



อิทธิพลของการฉายรังสีแกมมาและยูวีต่อสมบัติเชิงกลของน้ำยางธรรมชาติ
**Irradiation Effects on Mechanical Properties of Natural Rubber Latex by
Gamma and UV Radiation**

ณัฐชยา จันทร์วิไชย
Natchaya Janwichai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Physics
Prince of Songkla University**

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของการฉายรังสีแกมมาและยูวีต่อสมบัติเชิงกลของน้ำยาง
ธรรมชาติ
ผู้เขียน นางสาวณัฐชยา จันทร์วิไชย
สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.ชวัล ชาติตระกูล)ประธานกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ เกษราธิคุณ)
.....กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ชวัล ชาติตระกูล)
..... (รองศาสตราจารย์ ดร.ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)
..... (ดร.วิรัช ทวีปรีดา)กรรมการ (ดร.วิรัช ทวีปรีดา)
.....กรรมการ (ดร.สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
ฟิสิกส์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของการฉายรังสีแกมมาและยูวีต่อสมบัติเชิงกลของน้ำยางธรรมชาติ
ผู้เขียน	นางสาวณัฐชยา จันทร์วิไชย
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลต่อกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมาหรือรังสียูวีบนน้ำยางธรรมชาติที่ผสมด้วยสารเซนซีไทเซออร์ ซึ่งได้แก่ เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane, $CHCl_3$) โดยตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์ด้วยค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับปริมาณโดสรังสีแกมมาหรือใช้ระยะเวลาในการฉายรังสียูวีเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดจะลดลง และยังพบว่าการผสมสารเซนซีไทเซออร์ในน้ำยางธรรมชาติมากกว่า 1 ชนิดจะส่งผลที่ดีกว่า นั่นคือให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงกว่าการผสมสารเซนซีไทเซออร์เพียงชนิดเดียว ยกเว้นในกรณีของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำที่มีการผสมเตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) เป็นสารเซนซีไทเซออร์จะให้ผลในทางตรงกันข้าม (ค่าความต้านทานแรงดึงน้อยลง) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างเตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) กับทีเอ็มทีดี (TMTD) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ ที่เรียกว่า Low Ammonia-Tetramethylthiuram disulphide/Zinc oxid (LA-TZ)

Thesis Title Irradiation Effects on Mechanical Properties of Natural Rubber Latex by Gamma and UV Radiation
Author Miss Natchaya Janwichai
Major Program Physics
Academic Year 2010

ABSTRACT

This thesis will present the vulcanization effect of gamma radiation or UV radiation that exposed on natural rubber latex that mixed with a combination of sensitizers such as n-butyl acrylate (n-BA), tetrachloroethylene (C_2Cl_4) and trichloromethane ($CHCl_3$). All the vulcanizing rubber latex samples were investigated by measuring the tensile strength and %elongation at break. The results showed that the tensile strength of the samples gain more value after receiving the gamma radiation dose or from UV exposure. While the %elongation at break of the same samples show a less value if compare with the original value or before receiving the gamma radiation dose or from UV exposure. The important notice is that the natural rubber that mixed with more than one type of sensitizer will response with the gamma or UV radiation dose by gaining more tensile strength than the one that mix with one type of sensitizer. Except for natural rubber with a low ammonia content and mixed with tetrachloroethylene (C_2Cl_4) sensitizer will give a negative response (less tensile strength) with the gamma or UV radiation dose. This may due to the chemical reaction between the C_2Cl_4 and TMTD and ZnO that mixed in the natural rubber latex or what we call Low Ammonia-Tetramethyl-thiuram disulphide/Zinc oxid (LA-TZ).

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉายรังสีแกมมาบนน้ำยาธรรมชาติ	3
1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉายรังสียูวีบนน้ำยาธรรมชาติ	8
1.3 วัตถุประสงค์	11
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสี	12
2.1.1 แหล่งกำเนิดและชนิดของรังสี	12
2.1.1.1 รังสีที่เป็นกระแสของอนุภาคความเร็วสูง	12
2.1.1.2 รังสีในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	12
2.1.1.3 รังสีที่ก่อให้เกิดไอออน	13
2.1.1.4 รังสีที่ไม่ก่อให้เกิดไอออน	15
2.1.2 อันตรกิริยาของรังสีต่อโมเลกุล	17
2.1.3 การประยุกต์ใช้งานของรังสีในด้านต่างๆ	18
2.1.3.1 การประยุกต์ใช้งานทางด้านการเกษตร	18
2.1.3.2 การประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์	19
2.1.3.3 การประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม	19
2.1.3.4 การประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม	19
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับยางธรรมชาติ	20
2.2.1 ลักษณะทั่วไปและโครงสร้างของยางธรรมชาติ	20
2.2.2 ส่วนประกอบของน้ำยาง	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2.1 ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35%	21
2.2.2.2 ส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65%	22
2.2.3 ชนิดของน้ำยาง	24
2.2.3.1 น้ำยางสด	24
2.2.3.2 น้ำยางข้น	24
2.2.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ	25
2.2.4.1 ความยืดหยุ่น	25
2.2.4.2 ความเหนียวติดกัน	25
2.2.4.3 ความทนทานต่อแรงดึง	25
2.2.4.4 ความทนทานต่อการฉีกขาด	26
2.2.4.5 สมบัติเชิงพลวัต	26
2.2.4.6 ความต้านทานต่อการขีดถู	26
2.2.4.7 ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	26
2.2.4.8 การหั่งงอที่อุณหภูมิต่ำ	26
2.2.4.9 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด	26
2.2.4.10 อุณหภูมิการใช้งาน	26
2.2.5 การใช้งานยางธรรมชาติ	27
2.3 สารเคมีสำหรับน้ำยาง	28
2.3.1 สารให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซิง	29
2.3.2 สารตัวเร่ง	29
2.3.2.1 กลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมท	29
2.3.2.2 กลุ่มแซนเตท	29
2.3.2.3 กลุ่มซัลฟิनाไมด์	29
2.3.2.4 กลุ่มไซอะโซล	30
2.3.2.5 กลุ่มกำนิติน	30
2.3.2.6 กลุ่มไธยูแรม	30
2.3.3 สารกระตุ้น หรือ สารเสริมตัวเร่ง	30
2.3.4 สารตัวเติม	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5 สารช่วยในการแปรรูปของยาง หรือสารพลาสติกไซเซอร์	31
2.3.5.1 สารทำให้ยางนึ่มโดยทางเคมี	31
2.3.5.2 สารช่วยทำให้ยางนึ่มโดยทางกายภาพ	31
2.3.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	31
2.3.7 สารพิเศษอื่นๆ	31
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับส่วนผสมน้ำยาง สำหรับทำการพรีวัลคาไนซ์	31
2.4.1 สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ หรือสารเซนซิไทเซอร์	31
2.4.1.1 ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เพียงชนิดเดียว	32
2.4.1.2 ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป	32
2.4.1.3 ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่มีปฏิกิริยาช้า	32
2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับน้ำยางพรีวัลคาไนซ์	32
2.5.1 การพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ	32
2.5.2 การวัลคาไนซ์ของแผ่นฟิล์มที่ได้จากน้ำยาง	32
2.5.3 ผลทางโครงสร้างทางฟิสิกส์ในแผ่นฟิล์มน้ำยางพรีวัลคาไนซ์	33
2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติของยางในลักษณะฟิล์มบาง	33
2.6.1 คุณสมบัติการทนต่อแรงดึง	33
2.6.2 ความสามารถในการยืดตัวสูงสุด	34
3. สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	35
3.1 สารเคมี	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย	35
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	37
3.3.1 การเตรียมน้ำยางธรรมชาติและสารเคมี ก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์	37
3.3.2 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสี	39
3.3.2.1 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา	39
3.3.2.2 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือรังสียูวี	40
3.3.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำยางเป็นแผ่นฟิล์มบาง	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง	42
3.3.4.1 การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง	42
3.3.4.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	43
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	44
4.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสี	44
4.1.1 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา	44
4.1.1.1 การฉายรังสีแกมมาบนน้ำยางธรรมชาติ แอมโมเนียสูง (HA)	44
4.1.1.2 การฉายรังสีแกมมาบนน้ำยางธรรมชาติ แอมโมเนียต่ำ (LA)	55
4.1.2 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสียูวี	63
4.1.2.1 การฉายรังสียูวีบนน้ำยางธรรมชาติ แอมโมเนียสูง (HA)	66
4.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	77
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุปผลการทดลอง	85
5.1.1 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา	85
5.1.1.1 การฉายรังสีแกมมาบนน้ำยางธรรมชาติ แอมโมเนียสูง (HA)	85
5.1.1.2 การฉายรังสีแกมมาบนน้ำยางธรรมชาติ แอมโมเนียต่ำ (LA)	86
5.1.2 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสียูวี	87
5.1.2.1 การฉายรังสียูวีบนน้ำยางธรรมชาติ แอมโมเนียสูง (HA)	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
5.2.1 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสียูวี	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	89
ภาคผนวก	95
ก. ระบบการวัดปริมาณรังสี	96
ประวัติผู้เขียน	102

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแยกตามช่วงความยาวคลื่น	16
2.2 ส่วนประกอบของน้ำยางสด	23
2.3 ตัวอย่างการใช้งานยางธรรมชาติชนิดต่างๆ	27
3.1 ปริมาณน้ำยางธรรมชาติและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง	37
3.2 ลำดับของการผสมสารเคมี	38
3.3 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี	39
3.4 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี	39
4.1 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn ₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา	44
4.2 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn ₅ C ₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา	47
4.3 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn ₅ CH ₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา	49
4.4 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn ₅ C ₅ CH ₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา	51
4.5 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร LAPn ₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา	55
4.6 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร LAPn ₅ C ₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา	58
4.7 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร LAPn ₅ CH ₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา	60
4.8 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร LAPn ₅ C ₅ CH ₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา	62
4.9 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn ₅ ที่ผ่านการฉายรังสียูวี	66

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn_5C_5 ที่ผ่านการฉายรังสียูวี	69
4.11 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn_5CH_5 ที่ผ่านการฉายรังสียูวี	71
4.12 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสียูวี	73

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	12
2.2 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแยกตามชนิดการก่อให้เกิดไอออนของรังสี	17
2.3 ผลต่ออันตรกิริยาภายในโมเลกุลของสาร	18
2.4 โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแบบ cis-1,4-polyisoprene	20
2.5 โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแบบ trans-1,4-polyisoprene	21
2.6 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ	22
3.1 ชุดกวนน้ำยางผสมสารเคมี	38
3.2 กระปุกพลาสติกขนาดเล็ก สำหรับใส่น้ำยางเพื่อฉายรังสีแกมมา	40
3.3 เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่น Gammacell 220 Excel ที่ศูนย์ฉายรังสีแกมมา	40
3.4 ถังพลาสติก สำหรับใส่น้ำยางเพื่อฉายรังสียูวี	41
3.5 หลอดรังสียูวี รุ่น VL-215.MC 230V 50/60Hz ที่ใช้ในการฉายรังสี	41
3.6 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางในลักษณะแผ่นฟิล์มบาง และแผ่นฟิล์มที่ผ่านการอบ	42
3.7 ชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลล์ (die C) สำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง	42
3.8 เครื่องทดสอบแรงดึง (universal testing machine) ยี่ห้อ LLOYD instrument รุ่น LR10K ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง	43
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5$	45
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5$	46
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5$	47
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5$	48
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5CH_5$	49
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5CH_5$	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5$	67
4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5$	68
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5$	69
4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5$	70
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5CH_5$	71
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5CH_5$	72
4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5CH_5$	73
4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $HAPn_5C_5CH_5$	74
4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร	75
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร	76
4.31 ภาพถ่ายพื้นผิวด้านที่สัมผัสกับอากาศ (air interface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $HAPn_5C_5CH_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ่าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 12000 เท่า	78
4.32 ภาพถ่ายพื้นผิวด้านที่สัมผัสกับอากาศ (air interface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $HAPn_5C_5CH_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ่าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 24000 เท่า	79

