

อุณหเคมีและเอนทัลปี

จากบทที่ 5 ที่ผ่านมา เป็นเรื่องราวโดยละเอียดของกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ จะเห็นว่า เนื้อหาจะเป็นเรื่องราวของพลังงานชนิดต่าง ๆ รวมทั้งงานที่ได้จากพลังงานชนิดนั้น ๆ ในบทต่อไปนี้จะเป็นเรื่องราวโดยเฉพาะของพลังงานความร้อนที่เกี่ยวข้องกับวิชาเคมี หรือที่เรียกว่า อุณหเคมี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.1 ความหมายของอุณหเคมีและเอนทัลปี

อุณหเคมี (Thermochemistry) เป็นเคมีสาขาหนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ที่เกี่ยวข้องกับ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางฟิสิกส์ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาเคมีหลายชนิด มีอุณหภูมิสูงขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา แสดงว่ามีความร้อนคาย ออกมาจากปฏิกิริยานั้น บางปฏิกิริยามีอุณหภูมิลดลง แสดงว่ามีการดูดความร้อนเข้าไปใช้ใน ปฏิกิริยานั้น ปฏิกิริยาที่มีการคายความร้อน (q เป็นลบ) เรียกว่า "ปฏิกิริยาเอ็กโซเทอร์มิก" (Exothermic reaction) ปฏิกิริยาที่มีการดูดความร้อน (q เป็นบวก) เรียกว่า ปฏิกิริยาเอนโด เทอร์มิก (Endothermic reaction) เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่ที่ศึกษากันในห้องปฏิบัติการ มักเกิดที่ความดันคงที่ (คือ ความดันบรรยากาศ) ความร้อนของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องภายใต้ ภาวะนี้ ก็คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของระบบ (ΔH) ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 นั่นเอง

ΔH คือ ผลต่างระหว่างเอนทัลปีของระบบที่สภาวะสุดท้ายกับสภาวะเริ่มต้น ซึ่งไม่ ขึ้นอยู่กับวิถีทางของการเปลี่ยนแปลงของระบบ และเนื่องจาก ΔH เป็นฟังก์ชันสภาวะ ดังนั้น เราจะได้ว่า

$$\Delta H = H(\text{products}) - H(\text{reactants}) \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

หรือ $\Delta H = \sum H(\text{products}) - \sum H(\text{reactants})$

เมื่อ $\Sigma = \text{ผลรวม}$

ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอน (แกรไฟต์) กับแก๊สออกซิเจน ดังสมการ



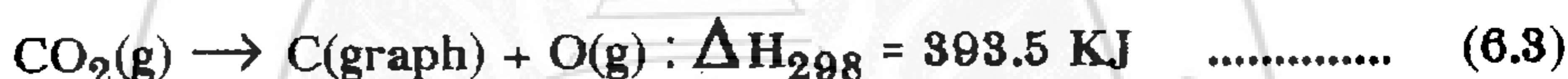
$$\Delta H_{298} = -393.5 \text{ KJ} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

สมการนี้ มีความหมายว่า คาร์บอนในรูปแกรไฟต์จำนวน 1 โมล ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น 1 โมล โดยระบบคายความร้อนออกมา 393.5 KJ ที่อุณหภูมิ 298 K ความดัน 1 บรรยากาศ (หรือ 101.325 kNm^{-2}) ΔH ค่านี้ก็คือ

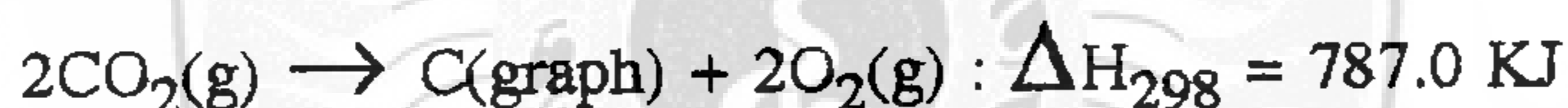
$$\begin{aligned} \Delta H &= H(\text{CO}_2, \text{g}) - H(\text{C, graph}) - H(\text{O}_2, \text{g}) \quad \text{ตามสมการ (6.1)} \\ &= -393.5 \text{ KJ} \end{aligned}$$

ค่าของ $H(\text{CO}_2, \text{g})$ และ H ของสารอื่น ๆ เราไม่สามารถจะวัดได้โดยตรง แต่ ΔH เราสามารถวัดได้

จากสมการที่ (6.2) ถ้าเขียนในรูปย้อนกลับ เครื่องหมาย ΔH ก็ต้องเปลี่ยนไปด้วย ดังนี้

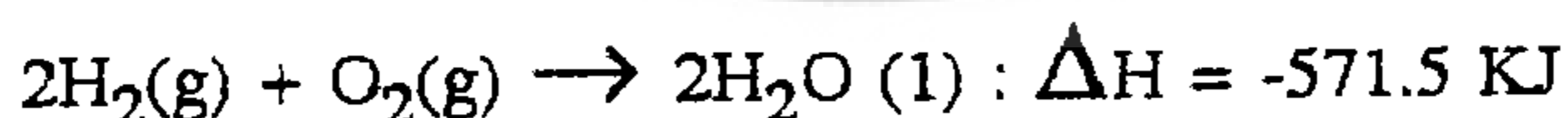


ถ้าจำนวนโมลที่เกี่ยวข้องในสมการ มีแฟกเตอร์ใดเข้ามามาก ค่า ΔH ก็จะต้องคูณด้วยแฟกเตอร์นั้นเช่นเดียวกัน ดังเช่น

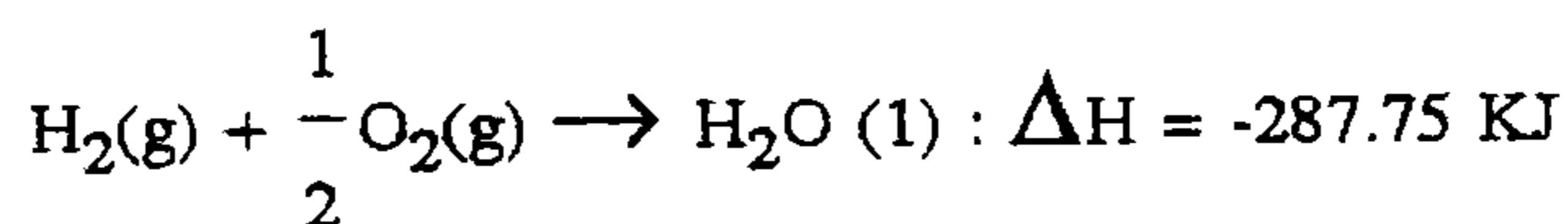


ในการคำนวณหาความร้อนของปฏิกิริยา ต้องเขียนสมการให้ได้ชัดเจนถูกต้อง และแน่นอน รวมทั้งจะต้องระบุสถานะของสารทุกตัวที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยานั้นด้วย ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสารใด ๆ ขึ้นอยู่กับสถานะทางกายภาพของสารนั้น ๆ สารชนิดเดียวกันแต่ต่างสถานะกันย่อมมีผลทำให้ ΔH ของปฏิกิริยาต่างกัน

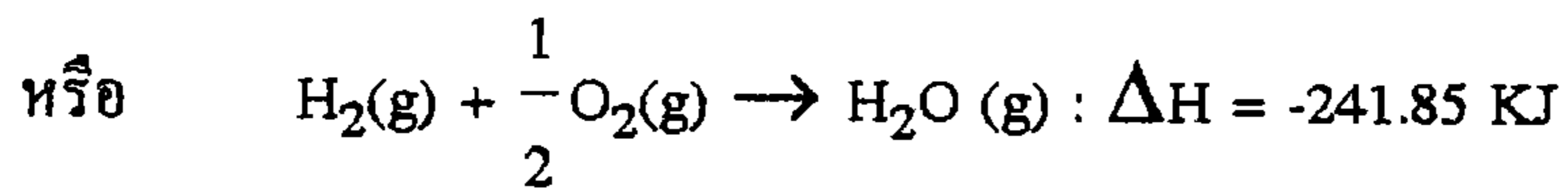
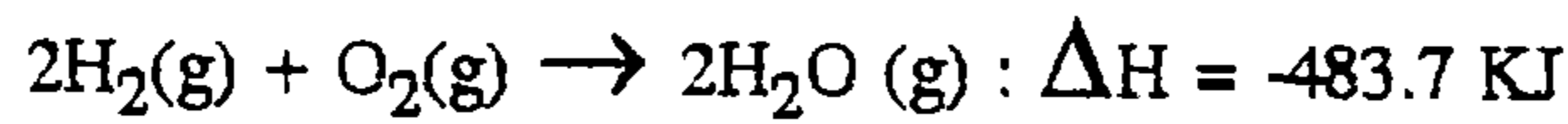
ตัวอย่างเช่น เมื่อจุดระเบิด $\text{H}_2(\text{g})$ 2 โมล กับ $\text{O}_2(\text{g})$ 1 โมล จะได้น้ำในสถานะของเหลว 2 โมล และมีความร้อนคายออกมา 571.5 KJ ดังสมการ



หรืออาจเขียนดังนี้ก็ได้ คือ



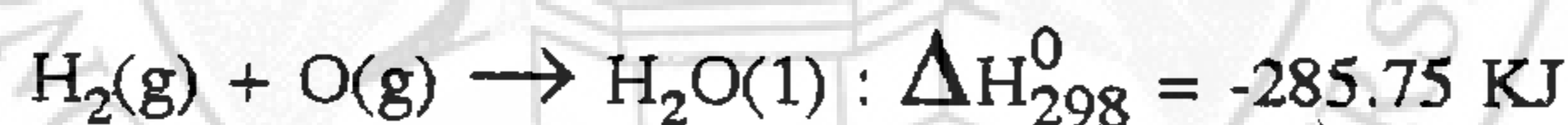
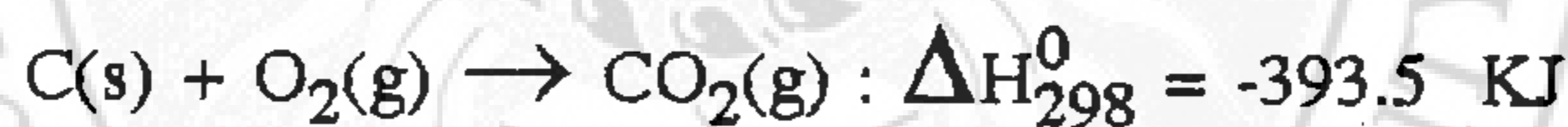
อย่างไรก็ตาม ถ้าให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นในภาชนะที่ใหญ่มาก ๆ จะได้ไอน้ำเกิดขึ้นและมีความร้อนคายออกมาเพียง 483.7 KJ เท่านั้น ดังสมการ



สำหรับธาตุที่มีหลายอัญรูป จำเป็นต้องระบุอัญรูปที่ใช้ลงไปด้วยเช่นกัน

6.2 สภาวะมาตรฐาน

สภาวะมาตรฐาน (Standard state) ของอุณหเคมี เราระบุด้วยความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิจึงเป็นเท่าไรก็ได้ แต่ที่นิยมกัน คือ 298 K (25 องศาเซลเซียส) ข้อมูลต่าง ๆ ที่รวบรวมได้ ส่วนใหญ่มีกระบุที่สภาวะมาตรฐาน การเปลี่ยนแปลงเอนทลปีภายใต้สภาวะมาตรฐาน กำหนดให้ใช้สัญลักษณ์ ΔH° และ $\Delta\text{H}_{298}^\circ$ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงเอนทลปี เมื่อทั้งสารเริ่มต้นและผลิตผลอยู่ที่สภาวะมาตรฐานที่อุณหภูมิ 298 K ในสมการอุณหเคมี ถ้าไม่มีการบ่งสถานะของสารไว้ ให้สมมุติว่าสารนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานได้ นั่นคือ เมื่อเป็นสารบริสุทธิ์ และมีสถานะทางกายภาพเป็นปกติ ณ อุณหภูมิที่กำหนด ที่ความดัน 1 บรรยากาศ สำหรับธาตุที่มีหลายอัญรูป ให้ใช้รูปที่เสถียรที่สุด ณ อุณหภูมินั้นเป็นมาตรฐาน ดังเช่นที่อุณหภูมิ 298 K สภาวะมาตรฐานของคาร์บอน คือ แกรไฟต์ ของกำมะถัน คือ กำมะถัน rombik และของน้ำ คือ น้ำที่เป็นของเหลว ดังตัวอย่าง

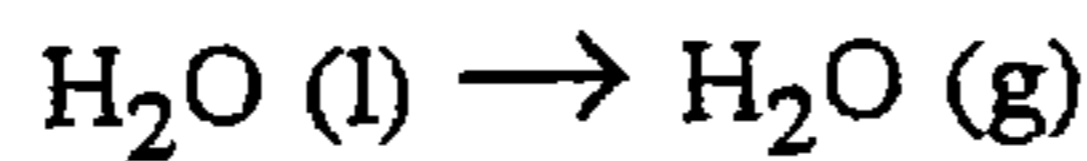


กรณีที่เขียน ΔH° โดยไม่ได้บ่งอุณหภูมิไว้ด้วย ให้ถือว่าเป็นค่าที่อุณหภูมิ 298 K

6.3 กฎของเฮสส์หรือกฎผลรวมความร้อนคงที่

กฎของเฮสส์ หรือ กฎผลรวมความร้อนคงที่ (Hess's law or the law of constant heat summation) เฮสส์ (Hess) เป็นคนแรกที่เสนอกฎนี้ขึ้นมาในปี ค.ศ. 1840 ซึ่งมีใจความว่า "การเปลี่ยนแปลงความร้อนรวมของปฏิกิริยาเคมีอย่างหนึ่งจะมีค่าเท่ากันเสมอ ไม่ว่าปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นหนึ่งขั้นหรือหลายขั้นก็ตาม" กฎนี้เป็นตัวอย่างหนึ่งของกฎทรงพลังงาน หรือกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งกล่าวว่า พลังงานไม่สามารถจะสร้างขึ้นหรือทำลายให้สูญไปได้ ตัวอย่างที่แสดงเกี่ยวกับกฎของเฮสส์มีมากมาย ดังเช่น ถ้าน้ำในสถานะของเหลวถูกทำให้

