บทที่ 3

เทคนิคและอุปกรณ์วัดความชื้นด้วยนิวตรอน

ในการหาปริมาณความชื้นด้วยเทคนิคนิวตรอนอาศัยหลักการ คือ องค์ประกอบของน้ำหนึ่งโมเลกุลประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม เมื่ออนุภาคของนิวตรอนชนกับอะตอมไฮโดรเจน นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานได้มากที่สุด เนื่องจากไฮโดรเจนมีมวลใกล้เคียงกับอนุภาคนิวตรอน คือประมาณ 1 หน่วยอะตอม (1 u) ดังจะเห็นได้จากค่า "Slowing-Down Power per Unit Weight" ของธาตุต่าง ๆ และค่าจำนวนครั้งในการชนของอนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงาน 4 MeV และ 100 eV เพื่อลดพลังงานลงเป็น 0.025 eV ในตารางที่ 1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของธาตุบางชนิดในการลดพลังงานของนิวตรอน

Element	Average Logarithmic Energy Decrement σ barn	Absorption Cross-sections at 0.025eV, σ_a	Slowing down power (ξ)	Slowing-down power per unit weitght	Average Collision times required for Thermalization	
					4MeV→ 0.025 eV	100eV→ 0.025 eV
H	1.000	0.3320	20.000	20.000	19	8
C	0.158	0.0034	0.016	0.001	120	53
O	0.120	<0.0002	0.456	0.029	159	70
Mg	0.080	0.0630	0.280	0.012	238	105
Si	0.070	0.1600	0.175	0.006	272	120
Fe	0.035	2.5300	0.455	0.008	545	239
Ni	0.032	4.8000	0.544	0.009	596	262

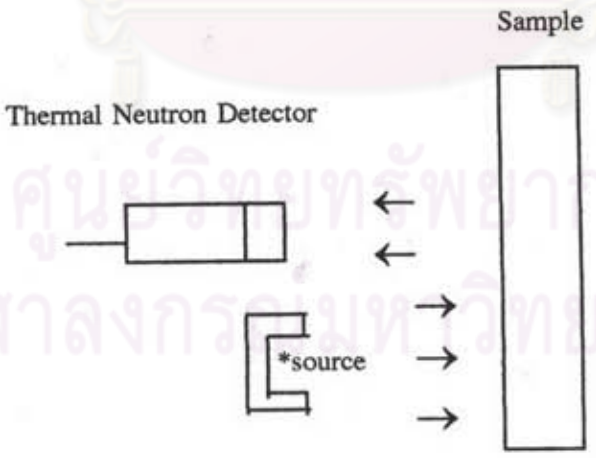
การวัดความชื้นด้วยนิวตรอนจึงอาศัยคุณสมบัติดังกล่าวในการหาปริมาณความชื้นในวัสดุ โดยการยิงอนุภาคนิวตรอนเร็วไปยังวัสดุ แล้วทำการวัดอนุภาคนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้นหรืออนุภาคนิวตรอนเร็วที่ทะลุผ่านออกมา ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นในวัสดุ

3.1 การวัดความชื้นด้วยเทคนิคนิวตรอนเร็ว

การวัดความชื้นด้วยนิวตรอนที่ใช้งานกันทั่วไป ได้แก่ งานทางด้านการสร้างถนน อุตสาหกรรม หรือ การสำรวจทรัพยากร ล้วนอาศัยเทคนิคนิวตรอนเร็วทั้งสิ้น เทคนิคการวัดความชื้นด้วยนิวตรอนเร็วแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก คือ

3.1.1 เทคนิคการกระเจิงของนิวตรอนเร็ว (Fast Neutron Scattering)

เทคนิคนี้ใช้หลักการกระเจิงของรังสีนิวตรอน เมื่อส่งผ่านเข้าสู่ตัวอย่างแล้วถูกลดพลังงานจากนิวตรอนเร็ว เป็นนิวตรอนช้าเข้าสู่หัววัดรังสีที่วัดนิวตรอนช้า ความเข้มของนิวตรอนช้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของความชื้นของตัวอย่าง ลักษณะเฉพาะของเทคนิคนี้คือ โดยทั่วไปจะจัดให้ต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีอยู่ด้านเดียวกัน เพื่อวัดรังสีนิวตรอนกระเจิงกลับ ทำให้สามารถวัดความชื้นได้จากด้านใดด้านหนึ่งของวัสดุ แต่ผิววัสดุด้านนั้นต้องเรียบ

