

2.1 การวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน

การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน หมายถึงการวิเคราะห์ธาตุ โดยการยิง (Bombard) ธาตุด้วยอนุภาคนิวตรอน เมื่อนิวตรอนเข้าไป กระทบนิวเคลียสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียส (Nuclear - transformation) ของอะตอมของธาตุนั้น จากการจับแบ่งพลังงานกันในระหว่างนิวคลีออนในนิวเคลียส เมื่อมีพลังงานเกินก็จะสลายออกมาในรูปของรังสีแกมมา รังสีแกมมาที่ถูกปล่อยออกมานี้อาจมีพลังงานเดียว หรือหลายพลังงานก็ได้ เราเรียกนิวไคลด์ที่เกิดขึ้นใหม่นี้ว่าเป็นเรดิโอไอโซโทป เรดิโอไอโซโทปชนิดหนึ่ง ๆ ก็จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของมันเองคือ ครึ่งชีวิต และค่าพลังงานของรังสีที่ปล่อยออกมา ถ้าเราสามารถวัดคุณสมบัติเฉพาะค่านของนิวเคลียสได้อย่างแม่นยำ ก็จะบอกได้ทันทีว่าเป็นเรดิโอไอโซโทปของธาตุใด และจากปริมาณรังสีที่วัดได้นี้มาเปรียบเทียบกับปริมาณรังสีของสารมาตรฐานของนิวไคลด์เดียวกันที่ทราบน้ำหนักแน่นอน จะสามารถคำนวณประมาณของธาตุที่จะวิเคราะห์ได้

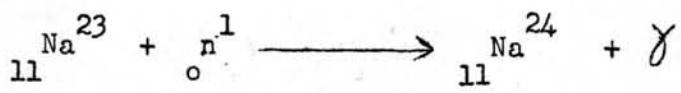
องค์ประกอบสำคัญของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน มีดังนี้คือ

2.1.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน ปกติแล้วนิวตรอนอาจได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือจากปฏิกิริยา fission หรืออาจได้จากต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ปฏิกิริยา  $(\alpha, n)$  หรือ  $(\gamma, n)$  นิวตรอนที่ออกมาจากต้นกำเนิดจะเป็นนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) คือมีพลังงานสูง ธาตุต่าง ๆ

ส่วนมากมักมีภาคตัดขวางต่อนิวตรอนชนิดนี้ต่ำ จึงไม่ใคร่เกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนชนิดนี้ และพบว่าถ้าทำให้นิวตรอนมีพลังงานลดลง คือให้มีพลังงานเหลือประมาณ 0.025 eV ซึ่งนิวตรอนที่มีพลังงานขนาดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์กับธาตุได้หลายชนิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นนิวตรอนแกมมา (n, γ reaction)

2.1.2 ปฏิกิริยานิวตรอนแกมมา คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการยิงของอนุภาคนิวตรอนเข้าไปเกาะที่นิวเคลียสของธาตุ นิวเคลียสเปลี่ยนไปเป็นเรกิโอไอโซโทปของธาตุเดิม พร้อมกับปล่อยรังสีแกมมาออกมา

ตัวอย่างปฏิกิริยาได้แก่



หรืออาจเขียนได้เป็น  $\text{Na}^{23} (n, \gamma) \text{Na}^{24}$

ปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนี้คือ



หรือ  $\text{W}^{186} (n, \gamma) \text{W}^{187}$

ในธรรมชาติ  $\text{W}^{186}$  มีไอโซโทปอื่นปนอยู่บ้างแต่น้อยมาก

ปฏิกิริยา (n, γ) เหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน เพราะปฏิกิริยานี้

การคำนวณ

ถ้า P = อัตราการเกิดของสารเรกิโอไอโซโทป

Q = จำนวนอะตอมทั้งหมดของธาตุที่นำไปอาบนิวตรอน

$\sigma$  = ความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุ เรียกว่าภาคตัดขวางต่อนิวตรอน (Neutron cross section) หน่วยเป็น barn ( $10^{-24}$  ซม.<sup>2</sup>)

$\phi$  = ความเข้มของนิวตรอนที่วิ่งเข้าชนเป้า (Target) บางครั้งเรียกนิวตรอนฟลักซ์ (Neutron flux) หน่วยเป็นนิวตรอนต่อ ตร.ซม. ต่อวินาที