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.33 ภาพถ่ายพื้นผิวด้านที่สัมผัสกับกระจก (glass interface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 24000 เท่า	80
4.34 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 12000 เท่า	81
4.35 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 24000 เท่า	82
4.36 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) บริเวณขอบฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 24000 เท่า	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งของโลกหรือประมาณร้อยละ 34.5 ของผลผลิตโลก โดยในปี 2544 มีการผลิตประมาณ 2.3 ล้านตัน ยางธรรมชาติส่วนใหญ่ที่ผลิตได้มีการส่งออกร้อยละ 90 และส่วนที่เหลือเป็นการจำหน่ายในประเทศ โดยประเภทของสินค้าที่ผลิตและส่งออกแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ยางดิบแปรรูปขึ้นต้นและผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งมีมูลค่าการส่งออกจำนวน 2,421.2 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2544 (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม 2544) จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น เห็นได้ว่า ยางธรรมชาติ นับเป็นสินค้าเศรษฐกิจของประเทศ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศมาเลเซีย พบว่าประเทศไทยมีผลผลิตยางมากกว่ามาเลเซียถึง 4 เท่า แต่กลับมีรายได้เข้าประเทศจากยางธรรมชาติน้อยกว่ามาเลเซียถึงปีละประมาณ 2,000 ล้านบาท (สถิติปี 2544) ดังนั้นแนวทางสำคัญที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติได้แก่ กระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางในรูปแบบการใช้งานที่หลากหลายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในการแปรรูปยางดิบเป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้น จำเป็นต้องนำยางมาผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanization) เนื่องจากยางดิบเป็นยางที่ยังไม่อยู่ในสภาพที่พร้อมนำไปใช้งาน เพราะยางดิบมีรูปร่างที่ไม่เสถียร มีความยืดหยุ่นต่ำและมีสมบัติเชิงกลไม่ดี (พงษ์ธร แซ่ฮุย 2548) ซึ่งกระบวนการวัลคาไนซ์นี้เป็นกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางจากเส้นตรง (linear) ไปเป็นพันธะเชื่อมโยง (cross-link) โดยโมเลกุลของยางจะมีการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเชื่อมโยง (vulcanizing agent) และมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยา แต่ในกระบวนการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้นนั้น จำเป็นต้องใช้เวลานานและพลังงานมากในการเกิดกระบวนการ ดังนั้นจึงมีการเติมสารตัวเร่งเพื่อทำให้กระบวนการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น เช่น ในกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ จะมีการเติมสารเร่งปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เพื่อทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น แต่จากการเติมสารตัวเร่งเหล่านี้ทำให้เกิดสารตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งอาจเป็นสารก่อมะเร็งจำพวกสารประกอบไนโตรซามีน (nitrosamine) และก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังได้

นอกจากการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์และใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารตัวเร่งแล้ว สารประกอบไนโตรซามีนยังเกิดขึ้นได้ในระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ของยางที่ใช้ซัลเฟอร์และสารตัวเร่งพวกซัลฟีนามิด, ไตโธโอคาร์บาเนต, ไทยูแรม เหล่านี้ ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่ใช้มากในกระบวนการวัลคาไนซ์ในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากให้สมบัติทางกายภาพดี นอกจากนี้ในระบบซัลเฟอร์ยังมีปัญหาเรื่องการกระจายตัวของสารเคมีที่ละลายไม่ได้ในส่วนผสมน้ำยาง อาจทำให้น้ำยางเกิดเป็นก้อนขึ้นและจับตัวจนหมด อีกทั้งในการใช้ซัลเฟอร์เป็นตัววัลคาไนซ์ จะทำให้เกิดซัลเฟอร์อิสระ (free sulphur) ซึ่งจะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ใสและเกิดปรากฏการณ์ที่ซัลเฟอร์ซึมออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้

นอกจากการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์แล้ว ยังมีการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นกระบวนการวัลคาไนซ์ที่มีข้อได้เปรียบกว่า นั่นคือ เป็นการวัลคาไนซ์ที่ไม่เกี่ยวกับการใช้สารตัวเร่งซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดสารที่ทำให้เกิดมะเร็งพวกไนโตรซามีน โดยประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์นี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของเพอร์ออกไซด์แล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดของยางอีกด้วย

อย่างไรก็ตามนอกจากการใช้สารเคมีในการวัลคาไนซ์แล้ว ยังมีการพัฒนาใช้ประโยชน์จากรังสีที่มีพลังงานสูงมาช่วยในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ (สมพร จงศ์คำ ม.ป.ป.) โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวและทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน ทำให้ยางมีความเสถียรต่อความร้อน อีกทั้งน้ำยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีนี้จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากมีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนน้อย ทำให้ไม่มีสารพิษตกค้างในผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังให้ผลิตภัณฑ์ที่ขาวนวล (รังสรร ศรีสาคร ม.ป.ป.) และปลอดจากสารก่อมะเร็งไม่ระคายเคืองต่อผิวหนังอีกด้วย รวมถึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของยางในด้านต่างๆ ให้ดียิ่งขึ้น เช่น สมบัติเชิงกล ความต้านแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต้านการฉีกขาด (tear resistance) และความยืดหยุ่น (elasticity) เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของรังสีแกมมาและรังสียูวีกับผลของสารเซนซิไทเซอร์ ซึ่งได้แก่ เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) เตตระคลอโรเอเททิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane, $CHCl_3$) ที่ใช้ผสมในตัวอย่งน้ำยางธรรมชาติต่อการวัลคาไนซ์ โดยคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการวัดค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสารตัวอย่าง

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉายรังสีแกมมาบนน้ำยางธรรมชาติ

ชยากกริต และ มานิตย์ (2539) ได้ทำการทดลองเพื่อหาวิธีลดปริมาณรังสีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสี วิธีที่ได้ผลดีคือ การทำวัลคาไนซ์ร่วมระหว่างการวัลคาไนซ์บางส่วนด้วยรังสีโดยใช้ 5 phr t-butyl hydroperoxide เป็นสารไวปฏิกิริยาร่วมและฉายรังสีที่ปริมาณ 4 kGy หลังจากนั้นทำการวัลคาไนซ์ต่อโดย redox vulcanization คือเติม 4 phr fructose และทำให้ร้อนที่ 60°C นาน 3 ชั่วโมง หรือเติม 0.4 phr tetra-ethylene pentamine ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมง ซึ่งจะให้ฟิล์มบางที่มีค่าความต้านทานแรงดึงจนขาดประมาณ 25 MPa, Modulus 300% ประมาณ 0.9 MPa และค่า crosslink density ประมาณ 1.5×10^{19} crosslink/cc เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า crosslink density ของฟิล์มยางจากการทำวัลคาไนซ์ร่วมนี้จะเป็นค่าเฉลี่ยของ crosslink density ของฟิล์มยางจากการทำวัลคาไนซ์ด้วยรังสีล้วนๆ (2.0×10^{19} crosslink/cc) และจากการทำวัลคาไนซ์ด้วยวิธีต็อกซ์ล้วนๆ (1.0×10^{19} crosslink/cc)

ชยากกริต ศิริอุปถัมภ์ (2549) ได้พัฒนาการผลิตน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมาในระดับการผลิตโรงงานต้นแบบครั้งละประมาณ 2-3 ตัน โดยใช้เครื่องฉายรังสีที่ศูนย์ฉายรังสีแห่งประเทศไทย ความแรง 345 kCi มี Carrier นำเข้าฉายรังสีรอบแหล่งฉายรังสี 9 carriers ภาชนะบรรจุน้ำยางธรรมชาติเพื่อฉายรังสีตามการทดลองมี 2 แบบ คือ แบบใช้ถังแบนและแบบถังกลม มีอุปกรณ์กวนน้ำยางขณะฉายรังสี แบบถังแบนทำเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบถัง PE ความจุ 20 ลิตรที่ใช้ทั่วไปกว้าง 17 เซนติเมตร ยาว 23 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร วางบนชั้นเหล็กบรรจุได้ 12 ถังต่อ carrier และแบบถังเหล็กไร้สนิมความจุ 180 ลิตร กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 115 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร บรรจุได้ 2 ถังต่อ carrier สำหรับการฉายรังสีแบบ incremental dose คือ ฉายรังสีให้ครบโดสในขณะหนึ่งเลย จะผลิตยางวัลคาไนซ์ได้ 2160 ลิตรต่อ batch สำหรับถัง PE และ 3240 ลิตร สำหรับถังเหล็กไร้สนิม การฉายรังสีจนครบ vulcanization dose คือ 15 kGy เมื่อใช้ 2 ethyl hexylacrylate 5 phr และ CCl_4 1 phr เป็นสารไวปฏิกิริยาใช้เวลา 12 และ 24 ชั่วโมง โดยมี over doseratio เป็น 1.3 และ 1.4 ตามลำดับ สำหรับน้ำยางกวนขณะฉายรังสีเป็นเหล็กไร้สนิม เส้นผ่านศูนย์กลาง 48.3 เซนติเมตร สูง 85.5 เซนติเมตร มีมอเตอร์ที่รอบเป็น 30 rpm กวนด้วยใบกวน 2 ใบ บรรจุได้ 4 ถังต่อ carrier การฉายรังสีในเงื่อนไขนี้ carrier จะไม่เคลื่อนที่ไปรอบแหล่งกำเนิดรังสี และผลิตน้ำยางฉายรังสีได้ 960 ลิตรต่อ batch ในเวลา 12 ชั่วโมง โดยมี over doseratio เป็น 1.0 การทดลองเรื่อง processability ของน้ำยางวัลคาไนซ์ด้วยรังสีในการผลิตเป็นถุงมือยางใช้ทางการแพทย์ (exam gloves) ทำที่โรงงานผลิตถุงมือ โดยใช้ single dipping เงื่อนไขที่เหมาะสมต่างไปจากการจุ่มจากยางวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์เล็กน้อย คือ จุ่มในน้ำยาง TSC 50-52 หลัง

beading ล้างด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 2 นาที เพื่อไล่อะคริลีน acrylate ฝังมืออย่างใช้ในการแพทย์ที่ได้มีสีขาวนวล นุ่มมือ มีลักษณะมันด้านในขอบที่มันเรียบร้อยซึ่งเป็นลักษณะที่ดีกว่ายางวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ อย่างไรก็ตามฝังมือที่ได้มีค่าความต้านทานแรงดึงจนขาด และค่า tear strength ต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ การฉายรังสีที่ได้ vulcanization dose พอดีจะให้คุณสมบัติที่ผ่าน ASTM D3578 สำหรับฝังมืออย่างใช้ในการแพทย์

ชยากริต และคณะ (2549) ได้ทำการพัฒนาการผลิตน้ำยางวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมาในระดับกึ่งห้องทดลองครั้งละ 10 ลิตร ในภาชนะฉายรังสีที่มีเครื่องกวนให้น้ำยางได้รับรังสีสม่ำเสมอ โดยใช้สารไวปฏิกิริยาเป็นนอร์มอล บิวทิลอะครีเลท และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ 5 และ 0.5 ส่วน ต่อเนื้อยาง 100 ส่วนตามลำดับ ปริมาณรังสีที่ทำให้น้ำยางชั้นวัลคาไนซ์พอดีอยู่ระหว่าง 10-12 kGy น้ำยางชั้นวัลคาไนซ์ด้วยรังสีนี้มีสมบัติในการจับแบบพิมพ์ในการจุ่มแบบใช้โคแอคควแลนต์ได้ดี และได้ให้น้ำยางวัลคาไนซ์ที่ได้ไปทดลองขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทจุ่ม เช่น ฝังมือใช้ในการแพทย์ จุกขวดนมเด็ก ลูกโป่งได้ผลดี มีสมบัติตามข้อกำหนดของ ASTM ทั้งคุณสมบัติก่อนและหลังการบ่มเร่ง ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์จากการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์แบบเก่า คือมีโมดูลัสต่ำกว่า มีความโปร่งใสมากกว่า ไม่มีสารก่อมะเร็งจำพวกไนโตรโซเอมีนเจือปน และไม่ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อ เหมาะที่จะใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับปาก ผิวหนังและอาหาร

ชยากริต และคณะ (2549) ได้ทำการทดลองวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสีโดยใช้ น้ำยางชั้นธรรมชาติในประเทศหลายแห่ง ทั้งที่เป็นชนิดแอมโมเนียสูง (HA) และแอมโมเนียต่ำ (LA) ใช้คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl₄) และ 2 เอทิลเฮกซิลอะครีเลต (2EHA) ร่วมกับ CCl₄ เป็นสารไวปฏิกิริยา เพื่อศึกษาถึงปริมาณรังสีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ อิทธิพลของส่วนประกอบที่ไม่ใช่ยางต่อการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางและสารมีพิษที่อาจตกค้างในแผ่นยางซึ่งได้จากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสี การทดลองยังรวมถึงการใช้ยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีขึ้นรูปเป็นฝังมืออย่างใช้ในการแพทย์ จากการทดลองไม่พบความแตกต่างเรื่องปริมาณรังสีในการวัลคาไนซ์และความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางเมื่อใช้น้ำยางชนิด HA หรือ LA เมื่อใช้สารไวปฏิกิริยาเป็น 2EHA และ CCl₄ ในสัดส่วน 5:1 โดยน้ำหนัก ในปริมาณ 6 ส่วน ต่อน้ำหนักยางได้ปริมาณรังสีในการวัลคาไนซ์อยู่ระหว่าง 10-27 kGy ส่วนประกอบที่ไม่ใช่ยาง โดยเฉพาะโปรตีนอาจมีผลทำให้ปริมาณรังสีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์สูงขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแผ่นยางที่ได้อยู่ที่ระหว่าง 15-26 MPa และขึ้นโดยตรงกับค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นยางจากน้ำยางก่อนการฉายรังสี แผ่นยางที่ได้จากน้ำยางวัลคาไนซ์ด้วยรังสี ตรวจพบปริมาณสารไวปฏิกิริยา (2EHA) ที่ใช้ร่วมด้วยเป็นปริมาณต่ำกว่า 10 ส่วนในล้านส่วน และตรวจไม่พบสารก่อมะเร็งพวกสารไนโตรโซเอมีน ฝังมืออย่างใช้ในการแพทย์ที่ทดลองผลิตขึ้น มีสมบัติทางกายภาพเหนือมาตรฐาน มีโมดูลัส และคุณสมบัติหลังบ่มเร่ง (accelerated aging) ดีมาก

