

## บันทึกคำบรรยายสรุปวิชาฟิสิกส์อุณหภาพ (PH 314) ครั้งที่ 7

เสียงจากผู้ประกาศนำ

“การบันทึกแถบคำบรรยายสรุปกระบวนการวิชาของมหาวิทยาลัยรามคำแหง มุ่งส่งเสริมการศึกษาด้วยตนเองและบริการความรู้มายังนักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์พระราชบัญญัติจัดตั้งมหาวิทยาลัยรามคำแหง เป็นตลาดวิชา.....ผลิตโดยสำนักเทคโนโลยีการศึกษามหาวิทยาลัยรามคำแหง ท่านผู้ฟังครับ ต่อไปนี้เป็นการบรรยายสรุปวิชาฟิสิกส์อุณหภาพหรือเทอร์มัลฟิสิกส์ (PH 314) ครั้งที่ 7 ในหัวข้อ

1. การทำก๊าซเหลวโดยปรากฏการณ์จูล-เคลวิน (ต่อ)
2. การทำน้ำแข็งแห้ง
3. การระเหิด

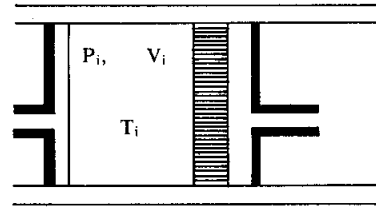
โดย รศ.อัจฉรา พันธุ์อำไพ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยรามคำแหง

\*\*\*\*\*บันทึกแถบคำบรรยายสรุปนี้ประกอบการบรรยาย  
ด้วยการฉายแผ่นภาพโปร่งใสตลอดคำบรรยาย\*\*\*\*\*

## การทำก๊าซเหลวโดยปรากฏการณ์จูล-เคลวิน (ต่อ)

ดังได้กล่าวไว้แล้วในตอนก่อนว่าโดยอาศัยปรากฏการณ์จูล-เคลวิน หรือการทดลองกับปลั๊กพอร์นในการทำก๊าซเหลว จะไม่มีความร้อนถ่ายเทเข้า-ออกได้ และความดันในตอนสุดท้ายจะน้อยกว่าความดันเมื่อเริ่มต้น

ปรากฏว่าการทดลองนี้ค่าเอนทัลปีของระบบจะไม่เปลี่ยนแปลง นั่นคือ เอนทัลปีในตอนสุดท้ายเท่ากับเอนทัลปีเมื่อเริ่มต้น

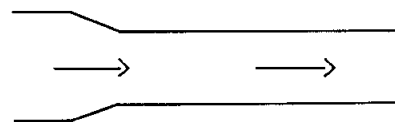


รูปที่ 33

โดยให้ผนังพอร์นอยู่ในตำแหน่งเดิมตลอดการทดลอง แต่ลูกสูบทั้งสองข้างของผนังพอร์นเลื่อนไปมาได้ จากในตอนเริ่มต้นก๊าซภายในกระบอกสูบมีค่าของความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิเป็น  $P_i$ ,  $V_i$ , และ  $T_i$  ในรูปที่ 33 โดย  $P_i$  คงที่จนถึงตอนสุดท้ายมีค่าเป็น  $P_f$ ,  $V_f$  และ  $T_f$  โดย  $P_f$  คงที่

