

SsSci^{2nd}conference 2019

การประชุมสวนสุนันทาวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 2
“วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน”

The 2nd Suan Sunandha National and International Academic
Conference on Science and Technology (SsSci 2019)

“Science, Technology and Innovation
for Sustainable Development”

วันศุกร์ที่ 8 พฤศจิกายน 2562
8th November 2019

ณ โรงแรมเดอะรอยัลริเวอร์ กรุงเทพมหานคร
The Royal River Hotel, Bangkok, Thailand

การพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่สามารถซ่อมแซมตัวเองจากวัสดุเชิงประกอบ
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และซาแมเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3)
Development of Self-healing Neutron Shielding Materials Based on
Polyvinyl alcohol (PVA) and Samarium Oxide (Sm_2O_3) Composites

ภิญญาพัชญ์ เทียมดวงตะวัน¹, เอกชัย วิมลมาลา², ดร.ฤทธิ มีสัตย์³, ดร.เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง⁴

¹ ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, e-mail: pinyapach.ti@live.ku.th

² กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
e-mail: ekachai.wim@kmutt.ac.th

³ ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, e-mail: fscirim@ku.ac.th

⁴ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, e-mail: kiadtisak.s@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนระดับพลังงานต่ำ (Thermal neutron) ที่สามารถซ่อมแซมตัวเอง (Self-heal) เมื่อเกิดการฉีกขาดของชิ้นงานจากวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) ที่เติมสารตัวเติมซาแมเรียมออกไซด์ (Samarium Oxide; Sm_2O_3) ที่มีคุณสมบัติในการเกิดอันตรกริยากับอนุภาคนิวตรอนได้ดี เนื่องจากมีค่าภาคตัดขวางแบบดูดซับกับอนุภาคนิวตรอนสูง โดยเติม Sm_2O_3 ที่ปริมาณ 0, 4, 8 และ 12wt.% ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเติมสารตัวเติม Sm_2O_3 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดก่อนทำการตัดเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำสมดุล (%EWC) ของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง นอกจากนี้การซ่อมแซมตัวเองของวัสดุเชิงประกอบ PVA/ Sm_2O_3 มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น (6 ชั่วโมง) แต่การเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมส่งผลให้ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุเชิงประกอบลดลง โดยวัสดุที่มีการเติมสารตัวเติม Sm_2O_3 ปริมาณ 12wt.% และความหนาประมาณ 20 มม. มีประสิทธิภาพในการกำบังนิวตรอนได้สูงสุด ทั้งนี้ผลงานวิจัยนี้ สามารถนำไปพัฒนาประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับขนย้ายต้นกำเนิดอนุภาคนิวตรอนเพื่อทดแทนวัสดุชนิดเดิมที่แตกหักหรือเกิดความเสียหายได้ง่าย เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีให้มากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: สมบัติเชิงกล, อนุภาคนิวตรอน, วัสดุกำบัง, พอลิไวนิลแอลกอฮอล์, ซาแมเรียมออกไซด์,

ABSTRACT

This work aimed to study and to develop self-healing thermal neutron shielding materials from polyvinyl alcohol (PVA) with the addition of samarium oxide (Sm_2O_3), which could greatly interact with neutrons due to its high neutron absorption cross section. The Sm_2O_3 contents in this work were varied from 0 to 4, 8, and 12wt%, respectively. The results showed that the increase in Sm_2O_3 contents led to the increases in tensile strength and elongation at break, but the decrease in the value of percentage of Equivalent Water Content (%EWC). Furthermore, the results indicated that the increase in the healing duration time led to the increase in self-healing properties. However, the increase in Sm_2O_3 contents led to the decrease in overall self-healing properties, of which 12-wt% Sm_2O_3 with 20 mm thickness had the highest neutron shielding abilities. In summary, the outcomes of this work could be used as a basis to develop neutron transportation casks in order to replace previously used materials that are prone to be damaged, which could substantially improve safety for radiation personnel.