ชีวกัณฑ์ และ ชยากริต (2548) ได้ทดสอบหาคอมแพทิบิลิเซออร์ที่เหมาะสมของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติ-โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำหลังการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้คอมแพทิบิลิเซออร์สามชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติโมเลกุลต่ำ ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ และมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์โพลีเอทิลีน จากการทดสอบการเข้ากันได้ของวัสดุภาคยางและโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าการใช้คอมแพทิบิลิเซออร์ทำให้วัสดุภาคมีขนาดเล็กลงและประสานกันได้ดีและยืนยันผลความเข้ากันได้ด้วยการหาอุณหภูมิการเป็นแก้วเพียงค่าเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้คอมแพทิบิลิเซออร์ชนิดต่างๆ สามารถช่วยผสมให้ยางธรรมชาติกับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเข้ากันได้ จากผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลจากความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการยืดจนขาด ค่าโมดูลัส 100% และความแข็ง พบว่า การใช้ฟทาสิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณร้อยละ 1.0 ในสัดส่วนของยางธรรมชาติกับโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ 60:40 หลังการครอสลิงค์ด้วยรังสีแกมมา ปริมาณ 120 kGy เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมและปริมาณรังสีที่เหมาะสมที่สุด สำหรับปริมาณคอมแพทิบิลิเซออร์ที่เหมาะสมในสัดส่วนอื่นจะแสดงค่าของสัดส่วนการบวมในตัวทำละลายและดัชนีความเข้มของออกซิเจนสูงสุดที่สามารถถูกตัดไฟได้ พร้อมทั้งหาสัดส่วนความเป็นเจลเพื่อยืนยันผลการครอสลิงค์ด้วยรังสีแกมมาในแต่ละเงื่อนไข

ปริดีเปรม และ ปริญา (2537) ได้ศึกษาน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี (RVNRL) เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของนอร์มอลบิวทิลอะครีเลต (n-butyl acrylate, n-BA) 5 phr กับ เทอริวรีบิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (tert-butyl hydroperoxide, HPO) 0.1 phr แล้วฉายรังสีแกมมาปริมาณ 8 kGy พบว่าความหนืดของน้ำยางที่เตรียมได้ลดลงตามอายุการเก็บ เมื่อเติมสารป้องกันออกซิเดชันชนิดต่างๆ ลงในน้ำยาง RVNRL แล้ว สมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มยางหลังอบแห้ง (ที่ 100°C นาน 22 ชั่วโมง) ดีขึ้น Nonnox WSL, Vulcanox KB และ Vulcanox MB2/Mg ทำให้ฟิล์มยางมีค่าความต้านทานแรงดึงจนขาด (Tb) สูง โดยใช้ปริมาณต่ำ ถู่มืออย่างแพทย์ (Examination glove) ที่เตรียมจากน้ำยาง RVNRL เติม Vulcanox KB 0.5 phr แล้วล้างด้วยน้ำอุ่น 50°C นาน 3 นาที จะให้ค่า Tb ก่อนและหลังอบแห้งเท่ากับ 21 MPa และ 20 MPa ตามลำดับ

รักพงษ์ และ ชยากริต (2548) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และยางธรรมชาติ (NR) เบสึนดีโดยวิธีการฉายรังสีแกมมา เพื่อให้เกิดคลอสลิงค์บางส่วน โดย NR/LDPE Blend เตรียมขึ้นด้วย เครื่องผสมภายในร่วมกับฟทาสิกแอนไฮไดรด์ที่อุณหภูมิ 140°C และฉายรังสีแกมมาเพื่อปรับปรุงคุณภาพเชิงกลของ NR/LDPE Blend การหาความเข้ากันได้ของ NR และ LDPE ทำโดยหาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันโดยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) และพิจารณาจาก Photomicrograph โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จากผลการทดสอบพบว่า NR/LDPE Blend ที่อัตราส่วน 50/50,

60/40 และ 70/30 ที่ใช้ฟทาลิกแอนไฮไดรด์เท่ากับ 1.5% เข้ากันได้ดี เมื่อ NR/LDPE Blend ที่อัตราส่วนดังกล่าวไปทำการฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 10-70 kGy แล้วทดสอบคุณสมบัติเชิงกล และหาความสัมพันธ์ ระหว่างคุณสมบัติเชิงกลกับปริมาณรังสี ได้ผลคือ ค่าความต้านทานแรงดึง ค่าความแข็งของ NR/LDPE Blend มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 50/50 ส่วนค่าสัดส่วนความเป็นเจล ค่าดัชนีการไหล ค่าดัชนีความเข้มข้นของก๊าซ ออกซิเจนต่ำสุดที่สามารถดูดติดไฟได้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกัน ค่าสัดส่วนการบวมน้ำมันมีค่าลดลงเมื่อปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น ค่าสัดส่วนความเป็นเจลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ปริมาณรังสีเท่ากับ 30 kGy หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

อนิรุทธิ์ และ ชยากริต (2549) ศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มยางจาก น้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ด้วยรังสีโดยการควบคุมอุณหภูมิขณะฉายรังสีภายใต้เงื่อนไขของ ปริมาณรังสีแกมมาและอุณหภูมิขณะฉายรังสีรวมถึงการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มยางที่ ได้จากเงื่อนไขต่างๆ การควบคุมอุณหภูมิต่ำทดลองตั้งแต่ 5°C ถึง 60°C ที่ปริมาณรังสีต่างๆ จาก 0-30 kGy พบว่าความเหนียวของน้ำยางจะเพิ่มขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิสูง การบวมของ ฟิล์มยางในตัวทำละลายอินทรีย์ ยางหลังวัลคาไนซ์ในการฉายรังสีที่อุณหภูมิต่ำจะบวมน้อยกว่า ที่อุณหภูมิสูงที่ปริมาณรังสีเดียวกัน ขณะที่คุณสมบัติการต้านทานแรงดึงขนาดของยาง หลังวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำจะสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงที่ปริมาณรังสีเดียวกัน ดังนั้นการปรับปรุง คุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มยางจากการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีจึงสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิ ขณะฉายรังสีน้ำยางชั้นกับสารไวปฏิกิริยา เช่น การฉายน้ำยางที่ 10°C จะได้ฟิล์มยางที่มีความ ต้านทานแรงดึง 25.3 MPa ที่ปริมาณรังสีที่วัลคาไนซ์ 28 kGy เปรียบเทียบกับการฉายรังสี น้ำยางที่ 55°C ซึ่งได้ค่าความต้านทานแรงดึงเพียง 15.1 MPa ที่ปริมาณรังสีวัลคาไนซ์ 19 kGy

C.V. Chaudhara, *et al.*, (2005) ศึกษาถึงกระบวนการวัลคาไนซ์บนยาง styrene butadiene (SBRL) ด้วยการฉายรังสี แผ่นฟิล์มที่ได้จะนำไปศึกษาคุณสมบัติ swelling ค่าความ ต้านทานแรงดึง และความเสถียรทางอุณหภูมิ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับโดสรังสี พบว่า ความเป็นเจล ค่าความต้านทานแรงดึง และความเสถียรทางอุณหภูมิของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อโดสรังสีเพิ่มขึ้น

Dafader, N. C., *et al.*, (2006) ได้เตรียมยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติและยาง สังกะเราะห์ และนำไปฉายรังสีโดยแปรค่าตามสัดส่วนจากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ที่ อุณหภูมิห้อง และได้ศึกษาผลที่ได้จากค่าความต้านทานแรงดึง ค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 500% ระยะยืดที่จุดขาด ค่าการบวมตัว พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสที่ 500% มี แนวโน้มที่ค่าสูงขึ้นไปโดสรังสี 8 kGy การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึงนี้มีการเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นจาก 5.61-7.46 MPa ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน

ของยางสังเคราะห์จาก 40-70% ในยางผสม ส่วนค่าระยะยืดที่จุดขาดและการบวมตัวนั้นจะลดลงในขณะที่โดสรังสีเพิ่มขึ้นหรือสัดส่วนของยางสังเคราะห์เพิ่มขึ้น

M. E. HAQUE, *et al.*, (1996) ได้ศึกษาถึงการฉายรังสีบนน้ำยางเพื่อศึกษาถึงกระบวนการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้น โดยศึกษาถึงผลที่เกิดขึ้นกับค่าคลออสลิงที่เกิดจากการใช้สารเซนซิไทเซอร์หลายตัว และในจำนวนสารเซนซิไทเซอร์ทั้งหมด พบว่า เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) จะเป็นสารเซนซิไทเซอร์ที่ให้ผลดีที่สุด และนอกจากค่าคลออสลิงแล้วยังได้ศึกษาถึงผลของค่าความต้านทานแรงดึงในแผ่นยางที่ใช้ n-BA อีกด้วย โดยจากการศึกษาโดสรังสีที่ให้ผลที่ดีที่สุดคือ 12kGy โดยใช้ n-BA เป็นสารเซนซิไทเซอร์จำนวน 5 phr และใช้เวลาในการผสมนาน 30-40 นาที

M.M. Jayasuriya, *et al.*, (2001) ศึกษาผลของตัวเร่ง TMPTMA และ PEA บนการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ (RVNRL) ด้วยรังสี ผลการศึกษาพบว่า PEA เป็นตัวเร่งที่มีผลต่อ RVNRL ได้ดีกว่า และผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพที่ได้ใกล้เคียงกับการใช้ เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) ซึ่งเป็นตัวเร่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับโดยตรงกับ n-BA แล้ว พบว่า PEA มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ผลที่ส่งต่อคุณสมบัติทางกายภาพที่ได้จะมีส่วนคล้ายกันที่โดสรังสีสูงๆ

R. Alex, *et al.*, (1989) ได้ศึกษาถึงผลของการฉายรังสีแกมมาบนน้ำยางธรรมชาติที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกล และผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ สารตัวเร่ง และระบบวัลคาไนซ์ ตัวอย่างของน้ำยางธรรมชาติถูกฉายรังสีในช่วงของโดสรังสี 5-15 Mrad ในอุณหภูมิห้อง (25°C) ที่ dose rate 0.3 Mrad/h ค่า sol content และ volume fraction ทำให้สามารถหาค่า gain insight ของน้ำยางที่ผ่านการฉายรังสี โมเลกุลย่อยของน้ำยางฉายรังสีจะลดลงเนื่องจากผลของความต้านทานแรงดึงที่ลดลง ค่าโมดูลัส 300% มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้มีมากในช่วงของการฉายรังสีที่ปริมาณต่ำๆ ส่วนค่าความต้านทานแรงดึงจะต่ำลงเมื่อโดสรังสีเพิ่มขึ้น และยังพบว่าถ่านดำและสารป้องกันการเสื่อมสภาพสามารถช่วยป้องกันยางธรรมชาติจากการฉายรังสีได้อีกด้วย

S.D. Gehman and I. Auerbach (1956) ศึกษาถึงสมบัติคลออสลิงจากกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 การวัลคาไนซ์ด้วยความร้อนและการใช้สารเคมีในการวัลคาไนซ์ พบว่ามีการพัฒนาสูงขึ้นในกระบวนการอุตสาหกรรมและสารเคมีที่เป็นตัวใช้ในการเกิดกระบวนการคลออสลิงคือ อะตอมของซัลเฟอร์ สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมานั้น การเกิดคลออสลิงเกิดจากการแตกตัวของไฮโดรเจนและเกิดการฟอร์มตัวใหม่ของพันธะคาร์บอน-คาร์บอนซึ่งเกิดเป็นพันธะที่แข็งแรงกว่าการใช้ซัลเฟอร์ โดยทั่วไปแล้วพบว่าสารที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์และซัลเฟอร์นั้นมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นกับการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมา

แต่สารตัวเดิมจะเพิ่มโอกาสในการเกิดการกระเจิงหรืออันตรกิริยาอื่นๆ กับโฟตอนได้ และยังพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเดิม ค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมานั้นมีค่าสูงพอเมื่อเทียบกับการวัลคาไนซ์แบบอื่นๆ สำหรับกระบวนการฉายรังสีนั้นจำเป็นต้องใช้ความแรงรังสีสูงในการวัลคาไนซ์ ถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงานความร้อน ความแรงรังสีที่ได้จะสามารถทำให้อนุมูลอิสระสูงขึ้นได้จนเท่ากับอนุมูลอิสระที่เกิดการวัลคาไนซ์ แต่ข้อดีของการใช้รังสีแกมมาในการวัลคาไนซ์คือ สามารถใช้ได้กับการวัลคาไนซ์อนุภาคต่างๆ และมีความเสถียรมากกว่า มีอายุการวัลคาไนซ์ที่ดี เป็นกระบวนการที่เย็นและรวดเร็ว การพัฒนาด้านอุตสาหกรรมของการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมานี้ อาจจะเป็นประโยชน์ในเรื่องผลผลิตที่เป็นของเสียจากกระบวนการฟิชชันหรือการผลิตเชื้อเพลิงหรือการพัฒนาในเทคโนโลยีการฉายรังสีต่อไป

Yanti Sabarinah, *et al.*, (1990) ศึกษาถึงการลดความต้องการการใช้ CCl_4 เป็นสารเซนซิไทเซอร์ในการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยการฉายรังสี ร่วมกับ n-BA, EA, MA และ MMA พบว่า n-BA เพียงเล็กน้อยคือประมาณ 2 phr มีความเป็นเซนซิไทเซอร์ที่ดีที่สุดในการวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติด้วยรังสี และพบว่าเมื่อใช้ n-BA ร่วมกับ CCl_4 (1/1 phr) จะให้ผลที่ดีขึ้น โดยความแรงของโดสรังสีที่เหมาะสมเมื่อใช้สารเซนซิไทเซอร์แบบผสมคือ 20 kGy และยังพบว่า ฟิล์มยางที่ได้จากการเตรียมแบบใช้สารเซนซิไทเซอร์แบบผสมจะให้คุณสมบัติที่ดีกว่าการใช้ CCl_4 เพียงอย่างเดียว

1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการฉายรังสียูวีบนน้ำยางธรรมชาติ

บัณฑิต ศรีนวลสุข (2550) ได้ศึกษาถึงการผลิต poly-emulsified bitumen โดยใช้ น้ำยางเหลืองอ็อกไซค์สามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยแสงยูวี นอกจากนี้ยังศึกษาเปรียบเทียบกับ การใช้ยางชนิดอื่น ได้แก่ ยางธรรมชาติ น้ำยางเหลือง และน้ำยางอ็อกไซค์ ยางมะตอยอิมัลชันที่ผลิตขึ้นทุกสูตรจะถูกทดลองด้านสมบัติเสถียรภาพและสมบัติของกาก การศึกษาเริ่มจากการลดน้ำหนักโมเลกุลน้ำยางธรรมชาติ ใช้กระบวนการโอโซนไลซิส จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR และ H-NMR และศึกษาการกระจายน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC ต่อมาน้ำยางที่ลดน้ำหนักโมเลกุลแล้วมาทำปฏิกิริยาอ็อกซิเดชันใช้กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60°C จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณหมู่อ็อกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค FT-IR และ H-NMR ต่อมาศึกษาการเชื่อมโยงด้วยแสงยูวีของยางเหลืองอ็อกไซค์ทั้งในสถานะน้ำยางและสารละลายในโทลูอีน โดยมีสาร Triarylsulfonium hexafluorophosphat salts (TAS) เป็น Cationic photoinitiator ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการนำน้ำยางเหลืองอ็อกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ไปผสมกับยางมะตอยอิมัลชันในอัตราส่วนต่างๆ และศึกษาเปรียบเทียบกับการใช้ยางธรรมชาติ น้ำยางเหลือง และน้ำยางอ็อกไซค์ โดยทำการทดสอบสมบัติด้านเสถียรภาพและสมบัติของกาก

รวมถึงศึกษาปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยแสงยูวีของยางเหลวอิพอกไซดในยางมะตอยอิมัลชัน ผลการศึกษาพบว่า หลังลดน้ำหนักโมเลกุลน้ำยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Mn) เท่ากับ 8240 กรัมต่อโมล และมีเปอร์เซ็นต์ epoxidation เท่ากับ 44.75% และพบว่ายางเหลวอิพอกไซดทั้งในสภาวะน้ำยางและสารละลายในโทลูอีนสามารถเกิดการเชื่อมโยงโดยแสงยูวีได้ โดยปริมาณการเชื่อมโยงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ photoinitiator แต่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของการเชื่อมโยงเมื่อทำการฉายแสงนานกว่า 2 นาที โดยการเชื่อมโยงในสภาวะน้ำยางเกิดได้น้อย เนื่องจากความสามารถในการละลายของ photoinitiator สำหรับผลของการผสมน้ำยางชนิดต่างๆ ลงในยางมะตอยอิมัลชันพบว่า ระบบอิมัลชันยังคงมีเสถียรภาพ ส่วนสมบัติของกากยางมะตอยพบว่า ยางมะตอยที่ผสมน้ำยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีที่สุดเนื่องจากมีความเข้ากันได้กับยางมะตอยมากที่สุด การเติมน้ำยางเหลวอิพอกไซดในปริมาณมากขึ้นพบว่า ระบบอิมัลชันยังคงมีเสถียรภาพแต่จะเกิดการแยกเฟสมากขึ้นด้วย และหลังการฉายแสงยูวีพบว่า สมบัติของกากไม่เปลี่ยนแปลง อาจเนื่องจากยางเหลวอิพอกไซดเกิดการเชื่อมโยงได้น้อยมาก

A.K. Bhowmick and J.R. White (2002) ได้ศึกษาถึงการปรับปรุงแผ่นยางด้วยกรรมวิธี ความร้อนที่ 65°C, 80°C และ 90°C และสังเกตผลการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้น โดยผลปรากฏว่าการอบด้วยรังสียูวีและการฉายแสงอาทิตย์นั้นให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกัน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเสื่อมสภาพหรือแยกลง โดยเฉพาะเมื่อฉายด้วยระยะเวลาที่นานขึ้นหรือใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกของการฉายและจะลดลง และเมื่อมีการเติมสารแอนติออกซิแดนซ์หรือความร้อนหรือแสงให้กับตัวอย่างน้ำยาง จะส่งผลให้ค่า thermooxidative มีค่าสูงขึ้นและค่าสมบัติทางกลจะมีการเปลี่ยนแปลง การฉายรังสียูวีและแสงบนตัวอย่างนั้นสามารถช่วยในการปรับปรุงคุณภาพต่างๆ ได้ โดยสามารถอธิบายได้ด้วยค่าคลอสลิง ค่าการย่อยสลาย และค่าความเป็นผลึกที่ได้ และจากการฉายรังสีและแสงนั้นไม่พบว่ามีเกิดการรอยร้าวหรือรอยแตกใดๆ บนตัวอย่างเลยแม้ว่าจะใช้เวลาในการฉายที่นานก็ตาม

Jaimon K. Kurian, *et al.*, (2000) ได้ศึกษาผลของสารตัวเร่งและแอนติออกซิแดนซ์ต่อน้ำยางธรรมชาติที่ฉายด้วยรังสียูวีและผลต่อระบบการวัลคาไนซ์ Zinc diethyl dithiocarbamate (ZDEC), zinc dibutyl dithiocarbamate (ZDBC), zinc mercaptobenzothiazole (ZMBT) และ tetramethyl thiuram disulfide (TMTD) ถูกใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาในการศึกษา และสารแอนติออกซิแดนซ์ที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของ butylated *p*-cresol และ dicyclopentadiene (Wingstay-L), tris-nonylated phenyl phosphite (Crystol EPR 3400), styrenated phenol (SP) และ polymerized 1,2-dihydro 2,2,4-trimethyl quinoline (HS) ตัวอย่างจะถูกนำไปฉายด้วยรังสียูวีและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่า ตัวอย่างที่มีการใช้ ZDBC+ZDEC และ ZDBC+ZMBT เป็นสารตัวเร่งร่วมกันให้ผลในการป้องกันผลของการฉายรังสียูวีได้ดีกว่าการใช้

ZDEC+ZMBT ส่วนสารแอนติออกซิแดนทึ่นั้น Wingstay-L และ SP+HS ยังคงส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพเหมือนเดิมหลังฉายรังสียูวี และ Crystol EPR 3400 มีส่วนมากในการช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของตัวอย่าง

M.D. Romeo-sanchez, *et al.*, (2001) ศึกษาถึงวิธีการปรับปรุงผิวของแผ่นยาง styrene-butadiene (R1) โดยวิธีที่ต่างกัน 2 วิธี คือ corona discharge และการฉายรังสียูวี การศึกษาโดยการใช้ corona discharge นั้นจะมีค่าแปรค่าระยะระหว่างอิเล็กโทรดกับตัวอย่างแผ่นยาง (2-4 มิลลิเมตร) และเวลา (1-11 วินาที) และในทำนองเดียวกันกับการฉายรังสียูวี (ระยะระหว่างหลอดรังสียูวีกับตัวอย่าง 1 และ 5 เซนติเมตร ระยะเวลา 30 วินาที และ 5 นาที) ผลจากการปรับปรุงผิวตัวอย่างทั้งสองวิธีจะถูกตรวจสอบด้วยค่า contact angle, ATR-IR spectroscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) และ Atomic Force Microscopy (AFM) พบว่าค่า contact angle จากการปรับปรุงผิวทั้งสองวิธีมีค่าลดลงถึงแม้จะมีกระบวนการในการจัดการที่ต่างกัน นั่นคือ corona discharge จะมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างสัณฐานของ R1 ในขณะที่การฉายรังสียูวีนั้นจะส่งผลต่อคุณลักษณะทางเคมีของตัวอย่าง และพบว่า zinc stearate จะพบเฉพาะกับการฉายรังสียูวีเท่านั้น ดังนั้นจะได้ว่า การฉายรังสียูวีบนแผ่นยาง R1 จะให้ผลที่น่าพอใจกว่า corona discharge

Patjaree and Jitladda (2005) ศึกษาปฏิกิริยาการฉายแสงยูวีร่วมกับการใช้สารเคมีในการย่อยขนาดโมเลกุลของน้ำยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่ง เพื่อเตรียมน้ำยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีหมู่ฟังก์ชันที่ปลายทั้งสองเป็นหมู่ไฮดรอกซิล โดยศึกษาผลของปริมาณน้ำยางธรรมชาติโปรตีนต่ำ ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และระยะเวลาการฉายแสงยูวีซึ่งมีผลต่อการเกิดการย่อยสลายของพอลิเมอร์ และวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงจากเทคนิคเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟีและวิเคราะห์โครงสร้างของยางที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคทางสเปคโตรสโคปี พบว่า เมื่อนำน้ำยางธรรมชาติโปรตีนต่ำที่มีปริมาณยางแห้งอยู่ร้อยละ 10 ร่วมกับสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของน้ำยาง โดยใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ความเข้มของแสงยูวีที่ 60 วัตต์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทำให้ได้น้ำยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 10^4

1.3 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation at break) ของน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่ต่างกันโดยผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดโคบอลต์-60 โดยให้ได้รับโดสรังสีที่ต่างกัน คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy

2. ศึกษาความเป็นไปได้และศึกษาคุณสมบัติความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation at break) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียสูงโดยผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสียูวี โดยให้ระยะเวลาการฉายรังสีที่ต่างกัน คือ 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง และให้ระยะห่างระหว่างหลอดรังสียูวี และสารตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติคือ 3 เซนติเมตร

3. เปรียบเทียบผลของสารเซนซีไทเซอ์เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane, $CHCl_3$) ที่ผสมในน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดต่อการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมาและรังสียูวี

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

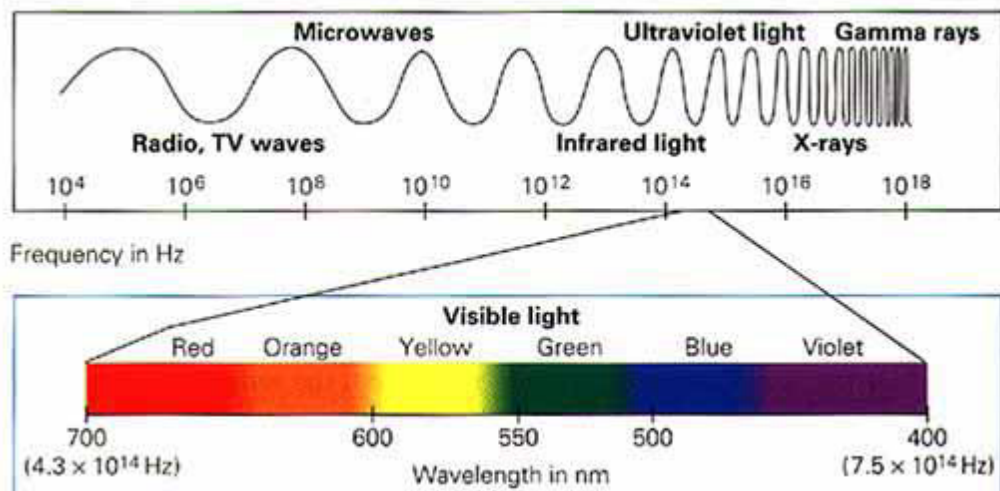
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสี

2.1.1 แหล่งกำเนิดและชนิดของรังสี

รังสี คือ พลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือในลักษณะของอนุภาคพลังงานสูง

2.1.1.1 รังสีในลักษณะที่เป็นกระแสของอนุภาคความเร็วสูง (Sub-atomic Particle Radiation) ซึ่งประกอบไปด้วย อนุภาคแอลฟา อนุภาคบีตา และนิวตรอน

2.1.1.2 รังสีในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) ซึ่งประกอบด้วย คลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟ อินฟราเรด แสง อัลตราไวโอเล็ต รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา และรังสีคอสมิก (รังสีกับสิ่งแวดล้อม 2009)



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (อุษา กัลลประวิทย์ ม.ป.ป.)

