

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 4

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

- การตกตะกอน
- การปนเปื้อนของตะกอน
- สารที่ใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอน
- การทำให้ระเหย
- การคำนวณเกี่ยวกับการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

1. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถบอกถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการตกตะกอน และสมบัติของตะกอนที่นำมาวิเคราะห์โดยน้ำหนักได้
2. เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจในขั้นตอนในการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก
3. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถเลือกใช้สารที่เป็นตัวทำให้ตกตะกอน ได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม รวมถึงการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในการตกตะกอนและการแก้ปัญหา
4. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถบอกวิธีการวิเคราะห์โดยน้ำหนักด้วยวิธีการทำให้ระเหยได้
5. เพื่อให้ผู้เรียนสามารถคำนวณเกี่ยวกับการวิเคราะห์โดยน้ำหนักได้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. ให้ผู้เรียนศึกษาเอกสารประกอบการสอนรายวิชาปริมาณวิเคราะห์
2. ผู้สอนบรรยายภาคทฤษฎีประกอบการสอนในลักษณะ โปรแกรมนำเสนอและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการสื่อสาร
3. หลังการบรรยายทฤษฎี อภิปรายร่วมกันระหว่างผู้สอนกับผู้เรียนและสรุปสาระสำคัญ
4. มอบหมายให้ผู้เรียนค้นคว้าเพิ่มเติมจากเอกสาร วารสาร ตำรา และสื่ออื่นๆ
5. ให้ผู้เรียนทำคำถามท้ายบท

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาปริมาณวิเคราะห์
2. โปรแกรมนำเสนอและอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการสื่อสาร
3. หนังสือ วารสาร และสื่ออิเล็กทรอนิกส์

การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตพฤติกรรมการเรียน การมีส่วนร่วมในการเรียน
2. สังเกตจากการซักถามและตอบปัญหาของผู้เรียน
3. ประเมินจากการทำคำถามท้ายบท

บทที่ 4

การวิเคราะห์ปริมาณโดยน้ำหนัก

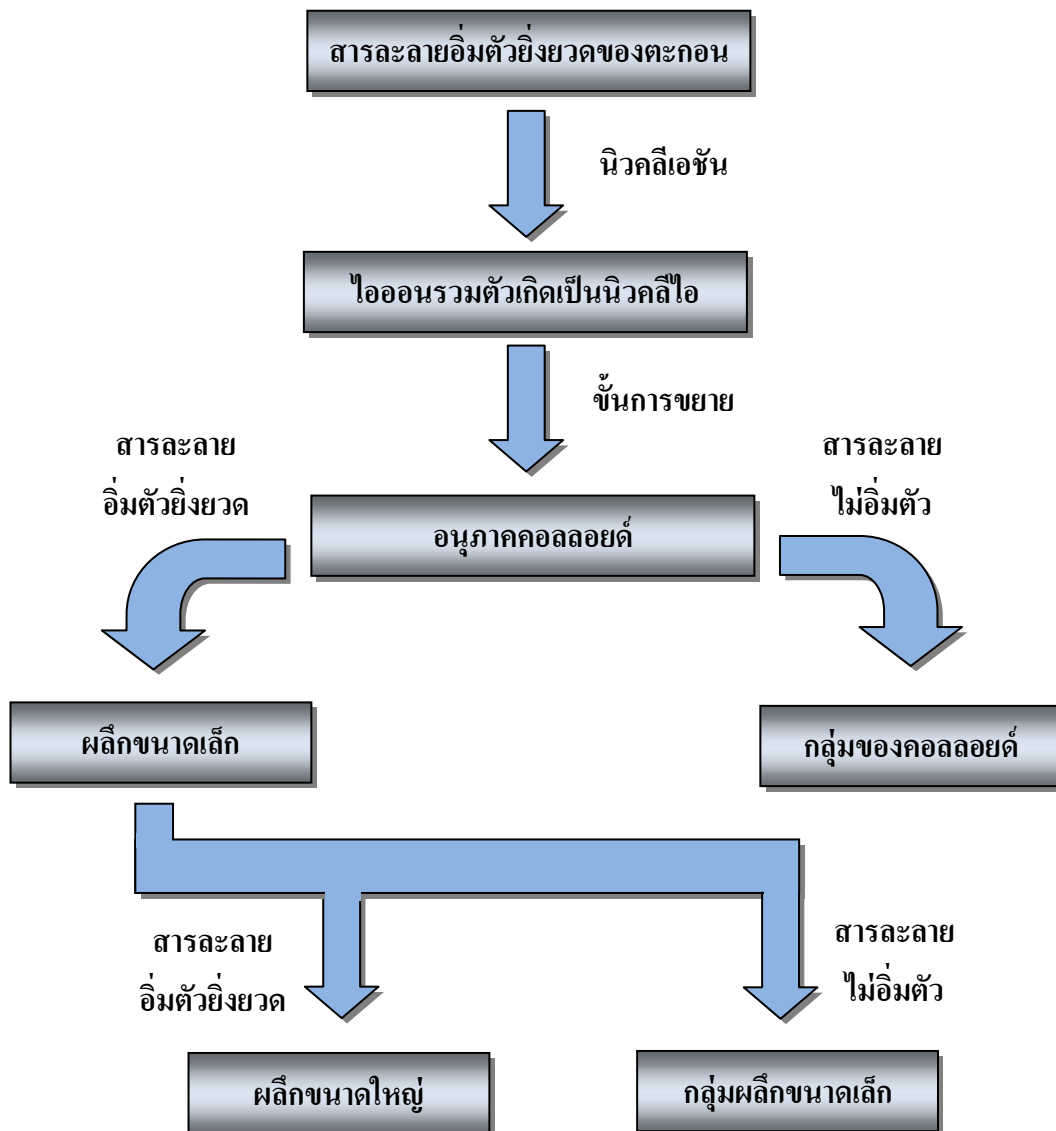
การวิเคราะห์ปริมาณโดยน้ำหนัก (Quantitative Gravimetric analysis) เป็นการวิเคราะห์สารตัวอย่างในระดับมหภาค ซึ่งปริมาณตัวอย่างต้องมีมากกว่า 100 มิลลิกรัม โดยการวิเคราะห์หาปริมาณสารจะทำได้โดยการชั่งน้ำหนัก การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ใช้อุปกรณ์เครื่องแก้วพื้นฐานทั่วไป และให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องสูง แต่ต้องใช้เวลามากในการวิเคราะห์ และต้องทำให้สารตัวอย่างปราศจากสารปนเปื้อน โดยการวิเคราะห์โดยน้ำหนักมีอยู่หลายเทคนิค อาทิเช่น วิธีการตกตะกอน (Precipitation method) วิธีการทำให้ระเหย (Volatilization method) และวิธีอิเล็กโทรกราวิเมทรี (Electrogravimetry) เป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวเฉพาะเทคนิคการตกตะกอน และวิธีการทำให้ระเหย ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณโดยการตกตะกอนจะต้องมีความเข้าใจในกระบวนการตกตะกอน วิธีการในการตกตะกอน และปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการตกตะกอน อาทิเช่น อุณหภูมิในการตกตะกอน ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการตกตะกอน และขนาดของตะกอน การปนเปื้อนของสารอื่นๆ เป็นต้น ทั้งนี้การวิเคราะห์ปริมาณจะต้องคำนึงถึงความจำเพาะของสารที่ใช้ในการตกตะกอน สมบัติของตะกอนที่เกิดขึ้น เช่น การความบริสุทธิ์ของตะกอน การละลายได้ของตะกอน การกรองและล้างตะกอน และการอบแห้ง ตะกอนที่ได้ โดยสมบัติต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์ปริมาณสารตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ โดยวิธีการทำให้ระเหยนั้นสามารถทำให้สารตัวอย่างระเหยได้หลายวิธี โดยจะขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ และวิธีการในการวิเคราะห์ ทั้งนี้จะต้องมีความรู้ความเข้าใจในกลไกของปฏิกิริยา และปัจจัยต่างๆ ของการระเหยสารในแต่ละวิธีการ ซึ่งจะช่วยให้สามารถคำนวณหาปริมาณสารที่สนใจในตัวอย่างได้อย่างถูกต้อง

การตกตะกอน

การวิเคราะห์หาปริมาณสารโดยการชั่งน้ำหนักด้วยวิธีการตกตะกอนเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์สารได้หลายชนิด โดยเลือกใช้ตัวทำให้เกิดตะกอนที่มีความจำเพาะกับสารนั้นๆ ซึ่งตัวทำให้เกิดการตกตะกอน ซึ่งมีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จำเป็นต้องมีความเข้าใจในกระบวนการ และปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การตกตะกอน รวมไปถึงสมบัติของตัวทำให้เกิดตะกอนและตะกอนที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กระบวนการเกิดตะกอน

เมื่อเติมตัวทำให้ตกตะกอนลงในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ สารตัวอย่างที่ต้องการทำการวิเคราะห์จะทำปฏิกิริยากับทำให้ตกตะกอน ผลผลิตที่ได้จะละลายในสารละลาย จนกระทั่งเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด ซึ่งผลผลิตจะไม่สามารถละลายได้อีก และจะเกิดการก่อตัวเป็นตะกอนได้ในลักษณะต่างๆ ขึ้นอยู่กับสภาวะการอิ่มตัวยิ่งยวดของสารละลาย โดยกระบวนการเกิดตะกอนทั้งหมดสามารถแสดงด้วยแผนผังดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังกระบวนการเกิดตะกอน
ที่มา : (คัดแปลงจาก ชูติมา ศรีวิบูลย์, 2544, หน้า 256)

จากแผนผังในรูปที่ 4.1 เมื่อตะกอนที่เกิดขึ้นละลายในสารละลายจนได้สารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด จะมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1.1 ช่วงการเหนี่ยวนำให้เกิดตะกอน (Introduction period) เกิดด้วยเวลาสั้นๆ ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลง ช่วงการเหนี่ยวนำให้เกิดตะกอนของตะกอนแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป เช่น ตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์จะมีช่วงการเหนี่ยวนำให้เกิดตะกอนสั้นกว่าตะกอนของแบเรียมซัลเฟต เป็นต้น

1.2 ช่วงการเกิดนิวเคลียส (Nucleation period) ไอออนของตะกอนที่ละลายจะรวมตัวกันเกิดเป็นนิวเคลียส (Nuclei) ที่มีขนาดเล็กมากไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

1.3 ช่วงการขยายขนาดตะกอน (Growth period) นิวเคลียสจะมีการขยายใหญ่ขึ้นกลายเป็นอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particles) โดยเกิดจากแคทไอออนหรือแอนไอออนรวมตัวกับนิวเคลียสไอด้วยพันธะทางเคมี การเปลี่ยนแปลงช่วงนี้อาจเป็นไปได้ 2 แบบคือ

1.3.1 เกิดกลุ่มของคอลลอยด์ (Colloidal aggregate) เกิดขึ้นจากการที่ตะกอนเกิดเป็นอนุภาคคอลลอยด์ แล้วสารละลายหมดสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด ตะกอนจะอยู่ในรูปของคอลลอยด์ และแขวนลอยอยู่ในสารละลาย

1.3.2 เกิดผลึกเล็ก (Fine crystal) เกิดขึ้นจากการที่ตะกอนเกิดเป็นอนุภาคคอลลอยด์ แล้วสารละลายยังคงสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด ในช่วงนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ 2 แบบคือ