Keywords: mechanical property, neutron, shielding, polyvinyl alcohol, samarium oxide

บทนำ

อนุภาคนิวตรอน (n) เป็นอนุภาคทางนิวเคลียร์ที่ไม่มีประจุทางไฟฟ้า จึงทำให้อนุภาคนิวตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้ดีกว่าอนุภาคที่มีประจุชนิดอื่น เช่น อนุภาคโปรตอน (p) หรืออนุภาคแอลฟา (α) ซึ่งในปัจจุบัน มีการนำอนุภาคนิวตรอนมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย ได้แก่ การใช้อนุภาคนิวตรอนรักษามะเร็งสมอง (Boron Neutron Capture Therapy; BNCT) (Barth et al., 1995) การถ่ายภาพแบบไม่ทำลายโดยใช้ลำอนุภาคนิวตรอน (Non-destructive neutron imaging) (Turkoglu et al., 2013) การใช้อนุภาคนิวตรอนเพื่อการศึกษาและพัฒนางานวิจัยด้านวัสดุ (Muramatsu and Yoshida, 1995) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม อนุภาคนิวตรอนสามารถเกิดอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) กับอะตอมตัวกลางที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันได้ดี เช่น อะตอมของธาตุไฮโดรเจนหรือธาตุฮีเลียม เป็นต้น โดยอนุภาคนิวตรอนมีการถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมตัวกลางจนก่อให้เกิดไอออนหรืออนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งอาจส่งผลเสียหรือผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากร่างกายมนุษย์มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก (มากกว่า 60%) ซึ่งอะตอมไฮโดรเจนในน้ำอาจเปลี่ยนเป็นไอออนและทำอันตรายกับเซลล์ของร่างกายได้ (Pelliccioni et al., 1998) จากตารางที่ 1 ซึ่งเปรียบเทียบอันตรายจากการได้รับอนุภาคนิวตรอนเทียบกับรังสีก่อไอออนประเภทอื่น โดยพิจารณาจากค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามประเภทของรังสี (Radiation weighting factor) โดยที่ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามประเภทของรังสีก่อไอออนมีความเป็น Positive กับปริมาณรังสี ซึ่งอนุภาคนิวตรอนมีค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักที่ 5-20 สูงกว่ารังสีก่อไอออนประเภทอื่น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการหาวิธีการป้องกันอันตรายหรือผลกระทบของผู้ปฏิบัติงานจากการได้รับอนุภาคนิวตรอนในปริมาณที่สูงเกินกำหนด เพื่อให้สามารถปฏิบัติงานได้อย่างปลอดภัย

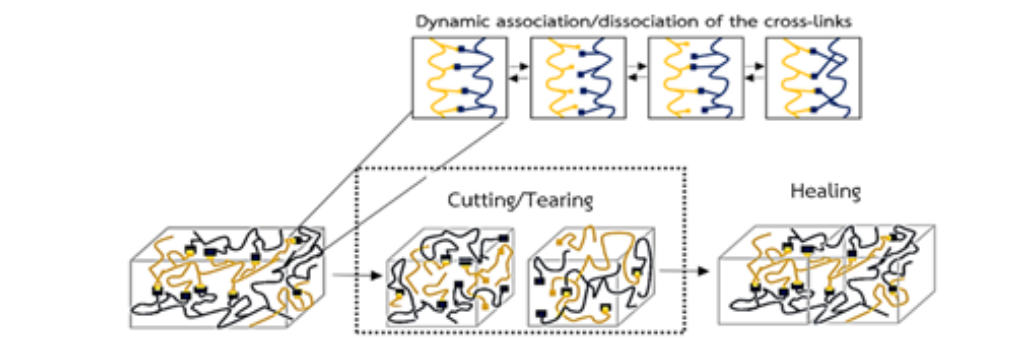
ตารางที่ 1 ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนักตามประเภทของรังสีก่อไอออน (Radiation weighting factor)

ชนิดของรังสีก่อไอออน	พลังงาน	ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก
Photon, Electrons	All energy	1
Proton	< 20 MeV	5
	< 10 keV	5
	10 - 100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
Neutron	2 - 20 MeV	10
	> 20 MeV	5

โดยทั่วไปหลักการป้องกันอันตรายจากการปฏิบัติงานกับรังสี ผู้ปฏิบัติงานต้องยึดปฏิบัติตามกฎ “As Low As Reasonably Achievable” หรือ “ALARA” อย่างเคร่งครัด โดย ALARA ประกอบด้วยหลักการสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ เวลา (Time) ระยะทาง (Distance) และอุปกรณกับังรังสี (Shielding) (Kaplan et al., 2016) กล่าวคือ ผู้ปฏิบัติงานควรใช้เวลาปฏิบัติงานในบริเวณที่มีรังสีให้สั้นที่สุดและอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีให้มากที่สุด นอกจากนี้ ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องใช้อุปกรณกับังรังสีที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับลักษณะงานที่ปฏิบัติ เพื่อป้องกันการได้รับรังสีโดยไม่จำเป็น โดยทั่วไปวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน นิยมใช้วัสดุที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุไฮโดรเจนปริมาณสูง เช่น น้ำ ยาง หรือพลาสติก เป็นต้น ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาแผ่นกำบังอนุภาคนิวตรอนในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการใช้งาน เช่น การใช้วัสดุโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) ผสมกับโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) ปริมาณ 7, 15 และ 24 phr (part per hundred of rubber/resin) เป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งผลการวิจัยพบว่า HDPE ผสม B_4C ปริมาณ 24 phr สามารถลดพลังงานของอนุภาค