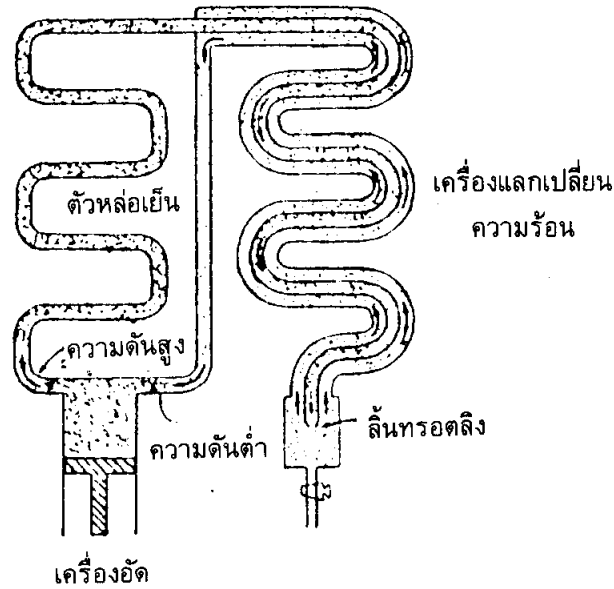
จากกฎข้อที่หนึ่ง จะได้ว่า  $dU = d'Q - d'W = -d'W$  เนื่องจาก  $d'Q = 0$  และ  $d'W$  จะหาค่าได้จาก  $d'W_i = \int_{V_i}^0 P_i dV = -P_i V_i$  เพราะเมื่อเริ่มต้นก๊าซอยู่ในระหว่างลูกสูบข้างซ้ายของผนังพอร์นจึงมีปริมาตรเปลี่ยนไปจาก  $V_i$  เป็น 0 และจาก  $d'W_f = \int_0^{V_f} P_f dV = P_f V_f$  ในตอนสุดท้าย เพราะก๊าซอยู่ระหว่างลูกสูบข้างขวาของผนังพอร์น จึงมีปริมาตรเปลี่ยนจาก 0 เป็น  $V_f$  ดังนั้น จึงได้  $U_f - U_i = -P_f V_f + P_i V_i$  หรือ  $U_f + P_f V_f = U_i + P_i V_i$  นั่นคือ  $H_f = H_i$  แสดงว่า เอนทัลปีของระบบคงที่ในกระบวนการนี้

นักศึกษาจะพบว่าในกระบวนการทรอตลิง (throttling process) ซึ่งมีการไหลผ่านหัวฉีด (throttle valve) อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 34 จะให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองข้างต้น



รูปที่ 34

ในส่วนประกอบของเครื่องทำก๊าซเหลวซึ่งเรียกว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระแสวน (counter-current heat exchanger) (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 35) นั้น ภายหลังจากที่อัดก๊าซเข้าไปด้วยเครื่องอัดและทำให้ก๊าซเย็นลงบ้างแล้ว โดยอาศัยตัวหล่อเย็น ต่อจากนั้นให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ภายในท่อสองชั้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระแสวน ในที่สุดก๊าซจะผ่านกระบวนการทรอตลิงเมื่อมีการไหลผ่านหัวฉีดอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ความดันสุดท้ายน้อยกว่าเริ่มต้น

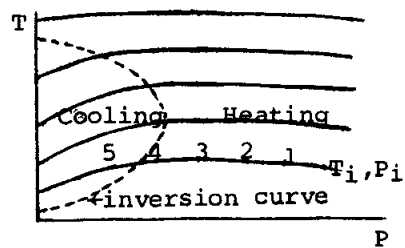


รูปที่ 35

ถ้าก๊าซมีอุณหภูมิต่ำลงถึงจุดควบแน่น ส่วนหนึ่งของก๊าซนั้นจะกลายเป็นหยดเหลว และส่วนที่เหลืออยู่ในสถานะก๊าซจะไหลย้อนกลับ โดยไปตามท่อชั้นนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะผสมกับก๊าซที่จะอัดเพิ่มเติมผ่านเครื่องอัดก๊าซ ตามกระบวนการตั้งแต่นั้นอีกครั้งหนึ่ง และจะเป็นเช่นนี้เรื่อยไปถ้าอุณหภูมิของก๊าซยังลดลงไม่ต่ำพอที่กลั่นตัวเป็นหยดเหลว หรือเมื่อต้องการให้ได้ก๊าซเหลวเป็นปริมาณมาก ๆ จะให้กระบวนการดำเนินไปเรื่อย ๆ โดยอัดก๊าซเพิ่มเข้าไปในแต่ละครั้ง

การทำก๊าซเหลวโดยกรรมวิธีนี้จะได้ก๊าซเหลวหรือไม่เพียงใด ปรากฏว่าขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นเป็นอย่างมาก ดังที่จะได้แสดงผลการศึกษาจากการทดลองต่อไปนี้ โดยขอให้นักศึกษาดูรูปที่ 36 ประกอบด้วย

