Chapter 3

คุณสมบัติของสารบริสุทธิ์

Properties of pure substances

คุณสมบัติของสารบริสุทธิ์

ในการศึกษาเรื่องการถ่ายโอนพลังงานของระบบมักจะมีการเกี่ยวข้องกับสารต่าง ๆที่ใช้เป็นตัวกลางในการช่วยส่งผ่านพลังงานหรือช่วยในการทำงาน ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงคุณสมบัติของสารบริสุทธิ์ชนิดต่าง ๆว่ามีการเปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะที่ต่าง ๆกันออกไปอย่างไรบ้าง

สารบริสุทธิ์

สารบริสุทธิ์คือสารที่มีเนื้อเป็นเนื้อเดียวกัน และมีองค์ประกอบทางเคมีที่แน่นอน สารหลาย ๆแบบสามารถถือว่าเป็นสารบริสุทธิ์ได้ไม่ว่าสารนั้นจะเป็นสารที่มีองค์ประกอบของธาตุเพียงธาตุเดียวหรือเป็นสารที่ประกอบของธาตุหลาย ๆชนิดรวมกัน เพียงแต่ว่าสารนั้นจะต้องเป็นสารที่มีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกันตลอดทั้งเนื้อสาร

ตัวอย่างของสารบริสุทธิ์

- อากาศซึ่งประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด: สามารถจะจัดให้เป็นสารบริสุทธิ์ได้เพราะถือว่ามีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกันตลอด
- น้ำผสมน้ำมัน:จะไม่ถือว่าเป็นสารบริสุทธิ์ เพราะมีองค์ประกอบทางเคมีไม่เหมือนกัน

ตัวอย่างของสารบริสุทธิ์

- น้ำผสมน้ำแข็งในแก้ว : สารบริสุทธิ์นั้นไม่จำเป็นต้องมีสถานะเดียวในกรณีนี้เป็นสารบริสุทธิ์ เพราะองค์ประกอบทางเคมีเป็น H_2O เหมือนกัน

สถานะของสารบริสุทธิ์

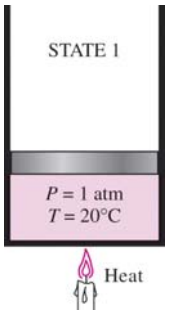
สำหรับสถานะหลัก(principle phase)จะมี อยู่ 3 สถานะ คือ

- ของแข็ง
- ของเหลว
- ก๊าซ

ของเหลวอัดตัว

(Compressed liquid หรือ subcooled liquid)

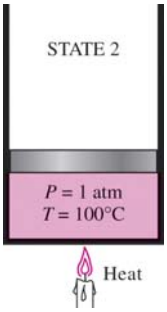
- กระบอกสูบและลูกสูบที่ภายในบรรจุน้ำซึ่งมีอุณหภูมิห้องในขั้นแรกนี้ สมมุติว่าเท่ากับ 20 °C และความดันบรรยากาศ
- น้ำจะมีสถานะเป็นของเหลวอัดตัว (compressed liquid หรือ subcooled liquid)
- ยังไม่พร้อมระเหยตัว



ของเหลวอิ่มตัว

(Saturated Liquid)

- ให้ความร้อนต่อไปจนได้ T = 100 °C ความดันคงที่ 1 atm
- น้ำพร้อมจะระเหยตัว
- ของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid)



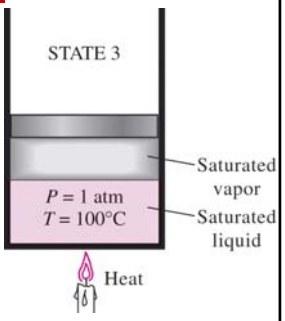
กระบวนการเปลี่ยนสถานะที่ความดันคงที่

- เมื่อมีความร้อนให้กับสารในสภาวะของเหลวอิ่มตัวต่อไปสารก็จะเริ่มเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอและจะมากขึ้นเรื่อย ๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เราเรียกว่ากระบวนการเปลี่ยนสถานะ
- ในระหว่างการเปลี่ยนสถานะถ้าความดันคงที่อุณหภูมิจะคงที่แต่ปริมาตรจำเพาะจะเพิ่มขึ้น

ของผสมอิ่มตัว

(saturated liquid-vapor mixture)

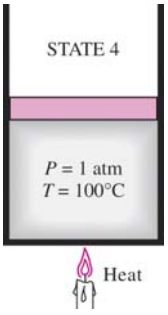
- ในช่วงที่น้ำยังกลายเป็นไอไม่ทั้งหมด ภายในกระบอกสูบจะประกอบด้วยน้ำซึ่งมีส่วนหนึ่งเป็นของเหลวและอีกส่วนหนึ่งเป็นไอ
- เรียกสารที่อยู่ในสภาพเช่นนี้ว่า *ของผสมระหว่างของเหลวและไอน้ำอิ่มตัว* (saturated liquid-vapor mixture) หรือเรียกสั้น ๆว่า *ของผสมอิ่มตัว*



ไออิ่มตัว

(saturated vapor)

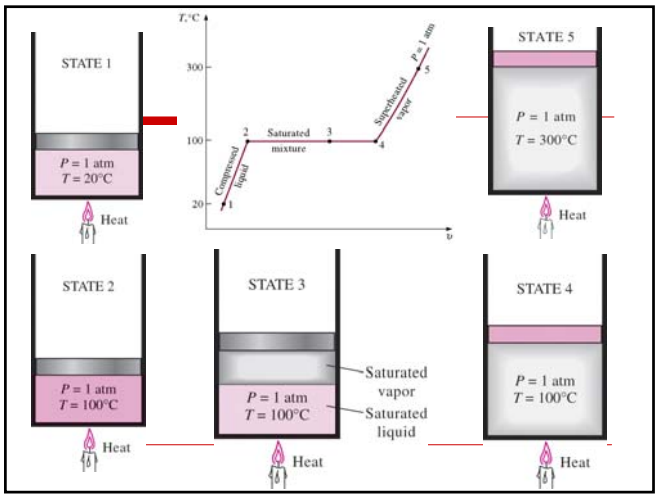
- ถ้าให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆจนกระทั่งน้ำหยดสุดท้ายกลายเป็นไอ
- สำหรับจุดนี้จึงเป็นจุดที่ไอน้ำพร้อมที่จะกลั่นตัว(condense)อยู่ตลอดเวลา
- เราเรียกไอที่พร้อมจะกลั่นตัวนี้ว่า*ไออิ่มตัว* (saturated vapor)



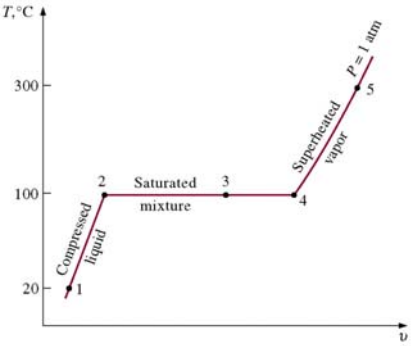
ไอร้อนยิ่งยวด

(Supperheated vapor)

- หลังจากกระบวนการเปลี่ยนสถานะสมบูรณ์ไปแล้วหากให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆโดยรักษาให้ความดันคงที่
- อุณหภูมิและปริมาตรจำเพาะก็จะสูงขึ้นเรื่อย
- ไอในสภาพที่ไม่พร้อมที่จะกลั่นตัวนี้เรียกว่า *ไอร้อนยวดยิ่ง* (superheated vapor)



การเปลี่ยนสถานะที่ความดันคงที่



อุณหภูมิอิ่มตัว
(Saturation Temperature)

- น้ำเดือดที่อุณหภูมิเท่าใด ?
- น้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100 °C ?
- ที่ความดัน 500 kPa น้ำเดือดที่ 151.83 °C
- เรียกอุณหภูมิที่สารบริสุทธิ์เริ่มเดือดที่ความดันหนึ่งว่า *อุณหภูมิอิ่มตัว*(Saturation Temperature, T_{sat}) ที่ความดันที่กำหนดให้

ความดันอิ่มตัว
(Saturation Pressure)

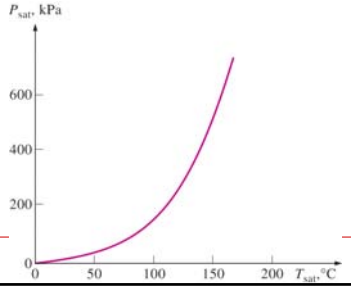
- เราเรียกความดันที่สารบริสุทธิ์เริ่มเดือดที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ว่า *ความดันอิ่มตัว* (Saturation Pressure,P_{sat}) ที่อุณหภูมินั้น
- โดยในขณะเกิดกระบวนการเปลี่ยนสถานะทั้งความดันและอุณหภูมิต่างเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นต่อกัน

$$T_{sat} = T(P_{sat})$$

- เรียกเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง T_{sat} และ P_{sat} ว่า liquid-vapor saturation curve

