น้ำมีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากของเหลวเป็นไอลายใต้ 100°C และ 1 atm จนกระทั่งน้ำกลายเป็นไอจนหมดที่จุด 4 (ไออิ่มตัว) จากนั้นให้ความร้อนต่อไปไอน้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 200°C ที่จุด 5 (ไอร้อนยวดยิ่ง)

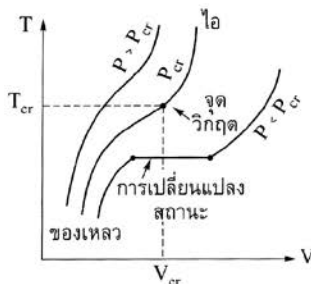
1.14 แผนภาพ T-v และ P-v ของสารบริสุทธิ์



รูปที่ 1.5 แผนภาพ T-v และ P-v ของสารบริสุทธิ์

ในรูปที่ 1.5 ทุกๆ สภาวะของของเหลวอัดตัวจะอยู่บนเส้นของเหลวอัดตัว และทุกๆ สภาวะของไออิ่มตัวจะอยู่บนเส้นไออิ่มตัว โดยเส้นทั้งสองนี้จะมาพบกันที่จุดวิกฤต (c.p.) ซึ่งเป็นจุดที่สภาวะของเหลวอัดตัวและสภาวะไอร้อนยวดยิ่งเหมือนกันทุกประการ สภาวะของเหลวอัดตัวจะอยู่บริเวณด้านซ้ายของเส้นของเหลวอัดตัว สภาวะไอร้อนยวดยิ่งจะอยู่บริเวณด้านขวาของเส้นไออิมิต์ ภายในเส้นโดม (dome) ของแต่ละแผนภาพในรูปที่ 1.5 จะแสดงสภาวะของของผสม 2 เฟสระหว่างของเหลวและไอกายใดสมมูลเฟสซึ่งเรียกว่า **บริเวณของผสม** เปียก

การเกิดกระบวนการภายใต้ความดันเหนือวิกฤต (supercritical pressure, $P > P_{cr}$) นั้น น้ำเปลี่ยนแปลงสภาวะบนเส้นความดันเหนือวิกฤตจะปรากฏให้เห็นเพียงเฟสเดียวเท่านั้น และไม่สามารถบอกได้ว่าจะเป็นไอหรือของเหลว ในที่นี้จะพิจารณาให้เป็นของไหล (fluid) ดังรูปที่ 1.6

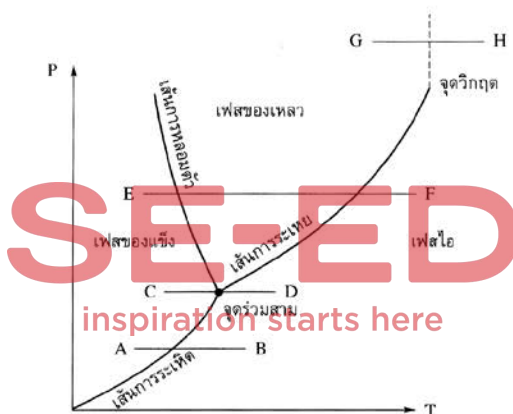


รูปที่ 1.6 การเปลี่ยนแปลงสภาวะเมื่อ $P = P_{cr}$, $P < P_{cr}$ และ $P > P_{cr}$

การเกิดกระบวนการภายใต้ความดันวิกฤต ($P = P_{cr}$) นั้น น้ำจะเปลี่ยนแปลงสภาวะบนเส้นความดันวิกฤตนั้น ถ้าอุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต น้ำจะอยู่ในสภาพของเหลวอัดตัว ในทางตรงกันข้าม ถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต น้ำจะอยู่ในสภาพไอร้อนยวดยิ่ง ดังรูปที่ 1.6

คุณสมบัติของสารบริสุทธิ์ที่จุดวิกฤตพิจารณาจากตารางที่ ก.6 ในภาคผนวก

จุดร่วมสาม คือสภาวะซึ่งสารบริสุทธิ์อยู่ร่วมกันอย่างสมดุลทั้ง 3 เฟสคือ ของแข็ง ของเหลว และไอ สำหรับน้ำนั้นจุดร่วมสามอยู่ที่ 0.01°C และ 0.6113 kPa ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แผนภาพ P-T ของน้ำ

ในรูปที่ 1.7 แสดงถึงสมดุลระหว่างเฟสทั้งสามของน้ำ (ของแข็ง ของเหลว และไอ) บนแผนภาพ P-T เส้นการระเหิดนั้นแสดงสภาวะสมดุลระหว่างเฟสของแข็งและไอ บนเส้นการหลอมตัว แสดงสภาวะสมดุลระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว และบนเส้นการระเหย แสดงสภาวะสมดุลระหว่างเฟสของเหลวและไอ ที่จุดร่วมสามแสดงสภาวะสมดุลระหว่างเฟสทั้งสามดังกล่าว

1.15 คุณสมบัติอิสระของสารบริสุทธิ์

สำหรับสารบริสุทธิ์แบบอัดตัวได้เชิงเตียพว่าสภาวะหนึ่งๆ ของสารนั้นสามารถกำหนดด้วยคุณสมบัติอิสระสองตัว ตัวอย่างเช่น ที่สภาวะหนึ่งของไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะกำหนดด้วยปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิ ที่สภาวะของเหลวอัดตัวและไอน้ำอัดตัวนั้นมีความดันและ

อุณหภูมิเดียวกัน จะพบว่าความดันและอุณหภูมิไม่เป็นคุณสมบัติอิสระสองตัวของสารบริสุทธิ์ จึงใช้ระบุภาวะในบริเวณของผสมเปิกนั้นไม่ได้ จะใช้ความดันและปริมาตรจำเพาะแทน

1.16 นิยามของงาน

ในทางอุณหพลศาสตร์กล่าวว่า “ในระบบหนึ่งๆ จะพิจารณาว่ามีงานเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อเกิดผลต่อสิ่งแวดล้อมโดยลำพังซึ่งเป็นการยกน้ำหนักขึ้นได้” งานที่ทำโดยระบบมีเครื่องหมายบวก งานที่ให้ต่อระบบมีเครื่องหมายลบ และใช้สัญลักษณ์เป็น W สำหรับระบบหนึ่งๆ จะมีงานเกิดขึ้นได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับการเลือกขอบเขตหรือผิวควบคุม ถ้าเลือกขอบเขตของระบบ (หรือผิวควบคุม) แล้วสามารถพิจารณาเป็นการเกิดผลภายนอกกระบวน โดยลำพังเป็นการยกน้ำหนักได้ ย่อมแสดงว่าระบบนั้นมีงานเกิดขึ้น

ในหน่วย SI กล่าวว่า “งานขนาด 1 จูล หมายถึงผลคูณระหว่างแรงขนาด 1 นิวตัน กับระยะทางในแนวแรง 1 เมตร” นั่นคือ

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$$

1.17 รูปแบบของงานในอุณหพลศาสตร์

เมื่อก้าวถึงงานทางกลแล้วมาจากนิยามพื้นฐานที่ว่า “งานคือผลคูณระหว่างแรง F กับการกระจัด dS ในแนวแรงนั้น” นั่นคือ

$$W = \int_1^2 F dS \quad (1.10)$$

รูปแบบของงานทางกลที่พบคือ

1.17.1 งานเนื่องจากการเคลื่อนที่ของขอบเขต (งานเนื่องจากการแทนที่)

ขอบเขตของระบบเคลื่อนที่เมื่อระบบเปลี่ยนแปลงสถานะ (ขยายตัวหรือหดตัว) ย่อมทำให้ระบบนั้นเปลี่ยนแปลงปริมาตรและเกิดงานเนื่องจากการแทนที่ภายใต้กระบวนการสมดุลควอไซ สมการคือ

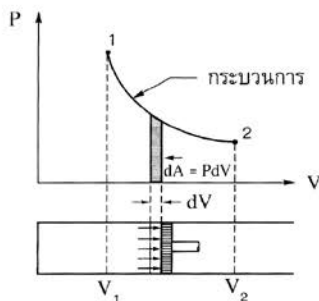
$$\delta W = P dL$$

โดย P คือความดันของระบบภายในกระบอกสูบ A คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ dL คือระยะทางที่ลูกสูบเคลื่อนที่ได้ และ dW คืองานที่เกิดขึ้น ในที่นี้ $A dL = dV$ นั่นคือ

$$dW = P dV$$

$$\text{และ } {}_1W_2 = \int_2^1 PdV \quad (1.11)$$

งานเป็นฟังก์ชันวิถี (path function) ซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นทางหรือกระบวนการ



รูปที่ 1.8 พื้นที่ใต้กราฟ P-V แทนงานเนื่องจากการแทนที่

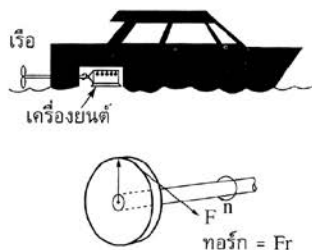
ข้อควรระวังในการใช้สมการ $\delta W = PdV$ ถ้าระบบนั้นดำเนินกระบวนการไม่สมดุล จะใช้สมการ $dW = PdV$ หางานไม่ได้ แต่จะพิจารณาจากสมการ

inspiration starts here

$$\delta W = F_{\text{ext}} dL = P_{\text{ext}} dV \quad (1.12)$$

โดยที่ F_{ext} คือแรงภายนอกกระทำต่อระบบ P_{ext} คือความดันภายนอกที่กระทำต่อระบบ และ dV คือการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร

1.17.2 งานเพลลา



รูปที่ 1.9 งานเพลลา

สำหรับระบบส่งถ่ายกำลังด้วยเพลอาหมุนด้วยทอร์ก τ kN.m ภายใต้รอบการทำงาน n รอบ ดังรูปที่ 1.9 หาแรงกระทำให้เกิดทอร์กจาก

$$\tau = Fr$$

$$\therefore F = \frac{\tau}{r}$$

ระยะทางของแรง F ทำได้ $S = (2\pi r)n$ ดังนั้นงานเพลาคือ

$$W_{sh} = FS = \frac{\tau}{r} (2\pi rn) = 2\pi n\tau \quad (1.13)$$

1.17.3 งานสปริง

เมื่อยืดหรือหดสปริงออกจากตำแหน่งสมดุลของสปริง จะทำให้สปริงนั้นมีพลังงานศักย์ยืดหยุ่นสะสมและสามารถทำงานได้ กำหนดให้สปริงมีค่าคงที่สปริง k สปริงถูกยืด (หรือหด) จากตำแหน่งสมดุลเป็นระยะ x_1 และ x_2 ที่สภาวะ 1 และสภาวะ 2 ของระบบตามลำดับ จากสมการ (1.10) พบว่างานสปริงคือ

$$W_{sp} = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2) \quad (1.14)$$

1.17.4 งานของลวดขึงตึง

พิจารณาระบบเป็นลวดขึงตึงซึ่งถูกกระทำภายใต้ความตึง ζ ทำให้ความยาวของลวดนั้นเปลี่ยนแปลงเท่ากับ dL งานที่ทำโดยระบบคือ

$${}_1W_2 = -\int_1^2 \zeta dL \quad (1.15)$$

เครื่องหมายลบในสมการ (1.15) เป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากถ้าเป็นงานที่ทำโดยระบบ dL จะเป็นลบ

1.17.5 งานจากความตึงผิว

ระบบประกอบเป็นฟิล์มของเหลวที่มีความตึงผิว ϕ ฟิล์มของเหลวถูกล้อมรอบด้วยโครงลวดสี่เหลี่ยม ซึ่งด้านหนึ่งสามารถเคลื่อนไปมาได้ เมื่อลวดเลื่อนไปจะทำให้พื้นที่ผิวของฟิล์มเปลี่ยนแปลง dA ดังนั้นงานที่ทำโดยระบบคือ

$${}_1W_2 = -\int_1^2 \phi dA \quad (1.16)$$

1.17.6 งานทางแม่เหล็ก

สำหรับกระบวนการสมดุลควอไซแบบย้อนกลับได้ งานที่ทำต่อสารทางแม่เหล็กเชิงเดียวคือ

$${}_1W_2 = -\int_1^2 \mu_0 \mathcal{H} d(VM) \quad (1.17)$$

ในที่นี้ μ_0 คือสภาพให้ซึมได้ในบริเวณอิสระ V คือปริมาตร $\mathcal{H}$ คือความเข้มของสนามแม่เหล็ก และ M คือ magnetization

1.17.7 งานทางไฟฟ้า

สำหรับกระบวนการสมดุลควอไซสำหรับระบบทางไฟฟ้าหนึ่งๆ ระหว่างดำเนินการกระบวนการนั้นมีความต่างศักย์ e ปริมาณของประจุไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบเป็น dZ และงานทางไฟฟ้าคือ

$$\begin{aligned} \delta W &= -e dZ, \quad \frac{dZ}{dt} = i \quad (i \text{ คือกระแสไฟฟ้า}) \\ \therefore {}_1W_2 &= -\int_1^2 \varepsilon i dt \end{aligned} \quad (1.18)$$

รูปสมการอัตราสำหรับงาน

$$\frac{\delta W}{dt} = \dot{W} = -\varepsilon i \quad (1.19)$$

ในที่นี้ i มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A) ε มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) และ W มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

1.18 นิยามและหน่วยของความร้อน

ความร้อนเป็นอันตรกิริยาระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกันกับงาน ความร้อนสามารถถ่ายเทข้ามขอบเขตของระบบได้เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ความร้อนจะหยุดถ่ายเทเมื่ออุณหภูมิของระบบและสิ่งแวดล้อมนั้นเท่ากัน และเรียกภาวะนี้ว่าสมดุลความร้อน

ความร้อนถ่ายเทออกจากระบบมีเครื่องหมายลบ และความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ระบบมีเครื่องหมายบวก และใช้สัญลักษณ์เป็น Q สำหรับกระบวนการแอเดียแบติกนั้นเป็นกระบวนการที่ปราศจากการถ่ายเทความร้อนข้ามขอบเขตของระบบ ($Q = 0$) ในหน่วย SI ความร้อนมีหน่วยเป็นจูล (J)

ความร้อนเป็นฟังก์ชันวิถึเช่นเดียวกับงาน ถ้าระบบดำเนินกระบวนการจากสภาวะ 1 ไปสู่สภาวะ 2 พบว่า

$$\int_1^2 \delta Q = {}_1Q_2 \quad (1.20)$$

ในบางครั้งอาจมองในเทอมของอัตราของความร้อนถ่ายเทข้ามขอบเขตของระบบ ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น $\dot{Q}$ ($\dot{Q} = \delta Q/dt$) ในหน่วย W หรือความร้อนต่อ 1 หน่วยมวลของระบบ ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น q ($q = Q/m$) ในหน่วย J/kg

1.19 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับมวลควบคุม

เมื่อพิจารณาระบบหนึ่งๆ กล่าวได้ว่า “ถ้ามีงานและ (หรือ) ความร้อนข้ามขอบเขตของระบบย่อมทำให้สภาวะของระบบนั้นเปลี่ยนแปลง” ความสัมพันธ์ของงาน ความร้อน และคุณสมบัติของระบบนั้นอาศัยหลักพื้นฐานของกฎอนุรักษ์ของพลังงาน ซึ่งนั่นก็คือกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

อาศัยผลการทดลองสรุปได้ว่า ถ้าระบบหนึ่งๆ ดำเนินครบวัฏจักร อินทิกรัลของความร้อนตลอดวัฏจักร ($\oint \delta Q$) เท่ากับอินทิกรัลของงานตลอดวัฏจักร ($\oint \delta W$) ของระบบนั้น โดยที่ทั้งงานและความร้อนอยู่ในหน่วยจูล นั่นคือ

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (1.21)$$

ปริมาณทั้งค่า u และ h สำหรับสารต่างๆ มีแสดงให้เห็นในตารางของคุณสมบัติในบริเวณของผสมเปียกนั้นสามารถเขียนเป็น

$$\begin{aligned} u &= u_f + x u_{fg} \\ h &= h_f + x h_{fg} \end{aligned} \quad (1.23)$$

สำหรับเอนทัลปีนั้นนิยามจาก

$$H = U + PV \quad \text{หรือ} \quad h = u + Pv \quad (1.24)$$

นิยามนี้ใช้ได้กับทุกกระบวนการ ไม่เจาะจงใช้กับกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง โดยส่วนมากแล้วในตารางและแผนภูมิของคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์จะให้เฉพาะค่าของเอนทัลปี ดังนั้นจึงหาค่าของพลังงานภายในจากสมการ $u = h - Pv$

สำหรับค่าของพลังงานภายในและเอนทัลปีนั้นต้องมีสภาวะอ้างอิงเปรียบเทียบค่า ในตารางไอน้ำกำหนดสภาวะอ้างอิงอยู่ที่ 0.01°C ซึ่งพลังงานภายในของเหลวอิ่มตัวมีค่าเป็นศูนย์ สำหรับสารทำความเย็น (แอมโมเนียและฟรอน-12) นั้นกำหนดสภาวะอ้างอิงเป็นของเหลวอิ่มตัวที่ -40°C ซึ่งมีเอนทัลปีเป็นศูนย์ และเอนทัลปีมีค่าติดลบได้ดังเช่นตารางที่ ก.1.5

1.21 ความร้อนจำเพาะ

1.21.1 ความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะคือปริมาณความร้อนต่อ 1 หน่วยมวลที่ทำให้สารนั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา ซึ่งแบ่งออกเป็นความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ C_v และความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ C_p นั่นคือ

$$C_v = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right)_v = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (1.25)$$

$$C_p = \frac{1}{m} \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right)_p = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (1.26)$$

พบว่าทั้ง C_p และ C_v ของสารหนึ่งๆ นั้นเป็นคุณสมบัติทางอุณหพลวัตของสารนั้น และไม่ขึ้นกับกระบวนการ

1.21.2 ความร้อนจำเพาะสำหรับสารที่เป็นของแข็งหรือของเหลว

สารในเฟสของแข็งหรือของเหลว ในขณะที่ดำเนินกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งนั้น จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความดันและปริมาตรจำเพาะของสารนั้น นั่นคือ

$$dh = du + d(Pv) = du$$

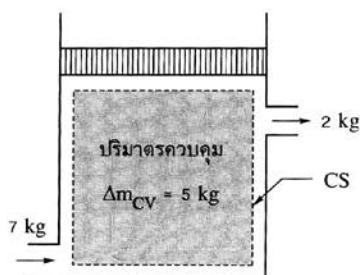
$$dh = du = C_d T$$

(1.27)

ในที่นี้ C คือความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่หรือความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ โดยที่ $C_v = C_p = C$ สำหรับสารที่เป็นของแข็งหรือของเหลว และบันทึกค่า C สำหรับสารต่างๆ ไว้ในตารางที่ ก.7

1.22 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม (CV)

ในการวิเคราะห์ปริมาตรควบคุมจำเป็นต้องทราบกฎการอนุรักษ์ของมวล และการอนุรักษ์ของพลังงานควบคู่กันไป



รูปที่ 1.11 กฎการอนุรักษ์ของมวลสำหรับปริมาตรควบคุม

1.22.1 กฎการอนุรักษ์ของมวล

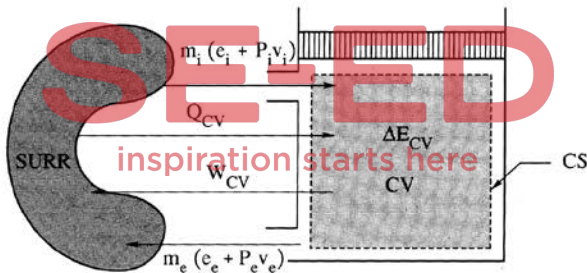
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{มวลไหลเข้าปริมาตร} \\ \text{ควบคุมทั้งหมด} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{มวลไหลออกจากปริมาตร} \\ \text{ควบคุมทั้งหมด} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{การเปลี่ยนแปลงของ} \\ \text{มวลสุทธิภายใน CV} \end{array} \right\}$$

$$\Sigma m_i - \Sigma m_e = \Delta m_{CV} \quad (1.28)$$

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

$$\Sigma \dot{m}_i - \Sigma \dot{m}_e = \frac{d}{dt} m_{CV} \quad (1.29)$$

สมการ (1.29) เรียกว่า สมการความต่อเนื่อง



รูปที่ 1.12 กฎการอนุรักษ์ของพลังงานสำหรับปริมาตรควบคุม

1.22.2 กฎการอนุรักษ์พลังงาน

การวิเคราะห์กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม อาศัยกฎการอนุรักษ์ของพลังงานหรือกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับระบบช่วยพิสูจน์ ซึ่งอาจกล่าวเป็นสมการได้ดังนี้

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{พลังงานทั้งหมดที่} \\ \text{ข้ามผิวควบคุมของ CV} \\ \text{(งานและความร้อน)} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{พลังงานทั้งหมด} \\ \text{ของมวลที่ไหล} \\ \text{เข้า CV} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{พลังงานทั้งหมด} \\ \text{ของมวลที่ไหล} \\ \text{ออกจาก CV} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{การเปลี่ยนแปลง} \\ \text{ของพลังงาน} \\ \text{สุทธิใน CV} \end{array} \right\}$$

$$Q_{CV} - W_{CV} + \Sigma E_{in} - \Sigma E_{out} = \Delta E_{CV} \quad (1.30)$$

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

$$\dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) = \frac{d}{dt} E_{CV} \quad (1.31)$$

1.23 กระบวนการสภาวะคงตัว-การไหลคงตัว (กระบวนการ SSSF)

อุปกรณ์ทางวิศวกรรมจำนวนมาก เช่น กังหัน คอมเพรสเซอร์ คอนเดนเซอร์ หรือนอกซ์เซล มีลักษณะการทำงานอยู่ในช่วงระยะเวลายาวนานภายใต้สภาวะคงตัว จึงพิจารณาเป็นอุปกรณ์ที่ดำเนินกระบวนการ SSSF

กระบวนการหนึ่งๆ จะพิจารณาว่าเป็นกระบวนการ SSSF นั้น จะต้องสอดคล้องกับสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. ปริมาตรควบคุมไม่เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิง (กรอบพิกัด)
2. มวลภายในปริมาตรควบคุม สภาวะของมวลในแต่ละจุดภายในปริมาตรควบคุมนั้นไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา

$$\frac{d}{dt} m_{CV} = 0 \quad \text{และ} \quad \frac{d}{dt} E_{CV} = 0$$

SE-ED
inspiration starts here

$$\text{สมการความต่อเนื่อง ; } \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$

จากกฎข้อที่หนึ่ง

$$\dot{Q}_{CV} - \dot{W}_{CV} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) = 0 \quad (1.32)$$

3. อัตราของมวลไหลข้ามผิวควบคุม สภาวะของมวลที่ไหล อัตราของการถ่ายเทความร้อนและงานข้ามผิวควบคุมนั้นคงที่

สำหรับปริมาตรควบคุมที่มีทางเข้าทางเดียวและทางออกทางเดียว

$$\text{สมการความต่อเนื่อง ; } \dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$$

จากกฎข้อที่หนึ่งพบว่า

$$q - w + h_i - h_e + \frac{1}{2}v_i^2 - \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_i - gZ_e = 0 \quad (1.33)$$

โดยที่ $q = \frac{\dot{Q}_{CV}}{\dot{m}}$ และ $w = \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{m}}$ และมีหน่วยเป็น kJ/kg

1.24 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

ในการทำงานภายใต้วัฏจักรหนึ่งๆ ซึ่งสอดคล้องกับกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์นั้น อาจเกิดขึ้นจริงหรือไม่ก็ได้ การพิจารณาในจุดนี้จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์ภายใต้กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ วัฏจักรหนึ่งๆ จะทำงานจริงได้นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับกฎข้อที่หนึ่งและกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

กระบวนการที่เกิดขึ้นจริงนั้นจะดำเนินไปโดยมีทิศทางที่แน่นอนและกลับทิศทางไม่ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้วยกาแฟร้อนที่ตั้งทิ้งไว้บนโต๊ะจะถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเสมอ แต่ความร้อนนั้นไม่สามารถถ่ายเทออกจากสิ่งแวดล้อมที่เย็นกว่าไปสู่ถ้วยกาแฟที่ร้อนกว่าได้

inspiration starts here

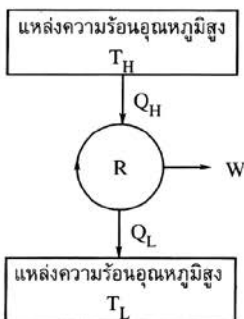
1.25 กลจักรความร้อนและเครื่องทำความเย็น (ปั๊มความร้อน)

1.25.1 กลจักรความร้อน

กลจักรความร้อนเป็นกลอุปกรณ์ทางความร้อนที่ทำงานอยู่ระหว่างแหล่งความร้อนสองแหล่ง โดยกลอุปกรณ์นั้นรับความร้อนปริมาณ Q_H จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง T_H เป็นผลให้ได้งานออกมาปริมาณ W และถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ T_L ในปริมาณ Q_L จะได้ว่า

ประสิทธิภาพทางความร้อนคือ

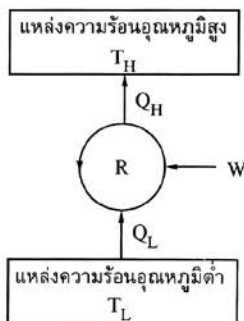
$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (1.34)$$



รูปที่ 1.13 กลจักรความร้อนย้อนกลับได้

1.25.2 เครื่องทำความเย็น

เครื่องทำความเย็นเป็นกลอุปกรณ์ทางความร้อนที่ทำงานอยู่ระหว่างแหล่งความร้อนสองแหล่ง โดยต้องใส่งานให้กับกลอุปกรณ์ด้วยปริมาณ W จึงจะสามารถรับความร้อนในปริมาณ Q_L จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ T_L และอุปกรณ์นั้นจะถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง T_H ด้วยปริมาณ Q_H สัมประสิทธิ์บ่งบอกสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นนี้คือ **inspiration starts here**



รูปที่ 1.14 เครื่องทำความเย็นย้อนกลับได้

สำหรับในฤดูร้อน

$$\text{COP} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{(Q_H/Q_L) - 1} \quad (1.35)$$

สำหรับในฤดูหนาว

$$\text{COP}' = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - (Q_L/Q_H)} \quad (1.36)$$

และ

$$\text{COP}' - \text{COP} = 1.0 \quad (1.37)$$

1.26 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

คำกล่าวของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ที่ใช้พิจารณาการทำงานของกลอุปกรณ์หนึ่งๆ นั้นคือคำกล่าวของเคลวิน-แพลงค์และคำกล่าวของเคลาซิอุส โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.26.1 คำกล่าวของเคลวิน-แพลงค์

คำกล่าวของเคลวิน-แพลงค์นั้นได้กล่าวถึงการทำงานของกลจักรความร้อน ซึ่งกล่าวว่า “เป็นไปได้ที่จะสร้างกลอุปกรณ์หนึ่งๆ ให้ทำงานเป็นวัฏจักรและให้งานออกมา โดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งความร้อนเพียงแหล่งเดียว”

1.26.2 คำกล่าวของเคลาซิอุส

คำกล่าวของเคลาซิอุสนั้นได้กล่าวถึงการทำงานของเครื่องทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน ซึ่งกล่าวว่า “เป็นไปได้ที่จะสร้างกลอุปกรณ์หนึ่งๆ ให้ทำงานเป็นวัฏจักรโดยรับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ และถ่ายเทความร้อนให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้ โดยปราศจากงานที่ให้กับกลอุปกรณ์นั้น”

จากคำกล่าวทั้งสองที่ผ่านมามีข้อสังเกต 3 ประการดังนี้

1. คำกล่าวทั้งสองเป็นคำกล่าวปฏิเสธ (negative statement) ซึ่งไม่สามารถพิสูจน์ได้ กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์นั้นพื้นฐานขึ้นอยู่กับผลการทดลองที่คล้ายกับกฎของธรรมชาติอื่นๆ
2. คำกล่าวทั้งสองของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์นั้นสอดคล้องต่อกัน กล่าวคือ ถ้าเป็นจริงหรือขัดแย้งต่อคำกล่าวหนึ่ง ย่อมเป็นจริงหรือขัดแย้งต่ออีกคำกล่าวหนึ่งด้วย
3. กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ได้กล่าวเสมอถึงความเป็นไปไม่ได้ในการสร้างเครื่องจักรทำงานไม่มีหยุดชนิดที่สอง เนื่องจากเครื่องจักรกลทำงานไม่มีหยุดชนิดแรกนั้นจะให้งานโดยไม่ต้องอาศัยอะไร ดังนั้นจึงขัดแย้งต่อกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ และเครื่องจักรกลทำงานไม่มีหยุดชนิดที่สองนั้นขัดแย้งต่อกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ กล่าวได้ว่ากลจักรความร้อนใดๆ ที่ขัดแย้งต่อกฎข้อที่สองนั้นสามารถจัดว่าเป็นเครื่องจักรกลทำงานไม่มีหยุดชนิดที่สอง