นิวตรอนพลังงานต่ำได้สูงที่สุดและมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี (Yasin and Khan, 2008) นอกจากนี้ มีการนำพาราฟิน ผสมกับยางมะตอยและไดโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) ที่ปริมาณ 7, 14, 21, 28 และ 35 wt.% เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุกำบัง อนุภาคนิวตรอนคุณภาพสูงและต้นทุนต่ำ ซึ่งผลการวิจัยพบว่า การเติม B_2O_3 ที่ปริมาณ 35 wt.% วัสดุมีประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอนสูงที่สุดและวัสดุสามารถทนต่อการแตกหักได้ดีกว่าวัสดุที่ไม่มีการเติมยางมะตอย (Toyen and Saenboonruang, 2017) อีกทั้งมีการนำน้ำยางพาราธรรมชาติ (Liquid natural rubber; LNR) ผสมกับ HDPE และ B_4C ปริมาณ 0-30 wt.% ผลิตเป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่น ซึ่งผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น โดยการเติม B_4C ปริมาณ 30 wt.% สามารถลดพลังงานของอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำได้สูงที่สุด (Zali et al., 2018)

แต่ทั้งนี้วัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนดังที่กล่าวมาข้างต้น มีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ วัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่ผลิตจากยางธรรมชาติ มีความซับซ้อนในด้านกระบวนการขึ้นรูป และมีการใช้สารเคมีบางชนิดที่อาจเป็นพิษกับ ผู้ปฏิบัติงานได้ (Incavo and Schafer, 2006) หรือวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่ผลิตจากพลาสติกเสริมสารป้องกันรังสีมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นต่ำ ในขณะที่วัสดุที่ผลิตจากพาราฟิน เกิดการแตกหักได้ง่าย อาจทำให้เกิดการรั่วไหลของรังสี ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพหรือคุณสมบัติพิเศษด้านการซ่อมแซมตัวเองเมื่อเกิดการแตกหักของวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน ซึ่งสามารถลดต้นทุนและยืดอายุการใช้งานได้ อีกทั้งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานในกรณีที่เกิดความเสียหายกับวัสดุกำบัง จึงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้กระบวนการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุ อาจเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติหลังจากวัสดุเกิดความเสียหายหรืออาศัยกลไกการกระตุ้นบางอย่าง เช่น แสง ความร้อน การแช่แข็ง หรือค่า pH เป็นต้น ในการซ่อมแซมตัวเอง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการใช้ วัสดุพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA) ผลิตเป็นวัสดุไฮโดรเจล (Hydrogel) ที่ความเข้มข้น 35 wt.% นำไปแช่แข็งและละลาย (Freezing and thawing) เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางโดยการตกผลึกของพันธะไฮโดรเจน และนำมาทดสอบการซ่อมแซมตัวเอง ดังแสดงในภาพที่ 1 ด้วยกระบวนการ Constitutional dynamic chemistry (Wei et al., 2014) ผลการวิจัยพบว่า วัสดุ PVA สามารถซ่อมแซมตัวเองได้หลังการตัดหรือฉีกขาด (Cutting and Tearing) โดยเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่บริเวณรอยต่อของชิ้นงาน ซึ่งสมบัติความต้านแรงดึงของชิ้นงานที่ซ่อมแซมตัวเองมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างชิ้นงานก่อนการตัด (Zhang et al., 2012)



ภาพที่ 1 กระบวนการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุไฮโดรเจลบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน

นอกจากนี้ เพื่อให้วัสดุที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ มีประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอนได้ดีขึ้น จึงมีการเติมสารประกอบของธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption cross section; σ) ที่สูง เช่น ไดโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) หรือซาแมเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3) ในวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งธาตุโบรอน (B) และธาตุซาแมเรียม (Sm) มีค่าเฉลี่ย σ สูงถึง 767 และ 5,922 barn ตามลำดับ โดยงานวิจัยที่ผ่านมา มีการผสม Sm_2O_3 ปริมาณ 21 wt.% กับ Polyimide และเติม carbon-fiber เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบ พัฒนาเป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนประสิทธิภาพสูง ผลการวิจัยพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่มีความหนา 3 ซม. สามารถลดจำนวนอนุภาคนิวตรอนให้มีค่าเท่ากับจำนวนอนุภาคนิวตรอนในธรรมชาติ ซึ่งวัสดุที่มีการเติม Sm_2O_3 สามารถลดทอนอนุภาคนิวตรอนได้ดีกว่าวัสดุที่ไม่มีการเติม Sm_2O_3 (Wang et al., 2015)

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่ผลิตจากวัสดุประเภท PVA ซึ่งมีคุณสมบัติในการซ่อมแซมตัวเองหากเกิดความเสียหายกับตัววัสดุ ผสมกับสารตัวเติม Sm_2O_3 ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดทอนจำนวนอนุภาคนิวตรอนให้กับวัสดุหลักได้ ที่ปริมาณ 0, 4, 8 และ 12 wt.% เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนประสิทธิภาพสูง โดยมีการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน (Neutron shielding properties) สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties) และสมบัติการซ่อมแซมตัวเอง (Self-healing properties) ซึ่งผลงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่ต้องการความยืดหยุ่นและสามารถซ่อมแซมตัวเองได้ เช่น บรรจุภัณฑ์ขนย้ายต้นกำเนิดอนุภาคนิวตรอนเพื่อใช้ทดแทนวัสดุชนิดเดิม อีกทั้งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงาน และเป็นทางเลือกในการใช้งานด้านการแพทย์ งานวิจัย งานอุตสาหกรรม ที่สามารถลดการนำเข้วัสดุป้องกันรังสีจากต่างประเทศที่มีราคาแพง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ Polyvinyl alcohol ต่อปริมาณสารตัวเติม Sm_2O_3 ที่ปริมาณต่างๆ
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมและความหนาของวัสดุเชิงประกอบ PVA/ Sm_2O_3 ต่อสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน
3. เพื่อศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตัวเอง (Self-healing) และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ PVA/ Sm_2O_3

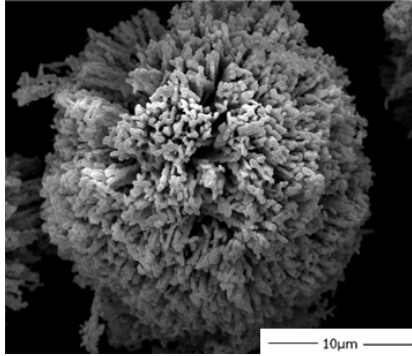
ระเบียบวิธีวิจัย

1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยแสดงในตารางที่ 2 และทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารตัวเติมผง Sm_2O_3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากบริษัท Philips รุ่น XL30 ประเทศญี่ปุ่น พบว่า สารตัวเติม Sm_2O_3 มีลักษณะอนุภาคมีผิวพรุนและหยาบ ค่อนข้างกลม ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 18.4 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2

ตารางที่ 2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

วัตถุดิบ/ สารเคมี	สมบัติ	ปริมาณที่ใช้ (wt.%)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ผู้ผลิต/จำหน่าย
PVA	MW:145000 g/mol, Hydrolysis > 99%	20	0.5	Richest Group, Shanghai, China.
Sm_2O_3	99.99%	0, 4, 8 และ 12	8.9	Richest Group, Shanghai, China.
Deionized water	น้ำปราศจากไอออน	68-80	1.0	Faculty of Science Kasetsart University



ภาพที่ 2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาค Sm₂O₃ ด้วยเทคนิค SEM (กำลังขยาย 5000 เท่า)

2. การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃

ทำการเตรียมสารละลาย PVA ที่ปริมาณ 20%wt โดยแช่ PVA ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 12°C ระยะเวลา 12 ชม. จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85°C ระยะเวลา 1 ชม. โดยกวนสาร PVA ให้ละลายในน้ำเป็นเนื้อเดียวกัน ต่อจากนั้นเติมสารตัวเติม Sm₂O₃ ที่ปริมาณต่างๆ และทำการกวนต่อจนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (เวลาประมาณ 10 นาที) และนำสารละลายที่ได้เทลงแม่พิมพ์กระจกขนาด 15 × 15 ซม.². ความหนาชิ้นงาน 5 มม. แล้วนำแผ่นพลาสติกใสปิดทับด้านบนแม่พิมพ์กระจกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 20-25°C) เป็นเวลา 30 นาที ต่อจากนั้นนำชิ้นงานไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ -30°C เป็นเวลา 1 ชม. นำชิ้นงานห่อด้วยฟิล์มพลาสติกใสและเก็บไว้ในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิห้องเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำจากตัวชิ้นงาน

3. การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃

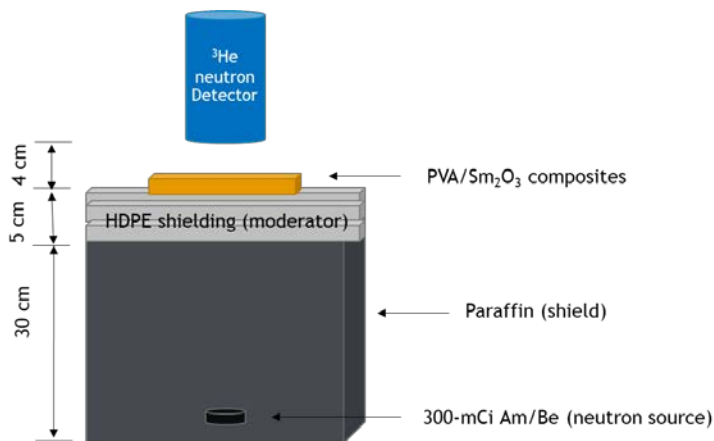
นำแผ่นวัสดุเชิงประกอบ ทดสอบลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากบริษัท Philips รุ่น XL30 ประเทศญี่ปุ่น และทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5kN ประเทศญี่ปุ่น ใช้ความเร็วในการดึง 500 มม./นาที

4. การทดสอบสมบัติการซ่อมแซมตัวเอง

นำชิ้นงานทดสอบ (รูปร่างดรัมเบลล์) ที่ได้จากการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง (ตามมาตรฐาน ASTM D412) มาตัดแบ่งครึ่งบริเวณตรงกลางชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานทั้งสองส่วนวางต่อกันบริเวณรอยตัดในภาชนะปิดสนิท ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 20-25 °C) ทดสอบการเชื่อมติดที่บริเวณรอยตัด ที่เวลาทดสอบต่างๆ ดังนี้ 1 ชม. และ 6 ชม. ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการซ่อมแซมตัวเอง (บริเวณรอยต่อที่เชื่อมติดกัน) ทดสอบความแข็งแรงรอยต่อทางด้านสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและการยืดตัว ตามหัวข้อที่ 2.3

5. การทดสอบสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน

การทดสอบการกำบังอนุภาคนิวตรอน ด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยใช้หัววัดจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่มีการเติมก๊าซฮีเลียม-3 (Helium-3) การทดสอบสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนตรวจวัดเพื่อหาอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอน ชนิด ²⁴¹Am/Be ที่ผ่าน (I) และไม่ผ่าน (I₀) การลดทอนของวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃ (I/I₀) ที่ปรับเปลี่ยน Sm₂O₃ ที่ปริมาณ 0, 4, 8 และ 12 wt.% และศึกษาความหนาของชิ้นงานที่ 5, 10, 15, 20 และ 25 มม. ตามลำดับ โดยวางชิ้นงานห่างจากหัวตรวจวัดอนุภาคนิวตรอนประมาณ 5 ซม. ทำการเชื่อมต่อหัววัดอนุภาคนิวตรอนกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณและอุปกรณ์ประมวลผล ตรวจวัดชิ้นงานซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย I/I₀ ของแต่ละชิ้นงาน



ภาพที่ 3 การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบตรวจวัดอนุภาคนิวตรอน

6. การวัดปริมาณน้ำสมดุล (Equivalent Water Content; EWC)

การวัดปริมาณน้ำสมดุล เป็นการตรวจสอบความสมดุลของการดูดซึมน้ำของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃ โดยเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน ขนาด 2 × 2 ซม.². แช่ในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) จนกระทั่งเกิดการดูดซึมน้ำโดยสมบูรณ์ (น้ำหนักชิ้นงานที่บวมตัวมีค่าคงที่ โดยแช่น้ำรวมทั้งหมด 8 วัน) บันทึกค่าเป็นน้ำหนักของตัวอย่างชิ้นงานที่ดูดซึมน้ำ (W_s) จากนั้นนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอบที่อุณหภูมิ 45°C จนกระทั่งตัวอย่างชิ้นงานมีน้ำหนักที่ไม่เปลี่ยนแปลง (คงที่) ทำการบันทึกค่าน้ำหนักตัวอย่างแห้ง (W_d) คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำสมดุล (Percentage of equilibrium water content; EWC%) อ้างอิงตามงานวิจัยของ Lin and Li, 2014. ดังแสดงในสมการที่ 1

$$EWC\% = \frac{W_s - W_d}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

ผลการวิจัย

สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ PVA ที่สารตัวเติม Sm₂O₃ ปริมาณต่างๆ

