หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

หลักการของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันนั้น อาศัยการทำให้เกิดเรดิโอไอโซโทปขึ้น โดยนำตัวอย่างไปอาบรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน การเกิดเรดิโอไอโซโทปดังกล่าวเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุในตัวอย่าง ซึ่งอาจจะเกิดจากปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา(n, γ) ปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน (n,p) ปฏิกิริยานิวตรอน-นิวตรอน (n,2n) หรือปฏิกิริยาอื่น ๆ โดยเฉพาะปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา ของเทอร์มัลนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุ นับว่ามีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ธาตุโดยวิธีนี้ เรดิโอ-ไอโซโทปที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ ค่าครึ่งชีวิต ชนิดของรังสีและพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา อันจะทำให้ทราบได้ว่า ตัวอย่างประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ซึ่งนับว่าเป็นการวิเคราะห์ทางด้านคุณภาพ (qualitative analysis) ส่วนการวิเคราะห์ทางด้านปริมาณ (quantitative analysis) นั้น กระทำได้โดยการวัดและคำนวณค่าความแรงรังสีที่พลังงานต่าง ๆ ของเรดิโอไอโซโทปของธาตุที่สนใจในตัวอย่างเปรียบเทียบกับในสารมาตรฐานซึ่งทราบปริมาณของธาตุที่สนใจแน่นอนแล้ว

2.1 เทคนิคการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

ในปัจจุบันเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันมีบทบาทสำคัญมากในด้านการวิเคราะห์ธาตุ เช่น การวิเคราะห์แร่ การวิเคราะห์ส่วนผสมของตัวอย่างต่าง ๆ ตลอดจนการวิเคราะห์ธาตุพิษปริมาณน้อยในการศึกษาวิจัยสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เป็นต้น เพราะนอกจากเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันจะมีความไวสูงแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง แม่นยำและรวดเร็ว ประกอบกับสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งแบบ

ทำลายตัวอย่าง (destructive analysis) และแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) โดยทั่วไปเทคนิคการวิเคราะห์นี้อาจแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

2.1.1 <u>การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันที่ใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสีหรือแบบไม่ทำลายตัวอย่าง</u>

เป็นวิธีวิเคราะห์ที่กระทำโดยการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกันและปล่อยทิ้งไว้ในช่วงเวลาที่เหมาะสม จากนั้นจึงทำการวัดความแรงรังสีของเรดิโอไอโซโทปของธาตุที่จะวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง วิธีการนี้จะไม่มีการสูญเสียสารตัวอย่างทั้งรูปร่างและลักษณะ

2.1.2 <u>การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันที่อาศัยกรรมวิธีทางเคมีประกอบหรือแบบทำลายตัวอย่าง</u>

เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ต้องใช้ขบวนการทางเคมีเข้าช่วยซึ่งแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

2.1.2.1 เทคนิคประกอบทางเคมีก่อนการอาบรังสีนิวตรอน (Pre-irradiation technique) ซึ่งได้แก่ การนำสารตัวอย่างมาผ่านขบวนการแยกธาตุที่จะวิเคราะห์ออกมาก่อนการอาบรังสีนิวตรอน วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมเพราะอาจจะมีการเปรอะเปื้อนเกิดขึ้น แต่จะนำมาใช้ต่อเมื่อมีความจำเป็นเท่านั้น เช่น ธาตุที่จะวิเคราะห์ให้เรดิโอไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตสั้นมากและมีการรบกวนอย่างมากจากเรดิโอไอโซโทปอื่นที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่าง จึงจำเป็นต้องแยกธาตุที่จะรบกวนได้นั้นออกไปก่อนที่จะนำสารตัวอย่างไปอาบรังสี หรือการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำซึ่งจำเป็นต้องนำมาผ่านขั้นตอนบางอย่างเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของธาตุที่จะวิเคราะห์ (preconcentration) ก่อนนำไปอาบรังสี เป็นต้น

2.1.2.2 เทคนิคประกอบทางเคมีหลังการอาบรังสีนิวตรอน (Post-irradiation technique) ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ที่ต้องใช้กรรมวิธีทางเคมีเข้าช่วยเพื่อแยกเรดิโอไอโซโทปที่ต้องการวิเคราะห์ออกจากสารตัวอย่าง

ภายหลังการอาบรังสีนิวตรอนแล้ว เพื่อให้ปราศจากการรบกวนของเรดิโอไอโซโทปตัวอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในสารตัวอย่างด้วย แล้วจึงทำการวัดความแรงรังสีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

วิธีการนี้จะทำให้สูญเสียรูปและลักษณะของสารตัวอย่างไป สำหรับกรรมวิธีทางเคมีซึ่งนำมาใช้ในการแยกธาตุหรือเรดิโอไอโซโทปของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์มีหลายวิธี อาทิเช่น การทำละลาย การสกัด การกลั่น การตกตะกอน และเทคนิคการแลกเปลี่ยนอิออน เป็นต้น