Liquid-vapor saturation curve

เราเรียกเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tsat และ Psat ว่า Liquid-Vapor Saturation Curve



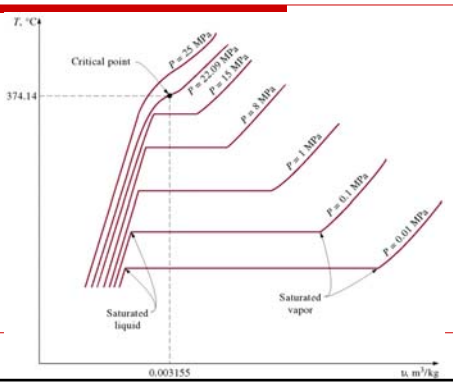
แผนภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้นได้มาจากการทดลอง ซึ่งมีข้อมูลจำนวนมาก การศึกษาแนวโน้ม หรือลักษณะของความสัมพันธ์ของคุณสมบัติต่าง ๆ จะพิจารณาได้ง่ายกว่า หากเราพิจารณาในลักษณะของกราฟ

แผนภาพ T-v

- น้ำที่บรรจุอยู่ในกระบอกสูบที่ความดัน 1 MPa ที่ความดันซึ่งสูงนี้ น้ำมีปริมาตรจำเพาะต่ำกว่าที่ความดัน 1 atm ถ้าเพิ่มความร้อนให้น้ำที่ 1 MPa เส้นทางที่เกิดขึ้นจะคล้ายคลึงกับน้ำที่ความดัน 1 atm
- เมื่อความดันสูงขึ้นอุณหภูมิที่น้ำเดือดสูงขึ้น ทำให้เส้นทางการเปลี่ยนแปลงของสารในขณะที่มีความดันสูงกว่าจะอยู่เหนือเส้นที่มีความดันต่ำกว่า

แผนภาพ T-v



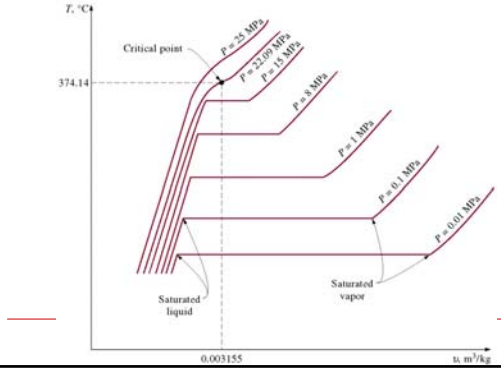
แผนภาพ T-v

- เมื่อความดันสูงปริมาตรจำเพาะของของเหลวอิ่มตัวจะสูงขึ้น
- เมื่อความดันสูงปริมาตรจำเพาะของไออิ่มตัวจะน้อยลง
- เมื่อความดันสูง เส้นระดับซึ่งแสดงว่าในขณะนั้นอุณหภูมิมีค่าคงที่ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างจุดของเหลวอิ่มตัวกับจุดไออิ่มจะสั้นลง

จุดวิกฤติ

- จะเห็นว่ายิ่งความดันสูงขึ้นเท่าไรเส้นระดับที่แสดงว่ามีอุณหภูมิคงที่ก็จะยิ่งสั้นลงเท่านั้น
- เมื่อถึงที่ระดับความดันหนึ่งเส้นดังกล่าวก็จะกลายเป็นจุดซึ่งจุดนี้เรียกว่า *จุดวิกฤติ* (critical point) หรือพูดได้ว่า จุดที่ของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัวเป็นจุดเดียวกัน

แผนภาพ T-v



คุณสมบัติที่จุดวิกฤติ

- ที่จุดวิกฤตจะมี *อุณหภูมิวิกฤติ ความดันวิกฤติ ปริมาตรจำเพาะวิกฤติ* ที่แน่นอน
- สรุปคือที่ความดันวิกฤติหากมีการเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารเรื่อย ๆ สารจะเปลี่ยนจากสภาพของเหลวเป็นไอพร้อมกันทั้งระบบโดยไม่มีการเปลี่ยนเข้าไปอยู่ในช่วงของผสมอิ่มตัวเลย

ตัวอย่างคุณสมบัติที่จุดวิกฤติ

- สำหรับน้ำจะมี P_{cr} เท่ากับ 22.06 MPa,
  T_{cr} เท่ากับ 373.95 ^{o}C,
  v_{cr} เท่ากับ 0.003106 m^3/kg
- สำหรับก๊าซฮีเลี่ยมจะมี P_{cr} = 0.23 MPa,
  T_{cr} = - 267.85 ^{o}C,
  v_{cr} = 0.01444 m^3/kg

เส้นของเหลวอิ่มตัว

- ลากเส้นโยงเส้นเชื่อมจุดอิ่มตัวทางด้านของเหลวอิ่มตัว
- เส้นที่ลากเชื่อมในช่วงของเหลวจะเรียกเส้นนี้ว่า*เส้นของเหลวอิ่มตัว* (saturated liquid line)

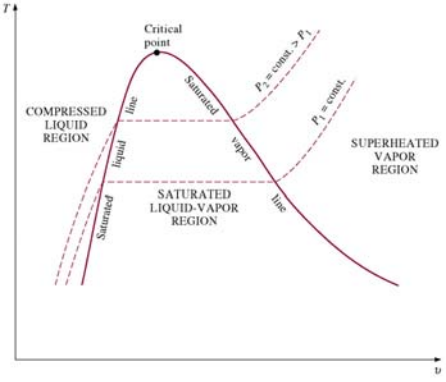
เส้นไออิ่มตัว

- หากว่าลากเส้นโยงเส้นเชื่อมจุดอิ่มตัวทั้งทางด้านของไออิ่มตัว
- เส้นที่ลากเชื่อมในช่วงไอจะเรียก*เส้นไออิ่มตัว* (saturated vapor line)
- เส้นสองเส้นนี้จะมาบรรจบกันตรงจุดวิกฤตพอดี

เส้นอิ่มตัว

- เส้นโค้งที่ได้จากการต่อจุดอิ่มตัวทั้งหมดนี้จะเรียกรวมกันว่าเส้นอิ่มตัว (saturated line) และจะมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ
- จุดสูงสุดของเส้นอิ่มตัวคือจุดวิกฤติ

กราฟแสดงเส้นอิ่มตัว

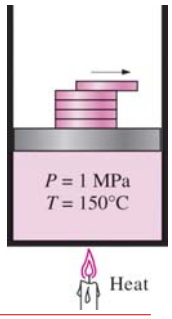


การบ่งสภาวะด้วยเส้นอิ่มตัว

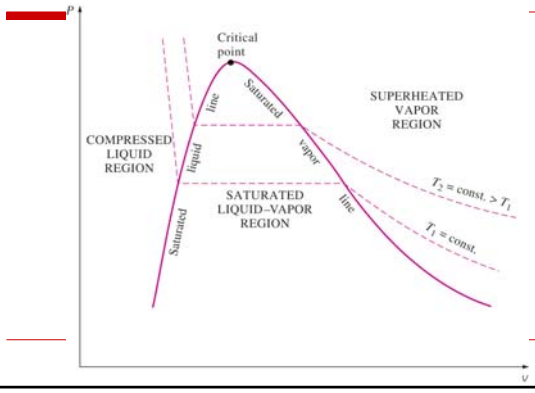
- สารในสภาพของเหลวอัดตัวจะอยู่ด้านซ้ายเรียกว่าเขตของเหลวอัดตัว (compressed liquid region)
- สารในสภาพไอร้อนยวดยิ่ง จะอยู่ทางด้านขวา เรียกว่าเขตไอร้อนยวดยิ่ง (superheated vapor region)
- สารที่อยู่ภายในรูประฆังจะเป็นของเหลวผสมกับไอเรียกว่าเขตของเหลวและไออิ่มตัวผสม (Saturated liquid-vapor mixture region)