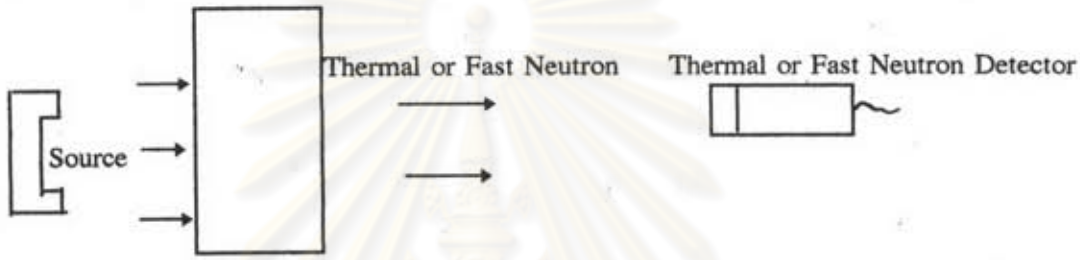


รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการวัดความชื้นโดยการใช้เทคนิคการกระเจิงของรังสีนิวตรอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 เทคนิคการส่งผ่านรังสีนิวตรอนเร็ว (Fast Neutron Transmission)

เทคนิคนี้ใช้การยิงนิวตรอนเร็วเข้าไปสู่ตัวอย่าง แล้วทำการวัดนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้นหรือนิวตรอนเร็วที่ทะลุผ่าน ความเข้มของนิวตรอนช้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงตามปริมาณความชื้นในวัสดุ ส่วนความเข้มของนิวตรอนเร็วจะลดลงตามปริมาณความชื้นของวัสดุ



รูป 3.2 แผนภาพแสดงการวัดความชื้นโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านรังสีนิวตรอนเร็ว

3.2 หัววัดรังสีนิวตรอน [1] [9]

หัววัดรังสีนิวตรอนมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันในการวัดความชื้นด้วยเทคนิคนิวตรอน มีอยู่ 5 ชนิด ดังนี้

3.2.1 หัววัดรังสีนิวตรอนชนิดพรอพอร์ชันนัล (proportional) ที่บรรจุก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (boron trifluoride, BF_3) เป็นหัววัดรังสีนิวตรอนช้าที่นิยมใช้มากที่สุด โบรอน-10 ซึ่งอยู่ในรูปของก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ที่บรรจุในหัววัดนิวตรอน จะทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอนุภาคนิวตรอนช้าทำให้เกิดอนุภาคอัลฟาและลิเทียม-7 ขึ้นมา ดังสมการ

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{7}_{3}Li $$

อนุภาคมีประจุที่เกิดขึ้น จะทำให้ก๊าซที่บรรจุอยู่แตกตัวเป็นประจุเมื่ออิออนบวกและอิเล็กตรอนที่เกดขึ้นวิ่งไปที่ขั้วบวกและขั้วลบ จะได้สัญญาณไฟฟ้าเกิดขึ้น

3.2.2 หัววัดรังสีนิวตรอนชนิดพรอพอร์ชันนัลที่ฉาบผนังด้วยโบรอน(boron-lined proportional neutron detector) มีหลักการเหมือนกับหัววัดรังสีนิวตรอนชนิดแรก เพียงแต่โบรอนซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนไปเป็นอนุภาคมีประจุจะอยู่ในรูปของผงละเอียดฉาบอยู่ที่ผนังด้านใน

ของหัววัดรังสีซึ่งบรรจุก๊าซบางชนิดไว้ (เช่น อาร์กอนผสมมีเทน อาร์กอนผสมคาร์บอนไดออกไซด์)

3.2.3 หัววัดรังสีนิวตรอนชนิดพรอพอร์ชันนัลที่บรรจุก๊าซฮีเลียม-3 (He-3 proportional neutron detector) เป็นหัววัดรังสีนิวตรอนช้าที่อาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับฮีเลียม-3 ดังนี้

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{3}_{2}B \longrightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{3}_{1}Li $$