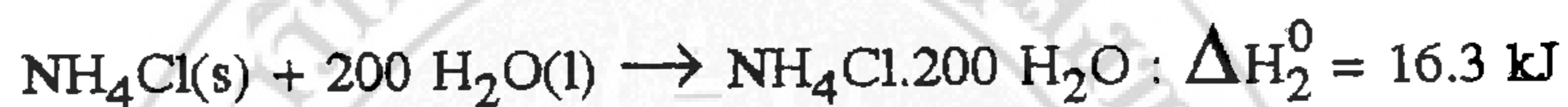
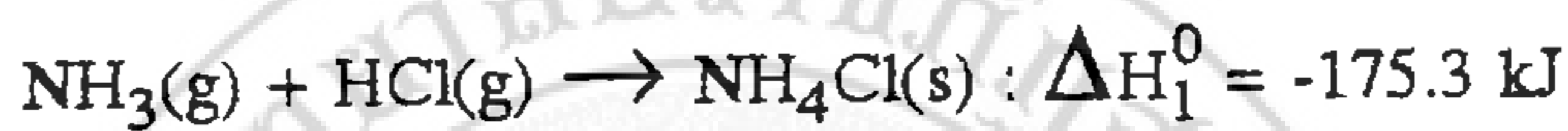
กลายเป็นไอโดยตรง ดังนี้



ความร้อนที่ถูกดูดกลืนเข้าไปมีค่าเท่ากับความร้อนแฝงโมลาร์ของการกลายเป็นไอ คือ 43.9 kJ ถ้านำค่านี้ไปหักออกจาก 285.75 kJ จะได้ 241.85 kJ ซึ่งเป็นความร้อนที่คายออกเมื่อผลิตไอน้ำ 1 โมล ขึ้นมาจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดยตรง

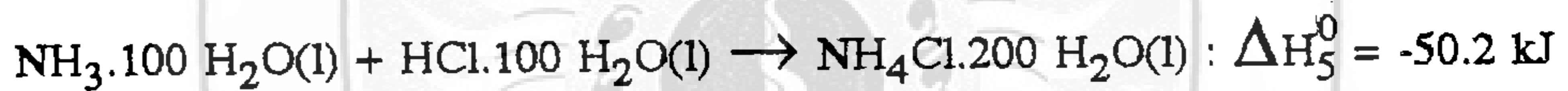
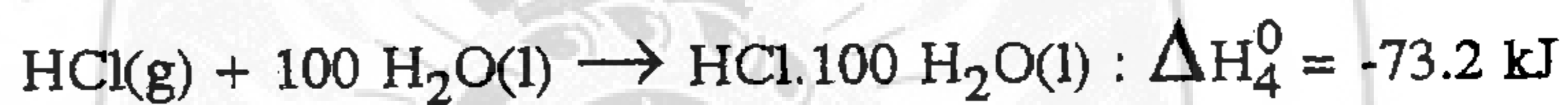
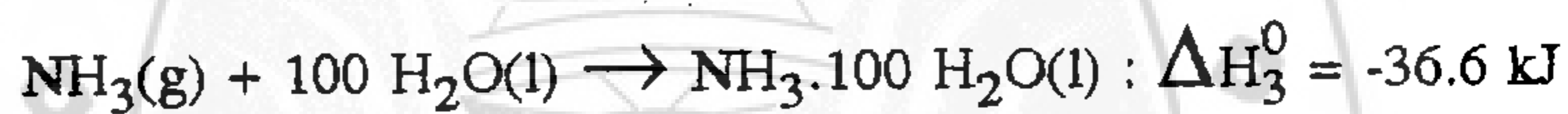
ทำนองเดียวกัน ในการทำสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ในน้ำ 200 โมล จากแก๊สแอมโมเนียกับแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ที่มีปริมาณมากพอ เราสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. ปล่อยให้แก๊สทำปฏิกิริยากันก่อน แล้วจึงนำแอมโมเนียมคลอไรด์ที่ได้ไปละลายน้ำ
ดังนี้



หรือ

2. ละลายแก๊สลงในน้ำก่อน แล้วจึงนำสารละลายทั้งสองผสมกัน ดังนี้



ตามกฎของเฮสส์ การเปลี่ยนแปลงความร้อนรวมจะมีค่าเท่ากันทั้ง 2 วิธี

นั่นคือ

$$\Delta H_1^0 + \Delta H_2^0 = \Delta H_3^0 + \Delta H_4^0 + \Delta H_5^0$$

ดังนั้น

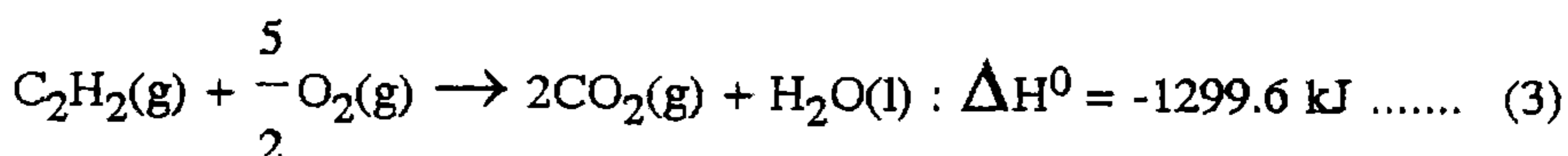
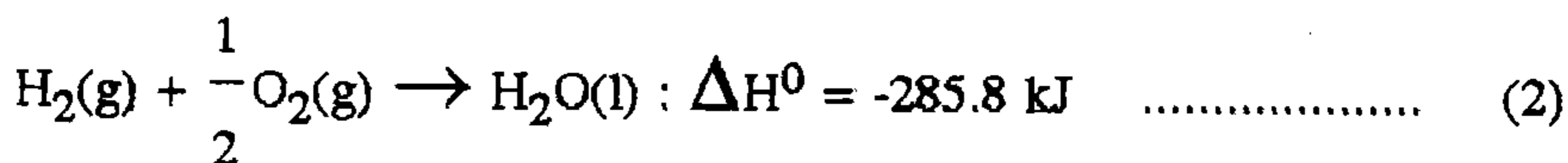
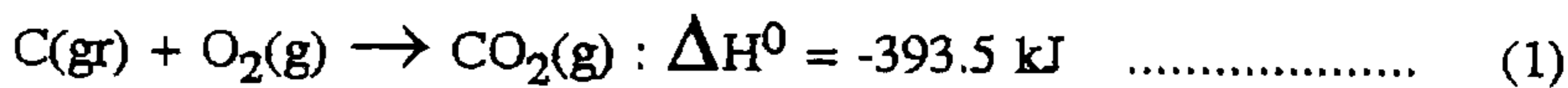
$$-175.3 + 16.3 = -35.6 + (-73.2) + (-50.2)$$

$$-159.0 = -159.0$$

จะเห็นได้ว่า ในการทำสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์โดยใช้น้ำ H_2O 200 โมล ความร้อนจะถูกคายออกมา 159.0 kJ เท่ากันโดยไม่ขึ้นอยู่กับวิถีของการเปลี่ยนแปลงเลย

กฎของเฮสส์ มีประโยชน์มากในการคำนวณความร้อนของปฏิกิริยา ที่เราไม่สามารถจะทำการวัดได้โดยตรง แต่เราจะต้องรู้ข้อมูลอื่นที่เกี่ยวข้อง ดังตัวอย่าง

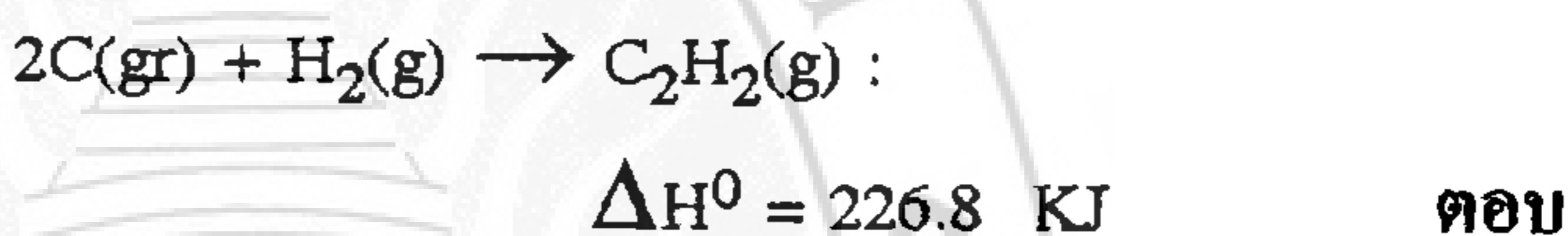
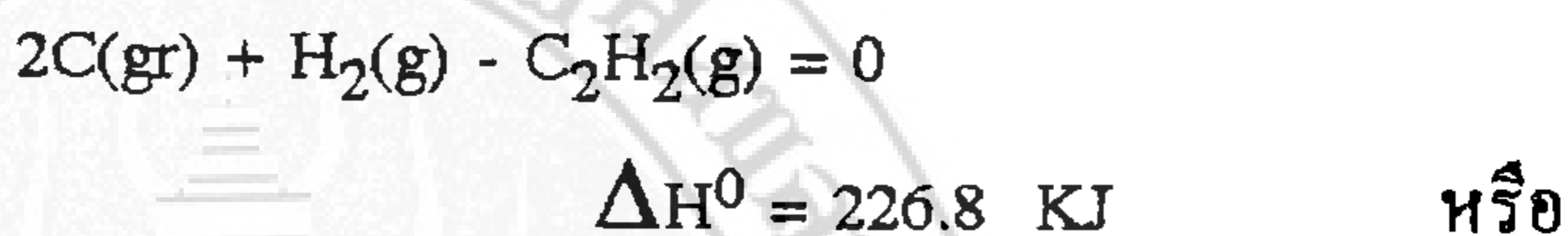
ตัวอย่างที่ 6.1 จงคำนวณ ΔH^0 สำหรับการสังเคราะห์แก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) จากธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โดยกำหนดให้ดังนี้



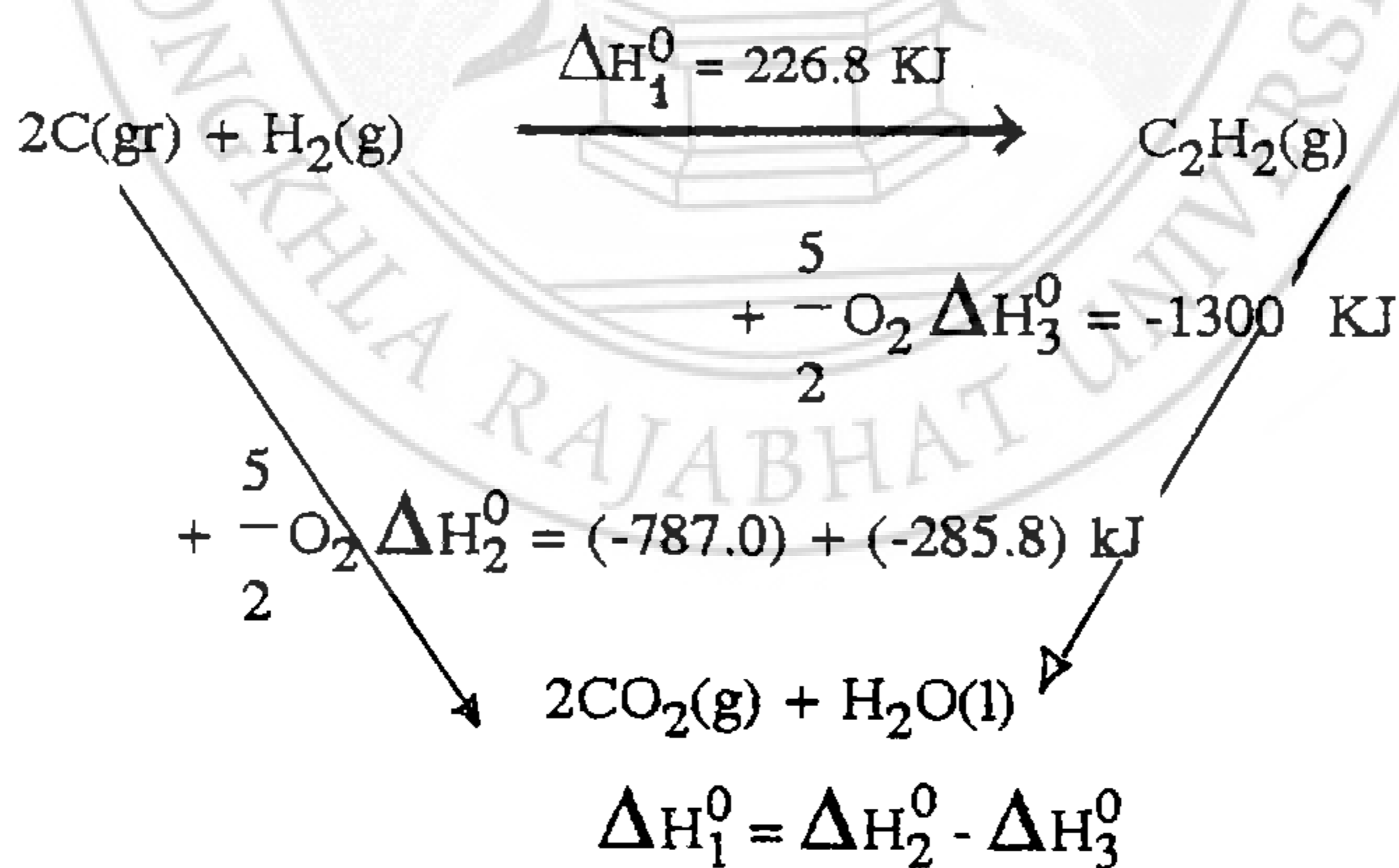
วิธีทำ



ตามกฎของเฮสส์ สมการ (4) + สมการ (2) - สมการ (3) จะได้



ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอน (แกรไฟต์) กับแก๊สไฮโดรเจนเกิดเป็นแก๊สอะเซทิลีนนั้น เราไม่สามารถจะทำให้เกิดขึ้นโดยตรงได้ เพราะนอกจากได้แก๊สอะเซทิลีนแล้ว ยังได้ไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น ๆ เกิดขึ้นอีก เราจึงใช้ประโยชน์จากกฎของเฮสส์มาช่วยในการคำนวณ