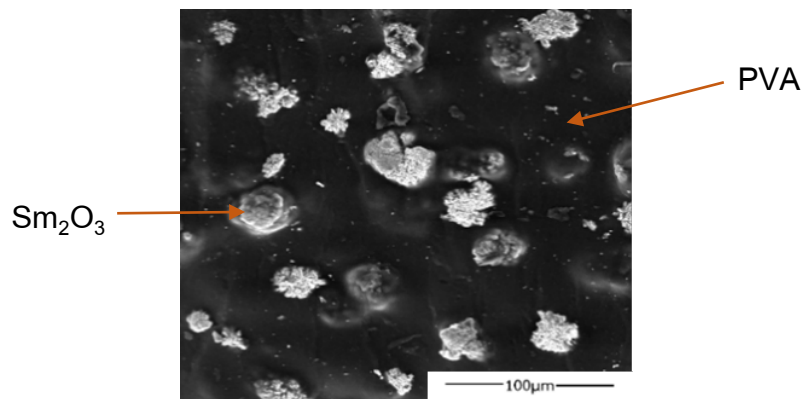
ตารางที่ 3 ผลสมบัติเชิงกลก่อนตัด และเวลาหลังการเชื่อมต่อรอยตัด และปริมาณน้ำสมดุล (%EWC) ของวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃

ปริมาณ Sm ₂ O ₃ (wt.%)	EWC (%)	ความต้านทานต่อแรงดึง (kPa)			การยืดตัว ณ จุดขาด (%)		
		ก่อนตัด	ระยะเวลาเชื่อมต่อ		ก่อนตัด	ระยะเวลาเชื่อมต่อ	
			1 ชม.	6 ชม.		1 ชม.	6 ชม.
0	92.0±0.7	56±8.5	45 ±1	60 ±12	603±65	639±141	578±42
4	88.7±3.4	97±17	54±1	75±10	591±55	512±248	535±106
8	89.0±1.7	123±15	53 ±2	87±23	556±181	339±168	391±65
12	81.2±0.2	171±55	63 ±3	104±15	687±125	232±111	333±104

จากผลสมบัติเชิงกลก่อนตัด และเวลาหลังการเชื่อมต่อของชิ้นงาน และปริมาณน้ำสมดุล (%EWC) ของวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃ แสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของวัสดุเชิงประกอบ PVA ที่เติมสารตัวเติม Sm₂O₃ ที่ปริมาณ 4, 8 และ 12wt.% ก่อนทำการตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ Sm₂O₃ ที่ความหยาบและ

ความพรุนของพื้นผิว จึงสามารถยึดเกาะทางกายภาพ (Physical interlocking) กับเฟสของ PVA ได้ดี ดังแสดงในภาพที่ 4 นอกจากนี้สอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำสมดุล (%EWC) ของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น แสดงถึงการเกิดพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ของสายโซ่ PVA เพิ่มขึ้น (Lin and Li, 2014)

ส่วนผลของสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ PVA ที่เติมสารตัวเติม Sm_2O_3 หลังการเชื่อมต่อที่เวลา 1 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามสารตัวเติม Sm_2O_3 เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ของสายโซ่ PVA ที่เพิ่มขึ้น ดังที่ได้กล่าวข้างต้น แต่สมบัติเชิงกลโดยรวมก็มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานก่อนตัด อีกทั้งพบว่า เวลาหลังการเชื่อมต่อที่มากขึ้น (6 ชั่วโมง) ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนในกรณีของค่าการยึดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารตัวเติม Sm_2O_3 เข้าไปขัดขวางการเชื่อมต่อของ PVA ที่เป็นเฟสหลัก (PVA matrix) ในวัสดุเชิงประกอบ (Xiaozhou et al., 2010)



ภาพที่ 4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ PVA/ Sm_2O_3 ด้วยเทคนิค SEM