แผนภาพ P-v

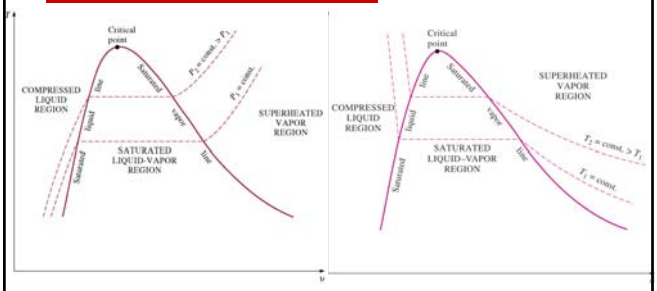
- รูปร่างของแผนภาพ P-v คล้ายคลึงกับ T-v diagram
- ในแผนภาพ T-v เส้นความดันคงที่จะลาดขึ้นข้างบน ส่วนในแผนภาพ P-v เส้นอุณหภูมิคงที่จะเอียงลง
- การทดลองสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนขนาดน้ำหนักเพื่อรักษาให้อุณหภูมิคงที่



แผนภาพ P-v



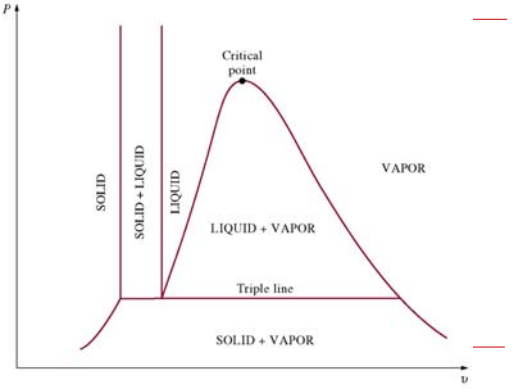
แผนภาพ T-v และ P-v



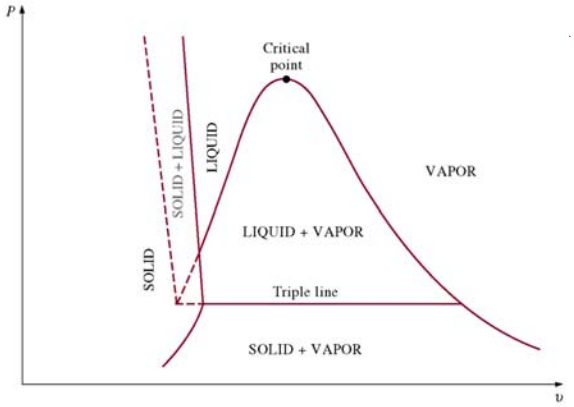
แผนภาพ P-v ครอบคลุมสถานะของแข็ง

- สารส่วนใหญ่ที่พบเห็นนั้นจะหดตัวหรือมีปริมาตรลดลงหากมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งหรือเมื่อมีอุณหภูมิลดลง
- ยกเว้นสารบางชนิดเช่นน้ำที่จะขยายตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง

สารที่หดตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง



สารที่ขยายตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง



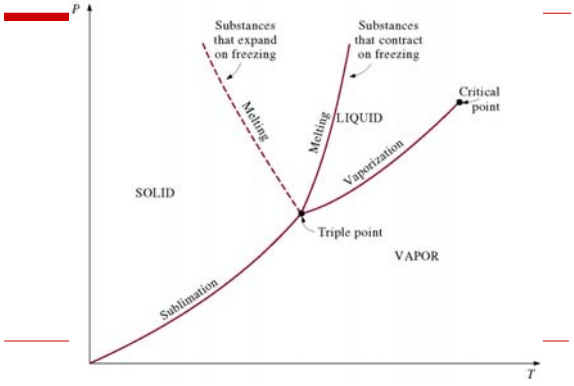
เส้นสามเชิง (Tipple line)

- ในบางสภาวะสารบริสุทธิ์อาจอยู่ในสภาพที่มีทั้ง 3 สถานะร่วมกันก็ได้
- เราจะพบว่ามีเส้นอยู่เส้นหนึ่งซึ่งสารสามารถมีสภาพเป็นได้ทั้งสามสถานะในขณะเดียวกัน
- เรียกเส้นที่เชื่อมต่อจุดของสภาพ 3 สถานะร่วมนี้บน ว่า*เส้นสามเชิง* (triple line)

แผนภาพ P-T

- บางครั้งเรียก *แผนภาพแสดงสถานะ* (phase diagram)
- เพราะจะมีเส้นแบ่งสถานะทั้งสามออกจากกันให้เห็นอย่างชัดเจน เส้นการระเหิดจะเป็นเส้นเขตแดนระหว่างของแข็งกับไอ
- เส้นการระเหย จะเป็นเส้นระหว่างของเหลวกับไอ
- เส้นหลอมละลาย แบ่งระหว่างของแข็งกับของเหลว

ตัวอย่างแผนภาพ P-T



จุดสามเชิง (Tipple point)

- สภาวะของสารที่จุดใด ๆบนเส้นสามเชิง จะมีความดันและอุณหภูมิเท่ากันทั้งหมดแต่จะมีปริมาตรจำเพาะแตกต่างกัน
- หากว่าเราพิจารณาเส้นสามเชิงบนแผนภาพ P-T เส้นนี้จะปรากฏเป็นจุดจุดเดียว เราเรียก*จุดสามเชิง* (triple point)

ตัวอย่างจุดสามเชิง

TABLE 3–3

Triple-point temperatures and pressures of various substances

Substance	Formula	T_{tp}, K	P_{tp}, kPa
Acetylene	C_2H_2	192.4	120
Ammonia	NH_3	195.40	6.076
Argon	A	83.81	68.9
Carbon (graphite)	C	3900	10,100
Carbon dioxide	CO_2	216.55	517
Carbon monoxide	CO	68.10	15.37
Deuterium	D_2	18.63	17.1
Ethane	C_2H_6	89.89	8×10^{-4}
Ethylene	C_2H_4	104.0	0.12
Helium 4 (λ point)	He	2.19	5.1
Hydrogen	H_2	13.84	7.04
Hydrogen chloride	HCl	158.96	13.9

ลักษณะของสารเทียบกับจุดสามเชิง

- สารบริสุทธิ์มีความดันต่ำกว่าความดันของจุดสามเชิง ไม่ว่าสารบริสุทธิ์ใดก็ไม่มีโอกาสที่จะอยู่ในสถานะของเหลวได้ ไม่ว่าอุณหภูมิหรือปริมาตรจำเพาะจะเป็นเท่าไร
- ในสภาพซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของจุดสามเชิง สารบริสุทธิ์ที่หดตัวเมื่อกลายเป็นของแข็งไม่มีโอกาสที่จะอยู่ในสถานะของเหลวได้

การกลายเป็นไอ

ของแข็งจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอได้ 2 วิธี

- หลอมเหลวกลายเป็นของเหลวก่อนแล้วจึงระเหย กลายเป็นไอ
- กลายเป็นไอโดยตรงเลยโดยไม่ต้องผ่านการหลอมเหลวก่อน *การระเหิด* (sublimation)

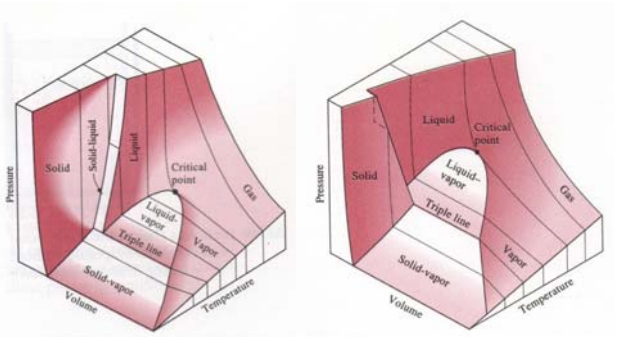
การระเหิด (Sublimation)

การที่เกิดการระเหิดได้นั้นแสดงว่ากระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์เกิดขึ้นในขณะที่ความดันต่ำกว่าความดันจุดสามเชิง

คำถาม

ท่านสามารถอธิบายได้หรือไม่ว่าทำไมเวลาที่เราเปิดน้ำอัดลมซึ่งเย็นจัดนั้น ก่อนที่เราจะเปิดฝาเรามองเห็นน้ำอัดลมในขวดเป็นของเหลวแต่เมื่อเราเปิดฝาแล้วน้ำอัดลมนั้นกลับกลายเป็นของแข็งหรือที่เราเรียกกันว่าเป็นวุ้นขึ้นมาได้ ?