จะได้  $P = N \sigma \phi \dots\dots\dots (2.1)$

เมื่ออะตอมเกิดใหม่เป็นเรกติโอไอโซโทป เมื่อเกิดแล้วมีการสลายตัวตลอดเวลา

ความแรงของสารกัมมันตรังสี = อัตราการเกิด - อัตราการสลายตัว

$$\frac{dN}{dt} = P - \lambda N$$

เมื่อ  $\frac{dN}{dt}$  = ความแรงของสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลาใด ๆ

$$\lambda = \text{ค่าคงที่ของการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี} \\ = \frac{693}{t_{\frac{1}{2}}}$$

อินทิเกรตจะได้

$$N = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) + N_0 e^{-\lambda t_1} \\ = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1}) \text{ เมื่อ } N_0 = 0$$

และความแรงของสารเรกติโอไอโซโทปที่เกิดขึ้นคือ

$$A = \lambda N = P(1 - e^{-\lambda t_1}) \dots\dots\dots (2.2)$$



- เมื่อ  $N$  = จำนวนอะตอมกัมมันตรังสีที่เวลาใด  
 $N_0$  = จำนวนอะตอมกัมมันตรังสีที่มีอยู่เริ่มแรก  
 $t_i$  = เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี

จาก 2.1 และ 2.2 จะได้

$$A = N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) \dots\dots\dots (2.3)$$

$$= \frac{Wf}{M} \sigma \phi \times 6.02 \times 10^{23} (1 - e^{-\lambda t_i}) \dots\dots (2.4)$$

หรือ  $W = \frac{MA}{\sigma \phi \times 6.02 \times 10^{23} (1 - e^{-\lambda t_i})} \dots\dots (2.5)$

เมื่อ  $N = 6.02 \times 10^{23} \frac{W \cdot f}{M}$

$W$  = น้ำหนักของธาตุหน่วยกรัม

$f$  = สัดส่วนของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นในธรรมชาติ  
(Abundance)

$M$  = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

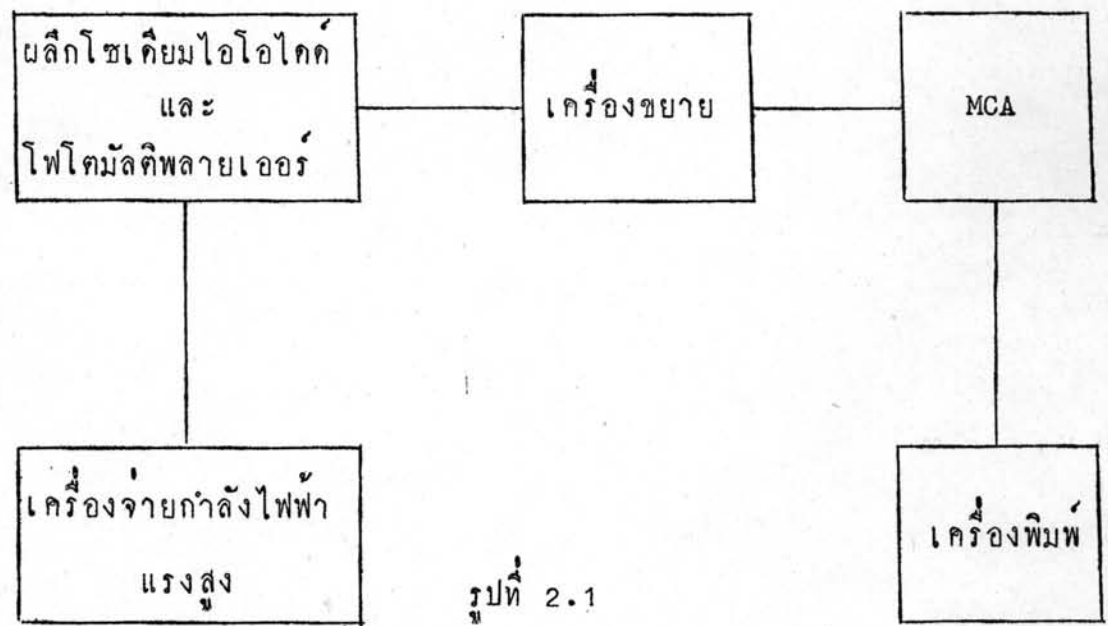
จากความแรงรังสีที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากความเข้มของนิวตรอน ในระหว่างการอาบรังสีอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ และความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุไม่สามารถหาได้อย่างถูกต้องแน่นอน ดังนั้นการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน จึงนิยมใช้วิธีเปรียบเทียบระหว่างธาตุในสารตัวอย่างกับธาตุนั้นในสารมาตรฐาน โดยนำสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีในตำแหน่งเดียวกันและพร้อมกันกับสารตัวอย่าง แล้ววัดความแรงของรังสีเปรียบเทียบกัน จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความแรงของรังสีของสารตัวอย่าง}}{\text{ความแรงของรังสีของสารมาตรฐาน}}$$

