เทคนิคการวิเคราะห์สารปริมาณน้อย โดยเครื่อง ETAAS

จรสพร เสนะวัต

ปัจจุบันการวิเคราะห์ธาตุโดยเครื่อง Atomic absorption spectrometry (AAS) เป็นที่รู้จักและนิยมอย่างแพร่หลาย ในวงการเคมีวิเคราะห์ทั้งด้านคุณภาพวิเคราะห์ และปริมาณวิเคราะห์ เพราะสามารถวิเคราะห์ธาตุได้มากมายในตัวอย่างหลายชนิด และมีหลายเทคนิคให้เลือกใช้ตามความเหมาะสม เช่น เทคนิค Flame atomic absorption spectrometry (FAAS) วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ใช้ง่าย สะดวก ให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้อง แม่นยำ มีความไวและความเฉพาะสูง ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ไม่มากนัก แต่มีข้อจำกัดคือช่วงความเข้มข้นที่สามารถวิเคราะห์ได้นั้นอยู่ในระดับส่วนในล้านส่วน (ppm) ซึ่งจากการพัฒนาความเจริญทางเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมทำให้มีความต้องการเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์สารปริมาณน้อยมาก ๆ ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่าระดับ ppm นี้ จึงเกิดการพัฒนาเทคนิค Electrothermal atomic absorption spectrometry ขึ้น

Electrothermal atomic absorption spectrometry (ETAAS) หรือที่เรียกว่า Graphite furnace atomic absorption spectrometry เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ธาตุในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่าเทคนิค FAAS ประมาณ 100 เท่า โดยใช้หลักการส่วนใหญ่เหมือนกันคือ สารตัวอย่างจะถูกนำเข้าสู่แหล่งผลิตอะตอมอิสระ (atomizer) เพื่อผลิตอะตอมอิสระของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ อะตอมอิสระเหล่านี้จะดูดกลืนคลื่นแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (light source) ที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสม (แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้คือ hollow cathod lamp) เมื่อแสงถูกดูดกลืนโดยอะตอมอิสระแล้ว ความเข้มข้นของคลื่นแสงจะเปลี่ยนไปซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณอะตอมอิสระของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้ทราบความเข้มข้นของตัวอย่างได้เมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน

สิ่งที่สำคัญในการวิเคราะห์โดยเทคนิคนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการผลิตอะตอมอิสระ (atomization) ในส่วนของเทคนิค FAAS นั้น แหล่งผลิตอะตอมอิสระใช้ความร้อนจากเปลวไฟ ทำให้มีข้อเสียดังนี้

1. สารตัวอย่างที่ถูกดูดเข้าไปเพียง 10% เท่านั้นที่ถูกพ่นให้กลายเป็นละออง (aerosol)

2. แนวช่องแสงที่พาดผ่านเปลวไฟ (optical path) มีช่วงสั้น ทำให้คลื่นแสงไม่ได้ถูกดูดกลืนโดยอะตอมอิสระทั้งหมด

3. อุณหภูมิของเปลวไฟค่อนข้างคงที่เพียงอุณหภูมิเดียว ทำให้ไม่สามารถกำจัดสารรบกวนทั้งหมดของสารตัวอย่างได้

4. เปลวไฟอาจปล่อยคลื่นแสงมารบกวนในช่วงความยาวคลื่นที่วิเคราะห์

จากปัญหาดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตอะตอมอิสระของเทคนิค FAAS ต่ำ จึงมีการพัฒนาเทคนิค ETAAS ขึ้น โดยปรับเปลี่ยนแหล่งผลิตอะตอมอิสระเป็นเตาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (furnace atomizer) ที่ประกอบด้วย