นอกจากจะสามารถจำแนกประเภทของรังสีจากรูปแบบของต้นกำเนิดรังสีแล้ว ยังสามารถจำแนกรังสีตามความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาต่างๆ (Interaction) กับสสารได้ 2 ประเภท นั่นคือ

2.1.1.3 รังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (Ionizing Radiation) เป็นรังสีที่มีพลังงานสูงพอที่สามารถทำให้อะตอมหรือโมเลกุลในตัวกลางที่รังสีผ่านไปเกิดแตกตัวเป็นไอออนได้ทั้งทางตรงหรือทางอ้อม (สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข ม.ป.ป.) ซึ่งประกอบด้วย

- แอลฟา (α -particle) เป็นนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม ประกอบด้วยโปรตอน 2 อนุภาค นิวตรอน 2 อนุภาค มีประจุไฟฟ้า $+2e$ และมีมวล 4.001516 amu เท่ากับนิวเคลียสของฮีเลียม แอลฟามักจะเกิดจากการสลายตัวของอะตอมที่หนักๆ ซึ่งมีเลขเชิงอะตอมตั้งแต่ 83 ขึ้นไป เนื่องจากนิวไคลด์ที่หนักจะมีแรงผลักรวมประจุระหว่างโปรตอนมากขึ้น ทำให้แรงนิวเคลียร์ลดลง เมื่อโปรตอน 2 อนุภาครวมกับนิวตรอน 2 อนุภาค แล้วมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะพลังงานศักย์ของนิวเคลียสได้ นิวคลีออนกลุ่มนี้จะหลุดออกจากนิวเคลียส หลังการสลายตัวให้แอลฟาแล้ว อาจเกิดการปลดปล่อยรังสีแกมมาติดตามมา เนื่องจากอนุภาคแอลฟามีประจุและค่อนข้างหนัก จึงสามารถทำอันตรกิริยาโดยการถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมของสสารที่อยู่ใรรังสีมีใกล้ๆ เท่านั้น สามารถเดินทางในอากาศได้เป็นระยะทางสั้นๆ (ไม่เกิน 2-3 เซนติเมตร) (อุษา กัลลประวิทย์ ม.ป.ป.)

- บีตา (β -particle) คืออนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งมีมวล 0.00055 amu มีประจุ $-1e$ มีอำนาจทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่างๆ ได้ดีมากกว่าอนุภาคแอลฟา เพราะมีมวลน้อยกว่าแอลฟา มาก การสลายตัวให้บีตาเกิดขึ้นกับนิวไคลด์ที่มีนิวตรอนมากเกินไป (neutron excess) ทำให้เกิดความไม่สมดุลในนิวเคลียส นิวตรอนจะเปลี่ยนเป็นโปรตอน พร้อมทั้งบีตาและแอนตินิวตริโนออกมา

- นิวตรอน (neutron) เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ มวล 1.008665 amu เป็นองค์ประกอบของนิวเคลียส ยกเว้นอะตอมของไฮโดรเจน เมื่ออยู่ภายในนิวเคลียส นิวตรอนจะเป็นอนุภาคที่อยู่ตัว แต่เมื่ออยู่เป็นอิสระจะสลายตัวให้อนุภาคบีตาและโปรตอน ด้วยครึ่งชีวิต 12.8 นาที ซึ่งสามารถจำแนกนิวตรอนได้ตามพลังงานและความเร็ว ดังนี้

- นิวตรอนช้า (slow neutron) คือ อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 1 keV อาจแยกได้เป็น เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) มีพลังงานเฉลี่ย 0.025 eV ที่ 20°C และเรโซแนนซ์นิวตรอน (resonance neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วง $1-100$ eV

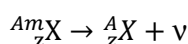
- นิวตรอนเร็ว (fast neutron) คือ อนุภาคนิวตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า 1 keV อาจจำแนกย่อยออกได้เป็น นิวตรอนปานกลาง (intermediate neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วง 1-500 keV นิวตรอนพลังงานสูง (high energy neutron) มีพลังงานอยู่ในช่วงพลังงาน 0.5-20 MeV และนิวตรอนสัมพัทธภาพ (relativistic neutron) มีพลังงานสูงกว่า 20 MeV (นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ 2545)

- รังสีเอกซ์ (X-rays) เป็นกลุ่มโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งของอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสไปอยู่ในวงโคจรที่มีพลังงานแตกต่างกัน รังสีเอกซ์อาจเกิดขึ้นในระหว่างการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีหรือในรูปของรังสีเบรมส์ชตราลุง และนอกจากนี้รังสีเอกซ์ยังมีคุณสมบัติที่สำคัญๆ ดังนี้

- มีช่วงความยาวคลื่นประมาณ 0.01-100 อังสตรอม
- เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และไม่ถูกทำให้เบี่ยงเบนโดยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า
- ทำให้วัตถุบางอย่างเรืองแสงได้
- เป็นรังสีที่ไม่ก่อหรือก่อให้เกิดไอออนได้ขึ้นอยู่กับขนาดของความยาวคลื่น
- ทำให้เกิดรอยดำบนแผ่นฟิล์มถ่ายรูปได้ เช่นเดียวกับแสง
- ทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่างๆ ได้ดี
- ถูกดูดกลืนโดยวัตถุที่มีเลขเชิงมวลสูง
- มีสมบัติเช่นเดียวกับแสง เช่น การสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) และการเบน (diffraction) (นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ 2545)

- รังสีแกมมา (V-rays) คือกลุ่มหรือโฟตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียสระหว่างการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ซึ่งบางครั้งอาจเกิดควบคู่กับการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาหรือบีตา (อุษา กัลลประวิทย์ ม.ป.ป.) หากนิวไคลด์กัมมันตรังสีอยู่ในสถานะกระตุ้นจะมีการปรับตัวเข้าสู่สถานะพื้น โดยมีการปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ช่วงเวลาของการสลายตัวให้รังสีแกมมาสั้นมาก และแตกต่างกันในแต่ละนิวไคลด์ จึงทำให้รู้สึกว่ารังสีแกมมาปลดปล่อยออกมาพร้อมๆ กับการสลายตัวของนิวไคลด์แม่

ในการปรับตัวสู่สถานะพื้น นิวไคลด์อาจจะไม่ลงไปสู่สถานะพื้นทันที แต่จะปรับไปสู่อะตอมกระตุ้นที่มีพลังงานระดับต่ำลงจนถึงสถานะพื้น ทำให้รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมา มีหลายพลังงาน โดยรังสีแกมมาอาจจะมีความถี่ตั้งแต่ระดับ eV จนถึงประมาณ 7 MeV การสลายตัวให้รังสีแกมมาไม่มีผลต่อเลขเชิงมวลและเลขเชิงอะตอมของนิวไคลด์ก่อนและหลังการสลายตัว เพียงแต่ทำให้มีพลังงานลดลง นิวไคลด์แม่และนิวไคลด์ลูกจึงเป็นไอโซเมอร์กัน ดังนั้นอาจเรียกการสลายตัวให้รังสีแกมมาว่า การเปลี่ยนแปลงไอโซเมอร์ริก (isomeric transition) ซึ่งเขียนสมการการสลายตัวได้ดังนี้



เช่นเดียวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ รังสีแกมมาไม่มีทั้งมวลและประจุ จึงทำอันตรกิริยากับสสารได้น้อยกว่าอนุภาคที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ทำให้มีการสูญเสียพลังงานช้าจึงเดินทางไปได้ไกลขึ้นอยู่กับพลังงานเริ่มต้น โดยอาจเดินทางได้ไกลหลายสิบลี้หรือหลายร้อยเมตรได้ในอากาศ โดยปกติรังสีแกมมาสามารถถูกกั้นได้ด้วยวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว เป็นต้น

2.1.1.4 รังสีที่ไม่ก่อให้เกิดไอออน (Non-Ionizing Radiation) ซึ่งประกอบไปด้วย

- คลื่นวิทยุ (radiowave) เป็นช่วงคลื่นที่ใช้ในการส่งข่าวสารจากเครื่องส่งของสถานีไปยังเครื่องรับตามบ้าน คลื่นวิทยุมีสมบัติที่น่าสนใจ คือ สามารถหักเหและสะท้อนได้ในชั้นบรรยากาศซึ่งเต็มไปด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อคลื่นวิทยุเคลื่อนที่ในชั้นบรรยากาศจะสามารถสะท้อนกลับสู่ผิวโลกได้ สมบัติข้อนี้ทำให้สามารถใช้คลื่นวิทยุในการสื่อสารเป็นระยะทางไกลๆ ได้

- ไมโครเวฟ (microwave) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 0.3GHz-300GHz (วิกิพีเดีย 2554) ใช้ในการส่งสัญญาณโทรทัศน์ และใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น คลื่นนี้ไม่สามารถสะท้อนกลับในชั้นบรรยากาศแต่จะสามารถทะลุผ่านออกไปเลย ดังนั้นจึงสามารถส่งคลื่นไมโครเวฟไปยังดาวเทียมที่โคจรรอบโลกเพื่อสะท้อนคลื่นกลับมายังสถานีรับที่อยู่ห่างไกลออกไปได้ นอกจากนี้คลื่นไมโครเวฟยังสะท้อนจากผิวโลหะได้ดี ซึ่งได้มีการนำเอาสมบัติข้อนี้ไปใช้ประโยชน์ในการตรวจหาอากาศยานที่เรียกว่า เรดาร์ ได้อีกด้วย

- อินฟราเรด (infrared) มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า รังสีใต้แดง หรือรังสีความร้อน เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วงเดียวกับไมโครเวฟ มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างแสงสีแดงกับคลื่นวิทยุ สสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -200°C - $4,000^{\circ}\text{C}$ จะปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา คุณสมบัติเฉพาะตัวของอินฟราเรด เช่น ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (วิกิพีเดีย 2554) ปัจจุบันมีการนำเอาอินฟราเรดมาใช้ในอุปกรณ์หลายอย่างเช่น ใช้ในระบบควบคุมที่

เรียกว่า รีโมทคอนโทรล หรือ การควบคุมระยะไกล ซึ่งเป็นระบบสำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ จากระยะไกล โดยรังสีอินฟราเรดจะเป็นตัวนำคำสั่งจากเครื่องควบคุมไปยังเครื่องรับ ในทางทหารได้มีการนำรังสีอินฟราเรดมาใช้เกี่ยวกับการควบคุมให้อาวุธนำวิถีเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายได้อย่างถูกต้อง และนอกจากนี้ยังมีการใช้ส่งสัญญาณสัญญาณนำแสงโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นพาหะนำสัญญาณ เนื่องจากถ้าใช้แสงธรรมดาอาจถูกรบกวนจากแสงภายนอกได้