อาศัยวิธีเปรียบเทียบนี้จึงไม่จำเป็นต้องรู้ค่านิวตรอนฟลักซ์ และประสิทธิภาพของเครื่องวัด

2.2 เครื่องวัดรังสีแกมมาแบบซินทิลเลเตอร์

เครื่องวัดรังสีแบบนี้ประกอบด้วยหัววัดรังสีเป็นผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (NaI - crystal) เรียกว่าซินทิลเลเตอร์ ต่ออยู่กับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube) โดยมีเครื่องจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูง (High voltage power supply) ทั้งหมดต่อไปยังเครื่องขยาย (Amplifier) เครื่องมัลติแชนแนล (Multichannel analyser) และเครื่องพิมพ์ (Printer) ตามแผนภาพ



รูปที่ 2.1

แผนภาพแสดงเครื่องวัดรังสีแกมมาแบบซินทิลเลเตอร์

การทำงานของเครื่องมือชนิดนี้ก็คือ เมื่อรังสีแกมมาเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของโซเดียมไอโอไดค์แล้วจะถูกกุกกลืนตามขบวนการทั้งสามคือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค คอมพตันเอฟเฟค และการเกิดอนุภาคคู่ พลังงานของรังสีแกมมาจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนในอะตอมของโซเดียมไอโอไดค์ ซึ่งเป็นสารเรืองแสง อิเล็กตรอนจะเสียพลังงานนั้นในผลึก โดยเปลี่ยนเป็นพลังงานแสง

พลังงานแสงที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ และขยายสัญญาณให้โตขึ้นโดยเครื่องขยายสัญญาณที่ขยายแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องมัลติแชนแนลและเครื่องพิมพ์ตามลำดับ อ่านค่าตามแรงของรังสีแกมมาจากรายการที่พิมพ์ได้

### 2.3 เทคนิคการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน

เทคนิคในการวิเคราะห์โดยวิธีนี้มี 2 แบบคือ

2.3.1 การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน โดยใช้เฉพาะเครื่องมือนับรังสี คือการวิเคราะห์โดยการทำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานให้มีสภาพใกล้เคียงกัน เป็นต้นว่าถ้าเป็นของแข็งมีลักษณะเป็นผงก็ต้องเหมือนกัน มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ถ้าเป็นของเหลวสารที่เป็นตัวทำละลายควรจะเป็นอย่างเดียวกัน ควรจะมีความสามารถในการกัมมันตรังสีได้พอ ๆ กัน หรือพูดอีกอย่างหนึ่งว่าทำให้สภาพของสารมาตรฐานและสารตัวอย่างคล้ายกัน นำสารทั้งสองเข้าอบรังสีพร้อมกันแล้ววัดความแรงรังสีของเรดิโอไอโซโทปของธาตุที่ต้องการหาปริมาณเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานโดยตรง การวัดรังสีแกมมาจำเป็นต้องใช้เครื่องมือนับรังสีแยกสเปกตรัมของรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ ได้

2.3.2 การวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน โดยผ่านการแยกทางเคมี คือการวิเคราะห์ที่ต้องนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานมาผ่านกรรมวิธีทางเคมี แยกชนิดของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ก่อนหรือหลังการอาบรังสี เช่น การกลั่นการตกตะกอน การสะกักเป็นคั่น เพื่อให้ปราศจากการรบกวนจากเรดิโอไอโซโทปของธาตุอื่น ๆ ในสารตัวอย่างนั้น ๆ แล้วจึงวัดความแรงรังสีเทียบกับสารมาตรฐาน

