

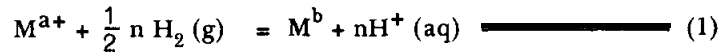
# บทที่ 11 สถานะออกซิเดชัน (Oxidation State)

## 1. จุดประสงค์ของการทดลอง

พิจารณาความเสถียรของสถานะออกซิเดชันต่าง ๆ และหาค่าสถานะออกซิเดชันของวานาเดียม ที่เกิดจากการรีดิวซ์ของสารบางตัว

## 2. บทนำ

เราสามารถพิจารณาความเสถียรสัมพัทธ์ของโลหะ ที่มีสถานะออกซิเดชันได้หลายค่า โดยปฏิกิริยาต่อไปนี้



เพราะฉะนั้น 
$$b = a - n$$

ศักย์รีดักชันมาตรฐาน (standard reduction potential) ของคู่  $M^{a+}/M^b$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E^\circ = -\Delta G^\circ / nF \quad (3)$$

$\Delta G^\circ$  เป็นค่าพลังงานอิสระมาตรฐานในปฏิกิริยาที่ (1) ซึ่งในการทดลองแบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าศักย์รีดักชัน แต่เพื่อการอธิบายที่สมบูรณ์ ขอแนะนำว่า ถ้าปฏิกิริยา (1) เป็นปฏิกิริยาในเซลล์อิเล็กโทรเคมี ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าหนึ่งผั้กลับต่อคู่  $H^+/H_2$  และอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งผั้กลับต่อคู่  $M^{a+}/M^b$  สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าโดยใช้สมการของ เนอร์ส

$$E = E^\circ - (2.3RT/nF) \log ([M^b]/[M^{a+}])$$

ในทางอุณหพลวัต (Thermodynamic) การเกิดขึ้นได้เองของปฏิกิริยาเคมีสามารถคาดคะเนได้จากค่า  $\Delta G^\circ$  ซึ่งถ้าปฏิกิริยานั้นทำให้พลังงานอิสระเปลี่ยนแปลงไปในทางลดลง หรือ  $\Delta G^\circ$  มีค่าเป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้เอง หรือถ้าดูจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3 จะเห็นว่าถ้าค่า  $E^\circ$  ของปฏิกิริยาเป็นบวกแสดงว่าปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้เอง ดังนั้นค่า  $E^\circ$  ของโลหะที่สถานะออกซิเดชันหนึ่ง ๆ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเสถียรของสถานะ

ออกซิเดชันนั้น ๆ ได้ ในสภาวะที่เป็นสารละลายที่ไม่มีสารตัวอื่นเจือปน ถ้าสารตัวนั้นมีกำลังในการออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์สูง ก็จะไปทำปฏิกิริยากับ ตัวทำละลายหรืออากาศหรือเกิดการแตกสลายตัวแบบดีสพรอพพอร์น (disproportion) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะออกซิเดชันขึ้นได้เอง

อย่างไรก็ตาม มีปฏิกิริยาบางประการที่แม้ว่าในทางอุณหพลวัตจะบ่งชี้ว่าสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ในความเป็นจริงแล้วปฏิกิริยาอาจไม่เกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นได้ช้ามากจนไม่เกิดประโยชน์ ทั้งนี้ เพราะผลของกำแพงจลน์ (kinetic barrier) ของปฏิกิริยาในการเปลี่ยนแปลงจากตัวทำปฏิกิริยา (reactants) ไปยังผลผลิต (products) ปฏิกิริยาจะต้องผ่านแนวกันของกำแพงจลน์นี้ ถ้ากำแพงจลน์มีค่าสูงปฏิกิริยา ก็จะเกิดขึ้นได้ช้า หรือไม่เกิดขึ้นเลยดังกล่าวแล้ว

ในกรณีที่มีสารบางตัวซึ่งไม่ทราบค่า  $E^\circ$  นอกจากจะวัดค่าได้โดยใช้เซลล์อิเล็กโทรเคมีแล้ว อาจจะทำการประมาณค่าได้จากปฏิกิริยาเคมีโดยใช้สารนั้นทำปฏิกิริยากับสารตัวอื่นที่ทราบค่า  $E^\circ$  แล้ว ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา



ถ้าไม่ทราบค่า  $E^\circ$  ของปฏิกิริยานี้ อาจจะสามารถวัดค่าได้โดยใช้ทำปฏิกิริยากับฮาโลเจนที่ทราบค่า  $E^\circ$  เช่น