1.3.2.1 เกิดกลุ่มผลึกเล็ก (Crystalline aggregate) จะเกิดขึ้นในกรณีที่เกิดผลึกเล็กแล้ว สารละลายหมดสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด

1.3.2.2 เกิดผลึกใหญ่ (Coarse crystal) เกิดขึ้นได้เมื่อเกิดผลึกเล็ก แล้วสารละลายยังคงสถานะอิ่มตัวยิ่งยวดต่อไป

2. คุณสมบัติของตะกอน

การวิเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอน จำเป็นต้องพิจารณาถึงสมบัติของตะกอนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่ตัดสินได้ว่าจะสามารถทำการวิเคราะห์ได้หรือไม่ ทั้งนี้สมบัติของตะกอนจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่างและตัวทำให้ตกตะกอน โดยคุณสมบัติของตะกอนที่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1. การละลายต่ำ (Low solubility) การที่จะตกตะกอนได้สมบูรณ์และไม่สูญเสียตะกอนในขั้นตอนการล้างตะกอน ตะกอนที่เกิดขึ้นควรมีการละลายต่ำ โดยปกติตะกอนที่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะต้องมีความสามารถในการละลายของตะกอนต่ำมาก ซึ่งจะทำให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียตะกอนน้อย

2. ความบริสุทธิ์สูง (High purity) ตะกอนที่เกิดขึ้นจะต้องมีความบริสุทธิ์สูงหรือไม่มีสิ่งเจือปน ในบางกรณีการตกตะกอนอาจเกิดการปนเปื้อนจากไอออนอื่นๆ ได้ ดังนั้นหากมีสิ่งปนเปื้อนที่แยกออกได้ยาก หรือแยกออกไม่ได้ ควรเลือกวิธีการตกตะกอนแบบอื่นแทน

3. ตะกอนมีขนาดใหญ่สามารถกรองได้ (Filterability) การที่ตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะสามารถกรองได้ง่ายและรวดเร็ว สำหรับตะกอนที่มีขนาดเล็กการกรองจะทำได้ยาก และใช้เวลานานในการกรอง

4. ตะกอนควรมีความเสถียรเมื่อผ่านการทำให้แห้ง ซึ่งตะกอนบางชนิดจะไม่เสถียรเมื่อทำให้แห้ง เช่น ตะกอนของ $Al(OH)_3$ เมื่อนำไปเผาจะสลายตัวเป็น Al_2O_3 เป็นต้น

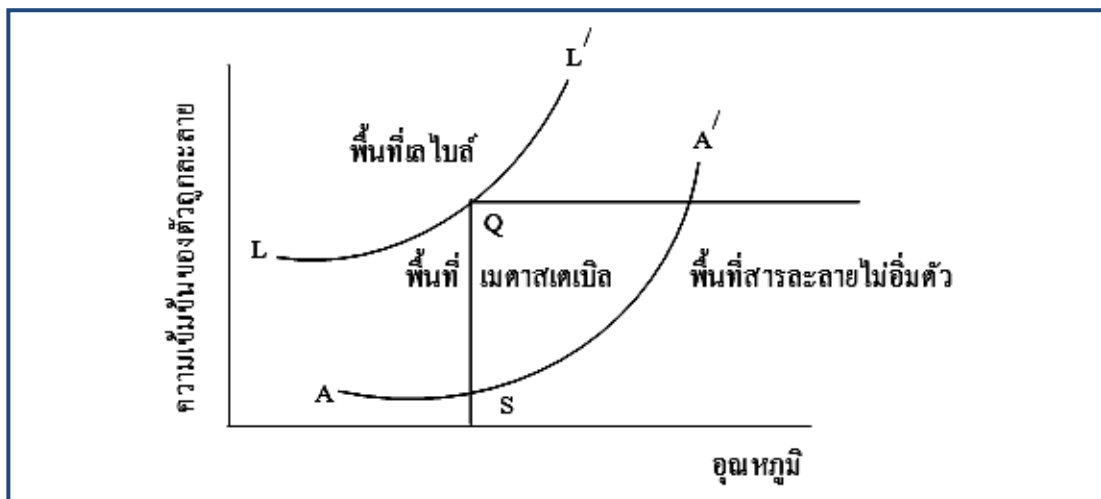
5. ตัวทำให้ตกตะกอนควรมีความจำเพาะเจาะจงต่อสารตัวอย่างที่ต้องการตกตะกอน ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดตะกอนร่วมของสารปนเปื้อน

6. ตะกอนจะต้องมีองค์ประกอบทางเคมีที่แน่นอนและไม่เกิดปฏิกิริยา (Chemical composition) หากตะกอนที่ได้มีองค์ประกอบที่ไม่แน่นอนจะต้องสามารถนำมาทำให้บริสุทธิ์และมีองค์ประกอบที่แน่นอนด้วยวิธีการง่ายๆ เช่น การเผาหรือการทำให้แห้ง

7. ตะกอนที่ได้ควรมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไม่ควรจะดูดความชื้นและไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในบรรยากาศ เพราะจะช่วยลดความผิดพลาดในการชั่ง ตะกอน

3. ผลของอุณหภูมิต่อการละลายของตะกอน

ความสัมพันธ์ระหว่างการละลายของตะกอนกับอุณหภูมิของสารละลาย สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของเส้นโค้งการละลายปกติ (Normal solubility curve) ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เส้นโค้งการละลายปกติ

ที่มา : (ดัดแปลงจาก ชูติมา ศรีวิบูลย์, 2544, หน้า 257)

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเส้นโค้งจะประกอบด้วยพื้นที่ 3 ส่วน ได้แก่

1. พื้นที่ที่สารละลายไม่อิ่มตัว (Unsaturated region) พื้นที่นี้จะไม่เกิดตะกอนเกิดขึ้น
2. พื้นที่เมตาเสเบิล (Metastable region) เป็นพื้นที่ที่สารละลายอิ่มตัวยังขาดไม่สามารถเกิดตะกอนได้เอง หากต้องการให้เกิดการตกตะกอนจะต้องเติมผลึกของสารนั้นลงไปเล็กน้อยเพื่อเป็นการล่อผลึก (Seeding)

3. พื้นที่เลไบล์ (Labile region) สารละลายสามารถเกิดตะกอนได้เองโดยไม่ต้องทำการล่อผลึก

เมื่อพิจารณาจากเทอร์โมแกรมจะเห็นว่า ถ้าเติมตัวทำให้ตกตะกอนลงในสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดตะกอน ถ้าความเข้มข้นของตะกอนอยู่ที่จุด S จะยังไม่มีเกิดการตกตะกอนเกิดขึ้น แต่ถ้าความเข้มข้นของตะกอนเพิ่มถึงจุด Q จะเริ่มมีตะกอนเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของสารละลายที่จุด Q จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ นั่นหมายความว่าถ้าสารละลายมีความเข้มข้นน้อยก็จะสามารถทำให้ตกตะกอนได้ด้วยการลดอุณหภูมิลง และจากเทอร์โมแกรมการละลายนี้ยังสามารถหาค่าองศาของการอิ่มตัวยังขาด (Degree of super saturation) ได้จากผลต่างของความเข้มข้นของสารละลายที่จุด Q กับความเข้มข้นของสารละลายที่จุด S ดังสมการ 4.1 ซึ่งค่าองศาการอิ่มตัวยังขาดนี้จะมีผลต่อขนาดของตะกอนที่จะเกิดขึ้นดังจะได้กล่าวต่อไป

$$\text{องศาของการอิ่มตัวยังขาด} = Q - S \quad (4.1)$$

4. ขนาดของตะกอน

ขนาดตะกอนกับ ค่าการอิ่มตัวยังขาดสัมพัทธ์ (Relative super saturation) จะมีความสัมพันธ์กันดังนี้คือ ขนาดของตะกอนจะแปรผกผันกับค่าการอิ่มตัวยังขาดสัมพัทธ์ของสารละลาย โดยตะกอนจะมีขนาดเล็ก เมื่อค่าการอิ่มตัวยังขาดสัมพัทธ์มีค่ามาก และตะกอนจะมีขนาดใหญ่เมื่อค่าการอิ่มตัวยังขาดสัมพัทธ์มีค่าน้อย การวิเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนต้องการตะกอนขนาดใหญ่ ดังนั้นในการตกตะกอนจึงต้องทำให้ค่าการอิ่มตัวยังขาดสัมพัทธ์มีค่าน้อย โดยค่าการอิ่มตัวยังขาดสัมพัทธ์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4.2

$$\text{ค่าการอิ่มตัวยังขาดสัมพัทธ์} = \frac{Q - S}{S} \quad (4.2)$$

Q คือ ความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของสารที่ต้องการตกตะกอน

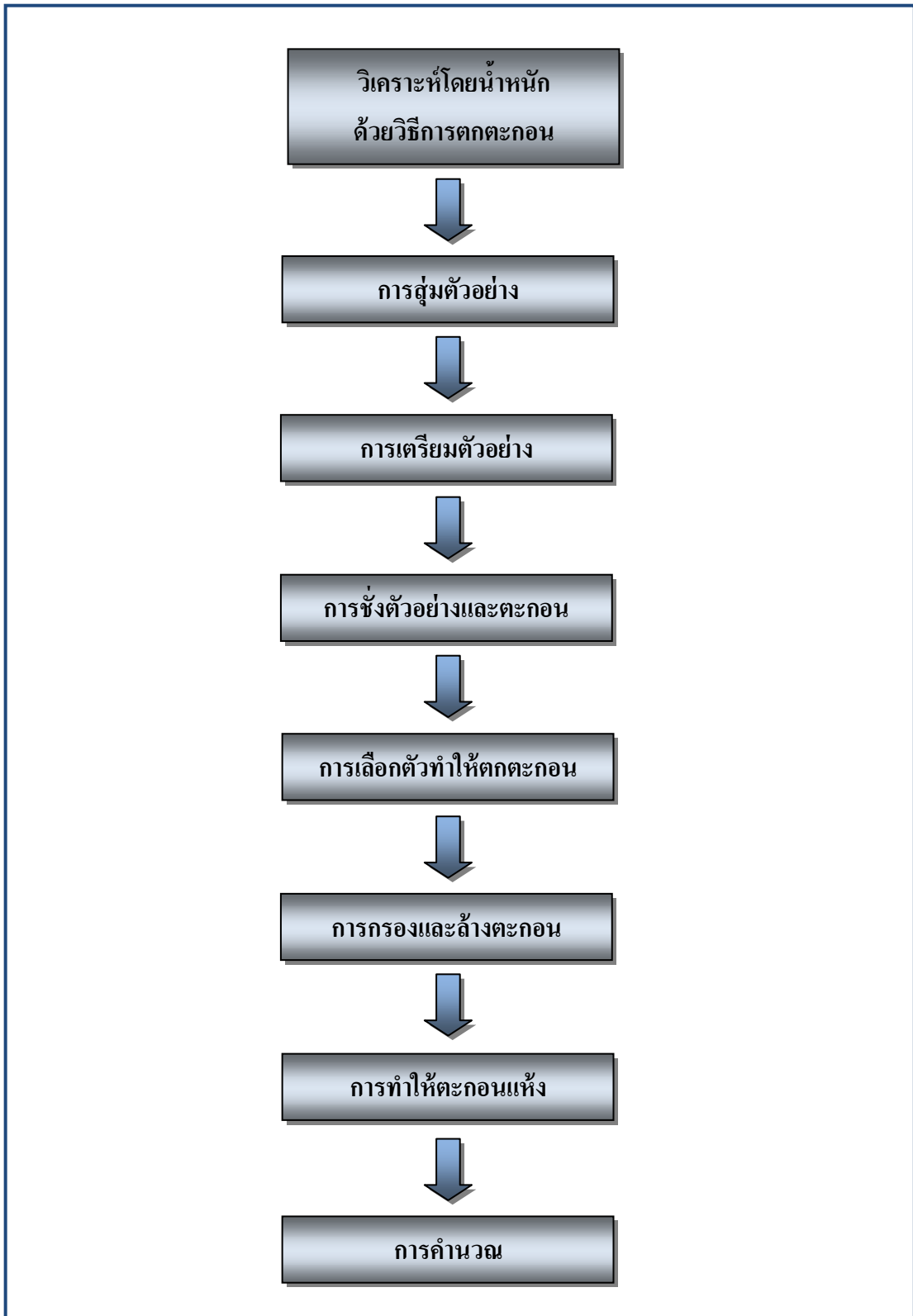
S คือ ค่าการละลายเป็นโมลาร์ของตะกอนเมื่อตะกอนละลายถึงสมดุล