2.3.3 สำหรับการทดลองต่อไปนี้ หากการวิเคราะห์โดยใช้วิธีในข้อ 2.3.1 เท่านั้น ถ้ามีธาตุอื่นซึ่งมี ภาวคัตขวางของนิวตรอนสูงปนอยู่ อาจทำให้พีคของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์สูงกว่าที่ควรจะเป็น ใช้วิธีแก้โดยการคำนวณซึ่งจะกล่าวในตอนต่อไป

#### 2.4 ข้อดีของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน

2.4.1 ความไวของการวิเคราะห์สูง ความไวของการวิเคราะห์ในที่นี้หมายถึง ความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุใดธาตุหนึ่งได้ต่ำสุดภายใต้สภาวะที่กำหนด ความไวของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับความเข้มของอนุภาคนิวตรอน (Flux) ความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุที่นำไปวิเคราะห์ สัดส่วนการมีอยู่ในธรรมชาติของไอโซโทปเสถียรของธาตุ

นอกจากนั้นความไวของการวิเคราะห์ยังขึ้นกับประสิทธิภาพ (Efficiency) ของเครื่องนับรังสีอีกด้วยกล่าวคือ

$$\text{ความแรงรังสีจริง} = \frac{\text{ปริมาณรังสีที่นับได้} \times 100}{\text{ประสิทธิภาพของเครื่องนับรังสี}}$$

นั่นค่าประสิทธิภาพของเครื่องนับรังสีสูงยอมทำให้ความสามารถในการนับความแรงของรังสีใกล้เคียงกับความแรงรังสีจริง จึงทำให้ความไวของการวิเคราะห์สูงด้วย

หนึ่งถ้าพิจารณาจากสูตร

$$W = \frac{MA}{\sigma \phi f (1 - e^{-\lambda t_1}) \times 6.02 \times 10^{23}}$$

จะเห็นว่าถ้านำค่าความยาวรังสีเป็นเวลานาน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าครึ่งชีวิตของเรดิโอไอโซโทปของธาตุที่เกิดขึ้นแล้วเทอม  $(1 - e^{-\lambda t_1})$  ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เพราะเทอมนี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง  $1 \rightarrow 0$  จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ  $e^{-\lambda t_1} \rightarrow 0$  คือ  $t_1$  มีค่ามาก

ถ้าความยาวรังสีเป็นเวลานาน

$$W = \frac{MA}{\sigma \phi f \times 6.02 \times 10^{23}}$$

ซึ่งจะทำให้เห็นชัดว่าจะทำให้ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Detection limit) ลดลง ซึ่งก็คือการเพิ่มความไวของการวิเคราะห์นั่นเอง

2.4.2 สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยทางวิธีเคมีธรรมดา ทั้งนี้เพราะเทคนิคนี้คำนึงถึงเฉพาะปริมาณรังสีที่เกิดขึ้น และถึงแม้ว่าจำเป็นที่จะต้องอาศัยกรรมวิธีทางเคมีเข้าช่วย ยังสามารถเติมไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นเป็นตัวพา (Carrier) เพื่อป้องกันการสูญเสียโคคัว

2.4.3 ไม่จำเป็นต้องแยกธาตุที่จะวิเคราะห์ให้ออกมาอย่างสมบูรณ์ เพียงแต่แยกออกมาให้บริสุทธิ์และมากพอที่จะวัดปริมาณรังสีได้เท่านั้น เนื่อง



จากสามารถปรับค่าเคมีคัลยิดค์ (Chemical yield) ให้เป็นร้อยละ 100 ได้ จากปริมาณตัวพาที่เค็มลงไปในสารตัวอย่างภายหลังจากการอาบรังสี

2.4.4 ในการวิเคราะห์โดยใช้เฉพาะเครื่องมือรังสีสามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และปริมาณ (Quantitative) ได้สะดวกและรวดเร็ว โดยไม่สูญเสียสารตัวอย่างรวมทั้งรูปและลักษณะกาย ถ้ามีการส่งสั๊กทิ้งไว้ให้สลายตัวให้หมดแล้วนำมาทดลอง เพื่อตรวจสอบผลการทดลองได้อีก กรณีนี้เป็นประโยชน์มากสำหรับวัตถุที่ใช้เป็นหลักฐานในการพิจารณาเรื่องราวต่าง ๆ

