การวิเคราะห์ธาตุในโบราณวัตถุ ณ พื้นที่ด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา พวงพร ศรีสมบูรณ์* นเรศร์ จันทน์ขาว ศิริชัย หวังเจริญตระกูล

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทรศัพท์ 0-2218-6781 โทรสาร 0-2218-6780 e-mail : poo088@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้ทดลองใช้เทกนิกการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน และ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอนในการวิเกราะห์เชิงกุณภาพโบราณวัตถุ ณ พื้นที่ โดยใช้ต้น กำเนิดนิวตรอนอะเมริเซียม–241/เบริลเลียมความแรง 18.5 GBq หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง แบบเคลื่อนย้ายได้ที่มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 30 % และเครื่องวิเกราะห์สเปกตรัมที่ต่อเข้ากับ ไมโกรกอมพิวเตอร์แบบกระเป๋าหิ้ว ตัวอย่างที่นำมาวิเกราะห์ในห้องปฏิบัติการมี 12 ชนิด ได้แก่ โลหะ สารเคมี ปูนโบราณ รวมทั้งพระพุทธรูป และระฆังสำริด ในภากสนามได้ทำการวิเกราะห์ องก์พระประธานภายในพระอุโบสถวัดหน้าพระเมรุ จังหวัดพระนกรศรีอยุธยา ผลการวิจัยแสดง ให้เห็นว่าเทกนิคนี้สามารถวิเกราะห์ธาตุบางชนิดได้ เช่น โบรอน อะลูมิเนียม ซิลิกอน กลอรีน แกลเซียม ทองแดง เหล็ก และตะกั่ว แต่ไม่มีกวามไวในการวิเกราะห์บางธาตุ เช่น ดีบุกและทองกำ กำสำกัญ : รังสีพรอมต์แกมมา การจับนิวตรอน การชนแบบไม่ยืดหยุ่นจิงนิวตรอน โบราณวัตถุ

In situ Elemental Analysis of Ancient Objects

Using Prompt Gamma-Ray Measurement Techniques

Puangporn Srisomboon* Nares Chankow Sirichai Wangchareontrakul Department of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University Tel. 0-2218-6781 Fax. 0-2218-6780 e-mail : <u>nares.c@eng.chula.ac.th</u>

Abstract

In this research, measurement of prompt gamma-rays from neutron capture and inelastic scattering of neutrons was experimentally investigated to be used for in situ qualitative analysis of elements in ancient objects. A 1.85 GBq Am–241/Be neutron source, a portable high purity germanium detector with a relative efficiency of 30 % and an Inspector 2000 spectrum analyzer connected to a portable microcomputer. In laboratory, 12 test specimens were analyzed including metals, chemicals, mortar, as well as Buddha images and a bronze bell. In the field, a Buddha image at Wat Naphramain in Ayuthaya Province was analyzed. The results indicated that the

technique was capable of analysing some elements such as B, Al, Si, Cl, Ca, Cu, Fe and Pb but was not sensitive to some elements like Sn and Au.

Keywords: Prompt gamma-ray, neutron capture, neutron inelastic scattering, ancient object