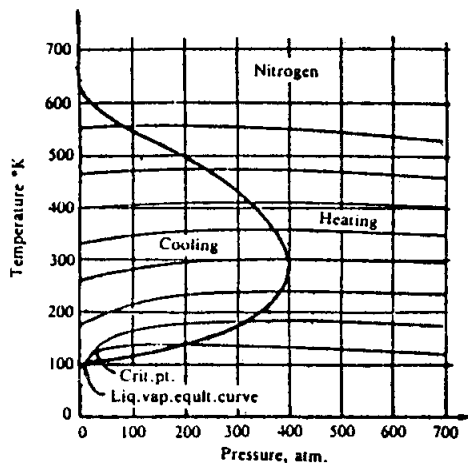
เมื่อเริ่มต้นก๊าซมีค่า  $T_i, P_i$  แต่หลังจากผ่านส่วนต่าง ๆ ของเครื่องทำก๊าซเหลวจนถึงส่วนสุดท้ายคือ วาล์วหรือลินทรอตติงจะมีความดันลดลง แต่อุณหภูมิอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ในแต่ละครั้ง โดยการเริ่มต้นครั้งต่อไปคือครั้งที่ 1, 2, 3, 4,... ตามลำดับ จะมีค่าเอนทัลปีเท่ากันทุกจุด ซึ่งเมื่อลากเส้นต่อระหว่างจุดเหล่านี้จะได้เส้นที่มีค่าเอนทัลปีค่าหนึ่ง จึงเรียกว่า เส้นไอเซนทัลปิก



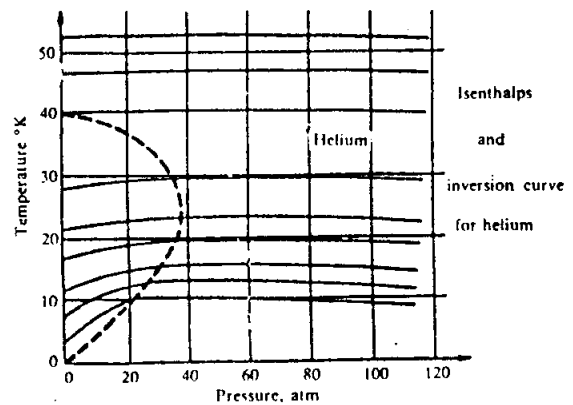
รูปที่ 36

จากการเริ่มต้นการทดลองที่ก๊าซมีค่าต่าง ๆ กัน จะได้เส้นที่มีค่าเอนทัลปีต่างกันชุดหนึ่ง สำหรับก๊าซนั้น ซึ่งเมื่อแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันจะมีลักษณะทั่วไปดังรูปที่ 36 ถ้าลากเส้นผ่านจุดสูงสุดของเส้นไอเซนทาลปีกเหล่านั้น จะได้เส้นที่เรียกว่าเส้นผกผัน (inversion curve) ซึ่งเป็นเส้นที่แสดงถึงตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงที่ก๊าซมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ร้อนขึ้น) กับช่วงที่ก๊าซมีอุณหภูมิต่ำลง (เย็นลง)

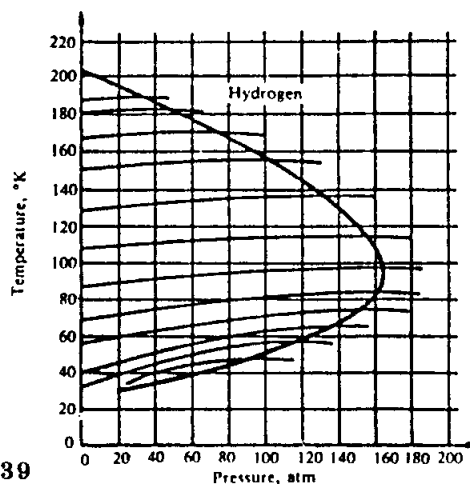
เมื่อทำการทดลองกับก๊าซต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และฮีเลียม โดยกรรมวิธีเดียวกันนี้ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความดัน ซึ่งมีลักษณะเฉพาะสำหรับก๊าซแต่ละชนิด (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 37, 38 และ 39 ตามลำดับ) เมื่อดูจากเส้นผกผันจะช่วยให้ทราบว่า จะสามารถทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิลดลงเมื่อใดบ้างและควรเริ่มต้นที่ใด ดังจะได้พิจารณาต่อไป



รูปที่ 37



รูปที่ 38



รูปที่ 39

ก) ถ้าเริ่มต้นจากทางขวาของเส้นผกผันซึ่งอยู่ในช่วงที่ก๊าซจะร้อนขึ้น โดยจะเห็นว่าเส้นกราฟพุ่งขึ้นไปทางด้านอุณหภูมิสูง ในขณะที่ความดันลดลงจากจุดเริ่มต้นไปยังจุด 1, 2, 3,... (ดูรูปที่ 36) ดังนั้นจะทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิสูงขึ้นตลอดเวลา