2.2 องค์ประกอบสำคัญของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (67-70)

2.2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน (neutron source)

ต้นกำเนิดนิวตรอนแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.2.1.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนที่เป็นสารกัมมันตรังสี (radioactive neutron source) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตขึ้นจากการผสมธาตุกัมมันตรังสีเข้ากับธาตุซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวของอนุภาคนิวตรอนตัวสุดท้ายต่ำดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเช่น เรเดียม-226 + เบอริลเลียม (^{226}Ra+Be) เรเดียม-226 เป็นเรดิโอไอโซโทปสลายตัวให้รังสีอัลฟา ซึ่งเมื่อรังสีอัลฟาวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของเบอริลเลียมจะทำให้นิวตรอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียสของเบอริลเลียมหลุดออกมา นั่นคือ ได้นิวตรอนออกมาจากปฏิกิริยา $^{9}_{4}Be(\alpha,n)^{12}_{6}C$ ต้นกำเนิดนิวตรอนที่อาศัยปฏิกิริยาแกมมา-นิวตรอน (γ,n) ของรังสีแกมมาพลังงานสูง ได้แก่ พลวง-124 + เบอริลเลียม (^{124}Sb+Be) นอกจากนี้ยังมีต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดที่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้เอง (self fission) ซึ่งได้แก่ แคลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) ให้นิวตรอนออกมาประมาณ 9×10^{9} นิวตรอนต่อวินาทีต่อ 1 คูรี หรือประมาณ 5×10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัม

2.2.1.2 เครื่องกำเนิดนิวตรอน (neutron generator) เป็นเครื่องผลิตรังสีนิวตรอน จากการเร่งอนุภาคที่มีประจุวิ่งเข้าชนเป้าโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) ทั้งนี้เพราะจะได้อนุภาคนิวตรอนมากขึ้น

ตารางที่ 2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทสารกัมมันตรังสี

ต้นกำเนิด	ครึ่งชีวิต	ปริมาณนิวตรอนที่ให้ (นิวตรอนต่อวินาที ต่อคูรี)	อัตราการปลดปล่อยรังสีแกมมาที่ระยะหาง 1 เมตร จากต้นกำเนิด (มิลลิเรินเกนต่อชั่วโมงต่อคูรี)
$^{226}Ra+Be$	1620 ปี	13×10^6	850
$^{239}Pu+Be$	24400 ปี	9×10^6	4
$^{241}Am+Be$	458 ปี	2.5×10^6	2.5
$^{210}Po+Be$	138 วัน	2.5×10^6	<0.3
$^{124}Sb+Be$	60 วัน	$\sim 0.2 \times 10^6$	1000
^{252}Cf	2.6 ปี	$\sim 9 \times 10^9$	เพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากการเกิดของ γ-emitting daughters

เมื่ออนุภาคมีประจุมีพลังงานสูงขึ้น ปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาระหว่างดิวเทอรอน (deuteron; ^2_1H หรือ ^2_1D) กับเป้าที่เป็นดิวทีเรียม (deuterium; ^2_1D) ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยา " DD reaction" และปฏิกิริยาระหว่างดิวเทอรอนกับเป้าที่เป็นตริเตียม (tritium; ^3_1H หรือ ^3_1T) ซึ่งเรียกว่า "DT reaction"

$$^2_1D + {}^2_1D \longrightarrow {}^3_2He + {}^1_0n + 3.28 \text{ MeV}$$

$$^3_1T + {}^2_1D \longrightarrow {}^4_2He + {}^1_0n + 17.6 \text{ MeV}$$

ปฏิกิริยา DD และ DT นิวตรอนที่เกิดขึ้น มีพลังงานเท่ากับ 2.46 และ 14.08 MeV ตามลำดับ

ในปัจจุบัน เครื่องกำเนิดนิวตรอนสามารถให้นิวตรอนออกมาในช่วง 10^9-10^{12} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

2.2.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้นิวตรอนออกมามากที่สุด ความเข้มของนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูอยู่ในช่วง 10^8-10^{14} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที นิวตรอนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของเชื้อเพลิงปรมาณูกับอนุภาคนิวตรอน ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด

2.2.2 <u>พลังงานของนิวตรอน</u>

รังสีนิวตรอนสามารถแบ่งออกตามค่าพลังงานได้ดังต่อไปนี้

2.2.2.1 เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ได้แก่ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.3 eV ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลาง การกระจายพลังงานของเทอร์มัลนิวตรอนจะเป็นไปตามการกระจายแบบแมกซ์เวลล์ (the Maxwellian distribution) ดังนี้

$$N(E) = \frac{2\pi N}{(\pi KT)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT} \quad \text{..... (2.1)}$$