บทนำ

การศึกษาและตรวจสอบศิลปโบราณวัตถุก่อนการอนุรักษ์นั้นเป็นสิ่งจำเป็นมาก เพราะ ้ข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับวัตถุเช่น ชนิดของเนื้อวัตถุ ลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี เทคนิค ้โบราณของการผลิตวัตถุนั้น ๆ ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการอนุรักษ์ศิลป ้โบราณวัตถุ เพราะสามารถจะคำเนินการได้โดยไม่ทำถายรูปแบบหรือลักษณะเดิมของศิลป ์ โบราณวัตถุ และยังสามารถนำเอาข้อมูลเหล่านี้ไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อศึกษาทคลองหาวิธีการ ที่เหมาะสมในการอนุรักษ์ศิลปโบราณวัตถุเหล่านั้นได้อย่างถูกต้อง การนำเทคโนโลยีทางด้าน ้นิวเคลียร์มาใช้กับงานวิเคราะห์ศิลปโบราณวัตถุนั้น ในปัจจุบันนี้นับว่ามีประโยชน์มากเนื่องจาก ้ปัญหาที่พบเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน คือมีการปลอมแปลงศิลปโบราณวัตถุขึ้นมากและเป็นการยากที่จะ พิสูจน์ได้ว่าเป็นของแท้หรือไม่ ต้องมีการพิสูจน์ตามหลักฐานทางโบราณกดีและข้อมูลทางด้าน ้วิทยาศาสตร์เข้ามาประกอบกันจะทำให้ข้อมูลน่าเชื่อถือ และเป็นที่ยอมรับจากทั่วโลก ในปัจจุบัน หลายประเทศมีการนำเทคโนโลยีนิวเคลียร์เข้ามาใช้เพิ่มขึ้นซึ่งข้อคีของเทคนิคทางค้านนิวเคลียร์ที่ ้นำมาใช้ กับการวิเคราะห์ศิลปโบราณวัตถุนั้น คือบางเทคนิคสามารถวิเคราะห์ได้แม้มีจำนวน ้ตัวอย่างน้อย และบางเทคนิคสามารถวิเคราะห์ ณ พื้นที่ (in situ analysis)ได้ โดยไม่ต้องมีการเก็บ ้ตัวอย่าง หรือไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive) เหตุผลนี้เองที่เหมาะสมจะนำเทคนิคนี้มาใช้กับ เทคโนโลยีนิวเคลียร์ที่มีการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ศิลปโบราณวัตถุใน งานด้านโบราณคดี ปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น เทคนิค X-ray fluorescence (XRF), เทคนิค Neutron activation analysis (NAA), เทคนิค prompt gamma-ray neutron activation analysis (PGNAA) เป็นต้น ซึ่งวิธี ทั้งหมดเป็นวิธีที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive methods) และศิลปโบราณวัตถุบางชนิดมี ้งนาดใหญ่ไม่สามารถทำการเคลื่อนย้ายเพื่อนำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการได้ หรือไม่สามารถนำ ้ส่วนใดส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการได้ ตัวอย่างเช่น พระประธานในพระอโบสถ ดังนั้น ้จึงต้องมีการนำเครื่องมือเพื่อไปทำการวิเคราะห์ ณ สถานที่ตั้งนั้นและเทคโนโลยีทางค้านนิวเคลียร์ ้จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดทางหนึ่ง มีความถูกต้อง เป็นที่ยอมรับจากสากล แต่ละเทคนิคย่อมมี ข้อจำกัดของการวิเคราะห์บางประการ เช่น เทคนิค XRF สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบที่ผิวของ ้ตัวอย่างเท่านั้น การวิเคราะห์ในระดับที่ลึกจากผิวตัวอย่างลงไปต้องใช้เทกนิคอื่นๆ เช่น เทคนิก PGNAA

ในการวิจัยนี้สนใจปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอยู่สองปฏิกิริยาดังนี้ เทคนิกการวัดรังสีพรอมต์แกมมา จากปฏิกิริยาการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นของนิวตรอน (neutron inelastic scattering) หรือปฏิกิริยา (n,n' γ) จากการที่นิวตรอนเร็วซึ่งมีพลังงานสูงวิ่งเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง แล้วทำให้ นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นจึงปลดปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาออกมาเพื่อกลับสู่สภาวะปกติ พร้อม ทั้งมีนิวตรอนที่มีพลังงานลดลงถูกปลดปล่อยออกมา นิวเคลียสอาจจะถูกกระตุ้นยกระดับพลังงาน จึ้นไปอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นระดับสูง ๆ ได้ โดยขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนเร็ว อีกเทคนิกหนึ่ง ที่สนใจคือเทคนิกการวัดรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) เป็นปฏิกิริยา ดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งจะปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) เป็นปฏิกิริยา ดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งจะปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยาการจับนิวตรอน (n, γ) เป็นปฏิกิริยา ดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งจะปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยากรจับนิวตรอน (n, γ) เป็นปฏิกิริยา ดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งจะปล่อยรังสีพรอมต์แกมมาจากปฏิกิริยากรจับนิวตรอน (n, γ) เป็นปฏิกิริยา กรอบนิวตรอน ซึ่งจะปล่อยรังสีงอมต์แกมมาจากปฏิกิริยากรอบนิวตรอน (n, γ) เป็นปฏิกิริยา กรีตองคนต้องมากเกิดขึ้นได้ดีกับนิวตรอนพลังงานด่า ได้แก่ เทอร์มัลนิวตรอน หรือ เอพิเทอร์มัลนิวตรอนซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงาน (exothermic reaction) คือมีก่า Q (Q-value) เป็นบวก เนื่องจากมวลของนิวไกลด์เริ่มด้นรวมกับมวลของนิวตรอน ซึ่งเป็นมวลก่อน เกิดปฏิกิริยา มีก่ามากกว่ามวลของนิวไลอด์หลังเกิดปฏิกิริยา รังสีพรอมต์แกมมาที่ได้จากปฏิกิริยา การจับนิวตรอน (n, γ) นี้ มีพลังงานก่อนข้างสูงจนถึงระดับ 10 MeV