1.27 กระบวนการย้อนกลับได้และกระบวนการย้อนกลับไม่ได้

กลจักรความร้อนใดๆ สามารถมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดได้ เมื่อกลจักรความร้อนดังกล่าวต้องดำเนินกระบวนการย้อนกลับได้

กระบวนการย้อนกลับได้ หมายถึงกระบวนการที่ระบบหนึ่งๆ เปลี่ยนแปลงจากสภาวะหนึ่งไปสู่อีกสภาวะหนึ่ง และระบบนั้นสามารถย้อนคืนสู่สภาวะเดิมได้บนกระบวนการเดิมโดยไม่ทำให้ระบบหรือสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง

กระบวนการย้อนกลับไม่ได้ หมายถึงกระบวนการซึ่งระบบหนึ่งเปลี่ยนแปลงจากสภาวะหนึ่งไปสู่อีกสภาวะหนึ่ง โดยระบบนั้นไม่สามารถย้อนกลับคืนสู่สภาวะเดิมได้ ถึงแม้ว่าจะทำให้ระบบย้อนกลับสู่สภาวะเดิมได้ก็ตาม แต่จะทำให้ระบบหรือสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ ได้แก่ ความเสียดทาน การขยายตัวโดยปราศจากความต้านทาน การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากมีอุณหภูมิแตกต่าง การผสมกันของสารที่แตกต่างกันสองชนิด และปัจจัยอื่นๆ เช่น ผลทางฮีสเตอรีซิส กระบวนการเผาไหม้ เป็นต้น

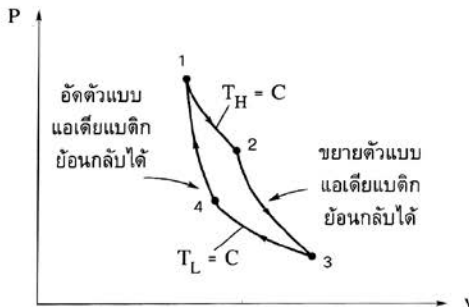
1.28 วัฏจักรคาร์โนต์

โดยทั่วไปแล้วกลจักรความร้อนจะทำงานได้โดยมีประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำกว่า 100 เปอร์เซ็นต์เสมอ หากจะถามว่ากลจักรความร้อนใดที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด คำตอบก็คือกลจักรความร้อนที่ดำเนินตามวัฏจักรคาร์โนต์เท่านั้นที่ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุด ในที่นี้เปรียบเทียบการทำงานระหว่างแหล่งความร้อนคู่เดียวกันและดำเนินกระบวนการย้อนกลับได้ตลอดวัฏจักร

วัฏจักรคาร์โนต์ประกอบขึ้นด้วยกระบวนการหลัก 4 กระบวนการ (สำหรับกลจักรความร้อน) คือ

1. กระบวนการอุณหภูมิคงที่แบบย้อนกลับได้ เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (กระบวนการ 1-2)
2. กระบวนการขยายตัวแบบแอดิแบติกย้อนกลับได้ เป็นกระบวนการที่ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานลดลงจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ (กระบวนการ 2-3)
3. กระบวนการอุณหภูมิคงที่แบบย้อนกลับได้ เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (กระบวนการ 3-4)
4. กระบวนการอัดตัวแบบแอดิแบติกย้อนกลับได้ เป็นกระบวนการที่ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิต่ำไปสู่อุณหภูมิสูง (กระบวนการ 4-1) ดังรูปที่

1.15



รูปที่ 1.15 แผนภาพ P-v แสดงวัฏจักรคาร์โนต์

ข้อเสนอสองประการเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ ได้แก่

ข้อเสนอประการแรก ข้อเสนอนี้ได้กล่าวไว้ว่า “เป็นไปได้ที่จะสร้างเครื่องจักรกลที่ทำงานอยู่ระหว่างแหล่งความร้อนคู่หนึ่ง ให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องจักรกลแบบย้อนกลับได้ที่ทำงานอยู่ระหว่างแหล่งความร้อนคู่เดียวกันนั้น”

ข้อเสนอประการที่สอง ข้อเสนอนี้ได้กล่าวไว้ว่า “ในบรรดาเครื่องจักรกลทั้งหมดที่ทำงานภายใต้วัฏจักรคาร์โนต์ ระหว่างแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิคงที่คู่เดียวกันนั้นย่อมมีประสิทธิภาพเท่ากัน”

ประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิเท่านั้น นั่นคือ

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1.38)$$

สัมประสิทธิ์บ่งสมรรถนะของเครื่องทำความเย็นที่ดำเนินเป็นวัฏจักรคาร์โนต์คือ

$$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad \text{สำหรับจุดประสงค์ด้านทำความเย็น} \quad (1.39)$$

$$COP' = \frac{Q_H}{W} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \quad \text{สำหรับจุดประสงค์ด้านให้ความร้อน} \quad (1.40)$$

1.29 อสมการของเคลาซิอุสและเอนโทรปี

การสร้างกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์นั้น จำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์มาจากการทำงานเป็นวัฏจักรของระบบ คุณสมบัติของระบบตัวหนึ่งที่ต้องกำหนดขึ้นเพื่อใช้วิเคราะห์ในขั้นนี้ก็คือ เอนโทรปี

การทำงานของกลจักรความร้อนหรือเครื่องทำความเย็นภายใต้วัฏจักรย้อนกลับได้หรือย้อนกลับไม่ได้พบว่า

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (1.41)$$

ในอสมการ (1.41) นี้เรียกว่าอสมการของเคลาซิอุส โดยที่เครื่องหมาย = ใช้สำหรับวัฏจักรย้อนกลับได้ และเครื่องหมาย < ใช้สำหรับวัฏจักรย้อนกลับไม่ได้

สำหรับอสมการของเคลาซิอุสนี้ใช้พิจารณาการทำงานของกลจักรความร้อนหรือเครื่องทำความเย็น

อาศัยอสมการของเคลาซิอุสพัฒนาไปสู่สมการการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีสำหรับกระบวนการหนึ่งๆ พบว่า

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{rev}} \quad \text{สำหรับกระบวนการย้อนกลับได้} \quad (1.42)$$

$$dS > \left(\frac{\delta Q}{T} \right) \quad \text{สำหรับกระบวนการย้อนกลับไม่ได้} \quad (1.43)$$

เอนโทรปี (S)

เอนโทรปี (S) เป็นคุณสมบัติขึ้นกับปริมาณ มีหน่วยเป็น kJ/K โดย S คือ เอนโทรปีต่อหน่วยมวล ซึ่งเป็นคุณสมบัติไม่ขึ้นกับปริมาณ และมีหน่วยเป็น kJ/kg·K ค่าสัมบูรณ์ของเอนโทรปีนั้นพิจารณาได้จากกฎข้อที่สามของอุณหพลศาสตร์ สำหรับเอนโทรปีสัมบูรณ์ที่สภาวะหนึ่งๆ นั้นวัดเทียบกับสภาวะอ้างอิงสัมบูรณ์ของสารนั้นๆ

สำหรับเอนโทรปีจำเพาะของสารบริสุทธิ์นั้นได้จัดไว้ในตารางของคุณสมบัติทางอุณหพลวัตเช่นเดียวกับปริมาตรจำเพาะหรือเอนทัลปีจำเพาะ โดยทั่วไปแล้วเมื่อกล่าวถึงเอนโทรปีย่อหมายถึงเอนโทรปีทั้งหมดหรือเอนโทรปีจำเพาะก็ได้ ภายในบริเวณอ้อมตัวเอนโทรปีสามารถคำนวณได้จาก

$$s = s_f + x s_{fg} \quad (1.44)$$

1.30 ความสัมพันธ์ที่สำคัญสองประการ

สำหรับสารอัดตัวได้เชิงเดี่ยว ความสัมพันธ์ที่สำคัญสองประการในอุณหพลศาสตร์คือ

$$\begin{aligned} TdS &= dU + PdV \\ TdS &= dH - VdP \end{aligned} \quad (1.45)$$

เขียนสมการต่อหนึ่งหน่วยมวลจะได้

$$\begin{aligned} Tds &= du + Pdv \\ Tds &= dh - vdP \end{aligned} \quad (1.46)$$

ในสมการ (1.45) และ (1.46) ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีสำหรับกระบวนการใดๆ ของระบบ ซึ่งอาจจะเป็นกระบวนการย้อนกลับได้หรือย้อนกลับไม่ได้ก็ได้

1.31 การใช้แนวคิดของงานสูญเสียพิสูจน์หาการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

กระบวนการย้อนกลับไม่ได้นั้น ระดับขนาดของสภาพย้อนกลับไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของงานสูญเสีย ซึ่งใช้สัญลักษณ์ LW ระดับขนาดของสภาพย้อนกลับไม่ได้ในค่าต่างๆ นั้น ก็คือค่าของงานสูญเสียที่แปรเปลี่ยนตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าสูงสุดหนึ่งๆ

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta LW}{T} \quad (1.47)$$

ข้อสรุปในสมการ (1.47) คือ

1. มียูสองหนทางที่ทำให้เอนโทรปีของระบบเพิ่มขึ้น นั่นคือต้องมีการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ระบบและระบบนั้นต้องดำเนินกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ งานสูญเสียนี้นี้มีค่าน้อยกว่าศูนย์ไม่ได้ หนทางเดียวที่เอนโทรปีของระบบจะลดลงก็คือเมื่อมีความร้อนถ่ายเทออกจากระบบ

2. เอนโทรปีเพิ่มขึ้นเนื่องจากสภาพย้อนกลับไม่ได้เรียกว่าการสร้างเอนโทรปีโดยย้อนกลับไม่ได้

3. สำหรับกระบวนการแอดิแบติก ($\delta Q = 0$) นั้น เอนโทรปีเพิ่มขึ้นเนื่องจากสภาพย้อนกลับไม่ได้เท่านั้น

1.32 หลักการเพิ่มเอนโทรปีของระบบปิด

หลักการเพิ่มเอนโทรปีของระบบหนึ่งๆ กล่าวว่า “กระบวนการใดๆ จะสามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีโดยสุทธิของระบบและสิ่งแวดล้อมนั้นเพิ่มขึ้นหรือเป็นศูนย์” และกระบวนการจะต้องดำเนินในทิศทางเดียว ตามสมการของ

$$\Delta S_{\text{NET}} = \Delta S_{\text{SYS}} + \Delta S_{\text{SURR}} \geq 0 \quad (1.48)$$

สำหรับกระบวนการย้อนกลับได้พบว่า $\Delta S_{\text{NET}} = 0$ สำหรับกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ พบว่า $\Delta S_{\text{NET}} > 0$ และสำหรับกระบวนการที่เป็นไปไม่ได้พบว่า $\Delta S_{\text{NET}} < 0$

สำหรับระบบโดดเดี่ยว หลักการเพิ่มของเอนโทรปีของระบบคือ

$$\Delta S_{\text{isolated system}} \geq 0 \quad (1.49)$$

1.33 การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของของแข็งและของเหลว

สำหรับของแข็งหรือของเหลว พิจารณาสมการ Tds สำหรับของแข็งและของเหลว ในเทอมของปริมาตรจำเพาะคือ Pdv (หรือ vdP) นั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับเทอมของ du (หรือ dh) และเนื่องจาก $dh = du = CdT$ ดังนั้น

$$ds = \frac{du}{T} = \frac{C}{T} dT \quad (1.50)$$

ในกรณีซึ่งความร้อนจำเพาะของของแข็งหรือของเหลวมีค่าคงที่พบว่า

$$S_2 - S_1 = \Delta S = mC \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (1.51)$$

1.34 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม

อาศัยกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับระบบสมการ (1.47) โดยพิจารณาระบบและปริมาตรควบคุมในช่วงเวลา δt เขียนสมการเชิงอัตราโดยใส่ลิมิตแต่ละเทอม แล้วให้ δt เข้าใกล้ศูนย์จะได้

$$\frac{d}{dt} S_{CV} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i = \sum_{cv} \left(\frac{\dot{Q}_{CV}}{T} \right) + \sum_{cv} \left(\frac{L\dot{Q}_{CV}}{T} \right)$$

สมการนี้เรียกว่า “กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาตรควบคุม” โดยมีสาระสำคัญคือ “อัตราของการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีภายในปริมาตรควบคุมรวมกับอัตราของเอนโทรปีไหลออกสุทธิ เท่ากับผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีเนื่องจากการถ่ายเทความร้อน และผลเนื่องมาจากการเกิดสภาพย้อนกลับไม่ได้ภายใน” เนื่องจากไม่สะดวกต่อการนำไปใช้งานจึงเขียนสมการใหม่เป็น

$$\frac{d}{dt} S_{CV} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum \left(\frac{\dot{Q}_{CV}}{T} \right) \quad (1.52)$$

1.35 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับกระบวนการสถานะคงตัว-การไหลคงตัว (กระบวนการ SSSF)

จากสมการ (1.52) พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีกับเวลาที่ทุกๆ จุดภายในปริมาตรควบคุม $[(d S_{CV}/dt)] = 0$ จะได้

$$\sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \geq \sum \left(\frac{\dot{Q}_{CV}}{T} \right) \quad (1.53)$$

สำหรับกรณีที่มีมวลไหลเข้าทางเดียวและไหลออกทางเดียว นั่นคือ $\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$ ดังนั้น

$$\dot{m}(s_e - s_i) \geq \sum_{cv} \left(\frac{\dot{Q}_{CV}}{T} \right) \quad (1.54)$$

ในอุปกรณ์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ เช่น กังหันไอน้ำ เครื่องสูบลม คอมเพรสเซอร์ นอซเซิล ล้วนแต่ดำเนินกระบวนการ SSSF ที่มีการไหลเข้าทางเดียวและออกทางเดียว การวิเคราะห์สมการใช้งานจะพิจารณาจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ และกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในกระบวนการย้อนกลับได้ นั่นคือ

$$\dot{m}(s_e - s_i) = \sum_{cv} \left(\frac{\dot{Q}_{cv}}{T} \right) \quad (1.55)$$

สามารถแบ่งปัญหาตามเงื่อนไขของกระบวนการดังต่อไปนี้

1. กระบวนการ SSSF แอเดียแบติกย้อนกลับได้ ใช้สมการ Tds และกฎข้อที่หนึ่งจะได้

$$w = - \int_i^e v dP + \left(\frac{1}{2} v_i^2 - \frac{1}{2} v_e^2 \right) + g(Z_i - Z_e) \quad (1.56)$$

2. กระบวนการ SSSF อุณหภูมิคงที่ย้อนกลับได้ ใช้สมการ (1.55) โดยที่ $\sum_{cv} (\dot{Q}_{cv}/T) = (\dot{Q}_{cv}/T)$ สมการ Tds และสมการกฎข้อที่หนึ่งจะให้ผลเช่นเดียวกับสมการ (1.56)

สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ ($v =$ ค่าคงที่) เช่น น้ำในสภาพของเหลวอัดตัว พบว่า

$$\int_i^e v dP = v(P_e - P_i) \quad (1.57)$$

สำหรับก๊าซอุดมคติที่ดำเนินกระบวนการโพลีโทรปิกย้อนกลับได้ ($Pv^n =$ ค่าคงที่)

$$\int_i^e v dP = \frac{nR}{n-1} (T_e - T_i) \quad (1.58)$$

สำหรับก๊าซอุดมคติที่ดำเนินกระบวนการอุณหภูมิคงที่ย้อนกลับได้ ($Pv =$ ค่าคงที่)

$$\int_i^e v dP = P_i v_i \ln \frac{P_e}{P_i} \quad (1.59)$$

3. กระบวนการ SSSF แอเดียแบติกย้อนกลับได้และงานเป็นศูนย์ กำหนดให้สารทำงานเป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ และ $w = 0$ แทนลงในสมการ (1.56) จะได้

$$v(P_e - P_i) \left(\frac{1}{2} v_e^2 - \frac{1}{2} v_i^2 \right) + g(Z_e - Z_i) = 0 \quad (1.60)$$

ในทางกลศาสตร์ของไหลเรียกสมการ (1.60) นี้ว่า สมการแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) หรือจัดสมการใหม่จะได้

$$\frac{P_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} + Z_i = \frac{P_e}{\rho g} + \frac{v_e^2}{2g} + Z_e$$

4. กระบวนการ SSSF แอเดียแบติกย้อนกลับได้ โดย $\Delta KE = \Delta PE = 0$
จากสมการ (1.56) จะได้

$$w = - \int_i^e v dP \quad (1.61)$$

1.36 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์สำหรับกระบวนการสภาวะเอกรูป-การไหลเอกรูป (กระบวนการ USUF)

ในที่นี้ $(dS_{CV}/dt) \neq 0$ ซึ่งเขียนอยู่ในเทอมของ $(d(ms)_{CV}/dt)$ แล้วอินทิเกรตสมการ (1.52) ในช่วงเวลาตั้งแต่ $t = 0$ ถึง t จะได้

$$(m_2 s_2 - m_1 s_1)_{CV} + \sum m_e s_e - \sum m_i s_i \geq \int_0^t \left(\frac{\dot{Q}_{CV}}{T} \right) dt \quad (1.62)$$

inspiration starts here

1.37 หลักการเพิ่มของเอนโทรปีสำหรับปริมาตรควบคุม

สำหรับปริมาตรควบคุมหนึ่งๆ ที่สามารถดำเนินกระบวนการที่เป็นไปได้ภายใต้สิ่งแวดล้อมนั้น ต้องสอดคล้องกับหลักการเพิ่มของเอนโทรปีสำหรับปริมาตรควบคุมนั้นๆ นั่นคือ

$$\frac{d}{dt} S_{NET} = \frac{d}{dt} S_{CV} + \frac{d}{dt} S_{Surr} \geq 0 \quad (1.63)$$

สมการ (1.63) แสดงให้เห็นว่าผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อมเท่ากับหรือมากกว่าศูนย์เสมอ

สำหรับกระบวนการ USUF

$$\Delta S_{NET} = \Delta S_{CV} + \Delta S_{Surr} \quad (1.64)$$

โดยที่

$$\Delta S_{CV} = (m_2 s_2 - m_1 s_1)_{CV} \quad (1.65)$$

$$\Delta S_{Surr} = \frac{-Q_{CV}}{T_0} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i \quad (1.66)$$

สำหรับกระบวนการ SSSF

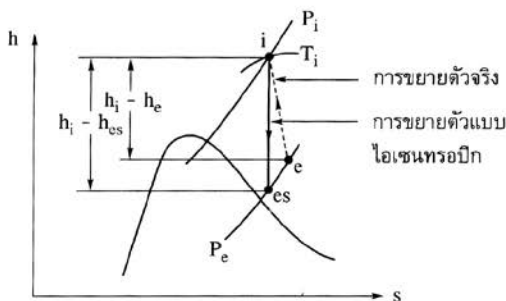
$$\frac{d}{dt} S_{NET} = \frac{d}{dt} S_{Surr} = \frac{-\dot{Q}_{CV}}{T} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i$$

1.38 ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิก

ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกเปรียบเทียบระหว่างสมรรถนะของอุปกรณ์ภายใต้การทำงานจริงกับสมรรถนะของอุปกรณ์นั้นภายใต้กระบวนการไอเซนทรอปิก ที่สภาวะทางเข้าและความดันทางออกเดียวกัน

1. ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของกังหัน η_{TUR} พิจารณารูปที่ 1.16 กำหนดให้สภาวะทางเข้าของกังหัน (สภาวะ i) และความดันทางออก P_e คงที่ โดยที่จุด es เป็นสภาวะทางออกของกังหันเมื่อดำเนินกระบวนการไอเซนทรอปิก และจุด e เป็นสภาวะทางออกของกังหันเมื่อดำเนินกระบวนการขยายตัวจริง ขณะดำเนินกระบวนการขยายตัวจริงนั้นไม่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างกังหันกับสิ่งแวดล้อม และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์จะได้

$$w_a = h_i - h_e$$



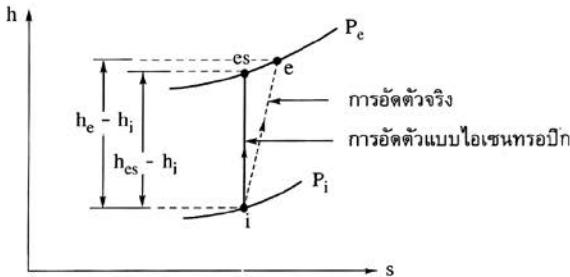
รูปที่ 1.16 การเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวจริงกับการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิกผ่านกังหัน

สำหรับการขยายตัวจริงนั้นเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ จากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์พบว่า $s_e > s_{es}$ และ $h_e > h_{es}$ ดังนั้นงานไอเซนโทรปิกต่อหนึ่งหน่วยมวลภายใต้สภาวะทางเข้าของกังหันและความดันทางออกเดียวกันคือ

ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของกังหันคือ

$$\eta_{TUR} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_i - h_e}{h_i - h_{es}} \quad (1.67)$$

2. ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของคอมเพรสเซอร์ η_{COMP} พิจารณารูปที่ 1.17 กำหนดให้สภาวะทางเข้าของคอมเพรสเซอร์ (สภาวะ i) และความดันทางออก P_e นั้นคงที่ โดยที่จุด es เป็นสภาวะทางออกของคอมเพรสเซอร์เมื่อดำเนินกระบวนการไอเซนโทรปิก และจุด e เป็นสภาวะทางออกของคอมเพรสเซอร์เมื่อดำเนินกระบวนการอัดตัวจริง ขณะดำเนินกระบวนการอัดตัวจริงนั้นไม่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างคอมเพรสเซอร์กับสิ่งแวดล้อม และไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์จะได้



รูปที่ 1.17 การเปรียบเทียบระหว่างการอัดตัวจริงกับการอัดตัวแบบไอเซนทรอปิกผ่านคอมเพรสเซอร์

สำหรับการอัดตัวจริงนั้นเป็นกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ จากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์พบว่า $s_e > s_{cs}$ และ $h_e > h_{cs}$ ดังนั้นงานไอเซนทรอปิกต่อหนึ่งหน่วยมวลภายใต้สภาวะทางเข้าของคอมเพรสเซอร์และความดันทางออกเดียวกันคือ

$$w_s = h_{es} - h_i$$

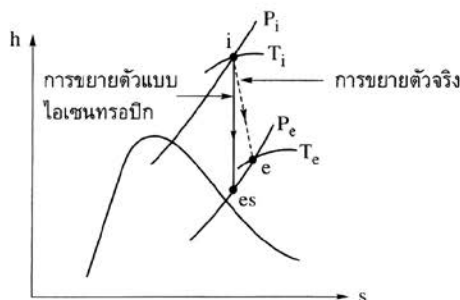
ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของคอมเพรสเซอร์คือ

$$\eta_{COMP} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_i - h_e}{h_i - h_{es}} \quad (1.68)$$

สำหรับประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของเครื่องสูบลมให้ใช้สมการ (1.68) นี้เช่นกัน

3. ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของนอซเซิล η_{NOZ} พิจารณารูปที่ 1.18 กำหนดให้สภาวะทางเข้าของนอซเซิล (สภาวะ i) และความดันทางออก P_e นั้นคงที่ โดยที่ es เป็นสภาวะทางออกของนอซเซิลเมื่อดำเนินกระบวนการไอเซนทรอปิก และจุด e เป็นสภาวะทางออกของนอซเซิลเมื่อดำเนินกระบวนการขยายตัวจริงและขยายตัวแบบแอดิแบติก ประสิทธิภาพทางไอเซนทรอปิกของนอซเซิลคืออัตราส่วนระหว่างพลังงานจลน์จริงที่ทางออกของนอซเซิล ($v_e^2/2$) กับพลังงานจลน์ที่ทางออกนั้นเมื่อดำเนินกระบวนการไอเซนทรอปิก ภายใต้สภาวะทางเข้าของนอซเซิลและความดันทางออกเดียวกัน ($v_{es}^2/2$) นั่นคือ

$$\eta_{NOZ} = \frac{v_e^2/2}{v_{es}^2/2} \quad (1.69)$$



รูปที่ 1.18 การเปรียบเทียบระหว่างการขยายตัวจริงกับการขยายตัวแบบไอเซนทรอปิกผ่านนอซเซิล

1.39 สมการสถานะสำหรับก๊าซอุดมคติ

ถ้าสารอัดตัวได้เชิงเดียวในเฟสไอมีพฤติกรรมเยี่ยงก๊าซอุดมคติ สมการของสถานะคือ

$$\begin{aligned} PV &= nRT \\ PV &= mRT \end{aligned} \quad (1.70)$$

inspiration starts here

ในที่นี้ n คือจำนวนโมลของก๊าซ มีหน่วยเป็น kmol, m คือมวลของก๊าซ มีหน่วยเป็น kg, R คือค่าคงที่ทางสากลของก๊าซ และมีค่าเท่ากับ 8.3144 kJ/kmol-K และ R คือค่าคงที่สำหรับก๊าซหนึ่งๆ มีหน่วยเป็น kJ/kg-K และแสดงค่าไว้ในตารางที่ ก.8 (ในภาคผนวก)

อาจเขียนในรูปของ

$$Pv = RT \text{ หรือ } P = \rho RT \quad (1.71)$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8.3144}{M} \text{ kJ/kg-K} \quad (1.72)$$

โดยที่ $v = V/m$ (ปริมาตรจำเพาะ), $\rho = m/V$ (ความหนาแน่น) และ M คือมวลโมเลกุล เมื่อมวลของก๊าซอุดมคติคงที่ จะได้กฎระหว่างสถานะของก๊าซดังนี้

$$\boxed{\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}} \quad (1.73)$$

ในสมการ (1.73) จะได้

1. ถ้าอยู่ภายใต้กระบวนการอุณหภูมิคงที่ (กฎของบอยล์)

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1.74)$$

2. ถ้าอยู่ภายใต้กระบวนการความดันคงที่ (กฎของชาร์ล)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1.75)$$

3. ถ้าอยู่ภายใต้กระบวนการปริมาตรคงที่ (กฎของเกย์)

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (1.76)$$

1.40 สมการสถานะสำหรับก๊าซจริง

ก๊าซจริงหนึ่งๆ ที่มีพฤติกรรมต่างไปจากก๊าซอุดมคตินั้น จะพิจารณาจากตัวประกอบสภาพอัดตัวได้ Z กล่าวคือ

$$\boxed{Z = \frac{P\bar{V}}{RT} \text{ หรือ } P\bar{V} = ZRT} \quad (1.77)$$

ในสมการ (1.77) สำหรับก๊าซอุดมคติ $Z = 1.0$ การเบี่ยงเบนของ Z ออกจาก 1.0 นั้นบ่งบอกให้ทราบถึงการเบี่ยงเบนออกจากพฤติกรรมของก๊าซอุดมคติ

การพิจารณาว่าก๊าซจริงหนึ่งๆ เป็นก๊าซอุดมคตินั้น จะพิจารณาจากหนึ่งในสองหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ความดันของก๊าซ ถ้าความดันของก๊าซนั้นต่ำมากๆ ($P \ll P_c$) ก๊าซนั้นจะมีพฤติกรรมของก๊าซอุดมคติไม่ว่าอุณหภูมิของก๊าซนั้นจะเป็นเท่าใดก็ตาม

2. อุณหภูมิของก๊าซ ถ้าอุณหภูมิของก๊าซนั้นสูง ($T \gg 2T_c$) ก๊าซนั้นจะมีพฤติกรรมของก๊าซอุดมคติในช่วงตั้งแต่ความดันต่ำจนกระทั่งถึงความดันค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าเป็น 4 หรือ 5 เท่าของความดันวิกฤต (P_c) ของก๊าซนั้น

สำหรับก๊าซที่มีพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปจากก๊าซอุดมคติจะอาศัยสมการสถานะดังนี้

1. สมการของบีตไท-บริดจ์แมน

$$P = \frac{\bar{R}T(1-\varepsilon)}{\bar{v}^2} (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2} \quad (1.78)$$