เมื่อ $N(E)$ = จำนวนนิวตรอนที่พลังงานใด ๆ ต่อหน่วยปริมาตร

N = จำนวนนิวตรอนรวมทั้งหมดต่อหน่วยปริมาตร

k = ค่า Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/°K

T = อุณหภูมิของตัวกลางเป็นองศาเคลวิน (°K)

2.2.2.2 อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 0.3-10^4 eV

2.2.2.3 นิวตรอนเร็ว (fast neutron) หมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 1 keV ขึ้นไป

2.2.2.4 รีโซแนนซ์นิวตรอน (resonance neutron) เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วงประมาณ 1-100 eV นิวเคลียสของธาตุหลายชนิดจะมีการจับนิวตรอนพลังงานช่วงนี้ได้ดีซึ่งเรียกว่ามี "resonance absorption"

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.3 <u>อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร</u> (Interaction of neutron with matter)

การที่นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า เมื่อวิ่งชนสสารใด ๆ จะไม่มีแรงต่อต้านทางไฟฟ้า ทำให้มีอำนาจทะลุทะลวงสูง อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นกับอะตอมของธาตุจะเกิดกับนิวเคลียสของอะตอมโดยตรง ไม่ได้เกิดกับอิเลคตรอนของอะตอมอย่างอนุภาคมีประจุ (charged particles) อื่น ๆ อันตรกิริยาที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ คือ

2.2.3.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) เป็นปฏิกิริยาที่นิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสของอะตอมแล้วนิวตรอนจะกระเจิงออกมาโดยที่นิวเคลียสไม่เปลี่ยนระดับพลังงาน ผลรวมของโมเมนตัมและพลังงานจลน์ก่อนการชนและภายหลังการชนมีค่าเท่ากัน บางทีเรียกการกระเจิงแบบนี้ว่า "potential scattering" ใช้สัญลักษณ์ย่อของปฏิกิริยาเป็น (n,n)

2.2.3.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) เป็นปฏิกิริยาที่นิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสของอะตอมแล้วทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (excited state) นิวตรอนจะกระเจิงออกมาพร้อมทั้งมีรังสีแกมมาออกมาจากนิวเคลียส เนื่องจากนิวเคลียสกลับสู่สภาวะสมดุลย์ปกติ (ground state) ปฏิกิริยาแบบนี้ผลรวมของพลังงานจลน์และโมเมนตัมของนิวตรอนกับนิวเคลียสที่ถูกชนจะมีค่าต่างกัน กล่าวคือ ภายหลังการชนผลรวมของพลังงานจลน์และโมเมนตัมมีค่าลดลง เพราะพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในรูปของการปลดปล่อยรังสีแกมมา ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดขึ้นได้ ต่อเมื่อนิวตรอนนั้นมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสของอะตอมอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่ธาตุแต่ละชนิด สัญลักษณ์ย่อ ของปฏิกิริยาชนิดนี้คือ (n,n')

2.2.3.3 ปฏิกิริยาจับนิวตรอน (neutron capture หรือ radiation capture หรือ neutron absorption) คือปฏิกิริยาที่นิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมแล้วถูกจับไว้ในนิวเคลียสนั้น ทำให้ได้นิวเคลียสใหม่ซึ่งมีเลขมวล (mass number) เพิ่มขึ้นเท่ากับหนึ่ง การรวมนิวตรอนกับนิวเคลียสนี้

จะมีรังสีแกมมาปลดปล่อยออกมาเรียกว่า "capture gamma rays" ปฏิกิริยาจับนิวตรอนเป็นปฏิกิริยาชนิดที่ให้พลังงานออกมา (exothermic reaction) เนื่องจากมวลของนิวเคลียสเดิมรวมกับมวลของนิวตรอนอิสระจะมีค่ามากกว่ามวลของนิวเคลียสใหม่เสมอ สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาคือ (n,γ) ตัวอย่างปฏิกิริยา เช่น $^{196}_{}Hg(n,\gamma)^{197}_{}Hg$; $^{74}_{}Se(n,\gamma)^{75}_{}Se$; $^{59}_{}Co(n,\gamma)^{60}_{}Co$ เป็นต้น

2.2.3.4 ปฏิกิริยาฟิชชัน (fission reaction) คือปฏิกิริยาที่นิวตรอนเข้าชนนิวเคลียสของธาตุที่มีเลขมวลสูงบางชนิด แล้วนิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเรียกว่านิวเคลียสประกอบ (compound nucleus) ต่อจากนั้นนิวเคลียสประกอบจะแบ่งตัวออกเป็นสองส่วนได้นิวเคลียสใหม่ 2 นิวเคลียสที่มีเลขมวลลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง พร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอนหลุดออกมา 2 ถึง 3 ตัว ปฏิกิริยาฟิชชันเป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเตาปฏิกรณ์ปรมาณูที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน พลังงานที่ได้ออกมาต่อปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ มีค่าประมาณ 200 MeV ใช้สัญลักษณ์ย่อของปฏิกิริยาเป็น (n,f) ตัวอย่างของปฏิกิริยา เช่น