The P-T-v surface



สารบริสุทธิ์ที่หดตัวเมื่อแข็ง สารบริสุทธิ์ที่ขยายตัวเมื่อแข็ง

การใช้ตารางเทอร์โมไดนามิกส์

- ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารจะได้มาจากการทดลอง
- ความสัมพันธ์จะซับซ้อนเกินที่จะอธิบายได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ทั่ว ๆไปได้
- ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักแสดงความสัมพันธ์ในรูปของตาราง

เอนทาลปี (Enthalpy, H)

พลังงานภายในกับพลังงานที่เกิดจากการไหล (flow work) เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$H = U + PV$$

$$h = u + Pv$$

ความสำคัญของเอนทาลปี (Enthalpy, H)

- ค่าความแตกต่างของเอนทาลปีของสารในสภาวะไออิ่มตัวและของเหลวอิ่มตัวที่ความดันหรืออุณหภูมิเดียวกันซึ่งแทนด้วย h_{fg}
  - ค่านี้เรียกความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
  - มีค่าเท่ากับปริมาณพลังงานที่ใช้ในการทำให้ของเหลวอิ่มตัวกลายเป็นไอที่ความดันคงที่

ตารางเทอร์โมไดนามิกส์

- ตารางทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้จัดรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องเข้าไว้ด้วยกัน
- การกำหนดสภาวะนั้นต้องใช้คุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับขนาดที่ไม่ขึ้นต่อกัน 2 คุณสมบัติ
- หลักการของการเปิดตารางนี้ก็คืออันดับแรกเราต้องสามารถกำหนดสภาวะให้ได้ก่อน

การแบ่งตารางเทอร์โมไดนามิกส์

- ตารางอิ่มตัว
- ตารางไอร้อนยวดยิ่ง
- ตารางของเหลวอัดตัว

ในที่นี้จะยกตัวอย่างตารางของน้ำ

ตารางสารอิ่มตัว

- เป็นการแสดงคุณสมบัติในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างของเหลวและก๊าซ
- การใช้ตารางของสารอิ่มตัวจะใช้อุณหภูมิและความดันเป็นคุณสมบัติ 2 ค่าเพื่อในการกำหนดสภาวะไม่ได้

Subscripts

- subscript *f* หมายถึง *ของเหลวอิ่มตัว*
- subscript *g* หมายถึง ไออิ่มตัว
- subscript *fg* หมายถึงค่าความแตกต่างของคุณสมบัติที่ไออิ่มตัวกับของเหลวอิ่มตัว

ตัวอย่าง

- v_f หมายถึงปริมาตรจำเพาะในสภาพของเหลวอิ่มตัว
- u_g หมายถึงพลังงานภายในในสภาพไออิ่มตัว
- u_{fg} จะมีค่าเท่ากับ $u_g - u_f$

ตารางของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว

- ตารางคุณสมบัติของของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัวของน้ำจะใช้อุณหภูมิหรือความดันค่าใดก็ได้
  - ตารางที่ A-4 ใช้อุณหภูมิเป็นหลัก
  - ตารางที่ A-5 ใช้ความดันเป็นหลัก
- ค่าที่แสดงในทั้งสองตารางนี้เหมือนกันทั้งหมด ต่างกันเฉพาะวิธีแสดงค่าเท่านั้น

ตารางอิ่มตัว : อุณหภูมิ

Temp. °C T	Sat. press. kPa P_{sat}	Specific volume m³/kg: Sat. liquid v_f	Specific volume m³/kg: Sat. vapor v_g
85	57.868	0.001032	2.8261
90	70.183	0.001036	2.3593
95	84.609	0.001040	1.9808

Specific temperature; Corresponding saturation pressure; Specific volume of saturated liquid; Specific volume of saturated vapor

ตัวอย่าง 3-1

Rigid tank บรรจุ น้ำอิ่มตัวที่เป็นของเหลว 50 kg ที่อุณหภูมิ 90°C ให้หา ความดัน และปริมาตรของ Rigid

จากโจทย์ เราทราบว่า น้ำมีสถานะเป็น Sat. liquid

ฉะนั้น $P = P_{sat@90^\circ C} = 70.183$ kPa (Tab. A-4)

$v = v_{f@90^\circ C} = 0.001036$ m³ / kg (Tab. A-4)

เพราะฉะนั้น $V = mv = 50 * 0.001035 = 0.0518$ m³

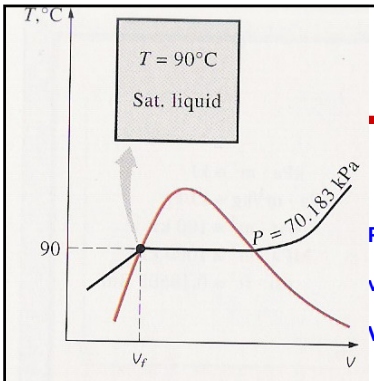


FIGURE 3–31
Schematic and T-v diagram for Example 3–1.

ตัวอย่าง 3-1

$P = P_{sat@90^\circ C} = 70.183$ kPa

$v = v_{f@90^\circ C} = 0.001036$ m³/kg

$V = 0.0518$ m³

ตัวอย่าง 3-2

กระบอกสูบอันหนึ่ง บรรจุไอน้ำอิ่มตัวปริมาตร 0.06 m³ ที่ความดัน 350 kPa จงหาอุณหภูมิและมวลสารของไอน้ำในกระบอกสูบนี้

จากโจทย์ เราทราบว่า น้ำมีสถานะเป็น Sat. Vapor

ฉะนั้น $T = T_{sat@350kPa} = 138.86$ °C (Tab. A-5)

$v = v_{g@350\ kPa} = 0.52422$ m³ / kg (Tab. A-5)

เพราะฉะนั้น $m = V/v = 0.06/0.52422 = 0.114$ kg

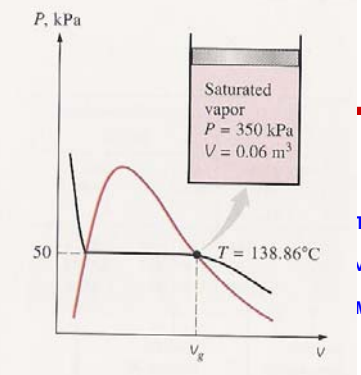


FIGURE 3–32
Schematic and P-V diagram for Example 3–2.

ตัวอย่าง 3-2

$T = T_{sat@350kPa} = 138.86$ °C

$v = v_{g@350\ kPa} = 0.52422$ m³ / kg

$M = V/v = 0.114$ kg

ตัวอย่าง 3-3

น้ำในสภาวะของเหลวอิ่มตัวมีมวล 200 g ได้รับความร้อนจนกระทั่งกลายเป็นของไอทั้งหมด ในขณะที่ความดันคงที่อยู่ที่ 100 kPa จงหา

(a) ปริมาตรของน้ำที่เปลี่ยนไป

(b) พลังงานที่น้ำได้รับ

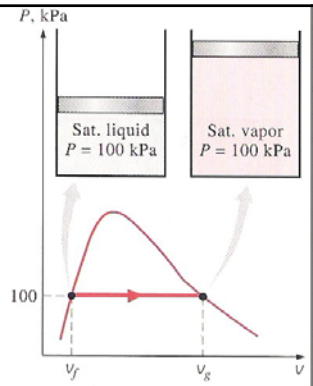


FIGURE 3–33
Schematic and P-v diagram for Example 3–3.

ตัวอย่าง 3-3 (a)

ปริมาตรจำเพาะที่เปลี่ยนไปจากของเหลวอิ่มตัวเป็นไออิ่มตัวจะเท่ากับ

$v_{fg} = v_g - v_f = 1.6941 - 0.001043$

$= 1.6931\ m^3/kg$

ดังนั้นปริมาตรที่เปลี่ยนไปทั้งหมดจะเป็น

$\Delta V = mv_{fg} = (0.2)(1.6931)$

$= 0.3386\ m^3$ Ans

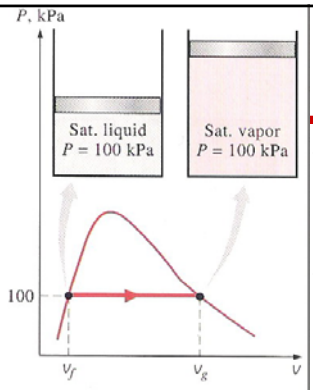


FIGURE 3–33
Schematic and P-v diagram for Example 3–3.