1. ภาชนะใส่สารตัวอย่าง (graphite tube) ทำด้วยแกรไฟต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่ทนความร้อนและไฟฟ้าได้ดี มีความบริสุทธิ์สูงปราศจากโลหะปนเปื้อนมีจุดหลอมเหลวสูง มีความแข็งมากแต่สามารถดัดแปลงเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้โดยเครื่องจักรและไม่ขยายตัวเมื่อถูกความร้อน แม้กระนั้น graphite tube ยังมีข้อจำกัดคือมีความพรุนทำให้อะตอมของแก๊สซึมผ่านได้ และแกรไฟต์สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโลหะได้เป็นสารประกอบพวกคาร์ไบด์ เพื่อแก้ปัญหานี้จึงต้องฉาบผิวแกรไฟต์ด้วย pyrolytic graphite รูปร่างของ graphite tube มี 2 ลักษณะคือ

- Graphite tube ลักษณะเป็นท่อกลม มีช่องตรงกลางด้านหนึ่งเพื่อใส่ตัวอย่าง
- Graphite cup ลักษณะคล้ายถ้วย ผนังด้านบนมีช่อง 2 ช่องตรงกันเพื่อให้แสงผ่าน

นอกจากนี้ยังมี graphite tube อีกชนิดหนึ่งเป็นแผ่น solid pyrolytic graphite มีลักษณะคล้ายถาด ใช้สอดเข้าไปภายใน graphite tube เรียกว่า pyrolytic platform ใช้สำหรับการวิเคราะห์ธาตุที่กลายเป็นไอได้ง่าย

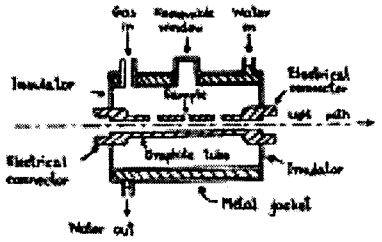
2. Electrode เป็นตัวให้ความร้อนแก่ graphite tube

3. ระบบน้ำหล่อเย็น (cooling system) ใช้ระบายความร้อนของ atomizer

4. แก๊สเฉื่อยใช้ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นอย่างรวดเร็วที่ผิวภายในและภายนอกของ electrode ซึ่งทำให้ไหม้

ได้ และยังช่วยกำจัดไอสารต่างๆ ที่แพร่ออกมา ส่วนใหญ่นิยมใช้แก๊สอาร์กอนหรือไนโตรเจน แต่แก๊สอาร์กอนสามารถปกป้อง graphite tube ได้ดีกว่าไนโตรเจน

ดังแสดงในรูป



Graphite tube จะอยู่ระหว่าง electrode 2 ข้าง ด้านบนมีช่องใส่สารตัวอย่าง ภายในมีระบบน้ำหล่อเย็น และแก๊สเฉื่อยไหลผ่าน ทั้งหมดนี้จะถูกวางอยู่ในแนวที่แสงผ่าน

หลักการทำงานของ furnace atomizer

ผ่าน voltage เข้าไปใน electrode เพื่อทำให้อุณหภูมิของ atomizer สูงขึ้น ซึ่งระดับอุณหภูมิจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ที่ตั้งโปรแกรมไว้แล้ว ระหว่างทำการวิเคราะห์ต้องผ่านแก๊สเฉื่อยตลอดเวลาและเมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์แต่ละครั้งอุณหภูมิของ atomize ต้องลดลงมาที่อุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็วด้วยระบบน้ำหล่อเย็น

ขั้นตอนการทำงานของ furnace atomizer มี 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

1. ขั้นทำให้แห้ง (drying stage) เป็นขั้นตอนที่ค่อยๆ ระเหยตัวทำละลายออกจากตัวอย่าง โดยใช้อุณหภูมิที่ใกล้จุดเดือดของตัวทำละลายนั้น เมื่อขั้นตอนนี้สมบูรณ์ ส่วนที่เหลือใน graphite tube จะมีลักษณะเป็นตะกอนข้นๆ บางๆ ซึ่งประกอบด้วยธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ปนอยู่กับของแข็งที่ละลายได้ (dissolved solid) และ matrix ของตัวอย่าง