โดยที่ $A = A_0(1-a/\bar{v})$, $B = B_0(1-b/\bar{v})$, $\varepsilon = c/\bar{v}T^3$ และ A_0 , a , B_0 , b และ c เป็นค่าคงที่สำหรับก๊าซต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ค่าคงที่ในสมการสถานะของบีตไท-บริดจ์แมน (ความดันเป็น kPa ปริมาตรจำเพาะเป็น m^3/kmol , อุณหภูมิเป็น K และ $\bar{R} = 8.3144 \text{ N.m/mol.K}$)

ก๊าซ	A_0	a	B_0	b	$10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$
ฮีเลียม	2.1886	0.05984	0.01400	0.0	0.0040
อาร์กอน	130.7802	0.02328	0.03931	0.0	5.99
ไฮโดรเจน	20.0117	-0.00506	0.02096	-0.04359	0.0504
ไนโตรเจน	136.2315	0.02617	0.05046	-0.00691	4.20
ออกซิเจน	131.0851	0.02562	0.04624	0.004208	4.80
อากาศ	131.8441	0.01931	0.04611	-0.001101	4.34
คาร์บอนไดออกไซด์	507.2836	0.07132	0.10476	0.07235	66.00

อาจเขียนในรูปของ

$$P = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}} + \frac{\beta}{\bar{v}^2} + \frac{\gamma}{\bar{v}^3} + \frac{\delta}{\bar{v}^4} \quad (1.79)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{โดยที่ } b &= B_0 \bar{R}T - A_0 - c\bar{R}/T^2 \\ \gamma &= -B_0 b \bar{R}T + A_0 a - B_0 c \bar{R}/T^2 \\ \delta &= B_0 b c \bar{R}/T^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.80)$$

สมการของบีตไท-บริดจ์แมนให้ผลแม่นยำสำหรับก๊าซที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.8 เท่าของความหนาแน่นวิกฤตของมัน (ค่าโดยประมาณ)

2. สมการของแวนเดอร์วาลส์ สมการของแวนเดอร์วาลส์ให้ผลแม่นยำไม่ดัดนัก ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2} \quad (1.81)$$

โดยที่ $a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$ และ $b = \frac{RT_c}{8P_c}$ (1.82)

3. สมการของเรดลิช-กวาง ให้ผลแม่นยำดีกว่าสมการของแวนเดอร์วาลส์ คือ

$$P = \frac{\bar{R}T}{\bar{v} - b} - \frac{a}{\bar{v}(\bar{v} + b) T^{1/2}} \quad (1.83)$$

โดยที่ $a = 0.42748 \frac{\bar{R}^3 T_c^{5/2}}{P_c}$
 $b = 0.08664 \frac{\bar{R} T_c}{P_c}$ (1.84)

inspiration starts here

4. สมการของไวเรียล อยู่ในรูปของ

$$\frac{P\bar{v}}{RT} = 1 + \frac{B}{\bar{v}} + \frac{C}{\bar{v}^2} + \frac{D}{\bar{v}^3} + \dots \quad (1.85)$$

โดยที่ B, C, D เป็นสัมประสิทธิ์ไวเรียลและขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

การแก้ไขจริงที่มีความหนาแน่นต่ำนั้นจะใช้สมการของสภาวะกระจายเพียงสัมประสิทธิ์ไวเรียลอันดับสอง

$$\frac{P\bar{v}}{RT} = 1 + \frac{B}{\bar{v}} \quad (1.86)$$

โดยที่ $B = b_0 B^*(T^*)$
 $T^* = \frac{T}{\epsilon/k}$ (1.87)

สำหรับสารบริสุทธิ์นั้นเทอม ϵ/k และ b_0 หาจากตารางที่ ก.12.2 (ในภาคผนวก)
จากนั้นเมื่อทราบ T^* ใช้ตารางที่ ก.12.1 หา B^* (T^*)

1.41 ความสัมพันธ์ของ P-V-T สำหรับก๊าซอุดมคติที่เป็นมวลควบคุม

ความสัมพันธ์ของ P-V-T ระหว่างสภาวะคู่หนึ่งๆ สำหรับมวลควบคุม แบ่งพิจารณา ดังนี้

1. กระบวนการปริมาตรคงที่

$$V_1 = V_2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.88)$$

2. กระบวนการความดันคงที่

$$P_1 = P_2, \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.89)$$

3. กระบวนการอุณหภูมิคงที่ ($PV =$ ค่าคงที่)

$$T_1 = T_2, \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \quad (1.90)$$

4. กระบวนการโพลีโทรปิก ($PV^n =$ ค่าคงที่)

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1-n} &= \frac{T_1}{T_2} \\ \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n &= \frac{P_2}{P_1} \end{aligned} \right\} \quad (1.91)$$

5. กระบวนการไอเซนทรอปิก ($PV^k = \text{ค่าคงที่}$ $k = C_p/C_v$)

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{1-k} &= \frac{T_1}{T_2} \\ \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k &= \frac{P_2}{P_1} \end{aligned} \right\} \quad (1.92)$$

1.42 งานและความร้อนสำหรับก๊าซอุดมคติที่เป็นมวลควบคุม

งานและความร้อนสำหรับก๊าซอุดมคติ พิจารณาจากกระบวนการดังต่อไปนี้

1. กระบวนการปริมาตรคงที่

$$\left. \begin{aligned} {}_1W_2 &= 0 \\ {}_1Q_2 &= mC_{v0}(T_2 - T_1) = C_{v0}(P_2 - P_1) \frac{V}{R} \end{aligned} \right\} \quad (1.93)$$

2. กระบวนการความดันคงที่

$$\left. \begin{aligned} W_{12} &= P(V_2 - V_1) \\ {}_1Q_2 &= mC_{p0}(T_2 - T_1) = C_{p0}(V_2 - V_1) \frac{P}{R} \end{aligned} \right\} \quad (1.94)$$

3. กระบวนการอุณหภูมิคงที่

$$\left. \begin{aligned} {}_1W_2 &= P_1 V_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1}\right) = mRT_1 \ln \left(\frac{P_1}{P_2}\right) \\ {}_1Q_2 &= {}_1W_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.95)$$

4. กระบวนการโพลีทรอปิก

$$\left. \begin{aligned} {}_1W_2 &= \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n} \\ {}_1Q_2 &= \frac{C_{v0}(T_2 - T_1)(k - n)}{1 - n} \end{aligned} \right\} \quad (1.96)$$

5. กระบวนการไอเซนทรอปิก

$$\left. \begin{aligned} {}_1W_2 &= \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - k} \\ {}_1Q_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.97)$$

1.43 ความจุความร้อนจำเพาะหรือความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติ

ความร้อนจำเพาะสำหรับก๊าซอุดมคติ (C_{v0} และ C_{p0})

สำหรับก๊าซอุดมคตินั้นพบว่า ทั้งพลังงานภายในและเอนทัลปีเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิเท่านั้น $u = u(T)$ และ $h = h(T)$ ดังนั้น

$$C_{v0} = \frac{du}{dT} \quad (1.98)$$

$$C_{p0} = \frac{dh}{dT} \quad (1.99)$$

พบว่า C_{v0} และ C_{p0} ของก๊าซอุดมคตินั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วยเช่นกัน ในที่นี้ตัวห้อยล่าง 0 แสดงว่าเป็นความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติ ซึ่ง C_{v0} และ C_{p0} มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$C_{p0} = C_{v0} + R \quad (1.100)$$

$$\frac{C_{p0}}{C_{v0}} = k \quad (1.101)$$

ในที่นี้ R คือค่าคงที่สำหรับก๊าซใดๆ และ k คืออัตราส่วนของความร้อนจำเพาะสำหรับก๊าซหนึ่งๆ ทั้งค่า R และ k สำหรับก๊าซใดๆ บันทึกไว้ในตารางที่ ก.8 ในภาคผนวก

สำหรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในหรือเอนทัลปีของก๊าซอุดมคติสามารถเขียนเป็น

$$du = C_{v0}dT \text{ หรือ } u_2 - u_1 = \int_1^2 C_{v0}(T)dT \quad (1.102)$$

$$dh = C_{p0}dT \text{ หรือ } h_2 - h_1 = \int_1^2 C_{p0}(T)dT \quad (1.103)$$

การคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีแบ่งเป็นกรณีดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 สมมติให้ความร้อนจำเพาะเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อินทิเกรตสมการ (1.103) จะได้

$$h_2 - h_1 = C_{p0}(T_2 - T_1) \quad (1.104)$$

แนะนำให้ใช้ค่า C_{p0} ที่อุณหภูมิเฉลี่ย T และ T_2 และให้คำนวณจากสมการในตารางที่ ก.9 จะให้ค่าถูกต้องยิ่งขึ้น และสำหรับตารางที่ ก.8 นั้นจะให้ค่าของ C_{p0} และ C_{v0} ที่อุณหภูมิ 300 K

กรณีที่ 2 เมื่อความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยใช้ค่าความร้อนจำเพาะสำหรับก๊าซต่างๆ จากสมการเอมพิริคัลในตารางที่ ก.9

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{M} \int_{T_1}^{T_2} \bar{C}_{p0} dT = \frac{1}{M} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \bar{C}_{p0}(\theta) \times 100 d\theta \quad (1.105)$$

ในที่นี้ $\theta = T/100$ และ M คือมวลโมเลกุล

กรณีที่ 3 เมื่อความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ โดยใช้ตารางที่ ก.11.1

$$h_2 - h_1 = \int_{T_0}^{T_2} C_{p0} dT - \int_{T_0}^{T_1} C_{p0} dT = h_{T_2} - h_{T_1} \quad (1.106)$$

สำหรับอากาศ h_T หรือ u_T นั้นแสดงค่าไว้ในตารางที่ ก.10

ทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาข้างต้น กรณีที่ 3 ให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำที่สุด กรณีที่ 2 คือ การประมาณค่าเชิงเอมพิริคัลและให้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ได้ในกรณีที่ 3 และกรณีที่ 1 เป็น กรณีซึ่งสมมติให้ความร้อนจำเพาะเป็นค่าคงที่ ค่าตอบที่ได้จึงถูกต้องแม่นยำน้อย

1.44 การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของมวลควบคุม

สำหรับก๊าซอุดมคติ อาศัยสมการ $du = C_{v0}dT$, $dh = C_{p0}dT$ และ $Pv = RT$ แทนลงในสมการ $Tds = du + Pdv$ จะได้

$$ds = C_{v0} \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{v0} \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1.107)$$

แทนลงในสมการ $Tds = dh - v dP$ จะได้

$$ds = C_{p0} \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P}$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 C_{p0} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (1.108)$$

แบ่งกรณีพิจารณาคำตอบของสมการ (1.107) และ (1.108) ดังนี้

1. ความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติคงที่ จะได้

$$\begin{aligned} s_2 - s_1 &= C_{v0} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \\ s_2 - s_1 &= C_{p0} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \end{aligned} \quad (1.109)$$

2. ความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิในตารางที่ ก.9 ใช้สมการของความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติชนิดต่างๆ ในตารางที่ ก.9 แล้วอินทิเกรตเทอมแรกด้านขวามือของสมการ (1.107) และ (1.108)

3. ความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิโดยใช้ตารางที่ ก.10 หรือ ก.11.1 อาศัยหลักการอินทิเกรตเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิง T_0 ถึงอุณหภูมิ T ใดๆ ดังนั้นจากสมการ (1.108) จะได้

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = (\bar{s}_{T_2}^0 - \bar{s}_{T_1}^0) - \bar{R} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (1.110)$$

ซึ่ง
$$\bar{s}_{T_2}^0 = \int_{T_0}^{T_2} \frac{\bar{C}_{p0}}{T} dT \quad \text{และ} \quad \bar{s}_{T_1}^0 = \int_{T_0}^{T_1} \frac{\bar{C}_{p0}}{T} dT$$

$\bar{s}_T^0$ คือเอนโทรปีสภาวะมาตรฐาน และแสดงค่าไว้ในตารางที่ ก.10 (สำหรับอากาศ) และตารางที่ ก.11.1 (สำหรับก๊าซชนิดต่างๆ)

ในตารางที่ ก.10 และ ก.11.1 นั้นจะให้ผลแม่นยำที่สุดในตารางที่ ก.9 ให้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากตารางที่ ก.10 และ ก.11.1 สำหรับกรณีที่สมมติให้ความร้อนจำเพาะของก๊าซคงที่นั้นให้ผลแม่นยำน้อยกว่าผลที่ได้จากตารางที่ ก.10 หรือ ก.11.1 แต่ให้ผลแม่นยำสำหรับก๊าซอะตอมเดี่ยวและก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางอากาศหรือตารางที่ ก.10 ตารางที่ ก.10 ใช้กับกระบวนการแอดิแบติกย้อนกลับได้ (กระบวนการไอเซนทรอปิก) การเปลี่ยนแปลงสภาวะของระบบโดยกระบวนการไอเซนทรอปิกพบว่า

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{P_{r1}}{P_{r2}} \right)_s = \text{ค่าคงที่} \quad (1.111)$$

และ

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{v_{r1}}{v_{r2}} \right)_s = \text{ค่าคงที่} \quad (1.112)$$

โดยที่ P_r คือความดันสัมพัทธ์ และ v_r คือปริมาตรจำเพาะสัมพัทธ์

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของก๊าซอุดมคติเมื่อดำเนินกระบวนการไอเซน-ทรอปิก กระบวนการไอเซนทรอปิก ($ds = 0$) สำหรับก๊าซอุดมคติที่มีความร้อนจำเพาะเป็นค่าคงที่พบว่า

$$Pv^k = P_1 v_1^k = P_2 v_2^k$$

โดยที่ 1 คือสภาวะเริ่มต้น และ 2 คือสภาวะสุดท้าย จากสมการของสภาวะสำหรับก๊าซอุดมคติ ($Pv = RT$) จะได้

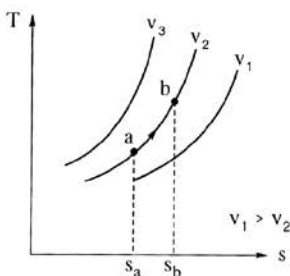
$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \quad (1.113)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{k-1/k} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad (1.114)$$

1.45 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีตามชนิดของกระบวนการต่างๆ ของมวลควบคุม

กระบวนการปริมาตรคงที่ย้อนกลับได้ นั่นคือ

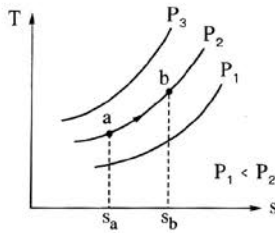
$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_{v0}(T) \frac{dT}{T} \quad (1.115)$$



รูปที่ 1.19 แผนภาพ T-s เมื่อ $v =$ คงที่

กระบวนการความดันที่ย้อนกลับได้ นั่นคือ

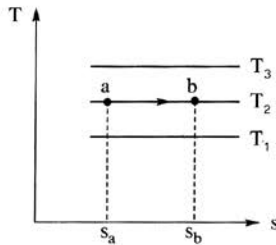
$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_{p0}(T) \frac{dT}{T} \quad (1.116)$$



รูปที่ 1.20 แผนภาพ T-s เมื่อ P = คงที่

กระบวนการอุณหภูมิที่ย้อนกลับได้ นั่นคือ

$$s_2 - s_1 = R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \quad (1.117)$$

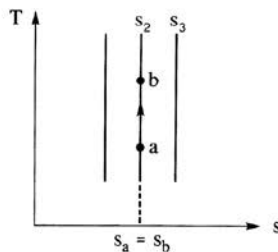


รูปที่ 1.21 แผนภาพ T-s เมื่อ T = คงที่

กระบวนการไอเซนทรอปิก นั่นคือ

$$s_b - s_a = 0, s_b = s_a$$

(1.118)

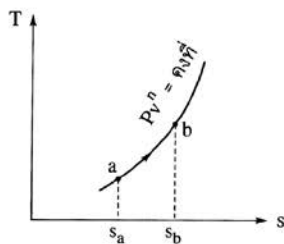


รูปที่ 1.22 แผนภาพ T-s เมื่อ $s = \text{คงที่}$

กระบวนการพอลิทรอปิกย้อนกลับได้ นั่นคือ

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_{v0}(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

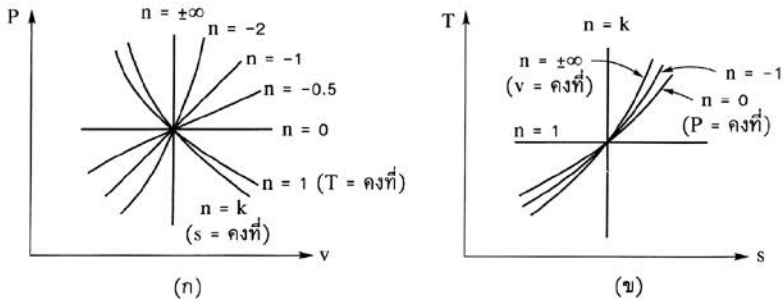
(1.119)



รูปที่ 1.23 แผนภาพ T-s เมื่อ $Pv^n = \text{คงที่}$

จากแผนภาพดังแต่รูปที่ 1.19 ถึง 1.23 นำมาเขียนรวมเป็นรูปเดียวกันจะได้รูปที่

1.24



รูปที่ 1.24 แผนภาพ P-v และ T-s สำหรับกระบวนการโพลิทรอปิก

พิจารณา n ที่ค่าต่างๆ พบว่า

$n = 0$ เป็นกระบวนการความดันคงที่

$n = k$ เป็นกระบวนการเอนโทรปี

$n = 1$ เป็นกระบวนการอุณหภูมิคงที่

$n = \infty$ เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่

เพื่อสะดวกต่อการนำไปใช้ จึงได้คำนวณความร้อนถ่ายเท ${}_1q_2$, งาน ${}_1w_2$, การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน Δu และการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี Δs สำหรับมวลควบคุมใช้กับก๊าซอุดมคติที่มีความร้อนจำเพาะเป็นค่าคงที่ $\Delta KE = 0$ และ $\Delta PE = 0$ ภายใต้กระบวนการย้อนกลับได้ และจัดได้ในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ความสัมพันธ์ P-v-T, ${}_1q_2$, ${}_1w_2$, Δu และ Δs สำหรับก๊าซอุดมคติที่มีความร้อนจำเพาะคงที่ (มวลควบคุม) ที่ดำเนินกระบวนการย้อนกลับได้โดยที่ $\Delta KE = 0$ และ $\Delta PE = 0$

	กระบวนการ ปริมาตรคงที่	กระบวนการ ความดันคงที่	กระบวนการ อุณหภูมิคงที่	กระบวนการ ไอเซนทรอปิก	กระบวนการ โพลีทรอปิก
ความสัมพันธ์	$v_1 = v_2$	$P_1 = P_2$	$T_1 = T_2$	$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{1-k} = \frac{T_1}{T_2}$	$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{1-n} = \frac{T_1}{T_2}$
P-v-T	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{P_1}{P_2}$ (Pv = ค่าคงที่)	$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \frac{P_2}{P_1}$ (Pv ^k = ค่าคงที่)	$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n = \frac{P_2}{P_1}$ (Pv ⁿ = ค่าคงที่)
${}_1q_2$	$C_{v0}(T_2-T_1)$	$C_{p0}(T_2-T_1)$	$P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	0	$C_{v0} \left(\frac{k-n}{1-n} \right) (T_2-T_1)$
${}_1w_2$	0	$P(v_2-v_1)$	$P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	$\frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-k}$	$\frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{1-n}$
Δu	$C_{v0}(T_2-T_1)$	$C_{v0}(T_2-T_1)$	0	$C_{v0}(T_2-T_1)$	$C_{v0}(T_2-T_1)$
Δs	$C_{v0} \ln \frac{T_2}{T_1}$	$C_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1}$	$R \ln \frac{v_2}{v_1}$	0	$R \ln \frac{v_2}{v_1} + C_{v0} \ln \frac{T_2}{T_1}$

1.46 สรุปตารางการวิเคราะห์ก๊าซอุดมคติสำหรับปริมาตรควบคุม

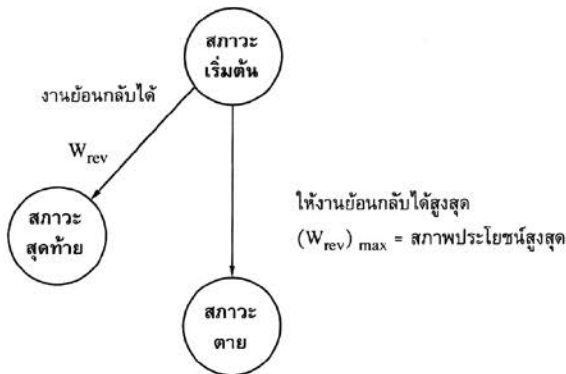
เพื่อสะดวกต่อการนำไปใช้งานจึงได้สรุปผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ P-v-T, ${}_1q_{CV}$, ${}_1w_{CV}$ และ Δs สำหรับก๊าซอุดมคติ (ปริมาตรควบคุม) ไว้ในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ความสัมพันธ์ P-v-T, q_{CV} , w_{CV} และ Δs สำหรับก๊าซอุดมคติที่มีความร้อนจำเพาะคงที่ (ปริมาตรควบคุม) ที่ดำเนินกระบวนการย้อนกลับได้ โดยที่ $\Delta KE = 0$ และ $\Delta PE = 0$

	กระบวนการ ความดันคงที่	กระบวนการ อุณหภูมิคงที่	กระบวนการ ไอเซนทรอปิก	กระบวนการ โพลีทรอปิก
ความสัมพันธ์ P-v-T	$\frac{v_e}{v_i} = \frac{T_e}{T_i}$	$\frac{v_i}{v_e} = \frac{P_e}{P_i}$	$\left(\frac{v_i}{v_e}\right)^{1-k} = \frac{T_i}{T_e}$ $\left(\frac{v_i}{v_e}\right)^k = \frac{P_e}{P_i}$	$\left(\frac{v_i}{v_e}\right)^{1-n} = \frac{T_i}{T_e}$ $\left(\frac{v_i}{v_e}\right)^n = \frac{P_e}{P_i}$
q_{CV}	$C_{po}(T_e - T_i)$	$-P_i v_i \ln \frac{P_e}{P_i}$	0	$\frac{(k-n)R}{(k-1)(1-n)} (T_e - T_i)$
w_{CV}	กำหนด $w_{CV} = 0$	$-P_i v_i \ln \frac{P_e}{P_i}$	$C_{po}(T_i - T_e)$	$\frac{n}{1-n} (P_e v_e - P_i v_i)$
Δs	$C_{po} \ln \frac{T_e}{T_i}$	$-R \ln \frac{P_e}{P_i}$	0	$\frac{(k-n)R}{(k-1)(1-n)} \ln \frac{T_e}{T_i}$

inspiration starts here

1.47 สภาวะตาย สภาพประโยชน์สูงสุด และงานย้อนกลับได้



รูปที่ 1.25 สภาพประโยชน์สูงสุดและงานย้อนกลับได้

ในงานทางวิศวกรรมความร้อนยังคงต้องอาศัยแนวคิดพื้นฐานของสภาพประโยชน์สูงสุดและสภาพย้อนกลับไม่ได้ เพื่อกำหนดเลือกแหล่งพลังงานมาใช้อย่างเหมาะสม โดยควบคุมให้เกิดสภาพย้อนกลับไม่ได้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

1. **สภาวะตาย (dead state)** หมายถึง สภาวะใดสภาวะหนึ่งของระบบซึ่งมีสมดุลทางกล สมดุลทางความร้อน และสมดุลทางเคมีกับสิ่งแวดล้อม รวมถึงไม่มีพลังงานจลน์และพลังงานศักย์เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งแวดล้อม

2. **สภาพประโยชน์สูงสุด (availability)** ระบบที่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง ถ้าระบบนั้นดำเนินการกระบวนการย้อนกลับได้จากสภาวะเริ่มต้นดังกล่าวและเข้าสู่สภาวะตายได้ ระบบจะได้งานย้อนกลับได้สูงสุด $(W_{rev})_{max}$ ซึ่งเรียกว่า **สภาพประโยชน์สูงสุด** ดังรูปที่ 1.25

3. **งานย้อนกลับได้** ระบบที่สภาวะใดสภาวะหนึ่ง ถ้าระบบนั้นดำเนินการกระบวนการย้อนกลับได้ จากสภาวะเริ่มต้นและเข้าสู่สภาวะสุดท้ายซึ่งไม่ใช่สภาวะตายนั้น ระบบจะได้งานย้อนกลับได้ (W_{rev}) เท่านั้น ซึ่ง $W_{rev} < (W_{rev})_{max}$ ดังรูปที่ 1.25

เมื่อเปรียบเทียบสมการสมดุลของพลังงานและสมการสมดุลของสภาพประโยชน์สูงสุดพบว่า

inspiration starts here

พลังงานป้อนเข้า = พลังงานใช้ประโยชน์ + พลังงานสูญเสีย

สภาพประโยชน์สูงสุดป้อนเข้า = สภาพประโยชน์สูงสุดที่ใช้ประโยชน์ + สภาพ
ประโยชน์สูงสุดสูญเสีย + สภาพย้อนกลับไม่ได้

1.48 งานย้อนกลับได้ (W_{rev})

งานย้อนกลับได้ (W_{rev}) คือ งานใช้ประโยชน์สูงสุดที่ได้ในขณะที่ระบบดำเนินการกระบวนการหนึ่งๆ ระหว่างสภาวะเริ่มต้นและสุดท้ายคู่หนึ่งๆ ภายใต้กระบวนการย้อนกลับได้

พิจารณาปริมาตรควบคุมที่ดำเนินการกระบวนการ USUF ย้อนกลับได้ภายใต้สิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิคงที่ T_0 งานย้อนกลับได้คือ

$$W_{\text{rev}} = \sum m_i (h_i - T_0 s_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i) - \sum m_e (h_e - T_0 s_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e) \\ - [m_2 (u_2 - T_0 s_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + gZ_2) - m_1 (u_1 - T_0 s_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + gZ_1)]_{\text{CV}}$$

(1.120)

ในสมการ (1.120) แสดงว่างานย้อนกลับได้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และสมการของงานย้อนกลับได้สำหรับกรณีต่างๆ มีดังนี้

1. สำหรับมวลควบคุมหรือระบบปิด เนื่องจากไม่มีมวลไหลข้ามผิวควบคุม สมการที่เหลือเป็น

$$\left(\frac{W_{\text{rev}}}{m} \right)_2 = {}_1(w_{\text{rev}})_2 = (u_1 - T_0 s_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + gZ_1) \\ - (u_2 - T_0 s_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + gZ_2)$$

(1.121)

2. สำหรับกระบวนการ SSSF สมการ (1.120) เหลือเป็น

inspiration starts here

$$\dot{W}_{\text{rev}} = \sum \dot{m}_i (h_i - T_0 s_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i) - \sum \dot{m}_e (h_e - T_0 s_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e) \quad (1.122)$$

สำหรับมวลที่ไหลเข้าทางเดียวและออกทางเดียวพบว่า

$$\frac{\dot{W}_{\text{rev}}}{\dot{m}} = w_{\text{rev}} = (h_i - T_0 s_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i) - (h_e - T_0 s_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e) \quad (1.123)$$

1.49 สภาพย้อนกลับไม่ได้

สภาพย้อนกลับไม่ได้ (I) คือผลต่างของงานย้อนกลับได้กับงานใช้ประโยชน์ ซึ่งเนื่องมาจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้

$$I = W_{\text{rev}} - W_{\text{use}}$$

$$I = \dot{W}_{\text{rev}} - \dot{W}_{\text{use}}$$

(1.124)

โดยที่ $W_{\text{use}} = W - W_{\text{Surr}}$ ซึ่ง W คืองานใช้ประโยชน์จริง (actual useful work) และ W_{Surr} คืองานต้านสิ่งแวดล้อม ซึ่ง $W_{\text{Surr}} = P_0(\Delta V)$ และ ΔV คือการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของระบบ

ถ้าพิจารณากระบวนการ SSSF หรือ USUF พบว่า $W_{\text{use}} = W_{\text{CV}}$

$$\dot{I} = \dot{W}_{\text{rev}} - \dot{W}_{\text{CV}} \quad \text{สำหรับกระบวนการ SSSF}$$

(1.125)

$$I = W_{\text{rev}} - W_{\text{CV}} \quad \text{สำหรับกระบวนการ USUF}$$

1.50 งานย้อนกลับได้และสภาพย้อนกลับไม่ได้สำหรับกระบวนการต่าง ๆ

1. กรณีกระบวนการ USUF W_{CV} หากจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ แทนค่าในสมการ (1.125) จะได้

$$I = \sum m_e T_0 s_e - \sum m_i T_0 s_i + m_2 T_0 s_2 - m_1 T_0 s_1 - Q_{\text{CV}} \quad (1.126)$$