ตัวอย่าง 3-3 (b)

พลังงานที่ใช้ในการทำให้น้ำ 1 kg กลายเป็นไอที่ความดัน 100 kPa คือ

$h_{fg@100\ kPa} = 2257.5\ kJ/kg$

พลังงานที่ใช้กับน้ำมวล 200 g จะเป็น

$H = mh_{fg} = (0.2)(2257.5)$

$= 451.5\ kJ$ Ans

ของผสมอิ่มตัว

- ในขณะเกิดกระบวนการกลายเป็นไอ สารจะอยู่ในสถานะของเหลวผสมไอหรือส่วนผสมระหว่างของเหลวอิ่มตัวกับไออิ่มตัว
- ในการวิเคราะห์คุณสมบัติผสมนี้เราต้องนิยามคุณสมบัติขึ้นมาอีกค่าหนึ่ง

ค่าคุณภาพ (quality, x)

ค่าคุณภาพ (quality, x)

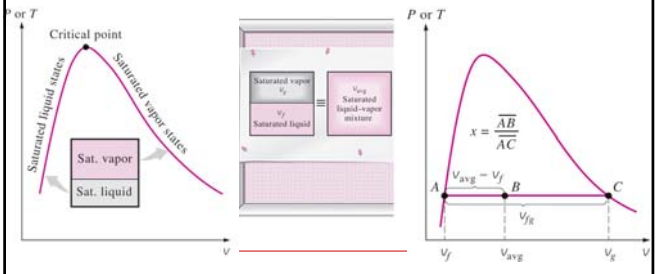
อัตราส่วนของมวลของสารในสถานะไออิ่มตัวหารด้วยมวลของสารทั้งระบบ

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}}$$

$$m_{total} = m_{liquid} + m_{vapor} = m_f + m_g$$

ค่าคุณภาพ (quality, x)

ค่าของ x จะไม่น้อยกว่าศูนย์หรือมากกว่าหนึ่ง



การหาค่าคุณสมบัติในช่วงของผสมอิ่มตัว

- ปริมาตรของเหลวอิ่มตัวที่ผสมอยู่ เท่ากับ V_f
- ปริมาตรไออิ่มตัวที่ผสมอยู่ เท่ากับ V_g

เพราะฉะนั้นปริมาตรรวม $V = V_f + V_g$

จาก $V = mv$

$m_t v = m_f v_f + m_g v_g$

การหาค่าคุณสมบัติในช่วงของผสมอิ่มตัว

- เนื่องจาก $m_f = m_t - m_g$ ดังนั้น

$m_t v = (m_t - m_g) v_f + m_g v_g$

- หารตลอดด้วย m_t

$$v = \frac{m_t - m_g}{m_t} v_f + \frac{m_g}{m_t} v_g$$

การหาค่าคุณสมบัติในช่วงของผสมอิ่มตัว

$$v = \frac{m_t - m_g}{m_t} v_f + \frac{m_g}{m_t} v_g$$

จาก $x = m_g / m_t$

$$v = (1-x)v_f + xv_g$$
$$= v_f + x\left(v_g - v_f\right)$$
$$= v_f + xv_{fg}$$

การหาค่าคุณสมบัติในช่วงของผสมอิ่มตัว

ถ้า y เป็นคุณสมบัติใด ๆ จะได้ว่า

$$y = y_f - xy_{fg}$$

การหาค่า x สามารถหาได้จาก

$$x = \frac{y - y_f}{y_{fg}}$$
$$= \frac{y - y_f}{y_g - y_f}$$

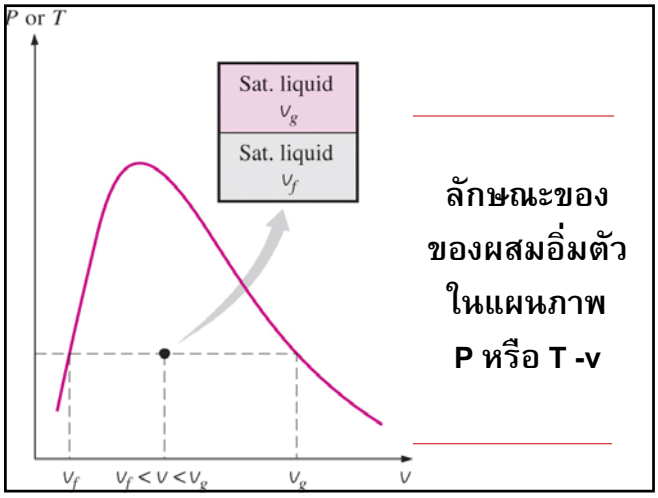
ข้อควรจำสำหรับของผสมอิ่มตัว

- $x = 0$ หมายถึงของเหลวอิ่มตัว
- $x = 1$ หมายถึงไออิ่มตัว
- เป็นไปไม่ได้ที่จะมี $x > 1$ หรือ $x < 0$
- ในช่วงนี้ $y_f < y < y_g$ เมื่อ y เป็นคุณสมบัติใด ๆ

ลักษณะของของผสมอิ่มตัว

- มีความดันเท่ากับความดันอิ่มตัว
- มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัว
- มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว

$y_f < y < y_g$



ลักษณะของของผสมอิ่มตัวในแผนภาพ P หรือ T -v

ตัวอย่าง 3-4

ถังใบหนึ่งบรรจุน้ำ 10 kg อุณหภูมิ 90°C ถ้าน้ำ 8 kg อยู่ในสภาวะของเหลว จงหา (a) ความดันภายในถัง (b) ปริมาตรของถัง

(a) เนื่องจากน้ำอยู่ในสภาวะของผสมอิ่มตัว ดังนั้นความดันต้องเป็นความดันอิ่มตัว

$P = P_{sat@90°C} = 70.183$ kPa Ans

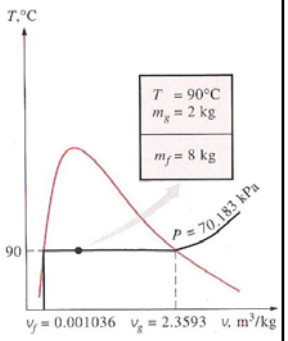


FIGURE 3–38
Schematic and T-v diagram for Example 3–4.

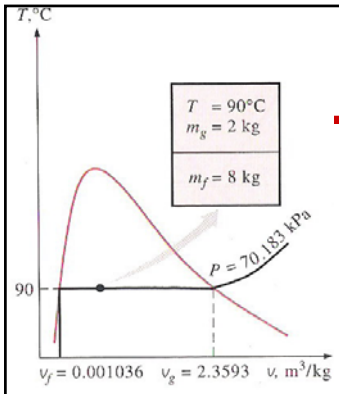


FIGURE 3–38
Schematic and T-v diagram for Example 3–4.

ตัวอย่าง 3-4

ที่ 90°C ค่า $v_f = 0.001036$ m³/kg และค่า $v_g = 2.3593$ m³/kg

วิธีที่ 1

จาก $V = m_f v_f + m_g v_g$

ดังนั้น $V = (8)(0.001036) + (2)(2.3593)$

$= 4.73$ m³ Ans

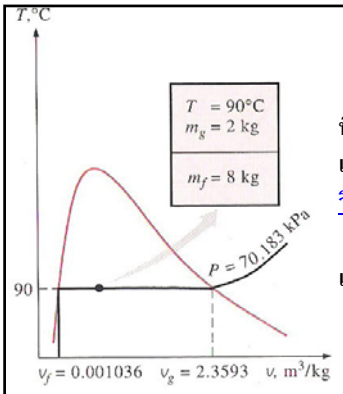


FIGURE 3–38
Schematic and T-v diagram for Example 3–4.

ตัวอย่าง 3-4

ที่ 90°C ค่า $v_f = 0.001036$ m³/kg และค่า $v_g = 2.3593$ m³/kg

วิธีที่ 2

$x = m_g/m_t = (2)/(10) = 0.2$

และ $v = v_f + x v_{fg}$

$v = 0.001036 + (0.2)(2.3593-0.001036)$

$= 0.473$ m³/kg

$V = mv = (10)(0.473)$

$= 4.73$ m³ Ans

ตัวอย่าง 3-5

ภาชนะขนาด 80 ลิตรบรรจุด้วยสารทำความเย็น R-134a โดยที่มวลของสารเท่ากับ 4 kg และมีความดัน 160 kPa จงหา

(a) อุณหภูมิของสารทำความเย็น

(b) ค่าคุณภาพไอ (c) เอนทาลปี

(d) ปริมาตรของ R-134a เฉพาะส่วนที่เป็นไอ

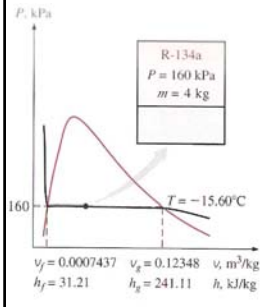


FIGURE 3–39
Schematic and P-v diagram for Example 3–5.