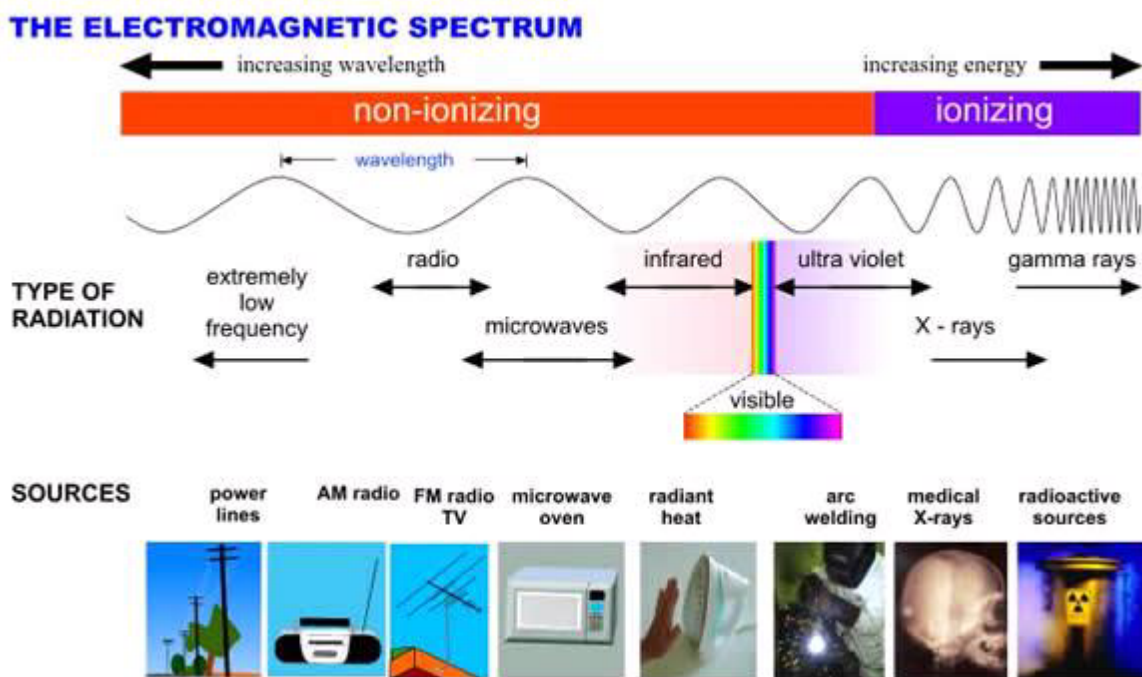
- แสง (visible light) เป็นแสงสีขาวที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีต่างๆ มีสีหลักอยู่ 7 สี มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-800 nm แสงจะแสดงคุณสมบัติทั้งของคลื่นและของอนุภาคในเวลาเดียวกัน นั่นคือ แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงคุณสมบัติของคลื่น เช่น การเลี้ยวเบน การสะท้อน หรือการหักเห และในขณะเดียวกัน แสงก็มีคุณสมบัติเป็นอนุภาค โดยเรียกอนุภาคของแสงว่า โฟตอน (วิกิพีเดีย 2554)

-อัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet light) หรือ รังสียูวีเป็นช่วงหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงที่มองเห็น แต่ยาวกว่ารังสีเอกซ์อย่างอ่อน มีความยาวคลื่นในช่วง 10-400 nm และมีพลังงานในช่วง 3-124 eV โดยสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสียูวีนั้นสามารถแบ่งย่อยได้ ดังแสดงดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 2.1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแยกตามช่วงความยาวคลื่น (วิกิพีเดีย 2552)

ชื่อ	ตัวย่อ	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	พลังงานต่อโฟตอน (eV)
อัลตราไวโอเล็ต เอ, คลื่นยาว	UVA	400-315	3.10-3.94
ใกล้	NUV	400-300	3.10-4.13
อัลตราไวโอเล็ต บี, คลื่นกลาง	UVB	315-280	3.94-4.43
กลาง	MUV	300-200	4.13-6.20
อัลตราไวโอเล็ต ซี, คลื่นสั้น	UVC	280-100	4.43-12.4
ไกล	FUV	200-122	6.20-10.2
สุญญากาศ	VUV	200-10	6.20-124
ไกลยิ่ง	EUV	121-10	10.2-124

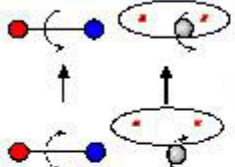

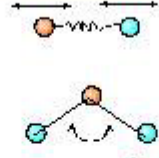
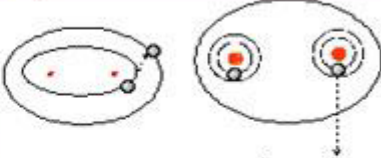
โดยส่วนใหญ่รังสียูวีนี้ได้มาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ส่วนในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าไปในหลอดที่บรรจุไอปรอทไว้ ไอปรอทจะรับเอาพลังงานจากอิเล็กตรอนของกระแสไฟฟ้าแล้วปล่อยรังสียูวีออกมา (ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ม.ป.ป.) ถึงแม้ว่ารังสียูวีจะจัดเป็นรังสีชนิดไม่ก่อให้เกิดไอออน แต่รังสียูวีพลังงานสูงๆ ที่อยู่ทางด้านขวาของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า ก็สามารถจัดเป็นรังสีชนิดก่อไอออนได้ (สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข ม.ป.ป.)



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแยกตามชนิดการก่อให้เกิดไอออนของรังสี

2.1.2 อันตรกิริยาของรังสีต่อโมเลกุล (Interaction with molecule)

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีผลต่ออันตรกิริยาภายในโมเลกุลของสารต่างๆ ต่างกัน ดังนั้นจึงมีการนำรังสีแม่เหล็กไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ทางวิทยาศาสตร์ เพื่อศึกษาโครงสร้าง ชนิด และ ปริมาณสาร เป็นต้น

ทิศสปิน	ทิศการหมุน	รูปแบบการสั่น	ระดับชั้นพลังงาน	
 <p>สปินเปลี่ยนทิศการหมุนในสนามแม่เหล็กนิวเคลียส อิเล็กตรอนสปิน</p>	 <p>โมเลกุลเปลี่ยนทิศการหมุน</p>	 <p>โมเลกุลสั่นในแบบต่างๆ</p>	 <p>อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน</p>	
Radiowave	Microwave	Infrared	Visible Ultraviolet	X-rays Gamma
centimeter หน่วยความยาวคลื่น		micrometer	nanometer	

รูปที่ 2.3 ผลต่ออันตรกิริยาภายในโมเลกุลของสาร (ณัฐภา แสงคำ 2553)

ช่วงคลื่นวิทยุ	มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศสปินของอิเล็กตรอน
ช่วงคลื่นไมโครเวฟ	มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการหมุนของโมเลกุล
ช่วงรังสีอินฟราเรด	มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการสั่นของโมเลกุล
ช่วงแสงและยูวี	มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนชั้นนอก
ช่วงรังสีเอกซ์	มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนชั้นใน
ช่วงรังสีแกมมา	มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของนิวเคลียส

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานของรังสีในด้านต่าง ๆ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนานำประโยชน์จากการใช้งานรังสีมาใช้กันอย่างแพร่หลายในหลาย ๆ ด้าน อาทิเช่น

2.1.3.1 การประยุกต์ใช้งานทางด้านการเกษตร มีการใช้งานด้านรังสีเพื่อกิจการต่างๆ ด้านการเกษตรเป็นอย่างมากเช่น ใช้เพื่อเพิ่มปริมาณคุณภาพผลผลิตทาง

การเกษตร ปรับปรุงพันธุ์พืชโดยใช้รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา หรือรังสีนิวตรอนฉายไปยังเซลล์ของพืช จะทำให้การแบ่งตัวของเซลล์พืชหยุดชะงัก มีการแบ่งตัวของเซลล์ล่าช้า เซลล์มีการกลายพันธุ์ เพื่อสร้างพันธุ์พืชที่มีลักษณะดีตามความต้องการ หรือมีการใช้รังสีในการปรับปรุงการใช้ปุ๋ยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังมีการนำรังสีมาใช้กับผลผลิตทางการเกษตร เช่น การใช้รังสีแกมมาเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของพืช ผัก และชะลอการสุกของผลไม้ เป็นต้น (วิกิพีเดีย 2554) นอกจากนี้ยังมีการใช้งานรังสีแกมมาในการควบคุมและกำจัดแมลงเพื่อลดการขยายพันธุ์โดยการทำให้แมลงเป็นหมันได้อีกด้วย (รังสรร ศรีสาคร ม.ป.ป.)

2.1.3.2 การประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ มีการใช้รังสีเพื่อการตรวจวินิจฉัยโรค เช่น การถ่ายเอกซเรย์ เพื่อตรวจความผิดปกติของอวัยวะในร่างกาย และการตรวจการทำงานของระบบอวัยวะ โดยให้ผู้ป่วยรับประทาน หรือฉีดสารกัมมันตรังสีเข้าไปในร่างกาย แล้วทำการถ่ายภาพอวัยวะ จะช่วยให้แพทย์ทราบถึงบริเวณที่แน่นอนของอวัยวะที่สูญเสียหน้าที่ไปได้ ตลอดจนการบำบัดรักษาโรค เช่น การใช้รังสีในการรักษาโรคมะเร็งและเนื้องอก หรือการใช้งานเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ปลอดภัย เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและคนไข้ เป็นต้น (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่ม 27 2546)

2.1.3.3 การประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม เราสามารถนำรังสีมาใช้ประโยชน์ในด้านสิ่งแวดล้อมใน ๒ ทาง คือ การรักษาและพัฒนาสภาพสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้น การตรวจและควบคุมปริมาณรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อมนุษย์ ดังเช่น การใช้รังสีแกมมาจากไอโซโทปโคบอลต์-60 หรือซีเซียม-137 มาเชื้อโรคต่างๆ ในน้ำทิ้งจากชุมชนและจากโรงพยาบาลเพื่อป้องกันโรคระบาด การใช้รังสีอิเล็กตรอนในการกำจัดก๊าซอันตราย (SO₂ และ NO₂) จากการปล่อยควันของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เผาถ่านหิน หรือการใช้เทคนิคนิวเคลียร์วิเคราะห์สารพิษต่างๆ ในดิน พืช อาหาร อากาศ และน้ำ เป็นต้น (สมพร จงคำ 2546)

2.1.3.4 การประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม

- อุตสาหกรรมการฉายรังสี มีการใช้รังสีพลังงานสูงมาฉายวัสดุเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ทางชีวภาพ หรือกายภาพ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น (รังสรร ศรีสาคร ม.ป.ป.)

- อุตสาหกรรมพอลิเมอร์ รังสีสามารถไปช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาในงานพอลิเมอร์ต่างๆ เช่น การฉายรังสีน้ำยางธรรมชาติเพื่อไปช่วยให้มอนอเมอร์จับตัวกับพอลิเมอร์ เรียกว่า การตอกรัง (grafting) หรือเพื่อไปทำให้พอลิเมอร์ จับตัวกันเป็นร่างแหสามมิติ และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความคงทนต่อความร้อน เช่น ใช้ในการผลิตฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์

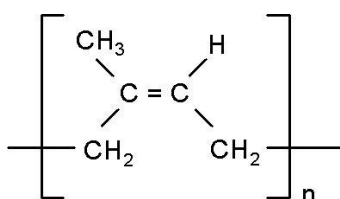
พลาสติกและโฟม เป็นต้น อีกทั้งยังช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของพอลิเมอร์ในด้านต่างๆให้ดียิ่งขึ้น เช่น การเกิดการเชื่อมโยงที่ดีขึ้น ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เพื่อสะดวกต่อการขึ้นรูปที่ง่ายขึ้น เป็นต้น (เกศินี เหมวิเชียร และ พิริยาธร สุวรรณมาลา ม.ป.ป.)