ข) ถ้าเริ่มต้นในช่วงที่ก๊าซเย็นลงได้ โดยจะเห็นว่าเส้นกราฟพุ่งต่ำลงไปทางด้านอุณหภูมิต่ำ โอกาสที่จะทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิต่ำลงถึงจุดควบแน่นก็เป็นไปได้

ค) ถ้าจุดเริ่มต้นของกระบวนการอยู่เหนือจุดตัดของเส้นผกผันกับแกนอุณหภูมิที่อุณหภูมิสูง (maximum inversion temperature) จะไม่สามารถทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิลดลงได้เลย เพราะอยู่นอกช่วงที่ก๊าซจะเย็นลงได้

ง) ถ้าต้องการให้ได้ก๊าซเหลวออกมามากที่สุด จากการอัดก๊าซปริมาณหนึ่งเข้าไปในเครื่องทำก๊าซเหลว จะสามารถกระทำได้ โดยต้องเริ่มต้นบนเส้นผกผัน เพราะว่า ถ้าอัดก๊าซปริมาณหนึ่งแล้วได้ก๊าซเหลวเป็นอัตราส่วน  $y$  ดังนั้น  $y = (h_f - h_i)/(h_f - h_1)$  เมื่อ  $h_i$  คือเอนทัลปีต่อโมลของก๊าซเริ่มต้น  $h_1$  คือเอนทัลปีต่อโมลของก๊าซเหลวในตอนท้าย และ  $h_f$  คือเอนทัลปีต่อโมลของก๊าซที่เหลือนตอนท้าย โดยที่เอนทัลปีทั้งหมดจะมีค่าคงที่ ทำให้ได้ว่า  $h_i = h_1 y + h_f(1-y)$  จะเห็นว่า  $y$  จะมีค่ามากที่สุด เมื่อกำหนดให้  $h_i$  มีค่าน้อยที่สุด

โดยที่  $h_i$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความดัน ดังนั้น สำหรับค่า  $h_i$  น้อยที่สุดตามหลักแคลคูลัส จะตรงกับกรณีที่  $(\partial h_i / \partial P)_{T, T_1} = 0$  ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะการเริ่มต้นว่าเริ่มอย่างไร

โดยที่  $(\partial h / \partial P)_T = -(\partial h / \partial T)_P (\partial T / \partial P)_h = -C_P \mu_h$  เมื่อ  $\mu_h$  คือความชันของเส้นไอเซนทาลปี เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของ จูล-เคลวิน ดังนั้นตามความสัมพันธ์ข้างต้น เมื่อต้องการก๊าซเหลวออกมามากที่สุด คือ ให้ได้  $y$  มีค่ามากที่สุด จึงให้  $\mu_h = 0$  นั่นคือจะต้องเริ่มต้นเมื่อค่าอุณหภูมิและความดันของก๊าซอยู่บนเส้นผกผัน

ขอให้นักศึกษาพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิกับความดันของก๊าซแต่ละชนิดดังแสดงไว้ในรูปที่ 37, 38 และ 39 สำหรับก๊าซไนโตรเจนจะเห็นว่า อุณหภูมิสูงสุดของเส้นผกผันใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แต่ของก๊าซไฮโดรเจนจะต่ำกว่ามาก และก๊าซฮีเลียมยิ่งต่ำลงไปใกล้ 0 เคลวินมาก ดังนั้นการทำก๊าซเหลววิธีนี้นับว่าต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก โดยเฉพาะเมื่อจะทำฮีเลียมเหลวก็ต้องลดอุณหภูมิต่ำกว่า 40 เคลวิน คือ  $-233^\circ\text{C}$ . ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดบนเส้นผกผัน จึงอาจจะต้องเตรียมไฮโดรเจนเหลวไว้เพื่อนำมาใช้ในการลดอุณหภูมิของก๊าซฮีเลียม ก่อนที่จะอัดเข้าเครื่องทำก๊าซเหลว และก่อนที่จะได้ไฮโดรเจนเหลวจะต้องเตรียม

ในโตรเจนเหลวให้ได้เสียก่อน เพื่อช่วยในการลดอุณหภูมิของก๊าซไฮโดรเจนก่อนที่จะอัดก๊าซไฮโดรเจนเข้าเครื่องทำก๊าซเหลวเช่นเดียวกัน