2. ขั้นเผาเป็นเถ้า (ashing stage) เป็นขั้นตอนกำจัดโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่รบกวนธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งขั้นตอนนี้อุณหภูมิที่ใช้อาจสูงถึง 1500 ° ซ. แต่ควรระวังอย่าให้ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์สลายตัว

3. ขั้นผลิตอะตอม (atomization stage) เป็นขั้นตอนสลายโมเลกุลที่ต้องการวิเคราะห์ให้เป็นอะตอมอิสระ (free atom) ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงมากอาจถึง 3000° ซ. อะตอมอิสระที่เกิดขึ้นจะอยู่ในแนวเดียวกับแหล่งกำเนิดแสงและเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงตามวิธีของ AAS

ขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของ furnace atomizer นี้จะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ด้วยโปรแกรมที่ผู้วิเคราะห์ตั้งไว้ ถึงแม้ว่าขั้นตอนการทำงานของ furnace atomizer จะมี 3 ขั้นตอน แต่ในทางปฏิบัติผู้วิเคราะห์สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนย่อยๆ ได้ประมาณ 8-20 ขั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้ดีขึ้นเรียกว่า multistep programming ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

เทคนิคการปรับเครื่อง (optimization)

1. เปิด hollow cathode lamp สำหรับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 10-15 นาที

2. ใส่ graphite tube ใน atomizer โดยให้ช่องใส่ตัวอย่างอยู่ด้านบน

3. ปรับตำแหน่งของ graphite tube ให้อยู่ในแนวเดียวกับช่องแสงผ่านและกับ detector โดยปฏิบัติตามคำแนะนำการใช้เครื่องมือแต่ละเครื่อง

4. ถ้ามี autosampler ต้องปรับปลายของ injector ให้ตรงกับช่องใส่ตัวอย่างของ graphite tube และให้ปลายของ injector อยู่ห่างจากก้นของ graphite tube ประมาณ 1.0 มม. (เพื่อให้มี reproducibility ที่ดี จำเป็นต้องมี autosampler)

เทคนิคการตั้งค่า parameter

Parameter ส่วนใหญ่ใช้ค่าเดียวกับค่าที่ใช้สำหรับเทคนิค FAAS นอกจากส่วนที่เกี่ยวข้องกับการ atomization ดังนี้

1. อุณหภูมิสำหรับขั้นทำให้แห้ง (drying temperature) ควรใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเดือด (boiling point) ของตัวทำละลาย (solvent) เล็กน้อยและสูงพอที่ทำให้ตัวทำละลายระเหยได้เร็วที่สุดเพื่อป้องกันการไหลของตัวอย่างไปตาม graphite tube แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปตัวทำละลายอาจกระเด็นทำให้สูญเสียตัวอย่างไป

กรณีที่ใช้ตัวทำละลายมากกว่า 2

STEP NO.	TEMPERATURE(°C)	TIME(SEC)	GAS FLOW(L/MIN)	GAS TYPE	READ COMMAND
1	85	5	3.0	NORMAL	NO
2	95	40	3.0	NORMAL	NO
3	120	10	3.0	NORMAL	NO
4	1000	5	3.0	NORMAL	NO
5	1000	1	3.0	NORMAL	NO
6	1000	2	3.0	NORMAL	NO
7	2600	2.3	0	NORMAL	YES
8	2600	2	0	NORMAL	YES
9	2600	2	3.0	NORMAL	NO

ชนิดขึ้นไป ขั้นตอนนี้ควรมีอุณหภูมิหลายช่วงขึ้นกับจำนวนของตัวทำละลายที่ใช้ โดยตั้งอุณหภูมิต่ำสุดก่อนเพื่อระเหยตัวทำละลายทีละชนิด

2. เวลาที่ใช้ในขั้นทำให้แห้ง (drying time) ต้องนานพอที่จะทำให้ตัวทำละลายระเหยหมด มิฉะนั้นตัวทำละลายอาจกระเด็นได้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในขั้นเผาเป็นเถ้า