3.2.4 หัววัดรังสีซินทิลเลเตอร์เหลว (Liqueid Scintillator) ชนิด NE213

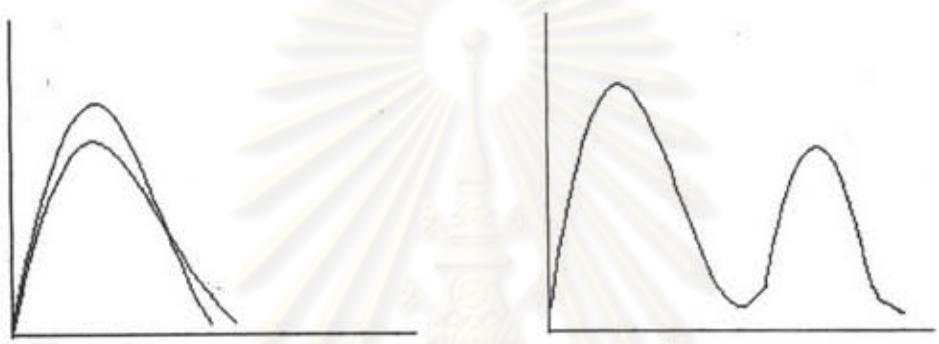
หัววัดรังสีชนิดนี้อาศัยหลักการที่นิวตรอนทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ลิเทียม-6 ซึ่งละลายอยู่ในซินทิลเลเตอร์เหลว แล้วงอนุภาคมีประจุที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดแสงวาบ(Scintillating light) แสงจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าต่อไป หัววัดรังสีชนิดนี้หากมีปริมาตรมาก จะสามารถวัดรังสีแกมมาได้ด้วย

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของหัววัดชนิด NE-213

Scintillation	NE-213
Type	Liquid
Density(g/cm3)	0.874
Refraction Index	1.506
Melting Softingor Boilingpoint ĉ)	141
Light Output % Anthracene	78
Decay Constant Main Component(ns)	3.7
Wave Length of Maximum Tromsmission(nm)	425
Number of H Atoms/Number of C Atoms	1.213
Principle Applications	Fast Neutron(PSD)*

*PSD represents neutron-gamma palse shape discriminator

แต่สัญญาณที่เกิดจากรังสีแกมมาและนิวตรอนนั้น ไม่สามารถที่จะแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงใช้ระบบอิเลกทรอนิกส์เข้ามาช่วยในการแยกสัญญาณทั้งสองออกจากกัน โดยอาศัยความแตกต่างทางด้านรูปร่างของสัญญาณที่เกิดขึ้น ระบบนี้เรียกว่า "Pluse shape Discriminator"(PSD) ดังรูปที่ 3.3



1.สัญญาณที่ได้จาก NE-213 2.สัญญาณที่ได้หลังจากผ่าน PSD

รูปที่ 3.3 สเปกตรัมที่ได้จากหัววัด NE-213

ระบบวัด PSD เป็นระบบวัดที่ให้ผลดีสามารถแยกสัญญาณของรังสีแกมมาและนิวตรอนได้อย่างดี แต่เป็นวิธีที่ยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากต้องทำการปรับเทียบมาตรฐาน(Calibration) เครื่องมืออิเลคทรอนิกส์ของระบบ PSD ซึ่งเป็นผู้ที่มีความชำนาญเท่านั้น

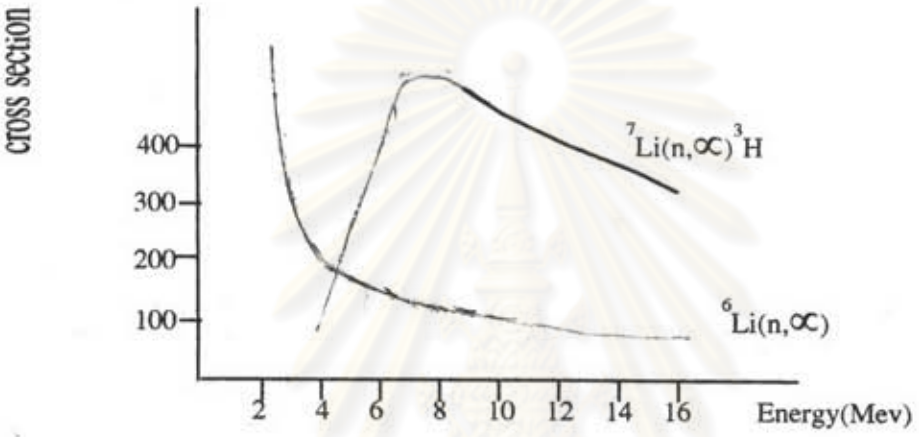
3.2.5 หัววัดรังสีแบบแก้วเรืองรังสี (Li-Glass Scintillator)