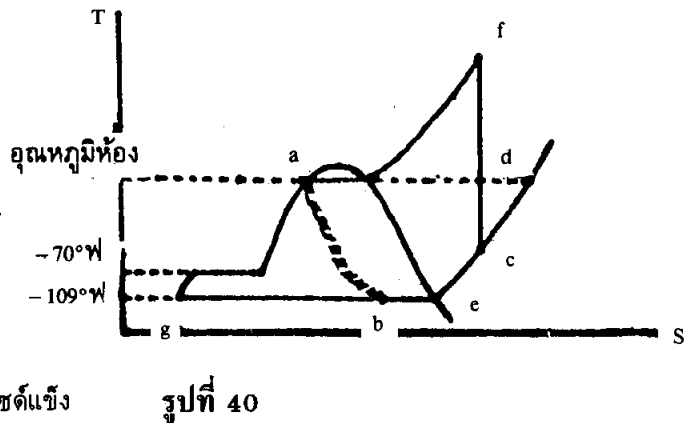
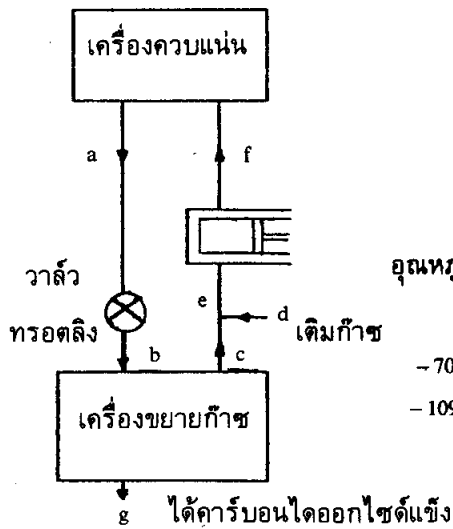
อย่างไรก็ตาม มีผู้นำกระบวนการขยายตัวแบบแอดเดียแบติกมาใช้ ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิของก๊าซได้ โดยไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายใด ๆ สำหรับเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการทำฮีเลียมเหลวด้วย เพราะดังได้กล่าวมาแล้วว่าในกระบวนการแอดเดียแบติกนั้นไม่ต้องการความร้อนถ่ายเทเข้าออก ซึ่งอาจใช้ฉนวนความร้อนหุ้มโดยรอบ หรืออาจให้กระบวนการเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จนความร้อนไม่ทันได้ไหลถ่ายเทเข้า-ออกได้ เมื่อก๊าซขยายตัวโดยวิธีนี้จะทำให้ก๊าซเย็นลง

### ข้อสังเกต

ขอให้ข้อสังเกตที่สำคัญสำหรับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่ำกับความดันของก๊าซตามการทดลองข้างต้นที่เรียกว่า เส้นไอเซนทาลป์กั้นนั้น ไม่ใช่เส้นของกระบวนการทรอติง เพราะเป็นการลากเส้นต่อจุดที่มีค่าเอนทัลปีเท่ากันเท่านั้น โดยไม่ทราบค่าต่าง ๆ ของระบบในระหว่างที่กระบวนการดำเนินไป จากจุดเริ่มต้นไปยังจุด 1, 2, 3,... ดังนั้น การลากเส้นต่อจุดที่มีค่าเอนทัลปีเท่ากัน จึงเป็นเพียงเส้นไอเซนทาลป์แต่ไม่เรียกเส้นกระบวนการทรอติง และจะไม่สามารถแสดงเส้นกระบวนการทรอติงลงในกราฟใด ๆ ได้ นอกจากจะแสดงด้วยเส้นประระหว่างจุดเริ่มต้นกับจุดสุดท้าย เพื่อแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในระหว่างจุดทั้งสองนั้น และจะใช้กรรมวิธีทำนองเดียวกัน (ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 40) ในเรื่องการทำน้ำแข็งแห้งที่จะได้กล่าวต่อไป