3. อุณหภูมิสำหรับขั้นเผาเป็นเถ้า (ashing temperature) ควรสูงพอที่จะกำจัดสารรบกวนธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ (matrix) ได้หมด มิฉะนั้น matrix อาจระเหยกลายเป็นไอหรือแตกตัวเป็นอะตอมแล้วดูดกลืนคลื่นแสงทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (background absorption) ได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึงขั้นผลิตอะตอม วิธีหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกำจัด matrix ทำได้โดยทำ atomization หลาย ๆ ครั้ง โดยเปลี่ยนค่า ashing temperature เพื่อเปรียบเทียบสัญญาณของการดูดกลืนคลื่นแสง (absorption signal) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- เมื่อเพิ่ม ashing temperature ให้สูงขึ้นจะทำให้ค่า absorption signal สูงขึ้นด้วยเนื่องจากการรบกวนของ matrix จะน้อยลงด้วย

- แต่ถ้าเพิ่ม ashing temperature สูงเกินไปจนถึงอุณหภูมิที่เกิดการแตกตัวเป็นอะตอมจะสูญเสียอะตอมที่ต้องการวิเคราะห์ในขั้นเผาเป็นเถ้า ทำให้ค่า absorption signal ลดลงอย่างรวดเร็ว

- ดังนั้น ashing temperature ที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิที่ทำ atomization แล้วให้ค่า absorption signal สูงสุด

นอกจากนี้จะใช้ ashing temperature หลายค่าก็ได้ขึ้นกับความซับซ้อนของตัวอย่าง

4. เวลาที่ใช้ในขั้นเผาเป็นเถ้า (ashing time) ควรนานพอที่จะกำจัด matrix หมด

5. อุณหภูมิสำหรับการผลิตอะตอม (atomization temperature) ที่เหมาะสมควรเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถให้ absorption signal สูงสุด ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้จำนวนอะตอมที่เกิดการ vaporization ก่อนการ atomization มีมากขึ้น และทำให้อายุการใช้งานของ graphite tube สั้นลง

6. เวลาที่ใช้ในการผลิตอะตอม (atomization time) ควรเป็นเวลาน้อยที่สุดที่อะตอมยังมีอยู่ใน graphite tube โดยสังเกตจาก absorption signal ซึ่งลดต่ำลงจนเท่า baseline (absorption signal ของเทคนิค ETAAS มีลักษณะเป็น peak เนื่องจากเมื่อเริ่มเกิด atomization ค่า absorption signal จะค่อย ๆ เพิ่มทีละน้อยตามปริมาณอะตอมอิสระที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วค่อย ๆ ลดลงจนไม่มีอะตอมอิสระเหลืออยู่ใน graphite tube เลย)

7. ควรให้แก๊สเฉื่อยไหลผ่านในขั้นทำให้แห้งและขั้นเผาเป็นเถ้า เนื่องจากการผ่านแก๊สเฉื่อยลงใน graphite tube ช่วยยืดอายุการใช้งานของ graphite tube และกำจัดไอของสารหรือ matrix ออกจาก graphite tube แต่ควรหยุดใช้ในขั้นผลิตอะตอมเพราะการที่อะตอมของธาตุที่วิเคราะห์อยู่ในช่องแสงผ่าน นานที่สุดจะทำให้ได้ค่า absorption signal สูงด้วย และหลังจากการ atomization เสร็จสิ้นลงควรให้แก๊สไหลผ่านอีกเพื่อปกป้อง graphite tube ในขณะที่ atomizer ลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิห้องอย่างรวดเร็ว

ข้อแนะนำที่ควรปฏิบัติ

1. ขวดเก็บสารละลายมาตรฐานและสารตัวอย่าง (container) ควรใช้ขวดโพลิเอทิลีนไม่ควรใช้ขวดแก้วเนื่องจากโลหะจะเกาะติดที่ผิวแก้วได้