เมื่อต้องการให้ค่าการอิ่มตัวยิ่งยวดสัมพัทธ์มีค่าน้อย เมื่อพิจารณาจากสมการ 4.2 สามารถทำได้ดังนี้

1. ให้ค่า Q มีค่าน้อย หรือมีองศาของการอิ่มตัวยิ่งยวดต่ำ ดังนั้นควรตกตะกอนในสารละลายเจือจางพอเหมาะและต้องค่อยๆ เติมตัวทำให้ตกตะกอนช้าๆ พร้อมทั้งคนตลอดเวลา
2. ให้ค่า S มีค่ามากขึ้น หรือเพิ่มค่าการละลายของตะกอน ซึ่งจะทำให้ค่า $Q - S$ มีค่าน้อย จึงควรตกตะกอนในสารละลายที่ร้อนและมีความเป็นกรดเล็กน้อย
3. เพื่อให้ได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ควรทำการย่อยตะกอนโดยให้กับความร้อนแก่สารละลาย โดยจะต้องควบคุมไม่ให้สารละลายเดือด โดยใช้เวลาในการย่อยตะกอนประมาณ 1-2 ชั่วโมง โดยตะกอนจะละลายแล้วรวมตัวกันใหม่อย่างเป็นระเบียบ ซึ่งเป็นผลทำให้ได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่และมีความบริสุทธิ์มากขึ้น
4. ทำการตกตะกอนในสารละลายเนื้อเดียวกัน (Precipitation from homogeneous solution; PEHS) ซึ่งเป็นเทคนิคการตกตะกอนวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาการเกิดสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดเฉพาะจุด (Local supersaturation) คือ การที่ตะกอนเกิดนิวคลีไอและกลายเป็นคอลลอยด์อย่างรวดเร็วในบริเวณที่ตัวอย่างสัมผัสกับตัวทำให้ตกตะกอน ทำให้เกิดตะกอนอย่างรวดเร็วและการรวมตัวกันของไอออนจะไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ตะกอนที่ได้มีขนาดเล็กและไม่บริสุทธิ์ สำหรับการตกตะกอนในสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกันนั้น สารประกอบในสารละลายที่ใช้ในการตกตะกอนจะค่อยๆ เกิดปฏิกิริยาแล้วทำให้เกิดไอออนที่จะใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอนอย่างช้าๆ ทำให้สารละลายอยู่ในสถานะที่มีองศาการอิ่มตัวยิ่งยวดต่ำอยู่ตลอดเวลา ทำให้ได้ตะกอนมีขนาดใหญ่และมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งสามารถทำได้โดยการตกตะกอนในสารละลายที่เจือจางมากๆ และทำการเติมตัวทำให้ตกตะกอนช้า และทำการกวนสารละลายตลอดเวลา แต่วิธีการนี้มีข้อเสียตรงที่สารละลายที่ได้มีปริมาณมากเกินไป

5. ขั้นตอนในการวิเคราะห์โดยน้ำหนักด้วยวิธีการตกตะกอน

การวิเคราะห์สารโดยหลักทั่วไปแล้วนั้น สิ่งที่ต้องวิเคราะห์จะต้องให้ความสำคัญและทำด้วยความระมัดระวังคือการดำเนินการวิเคราะห์ในแต่ละขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยหลายขั้นตอน ดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงขั้นตอนในการวิเคราะห์โดยนักด้วยวิธีการตกตะกอน

ที่มา : (ดัดแปลงจาก Fifield, F. W. & Kealey, D., 2000, p. 224)

5.1 การสุ่มตัวอย่าง การสุ่มตัวอย่างมีความสำคัญมากในการนำตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ เพราะต้องให้ได้ตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ทั้งหมด เช่น ตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างที่เกี่ยวกับอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ตัวอย่างเหล่านี้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีจำนวนมาก ผู้วิเคราะห์จะต้องรู้หลักการสุ่มตัวอย่างที่ถูกต้องและดำเนินการด้วยความระมัดระวัง

5.2 การเตรียมตัวอย่าง ผู้วิเคราะห์จะต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน จะมีวิธีในการเตรียมตัวอย่างแตกต่างกันออกไป เช่น การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนแสง ต้องเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในของสารละลายที่ใส ในบางกรณีอาจมีความจำเป็นจะต้องแยกสารปนเปื้อนที่เป็นตัวรบกวนออกก่อนเป็นต้น สำหรับการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบตกตะกอนนั้น การเตรียมตัวอย่างมักต้องใช้วิธีการบดสารตัวอย่าง แล้วนำไปละลายด้วยตัวทำละลาย ดังนั้นต้องคำนึงถึงความสะดวกของอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

5.3 การชั่งสารตัวอย่างและตะกอน การวิเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนเป็นวิธีการหาน้ำหนักของตัวอย่างในรูปของตะกอน ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องมีการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ และตะกอนที่ได้หลังการทำให้แห้ง เพื่อที่จะสามารถคำนวณหาปริมาณของสารที่ต้องการวิเคราะห์เทียบกับปริมาณของสารตัวอย่างได้

5.4 การเลือกตัวทำให้ตกตะกอน จะต้องคำนึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เช่น ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับสารที่สนใจ ความบริสุทธิ์ของตะกอนที่ได้ และไม่มีการตกตะกอนร่วม เป็นต้น โดยตัวทำให้ตกตะกอนมีทั้งที่เป็นสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ มีความจำเพาะต่อไอออนแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป

5.5 การกรองและล้างตะกอน การกรองตะกอนสามารถเลือกใช้ได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอน และวัสดุตัวกลางที่ใช้ในการกรองก็มีหลายชนิดเช่น กระดาษกรองใยแก้ว (Glass wool) ครุชิเบิล และซินเทอร์กลาส (Sintered glass) เป็นต้น การเลือกใช้วัสดุกรองชนิดใดนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนและกระบวนการวิเคราะห์ เช่น ตะกอน AgCl เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่สามารถกรองโดยใช้เบ้าช้อนได้ ส่วนตะกอน $Fe(OH)_3 \cdot xH_2O$ จะต้องใช้กระดาษชนิดไม่มีเส้นใยในการกรองตะกอน เนื่องจากต้องนำไปทำให้แห้งโดยการเผาด้วยความร้อนสูง เป็นต้น

สำหรับการล้างตะกอนจะเป็นการกำจัดหรือลดปริมาณสารปนเปื้อนที่เกิดจากการดูดซับที่ผิวของตะกอน โดยควรเลือกใช้น้ำล้างตะกอนที่มีอิเล็กโทรไลต์อยู่ด้วยเช่นสารละลายกรดไนตริก 0.01 โมล/ลิตร เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดตะกอนเกิดเปปไทเซชัน

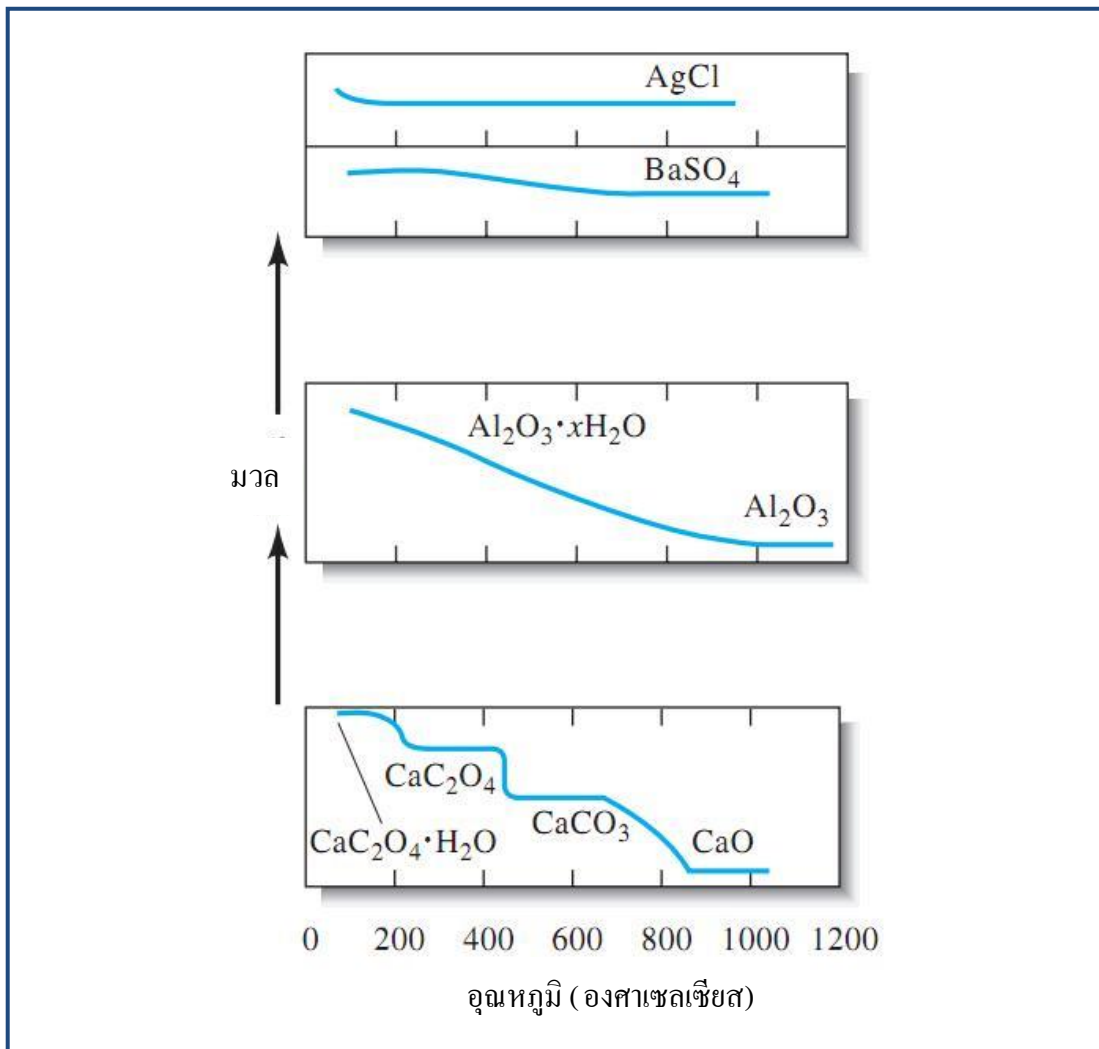
5.6 การทำให้ตะกอนแห้ง จะต้องเลือกใช้วิธีที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี โดยต้องคำนึงถึงการสูญหาย และการปนเปื้อนของตะกอน