2. กรณีสำหรับระบบปิดหรือมวลควบคุม พบว่า

$$I_2 = m T_0 (s_2 - s_1) - {}_1Q_2 \quad (1.127)$$

3. สำหรับกระบวนการ SSSF พบว่า

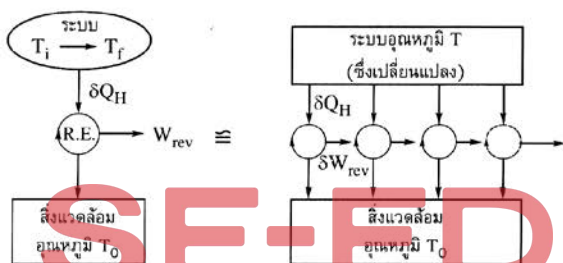
$$\dot{I} = \sum \dot{m}_e T_0 s_e - \sum \dot{m}_i T_0 s_i - \dot{Q}_{\text{CV}} \quad (1.128)$$

4. สำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนเมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน ΔT กำหนดให้ระบบมวล m อุณหภูมิเดิม T_i องศาเซลวิน ถูกทำให้เย็นลงสู่อุณหภูมิสุดท้าย T_f องศาเซลวิน โดยถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมอุณหภูมิคงที่ T_0 องศาเซลวิน และกำหนดให้ C เป็นความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของระบบ

งานย้อนกลับได้ หาจาก

$$W_{\text{rev}} = -\int_{T_i}^{T_f} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q_H = -\int_{T_i}^{T_f} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) mC dT$$

$$W_{\text{rev}} = mC(T_i - T_f) - mCT_0 \ln \frac{T_i}{T_f} \quad (1.129)$$

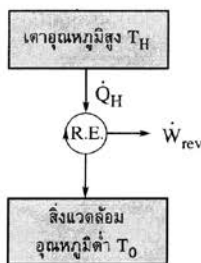


รูปที่ 1.26 การถ่ายเทความร้อนเมื่ออุณหภูมิของระบบแตกต่างจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

สภาพย้อนกลับไม่ได้ ($W_{\text{usc}} = 0$)

$$\therefore I = W_{\text{rev}} = mC(T_i - T_f) - mCT_0 \ln \frac{T_i}{T_f} \quad (1.130)$$

5. สำหรับการใช้เตาผลิตพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ T_H ในสิ่งแวดล้อมอุณหภูมิ T_0 กำหนดให้เตาผลิตพลังงานความร้อนออกมาในอัตรา Q_H ที่อุณหภูมิในเตาคงที่ T_H ภายใต้สิ่งแวดล้อมอุณหภูมิ T_0 คงที่ ในที่นี้ไม่มีงานถ่ายเทเข้าระบบ ($W_{\text{usc}} = W = 0$) ถ้าหาความต้องการงานย้อนกลับได้ $\dot{W}_{\text{rev}}$ ให้ติดตั้งกลจักรความร้อนย้อนกลับได้ระหว่างเตา (แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง T_H) กับสิ่งแวดล้อม (แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ T_0) จะได้ดังรูปที่ 1.27



รูปที่ 1.27 การถ่ายเทความร้อนจากเตาสู่สิ่งแวดล้อมอย่างย้อนกลับได้

$$\dot{W}_{\text{rev}} = \eta_{\text{th,rev}} \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H \quad (1.131)$$

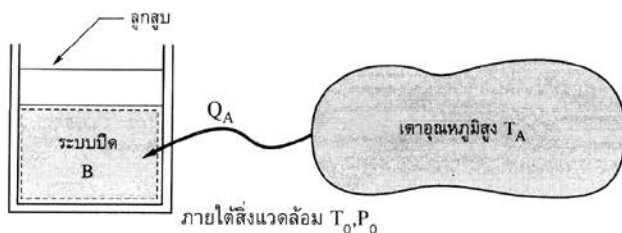
สภาพย้อนกลับไม่ได้ ($\dot{W}_{\text{use}} = 0$)

$$\dot{I} = \dot{W}_{\text{rev}} - \dot{W}_{\text{use}} = \dot{W}_{\text{rev}}$$

$$\dot{I} = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H \quad (1.132)$$

กระบวนการถ่ายเทความร้อนออกนอกเตาสู่สิ่งแวดล้อม เป็นการทำลายศักยภาพของพลังงานจนหมด เนื่องจากกำลังสูงสุดที่ระบบมีศักยภาพผลิตได้เท่ากับ $(1 - T_0/T_H)\dot{Q}_H$ นี้ จะถูกทำลายหมดด้วยสภาพย้อนกลับไม่ได้ของกระบวนการ

6. สำหรับการรับความร้อนของระบบปิดจากเตาที่มีอุณหภูมิคงที่

รูปที่ 1.28 การรับความร้อนของระบบปิดจากเตาที่มีอุณหภูมิคงที่ T_A

กำหนดให้ระบบปิด B ที่บรรจุในกระบอกสูบปิด รับความร้อนในปริมาณ Q_A จากเตาอุณหภูมิคงที่ T_A ทำให้ระบบปิดนั้นเปลี่ยนแปลงสภาวะเริ่มต้น (1) ไปสู่สภาวะสุดท้าย (2) ทั้งนี้สมมติให้ระบบดำเนินกระบวนการย้อนกลับได้ภายใน (internally reversible process) ภายใต้สิ่งแวดล้อมอุณหภูมิคงที่ T_0 ดังรูปที่ 1.28 ในที่นี้

$$W_{\text{use}} = PdV - W_{\text{SURR}} \quad (1.133)$$

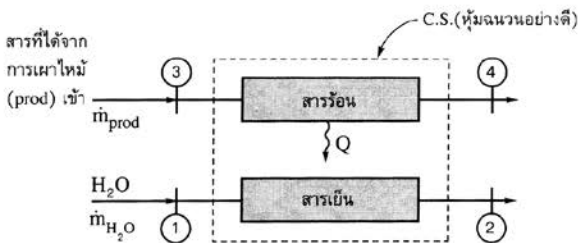
$$W_{\text{rev}} = (U_1 - U_2)_B - T_0(S_1 - S_2)_B + P_0(V_1 - V_2) - \left(1 - \frac{T_0}{T_A}\right)Q_A \quad (1.134)$$

สภาพย้อนกลับไม่ได้

$$I = W_{\text{rev}} - W_{\text{use}}$$

$$I = (U_1 - U_2)_B - T_0(S_1 - S_2)_B - \left(\int_1^2 PdV\right)_B - \left(1 - \frac{T_0}{T_A}\right)Q_A \quad (1.135)$$

7. สำหรับกระบวนการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 1.29 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารที่ได้อจากการเผาไหม้

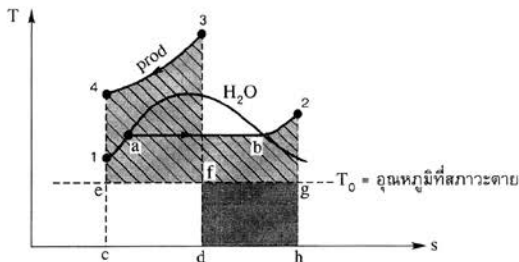
กำหนดให้สารที่ได้อจากการเผาไหม้ (prod) ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและให้ความร้อนกับน้ำ (H_2O) ดังรูปที่ 1.29 สามารถเขียนกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนลงบนแผนภาพ $T-s$ ได้ดังรูปที่ 1.30 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

ความร้อนถ่ายเทออกจากสารที่ได้จากการเผาไหม้

$$Q = H_4 - H_3 = (\text{พื้นที่ใต้กราฟ 3-4-c-d-3})$$

ความร้อนที่นำรับไว้ (ซึ่งเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทจากสารที่ได้จากการเผาไหม้)

$$Q = H_2 - H_1 = (\text{พื้นที่ใต้กราฟ 1-a-b-2-h-c-1})$$



รูปที่ 1.30 กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างย้อนกลับไม่ได้สำหรับตัวอย่างในรูปที่ 1.29

งานย้อนกลับได้คำนวณจาก

$$(\dot{W}_{\text{rev}})_{\text{prod}} = \dot{m}_{\text{prod}} [h_3 - h_4 - T_0(s_3 - s_4)] \quad (\text{พื้นที่ใต้กราฟ 3-4-e-f-3})$$

$$(\dot{W}_{\text{rev}})_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} [h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)] = (\text{พื้นที่ใต้กราฟ 1-a-b-2-g-e-1})$$

งานย้อนกลับได้สุทธิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (หน่วย kJ/kg-H₂O)

$$(w_{\text{rev}})_{\text{NET}} = (w_{\text{rev}})_{\text{prod}} + (w_{\text{rev}})_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$(w_{\text{rev}})_{\text{NET}} = \left(\frac{\dot{m}_{\text{prod}}}{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}} \right) [h_3 - h_4 - T_0(s_3 - s_4)] + [h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)] \quad (1.136)$$

โดยที่

$$\left(\frac{\dot{m}_{\text{prod}}}{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}} \right) = \frac{(h_2 - h_1)_{\text{H}_2\text{O}}}{(h_3 - h_4)_{\text{prod}}}$$

8. พิจารณาสภาพย้อนกลับไม่ได้จากหลักการเพิ่มของเอนทัลปีสำหรับปริมาตรควบคุม

$$\dot{I} = T_o \left(\frac{d}{dt} S_{CV} + \frac{d}{dt} S_{SURR} \right) \quad (1.139)$$

สมการ (1.139) กล่าวว่า ถ้า สภาพย้อนกลับไม่ได้ของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งจะมีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ

1.51 สภาพประโยชน์สูงสุด

งานย้อนกลับได้สูงสุดขึ้นอยู่กับสภาวะสุดท้ายของระบบ สภาวะสุดท้ายนี้เป็นสภาวะที่ระบบสมดุลกับสิ่งแวดล้อม ที่สภาวะนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอย่างฉับพลันและระบบไม่สามารถทำงานได้ และเรียกสภาวะนี้ว่า *สภาวะตาย*

สำหรับกระบวนการ SSSF ที่สภาวะทางเข้าหนึ่งๆ ของมวลที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม งานย้อนกลับได้สูงสุดจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมวลที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุมมีความสมดุลกับสิ่งแวดล้อมที่สภาวะทางออกนั้น นั่นคือมวลที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุมนั้นต้องมีความดันและอุณหภูมิเดียวกับสิ่งแวดล้อม อยู่ในสมดุลทางเคมีกับสิ่งแวดล้อม มีพลังงานศักย์ต่ำสุด และมีความเร็วทางออกเป็นศูนย์

1. สภาพประโยชน์สูงสุดสำหรับกระบวนการ SSSF ที่มีมวลไหลเข้าทางเดียวและออกทางเดียว งานย้อนกลับได้คือ

$$w_{rev} = (h_i - T_o s_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i) - (h_e - T_o s_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e)$$

งานย้อนกลับได้สูงสุดก็ต่อเมื่อ $h_e = h_o$, $s_e = 0$, $n_e = 0$ และ $Z_e = 0$ สภาวะที่สารทำงานสมดุลกับสิ่งแวดล้อมนั้นจะกำหนดตัวห้อยล่างเป็น 0 และงานย้อนกลับได้สูงสุดต่อหน่วยมวลของสารทำงานนี้เรียกว่า *สภาพประโยชน์สูงสุดต่อหน่วยมวล* และใช้สัญลักษณ์เป็น ψ นั่นคือ

$$\psi = (h - T_o s + \frac{1}{2} v^2 + gZ) - (h_o - T_o s_o + gZ_o) \quad (1.140)$$

ψ คือ ψ_i หรือ ψ_e ก็ได้ ซึ่งจะได้ว่า

$$w_{\text{rev}} = \psi_i - \psi_e \quad (1.141)$$

2. สภาพประโยชน์สูงสุดสำหรับกระบวนการ SSSF ที่มีมวลไหลเข้าหลายทางและออกหลายทาง

$$\dot{W}_{\text{rev}} = \sum \dot{m}_i \psi_i - \sum \dot{m}_e \psi_e \quad (1.142)$$

3. สภาพประโยชน์สูงสุดสำหรับระบบปิดหรือมวลควบคุม อาศัยสมการ (1.121) โดยกำหนดให้ $\Delta KE = 0$, $\Delta PE = 0$, $u_2 = u_0$ และ $s_2 = s_0$ ดังนั้นจะได้งานย้อนกลับได้สูงสุดของระบบคือ

$$(w_{\text{rev}})_{\text{max}} = (u - T_0 s) - (u_0 - T_0 s_0) \quad (1.143)$$

เมื่อคำนึงถึงงานใช้ด้านงานสิ่งแวดล้อมขณะขอบเขตของระบบเคลื่อนที่หรือขยายตัวคือ

$$w_{\text{Surr}} = P_0(v_0 - v) \quad (1.144)$$

สภาพประโยชน์สูงสุดต่อหน่วยมวลของระบบคือ

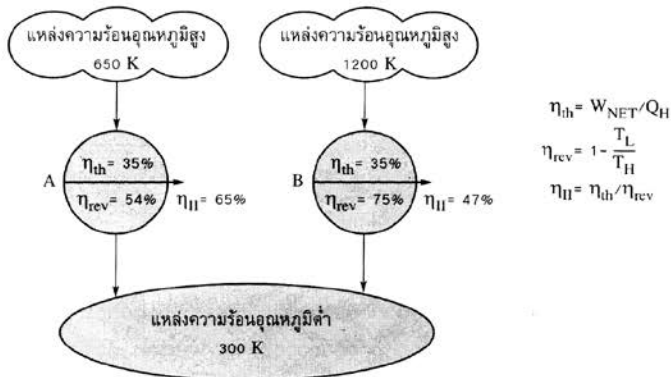
$$\phi = (w_{\text{rev}})_{\text{max}} - w_{\text{Surr}}$$

$$\phi = u - u_0 + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (1.145)$$

ϕ คือ ϕ_1 หรือ ϕ_2 จากสมการ (1.121) จะได้

$$_1(w_{\text{rev}})_2 = \phi_1 - \phi_2 - P_0(v_1 - v_2) + \frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2) + g(Z_1 - Z_2) \quad (1.146)$$

1.52 ประสิทธิภาพกฎข้อที่สอง



รูปที่ 1.32 สมรรถนะการทำงานของกลจักรความร้อน

สมรรถนะการทำงานของกลจักรความร้อน เครื่องทำความเย็น หรือปั๊มความร้อน ความสามารถในการแปลงรูปพลังงานนั้นวัดกันด้วยประสิทธิภาพกฎข้อที่สอง ซึ่งได้แก่ ประสิทธิภาพทางความร้อน (η_{th}) และสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (COP)

การชี้บอกสมรรถนะการทำงานของกลจักรความร้อนด้วย η_{th} ในรูปที่ 1.32 กลจักรความร้อน A และ B มีประสิทธิภาพกฎข้อที่สองที่หนึ่งเท่ากันคือ 35 เปอร์เซ็นต์ นั้นยังคงกล่าวไม่ได้ว่ากลจักรความร้อนทั้งสองสามารถทำงานได้ดีพอๆ กัน ในที่นี้ต้องพิจารณาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพทางความร้อนย้อนกลับได้ (η_{rev}) ของแต่ละเครื่อง (A และ B) จาก

$$\eta_{rev,A} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)_A = 1 - \frac{300}{650} = 54\%$$

$$\eta_{rev,B} = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right)_B = 1 - \frac{300}{1200} = 75\%$$

นิยามของประสิทธิภาพกฎข้อที่สอง (หรือประสิทธิภาพ) คือ

$$\eta_{II} = \frac{W_{use}}{W_{rev}} \text{ สำหรับอุปกรณ์ให้งาน} \quad (1.147)$$

$$\eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W_{use}} \text{ สำหรับอุปกรณ์รับงาน} \quad (1.148)$$

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rev}} \text{ สำหรับเครื่องทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน} \quad (1.149)$$

ในที่นี้จะใช้ $\eta_{II} = \eta_{th}/\eta_{rev}$ ดังนี้

$$\eta_{II,A} = \frac{35}{54} = 65\%$$

$$\eta_{II,B} = \frac{35}{75} = 47\%$$

inspiration starts here

พบว่ากลจักรความร้อน A นั้นสามารถแปลงศักยภาพในการผลิตงานได้สูงสุดมาเป็นพลังงานใช้ประโยชน์จริงเท่ากับ 65 เปอร์เซ็นต์ และกลจักรความร้อน B สามารถแปลงศักยภาพในการผลิตงานได้สูงสุดมาเป็นพลังงานใช้ประโยชน์จริงเท่ากับ 47 เปอร์เซ็นต์ นั้นย่อมแสดงว่ากลจักรความร้อน A สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับกลจักรความร้อนย้อนกลับได้มากกว่า ฉะนั้นกลจักรความร้อน A จึงทำงาน (perform) ได้ดีกว่า

1.53 ฟังก์ชันเฮล์มโฮลทซ์และฟังก์ชันกิบส์

ฟังก์ชันเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz function, A) และฟังก์ชันกิบส์ (Gibbs function, G) เป็นคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารบริสุทธิ์ ซึ่งมักพบเห็นในสมการกำหนดเงื่อนไขของสมดุลและเสถียรภาพของสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ของระบบ

กรณีระบบอยู่ในสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อมอุณหภูมิ T_0 ซึ่งระบบมีอุณหภูมิ T ระหว่างสถานะเริ่มต้น (1) และสถานะสุดท้าย (2) ใช้สมการ

$${}_1(w_{rev})_2 = (u_1 - T_1 s_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + gZ_1) - (u_2 - T_2 s_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + gZ_2)$$

ในที่นี้พบว่าฟังก์ชันเอนทัลปีคือ $a_1 = u_1 - T_1 s_1$ และ $a_2 = u_2 - T_2 s_2$ เขียนได้ว่า

$$A = U - TS \quad \text{หรือ} \quad a = u - Ts \quad (1.150)$$

เขียนสมการงานย้อนกลับได้สำหรับมวลควบคุม ในเทอมของฟังก์ชันเอนทัลปีคือ

$$({}_1w_2)_{\text{rev}} = (a_1 + \frac{1}{2}v_1^2 + gZ_1) - (a_2 + \frac{1}{2}v_2^2 + gZ_2) \quad (1.151)$$

ถ้าหากกำหนดให้ $\Delta KE = \Delta PE = 0$ ดังนั้น

$$({}_1w_2)_{\text{rev}} = A_1 - A_2 = m(a_1 - a_2) \quad (1.152)$$

กรณีระบบอยู่ในสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อม ($T = T_0$) และสมดุลทางกล ($P = P_0$) ดังนั้น

$$\begin{aligned} \phi &= (u + Pv - Ts) - (u_0 + P_0 v_0 - T_0 s_0) \\ &= (h - Ts) - (h_0 - T_0 s_0) \end{aligned}$$

ในที่นี้พบว่าฟังก์ชันกิบส์คือ

$$G = H - TS \quad \text{หรือ} \quad g = h - Ts \quad (1.153)$$

เขียนสมการงานย้อนกลับได้สำหรับมวลควบคุมในเทอมของฟังก์ชันกิบส์

$$({}_1w_2)_{\text{rev}} = g_1 - g_2 - P_0(v_1 - v_2) + \frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2) + g(Z_1 - Z_2) \quad (1.154)$$

สำหรับกระบวนการ SSSF โดยพิจารณาสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อม ($T_i = T_c = T_0$)

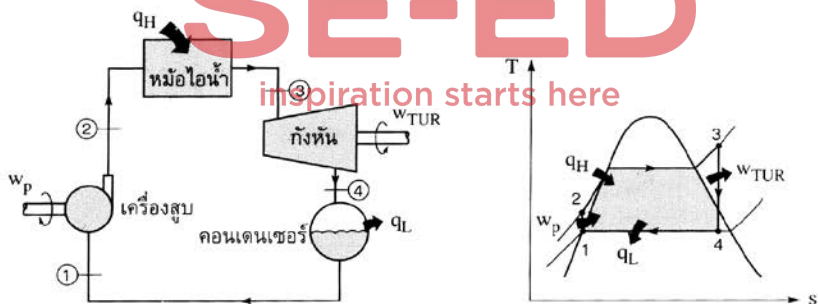
$$\dot{W}_{\text{rev}} = \dot{m}_i(g_i + \frac{1}{2}v_i^2 + gZ_i) - \dot{m}_e(g_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) \quad (1.155)$$

2

วัฏจักรกำลังไอน้ำ และวัฏจักรกำลังก๊าซ

วัฏจักรกำลังไอน้ำสำหรับโรงจักรพลังไอน้ำที่ควรทราบคือ

2.1 วัฏจักรแรงคินอย่างง่าย



รูปที่ 2.1 วัฏจักรแรงคินอย่างง่ายในอุดมคติ

วัฏจักรแรงคินเป็นวัฏจักรกำลังไอน้ำอย่างง่ายในอุดมคติ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ตัวคือ หม้อไอน้ำ กังหันไอน้ำ คอนเดนเซอร์ และเครื่องสูบ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละกระบวนการที่อุปกรณ์ต่างๆ เป็นกระบวนการย้อนกลับได้ทั้งหมด

การคำนวณในวัฏจักรแรงคิน

อุปกรณ์ทั้งสี่ที่กล่าวมาจัดเป็นกระบวนการ SSSF ทั้งสิ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์มีค่าน้อยมากและตัดทิ้งไปได้ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความร้อนและงานในวัฏจักร

$$\text{ที่เครื่องสูบลว (} q = 0 \text{); } w_P = h_2 - h_1 \quad \text{kJ/kg} \quad (2.1)$$

$$\text{หรือ } w_P = v(P_2 - P_1) \quad \text{kJ/kg} \quad (2.2)$$

$$\text{โดยที่ } h_1 = h_{f@P_1} \text{ และ } v_1 \approx v_2 \approx v_{f@P_1} \quad (2.3)$$

$$\text{ที่หม้อไอน้ำ (} w = 0 \text{); } q_H = h_3 - h_2 \quad \text{kJ/kg} \quad (2.4)$$

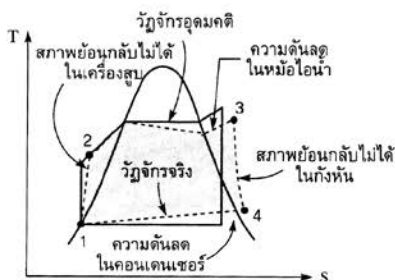
$$\text{ที่กังหันไอน้ำ (} q = 0 \text{); } w_{TUR} = h_3 - h_4 \quad \text{kJ/kg} \quad (2.5)$$

$$\text{ที่คอนเดนเซอร์ (} w = 0 \text{); } q_L = h_4 - h_1 \quad \text{kJ/kg} \quad (2.6)$$

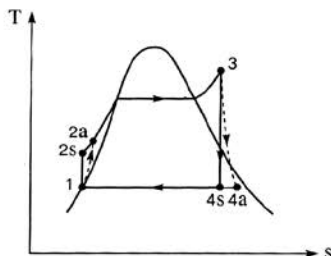
ประสิทธิภาพทางความร้อน

$$\eta_{th} = \frac{w_{NET}}{q_H} = 1 - \frac{q_L}{q_H} \quad (2.7)$$

$$\text{โดยที่ } w_{NET} = q_H - q_L = w_{TUR} - w_P \quad \text{kJ/kg} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.2 สาเหตุการเบี่ยงเบนของวัฏจักรจริงออกจากวัฏจักรแรงคิน



รูปที่ 2.3 ผลเนื่องจากสภาพย้อนกลับไม่ได้ของเครื่องสูบลและกังหันต่อวัฏจักรแรงคิน

ในรูปที่ 2.2 แสดงสาเหตุการเบี่ยงเบนของวัฏจักรจริงออกจากวัฏจักรแรงคิน

ในรูปที่ 2.3 แสดงผลของสภาพย้อนกลับไม่ได้ในการทำงานของเครื่องสูบลและกังหันที่มีต่อวัฏจักรแรงคิน จากสภาวะทางออกจริงของเครื่องสูบลและกังหันไอน้ำตามลำดับหาจากนิยามของประสิทธิภาพไอเซนทรอปิก

$$\eta_P = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad \text{สำหรับเครื่องสูบล} \quad (2.9)$$

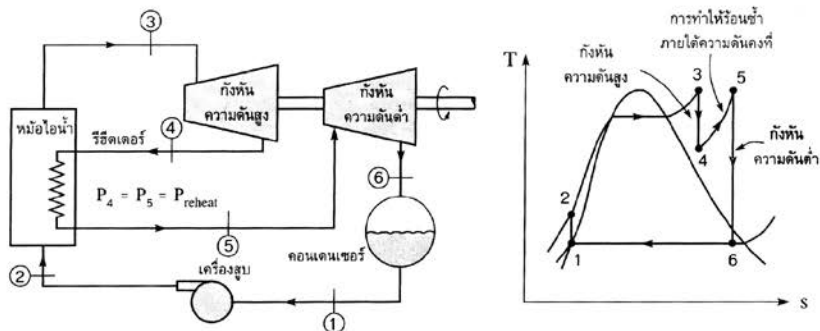
$$\eta_{TUR} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad \text{สำหรับกังหัน} \quad (2.10)$$

2.2 วัฏจักรแรงคินแบบรีฮีต

วัฏจักรที่มีรีฮีตเตอร์จะช่วยให้ประสิทธิภาพของวัฏจักรเพิ่มขึ้น โดยจะนำไอน้ำที่มีความดันปานกลางจะถูกส่งกลับไปในหม้อไอน้ำ เพื่อให้ความร้อนซ้ำภายใต้กระบวนการความดันคงที่ และส่งเข้ากังหันตอนถัดไปดังรูปที่ 2.4 ใช้กังหัน 2 ตอน ตอนแรกความดันสูง (กระบวนการ ③ - ④) และตอนหลังความดันต่ำ (กระบวนการ ⑤ - ⑥) ดังนั้น

$$q_H = q_{ปกติ} + q_{รีฮีต} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad (2.11)$$

$$w_{TUR} = w_{TUR1} + w_{TUR2} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \quad (2.12)$$



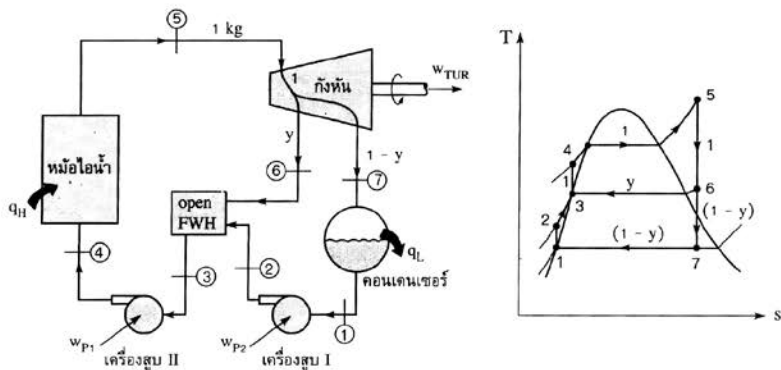
รูปที่ 2.4 วัฏจักรแรงดันแบบรีฮีต

2.3 วัฏจักรรีเจนอเรทีฟ

วัฏจักรรีเจนอเรทีฟเป็นวัฏจักรแรงดันที่มีการนำหรือดึงไอน้ำบางส่วนจากกังหันที่จุดต่างๆ เพื่อนำมาให้ความร้อนแก่น้ำเลี้ยง (feed water) ก่อนป้อนเข้าหม้อไอน้ำ แบบของวัฏจักรรีเจนอเรทีฟขึ้นอยู่กับลักษณะของการให้ความร้อน ซึ่งแบ่งออกเป็น

2.3.1 วัฏจักรรีเจนอเรทีฟที่มีเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด (แบบสัมผัสกันโดยตรง)

เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิดนี้มีลักษณะเป็นห้องผสมกันโดยตรงระหว่างไอน้ำที่ดึงมาจากกังหันและน้ำเลี้ยง ในทางอุดมคติของผสมที่ออกจากห้องผสมจะอยู่ในสภาพของเหลวอิ่มตัวที่ความดันของเครื่องอุ่น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วัฏจักรรีเจนอเรเตอร์ที่มีเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด

รูปที่ 2.5 แสดงวัฏจักรรีเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด โดยพิจารณาจากไอน้ำ 1 kg ที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำไหลเข้ากังหันที่ความดันหม้อไอน้ำ (สภาวะ 5) และขยายตัวแบบไอเซนทรอปิกสู่ความดันปานกลาง (P_6) ซึ่งจะดึงไอน้ำ y kg จากสภาวะ 6 นี้ และเหลือไอน้ำ $(1-y)$ kg ซึ่งจะขยายตัวอย่างสมบูร์กสู่ความดันที่คอนเดนเซอร์ ดังนั้นถ้าหม้อไอน้ำสามารถผลิตไอน้ำได้ m ในส่วนของไอน้ำที่ควบแน่นในคอนเดนเซอร์จะเหลือเพียง $(1-y)m$ พิจารณาปริมาณต่างๆ ต่อหนึ่งหน่วยมวลของไอน้ำที่ไหลผ่านหม้อไอน้ำพบว่า

$$q_H = h_5 - h_4 \quad (2.13)$$

$$q_L = (1-y)(h_7 - h_1) \quad \text{kJ/kg} \quad (2.14)$$

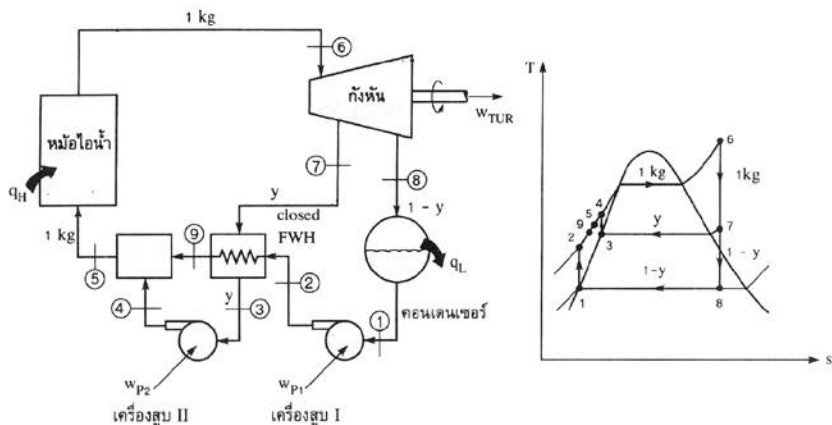
$$w_{TUR} = (h_5 - h_6) + (1-y)(h_6 - h_7) \quad \text{kJ/kg} \quad (2.15)$$

$$w_P = (1-y)w_{P,I} + w_{P,II} \quad \text{kJ/kg} \quad (2.16)$$

โดยที่ $y = m_6/m_5$ (เศษส่วนโดยมวลของไอน้ำที่ถูกดึงออก)

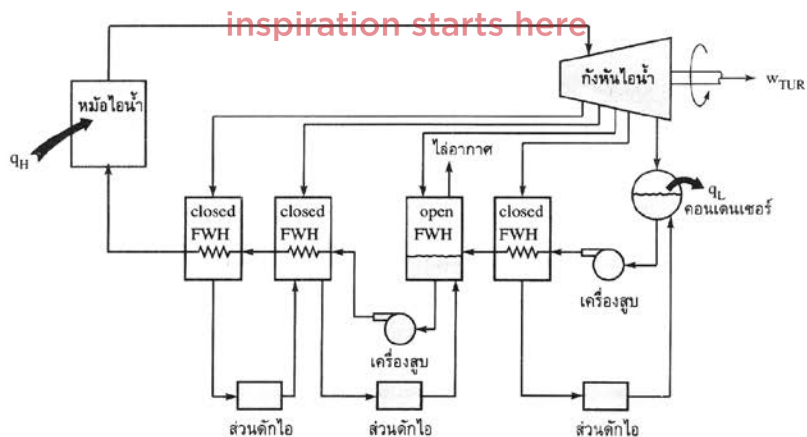
2.3.2 วัฏจักรรีเจนเนอเรทีฟที่มีเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด (แบบไม่สัมผัสกัน)

วัฏจักรรีเจนเนอเรทีฟแบบนี้ไอน้ำกับน้ำเลี้ยงจะไม่เข้าผสมกันโดยตรง ทำให้ความดันของน้ำเลี้ยงและไอน้ำไม่เท่ากัน ในรูปที่ 2.6 แสดงวัฏจักรรีเจนเนอเรทีฟซึ่งใช้เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด 1 ตัว ในทางอุดมคตินั้นน้ำเลี้ยงจะถูกให้ความร้อนจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิทางออกของเครื่องอุ่นของไอน้ำที่ดึงมา ($T_9 = T_3$) ส่วนไอน้ำนั้นจะควบแน่น (คอนเดนเซต) และออกจากเครื่องอุ่นในสภาพของเหลวอิ่มตัว (สภาวะ 3) คอนเดนเซตอาจถูกสูบเข้าเครื่องอุ่นตัวที่อยู่ด้านหน้า หรือป้อนสู่เครื่องอุ่นตัวที่อยู่ด้านหลังซึ่งมีความดันต่ำกว่าโดยอาศัยส่วนดักไอน้ำ (trap)



รูปที่ 2.6 วงจรรีเจนเนอเรทีฟที่มีเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด

ในรูปที่ 2.7 แสดงโรงจักรพลังไอน้ำที่ใช้เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด 1 ตัว และเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด 3 ตัว โดยอาศัยส่วนดักไอน้ำก่อนคอนเดนเซอร์กลับสู่เครื่องอุ่นความดันต่ำที่อยู่ด้านหลัง และกลับสู่คอนเดนเซอร์ในที่สุด



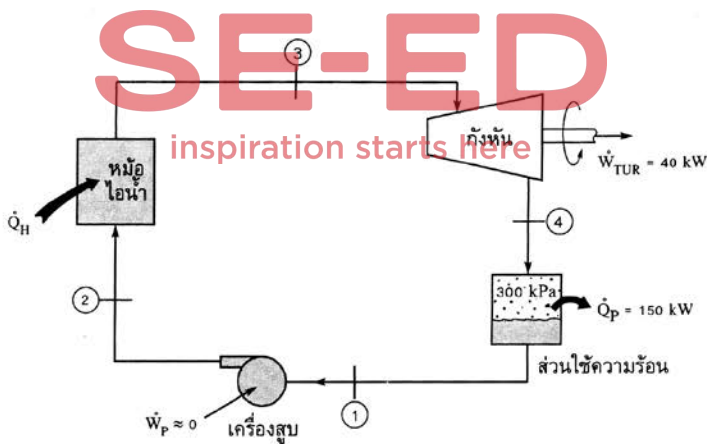
รูปที่ 2.7 โรงจักรพลังไอน้ำที่ใช้เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด 1 ตัว และเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด 3 ตัว

ข้อควรสังเกต แต่ละสมการพิจารณาทุกๆ เทอม (งานและความร้อน) เป็นค่าบวกทั้งหมด ซึ่งจะทำให้สะดวกและง่ายต่อการคำนวณ ดังนั้นเวลาแทนค่าลงในแต่ละสมการเพื่อหางานและความร้อนจึงไม่ต้องคำนึงถึงเครื่องหมาย

2.4 โคเจนเนอเรชัน

จุดประสงค์ในการแปลงรูปพลังงานความร้อนของไอน้ำออกมาใช้ประโยชน์มากกว่า 1 อย่าง เช่น เปลี่ยนมาเป็นพลังงานกลเพื่อขับเจนเนอเรเตอร์ผลิตกระแสไฟฟ้า และเพื่อให้ความร้อนในกระบวนการผลิตทั้งนี้ต้องอยู่ภายใต้แหล่งให้พลังงานเดียวกัน มักพบในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี โรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ โรงงานสิ่งทอ เป็นต้น การใช้ไอน้ำในลักษณะข้างต้นเช่นนี้เรียกว่าโคเจนเนอเรชัน

สำหรับวัฏจักรโคเจนเนอเรชันในอุดมคติแสดงในรูปที่ 2.8 กำหนดให้ใช้ไอน้ำเพื่อจุดประสงค์ 2 อย่างคือ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณ $\dot{W}_{TUR} = 40 \text{ kW}$ และส่งไปตามจุดหรือส่วนใช้ความร้อน (heating section) ในโรงงานในอัตรา $\dot{Q}_p = 150 \text{ kW}$ ที่ความดัน 300 kPa ทั้งนี้สมมติให้ของเหลวหรือคอนเดนเสตออกจากส่วนใช้ความร้อนในสภาพของเหลวอิ่มตัวที่ 300 kPa และถูกสูบเข้าหม้อไอน้ำ ดังนั้นจากสมดุลของพลังงานจะได้อัตราการให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ $\dot{Q}_H = 40 + 150 = 190 \text{ kW}$



รูปที่ 2.8 วัฏจักรโคเจนเนอเรชันในอุดมคติ

สัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับหม้อไอน้ำในวัฏจักรโคเจนเนอเรชัน บ่งบอกด้วยประสิทธิภาพใช้ประโยชน์ร่วม (utilization factor) ของวัฏจักรโคเจนเนอเรชันดังนี้

$$\varepsilon_u = \frac{(\text{งานผลิตโดยกังหัน}) + (\text{ความร้อนส่งไปให้ส่วนใช้ความร้อน})}{(\text{ความร้อนที่ให้กับหม้อไอน้ำ})} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_u = \frac{\dot{W}_{NET} + \dot{Q}_P}{\dot{Q}_H} = 1 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_H} \quad (2.18)$$

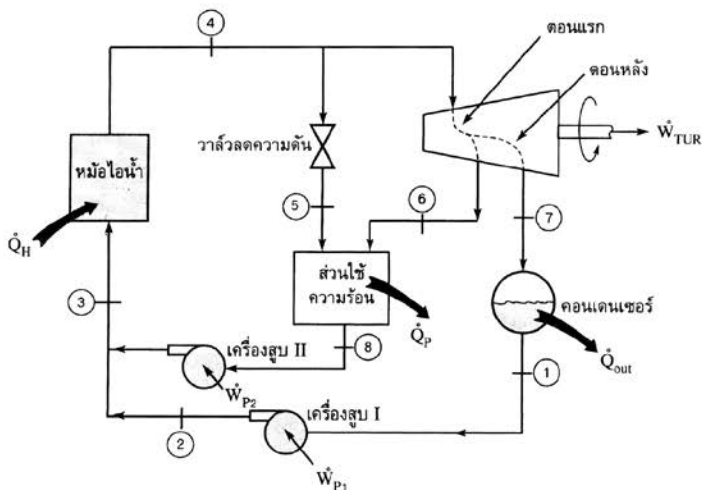
ในที่นี้ $\dot{Q}_{out}$ รวมถึงความร้อนถ่ายทิ้งในคอนเดนเซอร์ ความร้อนสูญเสียจากท่อส่ง และอุปกรณ์ต่างๆ ในวัฏจักรโคเจนเนอเรชัน ปกติถ้าไม่กำหนดเป็นอย่างอื่น $\dot{Q}_{out}$ ก็คือความร้อนถ่ายทิ้งในคอนเดนเซอร์เท่านั้น

วัฏจักรโคเจนเนอเรชันที่ใช้งานทางปฏิบัติมากกว่าแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

ในภาวะทำงานตามปกติ ไอน้ำบางส่วนจะถูกดึงออกจากกังหันตอนแรกที่ความดัน P_6 ไอน้ำส่วนที่เหลือจะขยายตัวผ่านกังหันตอนสุดท้ายจนกระทั่งถึงความดันในคอนเดนเซอร์ ($P_7 = P_1$) ในภาวะเช่นนี้พบว่า

$$\left[\begin{array}{c} \text{ความร้อนถ่ายทิ้ง} \\ \text{ในคอนเดนเซอร์} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{ความร้อนสูญเสียในวัฏจักร} \\ \text{โคเจนเนอเรชัน} \end{array} \right]$$

inspiration starts here



รูปที่ 2.9 วัฏจักรโคเจนเนอเรชันที่ใช้งานทางปฏิบัติ

ในภาวะที่ส่วนใช้ความร้อนในกระบวนการผลิตต้องการไอน้ำสูง ไอน้ำทั้งหมดที่หม้อไอน้ำผลิตได้จะถูกส่งไปยังส่วนใช้ความร้อนและไม่มีไอน้ำไหลออกสู่คอนเดนเซอร์เลย ($m_7 = 0$) แต่ยังคงมีการผลิตกระแสไฟฟ้าอยู่ ถ้าไอน้ำที่ส่งไปยังส่วนใช้ความร้อนนั้นไม่พอเพียงอีก ไอน้ำที่ผลิตมาจากหม้อไอน้ำจะถูกทอดเทิลผ่านวาล์วลดความดันจนเท่ากับความดันในส่วนใช้ความร้อน ($P_5 = P_6$) และส่งเข้าสู่ส่วนใช้ความร้อนโดยตรง

ในกรณีที่มีความต้องการใช้ไอน้ำสูงสุดในกระบวนการผลิต ไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตจากหม้อไอน้ำจะถูกส่งผ่านวาล์วลดความดันเท่านั้น ($m_5 = m_4$) และไม่มีไอน้ำผ่านกังหัน ($m_6 = 0, m_7 = 0$)

ในกรณีที่ไม่ต้องการใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิต ไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตจากหม้อไอน้ำจะถูกส่งผ่านกังหันและออกสู่คอนเดนเซอร์เท่านั้น ($m_5 = m_6 = 0$) วัฏจักรดำเนินการอย่างเช่นวัฏจักรพลังไอน้ำแบบธรรมดา

สมการใช้คำนวณตามอุปกรณ์ต่างๆ ในรูปที่ 2.9 มีดังต่อไปนี้

$$\text{หม้อไอน้ำ : } \dot{Q}_H = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$$

$$\text{คอนเดนเซอร์ : } \dot{Q}_{rej} = \dot{m}_7(h_7 - h_1)$$

$$\text{ส่วนใช้ความร้อน : } \dot{Q}_p = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_8 h_8$$

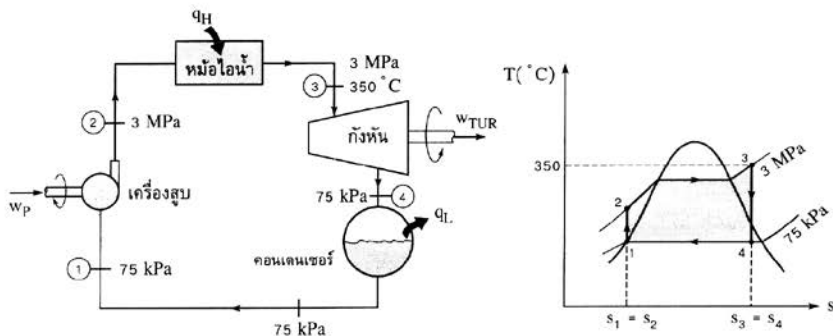
$$\text{กังหันไอน้ำ : } \dot{W}_{TUR} = (\dot{m}_4 - \dot{m}_5)(h_4 - h_6) + \dot{m}_7(h_6 - h_7)$$

ปัญหาและกรณีวิเคราะห์

2.1 โรงจักรกำลังไอน้ำแห่งหนึ่งทำงานตามวัฏจักรแรงดัน กำหนดให้ไอน้ำเข้ากังหันที่ 3 MPa และ 350°C และควบแน่นในคอนเดนเซอร์ที่ความดัน 75 kPa จงหาประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรนี้

แนวการวิเคราะห์

ให้เริ่มหาคุณสมบัติจากสภาวะ (1) ก่อนจนกระทั่งถึงสภาวะ (4) ที่หม้อไอน้ำใช้ $q_H = h_3 - h_2$ ที่คอนเดนเซอร์ $q_L = h_4 - h_1$ และ $\eta_{th} = 1 - (q_L/q_H)$



โรงจักรกำลังไอน้ำตามวัฏจักรแรงดัน

การคำนวณ

อาศัยข้อมูลจากตารางไอน้ำหาคุณสมบัติที่สภาวะต่าง ๆ ดังนี้

สภาวะ (1) : $P_1 = 75 \text{ kPa}$ ในสภาพของเหลวอิ่มตัว จะได้

$$h_1 = h_{f@75\text{kPa}} = 384.39 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = v_{f@75\text{kPa}} = 0.001037 \text{ m}^3/\text{kg}$$

สภาวะ (2) : $P_2 = 3 \text{ MPa}$ และ $s_2 = s_1$

$$\begin{aligned} w_p &= v_1(P_2 - P_1) \\ &= 0.001037(3000 - 75) = 3.03 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 + w_p \\ &= 384.39 + 3.03 = 387.42 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

สภาวะ (3) : $P_3 = 3 \text{ MPa}$, $T_3 = 350^\circ\text{C}$ จะได้

$$h_3 = 3115.3 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = 6.7428 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

สภาวะ (4) : $P_4 = 75 \text{ kPa}$, $s_4 = s_3 = 6.7428 \text{ kJ/kg}$ และ $s_4 < s_{g@75\text{kPa}}$

ดังนั้นอยู่ในบริเวณของผสมเปียก

$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.7428 - 1.213}{6.2434} = 0.886$$

$$h_4 = h_f + x_4 h_{fg} \\ = 384.39 + 0.886(2278.6) = 2403.2 \text{ kJ/kg}$$

หม้อไอน้ำ ; $q_H = h_3 - h_2$
 $= 3115.3 - 387.42 = 2727.88 \text{ kJ/kg}$

คอนเดนเซอร์ ; $q_L = h_4 - h_1$
 $= 2403.2 - 384.39 = 2018.81 \text{ kJ/kg}$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{2018.81}{2727.88} = 0.260 \text{ หรือ } 26\% \quad \text{ตอบ}$$

ข้อควรสังเกต ประสิทธิภาพทางความร้อนอาจหาได้อีกทางหนึ่งจาก

$$w_{TUR} = h_3 - h_4 = 3115.3 - 2403.2 = 712.1 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{NET} = w_{TUR} - w_P = 712.1 - 3.03 = 709.07 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{NET}}{q_H} = \frac{709.07}{2727.88} = 0.26$$

ข้อสรุป

1. นั่นคือโรงจักรกำลังไอน้ำนี้สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปของความร้อน (q_H) มาเป็นงานสุทธิได้เพียง 26 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น สำหรับโรงจักรกำลังไอน้ำจริงซึ่งทำงานอยู่ระหว่างอุณหภูมิและความดันเดียวกันจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่านี้ ทั้งนี้เนื่องจากมีสภาพย้อนกลับไม่ได้

2. อัตราส่วนของงานป้อนกลับ (back work ratio) ของโรงจักรคือ

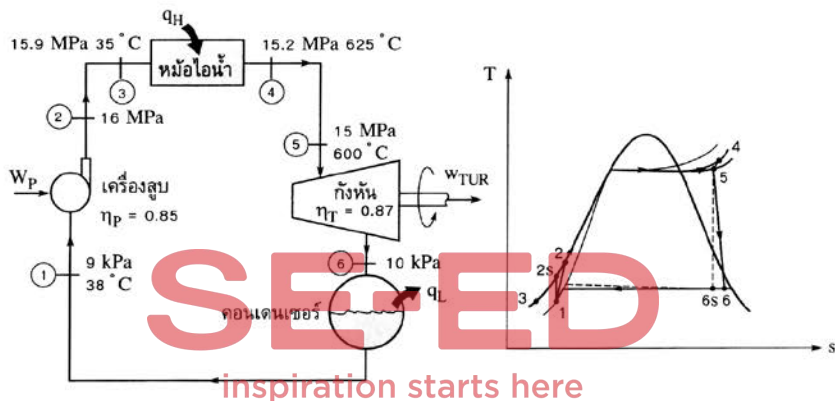
$$r_{bw} = \frac{w_P}{w_{TUR}} = 0.004 \text{ หรือ } 0.4\%$$

อัตราส่วนของงานป้อนกลับที่มีค่าต่ำๆ จะเป็นลักษณะเฉพาะของวัฏจักรกำลังไอน้ำ ตรงกันข้ามกับวัฏจักรกำลังก๊าซซึ่งมี r_{bw} ก่อนข้างสูงคือประมาณ 40 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีงานป้อนกลับไปขับเครื่องอัดอากาศมากกว่า

2.2 วัฏจักรกำลังไอน้ำทำงานเป็นวัฏจักรดังในรูป ถ้ากำหนดให้ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของกังหันและเครื่องสูบลำกับ 87 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จงหา

ก. ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร

ข. กำลังส่งออกสุทธิของวัฏจักรเพื่อกำหนดอัตราการไหลของไอน้ำ 15 kg/s



โรงจักรกำลังไอน้ำเมื่อคำนึงสภาพย้อนกลับไม่ได้ในเครื่องสูบลและกังหัน

แนวทวิเคราะห์

ที่กังหันและเครื่องสูบลงานจริงจากนิยามของประสิทธิภาพไอเซนทรอปิก

การคำนวณ

อาศัยข้อมูลจากตารางไอน้ำหาคุณสมบัติที่สภาวะต่าง ๆ

ก. ประสิทธิภาพทางความร้อน

$$\begin{aligned} \text{เครื่องสูบล ; } w_p &= \frac{w_{s,p}}{\eta_p} = \frac{v_1(P_2 - P_1)}{\eta_p} \\ &= \frac{0.001008(16000 - 9)}{0.85} = 19 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{กังหัน ; } w_{\text{TUR}} &= \eta_T w_{s,\text{TUR}} = \eta_T (h_5 - h_{6s}) \\ &= 0.87(3582.3 - 2115.7) = 1275.9 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{หม้อไอน้ำ ; } q_H &= h_4 - h_3 \\ &= 3645.7 - 146.7 = 3499.0 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}w_{\text{NET}} &= w_{\text{TUR}} - w_P \\ &= 1275.9 - 19 = 1256.9 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_{\text{th}} &= \frac{w_{\text{TUR}}}{q_H} \\ &= \frac{1256.4}{3499.0} = 0.359 \text{ หรือ } 35.9\% \quad \text{ตอบ}\end{aligned}$$

ข้อควรสังเกต ท่านจะพบว่าถ้าไม่มีสภาพย้อนกลับไม่ได้ ประสิทธิภาพทางความร้อนจะสูงกว่าคือ 43 เปอร์เซ็นต์

ข. กำลังผลิตได้ของวัฏจักร

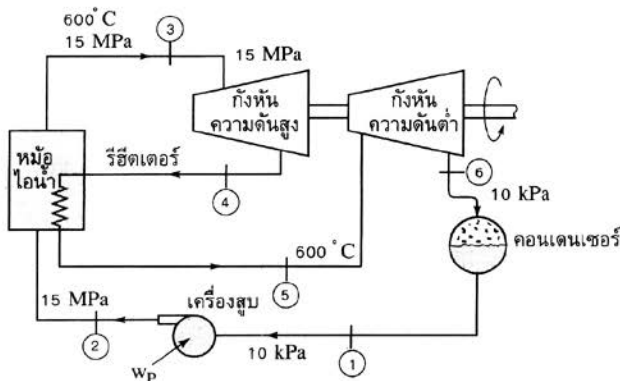
$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{NET}} &= \dot{m} w_{\text{NET}} \\ &= 15(1256.9) = 18.854 \text{ MW} \quad \text{ตอบ}\end{aligned}$$

2.3 วัฏจักรกำลังไอน้ำแรงดันแบบวีธีต กำหนดให้ไอน้ำเข้ากังหันความดันสูงที่ 15 MPa และ 600°C และควบแน่นในคอนเดนเซอร์ความดัน 10 kPa กำหนดให้องค์ประกอบความชื้นในไอน้ำที่ทางออกของกังหันความดันต่ำมีได้ไม่เกิน 10.4 เปอร์เซ็นต์ จงหา

ก. ความดันที่ไอน้ำถูกนำไปให้ความร้อนซ้ำ

ข. ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร

โดยทั้งนี้สมมติให้ไอน้ำถูกให้ความร้อนซ้ำจนถึงอุณหภูมิทางเข้าของกังหันความดันสูง



วัฏจักรแรงดันแบบรีฮีต

แนวการวิเคราะห์

- ก. พิจารณาระหว่างสภาวะ (5) และ (6) โดยเริ่มหาคุณสมบัติที่สภาวะ (6) ดังนั้น สภาวะ (5) จะระบุด้วย T_5 , s_5 และทราบความดันของไอน้ำที่นำไปให้ความร้อนซ้ำ
- ข. พิจารณาหาคุณสมบัติทุกสภาวะที่เหลือทั้งหมด คำนวณ $q_H = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$ และ $q_L = h_6 - h_1$ แต่จะสมการคิดเป็นเครื่องหมายบวก

การคำนวณ

อาศัยข้อมูลจากตารางไอน้ำหาคุณสมบัติที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

ก. ความดันที่สภาวะ (4) และ (5)

สภาวะ (6) ; $P_6 = 10 \text{ kPa}$, $x_6 = 1.0 - 0.104 = 0.896$ จะได้

$$\begin{aligned} s_6 &= s_f + x_6 s_{fg} \\ &= 0.6493 + 0.896(7.5009) = 7.370 \text{ kJ/kg-K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_6 &= h_f + x_6 h_{fg} \\ &= 191.83 + 0.896(2392.8) = 2335.8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

สภาวะ (5) ; $T_5 = 600^\circ\text{C}$, $s_5 = 7.370 \text{ kJ/kg-K}$ ประมาณค่าในช่วงจะได้

$$P_5 = 4.0 \text{ MPa}$$

$$h_5 = 3674.4 \text{ kJ/kg}$$

ความดันที่ไอน้ำถูกนำไปให้ความร้อนซ้ำ 4.0 MPa

ตอบ

ข. ประสิทธิภาพทางความร้อน

สภาวะ (1) ; $P_1 = 10 \text{ kPa}$ ในสภาพของเหลวอิ่มตัว จะได้

$$h_1 = h_{f@10\text{kPa}} = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = v_{f@10\text{kPa}} = 0.001010 \text{ m}^3/\text{kg}$$

สภาวะ (2) ; $P_2 = 15 \text{ MPa}$, $s_2 = s_1$

$$\begin{aligned} w_P &= v_1(P_2 - P_1) \\ &= 0.001010(15000 - 10) = 15.11 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 + w_P \\ &= 191.83 + 15.11 = 206.94 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

สภาวะ (3) ; $P_3 = 15 \text{ MPa}$, $T_3 = 600^\circ\text{C}$ จะได้

$$h_3 = 3582.3 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = 6.6776 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

สภาวะ (4) ; $P_4 = 4 \text{ MPa}$, $s_4 = s_3$ ประมาณค่าในช่วงจะได้

$$h_4 = 3154.3 \text{ kJ/kg}$$

$$T_4 = 375.5^\circ\text{C}$$

หม้อไอน้ำ ;

$$\begin{aligned} q_H &= (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \\ &= (3582.3 - 206.94) + (3674.4 - 3154.3) \\ &= 3895.46 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

คอนเดนเซอร์ ;

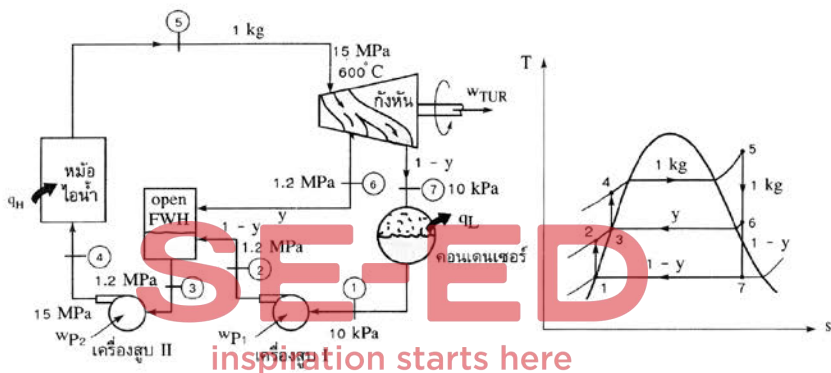
$$\begin{aligned} q_L &= h_6 - h_1 \\ &= 2335.8 - 191.83 = 2143.97 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

$$= 1 - \frac{2143.97}{3895.46} = 0.450 \text{ หรือ } 45\%$$

ตอบ

2.4 โรงจักรกำลังไอน้ำทำงานตามวัฏจักรแรงดันแบบรีเจนเนอเรทีฟโดยใช้เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิดจำนวน 1 ตัว กำหนดให้ไอน้ำไหลเข้ากังหันที่ 15 MPa และ 600°C และควบแน่นจนหมดในคอนเดนเซอร์ที่ความดัน 10 kPa ไอน้ำบางส่วนถูกดึงออกจากกังหันที่ 1.2 MPa และป้อนเข้าเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง จงหาเศษส่วนของไอน้ำที่ถูกดึงออกจากกังหัน และประสิทธิภาพทางความร้อนวัฏจักร



โรงจักรกำลังไอน้ำทำงานตามวัฏจักรรีเจนเนอเรทีฟที่มีเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด

แนวการวิเคราะห์

ให้หาเอนทัลปีของแต่ละสภาวะในวัฏจักร โดยเริ่มจากสภาวะ (1) จนถึง (7) จากนั้นพิจารณาเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงเป็น CV ใช้กฎข้อที่หนึ่งและกฎอนุรักษ์มวลหาเศษส่วนของไอน้ำที่ดึงออก (y) จากนั้นหาประสิทธิภาพจาก $\eta_{th} = 1 - (q_L/q_H)$ โดยที่ $q_H = h_5 - h_4$ และ $q_L = (1 - y)(h_7 - h_1)$

การคำนวณ

อาศัยข้อมูลจากตารางไอน้ำหาคุณสมบัติที่สภาวะต่างๆ ดังนี้

สภาวะ (1) ; $P_1 = 10 \text{ kPa}$ ในสภาพของเหลวอิ่มตัว จะได้

$$h_1 = h_{f@10\text{kPa}} = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = v_{f@10\text{kPa}} = 0.001008 \text{ m}^3/\text{kg}$$

สภาวะ (2) ; $P_2 = 1.2 \text{ MPa}$, $s_2 = s_1$ จะได้

$$\begin{aligned} w_{P1} &= v_1(P_2 - P_1) \\ &= 0.001008(1200 - 10) = 1.20 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 + w_{P1} \\ &= 191.83 + 1.20 = 193.03 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

สภาวะ (3) ; $P_3 = 1.2 \text{ MPa}$ ในสภาพของเหลวอิ่มตัว จะได้

$$h_3 = h_{f@1.2\text{MPa}} = 798.65 \text{ kJ/kg}$$

สภาวะ (4) ; $P_4 = 15 \text{ MPa}$, $s_4 = s_3$ จะได้

$$\begin{aligned} w_{P2} &= v_3(P_4 - P_3) \\ &= 0.001139(15000 - 1200) = 15.72 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_4 &= h_3 + w_{P2} \\ &= 798.65 + 15.72 = 814.37 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

สภาวะ (5) ; $P_5 = 15 \text{ MPa}$, $T_5 = 600^\circ\text{C}$ จะได้

$$h_5 = 3582.3 \text{ kJ/kg}$$

$$s_5 = 6.6776 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

สภาวะ (6) ; $P_6 = 1.2 \text{ MPa}$, $s_6 = 6.6776 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ประมาณค่าใน

ช่วงจะได้

$$h_6 = 2859.5 \text{ kJ/kg}$$

$$T_6 = 218.3^\circ\text{C}$$

สภาวะ (7) ; $P_7 = 10 \text{ kPa}$, $s_7 = 6.6776 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ปรากฏว่า

$s_7 < s_{g@10\text{kPa}}$ ดังนั้น

$$x_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.6776 - 0.6493}{7.5009} = 0.804$$

$$\begin{aligned} h_7 &= h_f + x_7 h_{fg} \\ &= 191.83 + 0.804(2392.8) = 2115.6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง ; ใช้สมการกฎข้อที่หนึ่งและกฎอนุรักษ์ของมวล

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e \text{ และ } \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$

กำหนดให้ y คือเศษส่วนของไอน้ำที่ดึงออกจากกังหัน $y = m_6/m_5$ ดังนั้น

$$yh_6 + (1 - y)h_2 = 1(h_3)$$

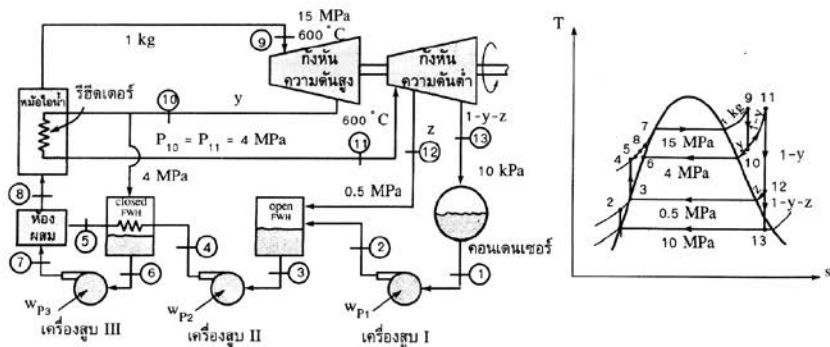
$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = \frac{798.65 - 193.03}{2859.5 - 193.03} = 0.227 \quad \text{ตอบ}$$

หม้อไอน้ำ ; $q_H = h_5 - h_4 = 3582.3 - 814.37 = 2767.93 \text{ kJ/kg}$

คอนเดนเซอร์ ; $q_L = (1 - y)(h_7 - h_1)$
 $= (1 - 0.227)(2115.6 - 191.83) = 1487.1 \text{ kJ/kg}$

ดังนั้น $\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{1487.1}{2767.93}$
 $= 0.463 \text{ หรือ } 46.3\% \quad \text{ตอบ}$

2.5 โรงจักรกำลังไอน้ำทำงานตามวัฏจักรร่วมรีฮิต-รีเจนเนอเรทีฟ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด 1 ตัว เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด 1 ตัว และรีฮีตเตอร์อีก 1 ตัว ดังรูป ไอน้ำเข้ากังหันที่ 15 MPa และ 600 °C และควบแน่นในคอนเดนเซอร์ที่ 10 kPa ไอน้ำบางส่วนถูกดึงออกจากกังหันที่ 4 MPa เพื่อใช้ในเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด ส่วนที่เหลือจะนำเข้ารีฮีตเตอร์ที่ความดันเดียวกัน และทำให้อไอน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 600 °C สมมติให้อไอน้ำควบแน่นหมดในเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยง และจะถูกสูบให้มีความดันถึง 15 MPa ก่อนเข้าผสมกับน้ำเลี้ยงในห้องผสมที่ความดันเดียวกัน ส่วนเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิดจะใช้ไอน้ำในส่วนที่ดึงมาจากกังหันความดันต่ำที่ความดัน 0.5 MPa จงหาเศษส่วนของไอน้ำที่ดึงออกจากกังหันแต่ละตอน และประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร



วัฏจักรร่วมรีฮิต-รีเจนเนอเรทีฟ

แนวการวิเคราะห์

ควรวหาเอนทัลปีตามจุดต่างๆ ในวัฏจักรและงานใช้สูบน้ำ จากนั้นใช้สมการกฎอนุรักษ์ของมวลและพลังงาน สำหรับเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิดและแบบเปิดเพื่อหาเศษส่วนของไอน้ำที่ใช้ (y และ z) ตามลำดับ สำหรับห้องผสมเพื่อหาเอนทัลปีที่จุด 8 ทั้งนี้

$$q_H = (h_9 - h_8) + (1 - y)(h_{11} - h_{10})$$

และ

$$q_L = (1 - y - z)(h_{13} - h_1)$$

การคำนวณ

หาเอนทัลปีในแต่ละสภาวะจากตารางไอน้ำและงานใช้สูบน้ำ

$h_1 = 191.83 \text{ kJ/kg}$	$h_{10} = 3154.3 \text{ kJ/kg}$
$h_2 = 192.32 \text{ kJ/kg}$	$h_{11} = 3674.4 \text{ kJ/kg}$
$h_3 = 640.23 \text{ kJ/kg}$	$h_{12} = 3014.3 \text{ kJ/kg}$
$h_4 = 644.06 \text{ kJ/kg}$	$h_{13} = 2335.8 \text{ kJ/kg}$
$h_5 = 1087.31 \text{ kJ/kg}$	$w_{p1} = 0.49 \text{ kJ/kg}$
$h_6 = 1087.31 \text{ kJ/kg}$	$w_{p2} = 0.826 \text{ kJ/kg}$
$h_7 = 1101.08 \text{ kJ/kg}$	$w_{p3} = 13.77 \text{ kJ/kg}$
$h_9 = 3582.3 \text{ kJ/kg}$	

เศษส่วนของไอน้ำที่ดึงออกจากกังหันนั้น จะคำนวณจากสมการกฎอนุรักษ์มวลและกฎข้อที่หนึ่งสำหรับกระบวนการ SSSF ในเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแต่ละตัว

เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบปิด จะได้

$$y(h_{10} - h_6) = (1 - y)(h_5 - h_4)$$

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{h_5 - h_4}{(h_{10} - h_6) + (h_5 - h_4)} \\
 &= \frac{1087.31 - 644.06}{(3154.3 - 1087.31) + (1087.31 - 644.06)} \\
 &= 0.177
 \end{aligned}$$

∴ เศษส่วนของไอน้ำที่ดึงออกจากกังหันความดันสูงเท่ากับ 0.177 kg ต่อ 1 kg ของไอน้ำที่ผลิตได้ ตอบ

เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด จะได้

$$\begin{aligned} zh_{12} + (1 - y - z)h_2 &= (1 - y)h_3 \\ z &= \frac{(1 - y)(h_3 - h_2)}{h_{12} - h_2} \\ &= \frac{(1 - 0.177)(640.23 - 192.32)}{(3014.13 - 192.32)} = 0.131 \end{aligned}$$

∴ เศษส่วนของไอน้ำที่ดึงออกจากกังหันความดันต่ำเท่ากับ 0.131 kg ต่อ 1 kg ของไอน้ำที่ผลิตได้ ตอบ

ห้องผสม ; ใช้กฎอนุรักษ์มวลและกฎข้อที่หนึ่งสำหรับกระบวนการ SSSF จะได้

$$\begin{aligned} (1)h_8 &= (1 - y)h_5 + yh_7 \\ h_8 &= (1 - 0.177)(1087.31) + 0.177(1101.08) \\ &= 1089.7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

หม้อไอน้ำ ;

$$\begin{aligned} q_H &= (h_9 - h_8) + (1 - y)(h_{11} - h_{10}) \\ &= (3582.5 - 1089.7) + (1 - 0.177)(3674.4 - 3154.3) \\ &= 2920.8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

คอนเดนเซอร์ ;

$$\begin{aligned} q_L &= (1 - y - z)(h_{13} - h_1) \\ &= (1 - 0.177 - 0.131)(2335.8 - 191.83) \\ &= 1483.6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_L}{q_H}$$

$$= 1 - \frac{1483.6}{2920.8} = 0.492 \text{ หรือ } 49.2\%$$

ตอบ

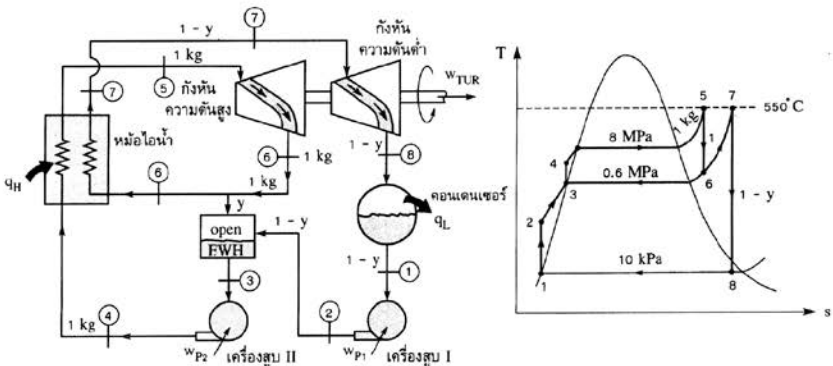
ข้อควรสังเกต เราสามารถคำนวณประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรได้อีกหนทางหนึ่งคือ

$$\eta_{th} = \frac{w_{NET}}{q_H} = \frac{w_{TUR} - w_P}{q_H}$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } w_{TUR} &= (h_9 - h_{10}) + (1 - y)(h_{11} - h_{12}) + (1 - y - z)(h_{12} - h_{13}) \\ w_P &= (1 - y - z)w_{P1} + (1 - y)w_{P2} + yw_{P3} \end{aligned}$$

2.6 โรงจักรกำลังไอน้ำในอุดมคติออกแบบให้ทำงานภายใต้วัฏจักรร่วมรีฮีต-รีเจเนอเรทีฟ และให้กำลังส่งออกสุทธิ 10 MW ไอน้ำเข้ากังหันความดันสูงที่ 8 MPa, 550 °C และขยายตัวสู่ความดัน 0.6 MPa ซึ่งที่ความดันนี้ตั้งไอน้ำบางส่วนป้อนเข้าสู่เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด และที่เหลือถูกให้ความร้อนซ้ำถึงอุณหภูมิ 550 °C ไอน้ำที่ถูกให้ความร้อนซ้ำแล้วจะขยายตัวในกังหันความดันต่ำจนถึง 10 kPa

- จงหาอัตราการไหลของไอน้ำที่เข้าสู่กังหัน
- จงหาขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสูบแต่ละตัว
- ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นของน้ำหล่อเย็นคอนเดนเซอร์มีค่าจำกัดสูงสุดเท่ากับ 10 °C จงหาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นนั้น
- ถ้าความเร็วของไอน้ำในท่อต่อระหว่างกังหันและคอนเดนเซอร์มีค่าจำกัดสูงสุด 100 m/s จงหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดังกล่าว



วัฏจักรร่วมรีฮีต-รีเจเนอเรทีฟ

แนวการวิเคราะห์

ควรหาเอนทัลปีตามจุดต่างๆ ในวัฏจักรและงานใช้สูบน้ำต่อ 1 kg ของไอน้ำ ใช้กฎอนุรักษ์ของมวลและพลังงานกับเครื่องสูบน้ำเลี้ยงเพื่อหาเศษส่วนของไอน้ำที่ใช้ (y)

ก. หาอัตราการไหลจาก $\dot{m} = \dot{W}_{NET}/w_{NET}$

ข. เครื่องสูบน้ำแต่ละตัว $\dot{W}_{P1} = \dot{m}(1 - y)w_{P1}$ และ $\dot{W}_{P2} = \dot{m}w_{P2}$

ค. หาอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่น้ำหล่อเย็นจาก $\dot{Q}_L = \dot{m}(1 - y)(h_8 - h_1) = \dot{m}_w C_p \Delta T$

ง. ใช้สมการ $A_8 v_8 = \dot{m}_8 v_8$

การคำนวณ

อาศัยข้อมูลจากตารางไอน้ำหาคูสมบัติที่สภาวะต่างๆ และหางานใช้สูบน้ำ

$$h_1 = h_{f@10\text{kPa}} = 191.8 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = v_{f@10\text{kPa}} = 0.00101 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$w_{P1} = v_1 (P_2 - P_1) = 0.00101(600 - 10) = 0.6 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{P1} = 191.8 + 0.6 = 192.4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = h_{f@0.6\text{MPa}} = 670.6 \text{ kJ/kg}$$

$$v_3 = v_{f@0.6\text{MPa}} = 0.001101 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$w_{P2} = v_3 (P_4 - P_3) = 0.001101(8000 - 600) = 8.1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 + w_{P2} = 670.6 + 8.1 = 678.7 \text{ kJ/kg}$$

$$h_5 = 3521.0 \text{ kJ/kg} \text{ (8 MPa, } 550^\circ\text{C)}$$

$$s_5 = 6.8778 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$h_6 = 2810.0 \text{ kJ/kg} \text{ (0.6 MPa, } 6.8778 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K)}$$

$$T_6 = 182.3^\circ\text{C}$$

$$h_7 = 3591.9 \text{ kJ/kg (0.6 MPa, } 550^\circ\text{C)}$$

$$s_7 = 8.1348 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$s_8 = s_f + x_8 s_{fg}$$

$$x_8 = \frac{8.1348 - 0.6493}{7.5009} = 0.9979$$

$$\begin{aligned} h_8 &= h_f + x_8 h_{fg} \\ &= 191.83 + 0.9979(2392.8) \\ &= 2579.7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_8 &= v_f + x_8 v_{fg} \\ &= 0.00101 + 0.9979(14.6689) \\ &= 14.639 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

เครื่องสูบน้ำแบบเปิด ; ใช้กฎอนุรักษ์มวลและกฎข้อที่หนึ่งสำหรับกระบวนการ SSSF จะได้

$$\begin{aligned} y h_6 + (1 - y) h_2 &= (1) h_3 \\ \therefore y &= \frac{(h_3 - h_2)}{(h_6 - h_2)} = \frac{(670.6 - 192.4)}{(2810.0 - 192.4)} = 0.1827 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กังหันไอน้ำ ; } w_{\text{TUR}} &= (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_7 - h_8) \\ &= (3521 - 2810) + (1 - 0.1827)(3591.9 - 2579.7) \\ &= 1538.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เครื่องสูบ ; } w_P &= (1 - y)w_{P1} + (1)w_{P2} \\ &= (1 - 0.1827)(0.6) + (1)(8.1) = 8.6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{\text{NET}} &= w_{\text{TUR}} - w_P \\ &= 1538.2 - 8.6 = 1529.7 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

ก. อัตราการไหลของไอน้ำ

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{\dot{W}_{\text{NET}}}{w_{\text{NET}}} \\ &= \frac{10000}{1529.7} = 6.53 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

ตอบ

ข. กำลังใช้ขับเคลื่อน

$$\begin{aligned}\dot{W}_{P_1} &= (1 - y)\dot{m}w_{P_1} \\ &= (1 - 0.1827)(6.53)(0.6) \\ &= 3.202 \text{ kW}\end{aligned}$$

ตอบ

$$\begin{aligned}\dot{W}_{P_2} &= (1)\dot{m}w_{P_2} \\ &= (6.53)(8.1) = 52.89 \text{ kW}\end{aligned}$$

ตอบ

ค. อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

$$\begin{aligned}\text{คอนเดนเซอร์ ; } q_L &= (1 - y)(h_g - h_f) \\ \dot{Q}_L &= \dot{m}(1 - y)(h_g - h_f) \\ &= 6.53(1 - 0.1827)(2579.7 - 191.83) \\ &= 12744 \text{ kW}\end{aligned}$$

น้ำหล่อเย็น ; $\dot{Q}_L = \dot{m}_w(h_c - h_i) = \dot{m}_w C_p \Delta T$

$$\therefore C_p = 4.184 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}, \Delta T = 10 \text{ K}$$

$$12744 = \dot{m}_w(4.184)(10)$$

$$\dot{m}_w = 304.6 \text{ kg/s}$$

ตอบ

ง. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อระหว่างกังหันกับคอนเดนเซอร์

$$\begin{aligned}A_g v_g &= \dot{m}_g v_g = \dot{m}(1 - y)v_g \\ A_g &= \frac{6.53(1 - 0.1827)(14.639)}{100} = 0.7813 \text{ m}^2\end{aligned}$$

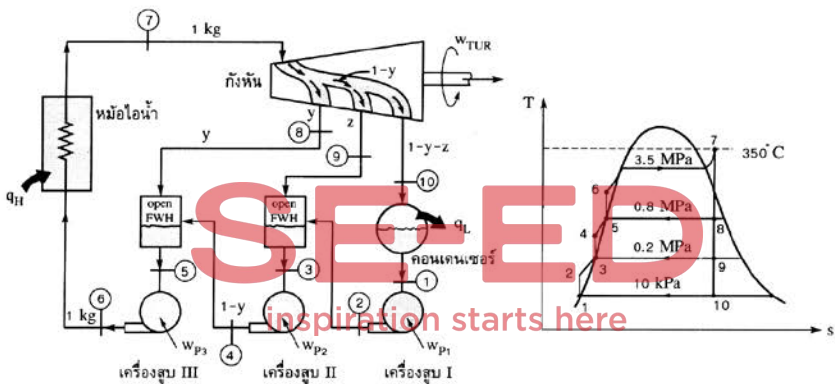
$$\frac{\pi}{4} d^2 = A_g \therefore d = \sqrt{\frac{4A_g}{\pi}}$$

$$\therefore d = \sqrt{\frac{4(0.7813)}{\pi}}$$

$$= 0.9974 \text{ m} = 99.7 \text{ cm}$$

ตอบ

2.7 พิจารณาวัฏจักรรีเจนเนอเรทีฟในทางอุดมคติของไอน้ำ ซึ่งไอน้ำเข้าสู่กังหันที่ 3.5 MPa, 350°C และควบแน่นในคอนเดนเซอร์ที่ 10 kPa ไอน้ำถูกดึงออกจากกังหันที่ 0.8 MPa และที่ 0.2 MPa เพื่อให้อุ่นน้ำเลี้ยงของหม้อไอน้ำภายในเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด 2 เครื่อง น้ำเลี้ยงออกจากเครื่องอุ่นแต่ละเครื่องที่อุณหภูมิเดียวกันกับคอนเดนเซต ใช้เครื่องสูบน้ำที่ออกจากคอนเดนเซอร์ 1 ตัว และสูบน้ำที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนอีก 2 ตัว จงคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนและงานสุทธิต่อกิโลกรัมของไอน้ำ



วัฏจักรรีเจนเนอเรทีฟที่ใช้เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงแบบเปิด 2 ตัว

แนวการวิเคราะห์

หาเอนทัลปีตามจุดต่างๆ ในวัฏจักรและงานใช้สูบน้ำต่อ 1 kg ของไอน้ำ ใช้กฎอนุรักษ์ของมวลและพลังงานกับเครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงทั้งสอง หาเศษส่วนของไอน้ำที่ดึงจากกังหัน (y และ z) จากนั้นหางานสุทธิของวัฏจักรและนำไปคำนวณประสิทธิภาพทางความร้อนต่อไป

การคำนวณ

หาเอนทัลปีในแต่ละสภาวะจากตารางไอน้ำและงานใช้สูบน้ำต่อ 1 kg ของไอน้ำ

$$h_1 = h_{f@10\text{kPa}} = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

$$v_1 = v_{f@10\text{kPa}} = 0.00101 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned} w_{P1} &= v_1(P_2 - P_1) = 0.00101(200 - 10) \\ &= 0.2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_2 &= h_1 + w_{P1} = 191.83 + 0.2 \\&= 192 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$h_3 = h_{f@0.2\text{MPa}} = 504.7 \text{ kJ/kg}$$

$$v_3 = v_{f@0.2\text{MPa}} = 0.001061 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned}w_{P2} &= v_3(P_4 - P_3) = 0.001601(800 - 200) \\&= 0.64 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_4 &= h_3 + w_{P2} = 504.7 + 0.64 \\&= 505.3 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$h_5 = h_{f@0.8\text{MPa}} = 721.11 \text{ kJ/kg}$$

$$v_5 = v_{f@0.8\text{MPa}} = 0.001115 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned}w_{P3} &= v_5(P_6 - P_5) = 0.001115(3500 - 800) \\&= 3 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_6 &= h_5 + w_{P3} = 721.11 + 3 \\&= 724.1 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$h_7 = 3104.0 \text{ kJ/kg (3.5 MPa, } 350^\circ\text{C)}$$

$$s_7 = 6.6579 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$s_8 = s_f + x_8 s_{fg@0.8\text{MPa}}$$

$$6.6579 = 2.0462 + 4.6166x_8$$

$$x_8 = 0.9989$$

$$\begin{aligned}h_8 &= h_f + x_8 h_{fg} \\&= 721.11 + 0.9989(2048) \\&= 2766.9 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$s_9 = s_f + x_9 s_{fg@0.2\text{MPa}}$$

$$6.6579 = 1.5301 + 5.5970x_9$$

$$x_9 = 0.9162$$

$$\begin{aligned}h_9 &= h_f + x_9 h_{fg} \\&= 504.7 + 0.9162(2201.9) \\&= 2522.1 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s_{10} &= s_f + x_{10}s_{fg@10\text{kPa}} \\
 6.6579 &= 0.6493 + 7500x_{10} \\
 x_{10} &= 0.8011 \\
 h_{10} &= h_f + x_{10}h_{fg} \\
 &= 191.83 + 0.8011(2392.8) \\
 &= 2108.7 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงที่ความดันสูง ใช้กฎอนุรักษ์มวลและกฎข้อที่หนึ่งสำหรับกระบวนการ SSSF จะได้

$$\begin{aligned}
 yh_8 + (1-y)h_4 &= (1)h_5 \\
 y &= \frac{(h_5 - h_4)}{(h_8 - h_4)} = \frac{(721.1 - 505.3)}{(2766.9 - 505.3)} = 0.0954
 \end{aligned}$$

เครื่องอุ่นน้ำเลี้ยงที่ความดันต่ำ จะได้

$$\begin{aligned}
 (1-y-z)h_2 + zh_9 &= (1-y)h_3 \\
 z &= \frac{(1-y)(h_3 - h_2)}{(h_9 - h_2)} \\
 &= \frac{(1 - 0.0954)(504.7 - 192.0)}{(2522.1 - 192.0)} = 0.1214
 \end{aligned}$$

กังหัน ;

$$\begin{aligned}
 w_{\text{TUR}} &= h_7 - h_8 + (1-y)(h_8 - h_9) + (1-y-z)(h_9 - h_{10}) \\
 &= (3104 - 2766.9) + 0.9046(2766.9 - 2522.1) \\
 &\quad + 0.7832(2522.1 - 2108.7) \\
 &= 882.3 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

เครื่องสูบ ;

$$\begin{aligned}
 w_p &= (1-y-z)w_{P1} + (1-y)w_{P2} + w_{P3} \\
 &= 0.7832(0.2) + 0.9046(0.64) + 3.0 \\
 &= 3.7 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{\text{NET}} &= w_{\text{TUR}} - w_p \\
 &= 882.3 - 3.7 = 878.6 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

ตอบ

หม้อไอน้ำ ;

$$q_H = h_7 - h_6$$

$$= 3104.0 - 724.1 = 2379.9 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{NET}}{q_H}$$

$$= \frac{878.6}{2379.9} = 0.37 \text{ หรือ } 37\%$$

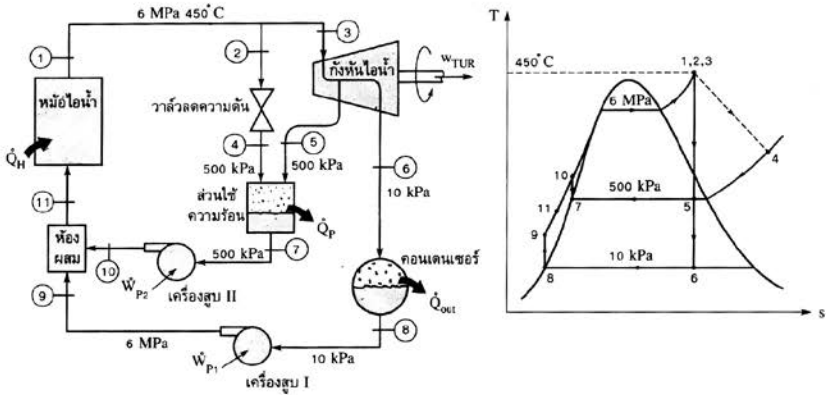
ตอบ

2.8 วัฏจักรโคเจนอเรชัน ในภาวะปกติไอน้ำถูกส่งไปยังกังหันไอน้ำที่ 6 MPa, 450°C หลังจากไอน้ำผ่านกังหันตอนแรกจะถูกดึงไปใช้ในส่วนใช้ความร้อนในกระบวนการผลิตที่ความดัน 500 kPa ส่วนไอน้ำที่เหลือจะผ่านกังหันตอนที่สองและออกสู่คอนเดนเซอร์ที่ความดัน 10 kPa และถูกสูบผ่านเข้าสู่ห้องผสมความดัน 6 MPa ในเวลาที่มีความต้องการใช้ไอน้ำสูงในส่วนใช้ความร้อนในกระบวนการผลิต ไอน้ำบางส่วนจะผ่านวาล์วลดความดันถึงความดัน 500 kPa และส่งเข้าในส่วนใช้ความร้อนโดยตรง ไอน้ำบางส่วนถูกดึงออกในปริมาณหนึ่งซึ่งทำให้ไอน้ำออกจากส่วนใช้ความร้อนอยู่ในสภาพของเหลวอิ่มตัวที่ความดัน 500 kPa พอตี และสูบเข้าสู่ห้องผสมต่อไป กำหนดอัตราการผลิตไอน้ำเท่ากับ 15 kg/s ถ้าหากไม่คำนึงถึงความดันลดและความร้อนสูญเสียของไอน้ำไหลผ่านท่อส่ง และสมมติให้ไอน้ำไหลผ่านกังหันและเครื่องสูบเป็นกระบวนการไอเซนทรอปิก จงคำนวณหา

- ก. อัตราการใช้ความร้อนสูงสุดของส่วนใช้ความร้อน
- ข. กำลังงานสุทธิที่วัฏจักรผลิตได้และประสิทธิภาพใช้ประโยชน์ร่วม เมื่อวัฏจักรไม่ใช้ส่วนใช้ความร้อน
- ค. อัตราการใช้ความร้อนของส่วนใช้ความร้อน และประสิทธิภาพใช้ประโยชน์ร่วม เมื่อไอน้ำปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของไอน้ำที่ผลิตได้นั้นผ่านเข้าวาล์วลดความดันและส่งเข้าส่วนใช้ความร้อนโดยตรง และดึงไอน้ำออกจากกังหันที่ 500 kPa ในปริมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของไอน้ำที่ผลิตได้