รูปที่ 6.1 แผนภาพแสดงวัฏจักรของพลังงานจากสังเคราะห์อะเซทิลีน

ที่มา : ราตรี วรรณจิตชัย และศศิเกษม ทองรงค์ 2524 : 197

จากตัวอย่างที่ (6.1) สามารถเขียนแผนภาพ แสดงวัฏจักรของพลังงานอย่างง่าย ๆ ที่เกี่ยวข้องกับได้ดังรูปที่(6.1)

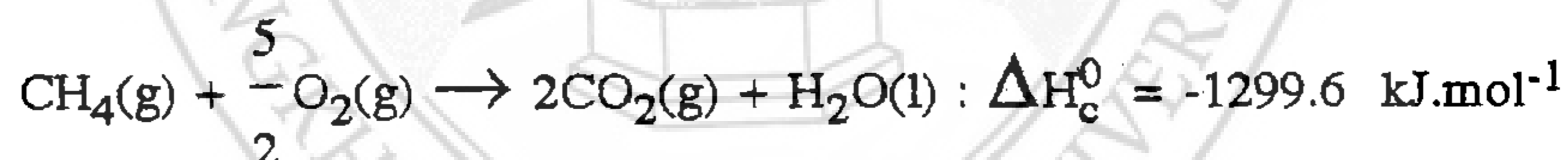
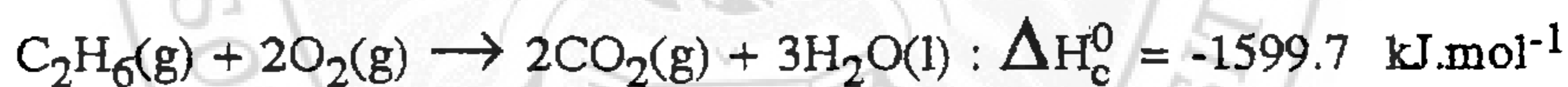
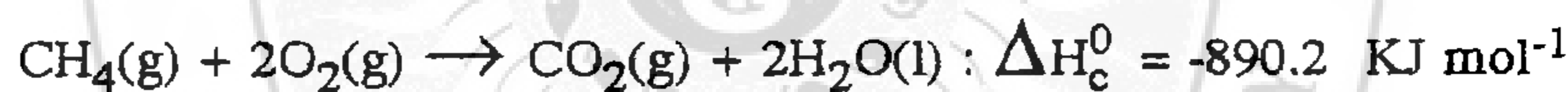
6.4 เอนทัลปีของปฏิกิริยา

เอนทัลปีของปฏิกิริยา (Enthalpy of reaction : ΔH) หรือความร้อนของปฏิกิริยา (Heat of reaction) หมายถึง เอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งใช้สัญลักษณ์ ΔH มักจะมีชื่อเรียกเฉพาะเจาะจงลงไปตามชนิดของปฏิกิริยา เพื่อบอกให้ทราบว่าปฏิกิริยาชนิดใด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.4.1 เอนทัลปีของการเผาไหม้

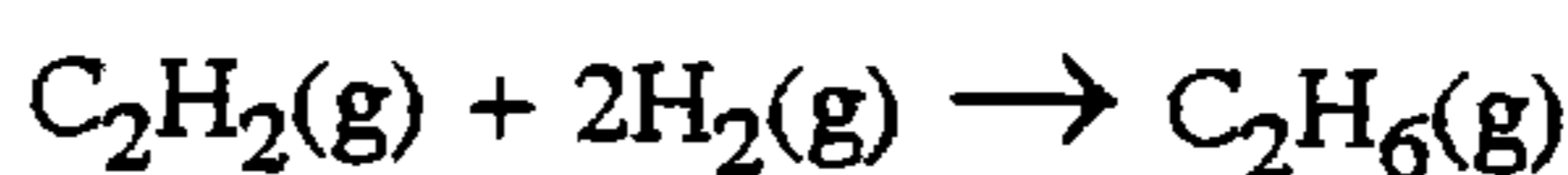
เอนทัลปีของการเผาไหม้ (Enthalpy of combustion : ΔH_c^0) หรือความร้อนของการเผาไหม้ของสารใด ๆ หมายถึง ความร้อนที่คายออกเมื่อสารนั้นจำนวน 1 โมล เผาไหม้ในออกซิเจนได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น ΔH^0 จึงเป็นลบ

สำหรับการเผาไหม้ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอย่างสมบูรณ์ จะได้ผลิตผลออกมาเป็นน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ ดังตัวอย่างสมการ



ค่าเอนทัลปีของการเผาไหม้ที่แน่นอน สามารถวัดได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) ค่าที่วัดได้นี้นำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาเอนทัลปีของปฏิกิริยาแบบอื่น ๆ ได้ ดังตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 6.2 จงคำนวณเอนทลปีมาตรฐานของปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงอะเซทิลีน(C₂H₂:g) เป็นอีเทน (C₂H₆:g) ดังสมการ

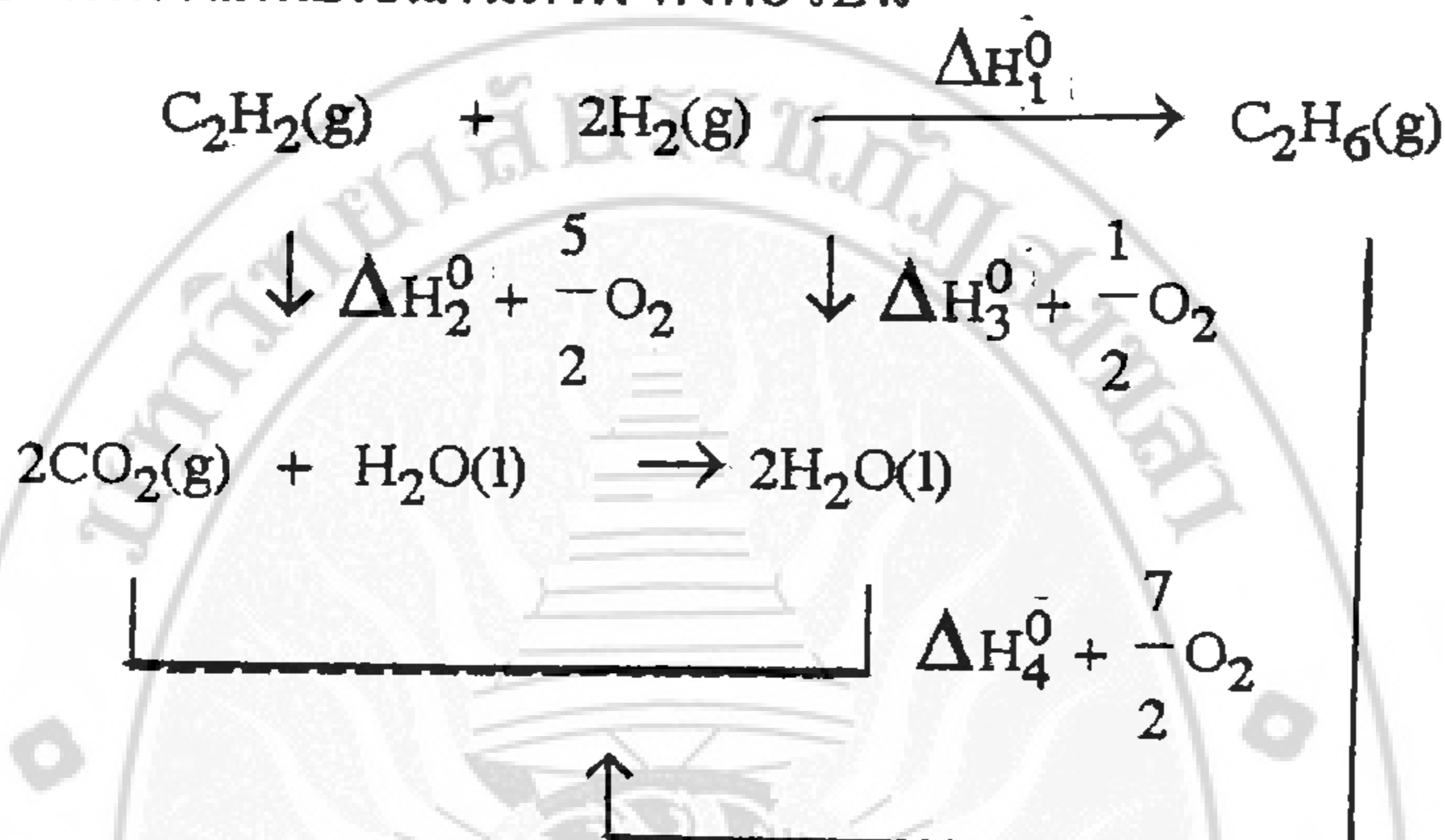


กำหนดให้เอนทลปีมาตรฐานของการเผาไหม้ของอะเซทิลีน(C₂H₂:g), อีเทน(C₂H₆:g) ไฮโดรเจน (H₂:g) เท่ากับ -1299.6, -1599.7 และ -285.8 kJ.mol⁻¹ ตามลำดับ

วิธีทำ

ในการคำนวณทำได้ 2 วิธีดังนี้

วิธีที่ 1 คำนวณโดยใช้แผนภาพ ดังต่อไปนี้



จากแผนภาพและกฎของเฮสส์ จะได้ว่า

$$\Delta H_1^0 + \Delta H_4^0 = \Delta H_2^0 + \Delta H_3^0$$

เพราะฉะนั้น

$$\Delta H_1^0 = \Delta H_2^0 + \Delta H_3^0 - \Delta H_4^0$$

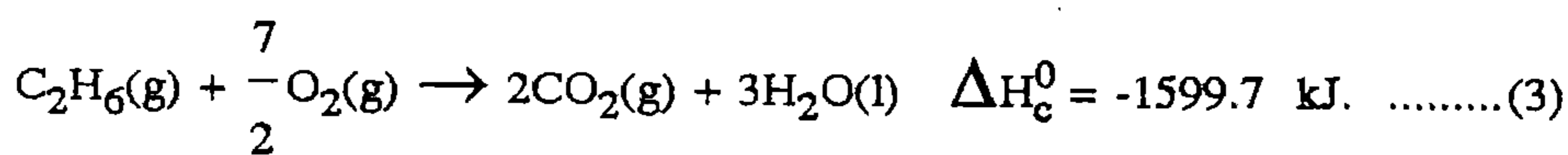
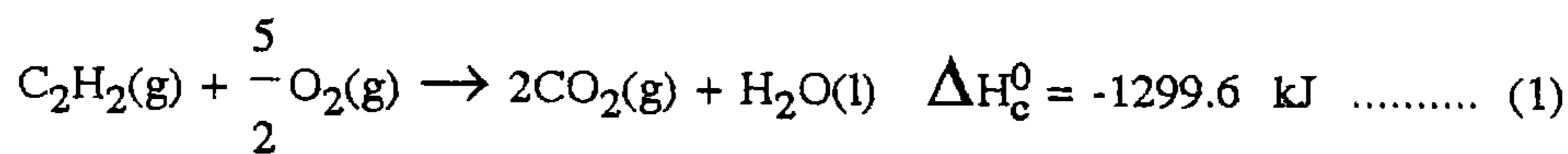
$$= (-1299.6) + 2(-285.8) - (-1599.7) \text{ kJ.}$$

$$= -271.5 \text{ kJ.}$$

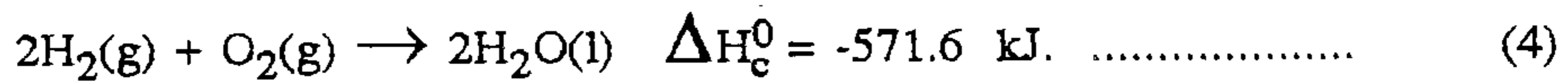
นั่นคือ เอนทลปีมาตรฐานของปฏิกิริยามีค่า -271.5 kJ

ตอบ

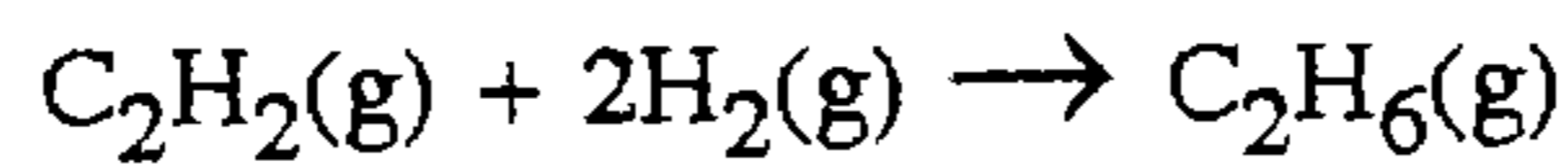
วิธีที่ 2 คำนวณไปตามขั้นตอนตามหลักคณิตศาสตร์ และจากข้อมูลที่กำหนด ดังนี้ จากโจทย์