ตัวอย่าง 3-5 (a)

ด้วยข้อมูลเท่าที่โจทย์ให้มา ยังไม่สามารถทราบได้ว่าสารทำความเย็นอยู่ในสถานะใด แต่สามารถเปรียบเทียบค่าได้ดังนี้คือ

$v = V/m = (0.080)/(4) = 0.02$ m³/kg

ที่ความดัน 160 kPa

จากตาราง A-12 ได้ว่า

$v_f = 0.0007435$ m³/kg และ

$v_g = 0.12348$ m³/kg

ตัวอย่าง 3-5 (a)

จากตาราง A-12 ได้ว่า

$v_f = 0.0007435\ m^3/kg$ และ $v_g = 0.12348\ m^3/kg$

เนื่องจาก $v_f < v < v_g$ ดังนั้น สารทำความเย็นนี้จะอยู่ในช่วงของ sat. mixture

นั่นคือ อุณหภูมิก็ควรเป็นอุณหภูมิอิ่มตัว

$T = T_{sat@\ 160kPa} = -15.60\ °C$ Ans

ตัวอย่าง 3-5 (b)

ค่าคุณภาพหาได้จาก

$x = (v - v_f) / v_{fg}$

$= (0.02-0.0007437)/(0.12348-0.0007437)$

$= 0.157$ Ans

ตัวอย่าง 3-5 (c)

เอนทาลปีหาจาก

$h = h_f + xh_{fg}$

จาก ตาราง A-12 hf = 31.21 kJ/kg และ hg = 209.90 kJ/kg จะได้ว่า

$h = 31.21 + (0.157)(209.90)$

$= 64.2$ kJ/kg Ans

ตัวอย่าง 3-5 (d)

จาก $m_g = xm_t = (0.157)(4kg) = 0.638\ kg$

ดังนั้น $V_g = m_g v_g$

$= (0.638)(0.12348) = 0.0775\ m^3$

ปริมาตรส่วนที่เป็นไอจะเท่ากับ 77.6 ลิตร

ปริมาตรที่เหลืออีก 2.5 ลิตรจะเป็นของเหลว

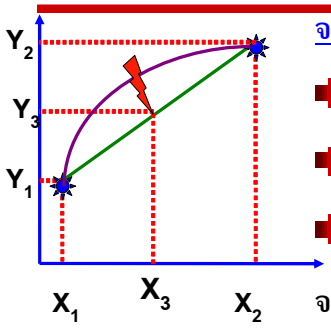
INTERPOLATION

- การใช้ตารางหากว่าค่าที่กำหนดให้ไม่ตรงกับค่าที่มีอยู่ในตาราง
- การเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัตินั้นโดยปกติไม่ได้เปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้น

LINEAR INTERPOLATION

- ถ้าการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเราอาจสมมุติว่าการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นได้
- เราจะหาค่าในระหว่างนั้นได้โดยการใช้ linear interpolation หรือ การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น

LINEAR INTERPOLATION



จากรูป

- ที่ $x = x_1$ ได้ $y = y_1$
- ที่ $x = x_2$ ได้ $y = y_2$
- ที่ x_3 ($x_1 < x_3 < x_2$)

จะได้ y_3 = ?

LINEAR INTERPOLATION

x เพิ่มขึ้น ($x_2 - x_1$) จะได้ y เปลี่ยนไป $y_2 - y_1$

x เพิ่มขึ้น ($x_3 - x_1$) จะได้ y เปลี่ยนไป $\Delta y = y_3 - y_1$

ดังนั้น

$$\Delta y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\left(x_3 - x_1\right)$$

$$y_3 = y_1 - \frac{\left(y_2 - y_1\right)}{\left(x_2 - x_1\right)}\left(x_3 - x_1\right)$$

ตัวอย่าง การทำ Linear interpolation

จงหาความดันอิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิ 133 °C

ที่ 130 °C P_{sat} = 270.28 kPa

ที่ 135 °C P_{sat} = 313.22 kPa

ดังนั้นที่ 133 °C จะได้ P_{sat} เท่ากับ

ตัวอย่าง การทำ Linear interpolation

$$P_3 = P_1 + \frac{\left(P_2 - P_1\right)}{\left(T_2 - T_1\right)}\left(T_3 - T_1\right)$$

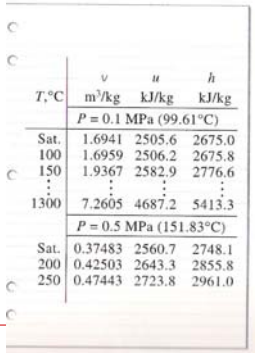
$$P_{sat@133^\circ C} = 270.28 + \frac{313.22 - 270.28}{135 - 130}\left(133 - 130\right)$$

ซึ่งได้คำตอบเท่ากับ

295.444 kPa Ans

ไอร้อนยวดยิ่ง (Superheated vapor)

สำหรับช่วงที่เป็นไอร้อนยวดยิ่ง สารจะอยู่ในสภาวะสถานะเดียว ดังนั้นอุณหภูมิ และความดันก็จะเป็นอิสระต่อกัน เพียงพอที่จะนำมาใช้บ่งสภาวะของสารได้ แสดงในตาราง A-6

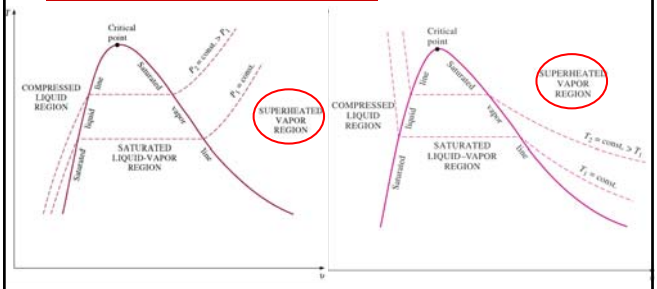


T,°C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg
	P = 0.1 MPa (99.61°C)		
Sat.	1.6941	2505.6	2675.0
100	1.6959	2506.2	2675.8
150	1.9367	2582.9	2776.6
⋮	⋮	⋮	⋮
1300	7.2605	4687.2	5413.3
	P = 0.5 MPa (151.83°C)		
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1
200	0.42503	2643.3	2855.8
250	0.47443	2723.8	2961.0

คุณสมบัติของไอร้อนยวดยิ่ง

- ณ อุณหภูมิที่กำหนดให้ ความดันจะต่ำกว่าความดันอิ่มตัว ($P < P_{sat}$)
- ณ ความดันที่กำหนดให้ อุณหภูมิจะสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ($T > T_{sat}$)

คุณสมบัติของไอร้อนยวดยิ่ง



คุณสมบัติของไอร้อนยวดยิ่ง

ที่ความดันหรืออุณหภูมิที่กำหนดให้ คุณสมบัติอื่น ๆ จะต้องสูงกว่าคุณสมบัติของไออิ่มตัว

$$v > v_g \ , \ u > u_g \ , \ h > h_g$$

ตัวอย่าง - ไอร้อนยวดยิ่ง

ตัวอย่าง 3-6 ให้หาค่าพลังงานภายในของน้ำที่ 200 kPa และ 300 °C u = 2,808.8 kJ/kg

ตัวอย่าง 3-7 ให้หาอุณหภูมิของน้ำที่สภาวะความดัน 0.5 MPa และ h = 2,890 kJ/kg

ตัวอย่าง - ไอร้อนยวดยิ่ง

ตัวอย่าง 3-7 ตรวจค่า h ที่

P = 0.5 MPa และ h = 2,890 kJ/kg

จากตาราง A-5 พบว่า $h > h_g$ แสดงว่าเป็นสภาวะ ไอร้อนยิ่งยวด จึงเปิดต่อที่ ตาราง A-6 ที่ P = 0.5 MPa

ตัวอย่าง - ไอร้อนยวดยิ่ง

พบว่า ค่า h มีค่าอยู่ระหว่าง

ที่ T = 200 °C ได้ h = 2855.8 kJ/Kg

T = ? ได้ h = 2890 kJ/kg

ที่ T = 250 °C ได้ h = 2961.0 kJ/kg

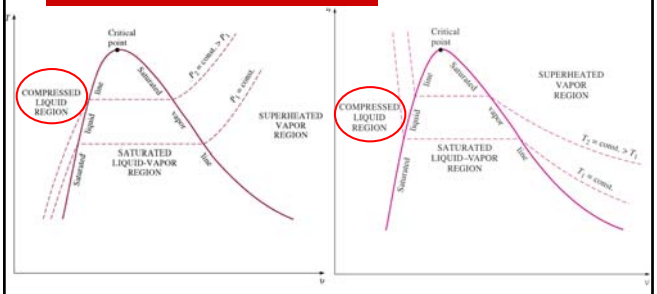
จึงทำ linear interpolation ได้ T = 216.3 °C