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow \underbrace{^{236}_{}U}_{\text{นิวเคลียสประกอบ}} \xrightarrow{\text{แตกตัว}} {}^{A_1}_{Z_1}X + {}^{A_2}_{Z_2}Y + \nu\,{}^{1}_{0}n + Q$$

เมื่อ X และ Y คือธาตุใหม่ที่เกิดขึ้นมีเลขมวลเท่ากับ A_1 และ A_2 และเลขอะตอม เท่ากับ Z_1 และ Z_2 ตามลำดับ

ν คือ จำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้น

Q คือ พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยา มีค่าประมาณ 200 MeV

2.2.3.5 ปฏิกิริยาการปล่อยอนุภาคมีประจุ (charged particle emission) เป็นปฏิกิริยาที่เมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุแล้วมีการปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคอัลฟา (α) อนุภาคโปรตอน(p) ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยานิวตรอน-อัลฟา (n,α) ปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน(n,p) ตัวอย่างของปฏิกิริยา เช่น $^{10}_{5}B(n,\alpha)^{7}_{3}Li$; $^{6}_{3}Li(n,\alpha)^{3}_{1}H$ และ $^{14}_{7}N(n,p)^{14}_{6}C$ เป็นต้น

2.2.3.6 ปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคนิวตรอน (neutron producing reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนพลังงานสูงกับนิวเคลียสของอะตอม โดยเมื่อนิวตรอนที่วิ่งเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมมีพลังงานมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนตัวสุดท้ายในนิวเคลียส จะสามารถทำให้นิวตรอนตัวสุดท้ายดังกล่าวหลุดออกมาจากนิวเคลียสได้ สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาคือ (n,2n) ตัวอย่างปฏิกิริยา ได้แก่ $^{2}_{1}H(n,2n)^{1}_{1}H$; $^{9}_{4}Be(n,2n)^{8}_{4}Be$ และ $^{14}_{7}N(n,2n)^{13}_{7}N$ เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสามนี้มีค่า threshold energy เท่ากับ 3.34, 1.85 และ 11.3 MeV ตามลำดับ

2.2.4 <u>การเกิดเรดิโอไอโซโทปและการสลายตัวของเรดิโอไอโซโทป</u>

อัตราการเกิดเรดิโอไอโซโทปขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุรวมทั้งสัดส่วนของปริมาณของธาตุนั้นที่มีอยู่ในธรรมชาติ ความสามารถในการจับนิวตรอนและความเข้มของนิวตรอนที่ใช้ ซึ่งอาจเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R = N\sigma\phi \qquad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ R = อัตราการเกิดเรดิโอไอโซโทป

N = จำนวนอะตอมของธาตุที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้วเกิดเป็นเรดิโอไอโซโทป

σ = ค่าความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุ (neutron cross section) มีหน่วยเป็นบาร์น (barn) (1 บาร์น = 10^{-24} ตารางเซนติเมตร)

ϕ = ความเข้มของนิวตรอน (neutron flux) มีหน่วยเป็นนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลง (rate of change) ของจำนวนอะตอมของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นจากการอาบรังสีนิวตรอนเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

i 17207058

อัตราการเปลี่ยนแปลง = อัตราการเกิด-อัตราการสลายตัว

$$\frac{d}{dt} N(t) = R - \lambda N(t) \qquad \text{.....(2.3)}$$

เมื่อ $\frac{d}{dt} N(t)$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น ณ เวลาใด ๆ

λ = ค่าคงที่ในการสลายตัว (decay constant) ของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้น และมีค่าเท่ากับ $\frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}}$

$T_{\frac{1}{2}}$ = ค่าครึ่งชีวิตของเรดิโอไอโซโทป

$N(t)$ = จำนวนอะตอมของเรดิโอไอโซโทป ณ เวลาใด ๆ

$\lambda N(t)$ = อัตราการสลายตัวของเรดิโอไอโซโทป ณ เวลาใด ๆ

ถ้าอินทิเกรต (integrate) สมการที่ (2.3) จะได้ว่า

$$N(t) = \frac{R}{\lambda}(1-e^{-\lambda t}) \qquad \text{.....(2.4)}$$

เมื่อ t = ระยะเวลาในการอาบรังสีนิวตรอน

ความแรงรังสีที่เวลา t ใด ๆ มีค่าเท่ากับ $A(t) = \lambda N(t)$ หรือคือ

$$A(t) = R(1-e^{-\lambda t}) \qquad \text{.....(2.5)}$$

แทนค่า R จากสมการที่ (2.2) ในสมการที่ (2.4) และ (2.5) จะได้

$$N(t) = \frac{N\sigma\phi}{\lambda}(1-e^{-\lambda t}) \qquad \text{.....(2.6)}$$