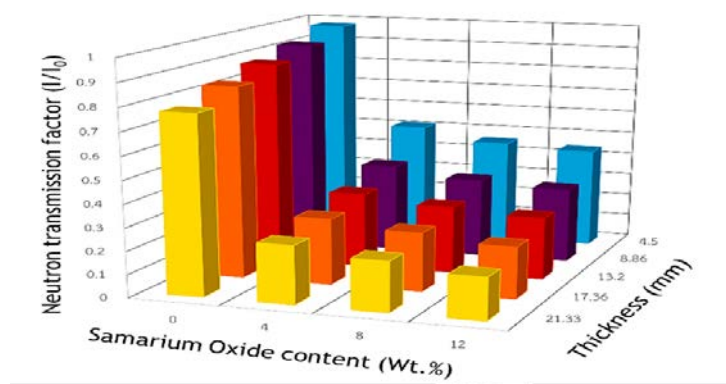
สมบัติการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุเชิงประกอบ PVA ที่สารตัวเติม Sm_2O_3 ปริมาณต่างๆ

จากผลประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเอง ของวัสดุเชิงประกอบ PVA/ Sm_2O_3 ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น (6 ชั่วโมง) ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณผิววัสดุเชิงประกอบที่ขาดออกจากกันมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเกิดขึ้น และมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเหล่านี้ที่แพร่ผ่านบริเวณผิวหน้าของรอยต่อเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเชื่อมต่อของชิ้นงานทั้งสอง พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น อาจจะมีโอกาสเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (Zhang et al., 2012) และเมื่อเติมปริมาณสารตัวเติม Sm_2O_3 พบว่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของ PVA/ Sm_2O_3 มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Sm_2O_3 ที่มีค่าความเป็นผลึกสูง ทำให้ไปขัดขวางการเชื่อมต่อของ PVA ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเกิดได้ยากขึ้น (Hassan et al., 2000)

ตารางที่ 4 ผลประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุเชิงประกอบ PVA/ Sm_2O_3

ปริมาณ Sm_2O_3 (wt.%)	ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตัวเอง (%)	
	ระยะเวลาเชื่อมต่อ 1 ชม.	ระยะเวลาเชื่อมต่อ 6 ชม.
0	80	100
4	56	77
8	44	71
12	37	61

สมบัติการก้ำงอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃



ภาพที่ 5 ค่าการลดทอนอนุภาคนิวตรอน (I/I₀) ที่ปรับเปลี่ยนสารตัวเติม Sm₂O₃ และความหนาของวัสดุเชิงประกอบ

จากผลการทดสอบการก้ำงอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ PVA ที่เติมและไม่เติมสารตัวเติม Sm₂O₃ ดังแสดงในภาพที่ 5 พบว่า วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติการก้ำงอนุภาคนิวตรอนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Sm₂O₃ โดยที่วัสดุ PVA (ที่ไม่เติม Sm₂O₃) ที่ความหนาประมาณ 20 ซม. มีค่าการลดทอนอนุภาคนิวตรอน (I/I₀) เท่ากับ 0.77 และเมื่อเติมสารตัวเติม Sm₂O₃ ที่ปริมาณ 4, 8 และ 12 wt.% พบว่าค่า I/I₀ มีค่าลดลงอย่างมากตามปริมาณสารตัวเติม Sm₂O₃ ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการลดทอน คือ 0.25, 0.21 และ 0.18 ตามลำดับ (กราฟทางด้านหน้า) และเมื่อทำการเพิ่มความหนาของวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃ ส่งผลทำให้ค่า I/I₀ มีค่าลดลงเช่นกัน (กราฟทางด้านข้าง) ในงานวิจัยนี้มีข้อสังเกตว่า ค่า I/I₀ มีค่าการลดลงที่เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าผลของการเติม Sm₂O₃ ในวัสดุเชิงประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Sm₂O₃ ซึ่งเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนสูง จึงทำให้วัสดุเชิงประกอบมีนิวเคลียสของธาตุซาแมเรียมต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคนิวตรอนสามารถเข้าทำอันตรกิริยากับธาตุซาแมเรียม (Sm) ได้มากขึ้น ส่งผลทำให้จำนวนนิวตรอนที่ผ่านออกมาจากวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง (Wang et al., 2015) นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มปริมาณ Sm₂O₃ ส่งผลทำให้ค่าความหนาครึ่งค่า (Haft value layer; HVL) มีค่าลดลง ซึ่งค่า HVL บ่งบอกถึงความสามารถในการลดทอนของจำนวนอนุภาคนิวตรอนครึ่งหนึ่งจากค่าเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลความหนาของวัสดุเชิงประกอบ PVA/Sm₂O₃ ที่ทำให้จำนวนอนุภาคนิวตรอนลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าเริ่มต้น (HVL)