หัววัดรังสีนี้ประกอบด้วยธาตุลิเธียมกับซีเรียม อยู่ภายในแก้วซิลิเกต (Sillcate glass) ซึ่งซีเรียมจะเป็นตัวกระตุ้น (Activated) หัววัดชนิดนี้สามารถวัดได้ทั้งรังสีนิวตรอนและแกมมาได้เช่นเดียวกัน ในการวัดรังสีนิวตรอนของหัววัดรังสี NE-905 ต้องอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ ดังนี้

$$^{6}Li + n \rightarrow T + {}^{4}He + 4.8\ MeV \quad .....(3.1).$$

$$^{7}Li + n \rightarrow T + {}^{4}He + n - 2.82\ MeV \quad .....(3.2)$$

อนุภาคอัลฟาและตริเตียม (Tritrium,3H) ที่เกิดขึ้นจากรังสีนิวตรอนดังปฏิกิริยาข้างต้น จะทำให้เกิดสัญญาณแสงภายในหัววัดรังสี สัญญาณแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหลอดไฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tupe) แล้วเข้าสู่ไดโนดและอาโนด ตามลำดับ การวัดรังสีนิวตรอนสามารถวัดรังสีนิวตรอนในช่วงกว้างโดยใช้ความเข้มข้นของ ^{6}Li และ ^{7}Li ต่าง ๆ กัน



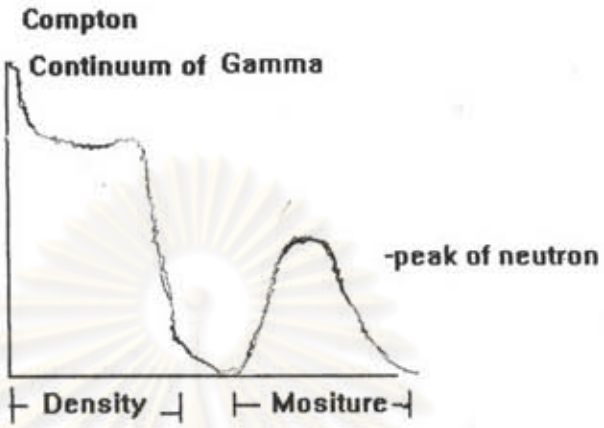
รูปที่ 3.4 Variation of tritium Production Cross sections [5]

จาก รูปที่ 3.4 จะเห็นว่าในช่วงนิวตรอนพลังงานต่ำและปานกลาง การเกิดปฏิกิริยา $^{6}Li(n,\alpha)$ มากกว่า $^{7}Li(n,\alpha)^{3}H$ ปฏิกริยา ^{7}Li จะเกิดเมื่อในรังสีนิวตรอน พลังงานตั้งแต่ 4 MeV ขึ้นไป เนื่องจากหัววัดรังสีชนิดนี้เป็นซินทิลเลเตอร์ที่เป็นของแข็ง (Solid Scintillator) ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูงกว่าหัววัดรังสี 4 ชนิดแรก จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาได้ดีกว่า ทำให้หัววัดรังสีชนิดนี้สามารถใช้วัดรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาได้ด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบของหัววัดรังสีชนิดนี้เป็นธาตุเบา หากไม่มีขนาดใหญ่มากก็จะไม่สามารถดูดกลืนพลังงานจากรังสีแกมมาพลังงานสูงได้ทั้งหมด ทำให้เห็นเพียงส่วนที่ได้จากพลังงานของคอมพ์ตันอิเล็กตรอน (Compton Electron) เท่านั้น หัววัดรังสีชนิดนี้ให้สัญญาณของรังสีนิวตรอนและแกมมาต่างกัน ซึ่งสามารถแยกได้ชัดเจนโดยใช้อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณพัลส์(Pulse Height Analyzer , PHA)

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของหัววัด NE-905

Manutacturer's Identification	Type NE-905
Density (g/cm^3)	2.48
Refractive index	1.55
Melting Point($^{\circ}c$)	1200
γ of emission maximum (nm)	395
Light Output relative to anthrec	20-30%
Decay Constant(ns)	100
Content of Li	6.6 wt%
^{6}Li enrichment	95%
Background α activity per 100 g. of glass(/min)	100-200
Resolution expected for thermal neutrons (depend on glass thickness)	15-28%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนและแกมมาที่ได้จากหัววัด NE-905

3.3 หลักการวัดความชื้นโดยการวัดรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา

ในการวัดความชื้นของวัสดุด้วยรังสีนิวตรอน นอกจากความเข้มรังสีนิวตรอนที่วัดได้จะแปรผันตามความชื้นแล้ว ยังแปรผันตามปริมาณวัสดุด้วย การใช้วิธีส่งผ่านรังสีแกมมาร่วมกับรังสีนิวตรอน จะทำให้สามารถปรับแก้ความแปรปรวนเนื่องจากปริมาณวัสดุได้ ทำให้ผลการวัดความชื้นถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

ในกรณีการวัดความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง จากกฎการลดทอนจะได้ว่า

<u>สำหรับนิวตรอน</u> $I_{nx} = I_{no}e^{-\mu m}$ .....(3.3)