### การทำน้ำแข็งแห้ง

ในเรื่องการทำน้ำแข็งแห้งหรือคาร์บอนไดออกไซด์แข็งขอให้นักศึกษาพิจารณาให้ดี จะเห็นว่าอาศัยกระบวนการทำนองเดียวกันกับการทำก๊าซเหลวที่ได้ศึกษาแล้ว แต่เนื่องจากลักษณะของคาร์บอนไดออกไซด์เอง ที่ไม่อาจอยู่ในสถานะเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันบรรยากาศปกติ แต่จะกลายเป็นของแข็งออกมา ในการทำน้ำแข็งแห้งจึงต้องลดอุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์ลงให้ถึงจุดระเหิดนี้ โดยอาศัยกระบวนการดังแสดงไว้ในรูปที่ 40



ขั้นตอนของการทำน้ำแข็งแห้งจะเริ่มจากอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 1 บรรยากาศและอุณหภูมิห้อง จนกระทั่งความดันสูงขึ้นถึง 1000 ปอนด์/นิ้ว<sup>2</sup> ตามกระบวนการแอดเดียแบติกหรือตามเส้นไอเซนโทรปิก cf (ในรูปที่ 40)

เมื่อผ่านเครื่องควบแน่นจนได้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่อุณหภูมิห้องแล้ว จึงจะผ่านไปสู่วาล์วทรอตติง ซึ่งจะทำให้ความดันลดลงจนถึงความดันบรรยากาศ โดยผ่านขั้นตอนการขยายตัวอีกขั้นหนึ่งจาก a ไป b จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของแข็งและไอผสมกันอยู่ ในที่นี้จะมีการระเหิดของสารมาเกี่ยวข้องด้วย จึงจะนำเรื่องราวของการระเหิดมากล่าวต่อไป เพื่อที่นักศึกษาจะได้เข้าใจปัญหาในการทำไอแห้งเกี่ยวกับน้ำแข็งแห้งได้ง่ายขึ้น

### การระเหิด

สำหรับการระเหิดจะใช้สมการเคลลาซิอุส-กลาเปรง ตามที่ได้ศึกษาแล้วในตอนต้นของเรื่องการเปลี่ยนสถานะ แต่จะดัดแปลงรูปแบบของสมการเสียใหม่ ซึ่งในที่สุดจะได้สมการเคิร์ชฮอฟฟ์สำหรับการระเหิดโดยเฉพาะ

โดยที่การระเหิดนั้น สารในสถานะไอจะมีปริมาตรมากกว่าในสถานะของแข็งมาก และจะถือว่าไอมีความดันต่ำจนเป็นไปตามสมการของก๊าซอุดมคติ นั่นคือ สามารถใช้ความสัมพันธ์  $Pv = RT$  ในกรณีนี้ได้ ดังนั้นจากสมการเคลลาซิอุส-กลาเปรง  $dP/dT = \ell_s/T(v_3 - v_1)$  เมื่อ  $\ell_s$  คือ ความร้อนของการระเหิด,  $v_3$  คือ ปริมาตรของไอ/โมล และ  $v_1$  คือ ปริมาตรของของแข็ง/โมล จะได้สมการเคิร์ชฮอฟฟ์ ดังนี้

$$\ell_s = \int_0^T C_p''' dT - \int_0^T C_p' dT + \ell_0$$

เมื่อ  $C_p''$  คือ ความร้อนจำเพาะของไอ และ  $C_p'$  คือความร้อนจำเพาะของของแข็ง และ  $\ell_0$  คือ ความร้อนของกลายเป็นไอที่ 0 เคลวิน

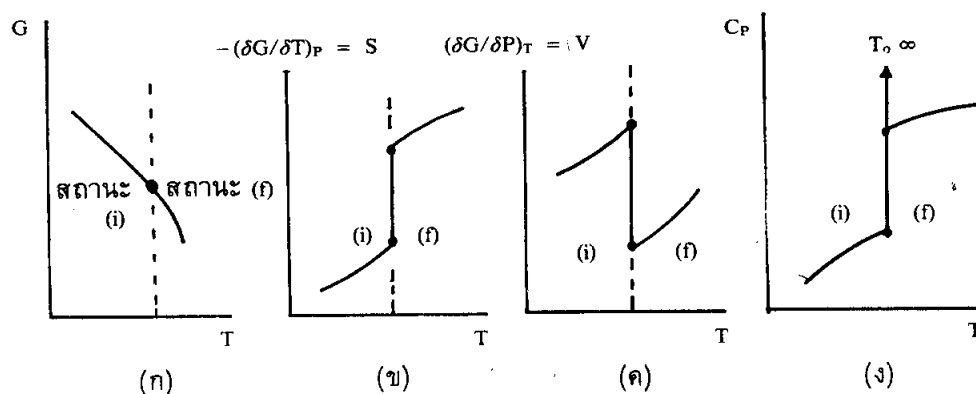
การนำสมการเคิร์ชฮอฟฟ์ไปใช้ นักศึกษาจะต้องระลึกว่า ค่าที่จะได้จากสมการนี้เป็นเพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น เพราะได้จากประมาณการว่า ปริมาตรของไอมากกว่าของของแข็งมากจนอาจละ  $V_1$  ทิ้งเสียได้ ( $V_3 - V_1 \sim V_3$ ) และไอที่ความดันต่ำเป็นไปตามกฎของก๊าซอุดมคติ ( $V_3 \sim RT/P$ )