5.6.1 การทำให้แห้งโดยการอบ ตะกอนบางชนิดสามารถทำให้แห้งด้วยวิธีการอบในเตาอบ ซึ่งปกติจะอบที่อุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียส เช่น ตะกอนของ AgCl

5.6.2 การทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ตะกอนบางชนิดสามารถทำให้แห้งได้ โดยตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมักล้างตะกอนด้วยตัวทำละลายที่ระเหยได้ง่าย เช่น ล้างตะกอนด้วยสารละลายผสมระหว่างอีเทอร์กับแอลกอฮอล์ เป็นต้น

5.6.3 การทำให้แห้งโดยการเผา การเผาตะกอนแต่ละชนิดเพื่อให้แห้งจะใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันเช่น ตะกอนของ BaSO_4 จะต้องเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ตะกอนของ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ จะต้องเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส เป็นต้น

การเผาและการทำให้ตะกอนแห้ง (Drying and ignition of precipitates) โดยการนำเอาตะกอนที่ได้มาให้ความร้อนจนได้ตะกอนที่มีส่วนประกอบที่แน่นอน การให้ความร้อนกับตะกอน เป็นการกำจัดตัวทำละลาย และสารอินทรีย์ โทไรไลต์ที่ระเหยง่ายที่รวมอยู่กับตะกอน ความร้อนที่ใช้ในการทำให้ตะกอนแห้ง หรือใช้เผาตะกอนจะขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอน การสลายตัวของตะกอนไปเป็นสารประกอบที่เสถียรเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้น้ำหนักของตะกอนมีค่าลดลง เช่น การให้ความร้อนกับตะกอน ซิลเวอร์คลอไรด์ แบเรียมซัลเฟตและอลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อให้ความร้อนแก่ตะกอน ในช่วงอุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส จะมีการสูญเสียน้ำที่เกาะอยู่ที่ตะกอน และอินทรีย์โทไรไลต์ที่ระเหยง่ายถูกกำจัดออกไป การกำจัดน้ำอย่างสมบูรณ์จะทำได้ที่อุณหภูมิประมาณ 650 องศาเซลเซียส สำหรับอลูมิเนียมออกไซด์ตะกอนจะปราศจากน้ำเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส สำหรับแคลเซียมออกซาลेटจะมีการสลายตัวได้สารประกอบหลายขั้นตอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนี้คือ เมื่ออุณหภูมิขึ้นไปถึง 135 องศาเซลเซียส ความชื้นจะถูกกำจัดออกไป ตะกอนของแคลเซียมออกซาลेटจะอยู่ในรูปของ $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 225 องศาเซลเซียส จะได้แคลเซียมออกซาลेटที่ปราศจากน้ำผลึก (CaC_2O_4) และเมื่อให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 450 องศาเซลเซียส แคลเซียมออกซาลेटจะสลายตัวไปเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ตัวอย่างผลของอุณหภูมิที่มีต่อน้ำหนักของตะกอน แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อุณหภูมิที่มีผลต่อน้ำหนักของตะกอน

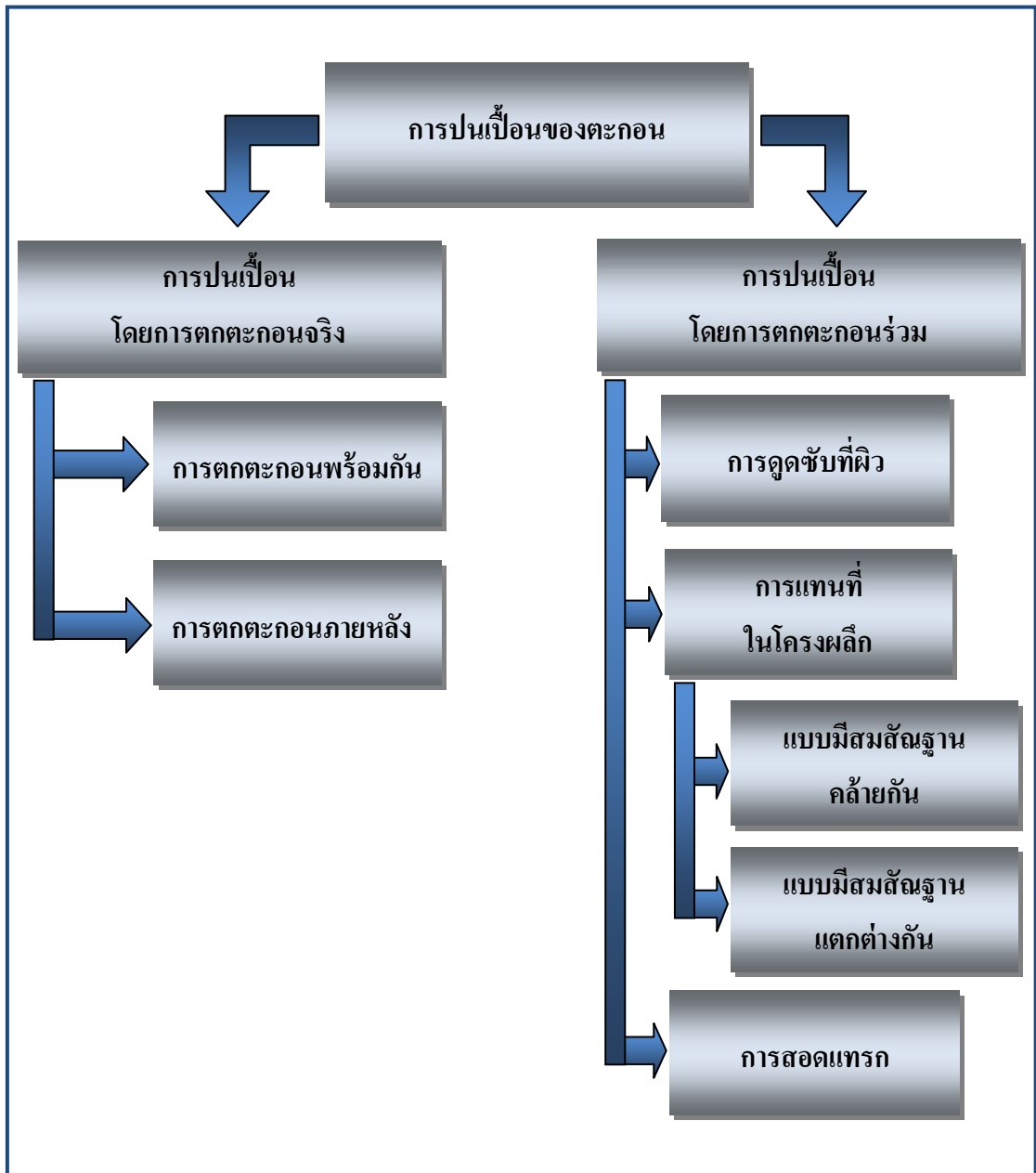
ที่มา : (ดัดแปลงจาก Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. & Crouch, S. R., 2013, p. 290)

5.7 การคำนวณผล ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะต้องนำมาคำนวณหาปริมาณของสารที่สนใจในสารตัวอย่าง และเพื่อให้ผลการทดลองมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือจะต้องทำการทดลองหลายๆ ซ้ำ แล้วรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยพร้อมทั้งค่าเบี่ยงเบน

จากขั้นตอนการวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่า การวิเคราะห์หาปริมาณสาร โดยวิธีการตกตะกอนนั้นประกอบด้วยหลายขั้นตอนซึ่งแต่ละขั้นตอนก็สามารถทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นผู้วิเคราะห์จะต้องทราบถึงกระบวนการในการเกิดตะกอน และการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นได้ในขณะที่ทำการตกตะกอน

การปนเปื้อนของตะกอน

ในการวิเคราะห์หาปริมาณ โดยวิธีการตกตะกอน อาจมีสิ่งที่ไม่ต้องการปนเปื้อนติดมากับตะกอนที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาจเกิดได้หลายลักษณะดังแผนผังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนผังการจำแนกลักษณะการปนเปื้อนของตะกอน

ที่มา : (คัดแปลงจาก ชูติมา ศรีวิบูลย์, 2544, หน้า 263-266)

1. การปนเปื้อนโดยการเกิดตะกอนจริง

การปนเปื้อนโดยการเกิดตะกอนจริง (Contamination by true precipitation) หมายถึง การปนเปื้อนที่สารอื่นในสารละลายของตัวอย่างที่สามารถตกตะกอนลงมาได้เช่นเดียวกับตะกอนของสารที่ต้องการวิเคราะห์ การตกตะกอนในลักษณะนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1.1 การตกตะกอนแบบซิมัลเทนียส (Simultaneous precipitation) เกิดขึ้นเมื่อสารปนเปื้อนนั้นมีปริมาณมากพอ โดยสารที่ต้องการวิเคราะห์และสารปนเปื้อนจะตกตะกอนลงมาพร้อมๆ กัน และไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน โดยรูปร่างของผลึกไม่จำเป็นต้องเป็นแบบเดียวกัน ในกรณีที่สารปนเปื้อนนั้นมีปริมาณน้อยจะไม่เกิดการเกิดตะกอนในลักษณะนี้