2.1.3.5 การประยุกต์ใช้งานทางด้านการศึกษาและวิจัย โดยการศึกษาถึงปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นจากการที่อนุภาคหรือรังสีที่มีพลังงานสูงวิ่งไปชนกับนิวเคลียสของธาตุต่างๆ รวมถึงการศึกษาถึงผลของรังสีต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับยางธรรมชาติ

2.2.1 ลักษณะทั่วไปและโครงสร้างของยางธรรมชาติ

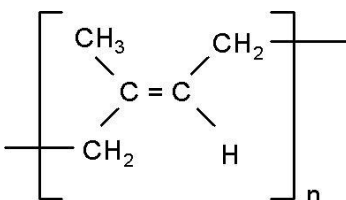
ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีซัลเฟอร์ ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีซัลเฟอร์ เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น (หน่วยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 2552) โดยหน่วยย่อยของแต่ละหน่วยประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอมและไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรทางเคมีอย่างง่ายคือ C_5H_8 โครงสร้างของ 1 โมเลกุลยางประกอบด้วย ไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรงแบบซิส (linear cis-1,4-polyisoprene) ประมาณ 3,000-5,000 หน่วยไอโซพรีน มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยประมาณ 200,000-400,000 มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้างมาก (วรภรณ์ ขจรไชยกูล 2549)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแบบ cis-1,4-polyisoprene (หน่วยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 2552)

ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20°C มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, t_g) ประมาณ -72°C ที่อุณหภูมินี้สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะ

คล้ายแก้ว (พงษ์ธร แซ่ฮุย 2547) ส่วนน้ำยางจากต้น Gutta Percha และ Balata ซึ่งเป็นต้นไม้ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะมีโครงสร้างโมเลกุลแบบทราน (trans-1,4-polyisoprene)



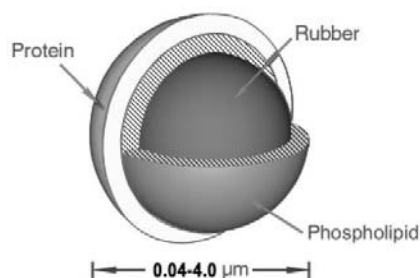
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลยางธรรมชาติแบบ trans-1,4-polyisoprene (หน่วยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 2549)

2.2.2 ส่วนประกอบของน้ำยาง

น้ำยางที่ได้จากต้นยางจะมีลักษณะเป็นเม็ดยางเล็กๆ กระจายอยู่ในน้ำ (emulsion) มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 30-40 pH 6.5-7 น้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีความหนืดประมาณ 12-15 เซนติพอยต์ (วิกิพีเดีย 2552) ส่วนประกอบในน้ำยางสดแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ

2.2.2.1 ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35% มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

- อนุภาคยาง ถูกห่อหุ้มด้วยสารจำพวกไขมันและโปรตีน โดยโปรตีนจะอยู่ชั้นนอกและอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.5% โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยในน้ำ ประกอบด้วยสารประกอบพวกคาร์บอน มีชื่อทางโครงสร้างเคมีว่า ไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) มีความหนาแน่น 0.92 กรัมต่อมิลลิลิตร มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000-400,000 กรัมต่อโมล ลักษณะอนุภาคยางมีลักษณะค่อนข้างกลมคล้ายลูกแพร์ มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันมากอยู่ระหว่าง 0.04-4 ไมครอน อนุภาคยางส่วนใหญ่จะมีขนาดไม่เกิน 0.4 ไมครอน ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูง พบว่า อนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำมาอยู่ด้านบน ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับหางน้ำยาง (skim latex)



รูปที่ 2.6 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ (Blackley 1997)

- โปรตีน (protein) โปรตีนที่ห่อหุ้มอยู่ที่ผิวรอบนอกของอนุภาคยางมีอยู่ประมาณ 25% ของโปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยาง โปรตีนที่อยู่ในน้ำยางส่วนมากเป็นชนิดแอลฟาไกลบูลิน (α -Globulin) และ ฮีวิน (Hevian) ส่วนนอกสุดของอนุภาคยางมีโปรตีนห่อหุ้มอยู่ประมาณ 1% ของอนุภาคยาง ส่วนใหญ่เป็นพวกแอลฟาไกลบูลินที่ไม่ละลายในน้ำกลั่นแต่ละลายในกรด ด่าง หรือเกลือ มีค่า Isoelectric point ที่ $\text{pH} = 4.8$ ดังนั้นอนุภาคยางจะรวมตัวกันอย่างรวดเร็วที่ pH ของแอลฟาไกลบูลินละลายน้อยที่สุด สำหรับโปรตีนที่ห่อหุ้มผิวรอบนอกของอนุภาคยางซึ่งเป็นโปรตีนพวกฮีวิน สามารถละลายในน้ำได้ มีค่า Isoelectric point ที่ $\text{pH} = 4.8$ จะป้องกันอนุภาคยางมารวมตัวกัน ส่วนประกอบของฮีวินมีกำมะถันอยู่ประมาณ 5% และเป็นประเภท crystalline disulphide linkage ดังนั้นขณะที่น้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพจะเกิดการบูดเน่าโดยโปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบพวกไฮโดรซัลไฟด์และสารเมอร์แคปแทนทำให้มีกลิ่นเหม็น

- ไขมัน (Lipid) ไขมันจะอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยางและโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิด ชนิด α -Lecithin ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง น้ำยางในสภาวะที่เป็นด่าง เช่น มีแอมโมเนียอยู่ (ประมาณ 0.6% ขึ้นไป) ฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซ์เป็นกรดไขมันที่มีโมเลกุลยาวซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ ทำให้น้ำยางมีความเสถียรยิ่งขึ้น แต่กรณีที่มีปริมาณแอมโมเนียน้อย (ประมาณ 0.2% ในน้ำยาง) การไฮโดรไลซ์จะเกิดขึ้นน้อย การเพิ่มความเสถียรของน้ำยางจึงจำเป็นต้องเพิ่มสบู่หรือสารอื่นที่ช่วยในการเก็บรักษาน้ำยางเพิ่มลงไป (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี 2546)

2.2.2.2 ส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง 65% มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

- ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม เซรัมของน้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อมิลลิลิตร ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ คาร์โบไฮเดรตเป็นสารพวกแป้งและน้ำตาล มีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1% น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิดคิวบาซิทอล (Quebrachitol)

- โปรตีนและกรดอะมิโน เป็นส่วนที่อยู่ในเซรุ่มของน้ำยาง มีค่า Isoelectric point หลายค่า โปรตีนที่มีค่า Isoelectric point สูงสามารถสลายตัวให้ประจุบวกได้ เป็นสาเหตุให้น้ำยางสูญเสียสภาพ

- ส่วนของลูทอยด์และสารอื่นๆ ลูทอยด์ (Lutiods) เป็นอนุภาคที่ค่อนข้างกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-3 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเยื่อบางๆ ภายในเยื่อบางๆ นี้มีทั้ง สารละลายและสารที่แขวนลอย มีค่า pH=5.5 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีน โดยมีโปรตีนที่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 3% และมีส่วนของโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำอยู่ประมาณ 2% นอกจากนี้ยังมี ส่วนของสารพวกฟอสโฟไลปิดแขวนลอยอยู่ประมาณ 0.5% และมีสารโพลีฟีนอลออกซิเดส ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ยางมีสีเหลืองหรือสีคล้ำเมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ลูทอยด์ ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียวสามารถเกิดการออสโมซิสได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางสดจะทำให้ลูทอยด์บวมและแตกง่าย ขณะที่ลูทอยด์เกิดการพองตัวมีผลทำให้น้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้นและเมื่อลูทอยด์แตกความหนืดก็จะลดลง หากเติมแอมโมเนียลงในน้ำยางสด พบว่าส่วนของลูทอยด์และสารพวกโกลหะแมกนีเซียมจะรวมตัวกับแอมโมเนีย เกิดการตกตะกอนเป็นตม สีน้ำตาลและสีม่วงแยกตัวออกจากน้ำยางและเกาะรวมกันอยู่ด้านล่างสามารถแยกออกได้ สารอื่นๆ โดยมากเป็นอนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey wyssling) เป็นสารที่ไม่ใช่ยางมีอนุภาคใหญ่กว่ายาง แต่ความหนาแน่นน้อยกว่า มีรูปร่างค่อนข้างกลม มีผนังล้อมรอบสองชั้น มีปริมาณไม่มากนัก ประกอบด้วย สารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ ซึ่งทำให้น้ำยางมีสีเหลืองเข้ม สามารถรวมตัวกับแอมโมเนียและแยกตัวออกจากยางมาอยู่เป็นส่วนหนึ่งของเซรุ่มได้ (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี 2546)

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของน้ำยางสด (Blackley 1997)

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content; TSC)	27-48
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content; DRC)	25-45
สารพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-1.25
ซีเถ้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

2.2.3 ชนิดของน้ำยาง

น้ำยางแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ น้ำยางสดและน้ำยางข้น

2.2.3.1 น้ำยางสด ที่กรีตได้จากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว บางครั้งอาจปนเหลืองอ่อนๆ ขุ่นข้นและมีกลิ่นหอมเล็กน้อย มีน้ำหนักน้อยกว่าน้ำ (มีความหนาแน่น 0.98 กรัมต่อมิลลิลิตร) และเมื่อตั้งทิ้งไว้จะลอยตัวขึ้นด้านบน น้ำยางสด ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางแห้ง ซึ่งจะมีอยู่ร้อยละประมาณ 35 โดยน้ำหนัก และส่วนที่เป็นน้ำและสารอื่นๆ ซึ่งจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก โดยส่วนประกอบทั้งสองส่วนนี้ มีสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงได้ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ อาทิ พันธุ์ยางพารา อายุต้นยาง ฤดูกาล วิธีการกรีตยาง ระบบหรือความถี่ในการกรีตยาง และปัจจัยที่สำคัญ และมีผลเป็นอย่างมากคือ การบำรุงรักษานั่นเอง (live-rubber 2009) นอกจากนี้ น้ำยางสดนั้น เก็บไว้ได้ไม่นานก็จะเกิดการบูดซึ่งจะคล้ายๆ กับน้ำนม เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ปะปนในน้ำยางจะย่อยสลายสารอาหารเกิดเป็นกรดและจะบูดเน่าในที่สุด จึงไม่แนะนำให้ทำมาเป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้น น้ำยางสดจึงมักถูกนำไปแปรรูปเป็นวัตถุดิบยางขันทัน เช่น น้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง STR XL และยางแท่ง STR SL เป็นต้น แล้วจึงนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

2.2.3.2 น้ำยางข้น เป็นน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น โดยน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 55-65 ซึ่งสูงกว่าน้ำยางสดที่มีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 20-35 ทำให้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายขึ้น (บุญธรรม นิธิอุทัยและคณะ 2540) น้ำยางข้นชนิดที่ผลิตในประเทศไทยเป็นน้ำยางข้นจากกรรมวิธีการใช้เครื่องปั่น (centrifuge concentrated latex) ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ

- น้ำยางชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia; HA)

เป็นน้ำยางข้นที่ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.7% ร่วมกับกรดลอริก 0.035% น้ำยางชนิดนี้มีข้อดีคือ มีอายุการเก็บน้ำยางได้นานเป็นปี ไม่เสี้ง่าย จึงมักนำไปผลิตถุงมือยาง กาวยาง ถุงยางอนามัย เป็นต้น ยกเว้นยางฟองน้ำ เนื่องจากแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำยางจะไปยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดเจลหรือเกิดฟองในน้ำยาง ทำให้ได้ฟองน้ำที่ด้อยคุณภาพ

- น้ำยางชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia; LA)

เป็นน้ำยางข้นที่ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย 0.2% ร่วมกับ TMTD 0.013% ร่วมกับ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 0.013% ร่วมกับกรดลอริก 0.035% ศัพท์วิชาการยางพาราใช้กันว่า LA-TZ ย่อมาจาก Low Ammonia-Tetramethyl-thiuram disulphide/Zinc

oxide สำหรับน้ำยางชนิดที่ใช้ปริมาณแอมโมเนียช่วยรักษาสภาพ นอกจากจะใช้สารช่วยกลุ่ม TMTD ซึ่งคือออกไซด์ และกรดลอริก ดังกล่าวข้างต้นแล้ว ผู้ผลิตน้ำยางชั้นประเภทอื่นๆ ได้มีการใช้สารช่วยกลุ่มอื่นๆ เช่น ZDC ร่วมกับกรดลอริก หรือกรดบอริกร่วมกับกรดลอริก เป็นต้น น้ำยางชนิดแอมโมเนียต่ำ ส่วนใหญ่นำไปใช้ในกระบวนการผลิตยางพองน้ำ แต่ทั้งนี้อายุการเก็บของน้ำยางชนิดนี้จะสั้นกว่าน้ำยางชนิดแอมโมเนียสูง

2.2.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึกได้ (crystallize) การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และทนทานต่อการขีดสีสูง (หน่วยเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 2552) นอกจากคุณสมบัติดังกล่าวที่กล่าวมาแล้ว ยางธรรมชาติยังมีคุณสมบัติอื่นอีก ดังนี้

2.2.4.1 ความยืดหยุ่น (elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ คือ ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม หรือใกล้เคียงขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว

2.2.4.2 ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติในสภาพที่ยังไม่คงรูป มีสมบัติเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

2.2.4.3 ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกดึงยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง โดยปกติยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงประมาณ 20 MPa หรือมากกว่า และเมื่อมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วยอาจมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงถึง 30 MPa ซึ่งสมบัตินี้ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง นิ่ม และแข็งแรงได้ เช่น การทำถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถูยางอนามัย สายยางยืด และยางรัด เป็นต้น

2.2.4.4 ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถแตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

2.2.4.5 สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย

2.2.4.6 ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงต่ำกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่า ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูในกลุ่มที่สูงมาก

2.2.4.7 สมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 10¹⁵ หรือ 10¹⁶ ohm cm

2.2.4.8 การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่น หรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งมีสมบัติดีกว่ายางเพียง 2 ชนิดเท่านั้น คือ ยางบิวตาไอดีน (BR) และยางซิลิโคน

2.2.4.9 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถที่จะเกิดการออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซน เพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะทำให้ยางนั้นเกิดรอยแตกจำนวนมากที่บริเวณผิวในทิศตั้งฉากกับการดึงยืดของยาง

2.2.4.10 อุณหภูมิการใช้งาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 55°C จนถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลานานๆ ยางอาจจะเกิดการแตกผลึกทำให้แข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะน้อยลงเนื่องจากความร้อนทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ (พงษ์ธร แซ่ฮุย 2547)