ข้อดีของสมการเคิร์ชฮอฟฟ์ก็คือ สามารถใช้ได้ถูกต้องในทุกระดับอุณหภูมิ เพราะหากจะหาจากสมการเคลาส์-คลาเปรองโดยตรง จากการวัดความดันไอที่อุณหภูมิต่ำจะทำได้ยาก โดยเฉพาะจาก

$$\ell_s = R \frac{dP/P}{dT/T^2} = -R \frac{d(\ln P)}{d(1/T)} = -2.3 R \frac{d \log P}{d(1/T)} \text{ นั้น}$$

เมื่อวัดความดันไอที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้วนำมาเขียนลงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln P$  หรือ  $\log P$  กับ  $1/T$  จะได้ความชันของเส้นกราฟนำไปแทนค่าลงในสมการนี้ เพื่อหาความร้อนของการระเหิดนั้น สามารถหาได้เพียงบางช่วงอุณหภูมิเท่านั้น

ในตอนท้ายนี้จะขอให้นักศึกษาทราบเพิ่มเติมด้วยว่า เท่าที่ได้กล่าวถึงการเปลี่ยนสถานะของสารมาแล้วนั้นได้เน้นเฉพาะการเปลี่ยนสถานะระดับต้น (First-order transition) เท่านั้น ซึ่งหมายถึงการที่อนุพันธ์ลำดับแรกของค่ากิบส์ เปลี่ยนแปลงในขณะที่สารเปลี่ยนสถานะ แต่ค่าของกิบส์จะคงที่ดังได้พิสูจน์แล้ว โดยอุณหภูมิจึงความดันมีค่าคงที่ด้วย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 41 (ก) จะเห็นว่าที่อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะจะมีค่ากิบส์ค่าหนึ่งคงที่ ซึ่งแสดงว่าค่ากิบส์เท่ากันทั้งสองสถานะ



รูปที่ 41



ค่าอนุพันธ์ย่อยของกิบส์ที่เปลี่ยนไปคือ เอนโทรปี และปริมาตร โดยที่สารจะมีเอนโทรปี และปริมาตรเปลี่ยนไปในขณะที่สารเปลี่ยนสถานะ โดยมีอุณหภูมิและความดันคงที่ โดยที่ค่าอนุพันธ์ย่อยของกิบส์เทียบกับอุณหภูมิในขณะที่ความดันคงที่ จะเท่ากับเอนโทรปีที่มีค่าติดลบ ซึ่งจะเห็นว่าที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งสารเปลี่ยนสถานะอยู่นั้น เอนโทรปีจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงไป ปริมาณหนึ่งได้ ดังแสดงในรูปที่ 41(ข) และในทำนองเดียวกันค่าอนุพันธ์ย่อยของกิบส์เทียบกับ ความดันในขณะที่อุณหภูมิกคงที่จะเท่ากับปริมาตร ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ที่อุณหภูมิของการ เปลี่ยนสถานะ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 41(ค) นอกจากนี้ขณะที่สารเปลี่ยนสถานะระดับต้นนี้ ค่าความจุ ความร้อนอาจมีค่าเพิ่มขึ้นได้ไม่จำกัดดังแสดงไว้ในรูปที่ 41(ง)

ก่อนจบการบรรยายนี้จะขอทดสอบความเข้าใจของนักศึกษาในเรื่องที่บรรยายมาแล้ว บางประการ ดังนี้