ปริมาณ Sm ₂ O ₃ (wt.%)	ความหนาครึ่งค่า (Haft value layer; HVL) (mm)
0	59.0
4	11.0
8	10.0
12	8.9

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการวิจัยการเติมสาร Sm_2O_3 ในวัสดุเชิงประกอบ PVA สามารถสรุปได้ดังนี้

1. วัสดุเชิงประกอบ PVA/ Sm_2O_3 มีสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุเชิงประกอบ PVA ที่เติมสารตัวเติม Sm_2O_3 ที่ปริมาณ 4, 8 และ 12wt.% ก่อนทำการตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำสมดุล (%EWC) ของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง
2. การซ่อมแซมตัวเองของวัสดุเชิงประกอบ PVA/ Sm_2O_3 มีประสิทธิภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น (6 ชั่วโมง) แต่การเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม Sm_2O_3 ทำให้ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตัวเองของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มลดลง
3. การเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Sm_2O_3 ในวัสดุเชิงประกอบและความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการกำบังอนุภาคนิวตรอนสูงขึ้น ซึ่งวัสดุเชิงประกอบที่เติม Sm_2O_3 ปริมาณ 12wt.% และความหนาประมาณ 20 มม. สามารถลดทอนจำนวนอนุภาคนิวตรอนลงได้มากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- Barth, R. F., Soloway, A. H. & Fairchild, R. G. 1990. **Boron neutron capture therapy for cancer**. Scientific American, 263(4), 100-107.
- Hassan, C. M. and Peppas, N. A. (2000). **Structure and applications of poly (vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional crosslinking or by freezing/thawing methods**. In Biopolymers PVA Hydrogels, Anionic Polymerisation Nanocomposites (pp. 37-65). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Incavo, J. A. and Schafer, M. A. 2006. **Simplified method for the determination of N-nitrosamines in rubber vulcanizates**. Analytica Chimica Acta, 557(1-2), 256-261.
- Kaplan, D. J. Patel, J. N. Liporace, F. A. and Yoon, R. S. 2016. **Intraoperative radiation safety in orthopaedics: a review of the ALARA (as low as reasonably achievable) principle**. Patient safety in surgery, 10(1), 27.
- Lin, Y. and Li, G. 2014. **An intermolecular quadruple hydrogen-bonding strategy to fabricate self-healing and highly deformable polyurethane hydrogels**. Journal of Materials Chemistry B, 2(39), 6878 - 6885.
- Muramatsu, Y. and Yoshida, S. 1995. **Determination of ^{129}I and ^{127}I in environmental samples by neutron activation analysis (NAA) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)**. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 197(1), 149-159.
- Pelliccioni, M. 1998. **Radiation weighting factors and high energy radiation**. Radiation protection dosimetry, 80(4), 371-378.
- Toyen, D. and Saenboonruang, K. 2017. **Development of paraffin and paraffin/bitumen composites with additions of B_2O_3 for thermal neutron shielding applications**. Journal of Nuclear Science and Technology, 54(8), 871-877.

- Turkoglu, D. Cao, L. and Lewandowski, R. 2013. **A low-cost neutron radiography device**. *Physics Procedia*, 43, 54-65.
- Wang, P. Tanga, X. Chai, H. Chena, D. and Qiu, Y. 2015. **Design, fabrication, and properties of a continuous carbon-fiber reinforced Sm_2O_3 /polyimide gamma ray/neutron shielding material**. *Fusion Engineering and Design*. 101, 218-225.
- Wei, Z. Yang, JH. Zhou, J. Xu, F. Zrínyi, M. Dussault, PH. Osada, Y. and Chen, YM. 2014. **Self-healing gels based on constitutional dynamic chemistry and their potential applications**. *Chemical Society Reviews*. 43(23), 8114-8131.
- Yasin, T. and Khan, M. N. 2008. **High density polyethylene/boron carbide composites for neutron shielding**. *e-Polymers*. 8(1), 1-7
- Zali, N. M., Yazid, H. and Ahmad, M. H. A. R. M. 2018. **Neutron shielding behavior of thermoplastic natural rubber/boron carbide composites**. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 298(1), 012-018.
- Zhang, H. Xia, H. and Zhao, Y. 2012. **Poly(vinyl alcohol) Hydrogel Can Autonomously Self-Heal**. *ACS Macro Letters*. 1(11), 1233-1236.