## 2.5 ข้อเสียของการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน

2.5.1 เป็นวิธีวิเคราะห์ที่ต้องใช้ทุนสูง เนื่องจากต้องมีแหล่งกำเนิดนิวตรอนและเครื่องนับรังสีที่มีประสิทธิภาพสูงทั้งสองสิ่งนี้มีราคาแพงมาก

2.5.2 จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับป้องกันและตรวจสอบปริมาณรังสีชนิดต่าง ๆ ไว้อย่างพร้อม (ถ้าใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์) แต่ไม่จำเป็นนักสำหรับการใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนจากสารไอโซโทป ( $\alpha, n$  หรือ  $\gamma, n$  reaction)

2.5.3 ไม่สามารถบอกได้ว่าธาตุที่วิเคราะห์หาปริมาณออกมาได้นั้นอยู่ในลักษณะใด คืออยู่ในรูปออกไซด์ซัลเฟต หรือไนเตรตเป็นต้น ผลการวิเคราะห์ออกมาเป็นปริมาณทั้งหมดของธาตุนั้น

2.5.4 ผู้ทำการทดลองจำเป็นต้องได้รับการฝึกอบรมและมีความรู้เกี่ยวกับกัมมันตภาพรังสีเป็นอย่างดี

2.5.5 ไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ธาตุได้ทุกธาตุในตารางธาตุจะใช้

วิเคราะห์ได้ผลดี เฉพาะธาตุที่มีภาคตัดขวางต่อนิวตรอนสูง ๆ เท่านั้น

2.5.6 ถ้าในสารตัวอย่างมีธาตุซึ่งไอโซโทปของธาตุนั้นปล่อยรังสีแกมมา มีพลังงานใกล้เคียง หรือมีครึ่งชีวิตใกล้เคียงกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์แล้ว มีโอกาสที่จะทำให้อผลการทดลองผิดพลาดได้มาก

## 2.6 ข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชัน

2.6.1 การสุ่มตัวอย่าง (Sampling) เนื่องจากการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคทีเวชันมีความไวของการวิเคราะห์สูงและมีการเกิดกัมมันต์ตัวเอง จึงใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อยเพราะถ้าใช้สารตัวอย่างมากอนุภาคนิวตรอนไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ทั่วถึง ฉะนั้นกรณีที่สารตัวอย่างมีเนื้อแตกต่างกัน หรือในกรณีที่ต้องผสมสารอย่างอื่นลงไปเพื่อทำการวิเคราะห์การคลุกเคล้าอาจไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันจริง ๆ การสุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้เป็นตัวแทนของทั้งหมด อาจทำให้ผิดพลาดได้แต่ข้อนี้อาจแก้ไขได้โดยการทำการทดลองหลาย ๆ ตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย

2.6.2 ความเข้มของนิวตรอนไม่คงที่ คือความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากันดังนั้นถ้านำสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง เข้าอาบรังสีในตำแหน่งต่างกัน หรือใช้เวลาต่างกันเพียงเล็กน้อย จะทำให้ปริมาณรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นผิดไปจะนำมาเปรียบเทียบกันไม่ได้ การแก้ไขกระทำโดยนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอาบรังสีพร้อมกัน ใกล้กันมากที่สุด และต้องมีโอกาสที่จะได้รับนิวตรอนเท่า ๆ กันด้วย

2.6.3 การกัมมันต์ตัวเองขณะอาบรังสี (Self-shielding) ข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากการที่สารตัวอย่างมีธาตุที่มีภาคตัดขวางต่อนิวตรอนสูงปนอยู่

นิวตรอนที่กระทบสารตัวอย่างจะถูกจับไว้ที่บริเวณผิวนอกเกือบหมด ไม่สามารถ  
เข้าถึงใจกลางของสารตัวอย่างทำให้ปริมาณรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นน้อยกว่าที่เป็น  
จริง ผลการวิเคราะห์จะผิดพลาดไป

004313