### แบบทดสอบความเข้าใจ 5

1. ถ้าความดันภายนอกเปลี่ยนไปเล็กน้อยขณะที่สารเปลี่ยนสถานะจะมีผลอย่างไร
2. ค่าใดบ้างจะคงที่และค่าใดบ้างจะเปลี่ยนแปลงขณะที่สารเปลี่ยนสถานะ
3. ความร้อนของการเปลี่ยนสถานะคงที่หรือไม่
4. การทำก๊าซเหลวตามหลักการทดลองของจูล-เคลวินทำได้อย่างไร
5. กระบวนการทรอตลิงให้ผลอะไร
6. เส้นกระบวนการทรอตลิงคือเส้นไอเซนทาลปีก ใช่หรือไม่
7. ในการทำก๊าซเหลวจากไนโตรเจนหรือไฮโดรเจนหรือฮีเลียม ก๊าซชนิดใดจะทำให้เป็นของเหลวได้ยากที่สุด
8. ตามหลักการของจูล-เคลวินจะได้ก๊าซเหลวเป็นอัตราส่วนมากที่สุดได้อย่างไร
9. การทำน้ำแข็งแห้งขึ้นกับลักษณะเฉพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างไร
10. การเปลี่ยนสถานะระดับต้นคืออะไร

### คำตอบแบบทดสอบ 5

1. ถ้าความดันเพิ่มจะทำให้จุดเปลี่ยนสถานะเพิ่มด้วย สำหรับสารที่ขยายตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ ถ้าความดันลดลง จะทำให้จุดเปลี่ยนสถานะลดด้วย สำหรับสารที่หดตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ ถ้าความดันเพิ่มจะกลับทำให้จุดเปลี่ยนสถานะลดลง สำหรับสารที่หดตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ ถ้าความดันลดลงจะกลับทำให้จุดเปลี่ยนสถานะเพิ่มขึ้น สำหรับสารที่หดตัวเมื่อเปลี่ยนสถานะ

2. ค่าคงที่ได้แก่ T, P และ G แต่ค่าที่เปลี่ยนแปลงได้แก่ V และ S
3. ไม่คงที่, ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของจุดเปลี่ยนสถานะ
4. โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระแสวน อัดก๊าซที่อุณหภูมิและความดันต่ำกว่า อุณหภูมิสูงสุดของเส้นผกผัน ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตั้งกับความดัน ภายในช่วงที่จะทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิต่ำลงจนถึงจุดควบแน่น ในขณะที่เอนทัลปีของก๊าซทั้งหมดคงที่ แต่ความดันลดลง
5. เอนทัลปีคงที่และความดันลดลง แต่อุณหภูมิมอาจเพิ่มหรือลดลงได้
6. ไม่ใช่, ไม่มีเส้นกระบวนการทอดลงในกราฟใด ๆ
7. ฮีเลียมเหลวเตรียมได้ยากที่สุด เพราะต้องทำให้ก๊าซนี้เย็นลงต่ำกว่า 34 เคลวิน ก่อนที่จะอัดเข้าเครื่องทำก๊าซเหลว ส่วนก๊าซอื่น ๆ ไม่ต้องต่ำมากเท่านี้
8. โดยเริ่มต้นจากก๊าซที่มีอุณหภูมิตั้งและความดันตามเส้นผกผัน
9. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถอยู่ในสถานะของเหลว ที่อุณหภูมิตั้งและความดันบรรยากาศปกติ แต่จะเป็นของแข็งและไอ
10. ค่าอนุพันธ์ย่อยลำดับแรกของฟังก์ชันกิบส์มีค่าเปลี่ยนแปลง ซึ่งสัมพันธ์กับการที่เอนโทรปีและปริมาตรเปลี่ยนไป แต่ค่าฟังก์ชันกิบส์จะคงที่เช่นเดียวกับอุณหภูมิตั้งและความดันซึ่งคงที่ ส่วนความจุความร้อนของสารอาจมีค่าสูงสุดถึงอนันต์ในขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะเช่นนี้

เสียงจากผู้ประกาศ “ที่จบลงไปนั้นคือการบรรยายสรุปวิชาฟิสิกส์อุณหภูมิตั้งหรือ PH 314 ครั้งที่ 7 โดย รศ.อัจนรา พันธุ์อำไพ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง”

.....การบันทึกแถบคำบรรยายสรุปกระบวนการวิชาของมหาวิทยาลัยรามคำแหง มุ่งส่งเสริม การศึกษาด้วยตนเองและบริการความรู้แก่นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป โปรดส่งคำถาม และข้อข้องใจไปยังคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ 10240.....