ของเหลวอัดตัว (Compress Liquid)

สภาวะของของเหลวอัดตัวได้แก่

- ที่อุณหภูมิที่กำหนดให้ ความดันจะสูงกว่าความดันอิ่มตัว (P > Psat)
- ที่ความดันที่กำหนดให้ อุณหภูมิจะต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว (T < Tsat)

ของเหลวอัดตัว (Compress Liquid)



ของเหลวอัดตัว (Compress Liquid)

ที่ความดันหรืออุณหภูมิที่กำหนดให้ คุณสมบัติอื่น ๆจะน้อยกว่าคุณสมบัติของของเหลวอิ่มตัว

$$v < v_f \quad u < u_f \quad h < h_f$$

การหาค่าคุณสมบัติของเหลวอัดตัว

ใช้ตาราง A-7 : กรณีที่ไม่มียกเว้น

- การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของสารที่อยู่ในสภาพของเหลวเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความดันจะมีน้อยมาก
- ในทางปฏิบัติ เราจะอนุโลมให้ใช้คุณสมบัติของเหลวอิ่มตัว ณ อุณหภูมิที่กำหนดให้ แทน

การหาค่าคุณสมบัติของเหลวอัดตัว

- การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของสารที่อยู่ในสภาพของเหลวเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความดันจะมีน้อยมาก
- ในทางปฏิบัติ เราจะอนุโลมให้ใช้คุณสมบัติของเหลวอิ่มตัว ณ อุณหภูมิที่กำหนดให้ แทน

การหาค่าคุณสมบัติของเหลวอัดตัว

ในทางปฏิบัติอาจประมาณ

$$y = y_{f@T}$$

โดยที่ y คือ v, u, h หรือคุณสมบัติอื่น ๆ

ตัวอย่าง 3-8

จงหาพลังงานภายในของน้ำที่ 80 °C, 5 MPa

(a) โดยวิธีใช้ข้อมูลจากตารางของน้ำเหลวอัด

(b) ใช้ข้อมูลจากตารางน้ำเหลวอิ่มตัว

(c) แสดงความแตกต่างของพลังงานภายในจากการหาโดยวิธีที่ 1 และ 2

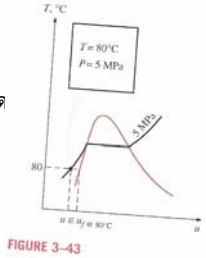


FIGURE 3–43
Schematic and T-u diagram for Example 3–8.

ตัวอย่าง 3-8

คุณสมบัติของน้ำที่ 80 °C, 5 MPa

- ความดันอิ่มตัวของน้ำที่ 80 °C คือ 47.39 kPa
- แต่ความดันที่กำหนดให้คือ 5 MPa
- นั่นคือ $P > P_{sat}$
- ดังนั้นน้ำจะอยู่ในสภาวะน้ำเหลวอัดตัว

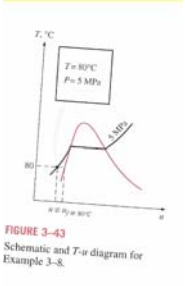


FIGURE 3–43
Schematic and T-ir diagram for Example 3–8.

ตัวอย่าง 3-8

(a) จากตารางของน้ำเหลวอัดตัว ตาราง A-7

P = 5 MPa , T = 80 °C จะได้

u = 333.82 kJ/kg Ans

ตัวอย่าง 3-8

(b) จากตารางของน้ำอิ่มตัว ตาราง A-4

$u = u_{f@80^\circ C}$

= 334.97 kJ/kg Ans

และได้ P_{sat} เท่ากับ 47.39 kPa

ตัวอย่าง 3-8

(c) ค่าพลังงานภายในต่างกันเท่ากับ

334.97-333.82 = 1.15 kJ/kg

หรือคิดเป็นร้อยละ (1.15/333.82) *100= 0.34% Ans

ขณะที่ความดันต่างกัน 5000/47.39 = 105.5 เท่า

ข้อควรจำในการใช้ตารางของเหลวอัดตัว

- หากความดันไม่สูงมากพอ จะไม่สามารถใช้ตารางของเหลวอิ่มตัวได้
- การหาคุณสมบัติโดยใช้ค่าของเหลวอิ่มตัวแทนจะต้องใช้ที่อุณหภูมิเดียวกันเท่านั้น

สมการสภาวะของก๊าซอุดมคติ

- การใช้ตารางเป็นเรื่องยุ่งยาก หากเรามีสมการคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน อุณหภูมิ ปริมาตร จะทำให้การคำนวณง่ายขึ้นมาก
- สมการที่แสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน อุณหภูมิ ปริมาตร จะเรียกว่า สมการสภาวะ

Gas กับ Vapor

- Gas กับ Vapor มีความหมายเหมือนกัน
- Vapor ใช้กับสารที่สภาวะไม่ห่างจากสภาวะสารควบแน่นกลายเป็นของเหลว
- Gas ใช้เรียกสภาวะของสารที่มีอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature)

กฎของ BOYLE

ในปี ค.ศ. 1662 Robert Boyle นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษค้นพบว่า *ความดันของก๊าซจะเป็นปฏิภาคผกผันกับปริมาตร* กล่าวคือถ้าอุณหภูมิของก๊าซอุดมคติคงที่จะได้ว่า

$$v \propto \frac{1}{P}$$

กฎของ CHARLES

J.Charles & J.Gay-Lussac ชาวฝรั่งเศสค้นพบว่า ที่ซึ่งความดันต่ำ *ปริมาตรของก๊าซจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอุณหภูมิ*

$$v \propto T$$

สมการสภาวะ

จากทั้งสองกรณีจะได้

$$v \propto \frac{T}{P}$$

หรือ $Pv \propto T$

ดังนั้น $Pv = RT$

R คือค่า Gas Constant แล้วแต่ชนิดของก๊าซ

T และ P ต้องเป็นค่าสัมบูรณ์

ค่าคงที่ของ Gas (R)

- ค่า R จะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ
- ค่าคงที่สากลของก๊าซทุกชนิดจะเท่ากัน

โดย $R = \frac{R_u}{M}$

R_u = 8.314447 kJ/(kmol.K)

M คือมวลโมเลกุล (molar mass หรือ molar weight) ใน SI unit มีหน่วยเป็น kg/kmol

มวลโมเลกุล (M)

- มวลโมเลกุลนี้หมายถึงมวลในหน่วยกิโลกรัมของสารปริมาณ 1 kmol

  เช่น N_2 มวลโมเลกุล 28 หมายความว่า N_2 จำนวน 1 kmol มีมวล 28 kg
- อีกค่าที่สำคัญคือ mole number, N [kmol]
- ถ้า m คือมวลของสารทั้งหมด จะได้ m = MN

สมการสภาวะในรูปแบบอื่น

จาก V = mv จะได้ PV = mRT

mR = MNR จะได้ $PV = NR_u T$

จาก $V = N\bar{v}$ จะได้

$$P\bar{v} = R_u T$$

ไอน้ำเป็นแก๊สในอุดมคติหรือไม่ ?