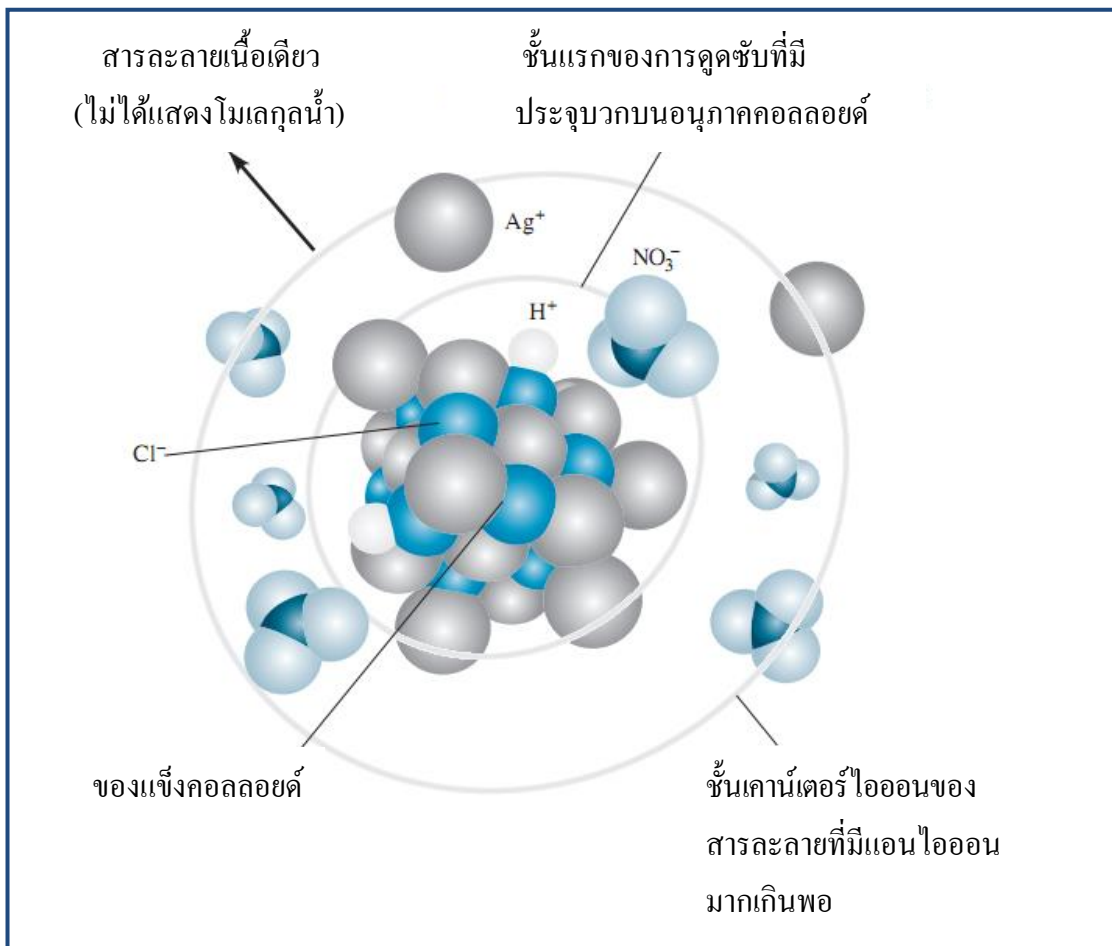
1.2 การตกตะกอนแบบโพสท์ (Post precipitation) เกิดจากการที่สารปนเปื้อนที่ละลายลงอยู่ในสารละลายสามารถเกิดตะกอนได้ โดยจะเกิดหลังจากที่สารที่สนใจส่วนใหญ่ตกตะกอนลงมาแล้ว ทำให้ความเข้มข้นของไอออนของสารที่สนใจลดลงสารปนเปื้อนจะเริ่มตกตะกอนร่วมกับตะกอนของไอออนของสารที่สนใจ ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถแยกตะกอนทั้งสองออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เมื่อนำตะกอนมาละลายและตกตะกอนใหม่ (Reprecipitation) จะทำให้ได้ตะกอนที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น หรืออาจหาสภาวะที่ทำให้ไอออนของสิ่งปนเปื้อนตกตะกอนหลังจากตกตะกอนสารที่สนใจสมบูรณ์ ซึ่งจะช่วยให้สามารถแยกตะกอนของสารสนใจออกไปได้ก่อนได้ เช่น ในกรณีที่มีไอออนทองแดง (Cu^{2+}) และไอออนสังกะสี (Zn^{2+}) ในสารละลายตัวอย่าง สามารถแยกไอออนทั้งสองได้โดยการตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ในสารละลายมีสภาวะเป็นกรดเจือจาง ซึ่งจะได้ตะกอนของทองแดงซัลไฟด์ (CuS) ออกมาก่อน สังกะสีจะตกตะกอนเป็นสังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) อย่างช้าๆ ดังนั้นเมื่อตกตะกอนทองแดงซัลไฟด์สมบูรณ์แล้ว ต้องทำการกรองตะกอนออกทันที เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของตะกอนสังกะสีซัลไฟด์

การแก้ไขการเกิดปนเปื้อนทั้ง 2 ลักษณะนี้ สามารถทำได้โดยการแยกเอาสารที่เป็นสิ่งปนเปื้อนออกจากสารละลายก่อนที่จะทำการตกตะกอน

2. การปนเปื้อนโดยการตกตะกอนร่วม

การปนเปื้อนโดยการตกตะกอนร่วม (Contamination by coprecipitation) หมายถึง สารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในสารละลายสามารถตกตะกอนร่วมกับไอออนที่สนใจได้ โดยไอออนที่ปนเปื้อนไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารปนเปื้อน การตกตะกอนร่วมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

2.1 การดูดซับที่ผิว (Surface adsorption) โดยปกติที่พื้นผิวของตะกอนที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีประจุเป็นบวก (+) หรือลบ (-) เสมอ เนื่องจากประจุของไอออนในสารละลายยึดเหนี่ยวอยู่กับผิวของตะกอน ดังนั้นถ้าตะกอนมีขนาดใหญ่ประจุบนพื้นผิวของตะกอนจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าเป็นคอลลอยด์จะมีประจุบนพื้นผิวสูง เนื่องจากตะกอนขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าตะกอนขนาดใหญ่ ประจุที่พื้นผิวตะกอนเหล่านี้จะมีผลต่อการแขวนลอยของอนุภาคคอลลอยด์ เนื่องจากการตกตะกอนจะมีการดูดซับไอออนไว้ที่ผิว โดยเฉพาะตะกอนประเภทคอลลอยด์ (Colloidal precipitation) จะเกิดการดูดซับของไอออนที่ผิวมาก ซึ่งไอออนที่ถูกดูดซับบนผิวของตะกอนจะเป็นชนิดใดนั้น จะขึ้นกับคุณสมบัติของไอออนในสารละลายและตะกอน และถ้าในสารละลายมีไอออนของสารปนเปื้อนรวมอยู่ด้วยก็จะทำให้เกิดการดูดซับสารปนเปื้อนที่ผิวของตะกอนด้วย การดูดซับไอออนที่พื้นผิวของตะกอน สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อนุภาคคอลลอยด์ของเงินคลอไรด์ ในสารละลายเงินไนเตรต

ที่มา : (ดัดแปลงจาก Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. & Crouch, S. R., 2013, p. 284)

เมื่อพิจารณาที่ผิวของตะกอน พบว่าที่ผิวในชั้นแรกของตะกอน (Primary layer) ไอออนที่ถูกดูดซับจะเป็นแลตทิซไอออน (Lattice ion) หรือคอมมอนไอออน (Common ion) ของไอออนที่มีปริมาณมากเกินไป จากรูปที่ 4.6 เมื่อทำการตกตะกอนคลอไรด์ไอออน (Cl^-) โดยใช้สารละลายเงินไนเตรต (AgNO_3) ที่มากเกินไป จะได้ตะกอนของ AgCl ส่วนที่มากเกินไปของ Ag^+ จะเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับ Cl^- ดังนั้น Ag^+ จึงถูกดูดซับไว้ในชั้นแรกของตะกอน ส่งผลให้ผิวของตะกอนมีประจุเป็นบวก และในชั้นถัดไปจะสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุลบไว้ได้และจะเรียกไอออนในชั้นนี้ว่า เคา์เตอร์ไอออน (Counter ion) ในกรณีนี้จะมีไนเตรตไอออน (NO_3^-) เป็นคา์เตอร์ไอออน โดยที่คา์เตอร์ไอออนจะทำให้ตะกอนมีประจุสมดุล และสามารถเกิดการรวมตัวจับกันเป็นก้อนได้ (Coagulation) หากในสารละลายมีไอออนอื่นๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วย ก็สามารถถูกดูดซับที่พื้นผิวของตะกอนได้ โดยจะถูกดูดซับในชั้นคา์เตอร์ไอออน ซึ่งอาจจะเป็นแคตไอออนหรือแอนไอออนก็ได้ ขึ้นอยู่กับประจุที่ผิวของตะกอนในชั้นแรก การปนเปื้อนของตกตะกอน จะเกิดขึ้นได้โดยการดูดซับไว้ในชั้นที่สอง ซึ่งการดูดซับสิ่งปนเปื้อนไว้ที่ผิวของตะกอนจะมีมากหรือน้อยหรือเป็นชนิดใดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

1. พื้นที่ผิวของตะกอน ถ้าตะกอนมีพื้นที่ผิวมากสิ่งปนเปื้อนที่ถูกดูดซับก็จะมีมาก และถ้าพื้นที่ผิวของตะกอนมีน้อย สิ่งปนเปื้อนที่ถูกดูดซับก็จะมีน้อย โดยปกติเมื่อน้ำหนักของตะกอนเท่ากันตะกอนที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าตะกอนที่มีขนาดใหญ่
2. ประจุของตะกอน ถ้าตะกอนมีประจุบวก แอนไอออนก็จะถูกดูดซับที่ผิว และถ้าตะกอนมีประจุลบ แคตไอออนก็จะถูกดูดซับที่ผิว โดยที่ตะกอนจะดูดซับไอออนที่ทำให้เกิดสารประกอบที่มีการละลายต่ำ
3. การแตกตัวของแลตทิซไอออนกับไอออนของสารปนเปื้อน ถ้ามีค่าแตกตัวมาก จะทำให้การปนเปื้อนน้อยลง ในทางตรงกันข้ามถ้ามีการแตกตัวน้อยก็จะทำให้การปนเปื้อนเกิดขึ้นมาก
4. ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวของตะกอน เมื่อความเข้มข้นของสารมีค่าน้อย ปริมาณสารที่ถูกดูดซับไว้ด้วยตะกอนก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าความเข้มข้นของสารมีค่ามากขึ้น พบว่าปริมาณสารที่ถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของตะกอนจะเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งหลังจากนั้นจะมีค่าคงที่ เนื่องจากเกิดการดูดซับไอออนจนเต็มพื้นที่ผิวของตะกอนแล้ว

2.2 การแทนที่ในโครงผลึกหรือการเกิดผลึกผสม (Inclusion or Mixed crystal formation) การปนเปื้อนแบบนี้จะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ

2.2.1 การแทนที่ใน โครงผลึกแบบมีสมสัณฐานคล้ายกัน (Isomorphic inclusion) เกิดขึ้นในกรณีที่สารปนเปื้อนมีองค์ประกอบขนาดเหมาะสม ที่จะเข้าไปแทรกใน โครงสร้างผลึกของตะกอนได้ โดยไม่ทำให้รูปร่างเกิดการบิดเบี้ยวไปจากเดิม ซึ่งการเกิดลักษณะนี้ เป็นการเกิดแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) เช่น $MgNH_4PO_4$ และ $MgKPO_4$ เป็นสารประกอบที่มี สมสัณฐานคล้ายกัน ไอออนของ K^+ และ NH_4^+ มีรัศมีไอออนใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการ ตกตะกอนแมกนีเซียมเป็น $MgNH_4PO_4$ ถ้าในสารละลายมีโปแตสเซียมไอออนรวมอยู่ด้วย โปแตสเซียมไอออนจะเข้าแทนที่แอมโมเนียมไอออนใน โมเลกุลของตะกอนได้ ดังนั้นในตะกอน จะมี $MgKPO_4$ ปะปนมาด้วย ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ได้ผลผิดพลาด เนื่องจาก $MgKPO_4$ และ $MgNH_4PO_4$ เมื่อนำไปเผาจะได้สารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน ข้อผิดพลาดในการเกิดการ แทนที่ในโครงผลึกแบบมีสมสัณฐานคล้ายกัน สามารถแก้ไขได้โดยการแยกเอาไอออนของสาร ครอบงวนออกก่อนทำการตกตะกอน หรือหลีกเลี่ยงการใช้สารละลายที่มีไอออนเหล่านี้

2.2.2 การแทนที่ในโครงผลึกแบบมีสมสัณฐานแตกต่างกัน (Non isomorphic inclusion) จะเกิดขึ้นกับตะกอนที่เป็นผลึก (Crystalline precipitation) โดยสารปนเปื้อนในกรณีนี้ จะมีสมบัติแตกต่างไปจากตะกอนและสามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันอยู่ในผลึกของตะกอนใน ลักษณะที่เป็นสารละลาย โดยมีสารปนเปื้อนเป็นตัวถูกละลายและตะกอนที่เป็นผลึก เป็นตัวทำ ละลาย การแก้ไขการปนเปื้อนลักษณะนี้สามารถทำได้โดยทำการแยกแยกไอออนของ สาร ปนเปื้อนออกก่อน แล้วจึงทำการตกตะกอนสารที่สนใจ