แนวการวิเคราะห์

ไล่หาเอนทัลปีของไอน้ำทุกๆ จุดที่เกี่ยวข้อง การใช้ความร้อนสูงสุดของส่วนใช้ความร้อนนั้นจะไม่มีไอน้ำผ่านกังหันเลย ถ้าหากใช้ไอน้ำร่วมแบบโคเจนอเรชันจะคิดสมมูลมวลในส่วนที่นำไปใช้ในส่วนใช้ความร้อนและผ่านกังหัน ใช้กฎข้อที่หนึ่งคำนวณความร้อนที่นำไปใช้ในส่วนใช้ความร้อน



การคำนวณ

ที่ 10 kPa ; $v_8 = 0.00101 \text{ m}^3/\text{kg}$

$h_8 = 191.83 \text{ kJ/kg}$

ที่ 500 kPa ; $v_7 = 0.001093 \text{ m}^3/\text{kg}$

$h_7 = 640.23 \text{ kJ/kg}$

ที่ 450°C, 6 MPa ; $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 3301.8 \text{ kJ/kg}$

$s_5 = s_1 = s_6 = 6.7193 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

ที่ 500 kPa ; $s_5 = s_f + x_5 s_{fg}$

$6.7193 = 1.8607 + 4.9606 x_5$

$\therefore x_5 = 0.979$

$h_5 = h_f + x_5 h_{fg}$

$= 640.23 + 0.979(2108.5) = 2704.45 \text{ kJ/kg}$

ที่ 10 kPa ; $s_6 = s_f + x_6 s_{fg}$

$6.7193 = 0.6493 + 7.5009 x_6$

$x_6 = 0.809$

$h_6 = h_f + x_6 h_{fg}$

$= 191.83 + (0.809)(2392.8) = 2127.60 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned}
 w_{P_1} &= v_8(P_9 - P_8) \\
 &= 0.00101(6000 - 10) = 6.0499 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{P_2} &= v_7(P_{10} - P_7) \\
 &= 0.001093(6000 - 500) = 6.0115 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_9 &= h_8 + w_{P_1} \\
 &= 191.83 + 6.0499 = 197.88 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{10} &= h_7 + w_{P_2} \\
 &= 640.23 + 6.0115 = 646.24 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

ก. อัตราการใช้ความร้อนสูงสุด

พิจารณาเมื่อไอน้ำทั้งหมดที่ผลิตได้ถูกทอเทิลและส่งไปยังส่วนใช้ความร้อน โดยไม่มีไอน้ำส่งเข้ากังหัน

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_{p, \max} &= \dot{m}_1(h_7 - h_4) \\
 &= 15(640.23 - 3301.8) \\
 &= -39923.5 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

ตอบ

เนื่องจากไม่มีความร้อนถ่ายเทที่คอนเดนเซอร์ และสมมติว่าไม่มีความร้อนสูญเสียตามอุปกรณ์และท่อส่ง จะพบว่า $\varepsilon_u = 100$ เปอร์เซนต์

ข. ในกรณีที่ไม่มีความต้องการไอน้ำในส่วนใช้ความร้อน

ไอน้ำจะผ่านเข้ากังหันและขยายตัวจนถึงความดันคอนเดนเซอร์ ในที่นี้ $\dot{m}_3 = \dot{m}_6 = \dot{m}_1 = 15 \text{ kg/s}$ และ $\dot{m}_2 = \dot{m}_5 = 0$

$$\begin{aligned}
 -\dot{W}_{TUR} &= \dot{m}_1(h_6 - h_3) \\
 &= 15(2127.60 - 3301.8)
 \end{aligned}$$

$$\dot{W}_{TUR} = 17613 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_P &= \dot{W}_{P_1} + \dot{W}_{P_2} \\
 &= \dot{m}_1 w_{P_1} + \dot{m}_5 w_{P_2} \\
 &= 15(6.0499) + 0 = 90.75 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{NET}} &= \dot{W}_{\text{TUR}} - \dot{W}_{\text{P}} \\ &= 17613 - 90.75 = 17522.25 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{H}} &= \dot{m}_1(h_1 - h_{11}) = \dot{m}_1(h_1 - h_9) \\ &= 15(3301.8 - 197.88) = 46558.8 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{u}} &= \frac{\dot{W}_{\text{NET}} + \dot{Q}_{\text{P}}}{\dot{Q}_{\text{H}}} \\ &= \frac{17522.25 + 0}{46558.8} = 0.38 \text{ หรือ } 38\% \quad \text{ตอบ}\end{aligned}$$

ค. เมื่อมีการใช้ร่วมทั้งกังหันและส่วนใช้ความร้อน

เนื่องจาก $\dot{m}_4 = 0.10(15) = 1.5 \text{ kg/s}$

$$\dot{m}_5 = 0.70(15) = 10.5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 = 12.0 \text{ kg/s}$$

ใช้กฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์กับส่วนใช้ความร้อนภายใต้ SSSF โดยที่ $\dot{W}_{\text{CV}} = \Delta \text{KE} = \Delta \text{PE} = 0$ ดังนั้น

inspiration starts here

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{P}} &= \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_5 h_5 \\ &= 12.0(640.23) - 1.5(3301.8) - 10.5(2704.45) \\ &= -25666.7 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{\text{P}} = 25666.7 \text{ kW (ความร้อนที่ให้กับส่วนใช้ความร้อน)}$$

ตอบ

ประสิทธิภาพใช้ประโยชน์ร่วมในกรณีวัฏจักรโคเจนเนอเรชัน

$$\therefore \dot{m}_3 = 15 - 1.5 = 13.5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_6 = 13.5 - \dot{m}_5 = 13.5 - 10.5 = 3 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{TUR}} &= \dot{m}_3(h_3 - h_5) + \dot{m}_6(h_5 - h_6) \\ &= 13.5(3301.8 - 2704.45) + 3(2704.45 - 2127.6) \\ &= 9794.78 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_P &= \dot{W}_{P1} + \dot{W}_{P2} = \dot{m}_1 w_{P1} + \dot{m}_7 w_{P2} \\
 &= 3(6.0499) + 12(6.0115) = 90.288 \text{ kW} \\
 \dot{W}_{NET} &= 9794.78 - 90.288 = 9704.5 \text{ kW} \\
 \dot{Q}_H &= \dot{m}_1 (h_1 - h_{11}) = 46558.8 \text{ kW} \\
 \varepsilon_u &= \frac{\dot{W}_{NET} + \dot{Q}_P}{\dot{Q}_H} \\
 &= \frac{9704.5 + 25666.7}{46558.8} = 0.76 \text{ หรือ } 76\% \quad \text{ตอบ}
 \end{aligned}$$

วัฏจักรกำลังก๊าซ

2.5 วัฏจักรกำลังมาตรฐานของอากาศ

สมมติฐานที่ใช้ในวัฏจักรมาตรฐานของอากาศคือ

1. มวลของของไหลทำงานคงที่ตลอดทั้งวัฏจักร และพิจารณาให้อากาศเป็นก๊าซอุดมคติตลอดทั้งวัฏจักร
2. ทุกๆ กระบวนการในวัฏจักรนั้นย้อนกลับได้ภายใน
3. กระบวนการเผาไหม้นั้นแทนด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก
4. กระบวนการขับไอเสียออก (exhaust process) นั้นแทนด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อให้อากาศหรือสารทำงานกลับคืนสู่สภาวะเริ่มต้น
5. กำหนดให้ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศคงที่

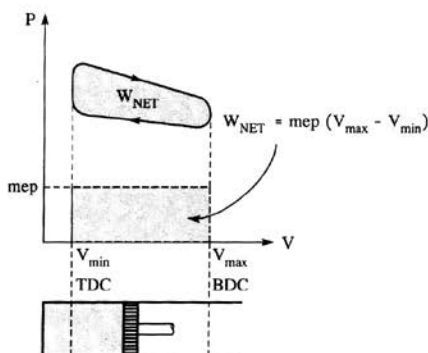
2.5.1 เครื่องยนต์แบบลูกสูบชัก

อัตราส่วนการอัด (r) และความดันยังผลเฉลี่ย (mep) คำนวณจาก

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_{BDC}}{V_{TDC}} \quad (2.19)$$

$$\text{mep} = \frac{W_{\text{NET}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}$$

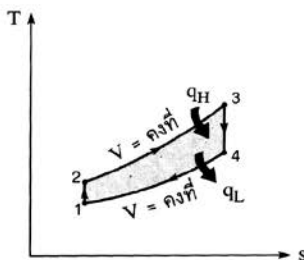
หน่วยเป็น kPa (2.20)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง W_{NET} ตลอดวัฏจักรกับ mep

2.5.2 วัฏจักรออตโตมาตรฐานของอากาศ

วัฏจักรออตโตเป็นวัฏจักรในอุดมคติสำหรับเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในซึ่งจุดระเบิดด้วยหัวเทียน ประกอบด้วยกระบวนการย้อนกลับได้ภายใน 4 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการอัดแบบไอเซนทรอปิก (1-2) กระบวนการรับความร้อนขณะปริมาตรคงที่ (2-3) กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนทรอปิก (3-4) และกระบวนการถ่ายความร้อนทิ้งขณะปริมาตรคงที่ (4-1) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพ T-s สำหรับวัฏจักรออตโตในอุดมคติ

$$q_H = C_v(T_3 - T_2) \quad (2.21)$$

$$q_L = C_v(T_4 - T_1) \quad (2.22)$$

$$\eta_{\text{th, Otto}} = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (2.23)$$

โดยที่

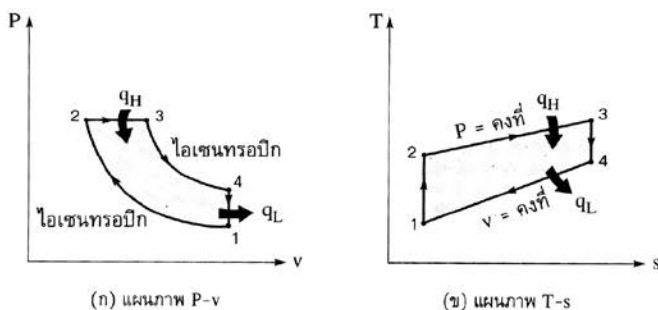
$$r = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \quad (2.24)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad (2.25)$$

เมื่อ k คือ อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ C_p/C_v

2.5.3 วัฏจักรดีเซลมาตรฐานของอากาศ

วัฏจักรดีเซลมาตรฐานของอากาศนี้เป็นวัฏจักรในอุดมคติสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล มีลักษณะคล้ายคลึงกับวัฏจักรออตโต ที่แตกต่างกันก็คือในวัฏจักรดีเซลจะรับความร้อนภายใต้ความดันคงที่ ดังรูปที่ 2.12 และมีสมการคำนวณดังนี้



รูปที่ 2.12 วัฏจักรดีเซลมาตรฐานของอากาศ

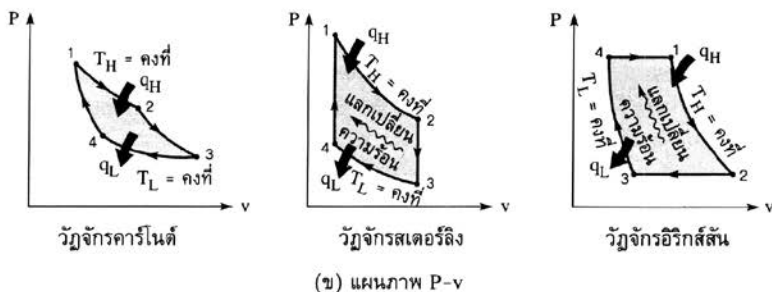
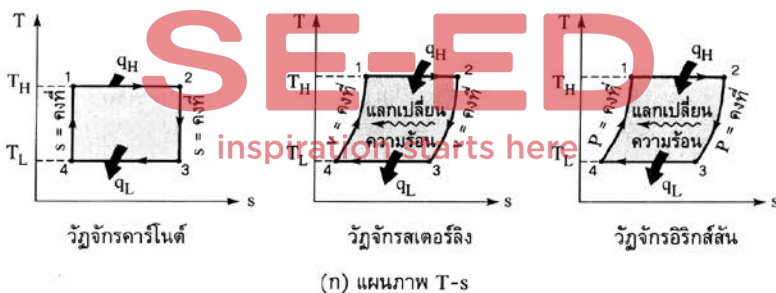
$$q_H = C_p(T_3 - T_2) \quad (2.26)$$

$$q_L = C_v(T_4 - T_1) \quad (2.27)$$

$$\eta_{th,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad (2.28)$$

โดยที่ r คืออัตราส่วนการอัด ($r = v_1/v_2$) และ r_c คืออัตราส่วนของปริมาตรกระบอกสูบหลังการเผาไหม้ต่อปริมาตรกระบอกสูบก่อนการเผาไหม้ ($r_c = V_3/V_2 = v_3/v_2$) บางทีเรียกว่าอัตราส่วนคัตออฟ (cutoff ratio)

2.5.4 วัฏจักรสเตอร์ลิงและอิริกส์สัน



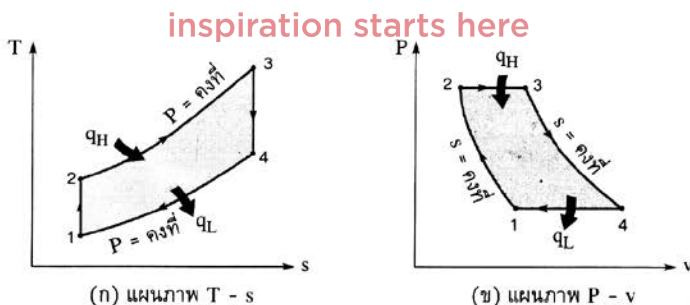
รูปที่ 2.13 แผนภาพ T-s และแผนภาพ P-v แสดงวัฏจักรคาร์โนต์ สเตอร์ลิง และอิริกส์สัน

ทั้งวัฏจักรสเตอร์ลิงและวัฏจักรอิริกส์สันนั้นเป็นวัฏจักรย้อนกลับได้ ซึ่งกระบวนการรับความร้อนและถ่ายความร้อนทั้งอยู่ภายใต้อุณหภูมิคงที่ที่ T_H และ T_L ตามลำดับ ส่วนสองกระบวนการที่เหลือจะเป็นกระบวนการเอนโทรปีภายใต้ปริมาตรคงที่สำหรับวัฏจักรสเตอร์ลิง และกระบวนการเอนโทรปีภายใต้ความดันคงที่สำหรับวัฏจักรอิริกส์สันดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นประสิทธิภาพทางความร้อน

$$\eta_{\text{th,Stirling}} = \eta_{\text{th,Ericsson}} = \eta_{\text{th,Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.29)$$

2.5.5 วัฏจักรไบริตัน

วัฏจักรไบริตันมาตรฐานของอากาศเป็นวัฏจักรในอุดมคติสำหรับกังหันก๊าซอย่างง่าย โดยประกอบด้วย 4 กระบวนการย้อนกลับได้ดังรูปที่ 2.14 กระบวนการอัดตัวแบบไอเซน-ทรอปิกในคอมเพรสเซอร์ (1-2) กระบวนการรับความร้อนภายใต้ความดันคงที่ในห้องเผาไหม้ (2-3) กระบวนการขยายตัวแบบไอเซนทรอปิกในกังหันก๊าซ (3-4) และกระบวนการถ่ายความร้อนทั้งภายใต้ความดันคงที่ (4-1) มีสมการคำนวณดังนี้



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงวัฏจักรไบริตัน

$$q_H = C_p(T_3 - T_2) \quad (2.30)$$

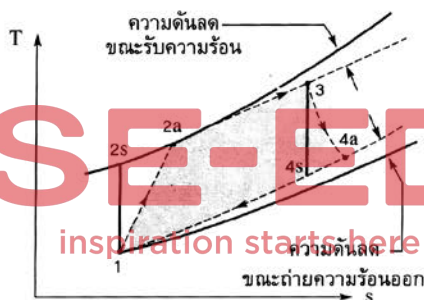
$$q_L = C_p(T_4 - T_1) \quad (2.31)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4} \quad (2.32)$$

$$\eta_{\text{Bray}} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \quad (2.33)$$

โดยที่ r_p คือ อัตราส่วนความดัน $r_p = P_2/P_1$

เครื่องยนต์กังหันก๊าซจริงจะแตกต่างไปจากวัฏจักรในอุดมคติ เนื่องจากมีสภาพย้อนกลับไม่ได้ภายในคอมเพรสเซอร์และกังหัน และมีความดันลดตามท่อส่ง ห้องเผาไหม้ และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่ 2.15 และอาศัยนิยามของประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกดังนี้

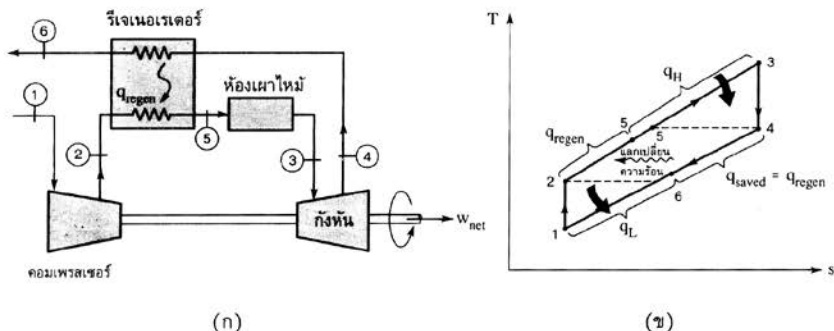


รูปที่ 2.15 วัฏจักรกังหันก๊าซจริง

$$\eta_{\text{COMP}} = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (2.34)$$

$$\eta_{\text{TUR}} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (2.35)$$

2.5.6 วัฏจักรไบรตันที่มีรีเจนเนอเรเตอร์



รูปที่ 2.16 วัฏจักรไบรตันที่มีรีเจนเนอเรเตอร์

สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ทางออกของกังหันนั้นมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง จึงนำไปให้ความร้อนต่ออากาศความดันสูงด้านทางอัดของคอมเพรสเซอร์ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน ซึ่งอุปกรณ์ส่วนนี้ก็คือรีเจนเนอเรเตอร์ รูปที่ 2.16 แสดงวัฏจักรไบรตันที่มีรีเจนเนอเรเตอร์โดยก๊าซไอเสียเข้ารีเจนเนอเรเตอร์ที่สภาวะ (4) และออกที่สภาวะ (6) ส่วนอากาศทางด้านอัดจะเข้าที่สภาวะ (2) และออกที่สภาวะ (5) ในทางปฏิบัติ $T_5 < T_4$ เสมอ ดังนั้นประสิทธิภาพของรีเจนเนอเรเตอร์

$$\eta_{\text{regen}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \approx \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (2.36)$$

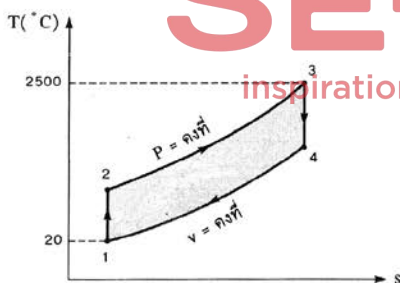
ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร

$$\eta_{\text{th,regen}} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3} \right) \Gamma_p^{(k-1)/k} \quad (2.37)$$

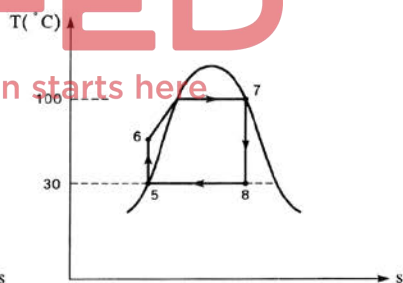
ปัญหาและการวิเคราะห์

2.9 วัฏจักรแรงดันแบบง่ายมีฟร็อน-12 เป็นของไหลทำงาน ซึ่งใช้เป็นวัฏจักรท้ายสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ขับเคลื่อนเจเนอเรเตอร์ (ไอเสียจากวัฏจักรดีเซลใช้เป็นแหล่งความร้อนอุณหภูมิในหม้อต้มฟร็อน-12) สภาวะตรงทางเข้าของเครื่องยนต์ดีเซลอยู่ที่ 100 kPa, 20 °C มีอัตราส่วนของการอัดเท่ากับ 16 และอุณหภูมิสูงสุดของวัฏจักรเท่ากับ 2500 °C ฟร็อน-12 ในสภาพไออิ่มตัวออกจากหม้อต้มในวัฏจักรท้ายที่ 110 °C และมีอุณหภูมิควบแน่นเท่ากับ 30 °C กำหนดกำลังส่งออกของเครื่องยนต์ดีเซลเท่ากับ 1.0 MW สมมติให้เป็นวัฏจักรในอุดมคติตลอด จงหา

- อัตราการไหลของอากาศในวัฏจักรดีเซล
- กำลังส่งออกของวัฏจักรท้าย โดยสมมติว่าไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลถูกหล่อเย็นลงถึง 200 °C ภายในหม้อต้มฟร็อน-12



วัฏจักรดีเซลของอากาศ



วัฏจักรแรงดันของ F-12

แนวการวิเคราะห์

คำนวณหาอุณหภูมิตามสภาวะต่างๆ ในวัฏจักรดีเซล แล้วหางานสุทธิจาก $w_{NET} = q_H - q_L$ และหาอัตราการไหลได้ $\dot{m}_{air} = \dot{W}_{NET} / w_{NET}$

ส่วนในวัฏจักรท้ายที่มี F-12 เป็นสารทำงานจะหาคุณสมบัติโดยอาศัยตารางที่ ก.3.1 ตั้งแต่สภาวะ (7) จนถึงสภาวะ (6) แล้วคำนวณหา $q_H = h_7 - h_6$ ส่วน $\dot{Q}_H$ เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไอเสียคำนวณได้จาก $\dot{Q}_H = \dot{m}_{air} C_{vo} \Delta T$

การคำนวณ

ก. อัตราการไหลของอากาศในวัฏจักรดีเซล

ในวัฏจักรดีเซล มีอากาศเป็นของไหลทำงาน $P_1 = 100 \text{ kPa}$, $T_1 = 293.2 \text{ K}$,
 $r_v = v_1/v_2 = 16$, $T_1 = 2773.2 \text{ K}$ และ $\dot{W}_{\text{diesel}} = 1 \text{ MW}$

$$\begin{aligned}\text{สภาวะ (1) ; } \quad v_1 &= \frac{RT_1}{P_1} \\ &= \frac{0.287 \times 293.2}{100} = 0.8415 \text{ m}^3/\text{kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{สภาวะ (2) ; } \quad T_2 &= T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \\ &= 293.2(16)^{0.4} = 888.8 \text{ K}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_2 &= P_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k \\ &= 100(16)^{1.4} = 4850 \text{ kPa}\end{aligned}$$

inspiration starts here

$$v_2 = \frac{v_1}{r_v} = \frac{0.8415}{16} = 0.0526 \text{ m}^3/\text{kg}$$

สภาวะ (3) ; เนื่องจากอากาศเป็นก๊าซอุดมคติภายใต้ความดันคงที่ (กระบวนการ 2-3) ดังนั้น

$$\begin{aligned}v_3 &= v_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right) \\ &= 0.0526 \left(\frac{2773.2}{888.8} \right) = 0.1641 \text{ m}^3/\text{kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{สภาวะ (4) ; } \quad T_4 &= T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} \\ &= 2773.2 \left(\frac{0.1641}{0.8415} \right)^{0.4} = 1442.1 \text{ K}\end{aligned}$$

กระบวนการ 2-3 ; ความร้อนถ่ายเทสู่ของไหลทำงานภายใต้ความดันคงที่

$$\begin{aligned} q_H &= C_{p0}(T_3 - T_2) \\ &= 1.0035(2773.2 - 888.8) = 1891 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

กระบวนการ 4-1 ; ความร้อนถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมภายใต้ปริมาตรคงที่

$$\begin{aligned} q_L &= C_{v0}(T_1 - T_4) \\ &= 0.7165(293.2 - 1442.1) = -823.2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{NET} &= q_H - q_L \\ &= 1891 - 823.2 = 1067.8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

อัตราการใช้เชื้อเพลิงคือ

$$\begin{aligned} m_{air} &= \frac{\dot{W}_{NET}}{w_{NET}} \\ &= \frac{1000}{1067.8} = 0.9365 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

ตอบ

ข. กำลังส่งออกของวัฏจักรท้าย

ในวัฏจักรท้าย มี F-12 เป็นของไหลทำงาน

สภาวะ (7) ; (ไออิ่มตัวที่ 110°C) จากตารางที่ ก.3.1 จะได้

$$h_7 = h_g = 196.484$$

$$s_7 = s_g = 0.6064$$

สภาวะ (8) ; $s_8 = s_7 = s_f + x_8 s_{fg}$ ที่ 30°C

$$0.6064 = 0.2397 + x_8(0.4451)$$

$$x_8 = 0.8239$$

$$\begin{aligned} h_8 &= h_f + x_8 h_{fg} \text{ ที่ } 30^\circ\text{C} \\ &= 64.539 + (0.8239 \times 134.936) \\ &= 175.713 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{TUR} &= h_7 - h_8 \\ &= 196.484 - 175.713 = 20.77 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

สภาวะ (5) ; (ของเหลวอิ่มตัวที่ 30°C) ตารางที่ ก.3.1

$$v_5 = v_f = 0.000774$$

$$h_5 = h_f = 64.539 \text{ kJ/kg}$$

$$s_5 = s_f = 0.2397$$

$$P_5 = P_{\text{sat}@30^\circ\text{C}} = 0.7449 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}\text{สภาวะ (6) ; } w_p &= -v_5(P_6 - P_5) \\ &= -0.000774(3978.4 - 744.9) \\ &= -2.50 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{กฎข้อที่หนึ่ง ; } h_6 &= h_5 - w_p \\ &= 64.539 + 2.50 = 67.039 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{กระบวนการ 6-7 ; } q_H &= h_7 - h_6 \\ &= 196.484 - 67.039 = 129.445 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

ความร้อนถ่ายเทสู่ฟรอน-12 ในหม้อต้ม $\dot{Q}_H$ เป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจาก
ไอเสียอุณหภูมิ 1442.1 K จนอุณหภูมิลดลงเป็น 473.2 K

$$\begin{aligned}\dot{Q}_H &= m_{\text{air}} C_{v0} \Delta T \\ &= 0.9365 \times 0.7165(1442.1 - 473.2) \\ &= 650.1 \text{ kW} \\ \dot{m}_{\text{F-12}} &= \frac{\dot{Q}_H}{q_H} \\ &= \frac{650.1}{129.445} = 5.022 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

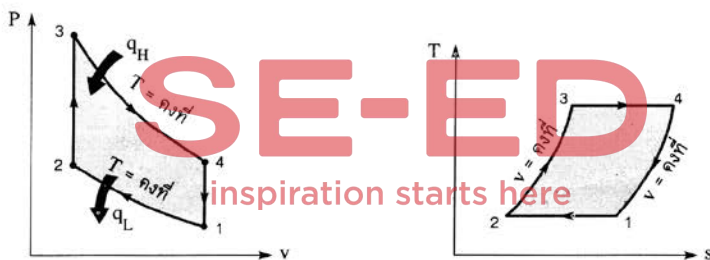
$$\begin{aligned}\dot{W}_{\text{NET}} &= \dot{m}_{\text{F-12}}(w_{\text{TUR}} + w_p) \\ &= 5.022(20.77 - 2.50) \\ &= 91.75 \text{ kW}\end{aligned}$$

ตอบ

2.10 พิจารณาวัฏจักรสเตอร์ลิงมาตรฐานของอากาศที่มีรีเจนเนอเรเตอร์ในอุดมคติ ความดันและอุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรอยู่ที่ 100 kPa และ 25 °C อัตราของการอัดเท่ากับ 10 และกำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักร 1000 °C จงวิเคราะห์ในแต่ละกระบวนการในวัฏจักรนี้ เพื่อพิจารณางานและความร้อน และจงหาสมรรถนะทั้งหมดของเครื่องยนต์

แนวการวิเคราะห์

ทำงานและความร้อนในแต่ละกระบวนการ ข้อสังเกต ${}_2w_3 = {}_4w_1 = 0$ กระบวนการปริมาตรคงที่ $q = C_v \Delta T$ และกระบวนการอุณหภูมิคงที่ $w = q = RT \ln(v_e/v_i)$ และสมมติที่รีเจนเนอเรเตอร์นี้ ${}_2q_3 = -{}_4q_1$