และ

$$A(t) = N\sigma\phi(1-e^{-\lambda t}) \qquad \text{.....(2.7)}$$

แต่

$$N = \frac{WN_A f}{M}$$

เมื่อ

W = น้ำหนักของธาตุดังกล่าว หน่วยเป็นกรัม

N_A = avogrado's number = 6.02×10^{23}

f = สัดส่วนเป็นร้อยละของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นในธรรมชาติ (% abundance)

M = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

ดังนั้น จากสมการ (2.7) เขียนใหม่ได้ว่า

$$A(t) = \frac{WN_A f \sigma \phi}{M}(1-e^{-\lambda t}) \quad \ldots\ldots\ldots (2.8A)$$

หรือ

$$W = \frac{A(t)M}{6.02\times10^{23} f\sigma\phi(1-e^{-\lambda t})} \quad \ldots\ldots\ldots (2.8B)$$

จากการวัดค่าความแรงรังสีที่เกิดขึ้นจะสามารถคำนวณปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ โดยอาศัยสมการ (2.8 A) หรือ (2.8 B) แต่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจริง ๆ ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่างส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีเปรียบเทียบระหว่างธาตุในสารตัวอย่างกับในสารมาตรฐาน โดยนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกันคือ ในตำแหน่งและระยะเวลาเดียวกัน แล้วทำการวัดความแรงรังสีเพื่อคำนวณหาปริมาณธาตุโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการ

$$C_x = C_s \frac{Rx}{R_s} \quad \ldots\ldots\ldots (2.9)$$

เมื่อ C_x = ความเข้มข้นของธาตุที่วิเคราะห์ในตัวอย่าง

C_s = ความเข้มข้นของธาตุที่วิเคราะห์ในสารมาตรฐาน

R_x = ความแรงรังสีของสารตัวอย่าง

R_s = ความแรงรังสีของสารมาตรฐาน

2.3 ข้อดีของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน

2.3.1 ความไวของการวิเคราะห์สูง ความไวของการวิเคราะห์ (sensitivity) ในที่นี้หมายถึงความสามารถที่จะวิเคราะห์ธาตุใดธาตุหนึ่งในปริมาณที่ต่ำสุดได้เพียงใด ภายใต้สภาวะที่กำหนด ความไวของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับความเข้มของอนุภาคนิวตรอน ความสามารถในการจับนิวตรอน สัดส่วนที่มีอยู่ในธรรมชาติของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นและน้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น ๆ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า ความไวในการวิเคราะห์ธาตุต่างชนิดกันจะไม่เท่ากัน ดังเช่นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมน้อยจะมีความไวในการวิเคราะห์สูงกว่าธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมมากเมื่อสภาวะอย่างอื่นเหมือนกัน

นอกจากนี้ ความไวของการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดรังสีด้วย

$$\% \text{ ประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดรังสี} = \frac{\text{ความแรงรังสีที่วัดได้} \times 100}{\text{ความแรงรังสีจริง}} \quad \ldots\ldots\ldots (2.10)$$

ถ้าเครื่องมือมีประสิทธิภาพสูง ย่อมจะทำให้สามารถวัดความแรงรังสีได้ใกล้เคียงกับความแรงรังสีจริง ซึ่งผลคือทำให้ความไวของการวิเคราะห์สูงขึ้น ปกติการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันนี้ สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีความเข้มข้นต่ำสุดได้ถึงหนึ่งส่วนในล้านส่วน และอาจทำการวิเคราะห์ได้ต่ำถึงหนึ่งส่วนในพันล้านส่วนสำหรับธาตุบางชนิด

2.3.2 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ต้องกังวลต่อข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นจากสิ่งเจือปนในระหว่างการปฏิบัติงานภายหลังการอาบรังสีแล้ว เนื่องจากธาตุที่จะวิเคราะห์ได้กลายเป็นเรดิโอไอโซโทปแล้ว ซึ่งจะมีความแตกต่างไปจากสิ่งเจือปนอื่น ๆ

2.3.3 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่สามารถใช้กับธาตุที่มีปริมาณน้อยซึ่งไม่สามารถจะวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีธรรมดา (conventional chemical technique) เช่น การตกตะกอน เนื่องจากวิธีการทางนิวตรอนแอคติเวชันคำนึงถึงเฉพาะความแรงรังสีที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงสามารถจะเติมไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นลงไปเป็นตัวพา (carrier) เพื่อป้องกันการสูญหายของเรดิโอไอโซโทป ทำให้สามารถปฏิบัติการวิเคราะห์ตามขั้นตอนของวิธีทางเคมีธรรมดาได้