2.3 การสอดแทรก (Occlusion) เป็นการปนเปื้อนของตะกอนที่เกิดขึ้นเนื่องจาก ไอออนที่เป็นสารปนเปื้อนเข้าไปสอดแทรกอยู่ข้างในของผลึกในขณะที่ผลึกอยู่ในขั้นการ เจริญเติบโต เนื่องจากภายในของผลึกมีโพรงมาก ซึ่งเป็นผลจากการที่ผลึกเติบโตเร็วเกินไป หรือ อาจจะมีการตกตะกอนเร็วเกินไป ทำให้เกิดตะกอนแบบกลุ่มก้อนที่จับกลุ่มอย่างหลวมๆ ตกลงมาทำให้มีสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในสารละลายเข้าไปสอดแทรกอยู่ภายในตะกอนได้

สารที่ใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอน

สารที่ใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอน (Precipitating agent) มีความสำคัญอย่างยิ่งใน การวิเคราะห์โดยวิธีตกตะกอน ซึ่งตัวทำให้ตกตะกอนแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ ตัวทำให้ตกตะกอน ที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic precipitating agent) และตัวทำให้ตกตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic precipitating agent)

1. ตัวทำให้ตกตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์หลายตัวสามารถใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอนกับธาตุและโลหะต่างๆได้ โดยสารอนินทรีย์เหล่านี้จะรวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับโลหะทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่มีค่าการละลายต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สารอนินทรีย์บางตัวที่ใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอน

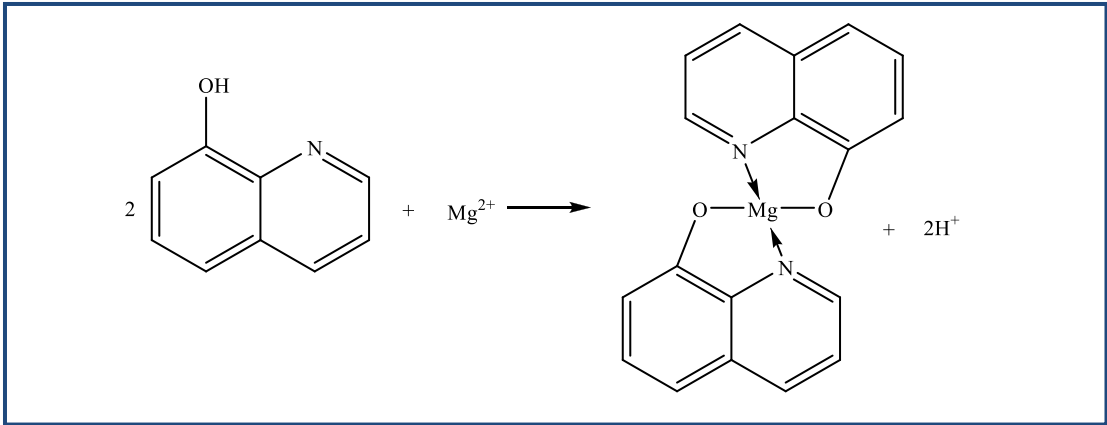
ตัวทำให้ตกตะกอน	ธาตุที่ตกตะกอน
$\text{NH}_3(aq)$	Be (BeO), Al (Al_2O_3), Sc (Sc_2O_3), Cr (Cr_2O_3), Fe (Fe_2O_3), Ga (Ga_2O_3), Zr (ZrO_2), In (In_2O_3), Sn (SnO_2), U (U_3O_8)
H_2S	Cu (CuO), Zn (ZnO or ZnSO_4), Ge (GeO_2), As (As_2O_3 or As_2O_5), Mo (MoO_3), Sn (SnO_2), Sb (Sb_2O_3), or Sb_2O_5), Bi (Bi_2S_3)
$(\text{NH}_4)_2\text{S}$	Hg (HgS), Co (Co_3O_4)
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	Mg ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$), Al (AlPO_4), Mn ($\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$), Zn ($\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$), Zr ($\text{Zr}_2\text{P}_2\text{O}_7$), Cd ($\text{Cd}_2\text{P}_2\text{O}_7$), Bi (BiPO_4)
H_2SO_4	Li , Mn , Sr , Cd , Pb , Ba
H_2PtCl_6	K (K_2PtCl_6 or Pt), Rb (Rb_2PtCl_6), Cs (Cs_2PtCl_6)
$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	Ca (CaO), Sr (SrO), Th (ThO_2)
$(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$	Cd (CdMoO_4), Pb (PbMoO_4)
HCl	Ag (AgCl), Hg (Hg_2Cl_2), Si (SiO_2)
AgNO_3	Cl (AgCl), Br (AgBr), I (AgI)
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	Bi (Bi_2O_3)
NH_4SCN	Cu [$\text{Cu}_2(\text{SCN})_2$]
NaHCO_3	Ru , Os , Ir
HNO_3	Sn (SnO_2)
H_5IO_6	Hg [$\text{Hg}_5(\text{IO}_6)_2$]
NaCl , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	F (PbClF)
BaCl_2	SO_4^{2-} (BaSO_4)
MgCl_2 , NH_4Cl	PO_4^{3-} ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$)

ที่มา : (คัดแปลงจาก Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. & Crouch, S. R., 2013, p. 294-295)

2. ตัวทำให้ตกตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์

ตัวทำให้ตกตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถเกิดสารเชิงซ้อนหรือสารประกอบคล้ายเกลือที่มีการละลายต่ำ การเกิดสารเชิงซ้อนจะเกิดจากโมเลกุลของสารอินทรีย์กับไอออนของโลหะแล้วให้สารเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างเฉพาะตัว เกิดเป็นตะกอนที่มีการละลายต่ำ มีความหนาแน่นต่ำ และตะกอนเหล่านี้สามารถทำให้แห้งได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่ใช้ในการตกตะกอนมีดังนี้

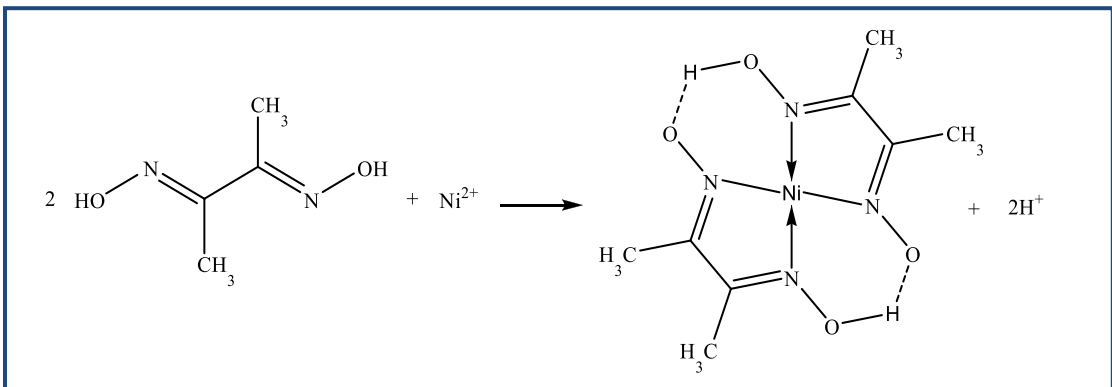
2.1 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8- hydroxyquinoline) หรือ ออกซีน(oxine) นิยมใช้ในการวิเคราะห์แมกนีเซียมและอะลูมิเนียม เมื่อเกิดสารเชิงซ้อนกับแมกนีเซียมจะได้ตะกอนมีสูตรโครงสร้างรูปที่ 4.12 ซึ่งการละลายของตะกอนชนิดนี้ขึ้นอยู่กับ pH โดยทั่วไปตะกอนจะละลายได้ดีเมื่อสารละลายเป็นกรด แต่มีตะกอนบางตัวที่ละลายได้ดีในสารละลายที่เป็นเบสมากๆ



รูปที่ 4.7 สารเชิงซ้อนของแมกนีเซียมกับ 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน

ที่มา : (คัดแปลงจาก Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. & Crouch, S. R., 2013, p. 296)

2.2 ไดเมทิลไกลออกซิม (dimethylglyoxime) ถูกนำมาใช้ในการตกตะกอนโลหะพัลเลเดียมในสารละลายที่เป็นกรด และใช้ในการตกตะกอนนิกเกิลในสารละลายเป็นเบสเล็กน้อยเท่านั้น สารละลายไดเมทิลไกลออกซิมละลายได้ยากในน้ำ จึงใช้ละลายในแอลกอฮอล์ เมื่อเกิดตะกอนกับไอออนของโลหะนิกเกิล จะได้ตะกอนสีแดงเข้มและทำให้แห้งได้ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 4.8

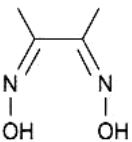
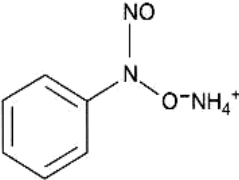
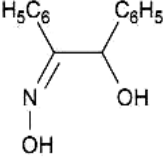
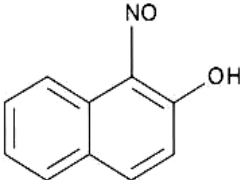
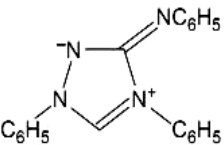


รูปที่ 4.8 สารเชิงซ้อนของนิกเกิลกับไดเมทิลไกลออกซิม

ที่มา : (คัดแปลงจาก Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. & Crouch, S. R., 2013, p. 296)

นอกจากตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วยังมีสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอนสารที่สนใจทั้งที่เป็นแคทไอออนและแอนไอออน ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอนของไอออนชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอน

ไอออน	ตัวทำให้ตกตะกอน	โครงสร้าง	ฟอร์มการเกิดตะกอน	ตะกอนที่ซึ่ง
Ni ²⁺	ไดเมทิลไกลออกซิม		Ni(C ₄ H ₇ O ₂ N ₂) ₂	Ni(C ₄ H ₇ O ₂ N ₂) ₂
Fe ³⁺	กำเฟอร์รอน		Fe(C ₆ H ₅ N ₂ O ₂) ₃	Fe ₂ O ₃
Cu ²⁺	กำพรอน		CuC ₁₄ H ₁₁ O ₂ N	CuC ₁₄ H ₁₁ O ₂ N
Co ²⁺	1-ไนโตรโซ-2-เนฟทานอล		Co(C ₁₀ H ₆ O ₂ N) ₃	Co หรือ CoSO ₄
K ⁺	โซเดียมแทคระทีนิล โบรอน	Na[B(C ₆ H ₅) ₄]	K[B(C ₆ H ₅) ₄]	K[B(C ₆ H ₅) ₄]
NO ₃ ⁻	ไนทรอน		C ₂₀ H ₁₆ N ₄ HNO ₃	C ₂₀ H ₁₆ N ₄ HNO ₃

ที่มา : (ดัดแปลงจาก Harvey, D., 2000, p. 249)

นอกจากใช้วิธีตกตะกอนแล้วยังพบว่าไอออนของโลหะหลายตัว สามารถแยกออกจากสารละลายในรูปธาตุได้ (Element form) โดยการใส่สารเคมีที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังตัวอย่างในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สารรีดิวซ์บางตัวที่ใช้รีดิวซ์สารที่จะวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก

สารรีดิวซ์	สารที่จะวิเคราะห์
แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์	Se Au
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ + ไฮดรอกซีลามีन	Te
ไฮดรอกซีลามีน	Se
กรดออกซาลิก	Au
แก๊สไฮโดรเจน	Re Ir
กรดฟอร์มิก	Pt
โซเดียมไนไตรต์	Au
สแตนนัส(II)คลอไรด์	Hg

ที่มา : (ดัดแปลงจาก Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. & Crouch, S. R., 2013, p. 295)

การทำให้ระเหย

วิธีการทำให้ระเหย (Volatilization methods) สามารถใช้วิเคราะห์สารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้โดยทั่วไปวิธีการทำให้ระเหยสามารถทำได้ทั้งวิธีตรง (Direct method) โดยทำการดูดซับไอของสารที่สนใจด้วยตัวดูดซับที่เหมาะสม แล้วจึงทำการวิเคราะห์สารที่ถูกดูดซับไว้ และวิธีอ้อม (Indirect method) ซึ่งเป็นการหาน้ำหนักที่สูญหายไป โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ หลังจากทำการระเหยสารที่สนใจออกไปแล้วทำการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างที่เหลืออยู่ ผลต่างของน้ำหนักทั้งสองค่าคือน้ำหนักของสารที่สูญหายไปโดยการระเหยเป็น นอกจากนี้แล้วยังมีวิธีการอื่นๆ ที่สามารถทำให้สารกลายเป็นไอได้ โดยสามารถแบ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทำให้ระเหยออกได้หลายวิธีดังนี้

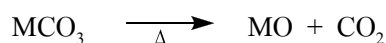
1. การทำให้สลายด้วยความร้อน

การทำให้สลายด้วยความร้อน (Thermal decomposition) สารหลายชนิด เมื่อถูกความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัว หรือเปลี่ยนสภาพ การสลายตัวและการเปลี่ยนสภาพจะเกิดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ทำการวิเคราะห์ ดังนี้

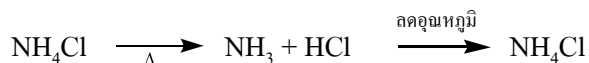
1.1 การทำให้แห้ง สารบางชนิดมีน้ำเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลในรูปสารประกอบไฮเดรท สามารถสลายตัวโดยการระเหยน้ำออกมาได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ในสารประกอบไฮเดรทบางชนิดต้องใช้อุณหภูมิสูงในการระเหยน้ำออกจากโมเลกุล เช่น ในการระเหยน้ำออกจากหินชิลิเกตต้องทำโดยการเผาที่อุณหภูมิสูงมาก และสามารถหาปริมาณของน้ำที่ระเหยไปได้จากการหาผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการเผาจนน้ำหนักคงที่ การระเหยน้ำออกจากหินชิลิเกตแสดงดังสมการ



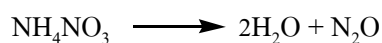
1.2 การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการให้ความร้อนแก่สารตัวอย่าง ความร้อนจะทำให้องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและออกซิเจนสลายตัวกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น เมื่อทำการเผาเกลือคาร์บอเนตของโลหะอัลคาไล แล้วจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระเหยออกไปดังสมการ



1.3 การเผาเกลือแอมโมเนียม โดยการให้ความร้อนสูงๆ กับตัวอย่างที่มีองค์ประกอบของเกลือแอมโมเนีย เกลือแอมโมเนียจะสลายตัวให้แอมโมเนียและกรด และเมื่อทำการลงแอมโมเนียและกรดที่ได้จากการสลายตัวจะรวมตัวกันกลับมาเป็นเกลือแอมโมเนียมตามเดิม ดังนี้

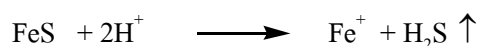


ในบางกรณีเมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานๆ จนเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงปฏิกิริยาจะไม่เกิดย้อนกลับเป็นสารตั้งต้น เช่น ที่ตัวอย่างมีเกลือแอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3) เป็นองค์ประกอบ เมื่อนำไปเผาจะเกิดการสลายตัวจนหมด เมื่อลดอุณหภูมิจจะไม่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังสมการ

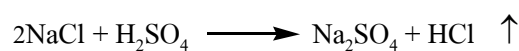


2. การแทนที่ของกรดที่ระเหยได้จากเกลือของมันเป็น

การแทนที่ด้วยกรดที่ระเหยได้จากเกลือของมัน (Displacement of volatile acid from their salts) เช่น เกลือคาร์บอเนต ซัลไฟต์และซัลไฟด์ เมื่อทำปฏิกิริยาจะเกิดแก๊สขึ้นดังสมการ

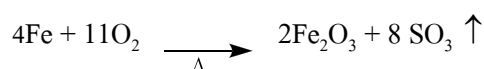


หรือเมื่อนำเกลือของคลอไรด์และไนเตรตมาทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดของแอนไอออนคลอไรด์และไนเตรตที่สามารถกลายเป็นไอได้ดังสมการ



3. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากออกซิเจนหรือสารเคมี

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากออกซิเจนในอากาศหรือสารเคมีต่างๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาแล้วได้แก๊สเกิดขึ้นเช่น ซัลไฟด์จะถูกอากาศออกซิไดส์เมื่อเผาด้วยความร้อนสูงๆ ในบรรยากาศปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ

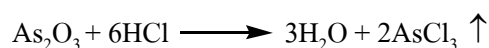
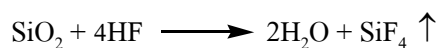


หรือสารอินทรีย์เมื่อเผาในบรรยากาศหรือออกซิเจนจะสามารถให้สารที่ระเหยได้ดังสมการ

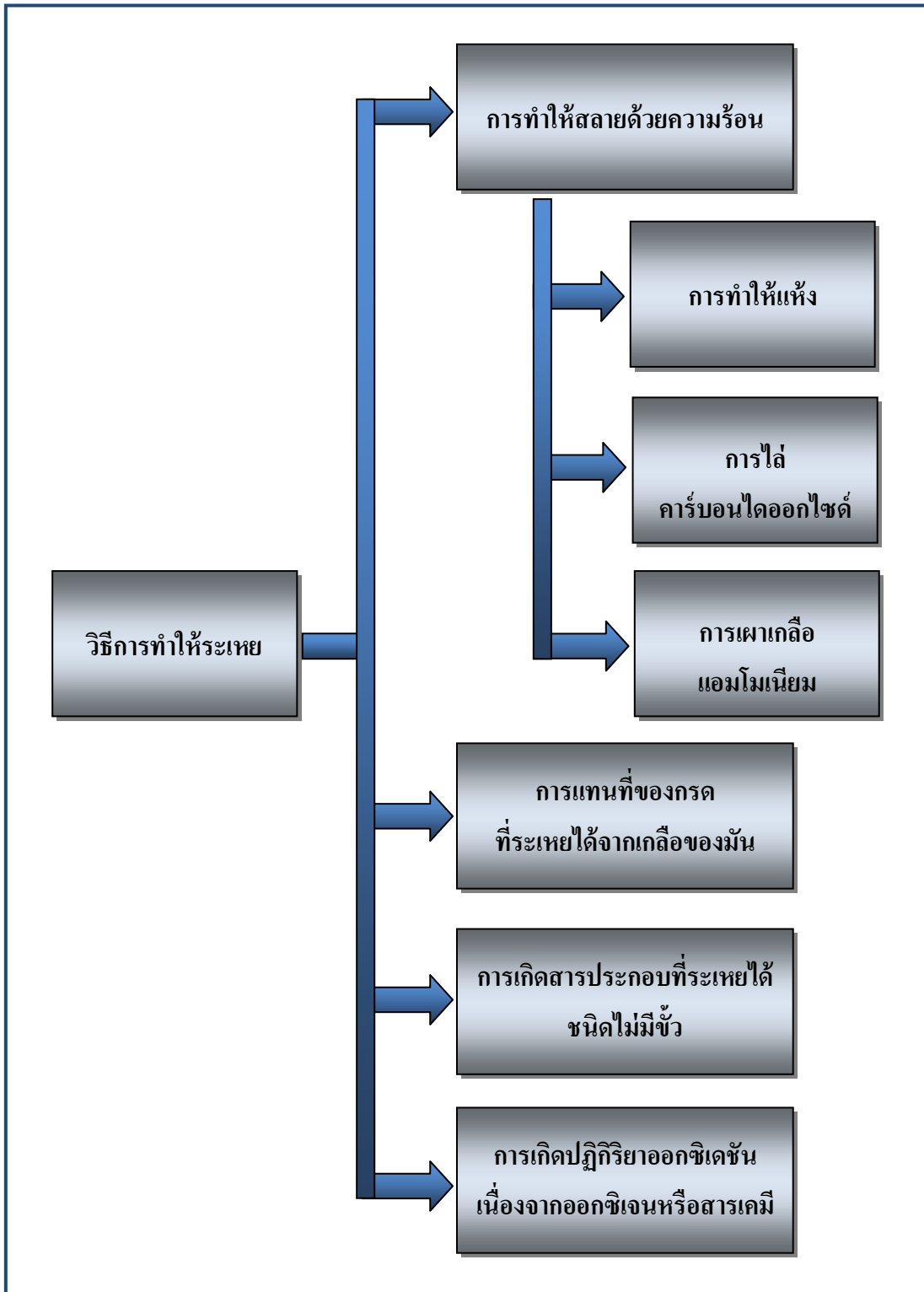


4. การเกิดสารประกอบที่ระเหยได้ชนิดไม่มีขั้ว

การเกิดสารประกอบที่ระเหยได้ชนิดไม่มีขั้ว (Formation of volatile, non polar compounds) เช่น ปฏิกิริยาของซิลิคอนเตตระฟลูออไรด์ (Silicon tetrafluoride) และอาร์เซนิก(III) คลอไรด์ (Arsenic (III) chloride) ดังสมการ



วิธีการทำให้สลายด้วยความร้อน สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนผังแสดงวิธีการทำให้ระเหย

ที่มา : (ดัดแปลงจาก ชุตติมา ศรีวิบูลย์, 2544, หน้า 281-284)

การคำนวณเกี่ยวกับการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก

การคำนวณผลจากการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก โดยนิยมนำมาเป็นปริมาณร้อยละของสารที่สนใจวิเคราะห์ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง โดยการคำนวณจะอาศัยข้อมูลจากการทดลองคือ น้ำหนักของสารตัวอย่างและน้ำหนักของสารที่สนใจที่มีอยู่ในตะกอนดังสมการ

$$\text{ร้อยละของ A} = \frac{W_A}{W_S} \times 100 \quad (4.3)$$

เมื่อ ร้อยละของ A คือ ร้อยละของน้ำหนักของสารที่ต้องการวิเคราะห์ในสารตัวอย่าง

W_A คือ น้ำหนักของสารที่ต้องการวิเคราะห์

W_S คือ น้ำหนักของสารตัวอย่าง

เนื่องจากสารที่สนใจ (A) ไม่ใช่ น้ำหนักตะกอน แต่ A จะเป็นเพียงองค์ประกอบของสารที่เป็นตะกอน ทำให้ไม่สามารถหาน้ำหนักของ A ได้โดยตรง แต่สามารถคำนวณหาได้โดยใช้คุณสมบัติทางเคมีที่มีความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของ A กับน้ำหนักของตะกอนซึ่งเรียกว่า ค่าแเกรวิเมตริกแฟกเตอร์