ີວີ້ສີ່ຄາຽວີຈັຍ

ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้คือ ²⁴¹Am/Be ความแรงรังสี 500 mCi และใช้หัววัครังสี HPGe ที่ มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 30% วิเคราะห์พลังงานรังสีพรอมต์แกมมาที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบ หลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA) บันทึกข้อมูลพลังงานที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ แบบหลายช่อง ด้วยโปรแกรม Genie 2000 การวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการ วิจัยในห้องปฏิบัติการ ส่วนที่สองเป็นการวิจัยที่ภาคสนาม ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ใน ห้องปฏิบัติการได้แก่ ปูนโบราณ พระพุทธรูปทองเหลือง พระพุทธรูปโลหะผสม พระพุทธรูป โลหะสำริด และระฆังโลหะสำริด จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์พระประธานในพระอุโบสถ วัดหน้า พระเมรุ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นพระพุทธรูปทรงเครื่องมีพระนามว่า "พระพุทธนิมิตวิชิต มารโมลีศรีสรรเพชญ์บรมไตรโลกนาถ "





รูปที่ 1 ตัวอย่างการจัคระบบวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 2 ตัวอย่างการจัคระบบวิเคราะห์ในภาคสนาม



1. ผลการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากปูน โบราณ



รูปที่ 3 ปูนโบราณสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาจากปูนโบราณ





2. ผลการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูปทองเหลือง

รูปที่ 4 พระพุทธรูปทองเหลืองและสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูปทองเหลือง



รูปที่ 4 (ต่อ) สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูปทองเหลือง 3. ผลการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูปโลหะผสม



รูปที่ 5 พระพุทธรูปโลหะผสมและสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุธรูปโลหะผสม



4. ผลการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูปโลหะสำริด





รูปที่ 6 พระพุทธรูปโลหะสำริดและสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูปโลหะสำริด

5. ผลการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากระฆังโลหะสำริค



รูปที่ 7 ระฆังโลหะสำริดและสเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาจากระฆังโลหะสำริด





รูปที่ 7 (ต่อ) สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาจากระฆังโลหะสำริค

6. ผลการวิเคราะห์รังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูป วัดหน้าพระเมรุ จ. พระนครศรีอยุธยา





(ก)

(ป)



รูปที่ 8 พระพุทธรูปทรงเครื่อง(ก) การจัดระบบวิเคราะห์ (บ) และสเปกตรัมรังสี พรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูปทรงเครื่อง