2.3.4 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่จำเป็นต้องแยกธาตุที่จะวิเคราะห์ออกมาให้ได้สมบูรณ์ เพียงแต่แยกออกให้บริสุทธิ์และมีปริมาณมากพอที่จะวัดความแรงรังสีได้เท่านั้น เนื่องจากสามารถปรับค่าเคมิคัลยิลด์ (chemical yield) ของขบวนการแยกให้เป็นร้อยละ 100 ได้โดยคิดเทียบจากน้ำหนักของตัวพาที่เติมลงไปในสารตัวอย่างภายหลังการอาบรังสี

2.3.5 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ใช้วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ เนื่องจากเรดิโอไอโซโทปของธาตุแต่ละตัวจะมีคุณสมบัติทางนิวเคลียร์เฉพาะตัว คือ ครึ่งชีวิต ชนิดของรังสีและพลังงานที่ปลดปล่อย จึงสามารถใช้เป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ได้

2.3.6 การวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนแอคติเวชันโดยใช้เฉพาะเครื่องมือวัดรังสี เป็นวิธีวิเคราะห์ ซึ่งสะดวกและรวดเร็ว โดยไม่มีการสูญเสียสารตัวอย่างทั้งรูปร่างและลักษณะ และถ้าเลือกสภาวะให้เหมาะสมแล้วจะสามารถทำการวิเคราะห์ได้หลายธาตุในคราวเดียวกันทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

2.4 <u>ข้อเสียของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน</u>

2.4.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ไม่สามารถระบุได้ว่า ธาตุที่วิเคราะห์ได้นั้นอยู่ในรูปใดในสารตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์จะแสดงถึงปริมาณทั้งหมดของธาตุนั้นที่มีในสารตัวอย่าง (total content) ไม่ใช่ของสารประกอบของธาตุชนิดหนึ่งชนิดใดโดยเฉพาะ

2.4.2 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้ทุกตัวในตารางธาตุ เพราะธาตุบางตัวไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีนี้

2.4.3 เป็นกรรมวิธีวิเคราะห์ที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและต้องใช้เงินลงทุนสูง เนื่องจากต้นกำเนิดนิวตรอนและเครื่องมือวัดรังสี ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์แบบนี้มีราคาแพงมาก

2.4.4 การใช้วิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชันจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับกัมมันตรังสีซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับป้องกันและตรวจสอบรังสีชนิดต่าง ๆ อย่างพร้อมมูล และข้อสำคัญที่สุดประการหนึ่งคือผู้ปฏิบัติงานจะต้องได้รับการฝึกอบรมให้มีความรู้ความเข้าใจในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับกัมมันตรังสีเป็นอย่างดี

2.5 ข้อผิดพลาดในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน (70)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันจะต้องคำนึงถึงข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ ข้อผิดพลาดเหล่านี้สามารถจะหลีกเลี่ยงหรือลดให้น้อยลงได้เมื่อรู้สาเหตุ และอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.5.1 ข้อผิดพลาดทางฟิสิกส์ (physical error) ถ้าตัดปัญหาความผิดพลาดเนื่องจากความผันแปรทางสถิติของการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (statistical fluctuations of the radioactive decay) ออกไปแล้ว ข้อผิดพลาดทางฟิสิกส์ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ที่สำคัญ ๆ มีดังนี้ คือ

2.5.1.1 ความผิดพลาดในการเตรียมสารตัวอย่าง (errors in sample preparation) จุดสำคัญข้อแรกที่อาจผิดพลาดได้ คือ การสุ่มตัวอย่าง (sampling) ตัวอย่างที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์จะต้องเป็นตัวแทนของตัวอย่างทั้งหมด ดังนั้นก่อนการสุ่มตัวอย่างจะต้องทำให้ทุกส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ก่อน อย่างไรก็ตามตัวอย่างบางชนิดที่ต้องผ่านการบดให้ละเอียดและคลุกเคล้าให้ดีนั้น อาจจะเกิดการเปรอะเปื้อนจากอุปกรณ์ที่ใช้และจากฝุ่นละอองในบรรยากาศ ซึ่งจะมีผลให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้ การแก้ไขข้อผิดพลาดเหล่านี้กระทำได้โดยการเตรียมสารตัวอย่างด้วยความระมัดระวังทุกขั้นตอน ภาชนะและอุปกรณ์ที่ใช้ต้องสะอาดเพื่อหลีกเลี่ยงการเปรอะเปื้อนที่จะเกิดขึ้นก่อนการอาบรังสีสารตัวอย่าง

2.5.1.2 การกำบังตัวเองของสารตัวอย่างขณะอาบรังสี (self-shielding) ข้อผิดพลาดเช่นนี้เกิดขึ้นได้เมื่อสารตัวอย่างที่นำไปอาบรังสีนิวตรอนมีปริมาณมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสารตัวอย่างนั้นมีธาตุบางชนิดที่มีความสามารถในการจับอนุภาคนิวตรอนได้ดีอยู่มาก เพราะสารตัวอย่างบริเวณใน ๆ จะได้รับรังสีนิวตรอนที่มีความเข้มน้อยกว่าบริเวณผิวนอก และทำให้เรดิโอไอโซโทปของธาตุบางตัวเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่มีผลให้เกิดข้อผิดพลาดในผลการวิเคราะห์ได้ ข้อผิดพลาดเช่นนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อย ในกรณีที่หลีกเลี่ยงไม่ได้จำเป็นต้องหาข้อมูลประกอบ (factor) สำหรับแก้ไขข้อผิดพลาดนี้