(2) x 2 ได้



จากกฎของเฮสส์ สมการ (1) + สมการ (4) - สมการ (3) จะได้



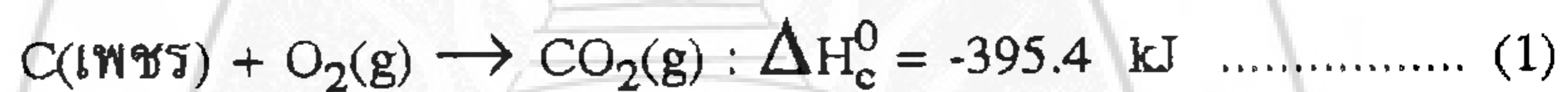
$$\Delta H^\circ = (-1299.6) + (-571.6) - (-1599.7)$$

$$= -271.5 \text{ กิโลจูล} \quad \text{ตอบ}$$

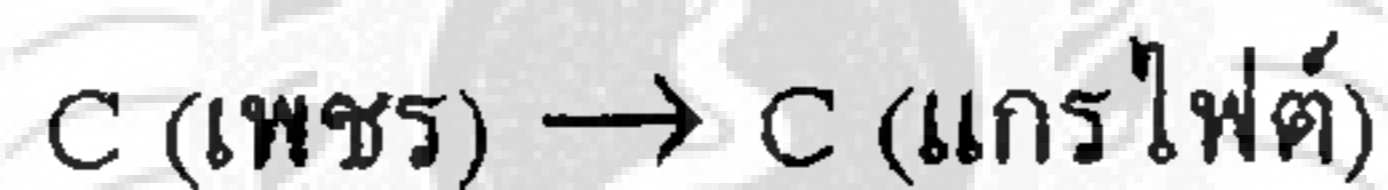
ตัวอย่างที่ 6.3 จงคำนวณเอนทัลปีของปฏิกิริยาในการเปลี่ยนคาร์บอน (เพชร) เป็นคาร์บอน (แกรไฟต์) กำหนดให้เอนทัลปีของการเผาไหม้ของคาร์บอน (เพชร), คาร์บอน (แกรไฟต์) = -395.4 kJ และ -393.5 kJ ตามลำดับ

วิธีทำ

จากโจทย์กำหนดให้



ดังนั้น จากกฎของเฮสส์ สมการ (1) - สมการ (2) จะได้



$$\Delta H^\circ = (-395.4) - (-393.5) \text{ kJ}$$

$$= 1.9 \text{ กิโลจูล} \quad \text{ตอบ}$$

ตัวอย่างค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเผาไหม้ (ΔH_c°) ของสารต่าง ๆ มีแสดงไว้ในตารางที่ (6.1)

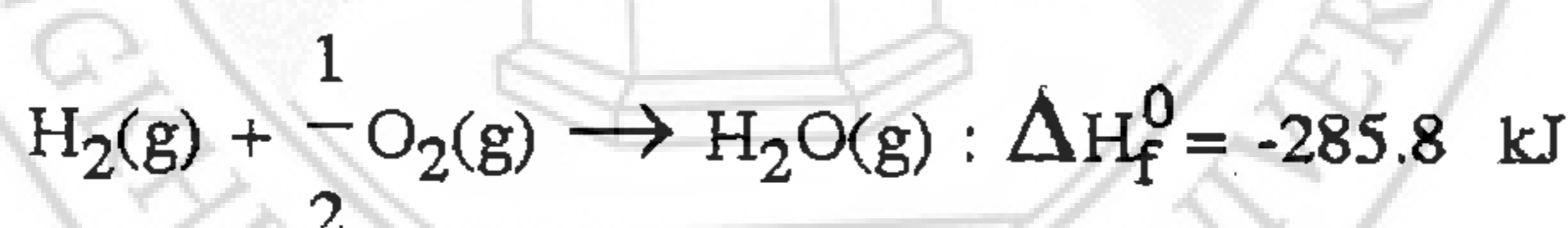
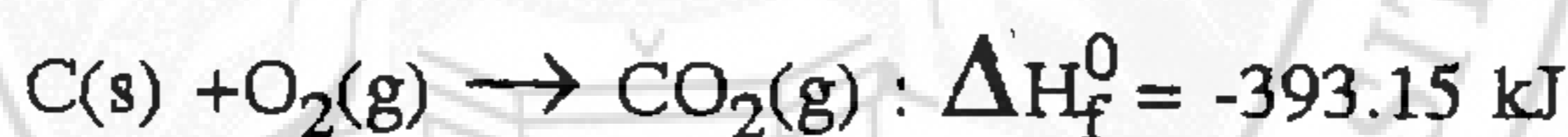
ตารางที่ 6.1 ค่านทลปีมาตรฐานของการเผาไหม้ของสาร (ΔH_c^0)

สาร	ΔH_c^0 (KJ mol ⁻¹)	สาร	ΔH_c^0 (KJ mol ⁻¹)
H ₂ (g)	-285.84	C ₇ H ₁₆ (g)	-484.2
CH ₄ (g)	-890.35	C ₆ H ₁₄ (g)	-3301.5
C ₂ H ₂ (g)	-1299.63	CH ₃ COOH(l)	-872.4
C ₂ H ₄ (g)	-1410.97	glucose(s)	-2815.8
C ₂ H ₆ (g)	-1559.88	sucrose(s)	-5676.7
C ₃ H ₈ (g)	-2220.07	C ₂ H ₅ OH(l)	-1366.95
n-butane(g)	-2878.51	i-butane(g)	-2871.65

ที่มา : ประเสริฐศรี เพิ่งพัก 2530 : 169 อ้างจาก Barrow 1973 : 145

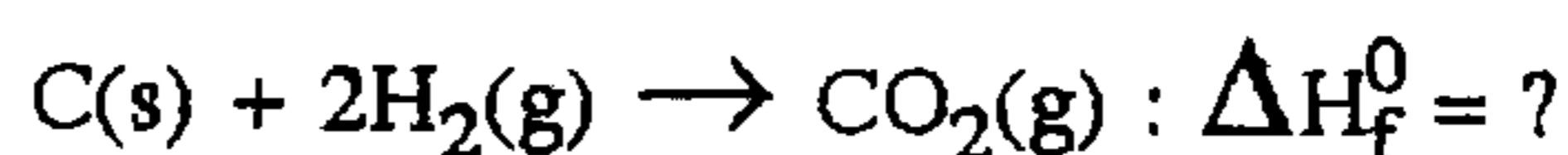
6.4.2 เอนทลปีของการเกิด

เอนทลปีของการเกิด (Enthalpy of formation : ΔH_f^0) หรือความร้อนของการเกิด (Heat of formation) ที่สภาวะมาตรฐาน หมายถึง ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสาร 1 โมล ที่สภาวะมาตรฐาน ถูกทำให้เกิดขึ้นจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในสภาวะมาตรฐานเช่นกัน ซึ่งเขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ ΔH_f^0 ดังตัวอย่างสมการ

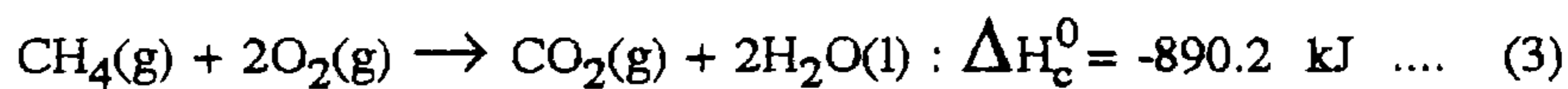
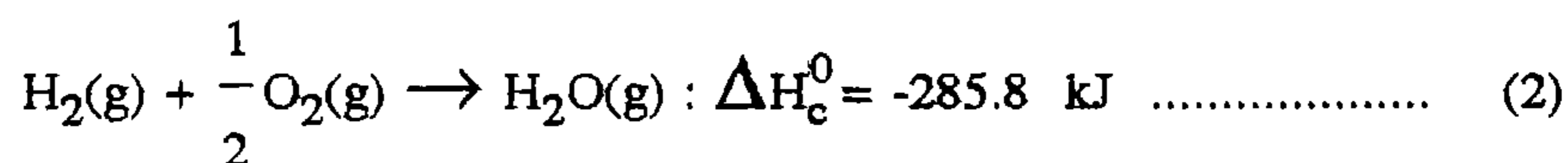
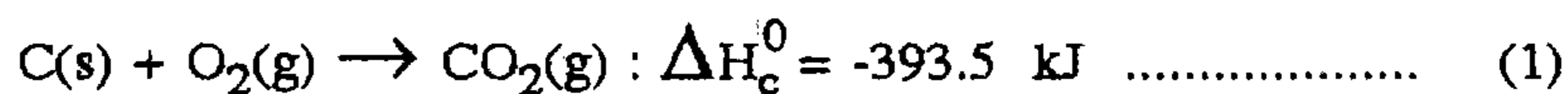


เอนทลปีของการเกิดสารบางชนิด ไม่สามารถจะวัดหาโดยตรงได้ง่ายนัก แต่เราก็สามารถคำนวณได้จากเอนทลปีของการเผาไหม้ ดังตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 6.4 จากตารางที่ 6.1 จงคำนวณเอนทลปีของการเกิดมีเทน (CH₄:g) สมการแสดงการเกิดมีเทนคือ



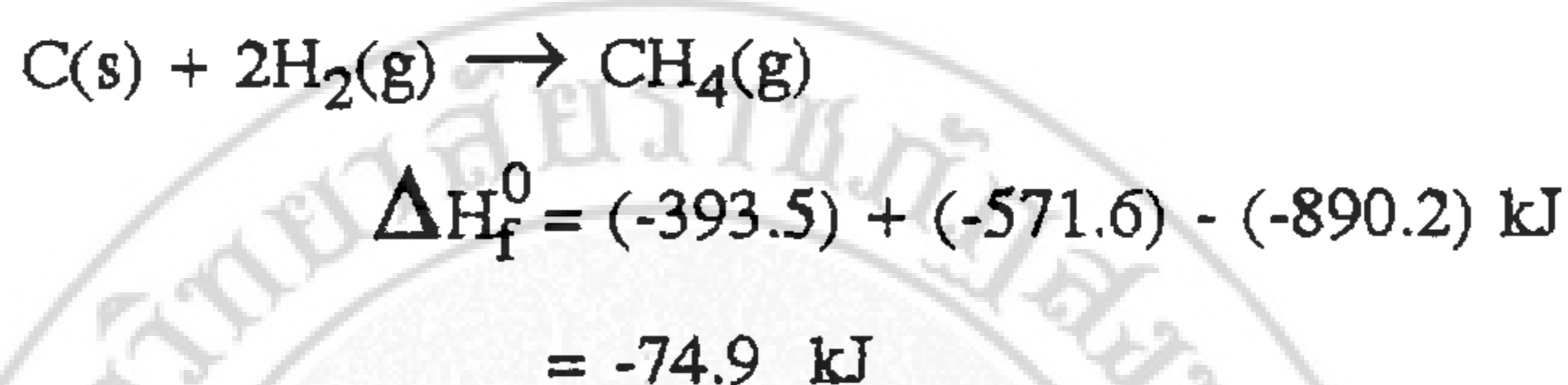
วิธีทำ



สมการ (2) x 2 จะได้



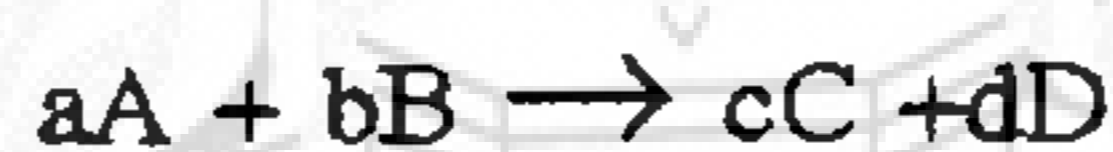
จากกฎของเฮสส์ สมการ (1) + สมการ (4) - สมการ (3) จะได้



นั่นคือ เอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดมีเทน ($\text{CH}_4(\text{g})$) = -74.9 กิโลจูล **ตอบ**

เอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดสารประกอบชนิดหนึ่ง เราอาจพิจารณาว่าเป็นเอนทัลปีของสารนั้นที่สภาวะมาตรฐานได้ และเอนทัลปีของปฏิกิริยา ก็คือ การเปลี่ยนแปลงในค่าเอนทัลปีของการเกิดสารนั่นเอง และเพื่อสะดวกในการคำนวณ จึงมีการกำหนดให้เอนทัลปีของธาตุที่สภาวะมาตรฐาน = 0

จงพิจารณาปฏิกิริยา



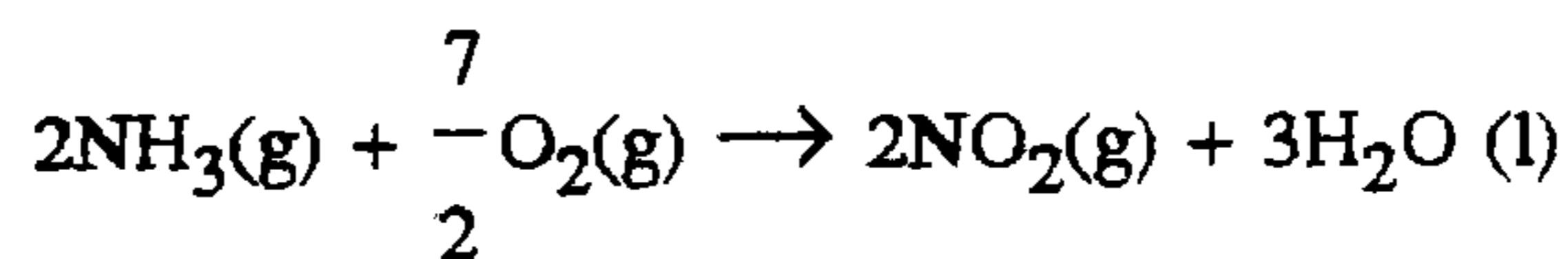
เอนทัลปีของปฏิกิริยานี้คือ

$$\Delta H^0 = \{cH^0(\text{C}) + dH^0(\text{D})\} - \{aH^0(\text{A}) + bH^0(\text{B})\}$$

หรืออาจเขียนได้ว่า

$$\Delta H^0 = \{c\Delta H_f^0(\text{C}) + d\Delta H_f^0(\text{D})\} - \{a\Delta H_f^0(\text{A}) + b\Delta H_f^0(\text{B})\}$$

ตัวอย่างที่ 6.5 จงคำนวณเอนทัลปีมาตรฐานของปฏิกิริยา



กำหนดเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิดสารต่อไปนี้ให้ คือ

$$\text{NH}_3 = -46.1 \text{ kJ mol}^{-1}, \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = -285.8 \text{ kJ mol}^{-1}, \text{NO}_2(\text{g}) = 33.2 \text{ kJ mol}^{-1}$$

วิธีทำ

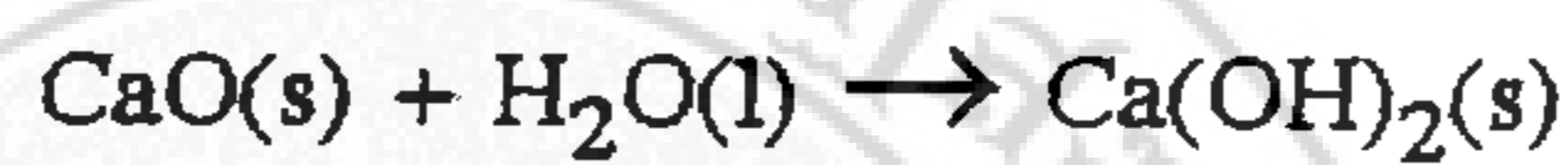
จากปฏิกิริยาที่โจทยกำหนดให้ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta H^0 &= 2\Delta H_f^0(\text{NO}_2:\text{g}) + 3\Delta H_f^0(\text{H}_2\text{O}:\text{l}) - 2\Delta H_f^0(\text{NH}_3:\text{g}) - \frac{7}{2}\Delta H_f^0(\text{O}_2:\text{g}) \\ &= (2 \times 33.2) - (3 \times 285.8) + (2 \times 46.1) - 0 \\ &= -698.8 \text{ kJ} \end{aligned}$$

นั่นคือ เอนทลปีมาตรฐานของปฏิกิริยานี้ คือ -698.8 กิโลจูล

ตอบ

ตัวอย่างที่ 6.6 จงคำนวณเอนทลปีมาตรฐานของปฏิกิริยา



กำหนดให้เอนทลปีมาตรฐานของการเกิด CaO(s), Ca(OH)₂(s) และ H₂O(l) = -635.5, -986.6 และ -285.8 kJ.mol⁻¹ ตามลำดับ

วิธีทำ

จากปฏิกิริยาที่โจทยกำหนดให้ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta H^0 &= \Delta H_f^0 \text{Ca}(\text{OH})_2 - \Delta H_f^0 \text{CaO}(\text{s}) - \Delta H_f^0 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \\ &= (-986.6) - (-635.5) - (-285.8) \\ &= -65.3 \text{ kJ} \end{aligned}$$

นั่นคือ เอนทลปีมาตรฐานของปฏิกิริยาคือ -65.3 กิโลจูล

ตอบ

ค่าเอนทลปีมาตรฐานของการเกิดสารบางชนิดได้แสดงไว้ในตารางที่ (6.2)

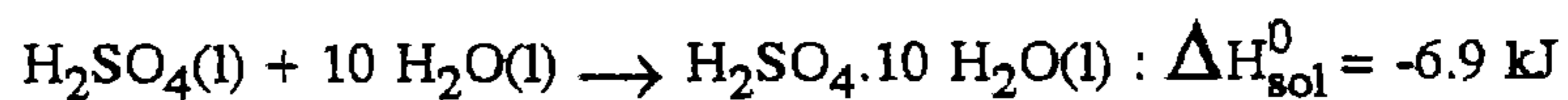
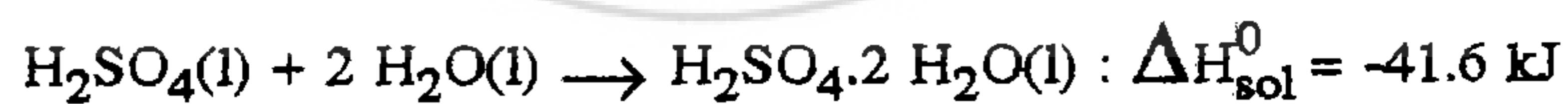
ตารางที่ 6.2 ค่าเอนทัลปีของการเกิด (ΔH_f^0)

สาร	ΔH_f^0 (kJ.mol ⁻¹)	สาร	ΔH_f^0 (kJ.mol ⁻¹)
CH ₄ (g)	-79.4	HF(g)	-269.9
CO(g)	-110.5	HI(g)	25.9
CO ₂ (g)	-393.5	H ₂ O(l)	-285.8
C ₂ H ₄ (g)	52.3	H ₂ O(g)	-241.8
C ₂ H ₆ (g)	-84.7	NH ₃ (g)	-46.2
C ₃ H ₈ (g)	-104.0	NO(g)	90.4
C ₆ H ₆ (l)	49.0	NO ₂ (g)	33.9
C ₁₀ H ₈ (g)	60.25	N ₂ O(g)	81.6
HBr(g)	-36.2	SO ₂ (g)	-296.6
HCl(g)	-92.3	SO ₃ (g)	-395.0

ที่มา : Moore 1972 : 56

6.4.3 เอนทัลปีของสารละลาย

เอนทัลปี (มาตรฐาน) ของสารละลาย (Enthalpy of solution : ΔH_{sol}^0) หรือความร้อนของสารละลาย (Heat of solution) หมายถึง ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงจะถูกดูดกลืนหรือคายออก เมื่อสาร 1 โมลละลายในตัวทำละลายปริมาณหนึ่งตามที่กำหนด ความร้อนของสารละลายจะมีค่าเปลี่ยนไปตามความเข้มข้นของสารละลายนั้น ดังนั้นในสมการจึงต้องบ่งปริมาณของตัวทำละลายเอาไว้ด้วย สารละลายส่วนใหญ่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย และมักจะบ่งปริมาณของน้ำนั้นเป็นจำนวนโมล ดังเช่น



เมื่อ aq. เป็นสัญลักษณ์ที่แสดงว่ามีน้ำจำนวนมากมาอยู่ในสารละลายนั้น นั่นคือเป็นสารละลายเจือจางอนันต์ (Infinity dilution) และที่สารละลายเจือจางอนันต์ การเติมตัวทำละลายลงไปอีก จะไม่ทำให้ความร้อนของสารละลายนั้นเปลี่ยนแปลงไปได้อีก

ตัวอย่างที่ 6.7 เมื่อละลาย NaCl(s) 1.625 กรัม ลงในน้ำ 100 กรัม ที่ 1 บรรยากาศ ปริมาณความร้อนที่ถูกดูดกลืนเข้าไปใช้เท่ากับ 0.1186 kJ จงคำนวณเอนทลปีของสารละลายนั้น เมื่อมวลโมเลกุลของน้ำและ NaCl เท่ากับ 18 และ 58.45 ตามลำดับ

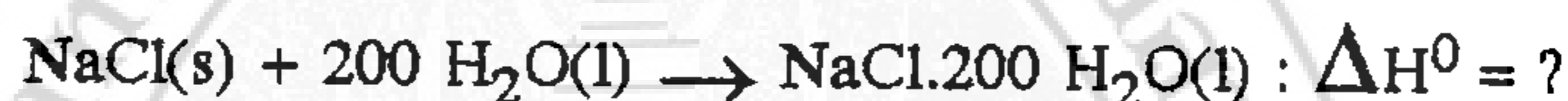
วิธีทำ

$$\text{จำนวนโมเลกุลของน้ำ 100 กรัม} \quad (n_1) = \frac{100}{18} = 5.56 \text{ โมล}$$

$$\text{จำนวนโมเลกุลของ NaCl(s) 1.65 กรัม} \quad (n_2) = \frac{1.625}{58.45} = 0.0278 \text{ โมล}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{5.56}{0.0278} = 200$$

ดังนั้น ปฏิกิริยานี้ก็คือ



แต่จากโจทย์ ปริมาณความร้อนที่ถูกดูดกลืนเมื่อใช้ NaCl(s) 0.0278 โมล = 0.1186 kJ

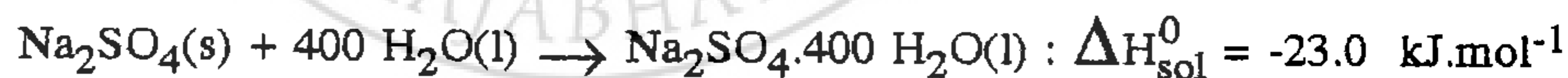
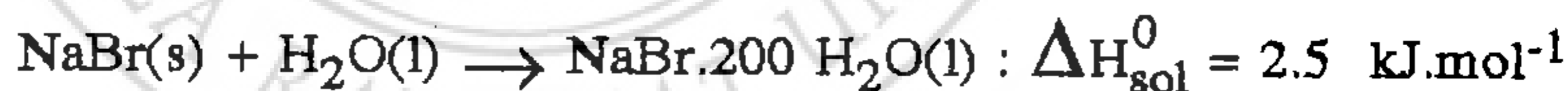
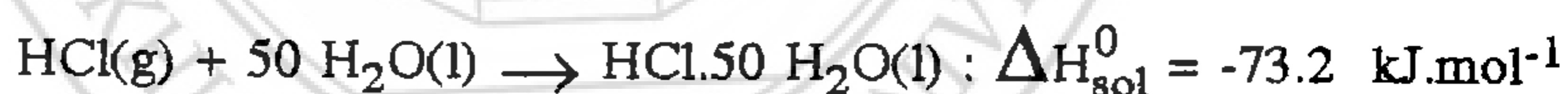
ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถูกดูดกลืนเมื่อใช้ NaCl(s) 1 โมล

$$\begin{aligned} &= \frac{0.1186}{0.0278} \text{ kJ} \\ &= 4.266 \text{ kJ} \end{aligned}$$

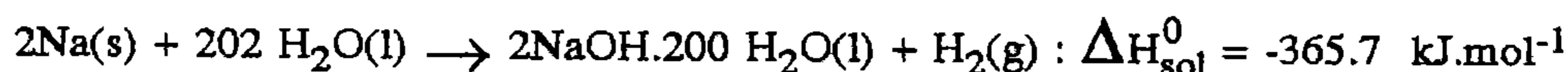
นั่นคือ เอนทลปีของสารละลาย NaCl = 4.27 kJ.mol⁻¹

ตอบ

จงพิจารณาตัวอย่างเอนทลปีของสารละลาย ดังสมการต่อไปนี้

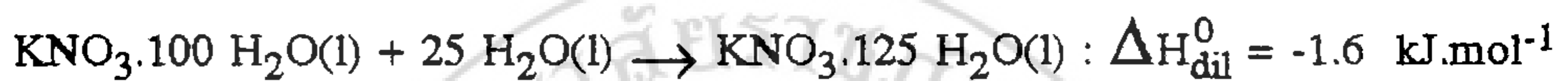
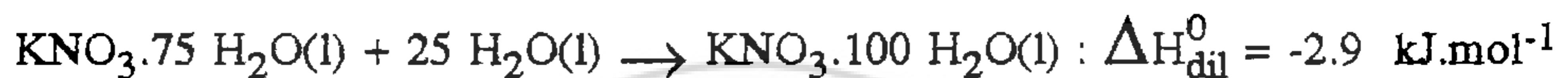
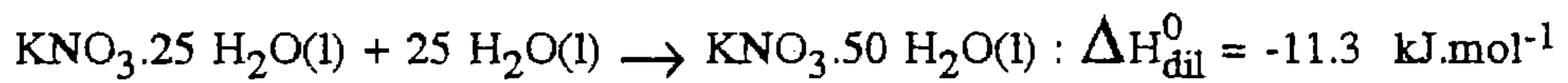


จะสังเกตได้ว่า โดยทั่วไปเอนทลปีของสารละลาย มักจะมีค่าน้อยกว่าเอนทลปีชนิดอื่น ๆ อยู่มาก แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าตัวถูกละลายทำปฏิกิริยาได้กับตัวทำละลาย ค่าเอนทลปีของสารละลายนั้นก็จะมีมากขึ้นได้ ดังตัวอย่าง

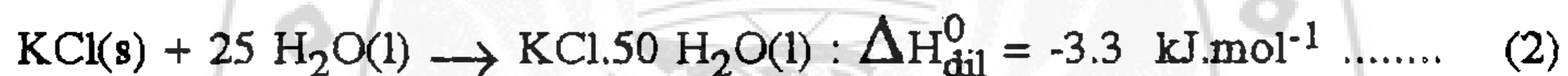
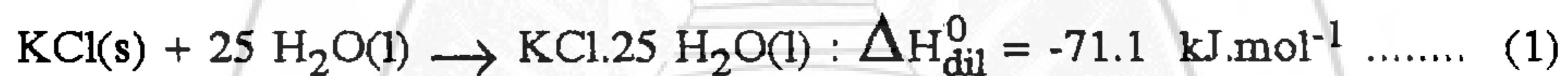


6.4.4 เอนทัลปีของการเจือจาง

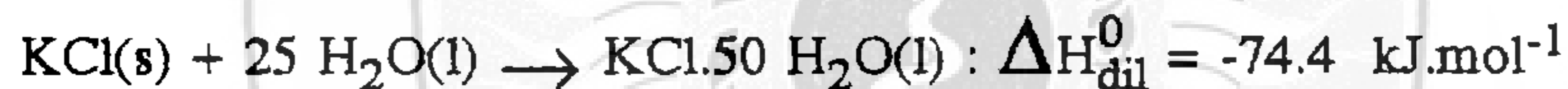
เอนทัลปี (มาตรฐาน) ของการเจือจาง (Enthalpy of dilution : ΔH_{dil}^0) หรือความร้อนของการเจือจาง หมายถึง ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสารละลายจำนวนหนึ่งตามที่กำหนด ซึ่งมีตัวถูกละลายอยู่ 1 โมล ถูกทำให้เจือจางลง โดยการเติมตัวทำละลายในปริมาณที่กำหนดลงไป ดังตัวอย่างเช่น



จากค่าเอนทัลปีของสารละลายและเอนทัลปีของการเจือจาง สามารถนำไปใช้คำนวณหาเอนทัลปีของสารละลายได้เพิ่มขึ้นอีก เมื่อมีตัวทำละลายอยู่ในสารละลาย ในปริมาณที่กำหนดใหม่ ดังเช่น

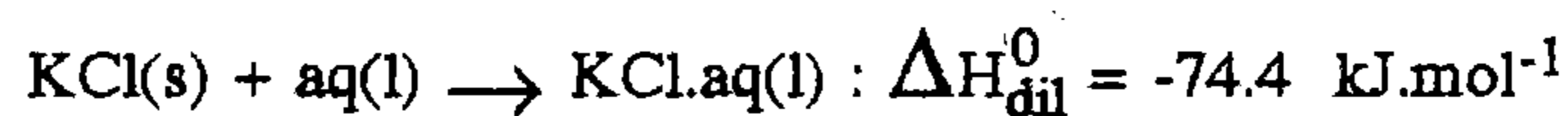


จากกฎของเฮสส์ สมการ 1 + สมการ 2 จะได้



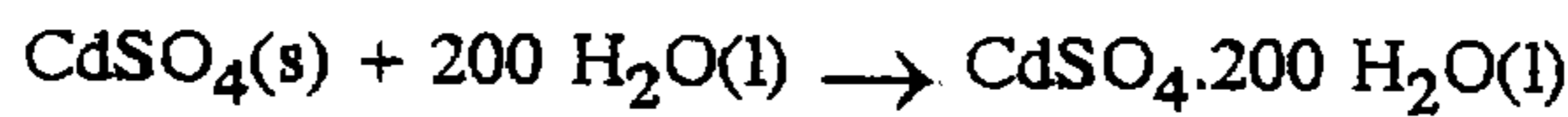
จากสมการตัวอย่างข้างต้นของ KNO_3 แสดงให้เห็นว่า ถ้ายิ่งทำให้สารละลายเจือจาง การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีก็ยังมีค่าน้อยลงด้วย ทั้งนี้ก็เพราะว่าเมื่อของแข็งละลายในน้ำ โคร่งผลึกของแข็งนั้นจะถูกทำให้แยกจากกัน ได้เป็นไอออนอยู่ในสารละลาย ทั้งนี้ก็เพราะว่าเป็นไอออนอยู่ในสารละลาย และเมื่อทำให้สารละลายเจือจาง ไอออนเหล่านี้จะยิ่งแยกออกจากกันมากขึ้น จนในที่สุดไอออนเหล่านี้จะไม่มีผลต่อกัน เมื่อสารละลายนั้นกลายเป็นสารละลายเจือจางอนันต์

ค่าเอนทัลปีของสารละลาย KCl ที่มีการละลายเจือจางอนันต์ มีค่าเท่ากับ $-77.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ดังสมการ



จงพิจารณาตัวอย่างการคำนวณดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 6.8 ในการศึกษาปฏิกิริยาต่อไปนี้



ได้ใช้ $\text{CdSO}_4(\text{s})$ ไป 3 กรัม จงคำนวณมวลของน้ำที่ต้องใช้ในการละลายของแข็งจำนวนนี้ เมื่อมวลของโมเลกุลของ $\text{CdSO}_4(\text{s})$ และน้ำเท่ากับ 208.5 และ 18 ตามลำดับ

วิธีทำ

$$\therefore n = \frac{m}{M}$$

เมื่อ $n =$ จำนวนโมล

$m =$ มวลสารเป็นกรัม

$M =$ มวล โมเลกุลของสาร

เพราะฉะนั้น จำนวนโมเลกุลของน้ำ $(n_1) = \frac{m_1}{18}$ โมล

และ จำนวนโมเลกุลของ $\text{CdSO}_4 = \frac{3}{208.5} = 0.0144$ โมล

จากสมการที่โจทย์กำหนด จะได้ว่า

ถ้าใช้ $\text{CdSO}_4(\text{s})$ 0.0144 โมล ต้องใช้น้ำ 200×0.0144 โมล

ดังนั้น $\frac{m_1}{18} = 200 \times 0.0144$

นั่นคือ $m_1 = 18 \times 200 \times 0.0144$
 $= 51.8$ กรัม

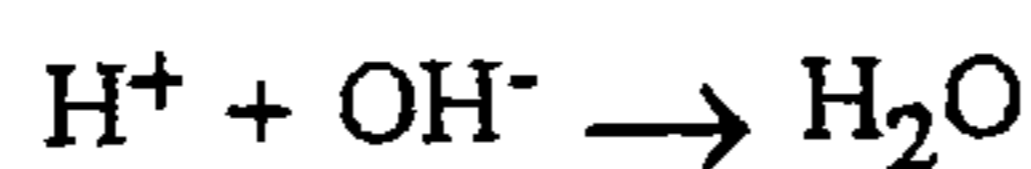
ดังนั้น มวลของน้ำที่ต้องใช้เพื่อละลาย $\text{CdSO}_4(\text{s})$ คือ 51.8 กรัม **ตอบ**

6.4.5 เอนทลปีของการสะเทิน

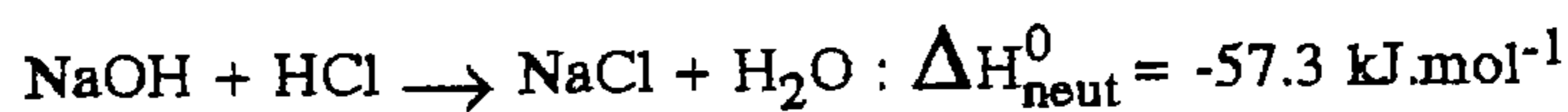
เอนทลปีของการสะเทิน (Enthalpy of neutralization : ΔH_{neut}^0) หรือความร้อนของการสะเทิน (Heat of neutralization) หมายถึง ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในการสะเทินกรดแก่กับเบสแก่แล้วเกิดน้ำจำนวน 1 โมล ค่านี้จะผันแปรไปตามชนิดของกรดและเบส จากการศึกษา พบว่าในสารละลายเจือจางของกรดแก่กับเบสแก่ ค่าเอนทลปีของการสะเทินค่อนข้างคงที่ ในช่วงประมาณ -56 ถึง $-59 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ต่อการเกิดน้ำ 1 โมล

การที่เอนทลปีของการสะเทินระหว่างกรดแก่กับเบสแก่มีค่าค่อนข้างคงที่นั้น เนื่องมาจากทั้งกรดแก่และเบสแก่แตกตัวเป็นไอออนได้อย่างสมบูรณ์ จึงทำให้มีเพียง H^+ (จากกรด)

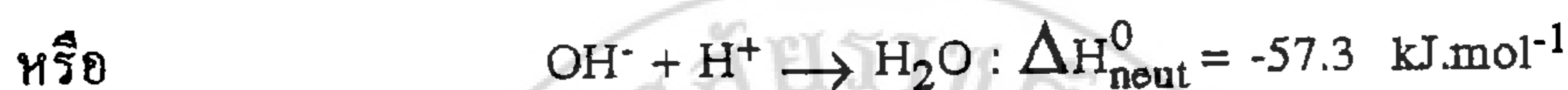
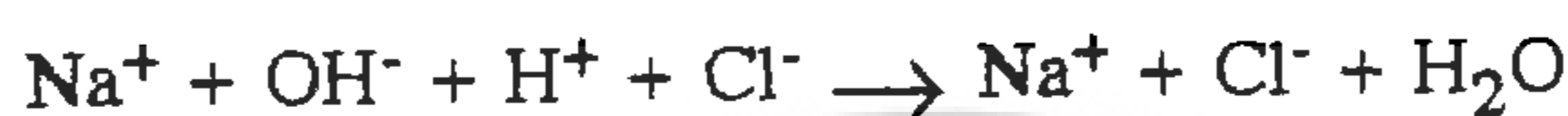
กับ OH^- (จากเบส) ในสารละลายเท่านั้น ที่ทำปฏิกิริยากัน ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาสะเทินระหว่างกรดกับเบสจึงเป็นความร้อนสำหรับปฏิกิริยาระหว่าง



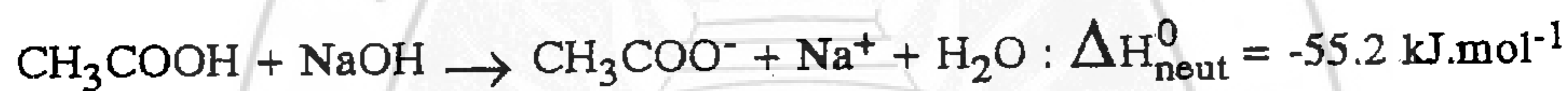
ดังตัวอย่างการสะเทินกรดแก่ HCl ด้วย เบสแก่ NaOH ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



สารทุกสารที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยานี้ ยกเว้นน้ำในสารละลายที่เจือจาง จะแตกตัวเป็นไอออนได้คืมากดังนี้



ในกรณีของกรดอ่อนหรือเบสอ่อน ค่า ΔH_{neut}^0 จะแตกต่างไปจากตัวเลขดังกล่าว ดังเช่นการสะเทิน CH_3COOH (กรดอ่อนซึ่งแตกตัวให้ H^+ น้อย) ด้วย NaOH ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



จะเห็นได้ว่าค่า ΔH_{neut} ที่ได้มีค่าน้อยกว่ากรณีแรก ทั้งนี้เพราะความร้อนบางส่วนถูกดูดกลืนเข้าไปใช้เพื่อทำให้กรด CH_3COOH แตกตัวเป็นไอออนให้ H^+ เข้าไปทำปฏิกิริยากับ OH^- จาก NaOH เกิดเป็นน้ำ

สำหรับสารละลายเจือจางอนันต์ ไม่ว่าจะเป็นกรดอ่อนหรือกรดแก่ ค่า ΔH_{neut}^0 หรือค่า ΔH_{neut} เอนทัลปีของการสะเทินจะมีค่าคงที่เท่ากันเสมอ คือ $-56.9 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$

ตัวอย่างค่า ΔH_{neut}^0 ของกรดและเบสบางคู่ มีแสดงไว้ในตารางที่ (6.3)

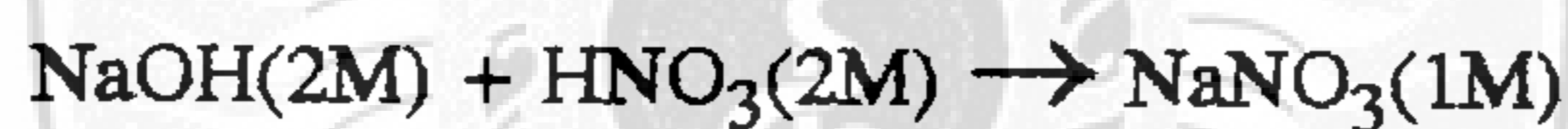
ตารางที่ 6.8 ค่านทลปีของการสะเทินกรดกับเบส (ΔH_{neut}^0)

กรด	เบส	ΔH_{neut}^0 (KJ mol ⁻¹)
HNO ₃	NaOH	57.1
H ₂ SO ₄	NaOH	66.5
HCl	KOH	57.3
HNO ₃	KOH	57.3
HNO ₃	Ca(OH) ₂	58.4
H ₂ S	NaOH	16.0
HCN	NaOH	12.0
HCl	NH ₃	51.5

ที่มา : ราตรี วรรชิตชัย และศศิเกษม ทองชงค์ 2524 : 211

พิจารณาตัวอย่างการคำนวณ ดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 6.9 จงคำนวณความร้อนของการสะเทินของปฏิกิริยาต่อไปนี้



เมื่อ HNO₃ เข้มข้น 2M 25 cm³ ผสมกับ NaOH 2M cm³ ในแคลอรีมิเตอร์ที่มีความจุความร้อน 132.2 JK⁻¹ พบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 8.35°C ถ้าความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 4.184 JK⁻¹g⁻¹

วิธีทำ

หาปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาที่โจทย์กำหนด ดังนี้

∴ ปริมาณของกรดหรือเบสที่ใช้ในปฏิกิริยา = ปริมาตร x ความเข้มข้น

$$\therefore \text{ปริมาณของกรด HNO}_3 \text{ 2M 25 cm}^3 = 25 \times \frac{2}{1000} = 0.05 \text{ โมล}$$

$$\text{และปริมาณของ NaOH 2M cm}^3 = 25 \times \frac{2}{1000} = 0.05 \text{ โมล}$$

$$\therefore \text{ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้น} = 0.05 \text{ โมล}$$

สมมติให้ความร้อนจำเพาะของสารละลายที่ได้มีค่าเท่ากับความร้อนจำเพาะของน้ำในสารละลายนั้น

$$\begin{aligned} \therefore \text{ ความจุความร้อนรวม} &= [132.2 + (50 \times 4.184)] \text{ JK}^{-1} \\ &= 341.4 \text{ JK}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ เกิดน้ำ } 0.05 \text{ โมล ระบบคายความร้อนออก} &= 341.4 \times 8.35 \text{ J} \\ &= 2851 \end{aligned}$$

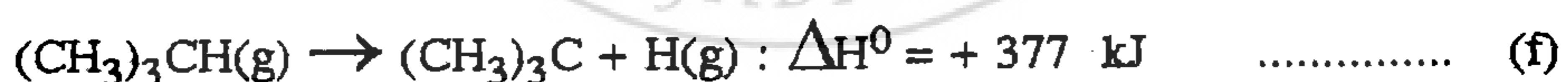
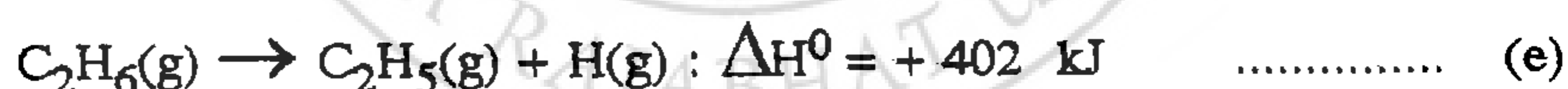
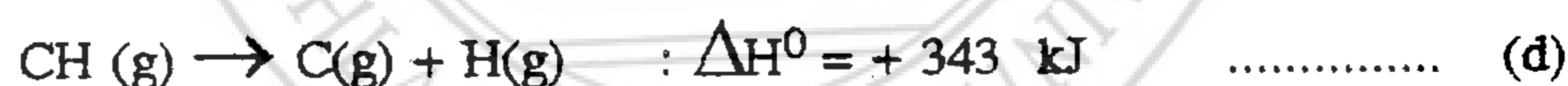
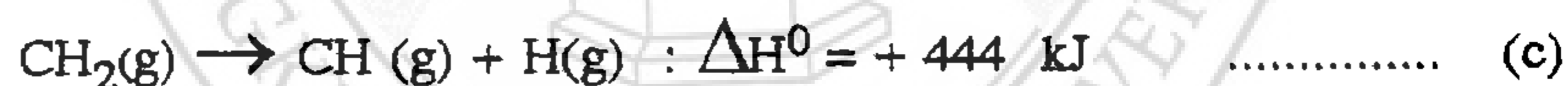
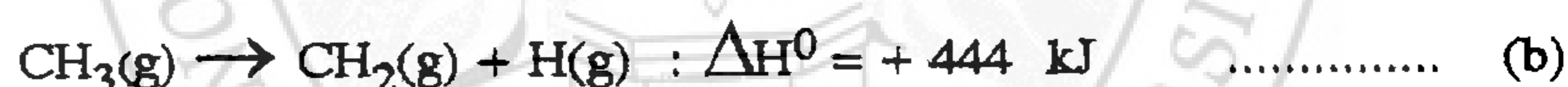
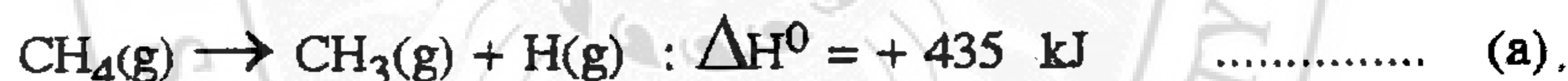
$$\text{ถ้าเกิดน้ำ } 1 \text{ โมล ระบบคายความร้อนออก} = \frac{2851}{0.05} = 57020 \text{ J}$$

นั่นคือ เอนทัลปีของการสะเทิน (ΔH_{neut}^0) เท่ากับ $-57.0 \text{ KJ mol}^{-1}$ **ตอบ**

6.4.6 เอนทัลปีพันธะหรือพลังงานพันธะ

เอนทัลปีพันธะหรือพลังงานพันธะ (Bond enthalpy or Bond energy) เป็นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทำลายโคเวเลนต์บอนด์ ซึ่งหมายถึง พลังงานที่ใช้เพื่อแยกอะตอมที่มาสร้างพันธะกันแบบโคเวเลนต์ให้ออกห่างจากกัน เป็นระยะเท่ากัน เมื่ออยู่ในสถานะแก๊สที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิเฉพาะค่าหนึ่ง เอนทัลปีพันธะมี 2 ชนิด คือ

1. เอนทัลปีของการสลายพันธะ (Bond dissociation enthalpy) ซึ่งหมายถึง พลังงานที่ใช้ในการทำลายพันธะ ที่เฉพาะเจาะจงลงไปในการประกอบอย่างหนึ่ง ถ้าเป็นสารประกอบต่างชนิดหรืออยู่ในสถานะแวดล้อมต่างกัน พลังงานของการสลายพันธะเดียวกัน ก็จะแตกต่างกันไปด้วย ดังเช่น



2. เอนทัลปีพันธะเฉลี่ย (Average bond enthalpy) หมายถึง ค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้สลายพันธะระหว่างอะตอมคู่หนึ่ง ๆ ไม่ว่าจะ เป็นโมเลกุลชนิดใด ดังเช่น ค่าเอนทัลปีเฉลี่ยของพันธะ C-H 1 พันธะ มีค่าเท่ากับ $416.5 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ไม่ว่าจะพันธะ C-H จะเป็นของโมเลกุลใดก็ตาม เราใช้ตัวเลข $416.5 \text{ kJ.mol}^{-1}$ เป็นค่าพลังงานที่ใช้ในการทำลายพันธะ C-H เท่ากันหมด ดังนั้น ในการทำลายพันธะ C-H ในแก๊สมีเทน (CH_4) ให้กลายเป็นอะตอมองค์ประกอบอย่างสมบูรณ์ ดังสมการ



จ้ต้องใช้พลังงานทั้งหมด ΔH^0 เท่ากับ $4 \times 416.5 = 1666.0 \text{ kJ}$

ตัวอย่างค่าเอนทัลปีพันธะของอะตอมคู่ต่าง ๆ มีแสดงเป็นตัวอย่างดังในตารางที่ (6.4)

ตารางที่ 6.4 เอนทัลปีพันธะเฉลี่ย ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)

พันธะ	เอนทัลปี	พันธะ	เอนทัลปี	พันธะ	เอนทัลปี
H-H	436	C-C	344	C=C	615
C-H	415	N-N	159	C≡C	812
N-N	391	O-O	143	N=N	418
O-H	463	F-F	158	N≡N	946
F-H	563	Cl-Cl	243	O=O	498
Cl-H	431	Br-Br	193	C=O	724
Br-H	366	I-I	151		
I-H	299	C-Cl	328		

ที่มา : ประเสริฐศรี เท็งทัก 2530 : 172 อ้างจาก Barrow 1973 : 161

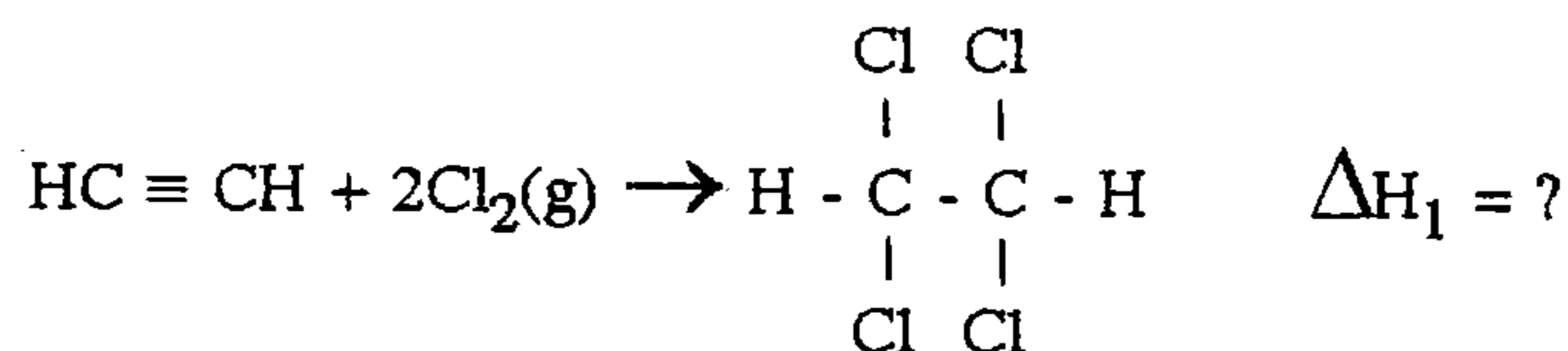
ในการแก้ปัญหาทางอุณหเคมี นิยมใช้ค่าเอนทัลปีพันธะเฉลี่ย เพื่อกำหนดหาเอนทัลปีของปฏิกิริยาได้ เมื่อไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับเอนทัลปีอื่น ๆ ที่ใช้ได้เลย

พิจารณาตัวอย่างการคำนวณดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 6.10 จงคำนวณค่าเอนทัลปีของปฏิกิริยาการเติมคลอรีนให้กับอะเซทีลีน ($\text{C}_2\text{H}_2\text{:g}$) โดยใช้ค่าต่าง ๆ จากตาราง (6.4)

วิธีทำ

ปฏิกิริยาการเติมคลอรีนเป็นดังนี้

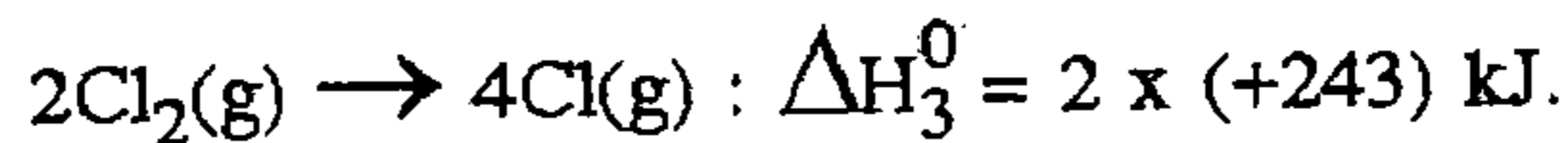


เราอาจจะคิดได้ว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเป็นขั้น ๆ ได้ดังนี้

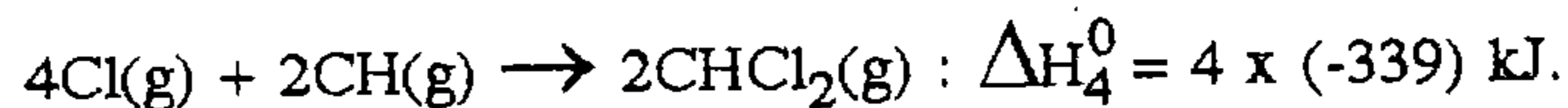
1. เกิดการสลายพันธะ C≡C



2. เกิดการสลายของ Cl₂(g) 2 โมล



3. เกิดพันธะ C-Cl 4 พันธะ



4. เกิด C-C 1 พันธะ



จากสมการข้างต้นและกฎของเฮสส์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta H_1^0 &= \Delta H_2^0 + \Delta H_3^0 + \Delta H_4^0 + \Delta H_5^0 \\ &= (945) + (2 \times 243) - (4 \times 339) - 348 \\ &= -273 \end{aligned}$$

นั่นคือ เอนทัลปีของปฏิกิริยา คือ -273 kJ.mol^{-1}

ตอบ

6.5 สรุป

อุณหเคมี เป็นเคมีสาขาหนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ที่ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงของความร้อนจากปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ โดยกำหนดด้วยค่าเอนทัลปี (Enthalpy : ΔH^0) แบบต่าง ๆ ตามชนิดของปฏิกิริยานั้น ๆ ค่าฟังก์ชันเอนทัลปีนี้เป็นฟังก์ชันของสถานะดังกล่าวมาแล้ว หาได้จากผลต่างของสถานะแรกและสถานะหลัง ปกติค่าเอนทัลปีนี้ เราจะกำหนดที่สถานะมาตรฐาน คือ ภาวะที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นต้น หนึ่งค่าของเอนทัลปีจะมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาเคมีนั้น ๆ ดังตัวอย่างเช่น

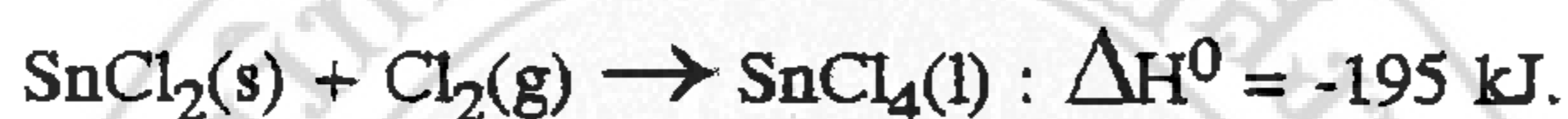
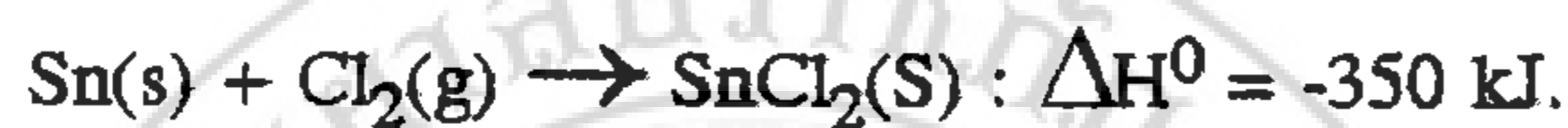
- เอนทัลปีของการเผาไหม้ (ΔH_c^0)
- เอนทัลปีของการเกิด (ΔH_f^0)
- เอนทัลปีของสารละลาย (ΔH_{sol}^0)
- เอนทัลปีของการเจือจาง (ΔH_{dil}^0)
- เอนทัลปีของการสะเทิน (ΔH_{neut}^0)
- เอนทัลปีพันธะ (ΔH^0) เป็นต้น

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6

1. จงอธิบายความหมายของคำต่อไปนี้ สั้น ๆ พอเข้าใจ

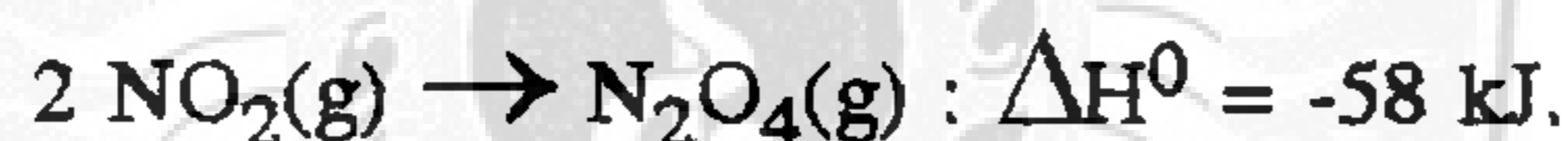
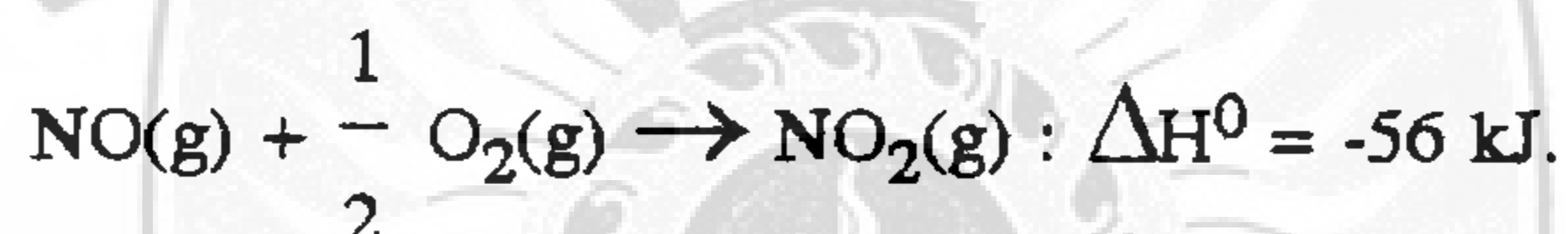
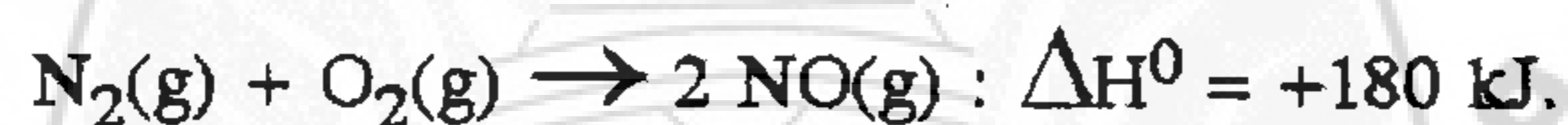
- | | |
|---------------------------------|---|
| 1.1 อุณหเคมี (Thermo Chemistry) | 1.5 เอนทลปีของการเผาไหม้ (ΔH_c^0) |
| 1.2 เอนทลปี (Enthalpy) | 1.6 เอนทลปีของการเกิด (ΔH_f^0) |
| 1.3 สภาวะมาตรฐาน | 1.7 เอนทลปีของการเจือจาง (ΔH_{dil}^0) |
| 1.4 กฎของเฮสส์ | 1.8 เอนทลปีของการสะเทิน (ΔH_{neut}^0) |

2. กำหนดข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้ให้



จงคำนวณหา ΔH^0 ของปฏิกิริยา $\text{Sn}(s) + 2\text{Cl}_2(g) \rightarrow \text{SnCl}_4(l)$

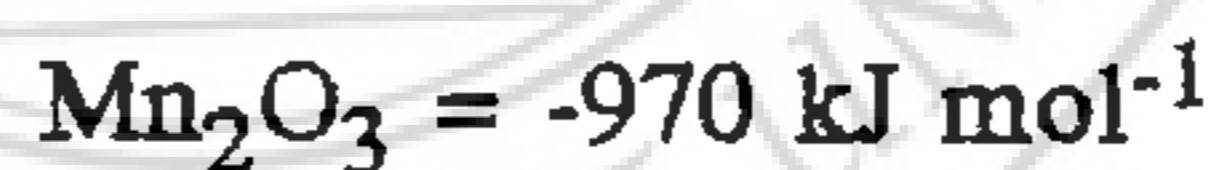
3. จากปฏิกิริยาและค่า ΔH^0 ที่กำหนดให้ต่อไปนี้



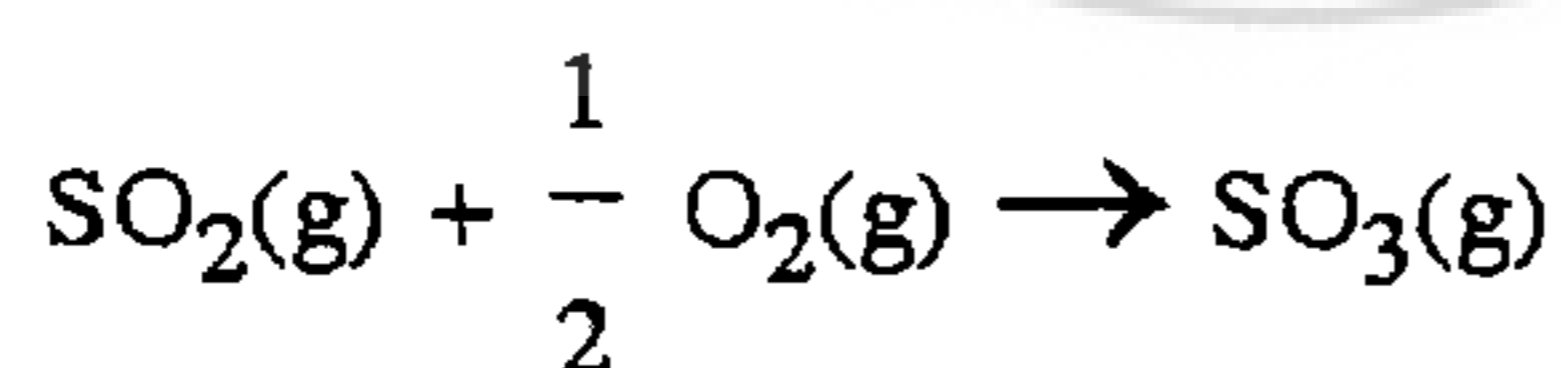
จงคำนวณ ΔH^0 ของปฏิกิริยา $\text{N}_2(g) + 2 \text{O}_2(g) \rightarrow \text{N}_2\text{O}_4(g)$

4. จงคำนวณ ΔH^0 ของปฏิกิริยา $2\text{Mn}_3\text{O}_4(s) + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 3\text{Mn}_2\text{O}_3(s)$

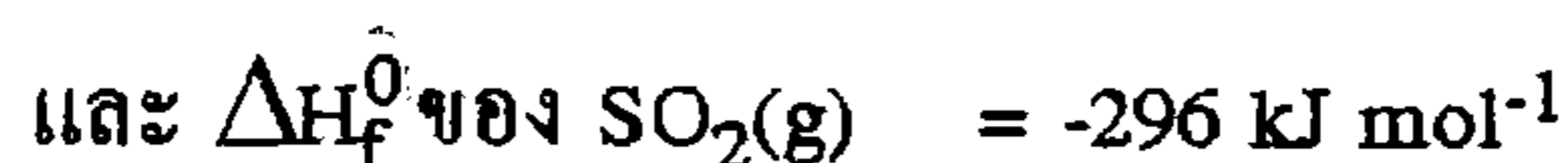
กำหนดให้ (ΔH_f^0) ของ $\text{Mn}_3\text{O}_4(g) = -1385 \text{ kJ mol}^{-1}$ และของ



5. จงคำนวณ ΔH_f^0 ของ $\text{SO}_3(g)$ จากปฏิกิริยาต่อไปนี้



เมื่อกำหนด ΔH^0 ของปฏิกิริยาให้ = -100 kJ.



6. จงคำนวณหาพลังงานของการเกิดสาร C_2H_4 จากสมการ $2\text{C} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4$

โดยอาศัยค่าความร้อนของการสันดาปของสารที่เกี่ยวข้องจากตารางที่ 6.1

7. จงคำนวณพลังงานพันธะใน HF(g) จากข้อมูลต่อไปนี้

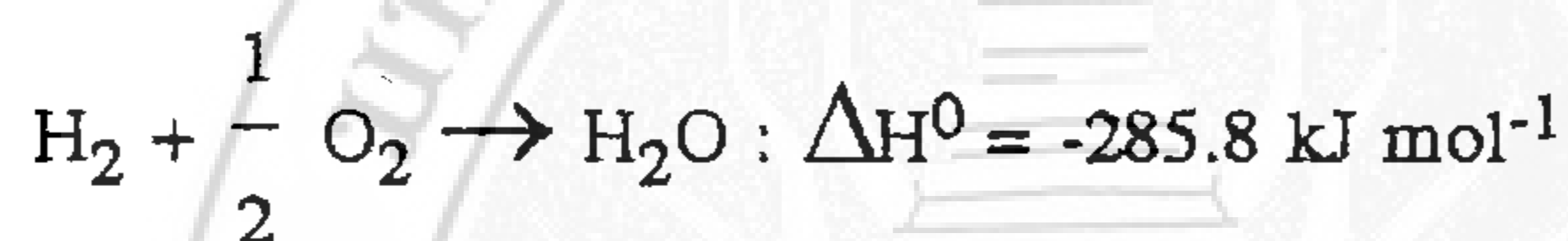
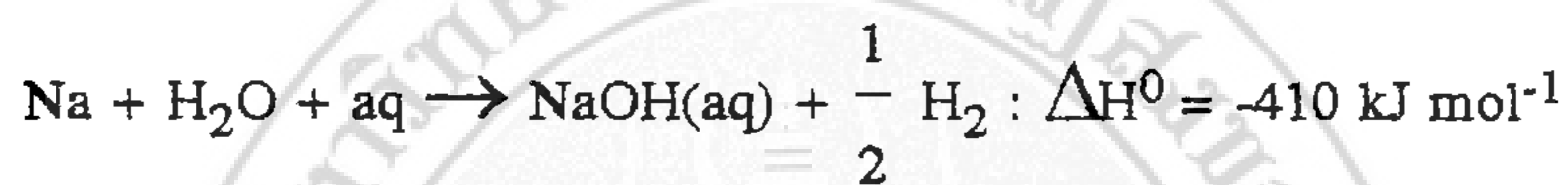
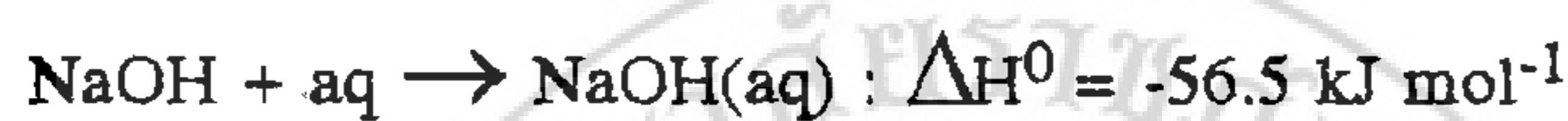
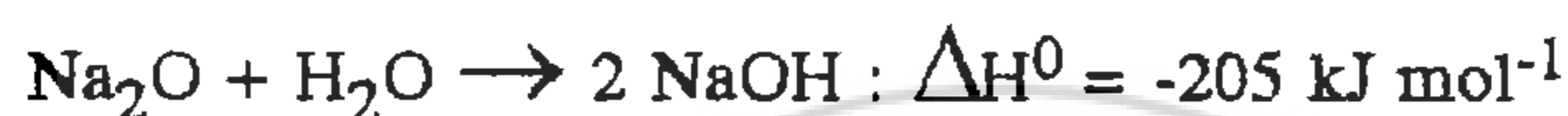
$$\text{ความร้อนของการเกิด HF(g)} = -268 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\text{พลังงานพันธะ H}_2 = 432 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\text{พลังงานพันธะของ F}_2 = 155 \text{ kJ mol}^{-1}$$

8. การสันดาปกลูโคส 1 โมล ที่ความดัน 1 atm 298.15 K ให้ความร้อนออกมา 2801.69 kJ จงคำนวณความร้อนมาตรฐานของการเกิดกลูโคส

9. จงคำนวณความร้อนของการเกิด Sodium (I) oxide จากข้อมูลต่อไปนี้

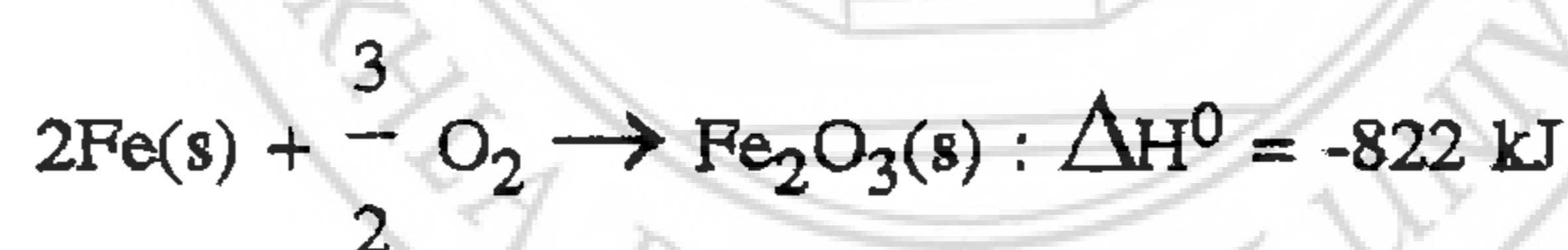


10. ที่อุณหภูมิ 25°C ความร้อนของการสันดาปต่อโมลของกรดเบนโซอิก

(C₆H₅COOH) มีค่าเท่ากับ -3227.5 kJ เอนทัลปีของการเกิด CO₂(g) และ H₂O(l)

ที่ 25°C มีค่า -395.5 และ -285.8 kJ mol⁻¹ ตามลำดับ จงคำนวณหาเอนทัลปีของการเกิดกรดเบนโซอิก

11. จากข้อมูลที่ 25°C ของปฏิกิริยาต่อไปนี้



จงคำนวณหา ΔH^0 ที่ 25°C ของปฏิกิริยานี้