- ไอน้ำก็เช่นเดียวกับก๊าซอื่น คือถ้าหากว่าความดันต่ำก็อาจพิจารณาว่าเป็นก๊าซอุดมคติได้
- โดยทั่วไปจะนิยมใช้ตารางไอน้ำมากกว่า

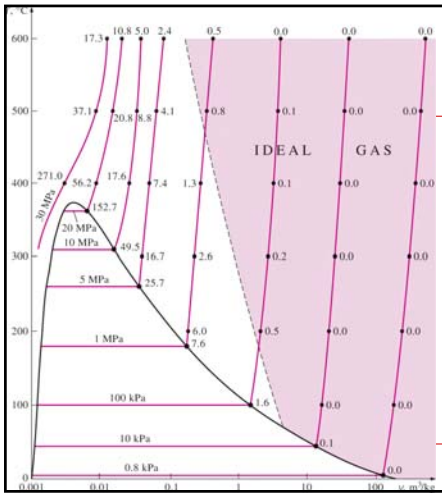


Fig. 3-49

Compressibility Factor (Z)

- สมการสภาวะ เป็นสมการง่าย ๆและสะดวกในการนำไปใช้งาน
- จาก Fig 3-49 จะพบว่าช่วงของสารที่ใกล้สภาวะอิ่มตัวและจุดวิกฤต จะแสดงพฤติกรรมห่างออกจาก แก๊สในอุดมคติ
- **Compressibility fact** จึงเป็นค่าที่ใช้ปรับแก้สมการสภาวะ

Compressibility Factor (Z)

Compressibility fact (Z) จึงเป็นค่าที่ใช้ปรับแก้สมการสภาวะ

$$Z = \frac{Pv}{RT}$$

$$Pv = ZRT$$

Compressibility Factor (Z)

$$Z = \frac{v_{actual}}{v_{ideal}}$$

$$v_{ideal} = RT/P$$

Z = 1 ถือว่าเป็น Ideal gas
นอกจากนั้น ถือว่าเป็น Real Gases

V_{actual} คือปริมาตรจำเพาะที่เกิดขึ้นจริง

V_{ideal} คือปริมาตรจำเพาะที่ได้จากสมการกรณีพิจารณาเป็นแก๊สในอุดมคติ

สมการสภาวะ ของIdeal Gas

การที่จะพิจารณาใช้สมการสภาวะของ Ideal gas

- ความดัน ต้องต่ำมาก ๆ
- อุณหภูมิ ต้องสูงมาก ๆ

แล้วจริงเกิดคำถามว่า ความดันต้องต่ำเท่าไหร่? อุณหภูมิต้องสูงถึงเท่าไหร่?

สมการสภาวะ ของIdeal Gas

อากาศ หรือ ไนโตรเจน สามารถที่จะใช้สมการสภาวะของ Ideal gas ได้เลย เนื่องจากที่อุณหภูมิและความดันปกติ อากาศหรือไนโตรเจนนั้นมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่จุดวิกฤตมาก อีกทั้งความดันต่ำ เมื่อเทียบกับจุดวกฤต

Compressibility Factor (Z)

สารโดยส่วนใหญ่ จะมีสถานะเป็นของแข็ง สภาวะของสารจะห่างจากจุดวิกฤตเพียงใด นั้นใช้ค่าสัดส่วนของอุณหภูมิและความดันใด ๆ เทียบกับค่าที่จุดวิกฤต โดยกำหนดในรูป

P_R คือความดันลดรูปReduced Pressure

T_R คืออุณหภูมิลดรูป Reduced Temperature

Compressibility Factor (Z)

พบว่า ค่า Z หรือ ปัจจัยของความสามารถในการอัดตัว (Compressibility factor) ของทุก ๆแก๊สจะเปลี่ยนไปตามค่า P_R และ T_R โดย

$$P_R = P/P_{cr}$$

$$T_R = T/T_{cr}$$

เรียกว่า หลักของการปรับแก้สภาวะ

Compressibility Factor (Z)

ค่า Z ได้จากการทำการทดลองแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของค่า Z ,T_R และ P_R ได้ดังรูปที่ 3-51 ซึ่งสามารถใช้ได้กับทุก ๆแก๊ส นั่นคือ

$P_R << 1$ และ $T_R > 2$

นอกจากนั้นใช้ไม่ได้

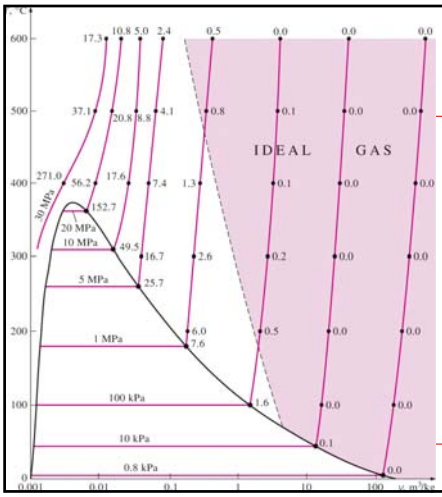
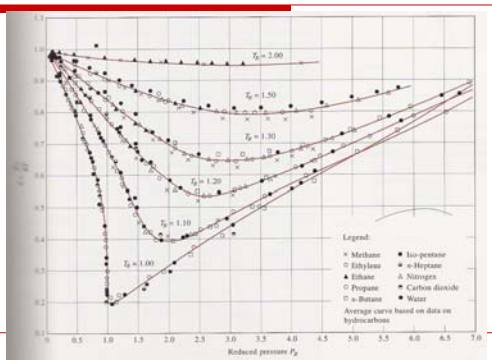


Fig. 3-49

Figure 3-51 : Compressibility Factor (Z)



Compressibility Factor (Z)

เรายังสามารถเขียนกราฟรูปทั่วไปของ Compressibility ในรูปของ สมบัติตัวที่สาม คือ ปริมาตรจำเพาะ (v) โดยเขียนในรูปของ V_R ดังแสดงใน Figure A-15 โดยนิยามว่า

$$V_R = \frac{V_{actual}}{RT_{cr}/P_{cr}}$$

V_R เรียกว่า pseudo-reduced specific volume

ตัวอย่าง Compressibility Factor (Z)

ให้หาปริมาตรจำเพาะของสารทำความเย็น R134a ที่ความดัน 1 MPa อุณหภูมิ 50 °C

(a) ใช้สมการสภาวะของ Ideal gas

(b) ใช้ Compressibility chart

จากตาราง A-1 สารทำความเย็น R134a มีค่า R P_{cr} และ T_{cr}

ตัวอย่าง Compressibility Factor (Z)

จากตาราง A-1 สารทำความเย็น R134a

R = 0.0815 kPa.m^3/kg.K

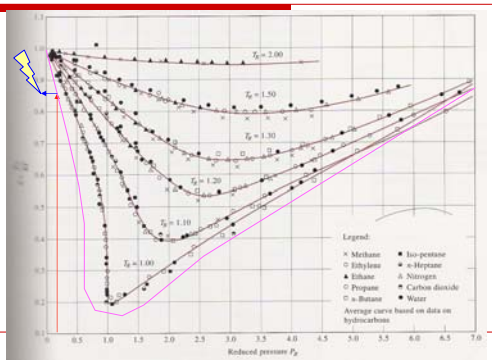
P_{cr} = 4.059 MPa

T_{cr} = 374.2 K

(a) แทนค่าในสมการสภาวะของ Ideal gas จะได้

$$v = \frac{RT}{P} = \frac{(0.0815)(323)}{1000} = 0.026325 \quad m^3/kg$$

Figure 3-51 : Compressibility Factor (Z)



ตัวอย่าง Compressibility Factor (Z)

จากตาราง A-1 สารทำความเย็น R134a

R = 0.0815 kPa.m^3/kg.K ,P_{cr} = 4.059 MPa,T_{cr} = 374.2 K

(b) หาค่าลดรูปของความดันและอุณหภูมิ

$$\left.\begin{aligned} P_R &= \frac{1.0}{4.059} = 0.246 \\ T_R &= \frac{323}{374.2} = 0.863 \end{aligned}\right\} \quad Z = 0.84$$

$$v = Zv_{ideal} = (0.84)(0.026325) = 0.022113\ m^3/kg$$

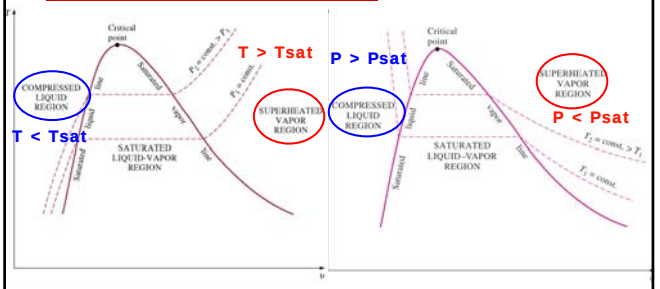
ตัวอย่าง Compressibility Factor (Z)

$$v = Zv_{ideal} = (0.84)(0.026325) = 0.022113\ m^3/kg$$

หรือ

$$v = \frac{ZRT}{P} = \frac{(0.84)(0.0815)(323)}{1000} = 0.022113\ m^3/kg$$

สรุปบทที่ 3



v ≅ vg , u ≅ ug , h ≅ hg

สรุปบทที่ 3

Ideal gas : Pv=mRT หรือ PV=RT
เมื่อ ความดันต่ำๆ อุณหภูมิสูง

Other : Pv=ZRT

$P_R = P/P_{cr}$ $T_R = T/T_{cr}$ = = > Z