แเกรวิเมตริกแฟกเตอร์ หมายถึงจำนวนกรัมของสาร A ที่สามารถทำปฏิกิริยาหรือสมมูลกับตะกอนน้ำหนัก 1 กรัมที่ดังสมการ 4.4

$$\text{แเกรวิเมตริกแฟกเตอร์} = \frac{a}{b} \times \frac{\text{น้ำหนักสูตรของสารที่ต้องการวิเคราะห์}}{\text{น้ำหนักสูตรของตะกอนที่เกิด}} \quad (4.4)$$

เมื่อ a และ b คือสัมประสิทธิ์ปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Coefficient) หมายถึงตัวเลขที่ทำให้สารตัวที่ต้องการคำนวณเท่ากันทั้งเศษและส่วน

การคำนวณน้ำหนักหรือร้อยละของสารที่สนใจวิเคราะห์ สามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของตะกอนที่ได้โดยใช้ค่าแเกรวิเมตริกแฟกเตอร์ดังสมการ 4.5

$$\text{ร้อยละสารที่วิเคราะห์} = \frac{\text{น้ำหนักของตะกอน} \times \text{แเกรวิเมตริกแฟกเตอร์}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}} \times 100 \quad (4.5)$$

ตัวอย่างที่ 4.1 จงหาค่าแกรวิเมตริกแฟกเตอร์ ในการวิเคราะห์สาร Cl^- จากตะกอน AgCl กำหนดให้มวลอะตอมของ $\text{Cl} = 35.45$ และ $\text{Ag} = 107.87$

วิธีทำ นั่นคือ AgCl 143.32 กรัม จะมี $\text{Cl}^- = 35.45$ กรัม
ถ้ามี AgCl 1 กรัม จะมี $\text{Cl}^- = \frac{35.45}{143.32}$ กรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น แกรวิเมตริกแฟกเตอร์} &= \frac{\text{น้ำหนักตามสูตรของ Cl}}{\text{น้ำหนักตามสูตรของ AgCl}} \\ &= \frac{35.45}{143.32} = 0.247 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 4.2 ละลายตัวอย่าง 50 กรัม แล้วทำการตกตะกอน Cl^- ในสารละลาย ด้วยสารละลาย AgNO_3 ที่มากเกินไป หลังทำการล้างและอบแห้งตะกอนแล้วพบว่าตะกอน AgCl ที่ได้มีน้ำหนัก 10.00 กรัม จงหาว่ามี Cl อยู่กี่กรัมในสารตัวอย่าง และคิดเป็นร้อยละเท่าใดในสารตัวอย่าง

วิธีทำ จำนวนน้ำหนักตามสูตรของ $\text{Cl} =$ จำนวนน้ำหนักตามสูตรของ AgCl

$$\begin{aligned} \frac{\text{wtCl}}{\text{gfwCl}} &= \frac{\text{wtAgCl}}{\text{gfwAgCl}} \\ \text{wt Cl} &= \text{wt AgCl} \times \frac{\text{gfwCl}}{\text{gfwAgCl}} \\ &= 10.00 \times \frac{35.45}{143.32} \\ &= 2.47 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะมี $\text{Cl} = 2.98$ กรัม ในตะกอน AgCl หนัก 10.00 กรัม

คำนวณร้อยละของ Cl ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของ Cl} &= \frac{W_{\text{Cl}}}{W_{\text{S}}} \times 100 \\ \text{ร้อยละของ Cl} &= \frac{10 \text{ กรัม}}{50 \text{ กรัม}} \times 100 \\ \text{ร้อยละของ Cl} &= 20 \end{aligned}$$

สรุป

วิธีการตกตะกอนเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก สามารถทำได้ โดยการนำสารตัวอย่างมาเตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลาย แล้วเติมสารที่ใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอน ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารที่จะวิเคราะห์แล้วเมื่อเกิดเป็นตะกอน ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นนี้จะต้องสามารถกรองแยกออกได้ง่าย มีความเสถียร และสามารถชั่งน้ำหนักได้ กลไกของการเกิดตะกอนประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ 1. ขั้นการเหนี่ยวนำการเกิดตะกอน 2. ขั้นการเกิดนิวเคลียสผลึก และ 3. ขั้นการขยายขนาดตะกอน โดยกระบวนการตกตะกอน สารละลายจะต้องอยู่ในสภาวะการอิ่มตัวยิ่งยวดของของตะกอนนั้น โดยขนาดของตะกอนจะแปรผกผันกับค่าการอิ่มตัวยิ่งยวดสัมพัทธ์ของสารละลาย สิ่งสำคัญในการวิเคราะห์โดยการตกตะกอนที่ควรคำนึงถึงคือการปนเปื้อนของตะกอนด้วยสารอื่น ซึ่งสามารถเกิดได้หลายลักษณะ ได้แก่ การปนเปื้อนโดยการตกตะกอนจริง และการปนเปื้อนโดยการตกตะกอนร่วม โดยการปนเปื้อนโดยการตกตะกอนร่วมสามารถเกิดได้ 3 แบบคือ การดูดซับที่ผิวของตะกอน การแทนที่ในโครงผลึก และการสอดแทรก การแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนที่เกิดขึ้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น โดยการล้างตะกอน การย่อยตะกอน การแยกสารที่ปนเปื้อนออกก่อนการตกตะกอน เป็นต้น

การวิเคราะห์โดยน้ำหนักด้วยวิธีการระเหย จะใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่สามารถระเหยหรือกลายเป็นไอได้ง่ายด้วยความร้อน หรือเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยมีวิธีการวิเคราะห์ได้ 2 วิธีคือ (1) วิธีวิเคราะห์โดยตรง คือการชั่งน้ำหนักของสารที่สนใจที่ระเหยเป็นไอ ซึ่งวิธีการนี้จะต้องสามารถเก็บไอรวบรวมที่ระเหยออกจากตัวอย่างแล้วทำการชั่งได้ เช่น การดูดซับไอระเหยบนวัสดุดูดซับ โดยน้ำหนักของวัสดุดูดซับที่เพิ่มขึ้นจะเป็นน้ำหนักของสารที่ระเหยเป็นไอ (2) วิธีวิเคราะห์โดยทางอ้อม คือการชั่งน้ำหนักของสารตัวอย่างก่อนและหลังจากการการระเหยสารที่สนใจด้วยความร้อน หรือการเกิดปฏิกิริยาเคมี ผลต่างของน้ำหนักก่อนและหลังจะเท่ากับน้ำหนักของสารที่ระเหยไป แล้วจึงนำน้ำหนักที่ได้จากการทดลองไปคำนวณหาปริมาณสารที่สนใจในสารตัวอย่างต่อไป

คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายกลไกในแต่ละกระบวนการของการเกิดตะกอน
2. จงอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการตกตะกอนและขนาดของตะกอนที่เกิดขึ้น
3. จงอธิบายถึงขั้นตอนของการวิเคราะห์โดยวิธีการตกตะกอนมาให้เข้าใจ

4. การปนเปื้อนของตะกอนเกิดขึ้นได้อย่างไร และมีวิธีแก้ไขอย่างไร
5. การเกิดปฏิกิริยาของสารที่ใช้เป็นตัวทำให้ตกตะกอนอินทรีย์ และอนินทรีย์ กับสารที่สนใจเกิดเป็นตะกอนเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร
6. $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$ เจือปนในตัวอย่าง 1.3410 กรัม นำตัวอย่างมาตกตะกอนด้วยสารละลายแอมโมเนียในรูป $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ แล้วทำการเผาตะกอนที่อุณหภูมิ 1000°C จะได้ Al_2O_3 ซึ่งน้ำหนักตะกอนได้เท่ากับ 0.4541 กรัม จงคำนวณหาปริมาณสารต่อไปนี้
 - (6.1) ร้อยละโดยน้ำหนักของ $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$
 - (6.2) ร้อยละโดยน้ำหนักของ Al_2O_3
 - (6.3) ร้อยละโดยน้ำหนักของ Al
7. นำสารละลาย 100 มิลลิลิตร ที่มี AgNO_3 อยู่ 0.500 กรัม ผสมกับสารละลาย 100 มิลลิลิตร ที่มี K_2CrO_4 อยู่ 0.300 กรัม จะเกิดเป็นตะกอนสีแดงของ Ag_2CrO_4 จงคำนวณหาค่าต่อไปนี้
 - (7.1) จงหาค่าการละลายได้ของ Ag_2CrO_4 และน้ำหนักของตะกอน
 - (7.2) จงคำนวณหาน้ำหนักของสารที่เหลือจากเกิดปฏิกิริยาในสารละลาย
8. สารตัวอย่างหนัก 1.0097 กรัม นำไปละลายและตกตะกอนเป็นซิลเวอร์คลอไรด์ได้น้ำหนักตะกอนเท่ากับ 0.2856 กรัม ถ้าคลอไรด์ในสารละลายตัวอย่างมาจากโซเดียมคลอไรด์เพียงอย่างเดียว จงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โซเดียมในสารตัวอย่าง
9. เติม H_2S ลงในสารละลายที่มี $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ เข้มข้น 0.100 โมล/ลิตร และ $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ เข้มข้น 0.100 โมล/ลิตร จงหาว่าตะกอนซัลไฟด์ของสารใดจะตกตะกอนก่อนและจงคำนวณหาว่ามีไอออนของสารที่ตกตะกอนก่อนเหลือเท่าใด เมื่อไอออนตัวที่สองเริ่มตกตะกอน

$$\text{Pb}^{2+} + \text{S}^{2-} \longrightarrow \text{PbS} \quad K_{\text{sp}} = 7.1 \times 10^{-29}$$

$$\text{Mn}^{2+} + \text{S}^{2-} \longrightarrow \text{MnS} \quad K_{\text{sp}} = 1.1 \times 10^{-15}$$
10. วิธีการวิเคราะห์โดยน้ำหนักด้วยการทำให้ระเหยแบ่งออกได้เป็นกี่วิธี อะไรบ้าง

เอกสารอ้างอิง

- ชุติมา ศรีวิบูลย์. (2544). **เคมีวิเคราะห์พื้นฐาน**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง
- ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์. (2548). **เคมีปริมาณวิเคราะห์**. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Bakeev K. A. (2010). **Process Analytical Technology** 2nd edition. United Kingdom: Wiley & Sons, Ltd.
- Brian, M. T. (2013). **Basics of Analytical Chemistry and Chemical Equilibria**. United States : John Wiley & Sons, Inc.
- Christain, G. D. (2004). **Analytical Chemistry** 6th edition. United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Daniel, C. H. (2007). **Quantitative Chemistry Analysis** 7th edition. New York: W.H. Freeman and Company.
- Dean, J. A., & Lange, N. A. (1999). **Lange's handbook of chemistry** 15th edition. New York: McGraw-Hill.
- Fifield, F. W. & Kealey, D. (2000). **Principles and Practice of Analytical Chemistry**. United Kingdom: Blackwell Science Ltd.
- Harvey, D. (2000). **Modern Analytical Chemistry**. United States: McGraw-Hill.
- Kenkel, J. V. (2003). **Analytical Chemistry for Technicians** 3rd edition. United States: CRC Press LLC.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J. & Crouch, S.R. (2013). **Fundamentals of Analytical Chemistry** 9th edition. United States: Cengage Learning Brooks/Cole.