วัฏจักรสเตอร์ลิงมาตรฐานของอากาศ

การคำนวณ

โจทย์ $P_1 = 100 \text{ kPa}$, $T_1 = T_2 = 298.2 \text{ K}$, $v_1/v_2 = 10$ และ $T_3 = T_4 = 1273.2 \text{ K}$
กระบวนการ 1-2 ; อยู่ภายใต้อุณหภูมิคงที่ พบว่า

$$\begin{aligned} {}_1w_2 &= {}_1q_2 = RT_1 \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \\ &= 0.287 \times 298.2 \ln \left(\frac{1}{10} \right) = -197.1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

กระบวนการ 2-3 ; อยู่ภายใต้ปริมาตรคงที่ พบว่า

$${}_2w_3 = 0$$

$$\begin{aligned}\text{กฎข้อที่หนึ่ง ; } {}_2q_3 &= C_{v0}(T_3 - T_2) \\ &= 0.7165(1273.2 - 298.2) = 698.6 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

กระบวนการ 3-4 ; อยู่ภายใต้อุณหภูมิคงที่ พบว่า

$$\begin{aligned}{}_3w_4 &= {}_3q_4 = RT_3 \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right) \\ &= 0.287 \times 1273.2 \ln(10) = 841.38 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

กระบวนการ 4-1 ; อยู่ภายใต้ปริมาตรคงที่ พบว่า

$${}_4w_1 = 0$$

$$\begin{aligned}\text{กฎข้อที่หนึ่ง ; } {}_4q_1 &= C_{v0}(T_1 - T_4) \\ &= 0.7165(298.2 - 1273.2) = -698.6 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{งานสุทธิ ; } w_{\text{NET}} &= {}_1w_2 + {}_2w_3 + {}_3w_4 + {}_4w_1 \\ &= -197.1 + 0 + 841.38 + 0 = 644.3 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

ที่รีเจนเนอเรเตอร์นี้ปริมาณความร้อนที่ของไหลทำงานได้รับ ${}_2q_3 = 698.6 \text{ kJ/kg}$ นั้นเป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากของไหลทำงานนั้น ${}_4q_1 = -698.6 \text{ kJ/kg}$ ดังนั้น

$$q_H = {}_3q_4 = 841.38 \text{ kJ/kg}$$

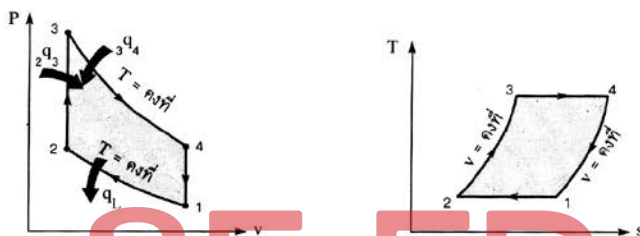
$$\begin{aligned}\eta_{\text{th}} &= \frac{w_{\text{NET}}}{q_H} \\ &= \frac{644.3}{841.38} = 0.766 \quad (76.6 \%) \quad \text{ตอบ}\end{aligned}$$

ข้อสังเกต ในที่นี้ $q_L = {}_1q_2 = -197.1$ สำหรับวัฏจักรคาร์โนต์

$$\begin{aligned}\eta_{\text{th}} &= \frac{q_H - q_L}{q_H} \\ &= \frac{841.38 - (-197.1)}{841.38} = 0.766\end{aligned}$$

2.11 พิจารณาเครื่องยนต์ในวัฏจักรสเตอร์ลิงในอุดมคติ มีความดันและอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการอัดแบบไอโซเทอร์มัลอยู่ที่ 100 kPa, 25 °C อัตราส่วนของการอัดเท่ากับ 6 และอุณหภูมิสูงสุดในวัฏจักรคือ 1100 °C จงคำนวณหา

- ความดันสูงสุดในวัฏจักร
- ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรที่มีและไม่มีรีजेเนอเรเตอร์



วัฏจักรสเตอร์ลิงมาตรฐานของอากาศ

แนวการวิเคราะห์ **inspiration starts here**

ไล่หาความดันตั้งแต่สภาวะ (1) → (2) → (3) จากนั้นหางานและความร้อนระหว่างกระบวนการกรณีไม่มีรีजेเนอเรเตอร์ $q_H = q_2 + q_4$ และกรณีมีรีजेเนอเรเตอร์ $q_H = q_4$

การคำนวณ

โจทย์ $T_1 = T_2 = 298.2 \text{ K}$, $P_1 = 100 \text{ kPa}$, $v_1/v_2 = 6$ และ $T_3 = T_4 = 1373.2 \text{ K}$

ก. ความดันสูงสุดในวัฏจักร

กระบวนการ 1-2 ; อยู่ภายใต้อุณหภูมิคงที่ พบว่า

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \\ &= 100 \times 6 = 600 \text{ kPa} \end{aligned}$$

กระบวนการ 2-3 ; อยู่ภายใต้ปริมาตรคงที่ พบว่า

$$\begin{aligned} P_3 &= P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right) \\ &= 600 \left(\frac{1373.2}{298.2} \right) = 2763 \text{ kPa} \end{aligned} \quad \text{ตอบ}$$

ข. ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร

กระบวนการ 1-2 ; อยู่ภายใต้อุณหภูมิคงที่ พบว่า

$$\begin{aligned} {}_1w_2 &= {}_1q_2 = RT_1 \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \\ &= 0.287 \times 298.2 \ln \left(\frac{1}{6} \right) = -153.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

กระบวนการ 2-3 ; อยู่ภายใต้ปริมาตรคงที่ พบว่า

$$\begin{aligned} {}_2w_3 &= 0 \\ {}_2q_3 &= C_{v0}(T_3 - T_2) \\ &= 0.7165(1373.2 - 298.2) = 770.2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

กระบวนการ 3-4 ; อยู่ภายใต้อุณหภูมิคงที่ พบว่า

$$\begin{aligned} {}_3w_4 &= {}_3q_4 = RT_3 \ln \left(\frac{v_4}{v_3} \right) \\ &= 0.287 \times 1373.2 \ln(6) = 706.1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

กระบวนการ 4-1 ; อยู่ภายใต้ปริมาตรคงที่ พบว่า

$$\begin{aligned} {}_4w_1 &= 0 \\ {}_4q_1 &= C_{v0}(T_1 - T_4) \\ &= 0.7165(298.2 - 1373.2) = -770.2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

งานสุทธิคือ $w_{NET} = {}_1w_2 + {}_2w_3 + {}_3w_4 + {}_4w_1$

$$= -153.3 + 0 + 706.1 + 0 = 552.8 \text{ kJ/kg}$$

วัฏจักรที่ไม่มีรีเจนอเรเตอร์

$$q_H = {}_2q_3 + {}_3q_4$$

$$= 770.2 + 706.1 = 1476.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{NET}}{q_H}$$

$$= \frac{552.8}{1476.3} = 0.374 \text{ หรือ } 37.4\% \quad \text{ตอบ}$$

วัฏจักรที่มีรีเจนอเรเตอร์ ที่รีเจนอเรเตอร์นี้ปริมาณความร้อนที่ของไหลทำงาน (อากาศ) ได้รับ ${}_2q_3 = 770.2 \text{ kJ/kg}$ นั้นเป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากของไหลทำงาน ${}_4q_1 = -770.2 \text{ kJ/kg}$ ดังนั้น

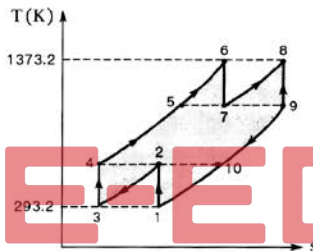
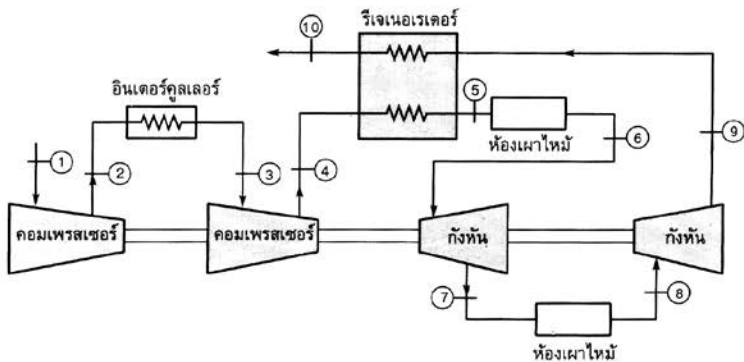
$$q_H = {}_3q_4 = 706.1 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{NET}}{q_H}$$

inspiration starts here

$$= \frac{552.8}{1476.3} = 78.3\% \quad \text{ตอบ}$$

2.12 พิจารณาวัฏจักรกังหันก๊าซในอุดมคติที่มีการอัดสองตอนและขยายสองตอน อัตราส่วนของความดันคร่อมคอมเพรสเซอร์แต่ละตัวและกังหันแต่ละตัวคิดเป็น 8 ต่อ 1 ความดันที่ทางเข้าของคอมเพรสเซอร์ตัวแรกเท่ากับ 100 kPa อุณหภูมิที่ทางเข้าของคอมเพรสเซอร์แต่ละตัวเท่ากับ 20°C และอุณหภูมิที่ทางเข้าของกังหันแต่ละตัวคือ 1100°C มีรีเจนอเรเตอร์ในอุดมคติทำงานร่วมในวัฏจักรนี้ จงหางานป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์ งานส่งออกของกังหัน และประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักร



แนวการวิเคราะห์

จากแผนภาพ T-s พบว่า $T_1 = T_3$, $T_2 = T_4 = T_{10}$, $T_5 = T_7 = T_9$ และ $T_6 = T_8$ โดยมีอัตราส่วนของความดันคร่อมคอมเพรสเซอร์และกังหันทั้งหมดเท่ากัน ที่คอมเพรสเซอร์ หา T_2 จาก $T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{(k-1)/k}$ และใช้กฎข้อที่หนึ่งหางานป้อนเข้าที่กังหัน หา T_7 จาก $T_7 = T_6 (P_7/P_6)^{(k-1)/k}$ และใช้กฎข้อที่หนึ่งหางานส่งออก ที่ห้องเผาไหม้ใช้กฎข้อที่หนึ่งหา q_H และ $\eta_{th} = w_{NET}/q_H$

การคำนวณ

$$\text{โจทย์ } P_2/P_1 = P_4/P_3 = P_6/P_7 = P_8/P_9 = 8.0,$$

$$P_1 = 100 \text{ kPa},$$

$$T_1 = T_3 = 293.2 \text{ K},$$

$$T_6 = T_8 = 1373.2 \text{ K},$$

$$T_2 = T_4 = T_{10}, T_5 = T_7 = T_9$$

สมมติให้ความร้อนจำเพาะของอากาศคงที่

คอมเพรสเซอร์ตัวแรกและตัวที่สอง ($s_1 = s_2$ และ $s_3 = s_4$)

$$T_4 = T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}$$

$$= 293.2(8)^{0.4/1.4} = 531.1 \text{ K}$$

$$w_{\text{COMP}} = C_{p0}(T_1 - T_2)$$

$$= 1.0035(293.2 - 531.1) = -238.7 \text{ kJ/kg}$$

งานป้อนเข้าของคอมเพรสเซอร์ทั้งสอง = $2(-238.7) = -477.4 \text{ kJ/kg}$ **ตอบ**

กังหันตัวแรกและตัวที่สอง ($s_6 = s_7$ และ $s_8 = s_9$)

$$T_9 = T_7 = T_6 \left(\frac{P_7}{P_6} \right)^{(k-1)/k}$$

$$= 1373.2 \left(\frac{1}{8} \right)^{0.4/1.4} = 758 \text{ K}$$

$$w_{\text{TUR}} = C_{p0}(T_6 - T_7)$$

$$= 1.0035(1373.2 - 758) = 617.4 \text{ kJ/kg}$$

งานส่งออกของกังหันทั้งสอง = $2 \times 617.4 = 1235.0 \text{ kJ/kg}$ **ตอบ**

$$w_{\text{NET}} = 1235.0 - 477.4 = 757.6 \text{ kJ/kg}$$

ห้องเผาไหม้ทั้งสอง ($T_5 = T_7$ และ $T_6 = T_8$)

$$q_H = (h_6 - h_5) + (h_8 - h_7)$$

$$= 2C_{p0}(T_6 - T_5)$$

$$= 2 \times 1.0035(1373.2 - 758) = 1234.7 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{NET}}}{q_H}$$

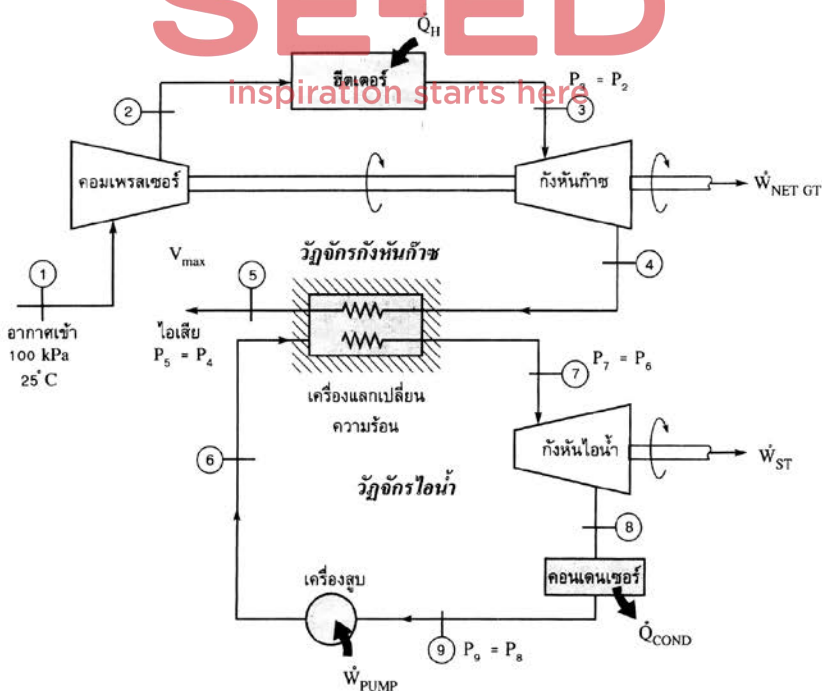
$$= \frac{757.6}{1234.7} = 0.613 \text{ หรือ } 61.3\% \quad \text{ตอบ}$$

2.13 พิจารณาวัฏจักรร่วมระหว่างวัฏจักรกังหันก๊าซกับโรงจักรพลังไอน้ำดังรูป ข้อมูลที่วัฏจักรกังหันก๊าซซึ่งมีอากาศเข้าคอมเพรสเซอร์ที่ 100 kPa, 25 °C อัตราส่วนของความดันของคอมเพรสเซอร์เท่ากับ 14 และประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของคอมเพรสเซอร์ 87 เปอร์เซ็นต์ อัตราความร้อนป้อนเข้าที่ฮีตเตอร์ 60 MW อุณหภูมิทางเข้าของกังหันที่ 1250 °C ความดันคายที่ 100 kPa และประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของกังหัน 87 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิคายของวัฏจักรที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ที่ 200 °C ข้อมูลที่วัฏจักรกังหันไอน้ำ สภาวะทางเข้าของเครื่องสูบลือของเหลวอิมดัวที่ 10 kPa ความดันทางออกของเครื่องสูบลือที่ 12.5 MPa และประสิทธิภาพไอเซนทรอปิก 85 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิทางเข้าของกังหันที่ 500 °C และประสิทธิภาพไอเซนทรอปิก 87 เปอร์เซ็นต์ จงหา

ก. อัตราการไหลโดยมวลของอากาศในวัฏจักรกังหันก๊าซ

ข. อัตราการไหลโดยมวลของน้ำในวัฏจักรกังหันไอน้ำ

ค. ประสิทธิภาพทางความร้อนทั้งหมดของวัฏจักรร่วมนี้



แนวการวิเคราะห์

ก. ที่คอมเพรสเซอร์ ทราบสภาวะ (1) ใช้ตารางที่ ก.10 และกฎข้อที่หนึ่งทางานไอเซนทรอปิกทางานใช้อัดตัวจริงจาก $w_{\text{COMP}} = w_{\text{SC}}/\eta_{\text{COMP}}$ และใช้กฎข้อที่หนึ่งหา h_2 ที่อีตเตอร์ ทราบสภาวะ (3) แล้วใช้กฎข้อที่หนึ่งหา m_{air}

ข. ที่กังหันก๊าซ ทราบสภาวะ (3) ใช้ตารางที่ ก.10 และกฎข้อที่หนึ่งทางานไอเซนทรอปิกทางานส่งออกจริงจาก $w_{\text{TUR}} = \eta_{\text{TUR}} w_{\text{ST}}$ และใช้กฎข้อที่หนึ่งหา h_4 ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทราบสภาวะ (5) และ (7) เครื่องสูบน้ำทางานไอเซนทรอปิกจาก $w_{\text{SP}} = -\int v dp$ และงานป้อนเข้าจริง และใช้กฎข้อที่หนึ่งหา h_6 ใช้กฎข้อที่หนึ่งกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะได้ $m_{\text{H}_2\text{O}}$

ค. ที่กังหันไอน้ำ เนื่องจากทราบสภาวะ (7) และ $s_{8s} = s_7$ จึงหาทางานไอเซนทรอปิกและงานส่งออกจริงได้ ทางานสุทธิของวัฏจักรโดยรวมงานทั้งหมด (คำนึงถึงเครื่องหมายของงานนั้น) และนำไปหาประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรต่อไป

การคำนวณ

ก. อัตราการไหลโดยมวลของอากาศในวัฏจักรกังหันก๊าซ

คอมเพรสเซอร์ จากตารางที่ ก.10 ที่ $T_1 = 298.2 \text{ K}$ โดยการประมาณค่าในช่วงจะได้

$$h_1 = 298.39 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{r1} = 1.3581$$

เนื่องจาก $s_1 = s_2$ ดังนั้น

$$P_{r2s} = P_{r1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$= 1.3581 \times 14 = 19.013$$

จากตารางที่ ก.10 ที่ $P_{r2s} = 19.013$ โดยการประมาณค่าในช่วงจะได้

$$T_{2s} = 625.9 \text{ K}$$

$$h_{2s} = 634.27 \text{ kJ/kg}$$

กฎข้อที่หนึ่ง ; $w_{\text{SC}} = h_1 - h_{2s}$

$$= 298.39 - 634.27 = -335.88 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}
 w_{\text{COMP}} &= \frac{w_{\text{SC}}}{\eta_{\text{COMP}}} \\
 &= \frac{-335.88}{0.87} = -386.07 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{กฎข้อที่หนึ่ง ; } w_{\text{COMP}} &= h_1 - h_2 \\
 -386.07 &= 298.39 - h_2 \\
 h_2 &= 684.46 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

ฮีตเตอร์ จากตารางที่ ก.10 ที่ $T_3 = 1523.2 \text{ K}$ โดยการประมาณค่าในช่วงจะได้

$$\begin{aligned}
 h_3 &= 1660.23 + \left(\frac{1523.2 - 1520}{1540 - 1520} \right) (1684.49 - 1660.23) \\
 &= 1664.1 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{r3} &= 636.5 + \left(\frac{1523.2 - 1520}{1540 - 1520} \right) (672.8 - 636.5) \\
 &= 642.3
 \end{aligned}$$

$$\text{กฎข้อที่หนึ่ง ; } \dot{Q}_H = \dot{m}_{\text{air}} (h_3 - h_2)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{\text{air}} &= \frac{\dot{Q}_H}{h_3 - h_2} \\
 &= \frac{60000}{1664.1 - 684.46} = 61.25 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

ตอบ

ข. อัตราการไหลโดยมวลของน้ำในวัฏจักรกังหันไอน้ำ
กังหันก๊าซ

$$\begin{aligned}
 \text{กระบวนการ 3-4 ; } P_{r4s} &= P_{r3} \left(\frac{P_4}{P_3} \right) \\
 &= 642.3 \left(\frac{1}{14} \right) = 45.88
 \end{aligned}$$

จากตารางที่ ก.10 ที่ $P_{r4s} = 45.88$ โดยการประมาณค่าในช่วงจะได้

$$T_{4s} = 790 + \left(\frac{45.88 - 45.51}{47.75 - 45.51} \right) (800 - 790) = 791.6 \text{ K}$$

$$h_{4s} = 810.98 + \left(\frac{45.88 - 45.51}{47.75 - 45.51} \right) (821.94 - 810.98)$$

$$= 812.79$$

กฎข้อที่หนึ่ง ; $w_{ST} = h_3 - h_{4s}$

$$= 1664.1 - 812.79 = 851.31 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{TUR} = \eta_{TUR} w_{ST}$$

$$= 0.87 \times 851.31 = 740.64 \text{ kJ/kg}$$

กฎข้อที่หนึ่ง ; $w_{TUR} = h_3 - h_4$

$$h_4 = h_3 - w_{TUR}$$

$$= 1664.1 - 740.64 = 923.46$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากตารางที่ ก.10 ที่ $T_5 = 473.2 \text{ K}$ โดยการประมาณค่าในช่วงจะได้

$$h_5 = 472.25 + \left(\frac{473.2 - 470}{480 - 470} \right) (482.48 - 472.25)$$

$$= 475.52 \text{ kJ/kg}$$

เครื่องสูบน้ำในวัฏจักรไอน้ำ

$$w_{SP} = -v_{f,10kPa}(P_6 - P_9)$$

$$= -0.00101(12500 - 10) = -12.615 \text{ kJ/kg}$$

$$w_P = \frac{w_{SP}}{\eta_P}$$

$$= \frac{-12.615}{0.85} = -14.84 \text{ kJ/kg}$$

กฎข้อที่หนึ่ง ; $w_P = h_9 - h_6$

$$h_6 = h_9 - w_P = h_{f,10kPa} - w_P$$

$$= 191.83 + 14.84 = 206.67 \text{ kJ/kg}$$

สภาวะ (7) ; อยู่ที่ 500°C , 12.5 MPa จากตารางที่ ก.1.3 จะได้

$$h_7 = 3341.8, s_7 = 6.4618$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ใช้กฎข้อที่หนึ่งกับกระบวนการ SSSF พบว่า

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{\dot{m}_{\text{air}}(h_4 - h_5)}{(h_7 - h_6)} \\ &= \frac{61.25(923.46 - 475.52)}{(3341.8 - 206.67)} \\ &= 8.75 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

ตอบ

ค. ประสิทธิภาพทางความร้อนทั้งหมดของวัฏจักรรวมนี้

กักกันไอน้ำ; $s_{8s} = s_7 = s_f + x_{8s}s_{fg}$ ที่ $P_8 = P_9 = 10 \text{ kPa}$

$$6.4618 = 0.6493 + x_{8s}(7.5009)$$

$$x_{8s} = 0.7748$$

$$\begin{aligned}h_{8s} &= h_f + x_{8s}h_{fg} \text{ ที่ } P_8 = 10 \text{ kPa} \\ &= 191.83 + 0.7748(2392.8) = 2045.8\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}w_{ST} &= h_7 - h_{8s} \\ &= 3341.8 - 2045.8 = 1296\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}w_{TUR} &= \eta_{TUR} w_{ST} \\ &= 0.87 \times 1296 = 1127.5\end{aligned}$$

งานสุทธิของวัฏจักรคือ

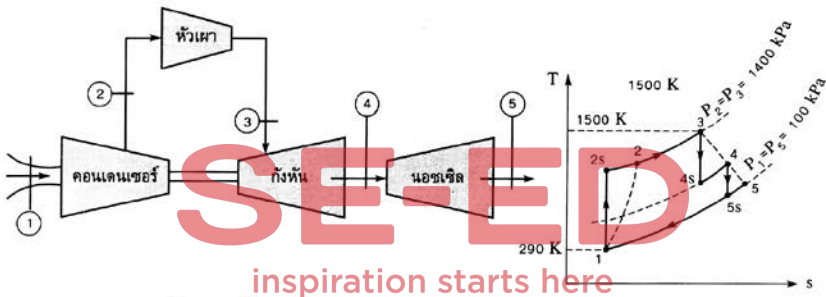
$$\begin{aligned}\dot{W}_{NET} &= [\dot{m}(w_{TUR} + w_{COMP})]_{\text{air}} + [\dot{m}(w_{TUR} + w_P)]_{\text{H}_2\text{O}} \\ &= 61.25(740.64 - 386.07) + 8.75(1127.5 - 14.84) \\ &= 31.453 \text{ MW}\end{aligned}$$

ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรคือ

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= \frac{\dot{W}_{NET}}{\dot{Q}_H} \\ &= \frac{31.453}{60} = 0.524 \text{ หรือ } 52.4\%\end{aligned}$$

ตอบ

2.14 พิจารณาวัฏจักรมาตรฐานของอากาศในอุดมคติสำหรับกังหันก๊าซที่มีการขับเคลื่อนแบบเจ็ตดังแสดงในรูป ความดันและอุณหภูมิทางเข้าคอมเพรสเซอร์อยู่ที่ 100 kPa, 290 K อัตราส่วนของความดันคร่อมคอมเพรสเซอร์เท่ากับ 14 ต่อ 1 และอุณหภูมิทางเข้าของกังหันเป็น 1500 K หลังจากผ่านกังหันแล้วอากาศจะเข้าไปในนอชเชิลและขยายตัวสู่ 100 kPa โดยสมมติให้ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของคอมเพรสเซอร์ กังหัน และนอชเชิลเป็น 87 , 89 และ 96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จงหาความดันที่ทางเข้าของนอชเชิลและความเร็วของอากาศที่ออกจากรานอชเชิล



แนวการวิเคราะห์

ที่คอมเพรสเซอร์ เนื่องจาก $s_{2s} = s_1$ และใช้กฎข้อที่หนึ่งหางานไอเซนทรอปิก w_{SC} และงานป้อนเข้าจริงจาก $w_{COMP} = w_{SC}/\eta_{COMP}$ ที่กังหันในที่นี้งานป้อนเข้าคอมเพรสเซอร์คืองานส่งออกของกังหัน จึงใช้กฎข้อที่หนึ่งหาอุณหภูมิทางออกของกังหัน (T_4) นำไปหาอุณหภูมิ T_{4s} เนื่องจาก $s_{4s} = s_3$ จึงหา P_4 จาก $P_4 = P_3(T_{4s}/T_3)^{k/(k-1)}$ ที่นอชเชิล $s_{5s} = s_4$ และใช้กฎข้อที่หนึ่งหาพลังงานจลน์ที่ทางออกในอุดมคติ แล้วใช้นิยามของประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของนอชเชิลหาความเร็วของอากาศที่ทางออก

การคำนวณ

โจทย์ $P_1 = P_5 = 100$ kPa, $T_1 = 290$ K, $P_2/P_1 = 14$, $T_3 = 1500$ K และกำหนดให้ความร้อนจำเพาะของอากาศเป็นค่าคงที่

คอมเพรสเซอร์ $s_{2s} = s_1$; ดังนั้น

$$\begin{aligned} T_{2s} &= T_1 \left(\frac{P_{2s}}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \\ &= 290(14)^{0.4/1.4} = 616.4 \text{ K} \end{aligned}$$

คู่มือ THERMODYNAMICS II HANDBOOK

อุณหพลศาสตร์

2

ระดับปริญญาตรี

หนังสือเล่มนี้สำหรับ

☐ ปวช.

☒ ปริญญาตรี

☐ ปวส.

☒ บุคคลทั่วไป

หมวดเทคโนโลยี-อุตสาหกรรม
วิศวกรรมเครื่องกล

หนังสือคู่มืออุณหพลศาสตร์ 2 (Thermodynamics II Handbook) เล่มนี้ ตรงตามหลักสูตร
ปริญญาตรีของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มีเนื้อหาเกี่ยวกับพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์ 1 วัฏจักรพลวงจันไอเก้น
วัฏจักรพลวงจันก๊าซ วัฏจักรการทำความเย็น ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของอุณหพลวัต ก๊าซผสมอุดมคติ
ปฏิกิริยาการเผาไหม้ ของผสมจริง โดยจะเขียนเป็นปัญหาและการวิเคราะห์ จึงเหมาะสำหรับใช้เตรียมสอบ
วัดผลและสอบรับใบประกาศนียบัตรทางวิศวกรรม สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (ใบท.ว.)

SE-ED

ประวัติกู้เขียน

inspiration starts here



มนตรี พิรุณเกษร

ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2525 และปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
วิทยาเขตธนบุรี (บางมด) เมื่อปี พ.ศ. 2528 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ISBN 974-512-895-3



9 789745 128958

160

295 บาท