หรือต้องเตรียมสารมาตรฐานให้มีลักษณะและเนื้อสารตลอดจนความเข้มข้นของธาตุใกล้เคียงกับสารตัวอย่างให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้สารมาตรฐานและสารตัวอย่างมีค่าการกำบังตัวเองพอ ๆ กัน นอกจากนี้อาจจะต้องใช้วิธีทำให้สารตัวอย่างเจือจางลงหรือการเติมสารมาตรฐานลงในสารตัวอย่าง

ปรากฏการณ์อีกอย่างหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายกับการกำบังตัวเองในขณะอาบรังสีนิวตรอน คือ "self shadowing" ซึ่งหมายถึงการกำบังตัวเองในขณะทำการวัดรังสี เกิดขึ้นได้เมื่อสารตัวอย่างที่จะวัดความแรงรังสีมีปริมาณมากหรือมีการดูดกลืนรังสีที่จะทำการวัดได้ดี การวัดรังสีอัลฟา เบตาและรังสีเอ็กซ์ต้องคำนึงถึงปรากฏการณ์ลักษณะนี้อย่างมาก แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการวัดรังสีแกมมาซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูง ปัญหาข้อนี้จึงเกิดขึ้นมากเฉพาะในกรณีที่ตัวอย่างประกอบด้วยธาตุหนักและตัวอย่างมีปริมาณมาก

2.5.1.3 ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มรังสีนิวตรอน (heterogeneity of neutron flux) ความเข้มของรังสีนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูมีค่าไม่เท่ากัน และถึงแม้จะเป็นตำแหน่งเดียวกันแต่ในช่วงเวลาต่างกันความเข้มของรังสีนิวตรอนอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ การที่สารตัวอย่างแต่ละตัวและสารมาตรฐานได้รับความเข้มของรังสีนิวตรอนต่างกันทำให้การวัดรังสีตลอดจนการคำนวณหาปริมาณเปรียบเทียบกันนั้นผิดพลาดไป ข้อผิดพลาดแบบนี้สามารถแก้ไขได้โดยการนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีพร้อมกันในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด และในกรณีที่ไม่สามารถจะจัดตำแหน่งดังกล่าวได้จะต้องมีการปรับค่าความแรงรังสีของสารตัวอย่างกับของสารมาตรฐานให้อยู่ในความเข้มของนิวตรอนเดียวกันโดยใช้สารเปรียบเทียบ (comparator) เป็นหลัก

2.5.1.4 ปฏิกิริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน (interfering nuclear reactions) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.5.1.4.1 การแทรกซ้อนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ให้เรดิโอไอโซโทปตัวเดียวกับที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีธาตุที่มีเลขอะตอม

ใกล้เคียงกับธาตุที่จะวิเคราะห์ เกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนแบบต่าง ๆ แล้วผลสุดท้ายให้เรดิโอไอโซโทปตัวเดียวกัน การแทรกซ้อนกรณีเช่นนี้อาจแบ่งออกเป็นแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

แบบที่ 1 : การแทรกซ้อนจากเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นโดยตรง ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการแทรกซ้อนแบบที่ 1

ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์	ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ต้องการ	ปฏิกิริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน
Na	$^{23}Na(n,\gamma)^{24}Na$	$^{24}Mg(n,p)^{24}Na$; $^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na$
Zn	$^{68}Zn(n,\gamma)^{69m}Zn$	$^{69}Ga(n,p)^{69m}Zn$; $^{72}Ge(n,\alpha)^{69m}Zn$

แบบที่ 2 : การแทรกซ้อนของเรดิโอไอโซโทปซึ่งเกิดขึ้นจากการสลายตัวของเรดิโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยากับนิวตรอนโดยตรง ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการแทรกซ้อนแบบที่ 2

ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์	ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ต้องการ	ปฏิกิริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน
Tl	$^{203}Tl(n,2n)^{202}Tl$	$^{204}Pb(n,3n)^{202m}Pb \xrightarrow{K\ capture} {}^{202}Tl$
Mn	$^{55}Mn(n,\gamma)^{56}Mn$	$^{54}Cr(n,\gamma)^{55}Cr \xrightarrow{\beta^-} {}^{55}Mn(n,\gamma)^{56}Mn$
As	$^{75}As(n,\gamma)^{76}As$	$^{74}Ge(n,\gamma)^{75}Ge \longrightarrow {}^{75}As(n,\gamma)^{76}As$

แบบที่ 3 : การแทรกซ้อนแบบอื่น ๆ ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีอนุภาคโปรตอนเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนเร็วกับธาตุบางชนิด แล้วอนุภาคโปรตอนนั้นไปทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แทรกซ้อนได้เรดิโอไอโซโทปตัวเดียวกับที่ต้องการวิเคราะห์ ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการแทรกซ้อนแบบที่ 3

ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์	ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ต้องการ	ปฏิกิริยานิวเคลียร์แทรกซ้อน
F	$^{19}F(n,2n)^{18}\underline{F}$	$^{17}O(p,\gamma)^{18}\underline{F}$; $^{18}O(p,n)^{18}\underline{F}$; $^{21}Ne(p,\alpha)^{18}\underline{F}$
Ti	$^{48}Ti(n,p)^{48}\underline{Sc}$	$^{48}Ca(p,n)^{48}\underline{Sc}$

2.5.1.4.2 การแทรกซ้อนจากเรดิโอไอโซโทปตัวอื่นซึ่งให้พลังงานของรังสีเท่ากับหรือใกล้เคียงกับตัวที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้เกิดการผิดพลาดในการวัดรังสี ซึ่งอาจจะหลีกเลี่ยงไปวัดรังสีที่พลังงานอื่น (ถ้ามี) ที่ไม่ถูกรบกวน นอกจากนี้อาจแก้ไขได้โดยการพิจารณาครึ่งชีวิตของตัวแทรกซ้อนกับตัวที่สนใจ เพื่อที่จะกำหนดเวลาที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอนหรือเวลาที่ทิ้งให้สลายตัว เป็นการขัดปัญหาหรือสดปัญหาการรบกวนดังกล่าว ในปัจจุบันหัววัดรังสีแบบกึ่งตัวนำ (semiconductor detectors) เช่น หัววัดรังสีแกมมาชนิดเจอร์เมเนียม-ลิเทียม Ge(Li), หัววัดรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอน-ลิเทียม Si(Li), high purity germanium และหัววัดรังสีพวกอนุภาคมีประจุแบบ surface barrier มีความสามารถในการแยกพลังงานได้ดีมาก จึงช่วยลดปัญหาการแทรกซ้อนแบบนี้ได้อย่างมาก

2.5.1.5 ความผิดพลาดเกี่ยวกับเทคนิคการวัดรังสี ประการแรกที่ต้องพิจารณาคือ สารตัวอย่างและสารมาตรฐานที่จะนำเข้าวัดรังสีจะต้องให้มีลักษณะเหมือนกันให้มากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ ทั้งชนิดและขนาดของภาชนะที่ใช้บรรจุสาร สถานะ รูปร่าง ปริมาณตลอดจนลักษณะและคุณสมบัติของเนื้อสาร รวมทั้งการจัดวางสารบนหัววัดในลักษณะและตำแหน่งเดียวกัน ประการที่สองคือ เวลาที่ใช้ในการวัด

รังสี (counting time) ถ้าจำนวนนับ (counts) ที่ได้มีค่าน้อยผลการวิเคราะห์จะมีข้อผิดพลาดมากทางสถิติ (statistical error) ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการวัดรังสีจะต้องมากพอเพื่อให้จำนวนนับที่ได้มีค่ามาก เป็นการลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการวัดรังสี นอกจากนี้ในกรณีของเรดิโอไอโซโทปที่มีครึ่งชีวิตสั้น ช่วงเวลาที่ทิ้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานก่อนนำมาวัดรังสีจะมีผลต่อความแรงรังสีที่วัดได้เป็นอย่างมาก จะต้องทำการปรับค่าปริมาณรังสีให้อยู่ในเวลาที่เริ่มวัดรังสีพร้อมกัน (แก้ decay time factor) แล้วจึงนำค่ามาเปรียบเทียบกันได้ ประการสุดท้ายคือประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดรังสี เนื่องจากการทำงานของเครื่องมืออิเลคโทรนิคอาจเปลี่ยนแปลงไปบ้างตามสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น ประสิทธิภาพในการวัดรังสีจึงอาจเปลี่ยนแปลงและมีผลให้การวิเคราะห์ผิดพลาดไปได้บ้าง

2.5.2 <u>ข้อผิดพลาดทางเคมี</u>

ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันแบบที่ต้องอาศัยกรรมวิธีทางเคมี จะต้องระมัดระวังข้อผิดพลาดทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีทางเคมีต่าง ๆ ที่ใช้กับสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องให้สมบูรณ์เหมือนกันหมด เป็นต้นว่า การแยก การทำละลาย การตกตะกอน และการล้างตะกอน การวิเคราะห์ตัวอย่างเดียวกันซ้ำหลาย ๆ ครั้งจะช่วยให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ควรจะมีการตรวจสอบกรรมวิธีทางเคมีที่ใช้ว่าสมบูรณ์เพียงใด