2. การล้างภาชนะใส่สารตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ (vessel) ควรแช่ใน 20% v/v C_6H_{12} ประมาณ 2 วัน แล้วแช่ต่อด้วย 20% v/v HNO_3 ประมาณ 2 วัน นำขึ้นมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด แล้วเป่าให้แห้งเก็บในที่สะอาดปราศจากฝุ่น

3. ถ้าใช้ autosampler ควรทำความสะอาดปลาย capillary ของ injector โดยแช่ใน diluteHNO_3 ประมาณ 1 วัน ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด ทำให้แห้งและเก็บในที่ปราศจากฝุ่น

4. ขวดใส่น้ำใน Autosampler ที่ใช้ระหว่างการวิเคราะห์ควรล้างด้วย 0.01% v/vHNO_3

5. น้ำที่ใช้ควรสะอาดปราศจากการปนเปื้อนจากแก๊สและสารต่าง ๆ ซึ่งตาม ASTM ให้ใช้ reagent water type 1 ซึ่งเตรียมโดยผ่านน้ำกลั่นที่มีค่าสภาพนำ (conductivity) ไม่เกิน 20 μmho/cm. ที่ 25° ซ. ลงใน column ที่ pack ด้วย ion-exchange resin และ membrane filter ขนาด 0.2 μm ได้น้ำ DI. ที่มีค่าสภาพนำไม่เกิน 0.06 μmho/cm.

6. ควรใช้สารเคมีเกรดดีที่สุดและบอกค่าสารปนเปื้อน (contaminate) เพื่อตรวจสอบได้ก่อนการวิเคราะห์

7. ควรใส่กรดอนินทรีย์ เช่น HCL, HNO_3 ในสารละลายมาตรฐานให้มีค่า pH$\leq$ 2 ซึ่งทำให้สามารถเก็บสารละลายมาตรฐานได้นานเป็นเดือน แต่สำหรับ working standard ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้งที่วิเคราะห์ เพื่อป้องกันการเกาะติดผนังขวดของธาตุหรือการละลายของสารต่าง ๆ จากผนังขวดออกมาในสารละลาย

8. ควรเตรียมสารตัวอย่างให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ถ้ามีตะกอนจะทำให้การใส่ตัวอย่างลงใน graphite tube (injection) ไม่ดี

ปัญหาและแนวทางแก้ปัญหา

1. ปัญหาจากสมบัติทางกายภาพของสารละลาย มีผลต่อการวิเคราะห์ด้วย FAAS อย่างมาก แต่มีผลต่อ ETAAS เพียงเล็กน้อย เช่น

- การไหลของตัวอย่างใน graphite tube ซึ่งแก้ไขโดยการตั้ง drying temperature ที่เหมาะสม

- อัตราการระเหยของอะตอมอิสระหลังจากเกิดการ atomization ขึ้นกับตำแหน่งของอะตอมภายใน graphite tube ซึ่งมีผลต่อ absorption signal

กล่าวคืออะตอมอิสระที่อยู่ด้านในหรือปลาย tube จะระเหยช้ากว่าอะตอมอิสระที่อยู่ตรงกลาง ช่วงเวลาดูดกลืนคลื่นแสงจึงต่างกัน สามารถแก้ไขได้โดยหยุดผ่านแก๊สเฉื่อยลงใน graphite tube เพื่อให้อะตอมอิสระอยู่ภายใน tube นานที่สุด

2. ปัญหาจากสมบัติทางเคมี เกิดจากสารประกอบบางตัวที่มีอยู่ในตัวอย่างทำปฏิกิริยาเคมีกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดไป เช่น

- ธาตุบางชนิดเกิดปฏิกิริยาเคมีกับคลอไรด์ได้สารประกอบโคเวเลนต์ที่เสถียรมาก (stable) และระเหยได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำก่อนการเกิด atomization เรียกว่า co-evaporation