<u>สำหรับแกมมา</u> $I_{\gamma x} = I_{\gamma o}e^{-\mu m}$ .....(3.4)

$$\ln (I_{no}/I_{nx}) = \mu_{nt}m_t + \mu_{nw}m_w \quad \text{.....(3.5)}$$

$$\ln (I_{\gamma o}/I_{\gamma x}) = \mu_{\gamma t}m_t + \mu_{\gamma w}m_w \quad \text{.....(3.6)}$$

เมื่อ I_{no}, I_{nx} คือ ความเข้มของนิวตรอนที่ตกกระทบตัวกลางและความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ เลยตามลำดับ

$I_{\gamma o}$, $I_{\gamma x}$ คือ ความเข้มของรังสีแกมมาที่ตกกระทบตัวกลางและความเข้มของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านไปได้โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ เลยตามลำดับ

μ_{nt} , μ_{nw} คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีนิวตรอนต่อแป้งมันสำปะหลังและต่อตัวอย่างน้ำตามลำดับ

$\mu_{\gamma t}$, $\mu_{\gamma w}$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีแกมมาต่อตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังและต่อตัวอย่างน้ำตามลำดับ

m_w, m_t คือ น้ำหนักของน้ำและน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังต่อตร.ซม. ตามลำดับ

W_w คือ สัดส่วนน้ำหนักของน้ำต่อน้ำหนักรวมของน้ำกับแป้งมันสำปะหลัง

สมการ 3.5 / 3.6,
$$\frac{\ln (I_{no}/I_{nx})}{\ln (I_{\gamma o}/I_{\gamma x})} = \frac{\mu_{nt}m_t + \mu_{nw}m_w}{\mu_{\gamma t}m_t + \mu_{\gamma w}m_w} \qquad \text{.....(3.7)}$$

ให้
$$R = \frac{\ln (I_{no}/I_{nx})}{\ln (I_{\gamma o}/I_{\gamma x})}$$

$$W_w = \frac{m_w}{m_w + m_t} \rightarrow m_t = \frac{m_w}{W_w} - m_w$$

$\therefore$
$$R = \frac{\mu_{nt}\left(\frac{m_w}{W_w} - m_w\right) + \mu_{nw}m_w}{\mu_{\gamma t}\left(\frac{m_w}{W_w} - m_w\right) - \mu_{\gamma w}m_w}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$R = \frac{\mu_{nt}\,(1/W_w - 1) + \mu_{nw}}{\mu_{\gamma_t}\,(1/W_w - 1) + \mu_{\gamma_w}} \qquad \text{.....3.6}$$

$$R\,.\mu_{\gamma_t}\,(1/W_w - 1) + R\,.\mu_{rw} = \mu_{nt}\,(1/W_w - 1) + \mu_{nw}$$

$$R\,.\mu_{\gamma_t}\,(1/W_w - 1) - \mu_{nt}\,(1/W_w - 1) = \mu_{nw} - R\,.\mu_{\gamma_w}$$

$$\frac{1}{W_w} = \frac{1 + \mu_{nw} - R\,.\mu_{\gamma_w}}{R\,.\mu_{\gamma_t} - \mu_{nt}}$$

$$= \frac{R\,.\mu_{\gamma_t} - \mu_{nt} + \mu_{nw} - R\,.\mu_{\gamma_w}}{R\,.\mu_{\gamma_t} - \mu_{nt}}$$

$$\therefore\ W_w = \frac{\mu_{\gamma_t}\,.\,R - \mu_{nt}}{(\mu_{nw} - \mu_{nt}) - R\,(\mu_{\gamma_w} - \mu_{\gamma_t})} \qquad \text{.....(.3.7)}$$

ถ้าไม่มีความชื้น $W_w = 0$ จะได้ว่า

$$R = \frac{\mu_{nt}}{\mu_{\gamma_t}} \qquad \text{.....(3.8)}$$

จากสมการที่ (3.7) จะเห็นได้ว่า ปริมาณความชื้นจะขึ้นอยู่กับค่า R ซึ่งหมายถึงค่า ln (I_{no}/I_{nx}) / ln $(I_{\gamma_o}/I_{\gamma_x})$ แสดงว่าถ้าแป้งมันสำปะหลังมีความชื้นคงที่ อัตราส่วนการลดทอนของรังสีนิวตรอนต่อรังสีแกมมาจะมีค่าคงที่ โดยไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ การใช้รังสีแกมมาร่วมกับรังสีนิวตรอนจึงสามารถใช้งานได้โดยที่ผู้ใช้ไม่ต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง ทำให้สะดวกในการปฏิบัติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย