



วิทยานิพนธ์

ผลของสารตัวเติมแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการ
ลดทอนรังสีแกมมา/อนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนมวล
โมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE)

EFFECTS OF GADOLINIUM OXIDE (Gd_2O_3) ON MECHANICAL
AND GAMMA/NEUTRON ATTENUATION PROPERTIES OF
ULTRA-HIGH-MOLECULAR-WEIGHT POLYETHYLENE
(UHMWPE) COMPOSITES

นายธิตินันท์ เอนกรัตน์มนตรี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา ๒๕๖๔

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

สาขาวิชา รังสีประยุกต์และไอโซโทป

ภาควิชา รังสีประยุกต์และไอโซโทป

เรื่อง ผลของสารตัวเติมแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการลดทอนรังสี
แกมมา/อนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE)
Effects of Gadolinium Oxide (Gd_2O_3) on Mechanical and Gamma/Neutron Attenuation
Properties of Ultra-high-molecular-weight Polyethylene (UHMWPE) Composites

نامผู้วิจัย นายธิดิสรณ์ เอนกรัตนมนตรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ไพบุลย์ เรืองพัฒนพงศ์, วท.ค.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์, Ph.D.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของสารตัวเติมแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการลดทอนรังสีแกมมา/
อนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE)

Effects of Gadolinium Oxide (Gd_2O_3) on Mechanical and Gamma/Neutron Attenuation Properties
of Ultra-high-molecular-weight Polyethylene (UHMWPE) Composites

โดย

นายธิตีสรณ์ เอนกรัตน์มนตรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปีการศึกษา 2564

ชิติสรณ์ เอนกรัตน์มนตรี : ผลของสารตัวเติมแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการลดทอนรังสีแกมมา/อนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูง พิเศษ (UHMWPE) ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป) สาขาวิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง, Ph.D.
ปีการศึกษา 2564

งานวิจัยนี้ ศึกษาและพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับปรุง พื้นผิวสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารกลุ่ม KBE-903 ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารกลุ่มไฮดรอกไซด์ ตั้งแต่ 5 ถึง 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 โดยทำการศึกษาและทดสอบสัณฐานวิทยา สมบัติการต้านทานการสึกหรอ สมบัติเชิงกลและค่าความแข็งที่พื้นผิว ผลการศึกษาวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณสารกลุ่มไฮดรอกไซด์ ส่งผลทำให้สมบัติการต้านทานการสึกหรอ ค่ามอดุลัสแรงดึง ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งที่พื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีค่าเพิ่มขึ้น แต่การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลง ดังนั้นทำการเลือกใช้ปริมาณสารกลุ่มไฮดรอกไซด์ที่ 20 %wt ในการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ส่วนอื่นๆ ต่อไป ทั้งนี้เมื่อมีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0 จนถึง 25 %wt ในวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE และทำการศึกษาและทดสอบความหนาแน่น สมบัติการกัมมันตภาพรังสีแกมมา สมบัติเชิงกลและค่าคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุ ผลการศึกษาวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ส่งผลให้ความหนาแน่น สมบัติการกัมมันตภาพรังสีแกมมาและค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีค่าเพิ่มขึ้น แต่พบว่าค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าคงทนไดอิเล็กทริก มีค่าลดลง นอกจากนี้ เมื่อมีการนำวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติมปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0 จนถึง 25 %wt ไปบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสี ^{60}Co โดยมีปริมาณรังสีสะสมเท่ากับ 60 kGy พบว่าการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ให้ความหนาแน่น สมบัติการกัมมันตภาพรังสีแกมมาและสมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ไม่ได้ผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ในขณะที่ค่าคงทนไดอิเล็กทริกมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (ไม่มีนัยสำคัญ) ทั้งนี้ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถนำวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่พัฒนาขึ้น ประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับบรรจุสารกัมมันตรังสีที่มีประสิทธิภาพในการกัมมันตภาพรังสีแกมมาและรังสีแกมมาได้

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Thitisorn Anekratmontre : Effects of Gadolinium Oxide (Gd_2O_3) on Mechanical and Gamma/Neutron Attenuation Properties of Ultra-high-molecular-weight Polyethylene (UHMWPE) Composites. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes.
 Thesis Advisor: Associate Professor Kiadtisak Saenboonruang, Ph.D.
 Academic Year 2021

This work studied and developed Gd_2O_3 /UHMWPE composites with the surface modifications of Gd_2O_3 using varying contents of a silane coupling agent (KBE-903) of 5-20 %wt of Gd_2O_3 ; for which the properties of interest that were investigated in this work included morphological, wear, mechanical, and surface hardness properties. The results showed that increases in the contents of a silane coupling agent led to the increases in wear resistance, tensile modulus, tensile strength, and surface hardness, but the decrease in elongation at break of the composites. As a result, the 20 %wt of a silane coupling agent was selected for further investigations. In addition, we have developed the Gd_2O_3 /UHMWPE composites with varying Gd_2O_3 contents from 0-25 %wt (in 5 %wt increment) and investigated important properties, including density, neutron/gamma attenuation, mechanical properties, and dielectric strength. The results indicated that the increases in Gd_2O_3 enhanced densities, neutron/gamma shielding, and tensile modulus but decreased tensile strength, elongation at break, and dielectric strength of the composites. Lastly, the Gd_2O_3 /UHMWPE composites with varying Gd_2O_3 contents from 0-25 %wt (in 5 %wt increment) were gamma irradiated using ^{60}Co as gamma source, with the total dose of 60 kGy. The results showed that the irradiated samples exhibited higher densities, neutron/gamma shielding, and mechanical properties but insignificant changes in the values of dielectric strength in comparison with non-irradiated samples. In conclusions, the overall results implied that the developed Gd_2O_3 /UHMWPE composites has shown great potential to be utilized as casks for the containment of radionuclides with high efficiencies in neutron and gamma shielding properties.

 Student's signature

 Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยข้อชี้แนะและคำแนะนำของอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ แสนบุญเรือง อาจารย์ประจำภาควิชา รางสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้มอบความรู้ แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประสบการณ์ รวมทั้งข้อชี้แนะในการแก้ไขปัญหาตลอดการดำเนินงานและการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย ซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริม และสนับสนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ทุนสัญญาเลขที่ N41D640003

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เอกชัย วิมลมาลา นักวิจัยสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และคณาจารย์ บุคลากรภาควิชารางสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ตลอดจนความรู้ในระดับบัณฑิตศึกษา นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ ในการทดสอบวัสดุ ขอขอบคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการฉายรังสีแกมมาและอนุภาคนิวตรอน ขอขอบคุณคุณดลฤดี ไตเย็นและนิสิตระดับบัณฑิตสาขาวิชารางสีประยุกต์และไอโซโทปทุกท่านที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลือตลอดการศึกษาในระดับปริญญาโท ขอขอบคุณนางสาวปริยารัตน์ อ่อนคำ ที่คอยให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และคอยช่วยเหลือ สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่ส่งเสริม สนับสนุนการศึกษาและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยข้อแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนความอนุเคราะห์ ของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ธิดิสรณ์ เอนกรัตนมนตรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
วัตถุประสงค์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร	5
รังสี (Radiation)	5
การค้นพบอนุภาคนิวตรอน.....	5
ประเภทของอนุภาคนิวตรอน.....	6
1. นิวตรอนช้า (Slow Neutron).....	6
2. นิวตรอนเร็ว (Fast Neutron)	7
แหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอน	7
แหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์	7
แหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิชชัน	8
การใช้ประโยชน์จากอนุภาคนิวตรอน	9
1. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์	9
2. การรักษามะเร็งด้วยเทคนิคการจับยึดด้วยอนุภาคนิวตรอน (Neutron Capture Therapy; NCT)	10

อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคนิวตรอนกับสสาร	12
1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision)	12
2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision)	13
รังสีแกมมา	15
แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา	15
การสลายตัวให้รังสีแกมมา	16
ประโยชน์ของรังสีแกมมา	19
1. ด้านอุตสาหกรรม	19
2. ด้านการเกษตรและอาหาร	19
3. ด้านการแพทย์	20
อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร	20
1. ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)	21
2. ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)	22
3. ปรากฏการณ์การผลิตคู่ (Pair production)	24
ผลกระทบของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต	25
1. การรับรังสีแบบเฉียบพลัน (Acute exposure)	25
2. การรับรังสีแบบเรื้อรัง (Chronic exposure)	25
ผลของรังสีต่อร่างกาย	25
1. ผลแบบเฉียบพลัน (Acute effect)	25
2. ผลแบบเรื้อรัง (Chronic effect)	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการ	38
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	38
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย	39

ส่วนที่ 1 : การศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารกุ่มควบไซเลนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของ Gd_2O_3 ต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอ สมบัติเชิงกล ค่าความแข็งที่พื้นผิวและลักษณะสัณฐานวิทยา	43
ส่วนที่ 2 :การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่มีต่อสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะสัณฐานวิทยา.....	49
ส่วนที่ 3 :การศึกษาผลของการบ่มเร่งวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ด้วยรังสีแกมมา ^{60}Co ปริมาณ 60 kGy ที่มีผลต่อสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/แกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า	55
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์	57
ส่วนที่ 1 : ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารกุ่มควบไซเลนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอ สมบัติเชิงกล ค่าความแข็งที่พื้นผิวและลักษณะสัณฐานวิทยา	57
ส่วนที่ 2 : ผลของปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ 0-25%wt ต่อค่าความหนาแน่น สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและสัณฐานทางวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE.....	63
ส่วนที่ 3 : ผลของการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจาก ^{60}Co (ปริมาณรังสี 60 kGy) ต่อค่าความหนาแน่น สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE	72
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	78
ส่วนที่ 1 : ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารกุ่มควบไซเลนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอ ค่าความแข็งที่พื้นผิว สมบัติเชิงกลและลักษณะสัณฐานวิทยา	78

ส่วนที่ 2 : ผลของปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ 0-25%wt ต่อค่าความหนาแน่น สมบัติการกำบัง อนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและสัณฐานทางวิทยาของวัสดุ เชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE.....	79
ส่วนที่ 3 : ผลของการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจาก ^{60}Co (ปริมาณรังสี 60 kGy) ต่อค่าความ หนาแน่น สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE.....	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก	84
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	95

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานในการชนแบบยืดหยุ่นของอนุภาคนิวตรอนกับตัวกลางชนิดต่างๆ โดยแสดงเป็นค่าสัดส่วนของพลังงานที่สูญเสียสูงสุดต่อพลังงานเริ่มต้น ($Q_{\max}/E_0$)	13
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างวัสดุพอลิเอทิลีนประเภท HDPE และ UHMWPE	30
ตารางที่ 3 ค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคนิวตรอน (Neutron absorption cross section) ของ แกโดลิเนียม (Gd) ซามาเรียม (Sm) และ โบรอน (B).....	31
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีน ชนิด Fibers/UHMWPE ที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบด้วยสารเคลือบไฮโดรเจน (Zhang et al., 2009).....	34
ตารางที่ 5 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE	38
ตารางที่ 6 เครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ที่ใช้ในการขึ้นรูปและทดสอบวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE.....	38
ตารางที่ 7 อัตราการสึกหรอ ค่าความแข็งที่พื้นผิว ค่าความหยาบที่พื้นผิวและความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคลือบไฮโดรเจนที่ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3	58
ตารางที่ 8 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารเคลือบไฮโดรเจน KBE-903 ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ..	62
ตารางที่ 9 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt.....	63
ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบสมบัติการก้ำกั๊อนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 จาก 0-25%wt กับวัสดุเชิงประกอบ B_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติมปริมาณสารตัวเติม B_2O_3 15.9%wt (B=5%wt) (ความหนา 2.0 มิลลิเมตร).....	65

ตารางที่ 11 สมบัติการกำบังรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 0-25%wt (ความหนา 2.0 มิลลิเมตร)	68
ตารางที่ 12 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25 %wt	70
ตารางที่ 13 ค่าคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25%wt.....	71
ตารางที่ 14 ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt ก่อนและหลังฉายรังสีแกมมาจาก ^{60}Co (ปริมาณรังสี 60 kGy).....	72
ตารางที่ 15 สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt (ความหนา 2 mm) ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจาก ^{60}Co ที่ปริมาณรังสี 60 kGy.....	73
ตารางที่ 16 ค่าการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt ก่อนและหลังฉายรังสีแกมมา ^{60}Co บ่มเร่งที่ปริมาณรังสี 60 kGy	74
ตารางที่ 17 ค่าคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt ก่อนและหลังการฉายรังสีแกมมาจาก ^{60}Co (ปริมาณรังสี 60 kGy)	77

1943

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้านิวเคลียร์	10
ภาพที่ 2 การรักษาด้วยเทคนิคการจับยึดด้วยอนุภาคนิวตรอน (Boron neutron capture therapy; BNCT).....	11
ภาพที่ 3 อันตรกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของอนุภาคนิวตรอนกับตัวกลาง.....	14
ภาพที่ 4 การสลายตัวของ ^{137}Cs	18
ภาพที่ 5 การสลายตัวของ ^{60}Co	19
ภาพที่ 6 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	21
ภาพที่ 7 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	23
ภาพที่ 8 ปรากฏการณ์การผลิตคู่.....	24
ภาพที่ 9 สมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMPWE ที่มีการเติมสารตัวเติม Sm_2O_3 0-50%wt (ก) สมบัติความต้านทานแรงดึง และ (ข) การยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$	32
ภาพที่ 10 วัสดุเชิงประกอบ $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ ที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมด้วยสารเคลือบไฮดรอกซี ซึ่งพบการเกาะกลุ่มของอนุภาค Sm_2O_3 อย่างชัดเจน.....	33
ภาพที่ 11 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารเคลือบไฮดรอกซีกับน้ำ.....	35
ภาพที่ 12 การเกิดปฏิกิริยาของสารเคลือบไฮดรอกซีกับพื้นผิวสารอนินทรีย์.....	35
ภาพที่ 13 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (ก) วัสดุเชิงประกอบ AlN/UHMWPE microspheres ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคลือบไฮดรอกซีและ (ข) วัสดุเชิงประกอบ AlN/UHMWPE microspheres ที่เติมสารเคลือบไฮดรอกซี KH-550 เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของ AlN microspheres.....	36
ภาพที่ 14 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวและเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยต่อ (ก) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และ (ข) ความต้านทานต่อการสึกหรอ	37
ภาพที่ 15 แผนดำเนินการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 และการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ (แผนงานส่วนที่ 1).....	40

ภาพที่ 16 แผนดำเนินการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติม Gd_2O_3 (0-25%wt) ผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE (แผนงานส่วนที่ 2)	41
ภาพที่ 17 แผนดำเนินการศึกษาผลของการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ^{60}Co (ปริมาณ 60 kGy) ผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE (แผนงานส่วนที่ 3)	42
ภาพที่ 18 เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)	44
ภาพที่ 19 เครื่องอัดรีดชนิดหนอนเกลียวคู่ (Twin screw extruder)	44
ภาพที่ 20 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน	45
ภาพที่ 21 เครื่องทดสอบสมบัติต้านทานการสึกหรอของพื้นผิว (Pin on disc machine for material testing)	46
ภาพที่ 22 เครื่องทดสอบค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness (Shore D))	47
ภาพที่ 23 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine)	48
ภาพที่ 24 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)	49
ภาพที่ 25 ภาพแสดงการทดสอบการก้ำกัแงนุภาคนิวตรอน	52
ภาพที่ 26 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการก้ำกัแงนุภาคนิวตรอน	53
ภาพที่ 27 ภาพแสดงการทดสอบการก้ำกัแงรังสีแกมมา	53
ภาพที่ 28 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการก้ำกัแงรังสีแกมมา	54
ภาพที่ 29 สันฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน KBE-903 ปริมาณ (ก) 5 %wt, (ข) 10 %wt และ (ค) 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3	59
ภาพที่ 30 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารคู่ควบไซเลน	59
ภาพที่ 31 การเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลนกับพื้นผิวของสารอนินทรีย์	60
ภาพที่ 32 ลักษณะของรอยการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ภายหลังการทดสอบสมบัติการต้านทานการสึกหรอด้วยเทคนิค Pin on disc โดยภาพ ก. ข. และ ค. แสดงถึงการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ตามลำดับ	61

ภาพที่ 33 แบบจำลองการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ โดยภาพ (ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่น้อย (ข)) แสดงวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่มาก.....	65
ภาพที่ 34 ผลการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt (ความหนาเท่ากับ 2 mm) โดย (ก) Neutron transmission factor (I/I_0) (ข) Linear attenuation coefficient (μ) (ค) Mass attenuation coefficient (μ_m) (เส้นประสีแดงแสดงถึงสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $B_2O_3/UHMWPE$ ที่มีปริมาณสารตัวเติม B_2O_3 เท่ากับ 15.9%wt)	66
ภาพที่ 35 แบบจำลองการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับอะตอมของ Gd_2O_3	69
ภาพที่ 36 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ (ก) 0%wt (ข) 5%wt (ค) 10%wt (ง) 15%wt (จ) 20%wt (ฉ) 25%wt	71
ภาพที่ 37 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25%wt โดย (ก) โมดูลัสแรงดึงของวัสดุ (ข) ความต้านทานแรงดึง (ค) เปอร์เซ็นต์ยืดตัว ณ จุดขาด (ง) ความแข็งที่พื้นผิว...	76

บทที่ 1

บทนำ

รังสี คือพลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดโดยผ่านตัวกลางหรือไม่ผ่านตัวกลางก็ได้ ทั้งนี้รังสีที่ปลดปล่อยออกจากต้นกำเนิด อาจอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือลำของอนุภาคที่มีพลังงานสูง ซึ่งสามารถจำแนกรังสีได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ รังสีที่ไม่ก่อไอออน (Non-ionizing radiation) และรังสีก่อไอออน (Ionizing radiation) โดยรังสีที่ไม่ก่อไอออน ได้แก่ รังสีที่มีพลังงานต่ำ ซึ่งเมื่อทำอันตรกิริยาหรือผ่านเข้าไปในตัวกลาง ไม่สามารถส่งผลให้ตัวกลางนั้นแตกตัวเป็นไอออนได้ เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะผลักอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากอะตอม ในขณะที่รังสีก่อไอออน ได้แก่ รังสีที่มีพลังงานสูง โดยมีพลังงานอยู่ในช่วงตั้งแต่ keV-MeV ทั้งนี้รังสีก่อไอออนเมื่อทำอันตรกิริยากับตัวกลาง สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางนั้นแตกตัวเป็นไอออนได้ ตัวอย่างของรังสีก่อไอออน ได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตาและอนุภาคนิวตรอน เป็นต้น (รุ่งชนเกียรติ, 2547)

อนุภาคนิวตรอนจัดเป็นรังสีก่อไอออนชนิดหนึ่งที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง โดยอนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคมูลฐานทางนิวเคลียร์ที่มีมวลใกล้เคียงกับอนุภาคโปรตอน แต่ไม่มีประจุไฟฟ้า จึงมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีประเภทอื่น ซึ่งปัจจุบันมีการนำอนุภาคนิวตรอนมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ทางด้านการแพทย์ เช่น การรักษามะเร็งด้วยเทคนิคการจับยึดนิวตรอน (Neutron Capture Therapy) หรือด้านพลังงาน เช่น เป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น แต่ทั้งนี้อนุภาคนิวตรอนสามารถส่งผลกระทบต่อสารพันธุกรรม (DNA) ได้โดยเมื่ออนุภาคนิวตรอนเข้าทำอันตรกิริยากับ DNA จะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมกลางของสาร จนเกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระดังกล่าว อาจทำอันตรกิริยากับเซลล์ จนเกิดความเสียหายขึ้นได้ ซึ่งอาจนำไปสู่การกลายของเซลล์หรือเหนี่ยวนำให้เกิดมะเร็งได้ ดังนั้นเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานหรือแพทย์ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับอนุภาคนิวตรอนจึงมีความเสี่ยงที่จะได้รับรังสีในปริมาณที่สูงเกินกว่าที่กฎหมายกำหนด เป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายกับร่างกายหรืออวัยวะสำคัญขึ้นได้ เช่น โรคมะเร็งหรือการเป็นหมัน เป็นต้น

ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายจากการได้รับรังสีในปริมาณที่สูง ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีต้องปฏิบัติตามหลักความปลอดภัยทางรังสีที่เรียกว่า “As Low As Reasonably Achievable” หรือ “ALARA” ซึ่งมีหลักการปฏิบัติ 3 ประการได้แก่ (Tiamduangtawan et al., 2020)

1. เวลา (Time of exposure) โดยปริมาณรังสีที่ได้รับจะแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานควรใช้เวลาในบริเวณที่มีรังสีให้น้อยที่สุด

2. ระยะทาง (Distance) โดยปริมาณรังสีที่ได้รับจะมีค่าแปรผกผันกับค่ากำลังสองของระยะทาง (Inverse square law) ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานจึงควรปฏิบัติงานห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีให้มากที่สุด

3. อุปกรณ์กำบังรังสี (Shielding) ในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถหลีกเลี่ยงข้อจำกัดด้านระยะเวลาหรือระยะทางระหว่างการปฏิบัติงานได้ อุปกรณ์กำบังรังสีเป็นอีกกระบวนการสำคัญในการป้องกันอันตรายจากรังสีต่อตัวผู้ปฏิบัติงาน โดยอุปกรณ์กำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดความเข้มของรังสีที่ผ่านมายังผู้ปฏิบัติงาน จึงสามารถเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานมากขึ้น

ทั้งนี้ในส่วนของวัสดุที่นำมาทำบังอนุภาคนิวตรอน ควรมีอะตอมของธาตุไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญเนื่องจากอะตอมไฮโดรเจนสามารถลดทอนพลังงานของอนุภาคนิวตรอนเร็ว (Fast neutron) เป็นอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal Neutron) ด้วยกระบวนการการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอนุภาคนิวตรอนกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งวัสดุประเภทพอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุไฮโดรเจนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีผู้สนใจในการนำวัสดุดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการกำบังอนุภาคนิวตรอน ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจนำวัสดุ PE ชนิดพอลิเอทิลีนมวล์โมเลกุลสูงพิเศษ (Ultra-high-molecular-weight polyethylene; UHMWPE) ซึ่งมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่สูงกว่า PE ชนิดอื่น และมีคุณสมบัติเด่นอื่นอีกหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อการสึกหรอ การกระแทก เลียดสี และการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี

เป็นต้น (Brydson, 1999) แต่ทั้งนี้พบว่าอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอนที่ทะลุทะลวงผ่านออกมาจากวัสดุกำบังรังสี ยังสามารถเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุ UHMWPE จึงมีการเติมสารตัวเติมชนิดแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gadolinium oxide; Gd_2O_3) ลงใน UHMWPE โดยแกโดลิเนียม (Gd) เป็นธาตุที่มีความสามารถในการลดทอนจำนวนอนุภาคนิวตรอนได้ดี เนื่องจาก Gd มีค่าภาคตัดขวางกับอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron absorption cross section) สูงถึง 48860×10^{-24} ตารางเซนติเมตร (48860 barns) ส่งผลให้อนุภาคนิวตรอนมีโอกาสนในการถูกจับโดยอะตอมของ Gd ที่สูง ซึ่งจะสามารถลดทอนจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่ผ่านวัสดุกำบังรังสีออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ Gd ยังมีความเหมาะสมในการกำบังรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมาภายหลังการดูดกลืนอนุภาคนิวตรอนของ Gd_2O_3 ได้ ทั้งนี้เนื่องจาก Gd เป็นธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมสูง ($Z=64$) และ Gd_2O_3 เป็นสารประกอบที่มีความหนาแน่นสูง ($\rho = 7.41 \text{ g/cm}^3$) ส่งผลให้ Gd_2O_3 สามารถเกิดอันตรกิริยาและลดพลังงาน/ความเข้มของรังสีแกมมาได้เป็นอย่างดี (Zhang *et al.*, 2020)

นอกจากนี้อนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมามีอาจทำลายแผงควบคุมวงจรไฟฟ้าในสถานปฏิบัติที่มีรังสีได้ (Olesen, 1966) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ไปใช้เป็นวัสดุสำหรับทำตู้ควบคุมวงจรไฟฟ้า เพื่อป้องกันการทำลายแผงควบคุมวงจรไฟฟ้าจากอนุภาคนิวตรอนหรือรังสีแกมมา อีกทั้งวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ยังสามารถป้องกันอันตรายที่เกิดจากไฟฟ้าลัดวงจรกับผู้ปฏิบัติงานได้ เนื่องจากวัสดุประเภท UHMWPE มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ที่ดี (Toyen *et al.*, 2018) จึงเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานจากอันตรายที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาวัสดุ UHMWPE ที่สามารถกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเติมสารตัวเติมชนิด Gd_2O_3 ในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt) ซึ่งผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ชนิด KBE-903 เพื่อให้สามารถผสมและขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้นในวัสดุหลัก

ชนิด UHMWPE ทำการทดสอบสมบัติที่สำคัญของวัสดุ ได้แก่ สมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า และลักษณะสัณฐานวิทยา เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการเตรียม Gd_2O_3 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) และผลของปริมาณ KBE-903 ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานการสึกหรอและลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจนชนิด KBE-903 ในวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ต่อสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะสัณฐานวิทยา
3. เพื่อศึกษาผลของความหนาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ต่อสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

รังสี (Radiation)

รังสี เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดโดยผ่านตัวกลางหรือไม่ผ่านตัวกลางก็ได้ ทั้งนี้รังสีที่ปลดปล่อยออกจากต้นกำเนิดรังสี อาจอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือลำของอนุภาค โดยสามารถจำแนกรังสีได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. รังสีที่ไม่ก่อไอออน (Non-ionizing radiation)

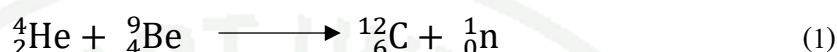
2. รังสีก่อไอออน (Ionizing radiation)

ทั้งนี้รังสีที่ไม่ก่อไอออน ได้แก่ รังสีที่เมื่อทำอันตรกิริยาหรือผ่านเข้าไปในตัวกลางแล้ว ไม่สามารถทำให้ตัวกลางนั้นเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอในการผลักอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากอะตอมได้ ในขณะที่รังสีก่อไอออน ได้แก่ รังสีที่มีพลังงานสูง โดยมีพลังงานอยู่ในช่วง keV-MeV ทั้งนี้รังสีก่อไอออน เมื่อทำอันตรกิริยากับตัวกลาง สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางนั้นแตกตัวเป็นไอออน ตัวอย่างรังสีประเภทก่อไอออน ได้แก่ อนุภาคนิวตรอน รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ อนุภาคแอลฟาและอนุภาคบีตาเป็นต้น (รุ่งชนเกียรติ, 2547) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาและพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา จากวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ดังรายละเอียดต่อไป

การค้นพบอนุภาคนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอน (Neutron; n) เป็นหนึ่งในประเภทของรังสีก่อไอออน โดยในปี 1930 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ วอลเทอร์ โบเทอ (Walther Bothe) และ เฮอเบิร์ต เบคเกอร์ (Herbert Becker)

ได้ค้นพบรังสีชนิดหนึ่งที่ไม่มีความประจุ จากการทดลองยิงอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุโปโลเนียม (Po) กับแผ่นเบริลเลียม (Be) จนเกิดอันตรกิริยาดังสมการที่ 1 (รุ่งชนเกียรติ, 2547) ซึ่งพบว่ารังสีที่ไม่มีความประจุนี้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง



ต่อมาไอแรน คูรี (Irene Curie) และเฟรเดอริก โจเลียต (Frederic Joliot) ได้ทำการวิจัยในปี ค.ศ. 1932 พบว่า อนุภาคที่เกิดจากเบริลเลียมที่เข้าทำอันตรกิริยากับพาราฟิน สามารถทำให้เกิดโปรตอนพลังงานสูง ซึ่งต่อมาเจมส์ แชดวิก (Jame Chadwick) พบว่าอนุภาคที่เกิดจากเบริลเลียม นั้น คืออนุภาคนิวตรอน โดยมวลของอนุภาคนิวตรอนมีค่าเท่ากับ 1.008665 amu ซึ่งใกล้เคียงกับมวลของอนุภาคโปรตอน ทั้งนี้อนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีความประจุไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางจึงไม่ถูกเบี่ยงเบนโดยสนามไฟฟ้าในตัวกลาง ส่งผลทำให้อนุภาคนิวตรอนเป็นรังสีที่มีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีแกมมาและอนุภาคอื่น

ประเภทของอนุภาคนิวตรอน

สามารถจำแนกประเภทของอนุภาคนิวตรอนตามระดับพลังงานและความเร็วได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ (รุ่งชนเกียรติ, 2547)

1. นิวตรอนช้า (Slow Neutron)

นิวตรอนช้า หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 1 keV ซึ่งสามารถแบ่งแยกได้เป็น

1.1 เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron) มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV ที่อุณหภูมิ 20 °C

1.2 เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1-100 eV

2. นิวตรอนเร็ว (Fast Neutron)

นิวตรอนเร็ว หมายถึง อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 1 keV ซึ่งสามารถแบ่งแยกได้
เป็น

2.1 นิวตรอนปานกลาง (Intermediate neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1-500 keV

2.2 นิวตรอนพลังงานสูง (High energy neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.5-20 MeV

2.3 นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron) มีพลังงานสูงกว่า 20 MeV ขึ้นไป

แหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอน

แหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ทำให้เกิดอนุภาคนิวตรอน เกิดจากการที่อนุภาคหรือรังสีพลังงานสูง เช่น อนุภาคแอลฟา อนุภาคโปรตรอน อนุภาคดิวเทอรอน หรือรังสีแกมมา เข้าทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับธาตุอื่น จนเกิดการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาที่มีการปลดปล่อยอนุภาคออกมา

ปฏิกิริยา (γ, n) โดยรังสีแกมมาเข้าทำอันตรกิริยากับธาตุเบา เช่น Be หรือ H เป็นต้น จนมีการปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนออกมา ตัวอย่างปฏิกิริยา (γ, n) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-3

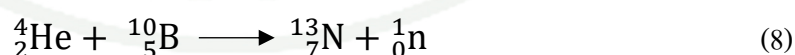




ปฏิกิริยา (p, n) และ (d, n) เป็นปฏิกิริยาของแหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอนที่จำเป็นต้องใช้เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อให้อนุภาคโปรตรอนและอนุภาคดิวเทอเรียมมีพลังงานสูง ตัวอย่างปฏิกิริยา (p,n) และ (d,n) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4-7



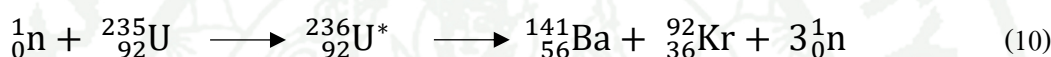
ปฏิกิริยา (α ,n) โดยอนุภาคแอลฟาเข้าทำอันตรกิริยากับธาตุเบา เช่น Be, B, N และ F เป็นต้น จนเกิดอนุภาคนิวตรอนออกมา ตัวอย่างปฏิกิริยา (α ,n) ดังแสดงในสมการที่ 8



แหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอนจากปฏิกิริยาฟิชชัน

ปฏิกิริยาฟิชชันจัดเป็นหนึ่งในปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยนิวเคลียสของอะตอมที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยูเรเนียม-235 (${}^{235}_{92}\text{U}$) ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหรือมากกว่า จากการเข้าทำอันตรกิริยาของอนุภาค

นิวตรอนกับนิวเคลียสของ ^{235}U ส่งผลให้อนุภาค รังสีและพลังงานจำนวนมาก ถูกปลดปล่อยออกมาภายหลังการเกิดอันตรกิริยานั้น โดยเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งภายหลังการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันนั้น อนุภาคนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2 MeV ถูกปลดปล่อยออกมาพร้อมกับอนุภาคและพลังงานต่าง ๆ ดังสมการที่ 9-10 ซึ่งแหล่งการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันที่สำคัญได้แก่ เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor)



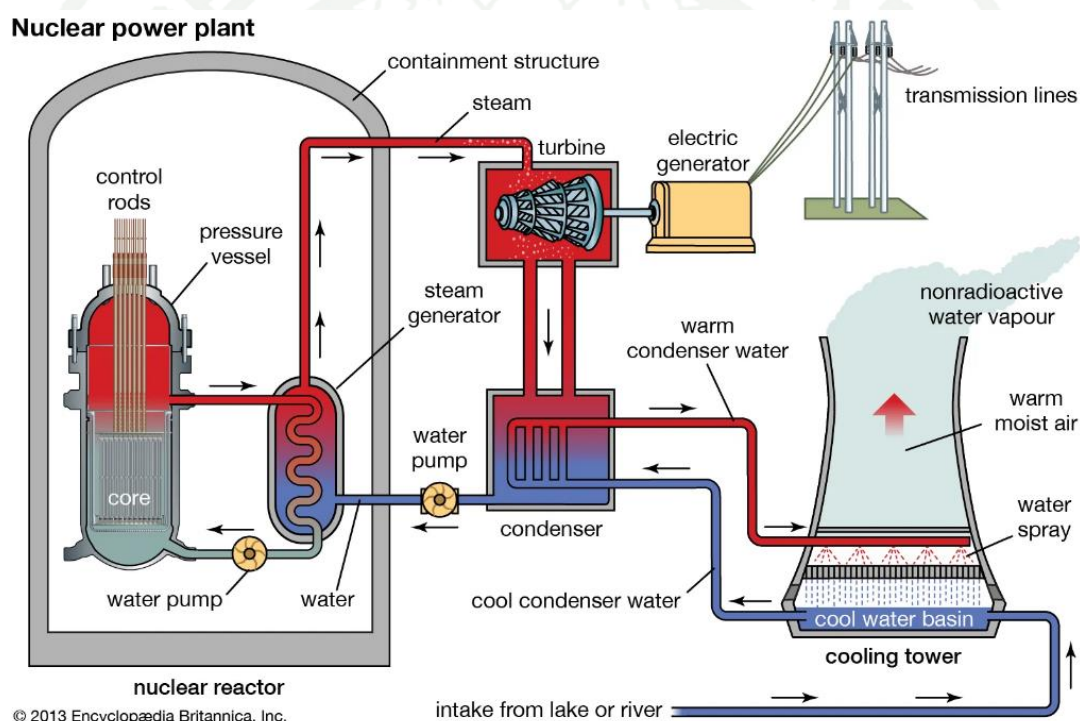
การใช้ประโยชน์จากอนุภาคนิวตรอน

1. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เป็นโรงไฟฟ้าที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนของปฏิกิริยาแตกตัวทางนิวเคลียร์หรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) โดยเมื่อนิวเคลียสของธาตุหนักถูกกระตุ้น ส่งผลให้เกิดการสลายตัวออกเป็นสองส่วนหรือมากกว่าพร้อมกับมีการปลดปล่อยพลังงาน อนุภาคและรังสีต่าง ๆ ออกมา ซึ่งปฏิกิริยาฟิชชันที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยาฟิชชันของยูเรเนียม-235 (^{235}U) ซึ่งเกิดจากการเข้าทำอันตรกิริยาของอนุภาคนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุ ^{235}U ส่งผลให้นิวเคลียสของธาตุ ^{235}U เกิดการสลายตัว (รุ่งชนเกียรติ, 2547) ดังสมการที่ 11



เมื่อนิวเคลียสของธาตุยูเรเนียมสลายตัว ส่งผลให้เกิดชิ้นส่วนของฟิชชัน (Fission fragment) และอนุภาคนิวตรอนเร็วประมาณ 2-4 อนุภาค โดยอนุภาคนิวตรอนที่เกิดขึ้นสามารถเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของธาตุ ^{235}U แบบต่อเนื่องจนเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ขึ้นได้ ซึ่งประมาณร้อยละ 80 ของพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชัน เป็นพลังงานที่อยู่ในรูปแบบของความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้น สามารถทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำที่มีแรงดันสูงจนสามารถหมุนกังหันไอน้ำซึ่งต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ดังภาพที่ 1

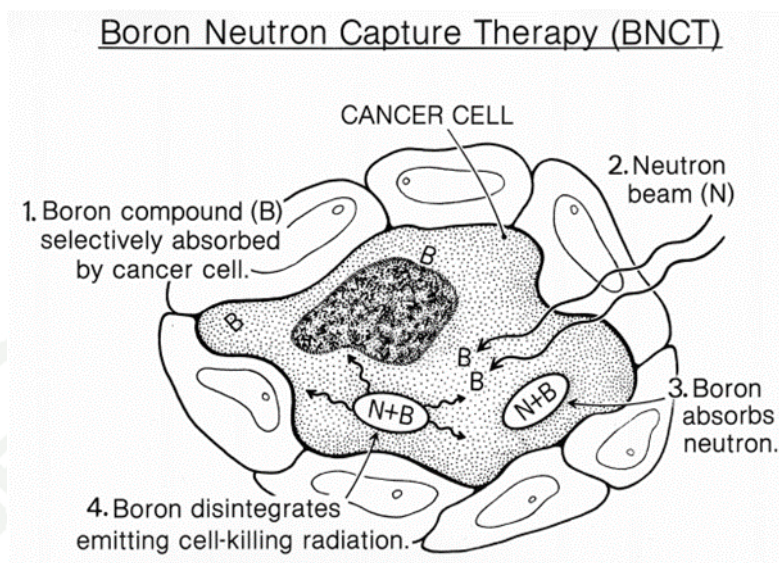


ภาพที่ 1 ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

ที่มา: (Martin, 2022)

2. การรักษามะเร็งด้วยเทคนิคการจับยึดด้วยอนุภาคนิวตรอน (Neutron Capture

Therapy; NCT)



ภาพที่ 2 การรักษาด้วยเทคนิคการจับยึดด้วยอนุภาคนิวตรอน (Boron neutron capture therapy; BNCT)

ที่มา: (โตเย็น, 2018)

การรักษาด้วยเทคนิคการจับยึดด้วยอนุภาคนิวตรอน เป็นวิธีการรักษามะเร็งหรือเนื้องอก เช่น มะเร็งที่ศีรษะและลำคอ เป็นต้น โดยมีการฉีดตัวยาที่มีส่วนประกอบของ B-10 ที่มีประสิทธิภาพในการจับยึดอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำได้ดีเข้าไปในบริเวณที่มีมะเร็งหรือเนื้องอก ดังแสดงในภาพที่ 2 ต่อมาผู้ป่วยจะได้รับการฉายรังสีด้วยอนุภาคอีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron) ที่มีพลังงานต่ำกว่า 0.5 eV ซึ่งอนุภาคอีพิเทอร์มัลนิวตรอนเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อ พลังงานของอนุภาคนิวตรอนจะถูกดูดกลืนโดยตัวยาที่ฉีดเข้าไปจนเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มีการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาพลังงานสูงออกมา ซึ่งอนุภาคแอลฟาเหล่านี้สามารถถ่ายเทพลังงานให้กับ มะเร็งหรือเนื้องอกได้ ส่งผลให้มะเร็งหรือเนื้องอกถูกทำลายหรือไม่สามารถขยายตัวได้อีกต่อไป นอกจากนี้อนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนที่ในตัวกลางด้วยระยะทางสั้นๆ เพียง 5-9 ไมโครเมตรเท่านั้น ส่งผลให้การทำลายเซลล์มะเร็งหรือเนื้องอกจะเกิดขึ้นในบริเวณที่ได้รับอนุภาคนิวตรอนเท่านั้น

อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคนิวตรอนกับสาร

สามารถจำแนกประเภทของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคนิวตรอนกับสาร ได้ดังนี้

1. การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision)

อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงสามารถเข้าทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของธาตุเบา โดยที่พลังงานรวมและโมเมนตัมรวมของระบบไม่มีการสูญเสีย ซึ่งการที่อนุภาคนิวตรอนถ่ายเทพลังงานให้กับนิวเคลียสที่อยู่ในสารบางส่วน ส่งผลทำให้อนุภาคนิวตรอนมีพลังงานลดลง (Neutron moderation)

โดยเมื่อนิวตรอนที่มีมวล m และมีพลังงาน E_0 เข้าชนกับนิวเคลียสของตัวกลางที่มีมวล M ส่งผลให้พลังงานของนิวตรอนที่กระเจิง (E) มีค่าลดลง ดังสมการที่ 12

$$E = E_0 \frac{(M-m)^2}{(M+m)^2} \quad (12)$$

ดังนั้น พลังงานที่ถ่ายเทให้กับนิวเคลียสของตัวกลางมีค่าเท่ากับ $E_0 - E$ ซึ่งเป็นพลังงานสูงสุดที่อนุภาคนิวตรอนสามารถถ่ายเทให้กับตัวกลางจากการชนแบบยืดหยุ่น ($Q_{\max}$) โดยค่า $Q_{\max}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 13

$$Q_{\max} = \frac{4mME_0}{(M+m)^2} \quad (13)$$

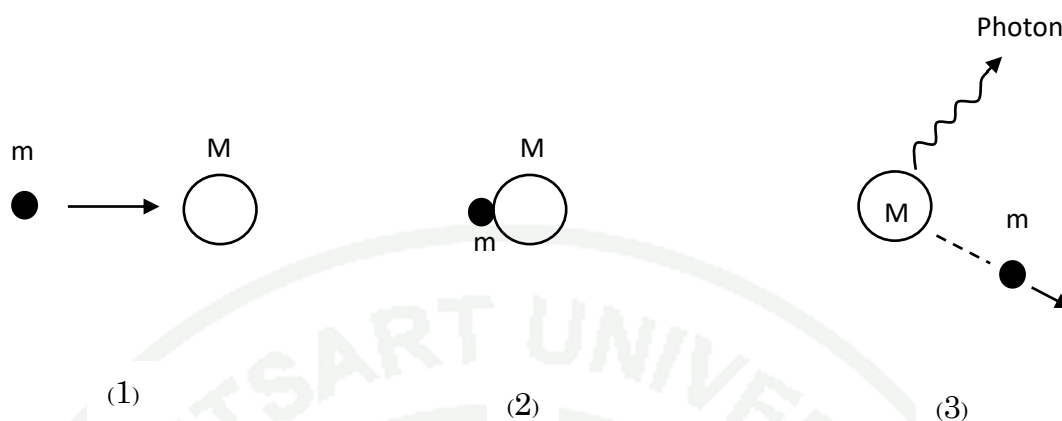
ทั้งนี้สัดส่วนของพลังงาน ($Q_{\max}/E_0$) ที่อนุภาคนิวตรอนถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลาง มีค่าแตกต่างกันตามชนิดของตัวกลาง โดยอนุภาคนิวตรอนสามารถถ่ายเทพลังงานได้ดีกับธาตุเบา เช่น H ทั้งนี้เพราะ ^1H มีมวลที่ใกล้เคียงกับนิวตรอน ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานในการชนแบบยืดหยุ่นของอนุภาคนิวตรอนกับตัวกลางชนิดต่างๆ โดยแสดงเป็นค่าสัดส่วนของพลังงานที่สูญเสียสูงสุดต่อพลังงานเริ่มต้น ($Q_{\max}/E_0$)

ตัวกลาง	$Q_{\max}/E_0$
^1H	1.000
^2H	0.889
^4He	0.640
^9Be	0.360
^{12}C	0.284
^{16}O	0.221

2. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision)

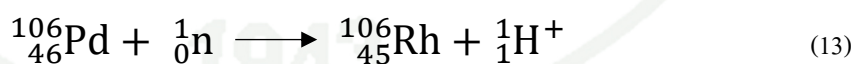
อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูง (มากกว่า 0.5 MeV) สามารถเข้าทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของธาตุนั้นๆ ส่งผลให้นิวเคลียสที่ถูกชนอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) ก่อนกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) โดยการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา



ภาพที่ 3 อันตรกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่นของอนุภาคนิวตรอนกับตัวกลาง
ที่มา: (รุ่งธนเกียรติ, 2547)

3.ปฏิกิริยาที่ให้อนุภาคที่มีประจุ (Charged particle reaction)

นิวเคลียสของตัวกลางเข้าทำอันตรกิริยากับอนุภาคนิวตรอนและมีการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น อนุภาคโปรตรอน อนุภาคบีต้าและอนุภาคแอลฟา เป็นต้น ตัวอย่างปฏิกิริยาที่ให้อนุภาคที่มีประจุดังแสดงในสมการที่ 13



4.ปฏิกิริยาการจับอนุภาคนิวตรอน (Radiative capture)

นิวเคลียสของตัวกลางดูดจับอนุภาคนิวตรอนไว้และมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา
ตัวอย่างปฏิกิริยาการจับอนุภาคนิวตรอนดังแสดงในสมการที่ 14



รังสีแกมมา

รังสีแกมมา (Gamma rays; γ) เป็นหนึ่งในประเภทของรังสีก่อไอออน โดยในปี ค.ศ. 1900 พอล อูริช วิลลาร์ด (Paul Ulrich Villard) ค้นพบรังสีแกมมาจากการศึกษาการหักเหของกัมมันตภาพรังสีที่ออกมาจากธาตุเรเดียม โดยรังสีบางชนิดที่เกิดขึ้น เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิดการเลี้ยวเบนไปทางซ้ายและขวาเนื่องจากเป็นรังสีที่มีประจุ ซึ่งภายหลังพบว่ากัมมันตภาพรังสีทั้งสองประเภทนี้ คือ รังสีบีต้าและรังสีแอลฟา ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่ารังสีบางชนิด เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง โดยไม่มีการเลี้ยวเบน เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากเป็นรังสีที่ไม่มีมวลและไม่มีประจุ ซึ่งภายหลังพบว่ากัมมันตภาพรังสีประเภทนี้ ได้แก่ รังสีแกมมา

แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา

นิวไคลด์กัมมันตรังสีบางชนิด เมื่อมีการสลายตัวให้รังสีชนิดอื่น นิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น ซึ่งอาจอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) ซึ่งยังคงมีพลังงานที่สูง จึงมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา เพื่อลดพลังงานและกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) ต่อไป แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ในกระบวนการฉายรังสีแกมมาในปัจจุบัน มีหลายประเภท เช่น

1. แหล่งกำเนิดรังสีซีเซียม-137 (^{137}Cs) ซึ่งมีการสลายตัวโดยการปลดปล่อยรังสีบีต้า จนกลายเป็นแบเรียม-137m ($^{137\text{m}}\text{Ba}$) ซึ่งเป็นไอโซโทปกึ่งเสถียร และมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.662 MeV โดยธาตุ ^{137}Cs มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 30.07 ปี

2. แหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 (^{60}Co) ซึ่งเกิดจากโคบอลต์-59 (^{59}Co) ซึ่งเป็นธาตุที่เสถียรในธรรมชาติ เกิดการจับกับอนุภาคนิวตรอนจนกลายเป็น ^{60}Co ซึ่งเป็นไอโซโทปที่สลายตัวให้รังสีบีตา โดยพบว่าหากยังมีพลังงานหลงเหลืออยู่ มีการปลดปล่อยพลังงานเหล่านี้ออกมาอยู่ในรูปของรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1.173 MeV และ 1.333 MeV โดย ^{60}Co มีค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 5.27 ปี (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ, 2556)

การสลายตัวให้รังสีแกมมา

เกิดจากการปล่อยพลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้รังสีหรืออนุภาคนิวคลีออนอื่น หากนิวไคลด์ถูกยังอยู่ในสถานะกระตุ้น จะมีการปรับตัวเข้าสู่สถานะพื้น โดยมีการปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ซึ่งเรียกว่ารังสีแกมมา ทั้งนี้พลังงานและความถี่ของรังสีแกมมามีความสัมพันธ์กัน ดังสมการที่ 15

$$E = h\nu \quad (15)$$

โดย E คือ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (J)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.625×10^{-34} Js)

ν คือ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Hz)

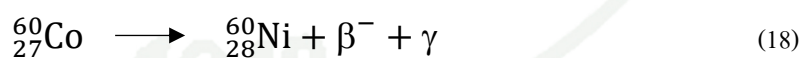
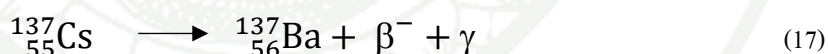
ซึ่งโดยปกติช่วงเวลาการสลายตัวให้รังสีแกมมานั้นสั้นมาก และแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของนิวไคลด์กัมมันตรังสี โดยอาจเรียกสถานะเช่นนี้ว่า สถานะอุปเสถียร (Metastable state) ซึ่งใช้อักษรย่อ m กำกับไว้ที่นิวไคลด์ หากมีการใช้เวลาการสลายตัวให้รังสีแกมมานานกว่า 1 นาโนวินาที ตัวอย่างนิวไคลด์ที่อยู่ในสถานะอุปเสถียร ได้แก่ $^{137\text{m}}\text{Ba}$ เป็นต้น

ในการปรับตัวสู่สถานะพื้นบางกรณี นิวไคลด์ไม่ได้ปรับตัวสู่สถานะพื้นโดยทันที แต่จะปรับตัวสู่สถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานต่ำลง จนถึงสถานะพื้น ส่งผลให้รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา มีหลายค่าพลังงาน โดยรังสีแกมมามีพลังงานได้ตั้งแต่ ระดับ eV จนถึงประมาณ 7 MeV

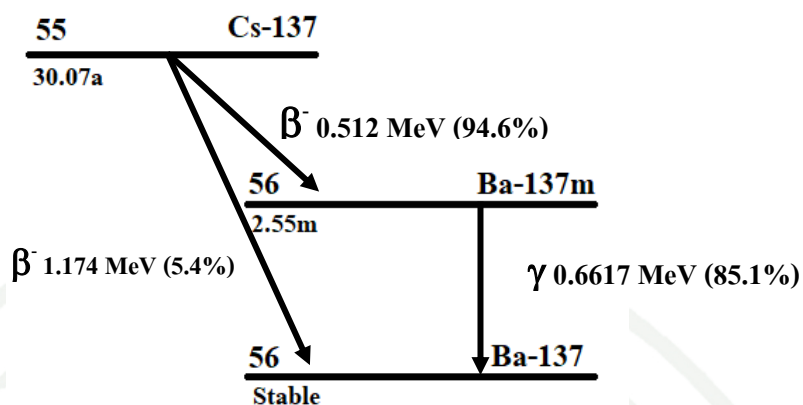
การสลายตัวให้รังสีแกมมา ไม่มีผลต่อเลขเชิงอะตอมและเลขเชิงมวลของนิวไคลด์ เพียงแต่ทำให้นิวไคลด์มีพลังงานลดลง นิวไคลด์แม่และนิวไคลด์ลูกจึงเป็นไอโซเมอร์กัน ดังนั้นอาจเรียกการสลายตัวให้รังสีแกมมาว่า การเปลี่ยนแปลงไอโซเมอร์ (Isomeric transition) ดังแสดงในสมการที่ 16



ทั้งนี้ ^{137}Cs และ ^{60}Co เป็นแหล่งรังสีแกมมาที่สำคัญ ซึ่งสลายตัวให้อนุภาคบีตา ดังสมการที่ 17-18

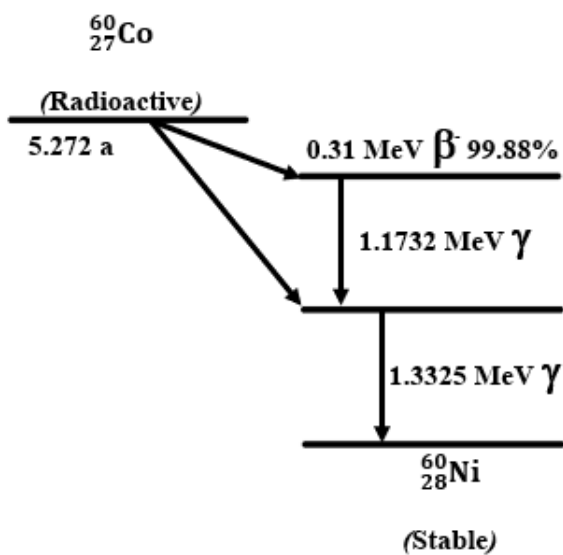


สำหรับการสลายตัวของ ^{137}Cs นั้นพบว่า 5.4% ของการสลายตัว มีการปลดปล่อยอนุภาคบีตาที่มีพลังงาน 1.174 MeV ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียรที่อยู่ในสถานะพื้น ส่วนอีก 94.6 % ของการสลายตัว จะเกิดเป็นไอโซโทปกึ่งเสถียร ^{137}Ba ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น จึงเกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมาที่พลังงาน 0.662 MeV เพื่อให้ ^{137}Ba กลับสู่สถานะพื้น ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การสลายตัวของ ^{137}Cs
ที่มา (รุ่งชนเกียรติ, 2547)

สำหรับการสลายตัวของ ^{60}Co พบว่า 0.12 % ของการสลายตัว มีการให้อนุภาคบีตาที่มีพลังงาน 1.48 MeV ส่วนอีก 99.88 % ของการสลายตัว พบว่ามีการให้อนุภาคบีตาพลังงาน 0.31 MeV โดยนิวไคลด์ยังอยู่ในสถานะกระตุ้น จึงมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1.173 MeV และ 1.333 MeV ออกมา ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การสลายตัวของ ^{60}Co
ที่มา (รุ่งชนเกียรติ, 2547)

ประโยชน์ของรังสีแกมมา

1. ด้านอุตสาหกรรม

ปัจจุบันมีการนำรังสีแกมมามาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากขึ้น เช่น การฉายรังสีแกมมาเพื่อเปลี่ยนสีอัญมณีและการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Non-destructive testing) ซึ่งเป็นการตรวจสอบรอยร้าวในโครงสร้างอาคาร ผลิตภัณฑ์ต่างๆ และวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบเครื่องบิน เป็นต้น (A.Mohamed, 2014)

2. ด้านการเกษตรและอาหาร

การวิจัยด้านการฉายรังสีในอาหารโดยใช้รังสีแกมมาในการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร ทั้งพืชผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ต่าง ๆ ช่วยทำลายแมลง จุลินทรีย์ หรือพยาธิ ในอาหารและผลผลิตทางการเกษตร อีกทั้งยังช่วยยับยั้งการงอกของพืชผัก และชะลอการสุกของผลไม้ ซึ่งอำนวยความสะดวกให้กับผู้บริโภคที่ได้บริโภคอาหารที่ถูกสุขอนามัย ปราศจากเชื้อโรคและพยาธิ ช่วยการถนอมอาหารและเก็บรักษาอาหารไว้ในช่วงฤดูกาลที่ขาดแคลน ลดการนำเข้าจากต่างประเทศและเพิ่มผลผลิตและรายได้ของประเทศ (Koz'min and Sanzharova, 2015)

3. ด้านการแพทย์

1. ปัจจุบันมีการพัฒนาสารกัมมันตรังสี สำหรับรักษาโรคมะเร็งต่างๆ ในร่างกายหลายชนิด โดยสารกัมมันตรังสีที่นิยมใช้ ได้แก่ ^{60}Co ซึ่งมีทั้งแบบฝังแร่เหล่านี้เข้าไปในบริเวณที่เป็นมะเร็งในร่างกาย และแบบฉายรังสีแกมมาจากภายนอกร่างกาย เข้าสู่บริเวณที่เป็นมะเร็ง (Reza Fazel *et al.*, 2009)

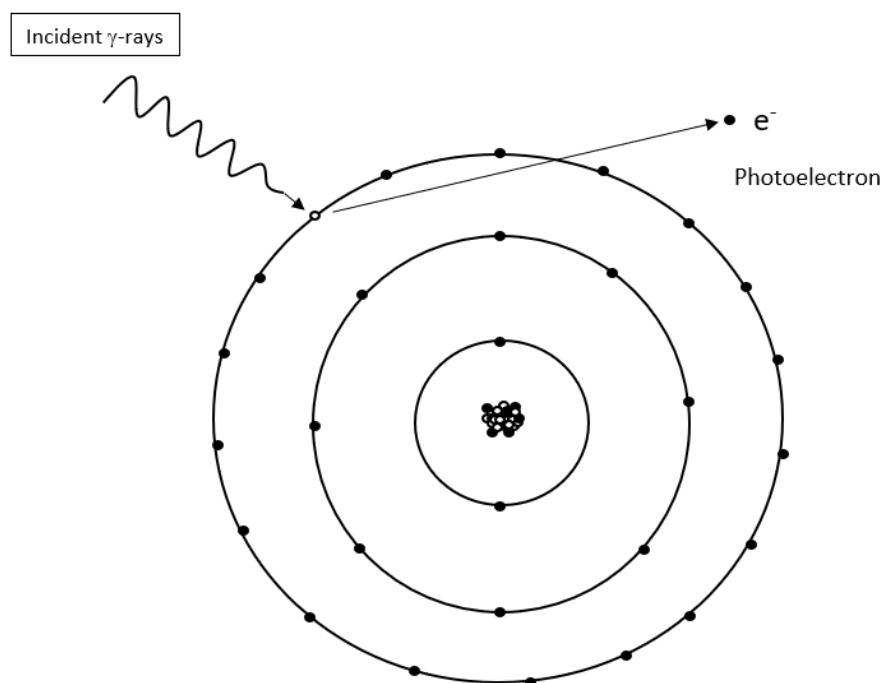
2. การตรวจและวินิจฉัยโรค เช่น การสร้างภาพอวัยวะต่าง ๆ ภายในร่างกายเพื่อตรวจสอบและพิสูจน์สมมุติฐานของโรคและความผิดปกติของอวัยวะ โดยนิยมใช้สารกัมมันตรังสีที่เป็นของเหลว เช่น เทกนีเชียม-99เอ็ม (^{99m}Tc) สำหรับตรวจสอบการทำงานของระบบอวัยวะต่าง ๆ ได้แก่ สมอง หัวใจ กระดูก ไชกระดูก ตับ ม้าม และปอด เป็นต้น (Reza Fazel *et al.*, 2009)

อันตรายของรังสีแกมมากับสสาร

รังสีแกมมาซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสสารจะสามารถเกิดอันตรายขึ้นได้หลายรูปแบบ โดยอันตรายที่สำคัญได้แก่ ปฏิกิริยาการแผ่รังสีโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปฏิกิริยาการคอมป์ตัน (Compton effect) และปฏิกิริยาการผลิตคู่ (Pair production) เป็นต้น

1.ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาเข้าทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอมของสาร จนเกิดการถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน ส่งผลให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากอะตอม ดังภาพที่ 6 โดยพลังงาน (E_e) มีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานของรังสีแกมมา ($h\nu$) กับพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ (B.E.) ดังสมการที่ 19 ซึ่งหากรังสีแกมมาที่เข้าทำอันตรกิริยามีพลังงานต่ำกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม อิเล็กตรอนไม่สามารถหลุดออกจากอะตอมได้ แต่หากรังสีแกมมาที่เข้าทำอันตรกิริยา มีพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม อิเล็กตรอนที่ถูกทำอันตรกิริยาสามารถหลุดออกจากอะตอม ส่งผลให้อิเล็กตรอนจากวงโคจรรอบนอกเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ และมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของรังสีเอกซ์



ภาพที่ 6 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ที่มา : (รุ่งชนเกียรติ, 2547)

$$E_c = h\nu - B.E. \quad (19)$$

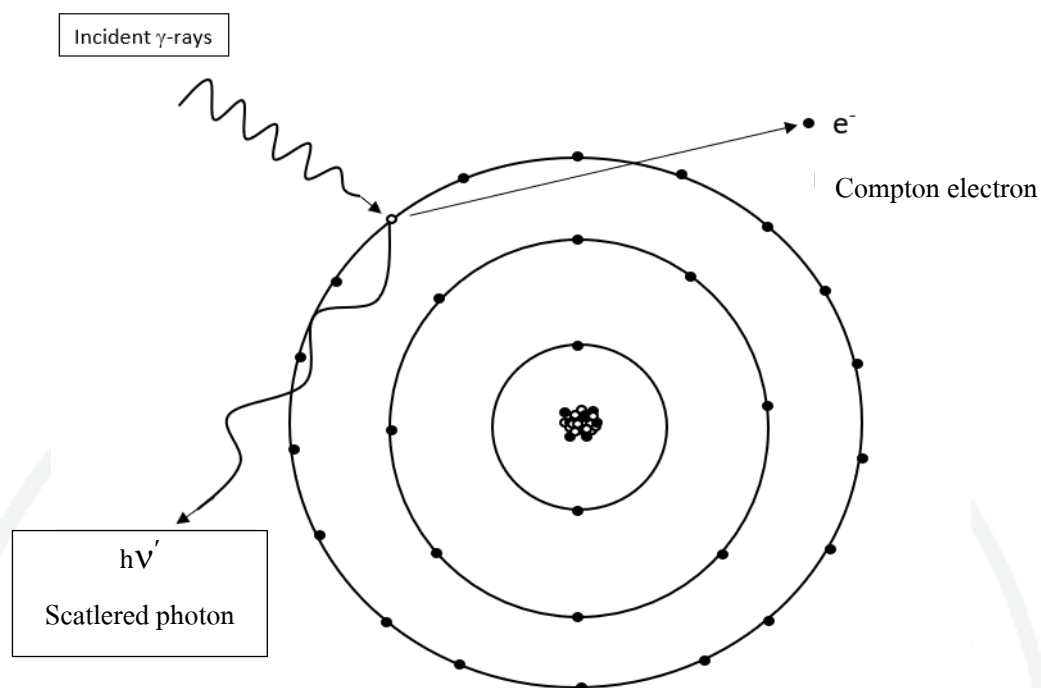
โดยที่ E_c คือ พลังงานของอิเล็กตรอน (MeV)

$h\nu$ คือ พลังงานของรังสีแกมมา (MeV)

B.E. คือ พลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ (MeV)

2.ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)

สำหรับปรากฏการณ์คอมป์ตันนั้น รังสีแกมมาเข้าทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในอะตอมของสารแบบยืดหยุ่น โดยรังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรไปในทิศทางทำมุมกับทิศทางการเคลื่อนที่เดิมของรังสีแกมมา โดยเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า คอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) ส่วนรังสีแกมมาที่มีพลังงานลดลงเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ โดยทำมุม θ กับทิศทางเดิม และมีความยาวคลื่น (λ) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยพลังงานของรังสีแกมมาที่สะท้อนออกไป ($h\nu'$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 20



ภาพที่ 7 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน
ที่มา : (รุ่งชนเกียรติ, 2547)

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \left(\frac{h\nu}{mc^2}\right)(1 - \cos\theta)} \quad (20)$$

โดยที่ $h\nu$ คือพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้าทำอันตรกิริยา (MeV)

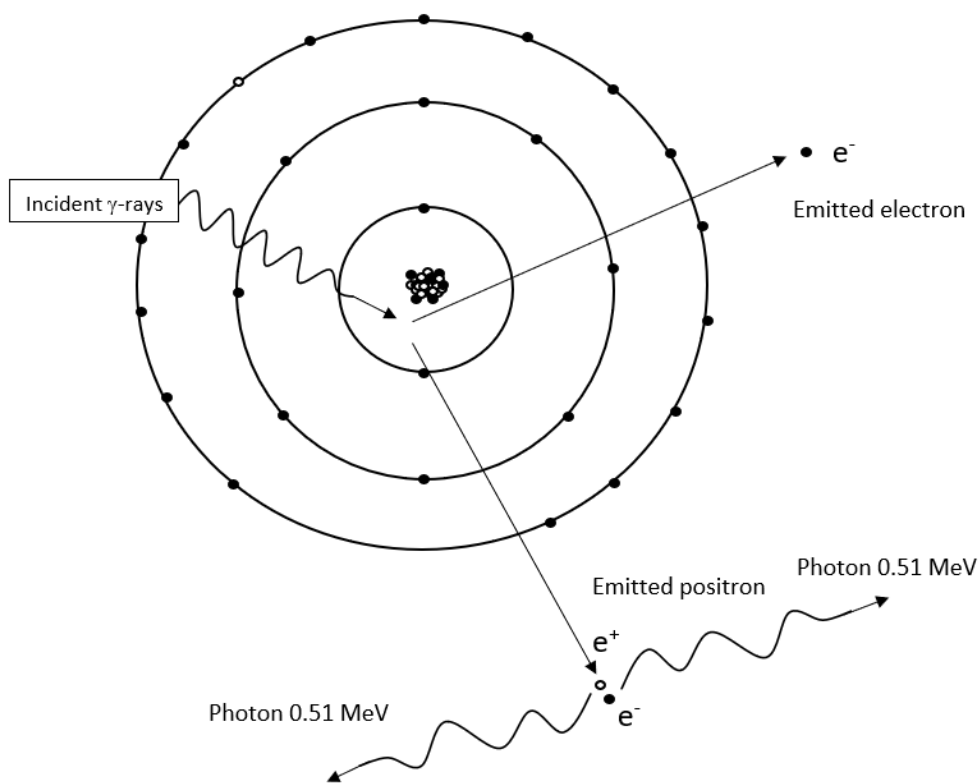
$h\nu'$ คือพลังงานของรังสีแกมมาที่สะท้อนออกไป (MeV)

m คือ มวล (MeV/c^2)

c คือความเร็วแสง (c)

3.ปรากฏการณ์การผลิตคู่ (Pair production)

อันตรกิริยาการผลิตคู่เป็นรูปแบบหนึ่งของการดูดกลืนรังสีแกมมา โดยเกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม ซึ่งรังสีแกมมาใช้พลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV ในการเปลี่ยนรังสีแกมมาให้กลายเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอน ซึ่งมีมวลรวมเทียบเท่ากับพลังงาน 1.02 MeV หลังจากการเกิดปรากฏการณ์การผลิตคู่ โพสิตรอนอาจรวมตัวกับอิเล็กตรอนอื่น แล้วให้โฟตอนจำนวน 2 อนุภาค ซึ่งมีพลังงานอนุภาคละ 0.51 MeV เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า แอนนิฮิเลชัน (Annihilation) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ปรากฏการณ์การผลิตคู่

ที่มา : (รุ่งชนเกียรติ, 2547)

ผลกระทบของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต

ผลกระทบจากการรับรังสีของสิ่งมีชีวิต ทั้งจากแหล่งกำเนิดรังสีภายนอกร่างกายและแหล่งกำเนิดรังสีภายในร่างกาย เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่สำคัญสองประการ ได้แก่ ปริมาณและอัตรารังสีที่ได้รับ ดังนั้นสามารถแบ่งประเภทการได้รับรังสีของมนุษย์ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ (จีวะประเสริฐ and เกียมจรัสรัมย์, 2018)

1. การรับรังสีแบบเฉียบพลัน (Acute exposure)

ร่างกายได้รับรังสีในปริมาณที่สูงมากเป็นระยะเวลาสั้นๆ เช่น การได้รับรังสีจากอุบัติเหตุทางรังสี ระเบิดนิวเคลียร์และการรับรังสีทางการแพทย์เพื่อการรักษาโรคมะเร็ง เป็นต้น

2. การรับรังสีแบบเรื้อรัง (Chronic exposure)

ร่างกายได้รับรังสีในปริมาณที่ต่ำแต่มีปริมาณที่สูงกว่าค่ารังสีพื้นหลัง (Background radiation) เป็นระยะเวลานานๆ เช่น การได้รับรังสีจากการปฏิบัติงานทางรังสีในห้องปฏิบัติการ เป็นต้น

ผลของรังสีต่อร่างกาย

1. ผลแบบเฉียบพลัน (Acute effect)

ผลกระทบแบบเฉียบพลันเป็นผลกระทบต่อสุขภาพที่เกิดขึ้นได้ทันทีภายหลังการรับรังสี โดยมีผลต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย ดังนี้ (จีวะประเสริฐ and เกียมจรัสรัมย์, 2018)

1.1 ระบบสร้างเลือด

เมื่อร่างกายได้รับรังสีปริมาณ 1 Gy เซลล์เม็ดเลือดจะได้รับผลกระทบอย่างชัดเจน เนื่องจากรังสีสามารถทำลายเซลล์เม็ดเลือดและอวัยวะที่ใช้ในการสร้างเลือด เช่น ม้าม ไชกระดูก เนื้อเยื่อและน้ำเหลือง เป็นต้น ทั้งนี้เซลล์เม็ดเลือดขาวจะมีความไวต่อรังสีมากที่สุด เนื่องจากเซลล์เม็ดเลือดขาวสามารถลดจำนวนลงอย่างรวดเร็วภายหลังจากการได้รับรังสีเพียง 0.1-0.2 Gy ซึ่งเมื่อจำนวนเซลล์เม็ดเลือดขาวลดจำนวนลง ส่งผลให้ภูมิคุ้มกันลดลง เป็นสาเหตุให้สามารถติดเชื้อโรคจากภายนอกได้ง่ายขึ้น

1.2 ระบบทางเดินอาหาร

ระบบทางเดินอาหารมีเยื่อเมือกและเนื้อเยื่อบุผิวที่มีความไวต่อรังสีมาก ทั้งนี้เยื่อเมือกและเนื้อเยื่อบุผิวถูกทำลายด้วยรังสี เกิดแผลเลือดออกในทางเดินอาหาร ส่งผลให้เกิดการติดเชื้อจากแบคทีเรียที่ลำไส้และเป็นไข้ ส่วนเนื้อเยื่อในระบบทางเดินอาหารอื่น ๆ มีความไวต่อรังสีน้อยกว่า อาจส่งผลให้เกิดอาการเพียงเล็กน้อย เช่น คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง เบื่ออาหาร เป็นต้น

1.3 ระบบประสาท

ระบบประสาทเป็นระบบที่มีความทนต่อรังสีมากที่สุดในร่างกาย เนื่องจากต้องได้รับรังสีในปริมาณที่สูงถึง 50 Gy ระบบประสาทจึงจะถูกทำลาย โดยอาจส่งผลให้เกิดภาวะหมดสติขั้นรุนแรง ชักและกระตุก เป็นต้น

1.4 ระบบสืบพันธุ์

ในกรณีของเพศชายหากได้รับรังสีในปริมาณสูง ส่งผลทำให้อสุจิและเซลล์สร้างอสุจิน้อยลงจนอาจเป็นหมันได้ในอนาคต หากเซลล์สร้างอสุจียังเหลืออยู่จากการถูกทำลายด้วยรังสีและสามารถแบ่งตัวสร้างอสุจิต่อไปได้ อาจเกิดอาการเป็นหมันชั่วคราว (Temporary sterility) แต่หากเซลล์อสุจิถูกทำลายไปมากจากการถูกทำลายด้วยรังสี และไม่สามารถแบ่งตัวสร้างอสุจิต่อไปได้อีก อาจทำให้เกิดการเป็นหมันถาวร

ในกรณีของเพศหญิงหากได้รับรังสีในปริมาณสูง ส่งผลทำให้ไข่และเซลล์สร้างไข่เสียหาย โดยหากได้รับรังสีในปริมาณน้อย อาจยังสามารถสืบพันธุ์ได้ แต่หากได้รับรังสีในปริมาณที่สูงมาก อาจส่งผลให้เป็นหมันถาวร

ความเสียหายอีกประการหนึ่งที่เกิดขึ้นกับระบบสืบพันธุ์ ได้แก่ รังสีอาจส่งผลให้โครโมโซมเกิดการผิดปกติ ซึ่งสามารถถ่ายทอดลักษณะความผิดปกติไปยังรุ่นลูกหลานได้

2. ผลแบบเรื้อรัง (Chronic effect)

ผลแบบเรื้อรังเป็นผลต่อสุขภาพที่ปรากฏหลังจากได้รับรังสีเป็นระยะเวลานาน อาจเกิดขึ้นจากการรับรังสีแบบเฉียบพลันหรือการรับรังสีแบบเรื้อรังก็ได้ ซึ่งส่งผลให้มีความเสี่ยงที่จะเป็นมะเร็งเพิ่มมากขึ้น ผลแบบเรื้อรังเกิดขึ้นแบบสุ่ม ไม่ขึ้นกับปริมาณรังสีที่ได้รับและไม่มีวิธีการวินิจฉัยใดๆ ที่สามารถบ่งชี้ได้อย่างแน่ชัดว่าสาเหตุของการเกิดมะเร็งเกิดขึ้นเนื่องจากการรับรังสีเรื้อรังหรือไม่ ทั้งนี้มีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลแบบเรื้อรัง เช่น ชนิดของรังสี ปริมาณของรังสี ระยะเวลาที่ได้รับรังสี อวัยวะที่ได้รับรังสี สภาพความแข็งแรงและพันธุกรรมแต่ละบุคคลที่ได้รับรังสี (ชีวะประเสริฐ and เกียมจรัสรังษี, 2018)

หลักการป้องกันรังสี

รังสีสามารถนำมาใช้งานให้เกิดประโยชน์ได้หลายรูปแบบ ด้านอุตสาหกรรม ด้านการเกษตร ด้านการแพทย์ ด้านงานวิจัย เป็นต้น แต่รังสีสามารถก่อให้เกิดผลเสียต่อร่างกายของผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีและผู้ที่เกี่ยวข้องได้เช่นกัน ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายจากการได้รับรังสีในปริมาณที่สูง ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีต้องปฏิบัติตามหลักความปลอดภัยทางรังสีที่เรียกว่า “As Low As Reasonably Achievable” หรือ “ALARA” ซึ่งมีหลักการปฏิบัติ 3 ประการได้แก่ (Tiamduangtawan et al., 2020)

- เวลา (Time of exposure) โดยปริมาณรังสีที่ได้รับแปรผันโดยตรงกับระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ดังนั้น ผู้ปฏิบัติงานควรใช้ระยะเวลาในบริเวณที่มีรังสีให้น้อยที่สุด
- ระยะทาง (Distance) โดยปริมาณรังสีที่ได้รับมีค่าแปรผกผันกับค่ากำลังสองของระยะทาง (Inverse square law) ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานควรอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีให้มากที่สุด
- อุปกรณ์กำบังรังสี (Shielding) ในกรณีที่ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถหลีกเลี่ยงข้อปฏิบัติด้านระยะเวลาหรือระยะทางในการปฏิบัติงานได้ อุปกรณ์กำบังรังสีเป็นอีกกระบวนการสำคัญในการป้องกันอันตรายจากรังสีต่อตัวผู้ปฏิบัติงาน โดยอุปกรณ์กำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพช่วยลดความเข้มของรังสีที่ผ่านมายังผู้ปฏิบัติงาน จึงสามารถเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานได้มากขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีต มีการนำวัสดุหลายชนิด เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ยางและคอนกรีต เป็นต้น มาประยุกต์และพัฒนาเป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน (Gaikwad *et al.*, 2018) โดยเฉพาะวัสดุประเภท PE เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความสามารถในการลดทอนความเข้มและพลังงานของอนุภาคนิวตรอนได้ดี เนื่องจากวัสดุ PE มีส่วนประกอบของธาตุไฮโดรเจนที่สูง ส่งผลให้สามารถลดทอนพลังงานจากการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างอะตอมไฮโดรเจนกับอนุภาคนิวตรอนได้ดี ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการนำวัสดุ PE มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอน ได้แก่ งานวิจัยของ (Al-saadi, 2010) ซึ่งพบว่าวัสดุ PE ที่มีความหนา 20 เซนติเมตร สามารถลดพลังงานของอนุภาคนิวตรอนจาก 14 MeV ให้มีพลังงานน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 MeV ได้

ทั้งนี้ วัสดุประเภท PE มีหลายชนิด เช่น ชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene; HDPE) ชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Medium density polyethylene; MDPE) ชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene; LDPE) และชนิดมวลโมเลกุลสูงพิเศษ (Ultra-high-molecular-weight polyethylene; UHMWPE) เป็นต้น จากงานวิจัยของ (İrim *et al.*, 2018) ได้มีการนำวัสดุ HDPE ไปใช้ในการกำบังอนุภาคนิวตรอน ทั้งนี้เนื่องจาก HDPE มีส่วนประกอบของธาตุไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยมีค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile ultimate strength) สูงถึง 22-31 MPa เป็นต้น นอกจากนี้พบว่าวัสดุประเภท (UHMWPE) เป็นหนึ่งในวัสดุที่มีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนเช่นกัน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าที่สูงกว่า HDPE ซึ่งเห็นได้จากงานวิจัยของ (มะธิโตปะนะ, 2556) ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง UHMWPE และ HDPE ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าสมบัติการต้านทานแรงดึง (Tensile properties) โดยรวมของวัสดุ UHMWPE มีค่าสูงกว่า HDPE อีกทั้งมีค่าความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) โดยรวมสูงกว่า HDPE เช่นกัน นอกจากนี้ UHMWPE มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ที่สูงกว่า HDPE จึงสามารถนำมาพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับการป้องกันความเสียหายจากอนุภาคนิวตรอนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้ (King *et al.*, 2009)

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างวัสดุพอลิเอทิลีนประเภท HDPE และ UHMWPE

Property	HDPE	UHMWPE
Molecular Weight (10^6 g/mol)	0.05-0.25	2-6
Tensile Modulus (GPa)	0.4-4.0	0.8-1.6
Tensile Ultimate Strength (MPa)	22-31	39-48
Tensile Ultimate Elongation (%)	10-1200	350-525
Impact Strength, Izod (J/m)	21-214	>1070 (No break)
Dielectric Strength (V/mill)	400-500	2300

ที่มา : (มะชิโตปะนะ, 2556)

แต่ทั้งนี้ อนุภาคนิวตรอนที่ผ่านออกมาจากวัสดุ PE ยังอาจเป็นอันตรายต่อสารพันธุกรรม (DNA) ในร่างกายได้ เนื่องจากอนุภาคนิวตรอนเหล่านี้ สามารถก่อให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนและทำลาย DNA ได้โดยตรง ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอนให้สูงขึ้นและลดปริมาณความหนาของวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่ต้องใช้ จึงมีการเติมสารตัวเติมที่มีค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคนิวตรอน (Neutron absorption cross-section) ที่สูง เช่น B_2O_3 , Sm_2O_3 , และ Gd_2O_3 เป็นต้น ลงไปในวัสดุ เพื่อเพิ่มโอกาสในการเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคนิวตรอน โดยงานวิจัยของ (โตเย็น, 2018) ได้มีการเติมสารตัวเติม Sm_2O_3 ปริมาณ 10 %wt ลงในวัสดุ UHMWPE พบว่าที่ความหนา 5 มิลลิเมตร วัสดุ Sm_2O_3 /UHMWPE สามารถลดทอนจำนวนอนุภาคนิวตรอนได้ถึง 60 % และได้มีการเปรียบเทียบความสามารถในการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ที่มีการเติม B_2O_3 และ Sm_2O_3 ในปริมาณ 10 %wt พบว่าวัสดุเชิงประกอบ Sm_2O_3 /UHMWPE มีค่าความหนาครึ่งค่า (Half value layer ; HVL) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอนที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบ B_2O_3 /UHMWPE ที่มีค่า HVL เท่ากับ 6.4 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคนิวตรอนของ Sm มีค่า

สูงกว่า B ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่งผลให้ วัสดุเชิงประกอบ $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคนิวตรอนได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบ $\text{B}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ และจากงานวิจัยของ (Tiamduangtawan *et al.*, 2020) ได้มีการเปรียบเทียบการก้ำบังอนุภาคนิวตรอนจากวัสดุเชิงประกอบพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol ; PVA) ที่มีการเติม Sm_2O_3 และ Gd_2O_3 ปริมาณ 3.5 %wt พบว่า $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{PVA}$ มีค่า HVL เท่ากับ 4.1 มิลลิเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการก้ำบังอนุภาคนิวตรอนที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบ $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{PVA}$ ที่มีค่า HVL เท่ากับ 5.2 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคนิวตรอนของ Gd มีค่าสูงกว่า Sm ดังแสดงในตารางที่ 3 ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{PVA}$ มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคนิวตรอนได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบ $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{PVA}$

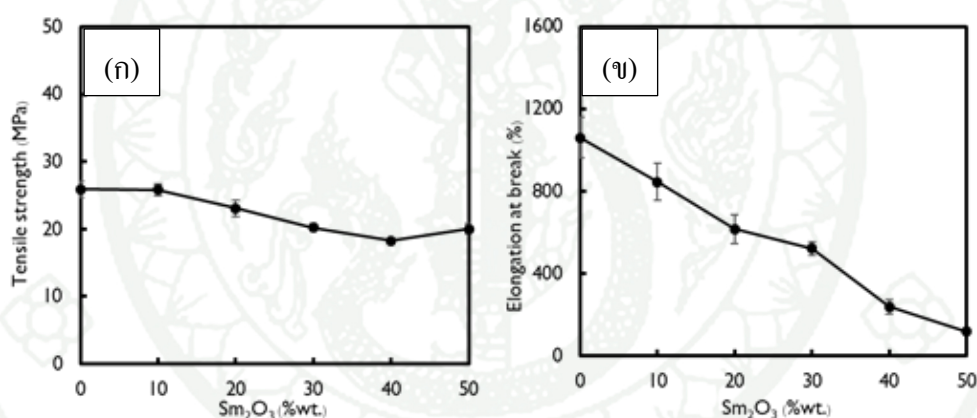
นอกจากนี้ Gd มีคุณสมบัติในการก้ำบังรังสีแกมมาที่อาจถูกปลดปล่อยออกมาภายหลังการดูดกลืนอนุภาคนิวตรอนของ Gd_2O_3 ทั้งนี้เนื่องจากธาตุที่นิยมนำใช้ก้ำบังรังสีแกมมา ต้องมีเลขอะตอมและความหนาแน่นที่สูง (Saeed *et al.*, 2015) ซึ่งจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับรังสีแกมมาได้ดี โดยธาตุ Gd มีเลขเชิงอะตอมที่สูง ($Z=64$) และ Gd_2O_3 มีความหนาแน่นที่สูง ($\rho= 7.41 \text{ g/cm}^3$) ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงกับผู้ปฏิบัติงานที่อาจได้รับรังสีแกมมาในปริมาณที่สูงเกินกำหนด ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการนำสารประกอบ Gd มาใช้ในการก้ำบังรังสีแกมมา ได้แก่ งานวิจัยของ (Mahmoud and Rammah, 2020) ได้มีการนำวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{Glass}$ มาก้ำบังรังสีแกมมาที่พลังงาน 15 MeV พบว่าวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวสามารถลดทอนความเข้มของรังสีแกมมาได้ โดยมีค่า HVL เท่ากับ 10 เซนติเมตร

ตารางที่ 3 ค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคนิวตรอน (Neutron absorption cross section) ของ แกโดลิเนียม (Gd) ซามาเรียม (Sm) และ โบรอน (B)

Element	Neutron absorption cross section (barns)
^{nat}Gd	48860
^{nat}Sm	5922
^{nat}B	767

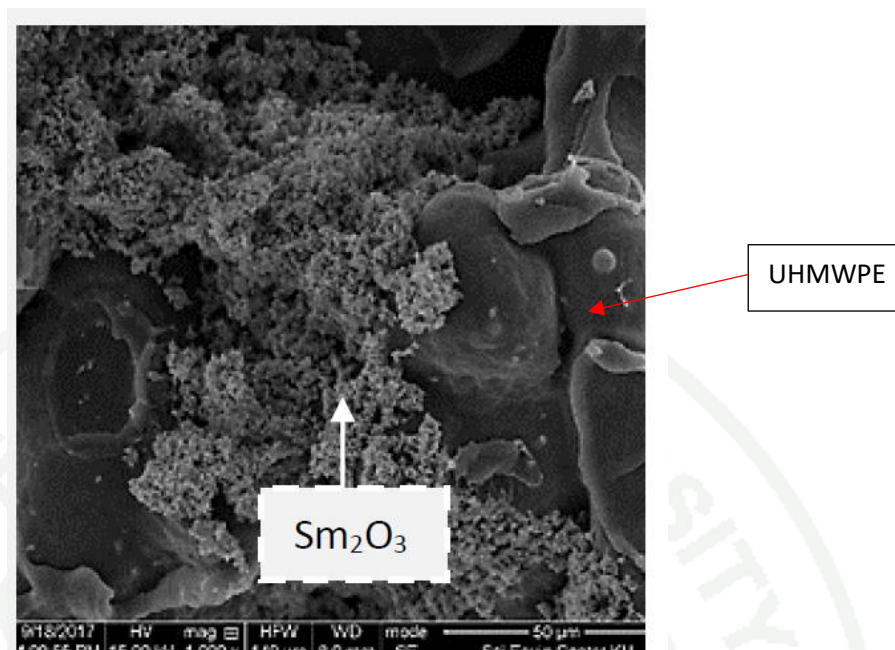
ที่มา : (โตเย็น *et al.*, 2018; มะริโตปะนา, 2556)

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในวัสดุหลักเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำบังอนุภาคนิวตรอน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง ดังเห็นได้จากงานวิจัยของ (โตเย็น, 2018) ได้มีการเติม Sm_2O_3 ที่ปริมาณ 0-50 %wt พบว่าสมบัติการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ มีค่าลดลงตามปริมาณสารตัวเติม ดังแสดงในภาพที่ 9 การลดลงของสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ เกิดขึ้นจากการที่สารตัวเติม Sm_2O_3 มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในวัสดุ UHMWPE โดยเมื่อมีการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการจับตัวกันเองระหว่างสารตัวเติมและเกิดการแยกเฟสอย่างชัดเจนของวัสดุหลักกับสารตัวเติม ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง



ภาพที่ 9 สมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของวัสดุเชิงประกอบ UHMPWE ที่มีการเติมสารตัวเติม Sm_2O_3 0-50%wt (ก) สมบัติความต้านทานแรงดึง และ (ข) การยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$

ที่มา : (โตเย็น *et al.*, 2018)



ภาพที่ 10 วัสดุเชิงประกอบ Sm_2O_3 /UHMWPE ที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน ซึ่งพบการเกาะกลุ่มของอนุภาค Sm_2O_3 อย่างชัดเจน

ที่มา : (โตเย็น *et al.*, 2018)

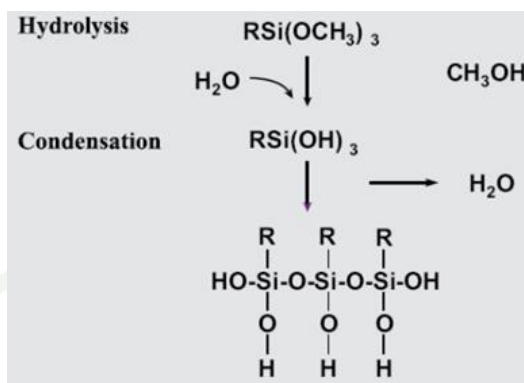
ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับปรุงการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุหลักให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น งานวิจัยของ (Zhang *et al.*, 2009) ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ Fiber/UHMWPE โดยใช้สารคู่ควบไฮโดรเจน 2 ชนิด ได้แก่ aminopropyl triethoxysilane (SCA-KH-550) และ glycidoxypopyl trimethoxysilane (SCA-KH-560) ซึ่งการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความเป็นผลึก (Crystallinity) ของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ Fiber/UHMWPE ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน ดังแสดงในตารางที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการทำให้โมเลกุลของ UHMWPE และ Fiber จับตัวกันได้ดีขึ้น โดยปลายข้างหนึ่งของสารคู่ควบไฮโดรเจนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับสารอนินทรีย์ เช่น เส้นใยและโลหะออกไซด์ เป็นต้น ส่งผลให้เกิดการเกาะติดกันระหว่างสารอนินทรีย์กับสารคู่ควบไฮโดรเจน ในขณะที่ปลายอีกข้างหนึ่งของสารคู่ควบไฮโดรเจนจะเกาะติดกับสารอินทรีย์ ซึ่งส่งผลให้การยึดติดกันระหว่าง

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ดีขึ้น โดยกลไกการเกิดพันธะของสารคู่ควบกับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มีขั้นตอนดังนี้

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนชนิด Fibers/UHMWPE ที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบด้วยสารคู่ควบไซเลน (Zhang *et al.*, 2009)

Samples	Tensile strength (cN/dtex)	Tensile modulus (cN/dtex)	Elongation at break (%)	Crystallinity (%)
Fibers/UHMWPE	15.9	369.7	4.6	66.0
Fibers/UHMWPE (SCA-KH-550)	17.7	456.4	4.5	67.9
Fibers/UHMWPE (SCA-KH-560)	17.5	430.7	4.5	67.8

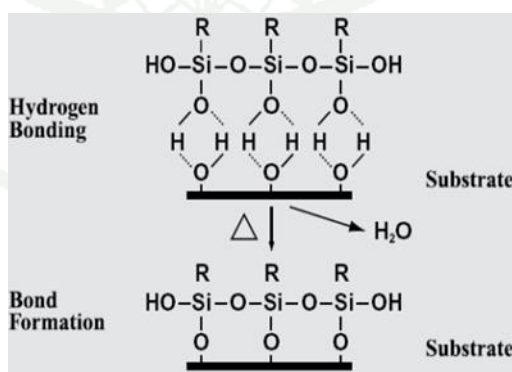
1. กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารคู่ควบไซเลนกับน้ำ เกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Silanols) ดังแสดงในภาพที่ 11 (Toyen *et al.*, 2021)



ภาพที่ 11 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารคู่คววไซเลนกับน้ำ

ที่มา : (Toyen *et al.*, 2021)

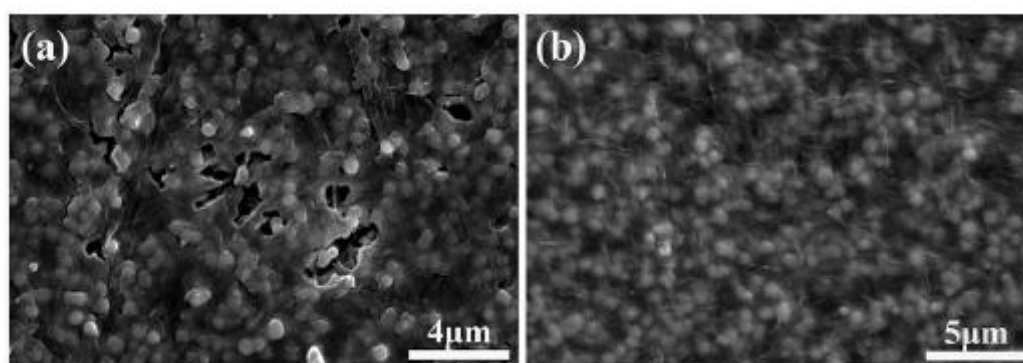
2. การเกิดพันธะกับผิวของสารอนินทรีย์ (สารตัวเติม) โดยหมู่ไซลานอลจะจับกับไฮดรอกไซด์ (-OH) และมีการระเหยออกของน้ำ เกิดเป็นพันธะออกเซน (Oxane bonds) ส่งผลให้ปลายข้างหนึ่งของสารคู่คววไซเลนสามารถเกาะติดกับสารอนินทรีย์และปลายอีกข้างหนึ่งเกาะติดกับสารอินทรีย์ได้ ซึ่งพบว่าจะทำให้สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์มีการรวมตัวกันได้ดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 12 (Toyen *et al.*, 2021)



ภาพที่ 12 การเกิดปฏิกิริยาของสารคู่คววไซเลนกับพื้นผิวสารอนินทรีย์

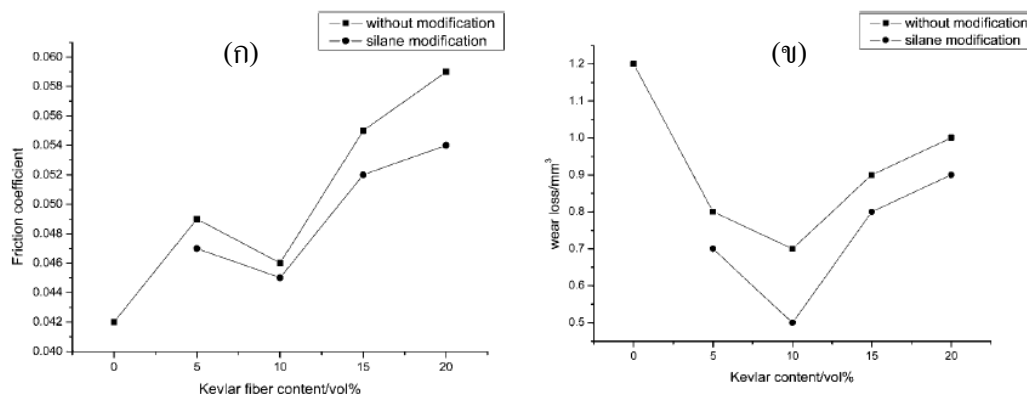
ที่มา : (Toyen *et al.*, 2021)

นอกจากนี้งานวิจัยของ (Wang *et al.*, 2016) ได้มีการใช้สารกลุ่มควาไซเลนในการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเดิม โดยมีการพัฒนาและทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ AIN/UHMWPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของ AIN ด้วยสารกลุ่มควาไซเลน KH-550 ดังแสดงในภาพที่ 13 โดยภาพ 13(ก) ซึ่งแสดงถึงวัสดุเชิงประกอบ AIN/UHMWPE ที่ไม่มีการใช้สารกลุ่มควาไซเลน พบว่าสารตัวเดิมมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในวัสดุ UHMWPE และมีรอยขาดหรือช่องว่างเกิดขึ้นในวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE ที่มีการใช้สารกลุ่มควาไซเลน ดังแสดงในภาพ 13(ข) ซึ่งพบว่าสารตัวเดิมมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น



ภาพที่ 13 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของ (ก) วัสดุเชิงประกอบ AIN/UHMWPE microspheres ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารกลุ่มควาไซเลนและ (ข) วัสดุเชิงประกอบ AIN/UHMWPE microspheres ที่เติมสารกลุ่มควาไซเลน KH-550 เพื่อปรับปรุงผิวของ AIN microspheres ที่มา : (Wang *et al.*, 2016)

งานวิจัยของ (Li and Ye, 2010) มีการศึกษาผลของการปรับปรุงผิวของเส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fibre) ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและวัสดุ UHMWPE โดยใช้สารกลุ่มควาไซเลนชนิด Vinyltriethoxysilane พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารกลุ่มควาไซเลนแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำกว่าและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเดิม ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ผลของการปรับปรุงผิวและเปอร์เซ็นต์ของเส้นใยต่อ (ก) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และ (ข) ความต้านทานต่อการสึกหรอ
ที่มา : (Li and Ye, 2010)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่พัฒนาวัสดุเชิงประกอบ UHMWPE สำหรับใช้ในการกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมา โดยการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณ 0, 10, 15, 20 และ 25 ร้อยละโดยมวล (%wt) ซึ่งผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควาไซเลนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมในวัสดุ UHMWPE ซึ่งผู้วิจัยทำการทดสอบสมบัติที่สำคัญของวัสดุได้แก่ สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติการทนต่อการสึกหรอ ลักษณะพื้นฐานวิทยา และสมบัติการต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งวัสดุที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็น อุปกรณ์เครื่องทดสอบด้านรังสี ดังนี้ บัช แบริง บานเลื่อน ฐานรองรับผู้ป่วย สำหรับห้องปฏิบัติการที่มีการใช้อนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา เพื่อเป็นการเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสี อีกทั้งยังสามารถนำมาพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับการป้องกันความเสียหายจากอนุภาคนิวตรอนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้ เช่น ตัวควบคุมระบบไฟฟ้า เป็นต้น

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE แสดงในตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 5 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE

วัสดุและสารเคมี	ที่มา
UHMWPE	IRPC Public Company Limited
Gd_2O_3 (99.99%)	Richest Group, Shanghai, China.
Paraffin oil (commercial grade)	Facobis Co., Ltd., Thailand.
n-Hexane (100% w/w)	Chemipan Corporation, Thailand
Ethanol (99.99%)	Chemipan Corporation, Thailand
3-aminopropyltriethoxysilane (KH-550)	Chemipan Corporation, Thailand

ตารางที่ 6 เครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ที่ใช้ในการขึ้นรูปและทดสอบวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE

เครื่องมือ/อุปกรณ์	สถานที่
เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่	P-PROF
เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน	P-PROF
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	KU
เครื่องวิเคราะห์สาร โดยแสงอินฟราเรด	KU
เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล	P-PROF and KU
เครื่องทดสอบสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา	KU and TINT

เครื่องทดสอบสมบัติด้านทานการสึกหรอที่พื้นผิว	KMUTNB
เครื่องทดสอบค่าการนำไฟฟ้า/การต้านทานไฟฟ้า	MTEC
เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	KU

*KU : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*P-PROF : กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*KMUTNB : ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*TINT : สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

*MTEC : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

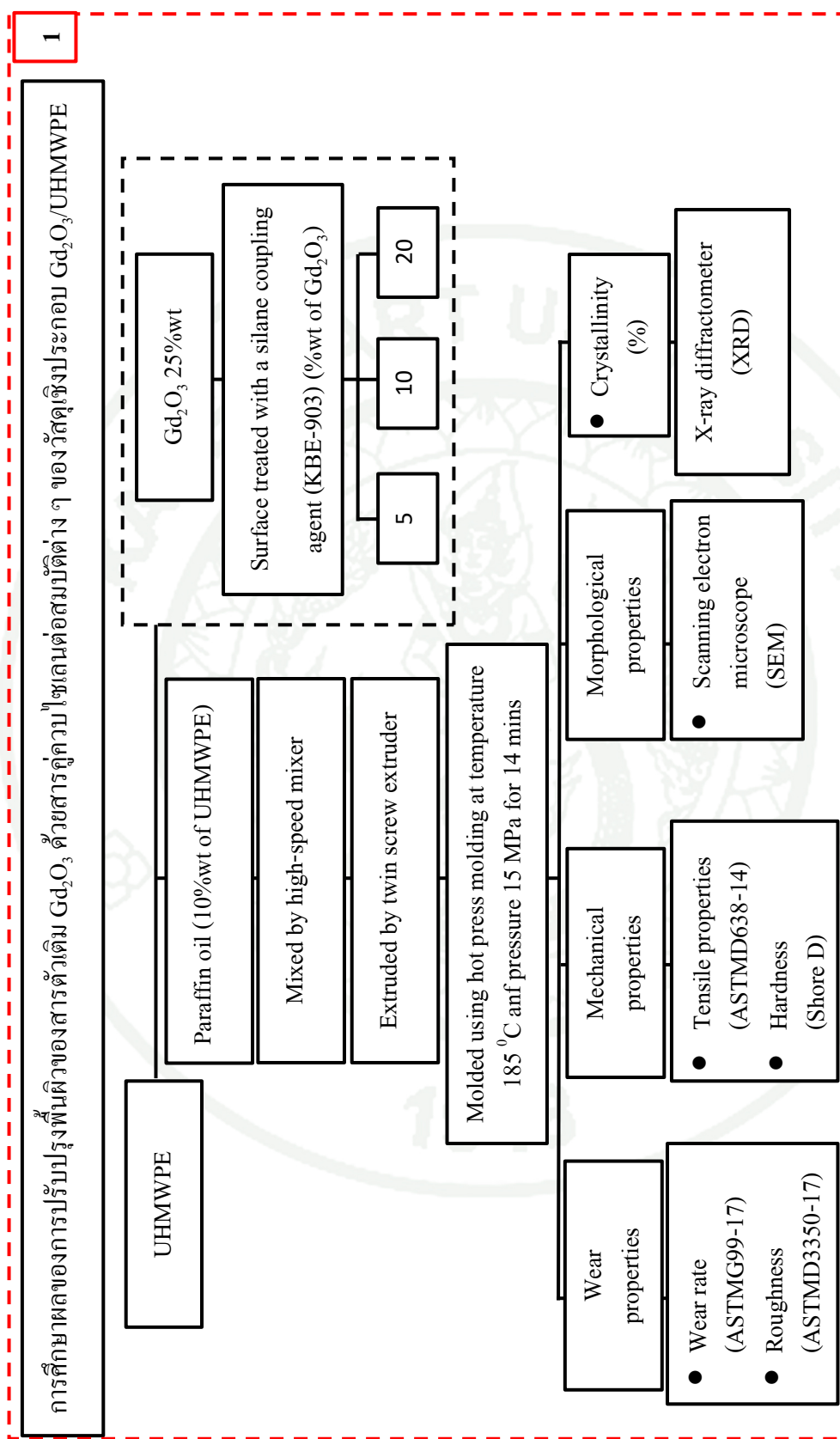
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนจากวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE โดยแบ่งแผนการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

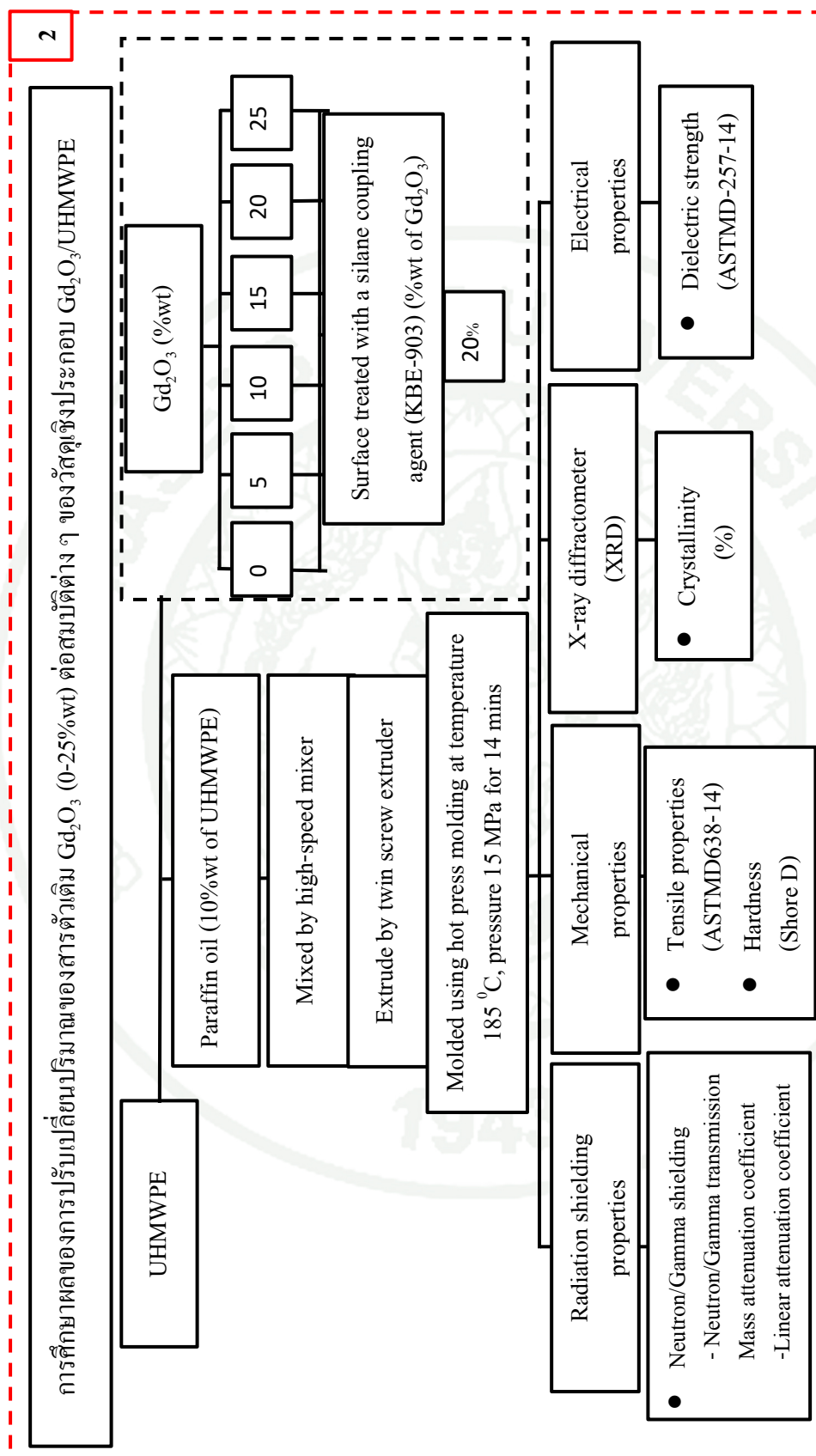
ส่วนที่ 1 : การศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารกลุ่มควาไซเลน ชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 % wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอ สมบัติเชิงกล ค่าความแข็งที่พื้นผิวและลักษณะฐานวิทยา เพื่อให้ได้ปริมาณสารกลุ่มควาไซเลนที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ใน ส่วนที่ 2 และ 3 แผนการศึกษาในส่วนที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 15

ส่วนที่ 2 : การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารกลุ่มควาไซเลน (KBE-903) ต่อสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/แกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE แผนการศึกษาในส่วนที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 16

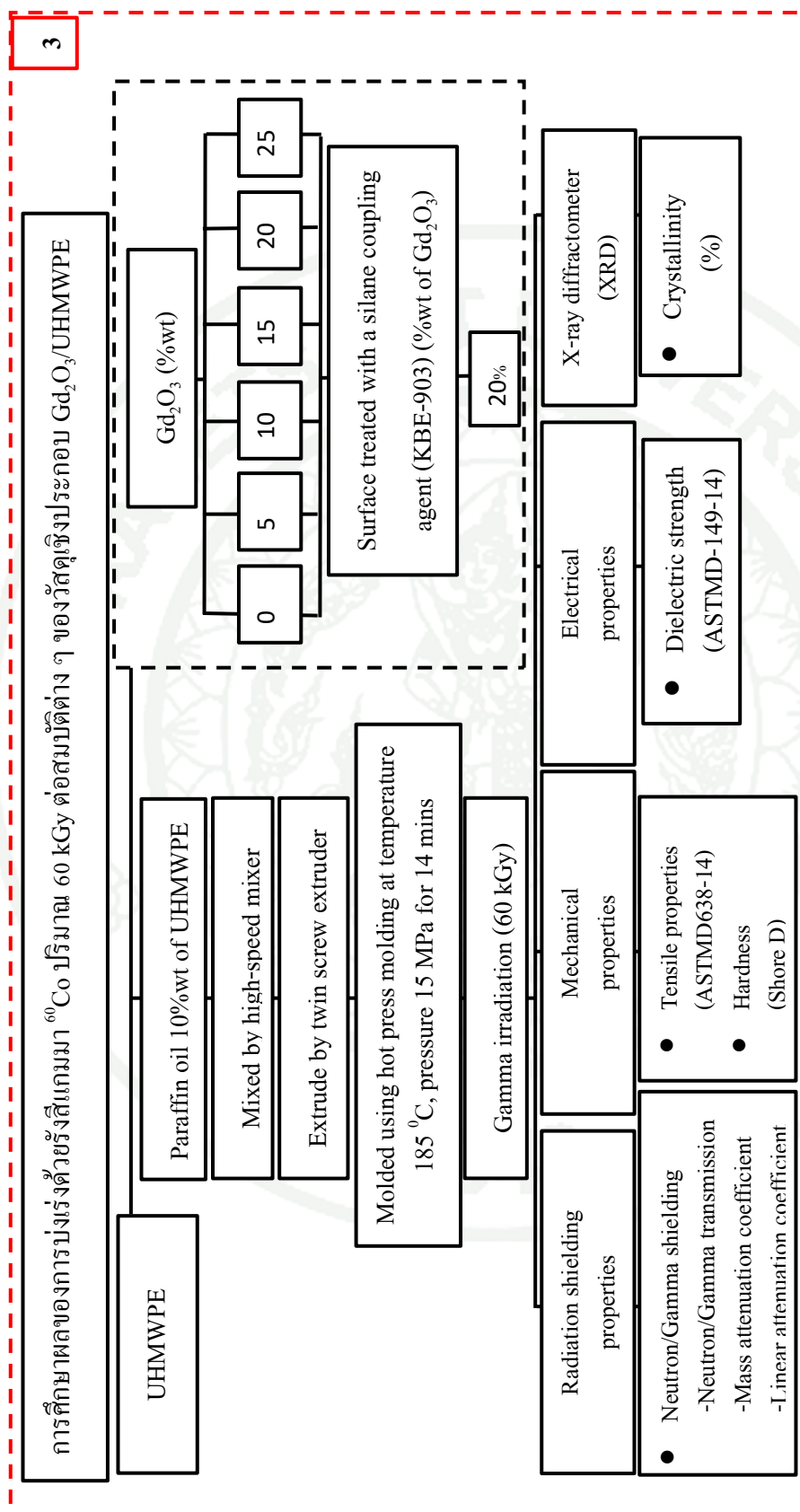
ส่วนที่ 3 : การศึกษาผลของการบ่งเร่งวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ด้วยรังสีแกมมา ปริมาณ 60 kGy ต่อสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/แกมมา สมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE แผนการศึกษาในส่วนที่ 3 ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 15 แผนดำเนินการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 และการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ (แผนงานส่วนที่ 1)



ภาพที่ 16 แผนดำเนินการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติม Gd_2O_3 (0-25%wt) ผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ (แผนงานส่วนที่ 2)



ภาพที่ 17 แผนดำเนินการศึกษาผลของการบ่มรังสีแกมมา ⁶⁰Co (ปริมาณ 60 kGy) ผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE (แผนงานส่วนที่ 3)

ส่วนที่ 1 : การศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารกลุ่มควาไซเลนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของ Gd_2O_3 ต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอ สมบัติเชิงกล ค่าความแข็งที่พื้นผิวและลักษณะฐานวิทยา

1. การเตรียมและการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3

ทำการเตรียมสารกลุ่มควาไซเลนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) ความเข้มข้น 5 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 โดยผสมสารละลายกลุ่มควาไซเลนชนิด KH-550 ร่วมกับเอทานอลและน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 5:72:23, 10:72:18 และ 20:72:8 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสารละลายที่ได้ผสมกับสารตัวเติม Gd_2O_3 ในอัตราส่วน 1:1 ด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Mechanical stirrer) เป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง และทำการระเหยแอลกอฮอล์ออกจากสารละลายด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Temperature-controlled water bath) ที่อุณหภูมิ $90^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำสารที่เหลือไปอบแห้งต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ $80^{\circ}C$ ด้วยเครื่องอบลมร้อน (Hot-air oven)

2. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE

ทำการผสมผง UHMWPE และ Gd_2O_3 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารกลุ่มควาไซเลนในอัตราส่วน 75:25 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) ดังแสดงในภาพที่ 18 จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปบดผสมด้วยความร้อนผ่านเกลียวด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) ดังแสดงในภาพที่ 19 มีการเติมน้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) ปริมาณ 10 % wt ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE โดยก่อนนำสารประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ใส่เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ เพื่อลดความหนืดของวัสดุ UHMWPE ระหว่างการขึ้นรูป โดยให้อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ในแต่ละช่วงดังนี้คือ 170, 175, 180 และ $185^{\circ}C$ ตามลำดับ เพื่อให้วัสดุ UHMWPE หลอมละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับ Gd_2O_3 โดยใช้ความเร็วของสกรูเท่ากับ 40 รอบต่อนาที เพื่อส่งผ่านและบดอัดสารประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ด้วยแรงเฉือนไปในแต่ละช่วงของสกรูและหัวคาย หลังจากนั้นแช่ชิ้นงานที่ผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ในสารละลายเฮกเซน (n-Hexane) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการสกัดน้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) ออกจากวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE และทำการอบ

วัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิ 80°C โดยใช้เครื่องอบลมร้อน เพื่อนำความชื้นและสารละลายเอ็น-เฮกเซนออกจากวัสดุ หลังจากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 185°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 18 MPa เป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 18 เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)



ภาพที่ 19 เครื่องอัดรีดชนิดหนอนเกลียวคู่ (Twin screw extruder)



ภาพที่ 20 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน

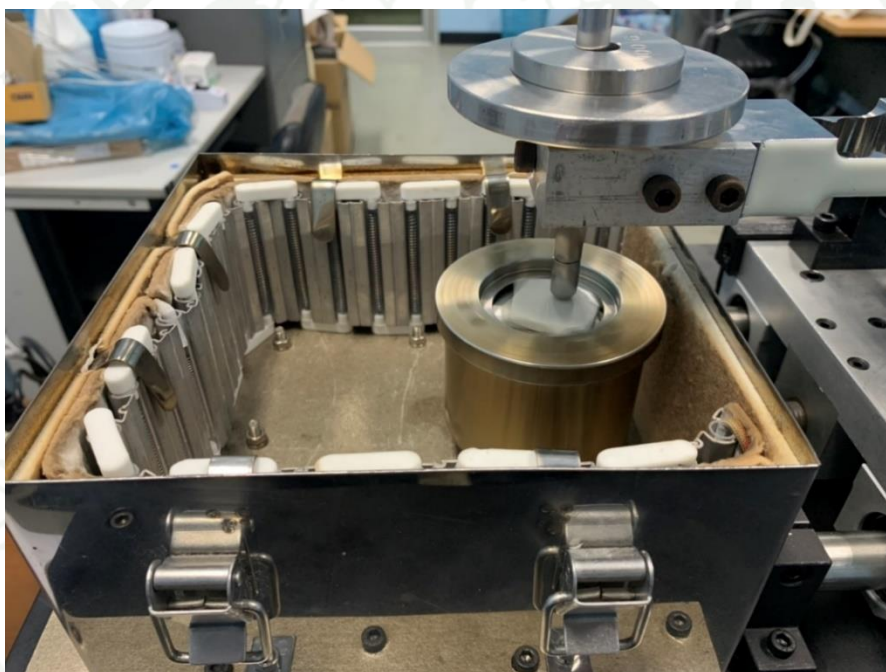
3. การทดสอบสมบัติการต้านทานการสึกหรอ ความแข็งที่ผิว สมบัติเชิงกลและลักษณะ สัณฐานวิทยา

3.1 สมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear properties)

ศึกษาสมบัติการต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยการทดสอบหาอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยเทคนิค Pin on disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-95 ในสภาวะแบบแห้ง โดยใช้ลูกบอลเหล็กกล้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร กดลงบนชิ้นงานตัวอย่างด้วยน้ำหนักกดคงที่ 5 นิวตัน โดยลูกบอลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เท่ากับ 0.3 เมตรต่อวินาที ระยะทาง 1000 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 21 ทั้งนี้สามารถคำนวณพื้นที่และอัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ จากสมการที่ 29 นอกจากนี้ ได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness (Shore D)) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยเครื่อง Hardness Tester รุ่น GS-719G จากบริษัท Teclock ประเทศญี่ปุ่น ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 ดังแสดงในภาพที่ 22

$$\text{Wear rate} = \frac{\text{wear volume loss}}{\text{Sliding distance} \times \text{applied load}} \quad (29)$$

โดยที่	wear rate	คือ อัตราการสึกหรอ (mm ³ /Nm)
	wear volume loss	คือ ปริมาตรที่วัสดุสูญเสียไป (mm ³)
	sliding distance	คือ ระยะทางที่ลูกกลิ้งเลื่อนไถบนพื้นผิววัสดุ (m)
	applied load	คือ แรงกดลูกกลิ้ง (N)



ภาพที่ 21 เครื่องทดสอบสมบัติด้านทานการสึกหรอของพื้นผิว (Pin on disc machine for material testing)



ภาพที่ 22 เครื่องทดสอบค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness (Shore D))

3.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทำการทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง (Tensile properties) ซึ่งประกอบด้วยค่า ค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break %) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5 kN ประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในภาพที่ 23 โดยใช้ความเร็วในการดึงขึ้นงานเท่ากับ 100 mm/min ตามมาตรฐาน ASTM D638-14



ภาพที่ 23 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine)

3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากบริษัท FEI รุ่น Qunata 450 ประเทศญี่ปุ่น

3.4 เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD)

ทำการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smartlab ดังแสดงในภาพที่ 24 สำหรับใช้วิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ทั้งนี้เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกันโดยมีหัววัด

สัญญาณ (Detector) เป็นตัวรับข้อมูล ทั้งนี้อาศัยในการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาของรังสีเอกซ์ จะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึกของชิ้นงาน



ภาพที่ 24 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)

ทั้งนี้การศึกษาในส่วนที่ 1 มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารคู่ควบไฮเลน ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของ Gd_2O_3 เพื่อให้ได้ปริมาณสารคู่ควบไฮเลนที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการวิจัยในแผนงานส่วนที่ 2 และ 3 ต่อไปโดยพิจารณาจากสมบัติการต้านทานการสึกหรอ ค่าความแข็งที่พื้นผิว และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลนปริมาณต่าง ๆ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรง เหมาะกับการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนที่ 2 :การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่มีต่อสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะสัณฐานวิทยา

1. การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE

ทำการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยปริมาณและกระบวนการผสมสารคู่ควบไฮเลนที่เหมาะสมจากแผนงานส่วนที่ 1 หลังจากนั้นทำการผสมผง UHMWPE และ Gd_2O_3 ใน

อัตราส่วน 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 และ 75:25 % โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปผสมด้วยความร้อนผ่านเกลียวด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยมีการเติมน้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) ปริมาณ 10%wt ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ เพื่อลดความหนืดและป้องกันการไหม้ของวัสดุ UHMWPE ระหว่างการขึ้นรูป โดยให้อุณหภูมิของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ในแต่ละช่วง ดังนี้คือ 170, 175, 180 และ 185 °C ตามลำดับ เพื่อให้วัสดุ UHMWPE หลอมละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกันกับ Gd_2O_3 โดยใช้ความเร็วของสกรูเท่ากับ 40 รอบต่อนาที เพื่อส่งผ่านและบดอัดสารประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยแรงเฉือนไปในแต่ละช่วงของสกรูและหัวคาย หลังจากนั้นแช่ชิ้นงานที่ผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ในสารละลายเฮกเซน (n-Hexane) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการสกัดน้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) ออกจากวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ และทำการอบวัสดุเชิงประกอบที่อุณหภูมิ 80 °C โดยใช้เครื่องอบลมร้อน เพื่อนำความชื้นและสารละลายเฮกเซนออกจากวัสดุ หลังจากนั้นนำวัสดุที่ได้ไปขึ้นรูปพร้อมแม่พิมพ์ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 185°C แรงดันปิดแม่พิมพ์ 18 MPa เป็นเวลา 15 นาที

2. การทดสอบสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล ลักษณะพื้นฐาน วิทยาและสมบัติทางไฟฟ้า

2.1 การตรวจวัดค่าความหนาแน่น (Density)

ทำการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ โดยการเตรียมตัวอย่างที่มีขนาด 2×2 ตารางเซนติเมตร ความหนาเฉลี่ย 0.2 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชิ้นต่อตัวอย่างและทำการวัดขนาดขนาดด้วยเครื่องมือวัดดิจิทัลเวอร์เนียสคาลิปเปอร์ที่มีความแม่นยำ 0.02 มิลลิเมตร ของบริษัท Duratool ประเทศไทย จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยมความละเอียด 4 ตำแหน่ง ของบริษัท Sartorius รุ่น Practum224-1S ประเทศเยอรมนี และคำนวณหาค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 30

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (30)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ (g/cm^3)

m คือ มวล (g)
V คือ ปริมาตร (cm³)

2.2 สมบัติการก่้างอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา (Neutron/Gamma shielding properties)

ทำการทดสอบสมบัติการก่้างอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 18 cm x 18 cm และหนา 0.2 เซนติเมตร โดยวางแผ่นชิ้นงานซ้อนกันให้มีความหนารวมตั้งแต่ 0.2-2 เซนติเมตร จากนั้นทำการวัดค่าอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมาเริ่มต้น (I_0) และค่าอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมาหลังผ่านวัสดุ (I) หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัดส่วนระหว่างรังสีหลังผ่านวัสดุและรังสีเริ่มต้น (I/I_0), ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงเส้น (μ), ค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงมวล (μ_m) และค่าความหนาครึ่งค่า (HVL) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 31-33 ทั้งนี้แหล่งกำเนิดอนุภาคนิวตรอนที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้แก่ ²⁴¹Am/Be โดยใช้หัววัดรังสีชนิดบรูก้าก๊าซฮีเลียม-3 (³He) ในการตรวจวัดจำนวนอนุภาคนิวตรอน ซึ่งมีการวางชิ้นงานให้ห่างจากหัววัดรังสีเป็นระยะทาง 11 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 25-26 ทั้งนี้หัววัดอนุภาคนิวตรอนมีการต่อเข้ากับวงจรนับวัดรังสี ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องขยายสัญญาณเบื้องต้น (Preamplifier) เครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) ยี่ห้อ Canberra รุ่น 2022 และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1000 V จากเครื่อง High volt power supply ยี่ห้อ Ortec รุ่น 659

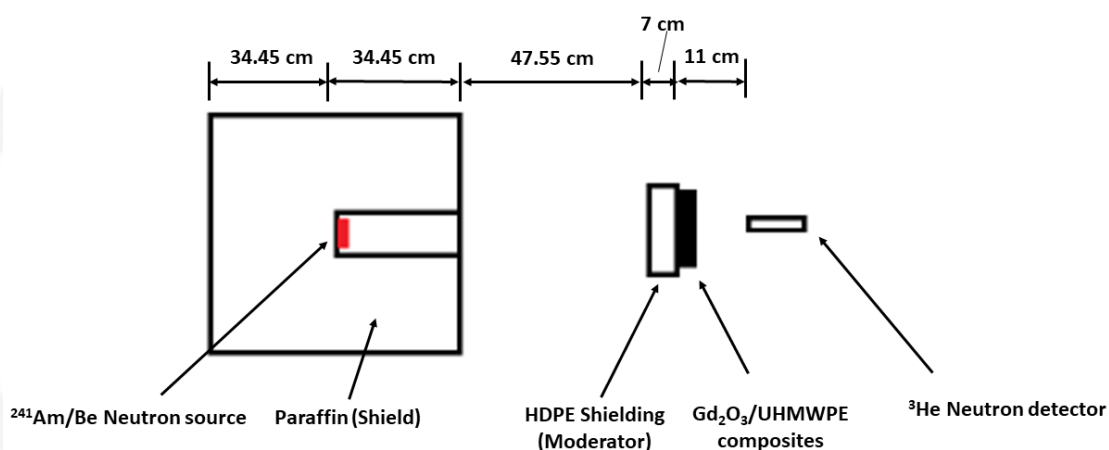
ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้แก่ ¹³⁷Cs ใช้หัววัดรังสีชนิดไอออนไนเซชัน แคมเบอร์ (Ionization chamber) ทำการตรวจวัดโดยวางชิ้นงานห่างจากหัววัดรังสี 90 เซนติเมตร และหัววัดรังสีแกมมามีการต่อเข้ากับวงจรนับวัดรังสี โดยมีการติดตั้งระบบเช่นเดียวกับในกรณีของอนุภาคนิวตรอน ทั้งนี้เมื่อรังสีแกมมาเข้าทำอันตรกิริยากับอากาศภายในหัววัด เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบ ซึ่งภายในหัววัดรังสีนั้น มีขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คือขั้วอิเล็กโทรดขั้วบวกหรือแอโนด (Anode) และขั้วลบหรือคาโทด (Cathode) โดยเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (High voltage) กับหัววัดรังสี จะส่งผลทำให้ไอออนที่เกิดขึ้นทุกตัววิ่งไปที่ขั้วอิเล็กโทรด โดยจำนวนของไอออนที่เกิดขึ้นภายในหัววัดรังสีนั้นขึ้นอยู่กับ ชนิด คุณสมบัติ และพลังงานของรังสี ดังแสดงในภาพที่ 27-28

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (31)$$

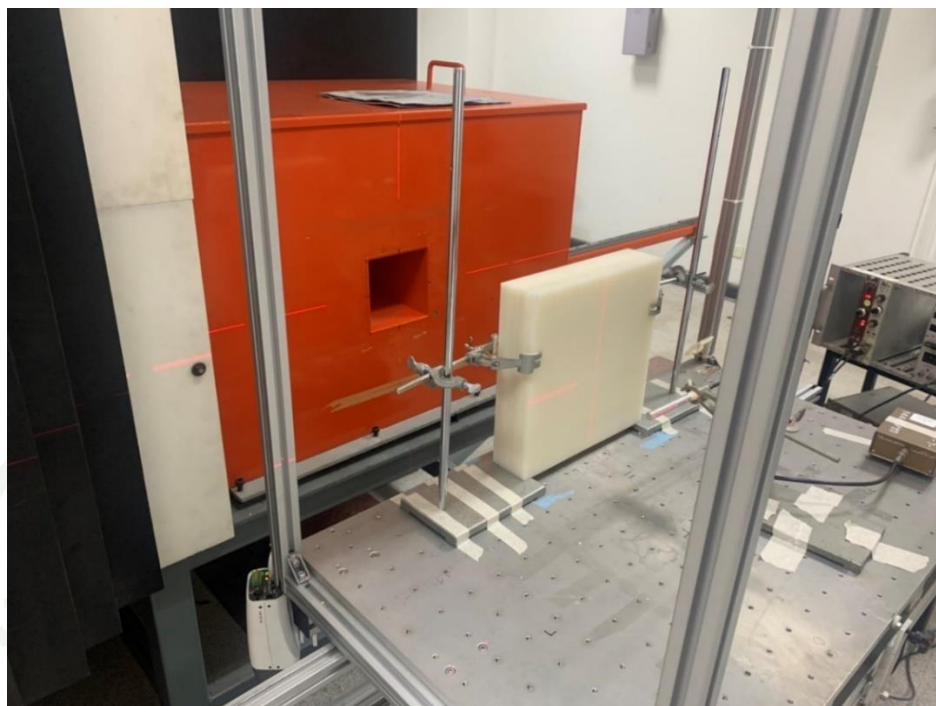
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (32)$$

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (33)$$

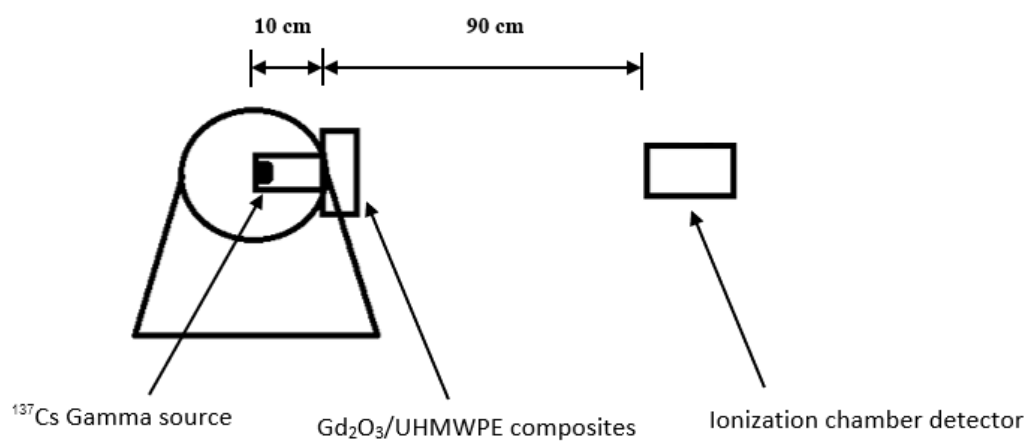
โดยที่ I_0 คือ ความเข้มเริ่มต้นของอนุภาคนิวตรอน
 I คือ ความเข้มของอนุภาคนิวตรอนหลังวัสดุกำบังรังสี
 x คือ ความหนาของชิ้นงาน (cm)
 ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (g/cm^3)



ภาพที่ 25 ภาพแสดงการทดสอบการกำบังอนุภาคนิวตรอน



ภาพที่ 26 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการกำบังอนุภาคนิวตรอน



ภาพที่ 27 ภาพแสดงการทดสอบการกำบังรังสีแกมมา



ภาพที่ 28 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการก้ำบั้งรังสีแกมมา

2.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทำการทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง (Tensile properties) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5 kN ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ความเร็วเครื่องในการดึง 100 mm/min ตามมาตรฐาน ASTM D638-14 นอกจากนี้ทำการทดสอบค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness (Shore D)) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยเครื่อง Hardness Tester รุ่น GS-719G จากบริษัท Teclock ประเทศญี่ปุ่น ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03

2.4 สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

ทำการทดสอบสมบัติความคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยเครื่อง High voltage tester (50kV 100mA) ยี่ห้อ Entry โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage) ที่มีความถี่ 50 Hz จาก 0 Volt ขึ้นไปเรื่อย ๆ สังเกตการเปลี่ยนสถานะของวัสดุจากฉนวนกลายเป็นตัวนำ (อัตราการเพิ่มโวลต์เท่ากับ 500 โวลต์/วินาที) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D149-14

ส่วนที่ 3 :การศึกษาผลของการบ่มเร่งวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยรังสีแกมมา ^{60}Co ปริมาณ 60 kGy ที่มีผลต่อสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/แกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า

1. การบ่มเร่งวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยรังสีแกมมา

ทำการบ่มเร่งวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25 %wt ด้วยการฉายรังสีแกมมา ^{60}Co ปริมาณ 60 kGy โดยทำการฉายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิด ^{60}Co บริเวณทั่วทั้งแผ่นของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$

2. การทดสอบค่าความหนาแน่น สมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะสัณฐานวิทยา ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ^{60}Co ปริมาณ 60 kGy

2.1 ความหนาแน่น (Density)

ทำการวัดค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ภายหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ^{60}Co ปริมาณ 60 kGy โดยใช้กระบวนการทดสอบดังแสดงในส่วนที่ 2 ข้อ 2.1 และเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา

2.2 สมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา (Neutron/Gamma shielding properties)

ทำการทดสอบสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ภายหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ^{60}Co ปริมาณ 60 kGy โดยใช้กระบวนการทดสอบดังแสดงในส่วนที่ 2 ข้อ 2.2 และเปรียบเทียบผลของสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา

2.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทำการทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งแรงที่พื้นผิว ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ภายหลังจากบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา $60Co$ ปริมาณ 60 kGy โดยใช้กระบวนการทดสอบดังแสดงใน ส่วนที่ 2 ข้อ 2.2 และเปรียบเทียบกับ การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง และค่าความแข็งแรงที่พื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ในส่วนที่ 2

2.4 สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

ทำการทดสอบสมบัติความคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ หลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา $60Co$ ปริมาณ 60 kGy โดยใช้กระบวนการทดสอบใน ส่วนที่ 2 ข้อ 2.3 และเปรียบเทียบกับ การทดสอบสมบัติความคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ในส่วนที่ 2

2.5 ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) จากบริษัท FEI รุ่น Quanta 450 ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับแผนงานในส่วนที่ 1

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์

ส่วนที่ 1 : ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไฮเลนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอ สมบัติเชิงกล ค่าความแข็งที่พื้นผิวและลักษณะฐานวิทยา

1. สมบัติการต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance properties)

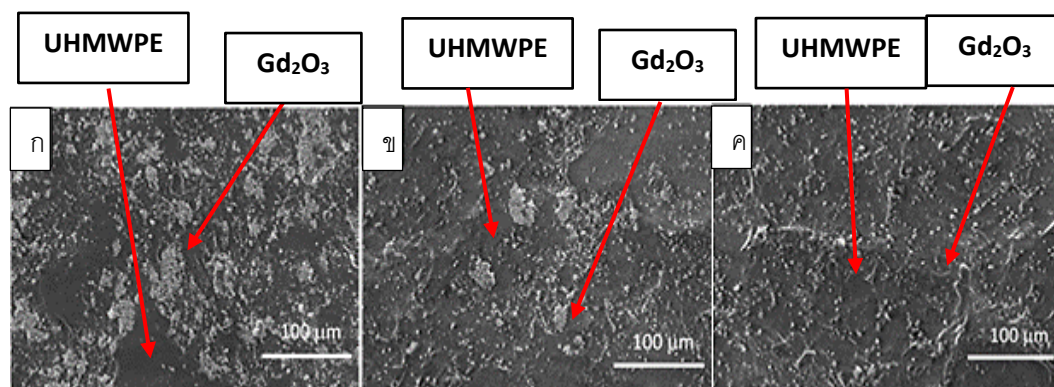
ผลของการทดสอบอัตราการสึกหรอและค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไฮเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 แสดงดังตารางที่ 7 พบว่าอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีค่าลดลง (ต้านทานการสึกหรอได้) ในขณะที่ค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณของสารคู่ควบไฮเลน โดยวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการใช้สารคู่ควบไฮเลน ที่ปริมาณ 20%wt มีค่าอัตราการสึกหรอน้อยที่สุดและมีค่าความแข็งที่ผิวสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไฮเลน สามารถลดการจับกลุ่มกันเองของสารตัวเติม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพลักษณะฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE (ภาพที่ 29) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไฮเลน สามารถลดการจับกลุ่มกันเองสารตัวเติม Gd_2O_3 โดยภาพ 29(ค) ซึ่งแสดงถึงลักษณะฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการใช้สารคู่ควบไฮเลนปริมาณ 20%wt พบว่ามีการกระจายตัวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ดีกว่า ภาพ 29(ก) และ ภาพ 29(ข) ซึ่งแสดงถึงลักษณะฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการใช้สารคู่ควบไฮเลนปริมาณ 5%wt และ 10%wt ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมด้วยสารคู่ควบไฮเลน ให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารคู่ควบไฮเลนกับน้ำ เกิดเป็นหมู่ไฮลันอล (Silanols) ดังแสดงในภาพที่ 30 โดยหมู่ไฮลันอลอันตรกิริยากับไฮดรอกไซด์ (-OH) ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ละลายในน้ำ เกิดเป็นพันธะออกเซน (Oxane bonds) ส่งผลให้ปลายข้างหนึ่งของสารคู่ควบไฮเลนสามารถเกิดพันธะเคมีกับสารอินทรีย์ (Gd_2O_3) ในขณะที่ปลายอีกข้างหนึ่งสามารถเกาะติดกับสารอินทรีย์ (UHMWPE) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 31 ซึ่งสามารถลดการ

เกาะกลุ่มกันเองของสารตัวเติม Gd_2O_3 และเพิ่มค่าการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Crystallinity (%)) ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลน ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE มีลักษณะเป็นเส้นเชือกหรือสายโซ่ที่พันกันยุ่งเหยิง (Amorphous region) และมีความยาวมากกว่าหนึ่งกิโลเมตร (ชาติภักต์ *et al.*, 2559) ซึ่งสารคู่ควบไซเลนสามารถทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการช่วยให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างวัสดุ UHMWPE และสารตัวเติม Gd_2O_3 จนสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE เกิดการจัดตัวกันอย่างเป็นระเบียบ (Crystalline Lamella) ส่งผลให้การเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น (ชาติภักต์ *et al.*, 2559) ดังแสดงในตารางที่ 7

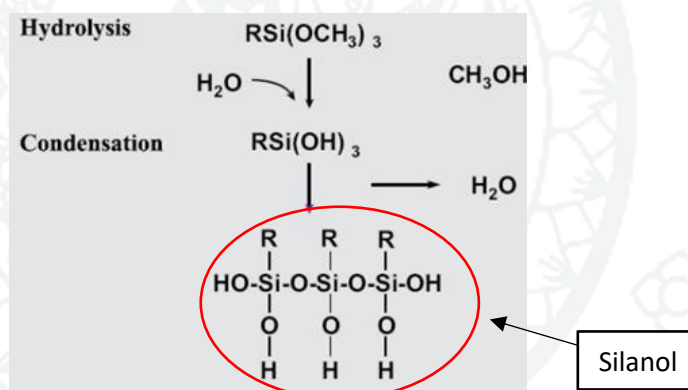
ส่วนตารางที่ 7 พบว่าค่าความหยาบที่พื้นผิว (Roughness) ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนทำให้เกิดพันธะทางเคมีระหว่างสารตัวเติม Gd_2O_3 กับวัสดุ UHMWPE ซึ่งช่วยลดช่องว่าง (Voids) ระหว่างวัสดุ UHMWPE กับสารตัวเติม ที่เป็นสาเหตุของความหยาบที่พื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลอัตราการสึกหรอที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่มีความหยาบที่พื้นผิวดำ จะมีโอกาสสูญเสียเนื้อวัสดุจากการเสียดสีที่น้อยกว่า (ความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า) วัสดุที่มีความหยาบที่พื้นผิวสูง (ชาติภักต์ *et al.*, 2559)

ตารางที่ 7 อัตราการสึกหรอ ค่าความแข็งที่พื้นผิว ค่าความหยาบที่พื้นผิวและความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3

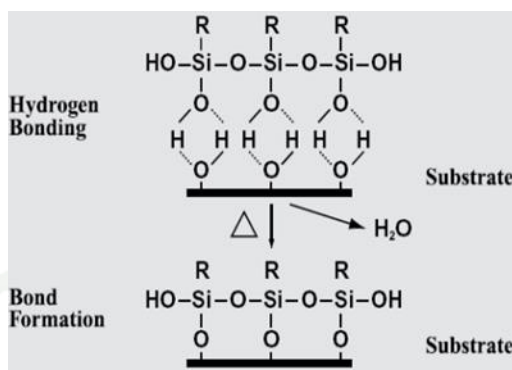
Silane coupling agent content (%wt)	Wear rate (mm^3/Nm)	Hardness (Shore D)	Roughness (μm)	Crystallinity (%)
5	6.85 ± 0.92	64 ± 1	0.32 ± 0.01	60.2
10	3.82 ± 0.34	65 ± 1	0.30 ± 0.01	66.5
20	0.33 ± 0.04	66 ± 1	0.25 ± 0.03	79.8



ภาพที่ 29 ลักษณะวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน KBE-903 ปริมาณ (ก) 5 %wt, (ข) 10 %wt และ (ค) 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3



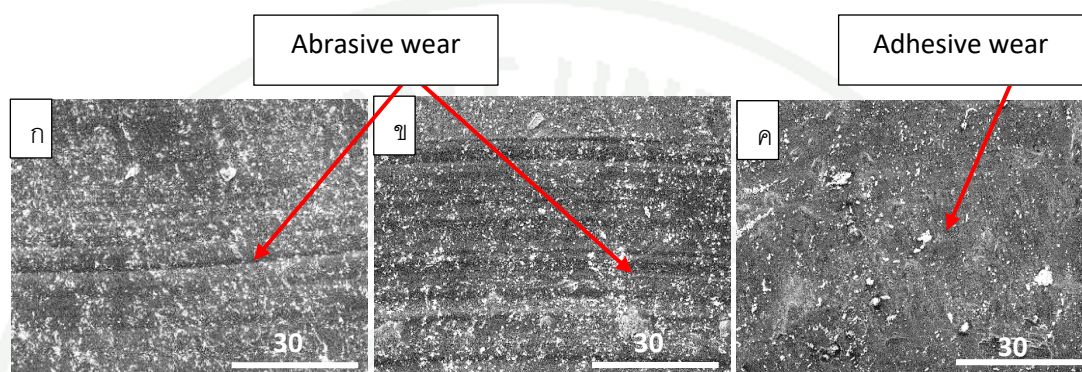
ภาพที่ 30 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารคู่ควบไซเลน
ที่มา : (Toyen *et al.*, 2021)



ภาพที่ 31 การเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลนกับพื้นผิวของสารอนินทรีย์
ที่มา : (Toyen *et al.*, 2021)

ทั้งนี้รอยการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ภายหลังการทดสอบด้วย ลูกกลิ้ง ดังแสดงในภาพที่ 32 พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน ที่ปริมาณ 5 และ 10%wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ส่งผลให้เกิดรอยการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear) ซึ่งสามารถมองเห็นเป็นรอยขีดข่วน รอยแฉะและร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรออย่างชัดเจน ทั้งนี้ การเกิดรอยลักษณะนี้เกิดจากการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลนใน ปริมาณที่น้อยเกินไป ส่งผลให้สารตัวเติม Gd_2O_3 บางส่วนไม่ได้ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบ ไซเลน จนเกิดการเกาะกลุ่มกันเองของสารตัวเติม Gd_2O_3 และเมื่อมีการขูดวัสดุด้วยลูกกลิ้ง บริเวณที่ สารตัวเติมมีการเกาะกลุ่มกันเองเกิดการแตกตัวออกก่อน จนเกิดเป็นรอยการสึกหรอของวัสดุและ เสียรูปจากการเกาะเป็นร่องบนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE (ชาติภักต์ *et al.*, 2559) ดังแสดงในภาพ 32 (ก) และภาพ 32 (ข) ในขณะที่วัสดุที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 20%wt (ภาพ 32 (ค)) พบว่าเกิดรอยการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) โดยพบรอยสึกและร่องบนพื้นผิวที่สึกหรอเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้สารตัวเติม สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับวัสดุ UHMWPE ได้ดีจากกระบวนการปรับปรุงผิวทางเคมีด้วยสารคู่ ควบ ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น (ชาติภักต์, 2559) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าอัตราการสึกหรอที่มีค่าลดลงตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ถูกกดทับด้วยลูกกลิ้งที่มีการเคลื่อนที่ ส่งผล ให้เกิดความเค้นที่ผิวหน้าของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีค่าสูงกว่าความเค้นที่จุดคราก

(Yield point) ของวัสดุ จนพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ เกิดการสึกหรอขึ้นได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 20%wt มีความแข็งแรงที่มากขึ้น จึงทำให้เกิดรอยการสึกหรอเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



ภาพที่ 32 ลักษณะของรอยการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ภายหลังการทดสอบสมบัติการต้านทานการสึกหรอด้วยเทคนิค Pin on disc โดยภาพ ก. ข. และ ค. แสดงถึงการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ตามลำดับ

2. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านมอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่าเมื่อปริมาณสารคู่ควบไซเลนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ มีค่ามอดุลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น (50.25 ± 4.93 MPa) ในวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับปรุงผิว Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 5 %wt เป็น 66.03 ± 5.21 MPa สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลนปริมาณ 20 %wt ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึง ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20.27 ± 0.11 MPa เป็น 22.49 ± 0.15 MPa เช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนส่งผลทำให้สารตัวเติม Gd_2O_3 สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับ UHMWPE ได้ดี ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบ

Gd₂O₃/UHMWPE มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการใช้สารคู่ควบไซเลนในการปรับปรุงผิวของสารตัวเติม Gd₂O₃ ยังช่วยลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติม Gd₂O₃ ด้วยกันเอง (Filler-filler interaction) (ภาพที่ 30) ดังนั้นเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับวัสดุเชิงประกอบในลักษณะการดึงและการบีบ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE สามารถต้านทานแรงดึงจากแรงภายนอกดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสารคู่ควบไซเลน ทำให้การกระจายตัวของสารตัวเติม Gd₂O₃ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความสามารถในการยึดตัวของวัสดุลดลง (Toyen *et al.*, 2021)

ตารางที่ 8 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd₂O₃ ด้วยสารคู่ควบไซเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd₂O₃

Silane coupling agent content (%wt)	Tensile modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
5	50.25 ± 4.93	20.27 ± 0.11	386 ± 14
10	58.15 ± 2.54	21.52 ± 0.38	353 ± 30
20	66.03 ± 5.21	22.49 ± 0.15	322 ± 22

ทั้งนี้จากผลการทดสอบในส่วนที่ 1 เห็นได้ว่าปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 20%wt ของสารตัวเติม Gd₂O₃ มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการทดสอบในส่วนอื่น ๆ ต่อไป โดยผลการทดสอบสมบัติการต้านทานการสึกหรอ ค่าความแข็งที่พื้นผิวและสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 20%wt มีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลน ที่ปริมาณ 5 และ 10 %wt ตามลำดับ

ส่วนที่ 2 : ผลของปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ 0-25%wt ต่อค่าความหนาแน่น สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและสัณฐานทางวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE

1. ความหนาแน่น (Density)

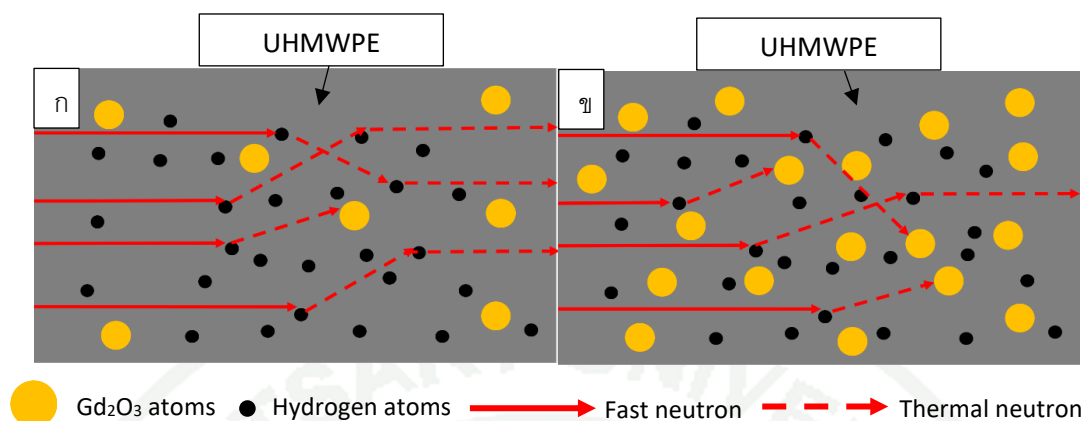
ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25 %wt ดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่าค่าความหนาแน่นของวัสดุมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Gd_2O_3 มีความหนาแน่นสูง (7.41 g/cm^3) (Thumwong *et al.*, 2021) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ UHMWPE ที่มีความหนาแน่น 0.94 g/cm^3 ดังนั้นเมื่อมีการเติมปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุ UHMWPE ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE เพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 9 ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt

Gd_2O_3 Content (%)	Density (g/cm^3)
0	0.94 ± 0.01
5	0.97 ± 0.01
10	0.98 ± 0.01
15	1.02 ± 0.01
20	1.08 ± 0.01
25	1.10 ± 0.01

2. สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา (Neutron/Gamma shielding properties)

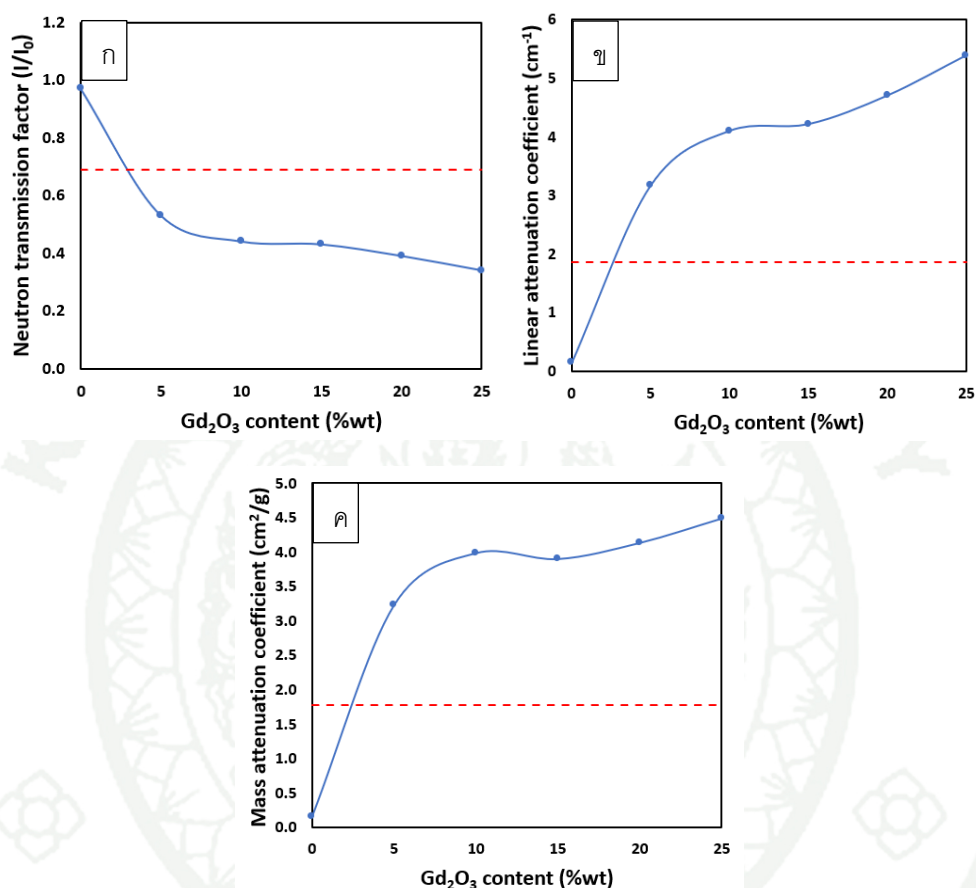
ผลการทดสอบสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 จาก 0-25 %wt ที่ความหนาของวัสดุเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 10 และภาพที่ 33 พบว่าค่า Neutron transmission factor (I/I_0) ของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ มีค่าลดลงจาก 0.56 ± 0.03 (0%wt) เหลือเพียง 0.16 ± 0.01 (25%wt) ในขณะที่ค่า Linear attenuation coefficient (μ) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.29 cm^{-1} (0%wt) เป็น 0.91 cm^{-1} (25%wt) และมีค่า Mass attenuation coefficient (μ_m) เพิ่มขึ้นจาก $0.31 \text{ cm}^2/\text{g}$ (0%wt) เป็น $0.76 \text{ cm}^2/\text{g}$ (25%wt) ทั้งนี้เนื่องมาจาก Gd ใน Gd_2O_3 มีค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอนสูงถึง 48860×10^{-24} ตารางเซนติเมตร (48860 barn) ส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ สามารถเกิดอันตรกิริยาแบบจับกับอนุภาคนิวตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 เป็นการเพิ่มโอกาสการเกิดอันตรกิริยาแบบจับกับอนุภาคนิวตรอนของวัสดุให้สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 33 ส่งผลให้ค่า I/I_0 มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของสารตัวเติม Gd_2O_3 (Tiamduangtawan et al., 2020) ในขณะที่วัสดุ UHMWPE ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 เกิดอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) กับอนุภาคนิวตรอนเป็นหลัก ซึ่งการชนในลักษณะนี้ สามารถลดทอนพลังงานของอนุภาคนิวตรอนได้เพียงเล็กน้อย ส่งผลให้อนุภาคนิวตรอนส่วนใหญ่ยังมีพลังงานหลงเหลืออยู่ ส่งผลทำให้ค่า I/I_0 ของวัสดุ UHMWPE ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 มีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้พบว่าวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 25%wt ที่ความหนา 2.0 มิลลิเมตร สามารถทำให้อนุภาคนิวตรอนที่ผ่านวัสดุออกมาได้เพียง 16% ดังแสดงในตารางที่ 10



ภาพที่ 33 แบบจำลองการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE โดยภาพ (ก) แสดงวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่น้อย (ข) แสดงวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่มาก

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 จาก 0-25%wt กับวัสดุเชิงประกอบ B_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติมปริมาณสารตัวเติม B_2O_3 15.9%wt (B=5%wt) (ความหนา 2.0 มิลลิเมตร)

Sample	Gd_2O_3 content (%wt)						B_2O_3 content (%wt)
	0	5	10	15	20	25	15.9
I/I_0	0.56 ± 0.03	0.18 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.17 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.70 ± 0.01
μ	0.29 ± 0.02	0.86 ± 0.01	0.86 ± 0.02	0.86 ± 0.03	0.89 ± 0.02	0.91 ± 0.03	1.85 ± 0.03
μ_m	0.31 ± 0.02	0.87 ± 0.02	0.83 ± 0.02	0.79 ± 0.03	0.78 ± 0.02	0.76 ± 0.02	1.78 ± 0.01



ภาพที่ 34 ผลการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ ที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt (ความหนาเท่ากับ 2 mm) โดย (ก) Neutron transmission factor (I/I_0) (ข) Linear attenuation coefficient (μ) (ค) Mass attenuation coefficient (μ_m) (เส้นประสีแดงแสดงถึงสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $\text{B}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ ที่มีปริมาณสารตัวเติม B_2O_3 เท่ากับ 15.9%wt)

ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt กับวัสดุเชิงประกอบ $\text{B}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ ที่มีการเติม B_2O_3 ปริมาณ 15.9%wt (ปริมาณ B เท่ากับ 5%wt) ซึ่งเป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่นิยมใช้ในหน่วยงานทางรังสีทั่วไป (ตารางที่ 9 และภาพที่ 34) พบว่าวัสดุเชิงประกอบ

Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการเติม Gd₂O₃ ปริมาณตั้งแต่ 5%wt ขึ้นไป มีค่า I/I_0 ต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบ B₂O₃/UHMWPE ที่มีการเติม B₂O₃ ปริมาณ 15.9 %wt ทั้งนี้เนื่องจากธาตุ Gd มีค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอน (48860×10^{-24} ตารางเซนติเมตร (48860 barns)) ที่สูงกว่าค่าภาคตัดขวางแบบจับกับอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอนของ B (3840×10^{-24} ตารางเซนติเมตร (3840 barns)) (โตเย็น, 2018) ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE สามารถเกิดอันตรกิริยาแบบจับกับอนุภาคนิวตรอนได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบ B₂O₃/UHMWPE ทำให้วัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE สามารถกักกัอนุภาคนิวตรอนได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบ B₂O₃/UHMWPE เมื่อมีการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่เท่ากัน

ผลการทดสอบสมบัติการกักกัรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd₂O₃ 0-25%wt (ความหนา 2.0 มิลลิเมตร) ดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่าค่า Gamma transmission factor (I/I_0) ของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE มีแนวโน้มลดลงจาก 0.88 ± 0.01 (0%wt) เป็น 0.83 ± 0.01 (25%wt) ในขณะที่ค่า Linear attenuation coefficient (μ) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 0.06 cm^{-1} (0%wt) เป็น 0.09 cm^{-1} (25%wt) และค่า Mass attenuation coefficient (μ_m) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก $0.07 \text{ cm}^2/\text{g}$ (0%wt) เป็น $0.08 \text{ cm}^2/\text{g}$ (25%wt) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Gd₂O₃ มีความหนาแน่นสูง ($\rho = 7.41 \text{ g/cm}^3$) อีกทั้ง Gd มีเลขอะตอมที่สูง ($Z=64$) ทำให้มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยากับรังสีแกมมาได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการลดทอนรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ทั้งนี้วัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE สามารถเกิดอันตรกิริยาที่สำคัญกับรังสีแกมมาได้ 3 ประการได้แก่

1. Photoelectric absorption ซึ่งเป็นอันตรกิริยาที่รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุ Gd

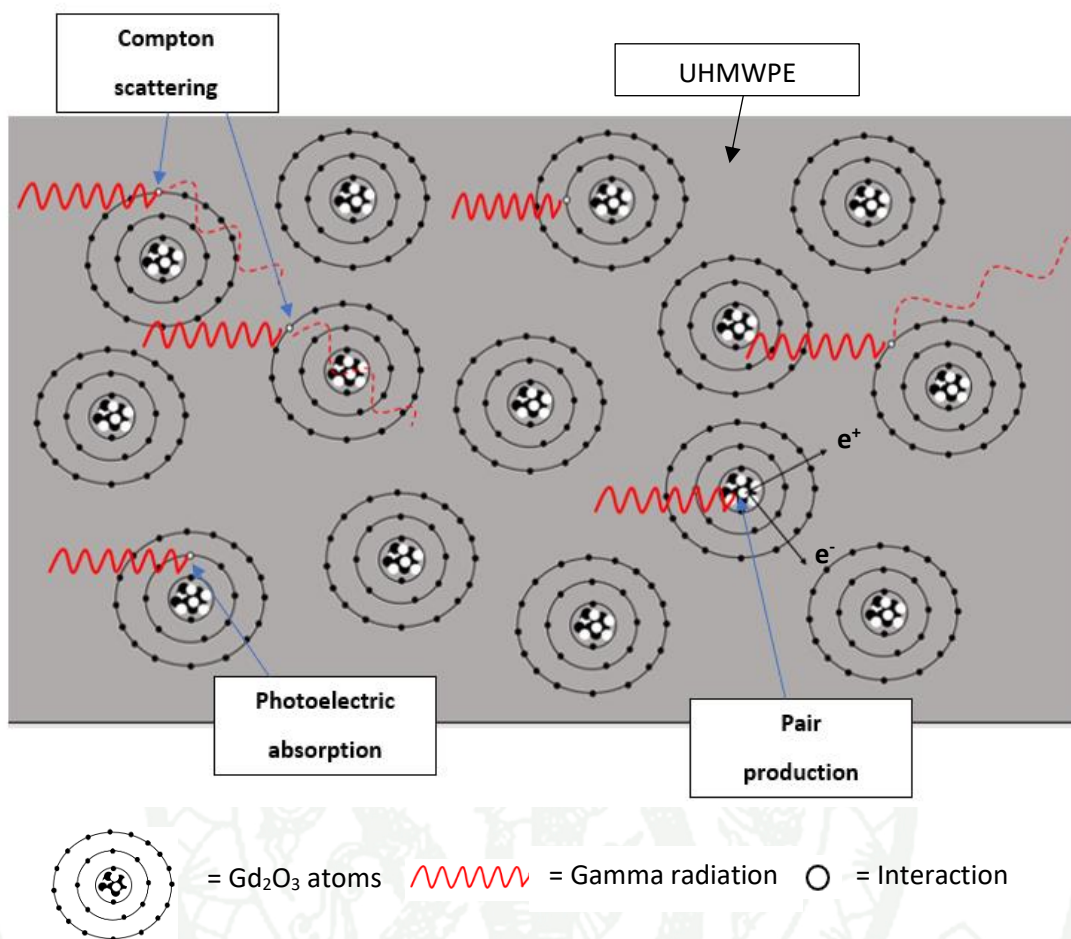
2. Compton scattering ซึ่งเป็นอันตรกิริยาที่รังสีแกมมาเข้าชนกับอิเล็กตรอนวงนอกของอะตอมของธาตุ Gd ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนของธาตุ Gd และเกิดการกระเจิงของรังสีแกมมา

3. Pair production ซึ่งเป็นอันตรกิริยาที่รังสีแกมมาวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม โดยรังสีแกมมาที่เข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอมจะใช้พลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV ในการเปลี่ยนรังสีแกมมาให้กลายเป็นคู่ออนุภาคอิเล็กตรอนและโพสิตรอน ซึ่งมีมวลรวมเทียบเท่ากับพลังงาน 1.02 MeV

โดยแบบจำลองกลไกการกัมมันตรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMPWE$ แสดงในภาพที่ 35

ตารางที่ 11 สมบัติการกัมมันตรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMPWE$ มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 0-25%wt (ความหนา 2.0 มิลลิเมตร)

Gd_2O_3 Content %	Gamma transmission factor	Linear attenuation coefficient (cm^{-1})	Mass attenuation coefficient (cm^2/g)
0	0.88±0.01	0.06±0.01	0.07±0.01
5	0.86±0.01	0.08±0.01	0.08±0.01
10	0.85±0.01	0.08±0.01	0.08±0.01
15	0.84±0.01	0.09±0.01	0.08±0.01
20	0.84±0.01	0.09±0.01	0.08±0.01
25	0.83±0.01	0.09±0.01	0.08±0.01



ภาพที่ 35 แบบจำลองการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับอะตอมของ Gd_2O_3

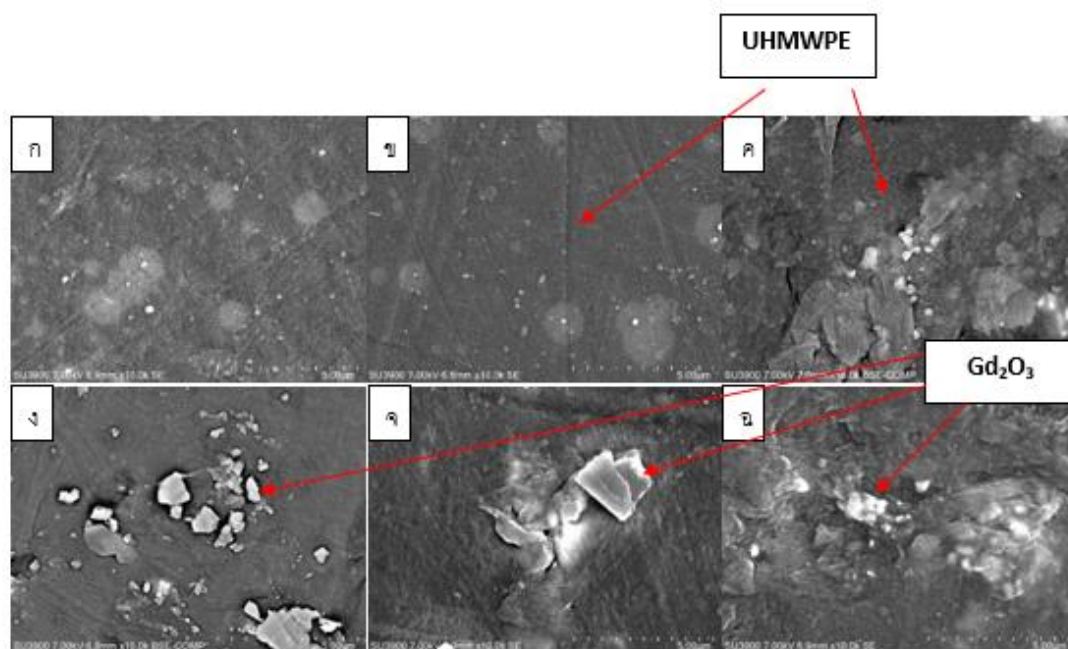
3. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านแรงดึง (Tensile properties) ของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ ซึ่งประกอบไปด้วยค่ามอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ดังแสดงในตารางที่ 12 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุ UHMWPE ส่งผลให้ค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Gd_2O_3 เป็นอนุภาคที่มีความแข็ง (Rigidity) ที่สูงกว่าวัสดุ UHMWPE เมื่อมีการเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่สูง ส่งผลให้ค่าความแข็งโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย (Fang *et al.*, 2006) ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่

เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 เพิ่มขึ้น ทำให้สารตัวเติมกับสารตัวเติมเกาะด้วยกันเอง (Filler-filler interaction) ส่งผลให้เกิดการแบ่งเฟสระหว่างวัสดุ UHMWPE และสารตัวเติม Gd_2O_3 อย่างชัดเจนจนเกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่และความต่อเนื่องของพอลิเมอร์ อีกทั้งการเติมสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดช่องว่าง (Voids) ระหว่างวัสดุ UHMWPE กับสารตัวเติมที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผลการทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยา ดังแสดงในภาพที่ 36 (โตเย็น *et al.*, 2018) โดยเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับวัสดุเชิงประกอบในลักษณะการดึงและยืด ทำให้วัสดุเชิงประกอบขาดออกจากกันได้ง่ายขึ้น โดยเริ่มต้นจากจุดบกพร่องของวัสดุ เช่น ช่องว่างขนาดเล็ก (Void) ที่เกิดขึ้นในบริเวณที่สารตัวเติมเกาะกลุ่มกันเอง ซึ่งช่องว่างขนาดเล็กนี้ เกิดการขยายใหญ่ มากขึ้นจนขาดออกจากกันในที่สุด ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงด้วย (Ninyong *et al.*, 2017) ในขณะที่ค่าความแข็งที่พื้นผิว (Hardness) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณสารตัว Gd_2O_3 ทั้งนี้เนื่องมาจากสารตัวเติม Gd_2O_3 เป็นอนุภาคที่มีความแข็ง (Rigidity) ที่สูงกว่าวัสดุ UHMWPE เมื่อมีการเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่สูง ส่งผลให้ค่าความแข็งที่พื้นผิวสูงของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ขึ้นตามด้วย (Fang *et al.*, 2006)

ตารางที่ 12 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25 %wt

Gd_2O_3 Content (%)	Tensile modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore D)
0	40.88 ± 2.59	24.96 ± 0.08	392 ± 10	60 ± 1
5	46.51 ± 4.19	24.87 ± 0.17	376 ± 21	63 ± 1
10	51.79 ± 3.17	24.15 ± 0.12	359 ± 16	64 ± 1
15	55.59 ± 3.20	23.61 ± 0.29	341 ± 14	64 ± 1
20	59.36 ± 3.92	23.50 ± 0.90	328 ± 12	64 ± 1
25	67.26 ± 3.64	22.49 ± 0.90	311 ± 13	65 ± 1



ภาพที่ 36 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ (ก) 0%wt (ข) 5%wt (ค) 10%wt (ง) 15%wt (จ) 20%wt (ฉ) 25%wt

4. สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

ผลการทดสอบค่าคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ดังแสดงในตารางที่ 13 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ 5%wt ส่งผลให้ค่าคงทนไดอิเล็กทริกมีค่าลดลงอย่างจาก 46.5 ± 0.4 kV/m² ในวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 เหลือเพียง 25.5 ± 1.2 ในวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 25%wt ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติม Gd_2O_3 เป็นโมเลกุลที่มีขั้วจึงมีค่าความเป็นตัวนำสูงกว่าวัสดุ UHMWPE ที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Haibin et al., 2018) ส่งผลทำให้เมื่อมีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ในวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุเป็นตัวนำได้ที่ค่าความต่างศักย์น้อยลง (ค่าคงทนไดอิเล็กทริกลดลง)

ตารางที่ 13 ค่าคงทนไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25%wt

Gd ₂ O ₃ Content (%)	Dielectric strength (kV/m ²)
0	46.5 ± 0.4
5	27.4 ± 1.0
10	27.0 ± 1.1
15	26.6 ± 1.1
20	26.2 ± 1.1
25	25.5 ± 1.2

ส่วนที่ 3 : ผลของการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจาก ⁶⁰Co (ปริมาณรังสี 60 kGy) ต่อค่าความหนาแน่น สมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE

1. ความหนาแน่น (Density)

ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd₂O₃ ตั้งแต่ 0-25%wt ภายหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจาก ⁶⁰Co ที่ปริมาณรังสี 60 kGy ดังแสดงในตารางที่ 14 พบว่าวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่ถูกฉายด้วยรังสีแกมมา มีความหนาแน่นสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากรังสีแกมมาสามารถทำอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE เป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ROOH ซึ่งจะแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ OR[•] และ OH[•] ที่ไม่เสถียร โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้ มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ออกซิเจนสามารถแทรกตัวในสายโซ่พอลิเมอร์ได้ (Kommling *et al.*, 2018) ซึ่งเป็นเหตุให้วัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่ถูกฉายด้วยรังสีแกมมา มีความหนาแน่นสูงขึ้น

ตารางที่ 14 ค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการเติม Gd₂O₃ ปริมาณ 0-25%wt ก่อนและหลังฉายรังสีแกมมาจาก ⁶⁰Co (ปริมาณรังสี 60 kGy)

Gd ₂ O ₃ Content (%)	Density (g/cm ³)	
	Non-gamma irradiation	Gamma irradiation (60 kGy)
0	0.94 ± 0.01	0.96 ± 0.01
5	0.97 ± 0.01	0.97 ± 0.01
10	0.98 ± 0.01	0.98 ± 0.01
15	1.02 ± 0.01	1.03 ± 0.01
20	1.08 ± 0.01	1.09 ± 0.01
25	1.10 ± 0.01	1.12 ± 0.01

2. สมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา (Neutron/Gamma shielding properties)

ผลการทดสอบสมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd₂O₃ ตั้งแต่ 0-25%wt ภายหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจาก ⁶⁰Co ที่ปริมาณรังสี 60 kGy ดังแสดงในตารางที่ 15 พบว่าวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่ถูกฉายด้วยรังสีแกมมามีความสามารถในการก้ำบังอนุภาคนิวตรอนได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการนำวัสดุเชิงประกอบมาฉายด้วยรังสีแกมมา ส่งผลให้รังสีแกมมาเข้าทำอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE จนเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ROOH ซึ่งแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ OR• และ OH• ที่ไม่เสถียร โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้ มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จนสามารถเข้าทำปฏิกิริยาบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ จนทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้น ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น (Premnath et al., 1996) ดังแสดงในตารางที่ 16 อนุภาคนิวตรอนจึงมีโอกาสดำรงอันตรกิริยาการชนกับอะตอมไฮโดรเจนของ UHMWPE ได้มากขึ้น สามารถลดพลังงานของอนุภาคนิวตรอนจนกลายเป็นอนุภาคเทอร์มัลนิวตรอนและถูกดูดซับด้วยสารตัวเติม Gd₂O₃ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 15 สมบัติการก้ำบังอนุภาคนิวตรอนของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการเติม Gd₂O₃ ปริมาณ 0-25%wt (ความหนา 2 mm) ก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจาก ⁶⁰Co ที่ปริมาณรังสี 60 kGy

Gamma Dose (kGy)	Gd ₂ O ₃ Content (%wt)					
	0	5	10	15	20	25
Neutron transmission coefficient (I/I ₀)						
0	0.99±0.01	0.53±0.02	0.44±0.02	0.43±0.02	0.39±0.03	0.34±0.05
60	0.97±0.01	0.53±0.02	0.42±0.02	0.41±0.02	0.37±0.03	0.32±0.05
Linear attenuation coefficient (cm ⁻¹)						
0	0.04±0.01	2.59±0.04	3.46±0.03	3.80±0.02	4.30±0.01	5.21±0.04
60	0.13±0.01	2.59±0.01	3.66±0.01	4.02±0.02	4.53±0.03	5.50±0.02
Mass attenuation coefficient (cm ² /g)						
0	0.05±0.01	2.64±0.03	3.36±0.01	3.51±0.01	3.77±0.01	4.34±0.02
60	0.14±0.01	2.64±0.01	3.55±0.01	3.71±0.02	3.99±0.03	4.58±0.01

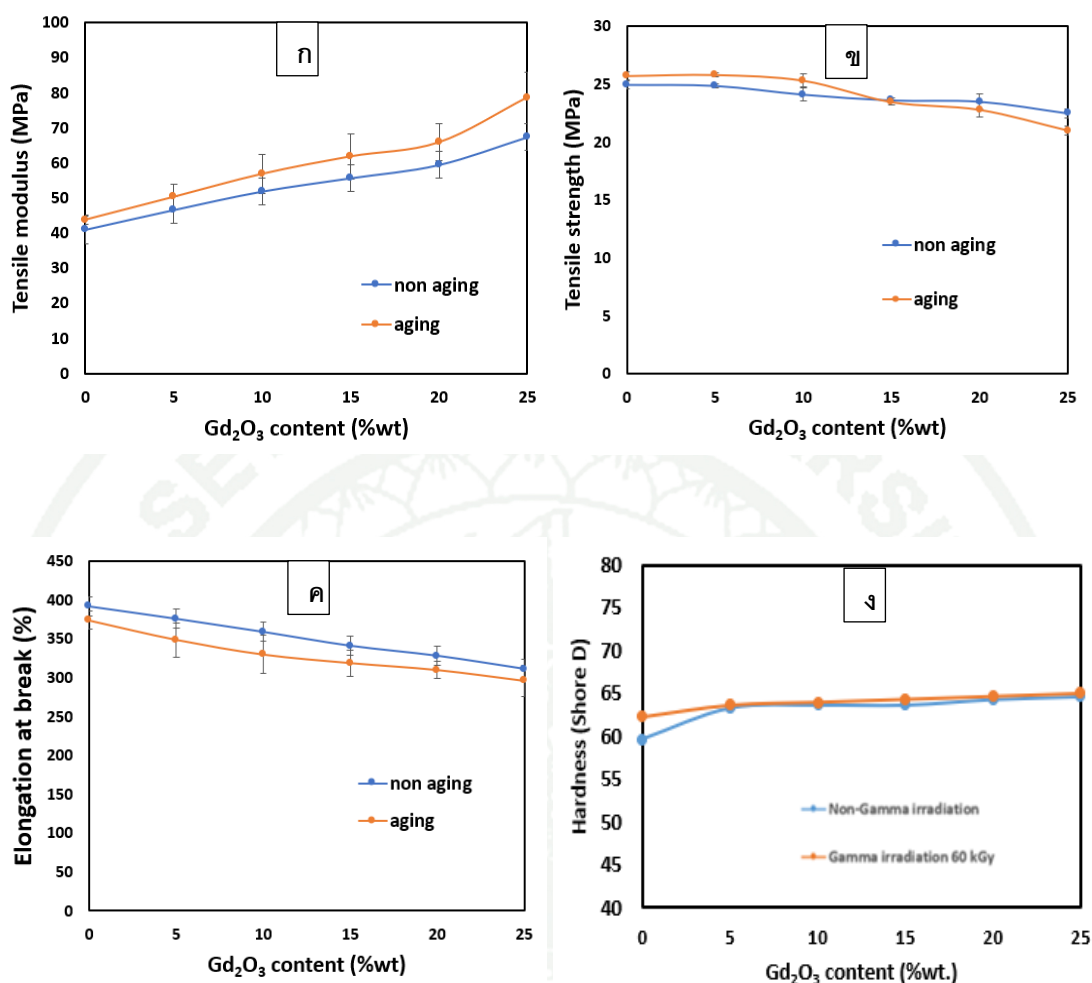
ตารางที่ 16 ค่าการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของวัสดุเชิงประกอบ Gd₂O₃/UHMWPE ที่มีการเติม Gd₂O₃ ปริมาณ 0-25%wt ก่อนและหลังฉายรังสีแกมมา ⁶⁰Co บ่มเร่งที่ปริมาณรังสี 60 kGy

Gd ₂ O ₃ Content (%)	Crystallinity (%)	
	Non-Gamma irradiation	Gamma irradiation (60 kGy)
0	82.8	84.0
5	76.4	77.8
10	73.3	77.0
15	72.3	76.5
20	71.7	75.6
25	69.5	74.8

3. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25%wt ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ^{60}Co ที่ปริมาณรังสี 60 kGy ดังแสดงในภาพที่ 37 สังเกตได้ว่าเมื่อนำวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 ไปบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสแรงดึงของวัสดุและค่าความแข็งที่พื้นผิว มีแนวโน้มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 37 ทั้งนี้เนื่องมาจาก รังสีแกมมาสามารถเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE ซึ่งทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางตรงบริเวณสายโซ่โมเลกุล เกิดโครงสร้างเป็นร่างแห ทำให้วัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ มีความแข็งแรงมากขึ้น (Premnath *et al.*, 1996) ในขณะที่ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ภายหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาที่มีการเติมปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 15-25%wt มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มสารตัวเติม Gd_2O_3 สูงขึ้น ทำให้อัตราส่วนของ UHMWPE น้อยลง เป็นผลให้เกิดพันธะเชื่อมขวางตรงบริเวณสายโซ่โมเลกุลที่น้อยลง ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงหลังบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา ทั้งนี้เนื่องจากรังสีแกมมาเข้าทำอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE จนเกิดพันธะเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ เกิดการยืดเกาะและเคลื่อนที่ออกจากกันได้ยากขึ้น (Toyen *et al.*, 2021) เป็นผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมา

1943



ภาพที่ 37 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25%wt โดย (ก) โมดูลัสแรงดึงของวัสดุ (ข) ความต้านทานแรงดึง (ค) เปร้อื่นตั้ยัดตัว ณ จุดขาด (ง) ความแข็งที่พื้นผิว

4. สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

ผลการทดสอบค่าคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 0-25%wt ภายหลังจากการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 60 kGy ดังแสดงในตารางที่ 17 พบว่าวัสดุเชิงประกอบ $Gd_2O_3/UHMWPE$ ที่ถูกฉายด้วยรังสีแกมมามีค่าคงทนไดอิเล็กทริกไม่แตกต่างกันจากตัวอย่างที่ไม่มีการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากรังสีแกมมาไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของสารตัวเติม Gd_2O_3

ที่มีคุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้ามากนัก ส่งผลให้ค่าคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 17 ค่าคงทนไดอิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{UHMWPE}$ ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt ก่อนและหลังการฉายรังสีแกมมาจาก ^{60}Co (ปริมาณรังสี 60 kGy)

Gd_2O_3 Content (%)	Dielectric strength (kV/m ²)	
	Non-gamma irradiation	Gamma irradiation (60 kGy)
0	46.5 ± 0.4	46.4 ± 1.0
5	27.4 ± 1.0	26.9 ± 1.1
10	27.0 ± 1.1	26.7 ± 1.1
15	26.6 ± 1.1	26.3 ± 1.0
20	26.2 ± 1.1	26.1 ± 1.1
25	25.5 ± 1.2	25.5 ± 1.1

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ส่วนที่ 1 : ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไฮเลนชนิด KBE-903 (3-Aminopropyltriethoxysilane) ที่ปริมาณ 5, 10 และ 20 %wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 ต่อสมบัติการต้านทานการสึกหรอ ค่าความแข็งที่พื้นผิว สมบัติเชิงกลและลักษณะสัณฐานวิทยา

1. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไฮเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5 10 และ 20 %wt ของ Gd_2O_3 พบว่าสารตัวเติม Gd_2O_3 มีการกระจายตัวในวัสดุ UHMWPE และมีการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติม Gd_2O_3 ลดลง เมื่อปริมาณสารคู่ควบไฮเลนเพิ่มขึ้น

2. การปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไฮเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5 10 และ 20 %wt ของ Gd_2O_3 พบว่าอัตราการสึกหรอและค่าความหยาบที่พื้นผิวมีค่าลดลง แต่ความแข็งที่พื้นผิวและค่าจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารคู่ควบไฮเลนที่เพิ่มขึ้น

3. การปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม Gd_2O_3 ด้วยสารคู่ควบไฮเลน KBE-903 ที่ปริมาณ 5 10 และ 20 %wt ของ Gd_2O_3 พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ลดลงตามปริมาณสารคู่ควบไฮเลนที่เพิ่มขึ้น

4. ปริมาณสารคู่ควบไฮเลนที่ 20%wt ของสารตัวเติม Gd_2O_3 มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการทดสอบในส่วนที่ 2 และส่วนที่ 3

ส่วนที่ 2 : ผลของปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 ที่ 0-25%wt ต่อค่าความหนาแน่น สมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและสัณฐานทางวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE

1. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติม Gd_2O_3 0-25%wt พบว่าสารตัวเติมเกิดการเกาะกลุ่มกันเองเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น

2. การปรับเปลี่ยนสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีค่าความหนาแน่นสูงขึ้น

3. การปรับเปลี่ยนสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกำบังอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมามีค่าเพิ่มขึ้น

4. การปรับเปลี่ยนสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ลดลง แต่มีค่ามอดูลัสแรงดึงและค่าความแข็งที่พื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น

5. ผลการเปรียบเทียบสมบัติการกำบังอนุภาคนิวตรอนระหว่างวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติม Gd_2O_3 ปริมาณ 0-25%wt กับวัสดุเชิงประกอบ B_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติม B_2O_3 ปริมาณ 15.9%wt ($B = 5\%$ wt) ซึ่งเป็นวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนที่นิยมใช้ในหน่วยงานทางรังสีทั่วไป พบว่าวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติมสารตัวเติม Gd_2O_3 ตั้งแต่ 5%wt ขึ้นไป สามารถในการกำบังอนุภาคนิวตรอนสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบ B_2O_3 /UHMWPE ที่มีการเติมสารตัวเติม B_2O_3 ปริมาณ 15.9%wt ($B = 5\%$ wt)

6. การปรับเปลี่ยนสารตัวเติม Gd_2O_3 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE มีค่าคงทนได้อิเล็กทริกลดลง

ส่วนที่ 3 : ผลของการบ่มเร่งด้วยรังสีแกมมาจาก ^{60}Co (ปริมาณรังสี 60 kGy) ต่อค่าความหนาแน่น สมบัติการก้ำบงอนุภาคนิวตรอน/รังสีแกมมา สมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้า ของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE

1. ความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยการฉายรังสีแกมมามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยการฉายรังสีแกมมา

2. ความสามารถในการก้ำบงอนุภาคนิวตรอนและรังสีแกมมาของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยการฉายรังสีแกมมามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยการฉายรังสีแกมมา

3. สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยการฉายรังสีแกมมา มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยการฉายรังสีแกมมา

4. ค่าคงทนได้อิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยการฉายรังสีแกมมา มีค่าไม่แตกต่างกับค่าคงทนได้อิเล็กทริกของวัสดุเชิงประกอบ Gd_2O_3 /UHMWPE ที่ไม่ผ่านการบ่มเร่งด้วยการฉายรังสีแกมมา

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Al-saadi, A.J. 2010. Iron-polyethylene combination for shielding of 14 mev neutrons. **Journal of Kufa-physics**. 2: 1-6.
- Fang, L., Y. Leng and P. Gao. 2006. Processing and mechanical properties of HA/UHMWPE nanocomposites. . **Biomaterials**. 27: 3701-3707.
- Gaikwad, D., M. Sayyed, S.S. Obaid, S.A. Issa and P. Pawar. 2018. Gamma ray shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnF}_2\text{-As}_2\text{O}_3\text{-Sm}_2\text{O}_3$ glasses. **Journal of Alloys and Compounds**. 765: 451-458.
- İrim, Ş.G., A.A. Wis, M.A. Keskin, O. Baykara, G. Ozkoc, A. Avcı, M. Doğru and M. Karakoç. 2018. Physical, mechanical and neutron shielding properties of h-BN/Gd₂O₃/HDPE ternary nanocomposites. **Radiation Physics and Chemistry**. 144: 434-443.
- King, D.B., E.S. Bielejec, C.E. Hembree, J.K. McDonald, W.R. Wampler, R.M. Fleming, G. Vizkelethy, T.J. Sheridan, V.J. Harper-Slaboszewicz and P.J. Griffin. 2009. **Test simulation of neutron damage to electronic components and circuits using accelerator facilities**.
- Kommling, A., K. Von der Ehe, D. Wolff and M. Jaunich. 2018. Effect of high-dose gamma irradiation on (U) HMWPE neutron shielding materials. **Radiation Physics and Chemistry**. 142: 29-33.
- Koz'min, G.V. and N.I. Sanzharova. 2015. Radiation technologies in agriculture and food industry., **The 10-th anniversary Russian scientific conference Radiation protection and radiation safety in nuclear technologies.**, Russia.
- Li, J. and F. Ye. 2010. Effect of surface modification of kevlar fibre on friction and wear properties of uhmwpe composites. **Plastics, Rubber and Composites**. 39: 264-267.
- Mahmoud, K. and Y. Rammah. 2020. Investigation of gamma-ray shielding capability of glasses doped with Y, Gd, Nd, Pr and Dy rare earth using mcnp-5 code. **Physica B: Condensed Matter**. 577: 411756.
- Martin, W. 2022. **Nuclear power**. Available Source,
- Ninyong, K., E. Wimolmala, N. Sombatsompop and K. Saenboonruang. 2017. Potential use of nr

- and Wood/NR composites as thermal neutron shielding materials. **Polymer Testing**. 59: 336-343.
- Olesen, H.L. 1966. Radiation effects on electronic systems. **Plenum press**. 234.
- Premnath, V., W.H. Harris, M. Jasty and E.W. Merrill. 1996. Gamma sterilization of UHMWPE articular implants: An analysis of the oxidation problem. **Biomaterials**. 17: 1741-1753.
- Reza Fazel, M.D., H.M. Krumholz, Y. Wang and J.S. Ross. 2009. Exposure to low-dose ionizing radiation from medical imaging procedures. **The NEW ENGLAND JOURNAL of MEDICINE**. 361:
- Thumwong, A., E. Wimolmala, T. Markpin, N. Sombatsompop and K. Saenboonruang. 2021. Enhanced x-ray shielding properties of nrl gloves with nano-Bi₂O₃ and their mechanical properties under aging conditions. **Radiation Physics and Chemistry**. 186: 109530.
- Tiamduangtawan, P., E. Wimolmala, R. Meesat and K. Saenboonruang. 2020. Effects of sm₂o₃ and Gd₂O₃ in poly (vinyl alcohol) hydrogels for potential use as self-healing thermal neutron shielding materials. **Radiation Physics and Chemistry**. 108818.
- Toyen, D., Y. Paopun, D. Changjan, E. Wimolmala, M. Sithipong, T. Pianpanit, T. Anekratmontree and K. Saenboonruang. 2021. Simulation of neutron/self-emitted gamma attenuation and effects of silane surface treatment on mechanical and wear resistance properties of Sm₂O₃/UHMWPE composites. **Polymers**. 13(19): 3390.
- Wang, Y., X. Qiao, J. Wan, Y. Xiao and X. Fan. 2016. Preparation of aln microspheres/UHMWPE composites for insulating thermal conductors. **RSC Advances**. 6: 80262-80267.
- Zhang, P., C. Jia, J. Li and W. Wang. 2020. Shielding composites for neutron and gamma-radiation with Gd₂O₃@ w core-shell structured particles. **Materials Letters**. 276: 128082.
- Zhang, Y., J. Yu, L. Chen, J. Zhu and Z. Hu. 2009. Surface modification of ultrahigh-molecular-weight polyethylene fibers with coupling agent during extraction process. **Journal of Macromolecular Science, Part B**. 48: 391-404.
- ชาติฤกษ์, ป., อ. เต็มเปี่ยม and ศ. วรณศรี. 2559. พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเชิงประกอบเพื่อความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- ชีวะประเสริฐ, อ. and ว. เจียมจรัสรัมย์. 2018. Guidelines for occupational health and radiation safety in

catheterization laboratory. วารสารสมาคมเวชศาสตร์ป้องกันแห่งประเทศไทย. 6: 267-274.