- ธาตุแต่ละธาตุสามารถเกิดสารประกอบได้หลายชนิด ซึ่งมี atomization temperature ที่เหมาะสมต่างกัน ทำให้เกิด absorption signal หลายค่า

- ธาตุบางธาตุเกิดปฏิกิริยาเคมีได้สารประกอบพวกคาร์ไบที่เสถียรมาก ซึ่งไม่สลายตัวแม้ใช้อุณหภูมิสูง

จากสาเหตุดังกล่าวจะเห็นว่าสารรบกวนที่อยู่ในตัวอย่างทำให้สูญเสียอะตอมอิสระซึ่งมีผลต่อการวิเคราะห์ เรียกสารเหล่านี้ว่า matrix สามารถแก้ไขโดยเติมสารเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ให้สารประกอบที่มีความคงตัวสูง ไม่ระเหยง่าย ทำให้สามารถเพิ่ม ashing temperature ให้สูงขึ้นเพื่อกำจัด matrix ได้อย่างสมบูรณ์ หรือเติมสารเคมีที่ทำให้ matrix ระเหยได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิต่ำก่อนการเกิด atomization เรียกสารนี้ว่า matrix modifier หรือ chemical modifier การเลือกใช้ matrix modifier ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์และ matrix ในสารตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์ธาตุตะกั่วใช้ H_3PO_4 หรือ $NH_4H_2PO_4$ (5000 μg/mL) หรือ EDTA, citrate, oxalate (0.5%-1%v/v) หรือ palladium in reducing agent (ascobic acid or citric acid) เป็นต้น

นอกจากนี้อาจใช้ pyrolytic platform เพื่อชะลอการระเหยของอะตอมให้ช้าลงเพราะ platform มีอุณหภูมิต่ำกว่า graphite tube เนื่องจากผิวของ platform ไม่สัมผัสผนัง graphite tube โดยตรง เมื่อใช้ร่วมกับ matrix modifier จะทำให้ผลการวิเคราะห์ดีขึ้น

3. Background absorption หรือ non-specific absorption เกิดจากโมเลกุลของสารต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV ได้ ทำให้ค่า absorption signal ผิดพลาดไป หรือทำให้เกิดการกระจายแสง (scattering) ที่มาจากแหล่งกำเนิดแสง แก้ไขโดยใช้ background correction ซึ่งมีหลายวิธีคือ

- ใช้ continuum source ที่นิยมคือ deuterium lamp

- ใช้ zeeman background correction

- ใช้ smith-hieftje background correction

จะเห็นว่าการผลิตอะตอมอิสระของ graphite furnace atomizer ตามเทคนิค ETAAS นี้ ให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำ มีความไวสูงมาก เนื่องจากวิธีนี้สามารถแยกสารเจือปนออกจากสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้อย่างสมบูรณ์การวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยมาก ๆ มีโอกาสผิดพลาดสูง เนื่องจากการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม เครื่องมืออุปกรณ์ สารเคมีและวิธีการที่ใช้ ดังนั้นผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีประสบการณ์ ความชำนาญ และมีความระมัดระวังสูง นอกจากนี้ยังอาจสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย การเลือกใช้วิธีวิเคราะห์ใด ๆ จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในทุก ๆ ด้าน

เอกสารอ้างอิง

พิมล เรียนวัฒนา. สเปคโตรสโคปีกับการประยุกต์ทางเคมี. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภาควิชาเคมี, 2521.

แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสบ. หลักและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ ชวนพิมพ์, 2534.

American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM Standards. section 11 volume 11.01 Philadelphia, PA : the society, 1990.

Bennett, PA. and Rothery, E. Introducing atomic absorption analysis. Melbourne : Varian Techtron Pty. Ltd., 1983.

Rothery, E. Analytical methods for graphite tube atomizers. Melbourne : Varian Techtron Pty. Ltd., 1988.

Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. Washington, DC : American Public Health Association, 1992.