รูปที่ 8 (ต่อ) สเปกตรัมรังสีพรอมต์แกมมาจากพระพุทธรูปทรงเครื่อง

ตัวอย่าง	พลังงาน	นิวไคลด์	ปฏิกิริยา	ตัวอย่าง	พลังงาน	นิวไคลด์	ปฏิกิริยา
	(keV)				(keV)		
ปูนโบราณ	1775.7	²⁸ Si	(n,n [/] γ)	พระพุทธรูป	960.4	⁶³ Cu	$(n,n'\gamma)$
	1938.9	²⁸ Si	(n,n [/] γ)	ทองเหลือง	990.2	⁶⁴ Zn	$(n,n'\gamma)$
	1948.2	⁴⁰ Ca	(n,γ)		1037.8	⁶⁶ Zn	(n,n [′] γ)
	3532.8	²⁸ Si	(n, γ)		1075.2	⁶⁷ Zn	(n, γ)
พระพุทธรูป	159.6	⁶³ Cu	(n,γ)		1113.4	⁶⁵ Cu	(n,n [/] γ)
ทองเหลือง	278.7	⁶³ Cu	(n,γ)		1324.3	⁶³ Cu	(n,n [′] γ)
	668.8	⁶³ Cu	(n,n'γ)	ระฆังสำริด	278.7	⁶³ Cu	(n, γ)
พระพุทธรูป	158.3	⁶³ Cu	(n, γ)		668.8	⁶³ Cu	$(n,n'\gamma)$
โลหะผสม	277.7	⁶³ Cu	(n, γ)		960.4	⁶³ Cu	$(n,n'\gamma)$
	669.0	⁶³ Cu	(n,n'γ)		1113.4	⁶⁵ Cu	(n,n [/] γ)
	846.3	⁵⁶ Fe	(n,n'γ)	พระพุทธรูป	159.6	⁶³ Cu	(n, γ)
	961.4	⁶³ Cu	(n,n'γ)	ทรงเครื่อง	278.7	⁶³ Cu	(n, γ)
	991.3	⁶⁴ Zn	(n,n [/] γ)		647.6	⁶³ Cu	(n, γ)
	1077.4	⁶⁷ Zn	(n, γ)		668.6	⁶³ Cu	$(n,n'\gamma)$
	1114.9	⁶⁵ Cu	(n,n [′] γ)		960.4	⁶³ Cu	$(n,n'\gamma)$
พระพุทธรูป	159.6	⁶³ Cu	(n, γ)		1113.4	⁶⁵ Cu	$(n,n'\gamma)$
โลหะสำริด	278.7	⁶³ Cu	(n, γ)		1325.1	⁶³ Cu	(n,n [/] γ)
	787.9	³⁵ C1	(n, γ)		1409.3	⁶³ Cu	$(n,n'\gamma)$
	960.4	⁶³ Cu	(n,n [′] γ)		1479.0	⁶⁵ Cu	$(n,n'\gamma)$
	1162.8	³⁵ C1	(n, γ)		1938.9	²⁸ Si	(n,n [/] γ)
	1325.1	⁶³ Cu	(n,n [′] γ)		1948.2	⁴⁰ Ca	(n, γ)
	1946.5	⁴⁰ Ca	(n, γ)		3532.0	²⁸ Si	(n, γ)
	1954.2	³⁵ C1	(n, γ)				

ตารางที่ 1 พลังงานของรังสีพรอมต์แกมมาที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่าง

สรุปผลการวิจัย

	1			
ตัวอย่าง	ชาตุที่สามารถวิเคราะห์	ที่มาของธาตุที่วิเกราะห์		
1. ปูนโบราณ	ซิลิกอน แคลเซียม	เป็นวัสคุที่ใช้ในการทำปูนโบราณ คือ ทราย (SiO ₂)		
		และ CaCO ₃		
2. พระพุทธรูปทองเหลือง	ทองแคง สังกะสี	จากโลหะทองเหลืองมีส่วนผสมระหว่าง		
		โลหะทองแคงและ โลหะสังกะสี		
3. พระพุทธรูปโลหะผสม	ทองแคง สังกะสี	จากโลหะผสมระหว่าง ทองแดง สังกะสี และเหล็ก		
4. พระทุทธรูปโลหะสำริด	ทองแดง	ทองแดงเป็นส่วนประกอบหลักของโลหะสำริด		
	คลอรีน	สารประกอบกลอไรค์เป็นสนิมสีเขียวอ่อนที่เกิด		
		ขึ้นกับโลหะสำริด		
	แคลเซียม	จากดินที่อยู่ภายในพระพุทธรูป		
5. ระฆังโลหะสำริด	ทองแดง	ทองแดงเป็นส่วนประกอบหลักของโลหะสำริด		
6. พระพุทธรูปทรงเครื่อง	ทองแดง	ทองแดงเป็นส่วนประกอบหลักของโลหะสำริด		
	ซิลิกอน แคลเซียม	จากปูนโบราณที่มีการโบกทับก่อนที่จะลงรักปีดทอง		

ตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์ธาตุที่ได้จากตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคการวัดรังสีพรอมต์แกมมา หลัง จาก เกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในระดับที่ลึกลงไปจากผิวของ ตัวอย่าง แต่ความไวในการวิเคราะห์ของธาตุแต่ละตัวขึ้นอยู่กับค่าภาคตัดขวางของธาตุนั้นๆ และ ปริมาณที่มีอยู่ในโลหะผสมนั้น การวิเคราะห์โลหะสำริดทั้งในห้องปฏิบัติการ และภาคสนามไม่

สามารถวิเคราะห์โลหะดีบุกได้เนื่องจากโลหะดีบุกที่มีการเติมลงไปในโลหะผสมมีปริมาณน้อย และจากการค้นคว้าพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปการเติมดีบุกจะถูกลดปริมาณลง และไม่สามารถวิเคราะห์ ทองคำที่ปิดที่ผิวของพระพุทธรูปทรงเครื่องได้ เนื่องจากทองคำที่ปิดนั้นใช้ทองคำเปลวที่มีความ หนาเพียง 0.1 ไมโครเมตร ปิดประมาณ 4 - 5 ชั้น ความหนาทั้งหมดคือ 0.5 ไมโครเมตร ทำให้ นิวตรอนทะลุผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาภายใต้ส่วนที่ทำการปิดทอง จากตารางที่ 2 จะพบว่าภายใต้ชั้น ที่ปิดทองมีปูนโบราณอยู่ ซึ่งจะตรงกับประวัติที่มีการบันทึกไว้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอกราบ ขอบพระคุณเจ้าอาวาสวัคหน้าพระเมรุ จังหวัคพระนกรศรีอยุธยา ที่ให้ความกรุณาใช้สถานที่เพื่อ ใช้ทำงานวิจัย ขอขอบพระกุณอุทยานประวัติศาสตร์ พระนกรศรีอยุธยา ที่อำนวยกวามสะดวก งานวิเกราะห์ภากสนาม ขอขอบพระกุณอาจารย์จเด็จ เย็นใจ กุณธนัญชัย พิรุณพันธ์ กุณเฉลิม พงษ์ โพธิ์ลี้ และคุณภูริต กวินรัมย์ สำหรับการช่วยเหลือที่ดีมากในการปฏิบัติงานภากสนาม

เอกสารอ้างอิง

- พรรณี เสถียรศรี, 2542. การวิเคราะห์ธาตุหนักบางชนิดในดิน ณ พื้นที่โดยใช้เทคนิคนิวตรอน.
 วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Curtiss, L.F., 1959. Introduction to Neutron Physics. Affifiated East West Press, New Delhi.
- นเรศร์ จันทน์ขาว., 2541. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. เอกสารการสอนวิชา 2111660 Industrial Radiation Imaging. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- Cunningham, J.B., Sowerby, B.D., Rafter, P.T., Greenwood-Smith, R., 1984. Int. J. Appl. Radiat. Isot. 35, 635-643.
- Cheng, C.Y., Coope, D.F., Filo, A. J., Yates, S.W., 1978. Elementary Analysis by Gamma-Ray Detection Following Inelastic Neutron Scattering. J. Radio. Analyt. Chem. 46, 343-355.
- Tuli, J.K., 1998. Thermal Neutron Captured Gamma Ray. National Nuclear Data Center. Brookhaven National Laboratory, New York.
- Cow. A. J., Francois, P.E., Gatrell, R.P., 1968. The Design of Neutron Howitzers. Int. J. Appl. Radiat. Isot., 19, 541-544.