โดยใช้คู่ของ  $\text{Br}_2/\text{Br}^-$  ทำปฏิกิริยากับคู่ของ  $\text{Cl}_2/\text{Cl}^-$  และ  $\text{I}_2/\text{I}^-$  ซึ่งในปฏิกิริยารีดักชันของ  $\text{Br}_2$  ไปเป็น  $\text{Br}^-$  นั้น เมื่อใช้น้ำโบรมีนทำปฏิกิริยากับสารละลายของ  $\text{NaCl}$  และ  $\text{NaI}$  จะพบว่าไม่มีปฏิกิริยาเดียวที่เกิดขึ้นคือ



จากปฏิกิริยานี้แสดงว่าค่า  $E^\circ$  ของสมการ (6) จะต้องมากกว่า  $+0.5355 \text{ V}$

การที่  $\text{NaCl}$  ไม่สามารถไปรีดิวซ์  $\text{Br}_2$  ได้ อาจหมายความว่า ค่า  $E^\circ$  ของสมการ (4) น้อยกว่า  $+1.36 \text{ V}$  หรืออาจจะเป็นไปได้ว่าปฏิกิริยาไม่เกิดขึ้นแม้ว่าค่า  $E^\circ$  จะมากกว่า  $+1.36 \text{ V}$  เนื่องจากผลของกำแพงจลน์ดังกล่าวแล้ว เพื่อจะพิสูจน์ผลก็ต้องไปพิจารณาปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $\text{Br}^-$  โดยใช้  $\text{NaBr}$  ทำปฏิกิริยากับน้ำคลอรีน และเกล็ดไอโอดีน ผลปรากฏว่ามีปฏิกิริยาเดียวที่เกิดขึ้นอีกคือ



จากปฏิกิริยานี้ จะยืนยันได้โดยหมดข้อสงสัยว่า ค่า  $E'$  ของสมการ (6) จะน้อยกว่า  $+1.36 \text{ V}$  แน่หนอน นั่นคือค่า  $E'$  ของสมการ (6) จะอยู่ระหว่าง  $1.36-0.54 \text{ V}$  และค่าที่แท้จริงคือ  $+1.06 \text{ V}$  ดังนั้น ถ้ามีการจัดสภาวะของปฏิกิริยาให้เหมาะสม จะสามารถประมาณค่า  $E'$  ได้ในช่วงที่มีความผิดพลาดไม่เกิน  $0.1 \text{ V}$

สำหรับโลหะที่จะใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ วานาเดียม ซึ่งมีสถานะออกซิเดชันได้หลายค่าในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ พบว่ามีสถานะออกซิเดชันได้ 4 ค่าคือ  $V(\text{II})$ ,  $V(\text{III})$ ,  $V(\text{IV})$ , และ  $V(\text{V})$  แต่  $V(\text{II})$  เป็นตัวที่ไม่เสถียรในบรรยากาศ สารละลายวานาเดียมในแต่ละออกซิเดชันจะมีสีต่างๆ กัน คือ  $V(\text{II})$  สีม่วง,  $V(\text{III})$  สีเขียว,  $V(\text{IV})$  สีฟ้า,  $V(\text{V})$  สีเหลือง ซึ่งจะสามารถระบุสถานะออกซิเดชันของวานาเดียมได้โดยการสังเกตดูสีของสารละลาย

ในการทดลองนี้ จะเป็นการศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง  $V(\text{V})$  กับอนุกรมของตัวรีดิวซ์ชุดหนึ่ง และปฏิกิริยาระหว่าง  $V(\text{IV})$  กับอนุกรมของตัวออกซิไดซ์ชุดหนึ่ง จากการทดลองนี้จะทำให้เรียนรู้เกี่ยวกับ

1. การเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneity) ของปฏิกิริยาในเชิงอุณหพลวัตเทียบกับทางจลน์ของปฏิกิริยานั้น
2. ความหมายศักย์มาตรฐานในปฏิกิริยาเคมีได้ดีขึ้น
3. วิธีการประมาณค่าศักย์มาตรฐานรีดักชัน (Standard Reduction Potential) โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชันจาก  $V(\text{V})$  ไปยัง  $V(\text{IV})$  เป็นตัวศึกษา



และใช้ค่าศักย์มาตรฐานที่ทราบค่าแล้วของสารตัวอื่นเป็นเกณฑ์

4. การหาค่าสถานะออกซิเดชันของวานาเดียม

การหาค่าสถานะออกซิเดชันของ  $V(\text{n})$  ทำได้โดยการรีดิวซ์  $V(\text{V})$  ไปเป็น  $V(\text{n})$  แล้วนำไปไตเตรตกับ  $\text{KMnO}_4$  ซึ่งปฏิกิริยาจะเป็น



ถ้ารู้ความเข้มข้นของ  $\text{KMnO}_4$  และ  $\text{V}^{5+}$  ที่ใช้ก็สามารถคำนวณหาค่า  $\text{n}$  ได้โดยวิธีปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometry)

สิ่งที่ต้องสังเกตให้มากจากการทดลองนี้คือ ในบางปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาหนึ่งอาจจะทำปฏิกิริยากันเองอีก ทำให้เกิดปฏิกิริยาหันกลับไปยังสถานะออกซิเดชันอื่นได้ ดังนั้น เมื่อจะศึกษาปฏิกิริยาของสารคู่หนึ่ง จะต้องพิจารณาความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดด้วย

### 3. การทดลอง

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้

แอมโมเนียมเมตาแวนาเตท

ซิงค์

โซเดียมซัลไฟท์  $\text{Na}_2\text{SO}_3$

โซเดียมไนไตรท์  $\text{NaNO}_2$

โซเดียมโบรไมด์  $\text{NaBr}$

กรดออกซาลิก  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$

โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต

#### 3.2 วิธีทดลอง

##### 3.2.1 เตรียมสารละลายเมตาแวนาเตท 0.1 M

ชั่งแอมโมเนียมเมตาแวนาเตทอย่างละเอียดประมาณ 2.5 กรัม เทใส่ขวดปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 มิลลิลิตร เขย่าจนสารละลายหมด แล้วเติมน้ำ กรดซัลฟูริก 75 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เจือจางเป็น 250 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายสีเหลือง

##### 3.2.2 เตรียมสารละลายมาตรฐาน 0.02 M โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ชั่งโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต ประมาณ 3.1–3.2 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร เติมน้ำลงไปประมาณ 1 ลิตร ต้มสารละลายจนเดือด ตั้งสารไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องกรองสารละลายผ่านกรวยกรองโดยใช้ใยแก้วแทนกระดาษกรอง เก็บสารละลายในขวดสีชาและเก็บในที่มืด หากความเข้มข้นที่แน่นอนโดยการไตเตรตกับสารละลาย 0.05 โซเดียมออกซาลาเท :  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$  หรือโปแตสเซียมออกซาลาเท :  $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

##### 3.2.3 ปฏิกริยารีดักชัน

###### 3.2.3.1 เปรียบเทียบการรีดิวซ์ด้วย $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , $\text{NaNO}_2$ , $\text{NaBr}$ และ $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$

ตวงสารละลายวานาเดียม 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำ กรด 2 M ซัลฟูริก 25 มิลลิลิตรลงไป คนให้เข้ากันแล้วตวงสารละลายนี้ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร 4 ใบ ๆ ละ 10 มิลลิลิตร แล้วทำการทดลองต่อไปนี้

ก) ใบที่หนึ่ง เติมน้ำ  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  หรือ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  ลงไปจนสีเปลี่ยน

ข) ใบที่สอง เติมน้ำ  $\text{NaNO}_2$  ลงไป 10 มิลลิลิตร

ค) ใบที่สาม เติมน้ำ  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  ลงไป 10 มิลลิลิตร

ง) ใบที่สี่ เติมน้ำ  $\text{NaBr}$  ลงไป 10 มิลลิลิตร

ตั้งสารละลายเหล่านี้ทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที บันทึกผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละบีกเกอร์

แล้วนำสารเหล่านี้ไปต้มให้เดือดในตู้คว้น เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และความเร็วของปฏิกิริยา เก็บสารละลายในข้อ ก. ไว้

จงเขียนสามการแสดงผลปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นและคำนวณคํายมาตรฐานของปฏิกิริยาเหล่านั้น

### 3.2.3.2 การรีดิวซ์ด้วยสังกะสี

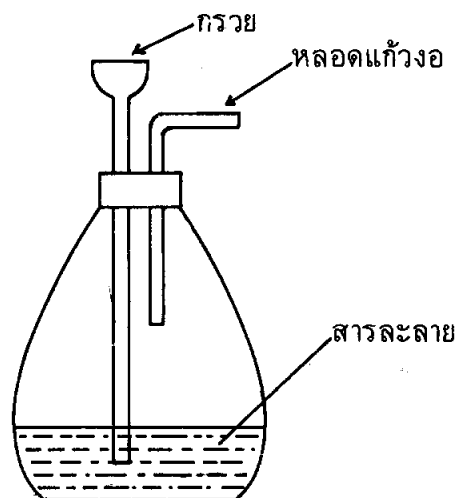
การทดลองนี้ให้ทำต่อเนื่องไปจนถึงข้อ 3.2.4.1 และอย่างรวดเร็ว  
ปิเปตสารละลายวานาเดียมมา 30 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้ว เติมสังกะสีลงไปประมาณ 5 กรัม อุดด้วยจุกยาง (ไม่ต้องแน่น) เขย่าขวดแก้วไปมา บันทึกการเปลี่ยนสีของสารละลายจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนสีอย่างสมบูรณ์

จงเขียนสมการแสดงผลปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นและคำนวณค่า  $E'$  ของปฏิกิริยา

### 3.2.4 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

#### 3.2.4.1 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของวานาเดียม (V)

นำขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดปากด้วยจุกยางที่มีกรวยสำหรับเทสารผ่าน และแท่งแก้วอ เพื่อต่อกับเครื่องดูดอากาศเสียอยู่ ดังรูปที่ 11.1



รูปที่ 11.1 ขวดแก้วรูปชมพู่ซึ่งพ่นอากาศผ่านทางกรวยโดยการดูดอากาศจากหลอดแก้วอ

นำสารละลายที่ได้จากการรีดิวซ์วานาเดียม (V) ด้วยสังกะสีในข้อ 3.2.3.2 มาผ่านกรวยซึ่งมีเยแก้วที่ทำให้เปียกด้วยน้ำเล็กน้อยรองอยู่ หลังจากกรองแล้ว ปิเปตสารละลายที่กรองได้มา 5 มิลลิลิตร

(ทำอย่างรวดเร็ว) เติมลงในบีกเกอร์ในข้อ 3.2.3.1 ก) ส่วนสารละลายที่เหลือนั้นให้อุดจุกยางกลับลงไป แล้วล้างสังกะสีบนกรวยกรองด้วย 2 M กรดซัลฟูริกครั้งละ 15 มิลลิลิตร 2 ครั้ง โดยเทผ่านกรวยกรองลงไปรวมกัน จากนั้นต่อหลอดแก้วเข้ากับที่ดูดอากาศ ตรวจสอบให้แน่ใจว่าปลายของกรวยกรองจุ่มอยู่ในสารละลาย ฟันอากาศลงไปในการละลายผ่านทางกรวยประมาณ 10 นาที เปรียบเทียบการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้น ทั้งในบีกเกอร์และในขวดชมพู เก็บสารละลายในขวดชมพูไว้ทำต่อในข้อ 3.2.5.2

จงเขียนสมการเคมีแสดงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น และคำนวณหาค่า  $E'$

#### 3.2.4.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของวานาเดียม (IV)

การทดลองต่อไปนี้จะทำพร้อมกับข้อ 3.2.5 ได้

ตวงสารละลายวานาเดียม (V) มา 25 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์แล้วเติม 2 M กรดซัลฟูริกลงไป 25 มิลลิลิตร เติมโซเดียมซัลไฟท์ หรือ โซเดียมไบซัลไฟท์ ลงไปจนสีเปลี่ยน (ทำในตู้ควัน) แล้วนำไปต้มให้เดือดเพื่อไล่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) ออกให้หมด เมื่อสารละลายเปลี่ยนเป็นสีฟ้าและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ระเหยหมดแล้ว ให้นำสารมาทดลองดังต่อไปนี้

ตวงสารละลายนี้มาใส่ลงในบีกเกอร์ 3 ใบ ใบละ 10 มิลลิลิตร

จ) ใบที่หนึ่ง เติมน้ำโบรมีนลงไป 10 มิลลิลิตร (ทำในตู้ควัน)

ฉ) ใบที่สอง เติมสารละลาย 0.2 M โซเดียมซัลเฟตลงไป 10 มิลลิลิตร

ช) ใบที่สาม เติมสารละลาย 0.2 M โซเดียมไนเตรตลงไป 10 มิลลิ-

ลิตร

ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที จงสังเกตปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แล้วนำสารละลายทั้งหมดนี้ไปต้มให้เดือดในตู้ควัน สังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

จงเขียนสมการเคมีแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมด และคำนวณค่า  $E'$  จากผลการทดลองในข้อ 3.2.3 และ 3.2.4 ให้ประมาณค่า  $E'$  ของสมการ (9) โดยอธิบายเหตุผลมาโดยละเอียด

#### 3.2.5 การหาสถานะออกซิเดชันของวานาเดียม

##### 3.2.5.1 การรีดิวซ์ด้วยโซเดียมซัลไฟท์

การทดลองนี้ควรทำ 2 ตัวอย่างควบคู่กันไป โดยบีบเปิดสารละลายวานาเดียม (V) 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร เติม 2 M กรดซัลฟูริกลงไป 25 มิลลิลิตร และโซเดียมซัลไฟท์ลงไปจนสีเปลี่ยน (ประมาณ 1 กรัม) เขย่าจนละลายแล้วนำไปต้มให้เดือดเพื่อกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกไป บันทึกสีของสารละลายวานาเดียมทั้งก่อนและ

หลังการรีดิวซ์ แล้วนำไปไตเตรตกับสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตในขณะที่สารละลายร้อน เมื่อถึงจุดยุติจะได้สารละลายสีส้ม

#### 3.2.5.2 การรีดิวซ์ด้วยสังกะสี

นำสารละลายที่ได้จากการรีดิวซ์ด้วยสังกะสี แล้วต่อด้วยการออกซิไดซ์ด้วยอากาศจากข้อ 3.2.4.1 ต้มสารละลายนั้นให้ร้อนประมาณ 60–80 องศาเซลเซียส แล้วไตเตรตสารละลายขณะร้อนด้วยสารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตจนถึงจุดยุติ

จงคำนวณหาค่าสถานะออกซิเดชันของสารละลายวานาเดียมทั้งข้อ 3.2.5.1 และ 3.2.5.2 จากจำนวนโมลเริ่มต้นของวานาเดียม (V) และจำนวนโมลของโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ใช้ไป

### แบบข้อมูลรายงานการทดลอง

ความเข้มข้นของเมตตะวานาเดทกับโซเดียมออกซาลเอท

|                                  | น้ำหนักสาร/กรัม |
|----------------------------------|-----------------|
| เมตตะวานาเดท<br>โซเดียมออกซาลเอท |                 |

ความเข้มข้นของโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต

|  |   |   |
|--|---|---|
| ปริมาตรของ 0.05 M $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ / 25 มล. | 1 | 2 |
| ปริมาตรของ 0.02 M $\text{KMnO}_4$ / มล. ที่อ่าน              |   |   |
| ปริมาตรของ 0.02 M $\text{KMnO}_4$ /มล. ที่ใช้                |   |   |



รีดิวซ์ด้วยซิงค์

| สารละลายวานาเดียม<br>(มล.) | ปริมาตรของ $\text{KMnO}_4$ (มล.) |   |        | สีที่เปลี่ยน |
|----------------------------|----------------------------------|---|--------|--------------|
|                            | 1                                | 2 | เฉลี่ย |              |
|                            |                                  |   |        |              |

รีดิวซ์ด้วยโซเดียมซัลไฟท์

| สารละลายวานาเดียม<br>(มล.) | ปริมาตรของ $\text{KMnO}_4$ (มล.) |   |        | สีที่เปลี่ยน |
|----------------------------|----------------------------------|---|--------|--------------|
|                            | 1                                | 2 | เฉลี่ย |              |
|                            |                                  |   |        |              |

รีดิวซ์ด้วยเหล็ก (II) ซัลเฟต

| สารละลายวานาเดียม<br>(มล.) | ปริมาตรของ $\text{KMnO}_4$ (มล.) |   |        | สีที่เปลี่ยน |
|----------------------------|----------------------------------|---|--------|--------------|
|                            | 1                                | 2 | เฉลี่ย |              |
|                            |                                  |   |        |              |

## คำถามท้ายบท

- 1) วานาเดียมในสารละลายที่มีสถานะออกซิเดชันต่าง ๆ กันนั้น จะอยู่ในรูปไอออนที่ต่างกันอย่างไร และเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น
- 2) ตัวรีดิวซ์แต่ละตัวนั้น เหตุใดจึงให้วานาเดียมที่สถานะออกซิเดชันต่างกัน
- 3) มีปฏิกิริยาใดบ้างที่ควรเกิดขึ้นได้เองทางขบวนการอุณหพลวัตร์ แต่ไม่เกิดขึ้นจริงในการทดลอง
- 4) เหตุใดในการเตรียม  $V^{4+}$  เพื่อศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเจาะจงใช้  $Na_2SO_2$  (หรือ  $Na_2S_2O_5$ ) เป็นตัวรีดิวซ์จาก  $V^{5+}$  เป็น  $V^{4+}$