โตเย็น, ค. 2018. การพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนจากวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนชนิด **ultra-high-molecular-weight-polyethylene (UHMWPE)** ซาแมเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3) และ โบรอนออกไซด์ (B_2O_3). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

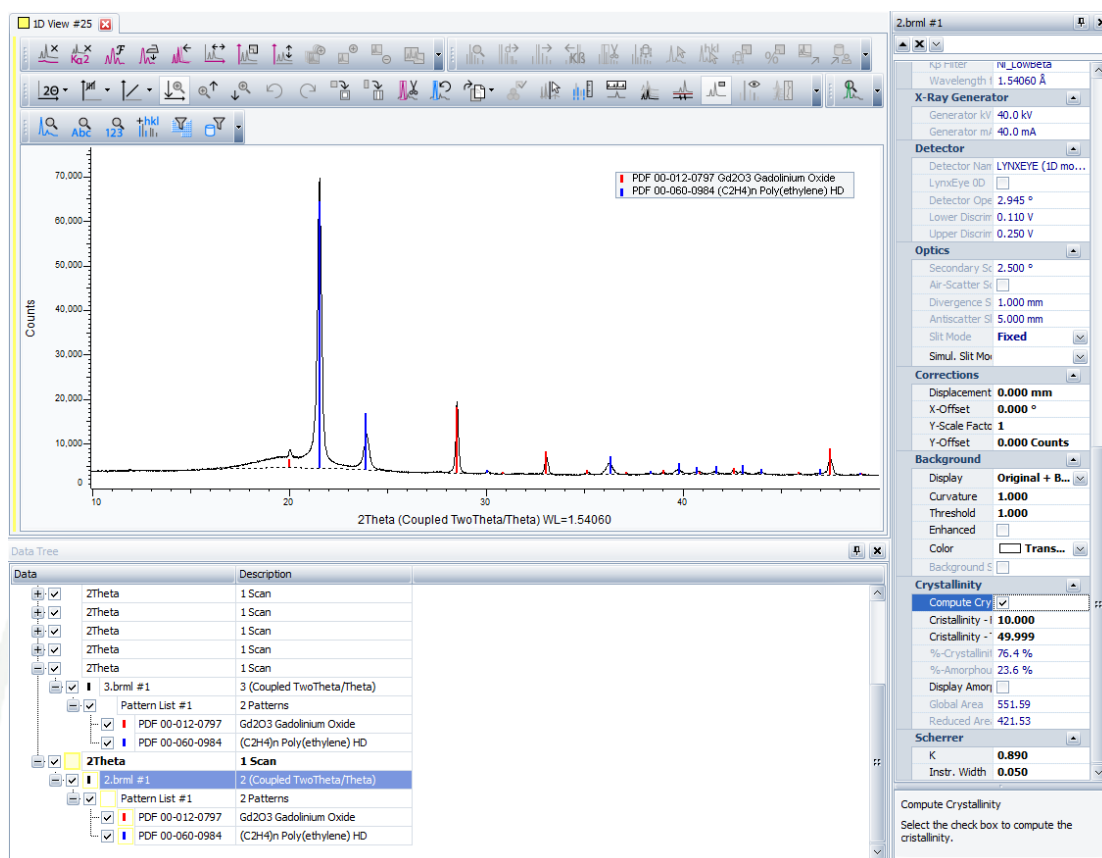
โตเย็น, ค., เ. แสนบุญเรือง and เ. วิมลมาลา. 2018. การพัฒนาวัสดุกำบังอนุภาคนิวตรอนจากวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนชนิด **ultra-high-molecular-weight-polyethylene (uhmwpe)** ซาแมเรียมออกไซด์ (sm_2o_3).

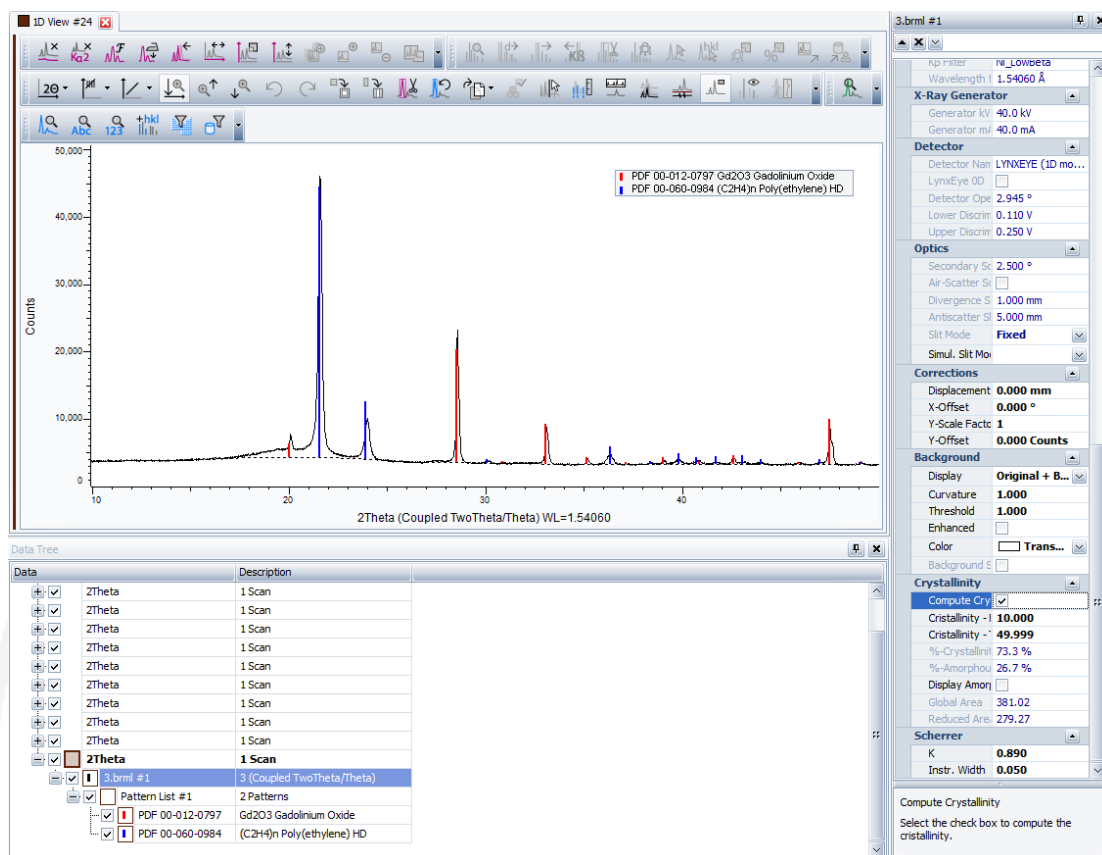
มะธิโตปะนา, ส. 2556. การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ **UHMWPE** จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

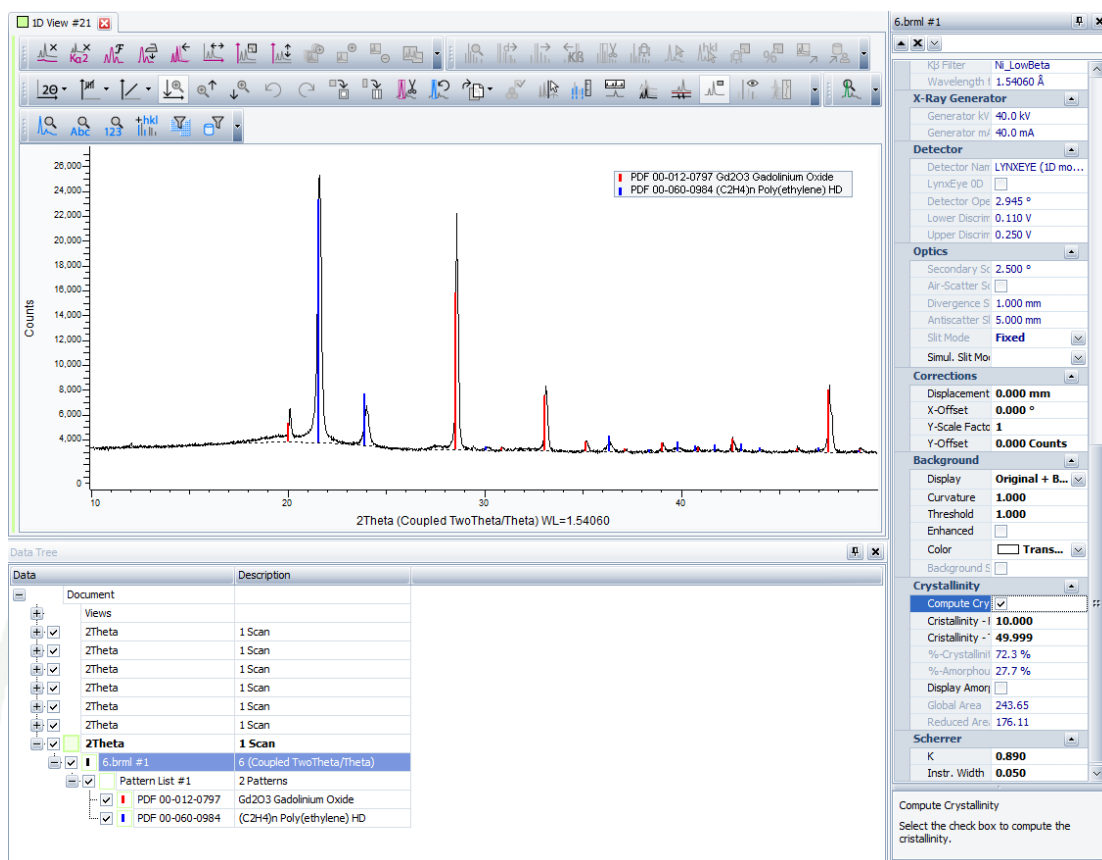
รุ่งธนเกียรติ, น. 2547. พลังงานนิวเคลียร์เพื่อมนุษยชาติ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

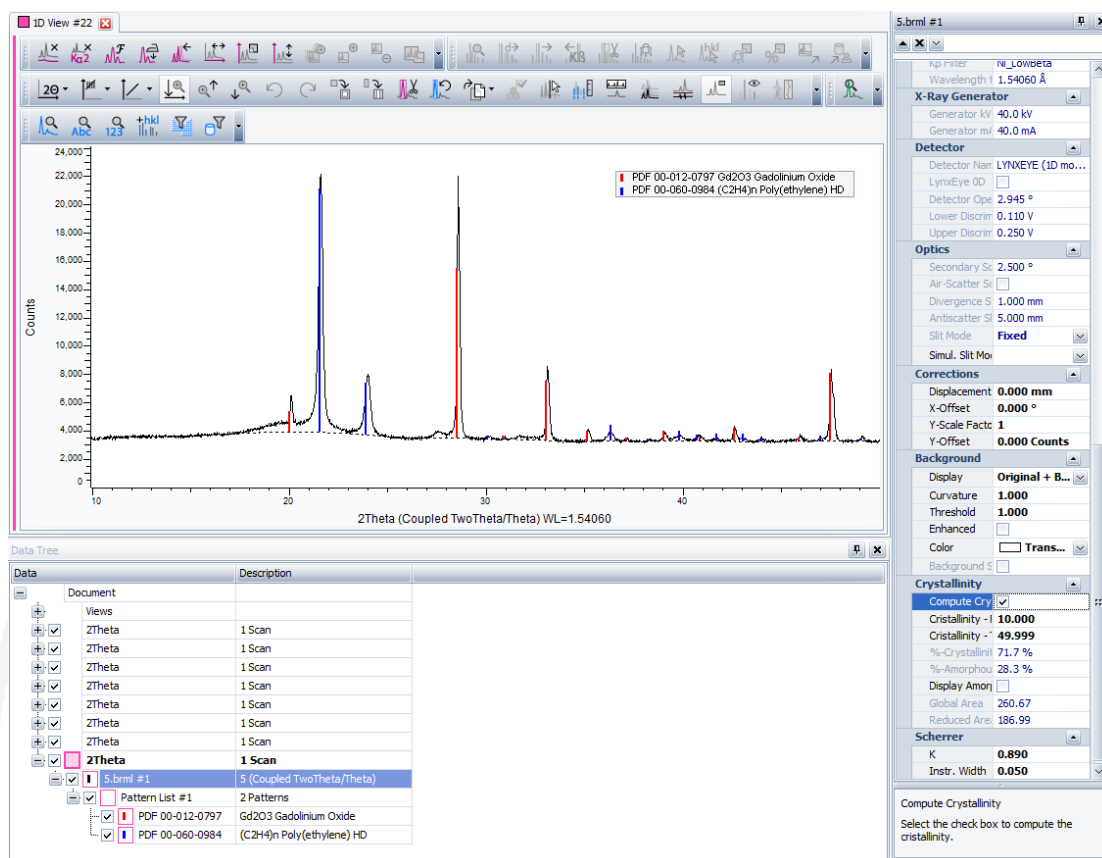


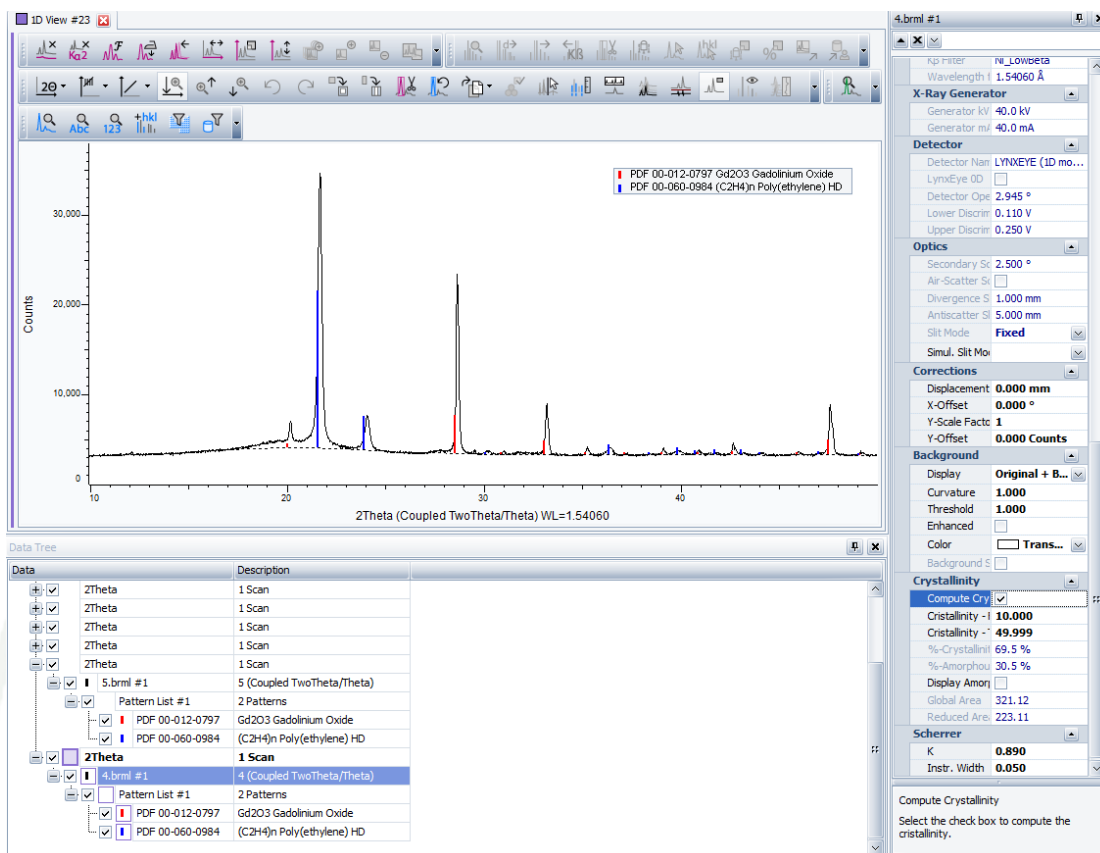
ภาคผนวก

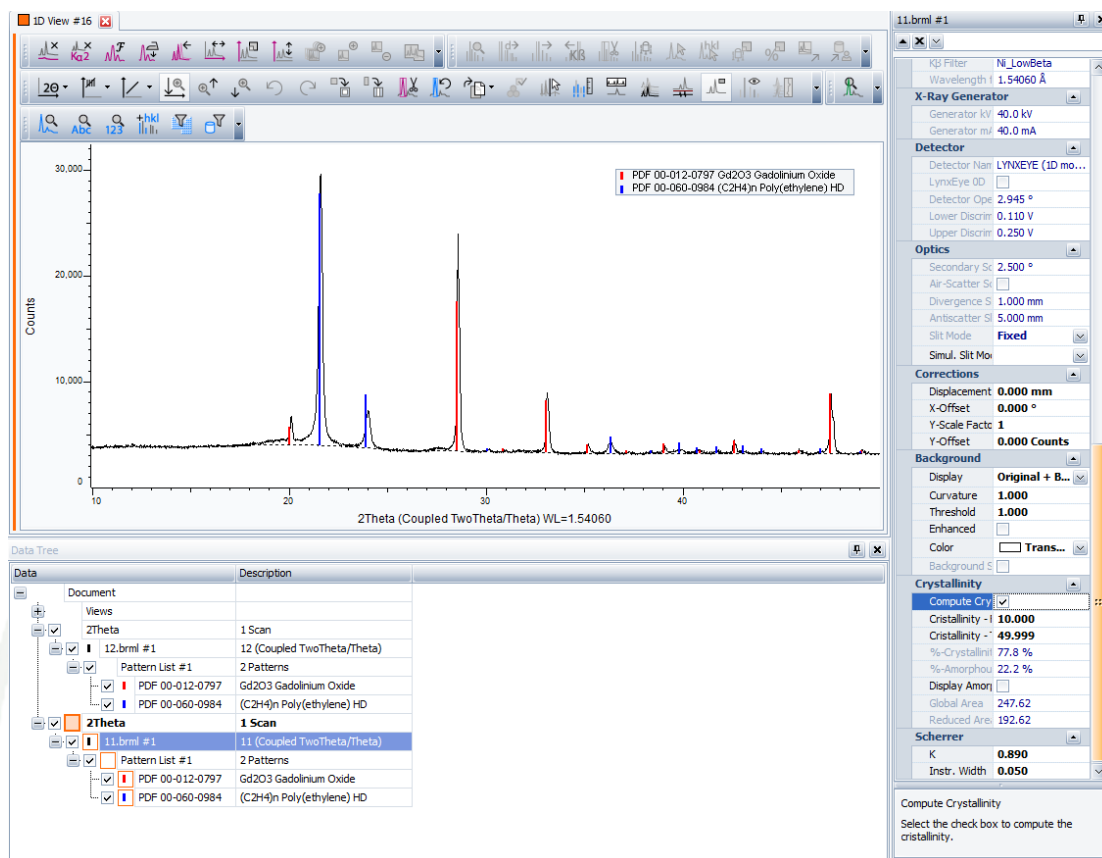


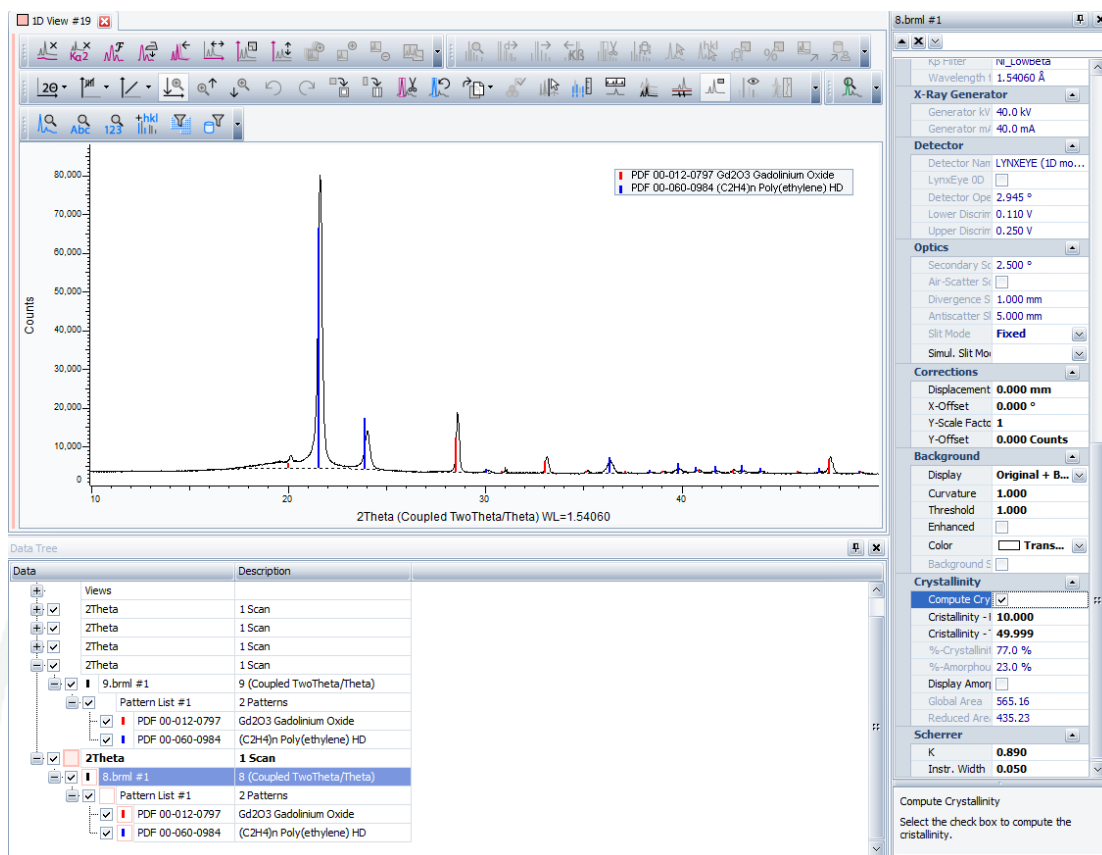


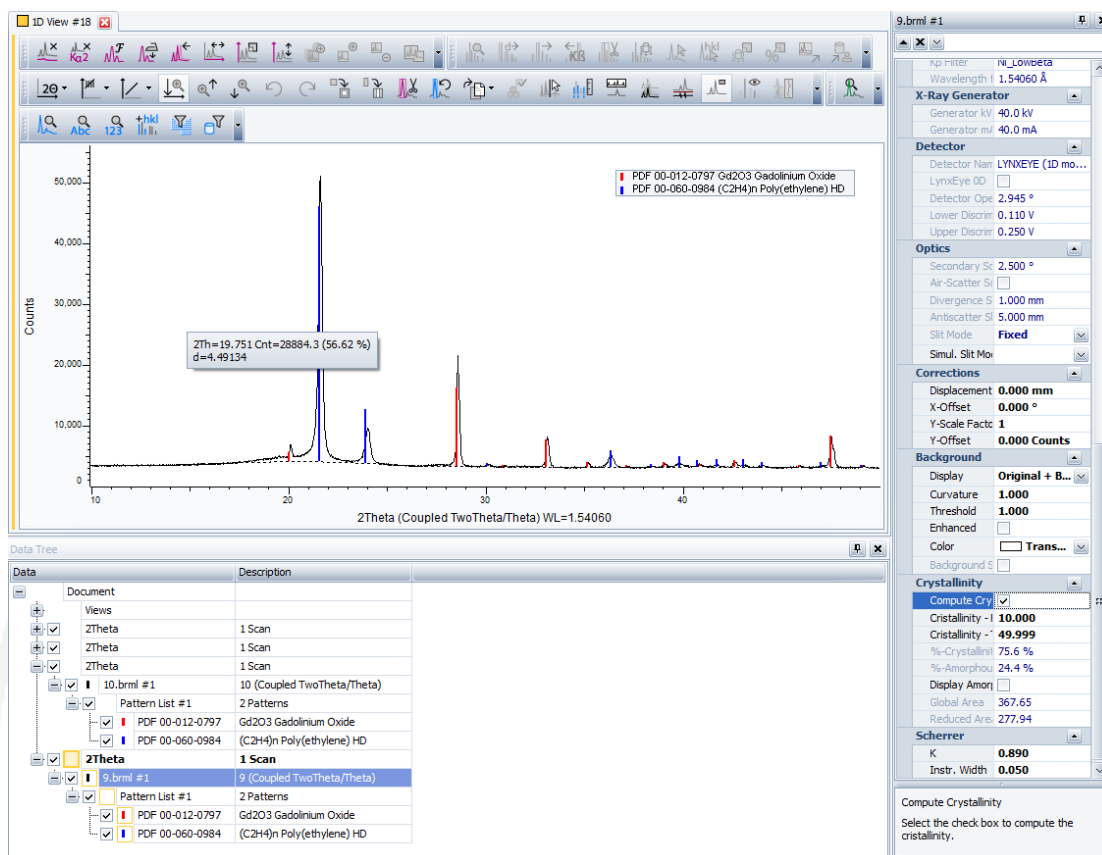


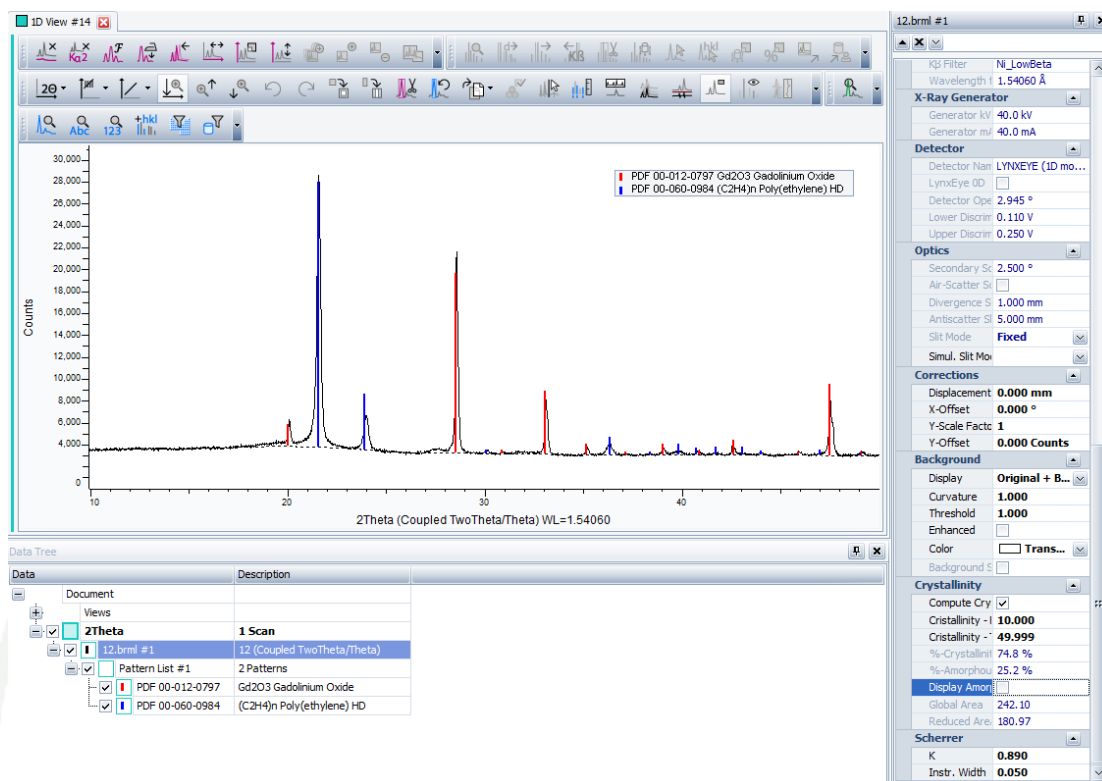












ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	ชิติศรณ เอนกรัตนมนตรี
วัน เดือน ปี เกิด	21 May 1996
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน	68/85 การเคหะหลักสี่ ตึก 8 ซอยแจ้งวัฒนะ 5 แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์ชีวภาพรังสี)
ทุนการศึกษา	ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและ นวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ทุนสัญญาเลขที่ N41D640003