2.2.5 การใช้งานยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ผลิตได้ในรูปแบบต่างๆ จะมีการนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด ดังแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการใช้งานยางธรรมชาติชนิดต่างๆ (สถาบันวิจัยยาง 2540)

ชนิด	การใช้งาน	หมายเหตุ
STR XL, STR 5L, ADS, RSS 1, pale crepe	ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เกสซ์กรรม การสัมผัสอาหาร ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเติมแต่งสี สัน เส้นด้ายยางยืด (cut threads) กาวยาง เทปติดพื้น รองเท้าและส่วนประกอบ	เป็นยางที่มีความสะอาดมีสีจาง โดยเฉพาะยาง STR XL และ STR 5L ส่วน RSS ค่อนข้างแข็งมาก ค่า Mooney Viscosity สูงและไม่ค่อยเหมาะในงานผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสัมผัสอาหาร
STR 20, RSS 2, 3, 4, 5	ผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ ยางล้อดอก รวมทั้งผลิตภัณฑ์ยางอะไหล่ ยางใช้ในงานวิศวกรรม และใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป	เป็นยางสีคล้ำ มักใช้งานที่ผสมกับสารตัวเติมโดยเฉพาะพวกเขม่าดำ โดยเฉพาะยางแผ่นรมควันชั้น 4, 5 จะมีคุณภาพต่ำ จึงมักใช้ผลิตผลิตภัณฑ์คุณภาพต่ำ
Skim Rubber	ผลิตภัณฑ์คุณภาพต่ำ เช่น ยางปูพื้น ยางล้อรถเข็น ยางกันกระแทก เป็นต้น	ใช้ผสมกับยางคุณภาพสูงเพื่อลดต้นทุนและเนื่องจากมีสีอ่อน และมี non rubber มากกว่ายางปกติจึงสามารถใช้ผลิตภัณฑ์ยางสีจางหรือยางที่ต้องการแต่งเติมสี นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบในการเกิดคงรูปได้เร็ว แต่ข้อเสีย คือ สมบัติทางกายภาพต่ำ

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างการใช้งานยางธรรมชาติชนิดต่างๆ (สถาบันวิจัยยาง 2540) (ต่อ)

ชนิด	การใช้งาน	หมายเหตุ
น้ำยางข้น	<p>ผลิตภัณฑ์จุ่มแบบ เช่น ถุงมือ ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย จุกนม สำหรับทารก เป็นต้น</p> <p>ผลิตภัณฑ์ตีฟอง เช่น ที่นอน หมอน ตุ๊กตา ฟองน้ำ เป็นต้น</p> <p>ผลิตภัณฑ์หล่อแบบ เช่น ตุ๊กตายาง หุ่นการศึกษา เป็นต้น</p> <p>ผลิตภัณฑ์เส้นด้ายยัด (latex thread) เช่น ท่อยาง หรือ กาวน้ำยาง เป็นต้น</p>	สามารถออกสูตรสารเคมีผสมน้ำยางให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียวและแข็งแรงมากโดยไม่เติมสารเสริมความแข็งแรง (reinforcing filler)
น้ำยางคงรูป (Prevulcanization)	ผลิตภัณฑ์จุ่มแบบต่างๆ เช่น ถุงมือ ลูกโป่ง และผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นแบบหล่อต่างๆ เป็นต้น	มีส่วนผสมสารเคมีต่างๆ แล้วจึงใช้งานได้สะดวก และสามารถรับเพิ่มความทนทานให้กับผลิตภัณฑ์โดยการเติมสารเคมีกันเสื่อมในระบบการขึ้นรูป

2.3 สารเคมีสำหรับน้ำยาง

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่างๆที่ผสมลงไปนยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางตามคุณสมบัติที่ต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีแล้วไม่อาจนำไปใช้งานได้เว้นแต่สารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับยางก่อน ซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีเรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber) (พรทิพย์ ศรีโสภา 2547) การใช้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางนั้นก็เพื่อช่วยในการปรับปรุงและแก้ไขข้อเสียต่างๆ ที่มีในยางธรรมชาติ เพื่อให้ยางมีการใช้งานได้กว้างขึ้น เช่น การที่ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง หรือ การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกทำให้ยางใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัดเท่านั้น เป็นต้น (พรพรรณ

นิรุธ 2528) ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ จึงจำเป็นต้องผสมสารเคมีต่างๆ ลงไป โดยสารเคมีสำหรับน้ำยาง มีดังนี้

2.3.1 สารทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซิง (Vulcanizing agent) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) ตรงตำแหน่งที่วงไวต่อการทำปฏิกิริยา ได้แก่ สารกำมะถัน สารที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน สารเพอร์ออกไซด์

2.3.2 สารตัวเร่ง (Accelerator) เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้เร็วขึ้น ทำให้เวลาเชื่อมโยงเร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันในปริมาณที่น้อยลง ได้แก่ สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดช้า ปานกลาง หรือเร็ว เช่น กัวนิติน (Guanidine) ไธอาโซล (Thiazole) ซัลฟีนามาไมด์ (Sulphenamide) ไธยูราม (Thiuram)

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ ได้เป็น 6 กลุ่มดังนี้

2.3.2.1 กลุ่มไดไธโอคาร์บามาเทต (Dithiocarbamate) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) กลุ่มเกลือโซเดียม (sodium salt) และกลุ่มเกลือซิงค์ (zinc salt) สารตัวเร่งกลุ่มนี้จัดอยู่ในพวกสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์สูง จะเร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วมาก โดยกลุ่มเกลือซิงค์มีการใช้งานในทางการค้ามากที่สุด และสารตัวเร่งกลุ่มนี้มักใช้เป็นสารตัวเร่งสำหรับน้ำยาง อุณหภูมิที่ใช้งานในการวัลคาไนซ์ไม่เกิน 125°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะโปร่งใส ขาว หรือมีสีสน้ำใส ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ได้แก่ ZDPC, ZDEC, ZDBC, ZDMC เป็นต้น

2.3.2.2 กลุ่มแซนทาเทต (Zanthate) เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ยางได้เร็วมาก (เร็วกว่ากลุ่มเกลือแอมโมเนียมของไดไธโอคาร์บามาเทต) ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยางไม่นิยมใช้กับยางแข็ง อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ประมาณ 80-110°C เพื่อให้ได้การวัลคาไนซ์แบบพลาโต (plateau curve) ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ได้แก่ SIX, ZIX, ZBX เป็นต้น

2.3.2.3 กลุ่มซัลฟีนามาไมด์ (Sulphenamide) เป็นสารตัวเร่งที่ delay action หรือให้เวลาสก๊อชนานกว่าไธอาโซล เพราะเมื่อได้รับความร้อน ซัลฟีนามาไมด์จะแตกตัวให้ MBT และเบสออกมา โดยที่ MBT จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ และเบสเป็นตัวกระตุ้นให้สารตัวเร่งทำงานเร็วขึ้น มอดูลัสสูงขึ้น สารกลุ่มนี้ได้แก่ CBS, TBBS, DCBS, Vulcavit AZ เป็นต้น การใช้ซัลฟีนามาไมด์ร่วมกับไดไธโอคาร์บามาเทตหรือไธยูราม จะทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น และจำเป็นต้องมีซิงค์ออกไซด์ อย่างน้อย 3.0 phr และกรดไขมันร่วมด้วยเพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่ซัลฟีนามาไมด์เป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงมากและมีสมบัติเชิงกลที่ดี รวมทั้งการ

วัลคาไนซ์แบบพลาโต แต่ซัลฟีนามิดต์จะเกิดการแตกสลายได้ง่าย เมื่ออยู่ใกล้ความชื้นหรือไอน้ำ ซึ่งจะทำให้ยางเกิดการสก๊อชได้ง่ายขึ้นและวัลคาไนซ์ได้ช้าลง

2.3.2.4 กลุ่มไธอะโซล (Thiazole) เป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ถ้าใช้ไธอะโซลเป็นสารตัวเร่งเพียงอย่างเดียวล้วนๆ ยางที่ได้จะมีความปลอดภัยในการผลิตมากกว่าใช้สารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงอื่นๆ ตัวอย่าง สารกลุ่มไธอะโซล ได้แก่ MBTS, MBT, ZMBT, เป็นต้น (โดย MBTS และ MBT ช่วยให้ยางนุ่มลงในขณะที่ทำการบดผสมด้วย ส่วน ZMBT มีความเร็วในการวัลคาไนซ์มากกว่า MBTS จึงนิยมใช้กับน้ำยาง) ยางที่ใช้ในสารกลุ่มนี้สามารถวัลคาไนซ์ได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ โดยเฉพาะเครื่องอัด ถ้าใช้สารกลุ่มนี้ร่วมกับสารตัวเร่งกลุ่มอื่น เช่น ไดไฮโอคาร์บาเมทและไธยูเรม จะทำให้การวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น การใช้ไธอะโซลจำเป็นต้องมีซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันร่วมด้วย

2.3.2.5 กลุ่มกัวนิดีน เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ได้ช้า มักใช้เป็นสารตัวเร่งเสริมเหมาะที่จะใช้กับยางหนา เพราะต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ที่นาน สารกลุ่มนี้ เช่น DPG, DOTG, ออกตะโททิลไบกัวนิดีน (o-totyl biguanidine) เป็นต้น

2.3.2.6 กลุ่มไธยูเรม (Thiuram) จัดเป็นกลุ่มของสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงเป็นพิเศษ ยางจะสก๊อชและวัลคาไนซ์ช้ากว่ากลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมท สารกลุ่มนี้สามารถใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นสารตัวเร่งด้วยตัวเองตามลำพัง โดยไม่ต้องมีกำมะถันก็สามารถวัลคาไนซ์ยางได้เช่นกันที่เรียกว่า thiuram vulcanization แต่ยางที่ได้จะมีค่ามอดูลัสต่ำ หรือใช้ปนกับกำมะถันในปริมาณเล็กน้อย ได้ยางที่มีสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำและทนความร้อน หรือใช้เป็นสารตัวเร่งเสริมเพื่อกระตุ้นสารตัวเร่งอื่น เช่น ใช้คู่กับไธอะโซลและซัลฟีนามิดต์ เป็นต้น ตัวอย่างสารตัวเร่งกลุ่มนี้ คือ TMTD, TMTM, TETD, DPTS เป็นต้น และสารกลุ่มนี้จำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์กระตุ้นการทำงาน แต่ไม่จำเป็นต้องมีกรดไขมันได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ประมาณ 125-135°C มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่โปรงใส มีสีขาวย หรือสีต่างๆ และใช้กับวัสดุทางการแพทย์

2.3.3 สารกระตุ้น หรือ สารเสริมตัวเร่ง (Activator) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น เร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น โดยทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงขึ้น ได้แก่ กรดสเตียริก (stearic acid) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

2.3.4 สารตัวเติม (Filler) เป็นสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น พวกรวมดำ (Carbon Black) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และ ซิลิกา (Silica) เป็นต้น

2.3.5 สารช่วยในการแปรรูปของยาง หรือสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticiser) เป็นสารที่ช่วยทำให้ยางนิ่ม แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.3.5.1 สารทำให้ยางนิ่มโดยทางเคมี (Chemical plasticiser) เป็นสารเคมีที่เมื่อใส่เข้าไปในยางจะทำให้ยางนิ่มและลดเวลาของการบดยางลง การใช้งานมักใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ มักใส่สารเคมีประเภทนี้ลงไปในยางเมื่อเริ่มต้นการผสมหรือบด และปล่อยให้สารทำปฏิกิริยากับยางเป็นระยะเวลาสั้นๆ ก่อนที่จะใส่สารอื่นลงไปได้ เช่น Sulphonic acid, Xylyl mercaptan

2.3.5.2 สารช่วยทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ (Physical plasticiser) เป็นสารที่ใส่เข้าไปแล้วจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจะนิ่มลง แปรรูปได้ง่ายขึ้น ที่สำคัญได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเอทาเทอร์ เป็นต้น (พรทิพย์ ศรีโสภา 2547)

2.3.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agent) เป็นสารที่ใช้เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง โดยใช้สารพวกแอนติออกซิแดนท์ หรือ สารพวกแอนติโอโซนแนนท์ ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้จะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวนานขึ้น (พงษ์ธร แซ่ฮุ่ย 2548)

2.3.7 สารพิเศษอื่น ๆ (Miscellaneous ingredient) ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใส่สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ ยกตัวอย่าง เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) หรือ สารหน่วง (retarder) เป็นต้น

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับส่วนผสมน้ำยาง สำหรับการพรีวัลคาไนซ์ (Latex compounding)

น้ำยางสามารถนำมาใช้โดยตรงกับอุตสาหกรรม หลักของน้ำยาง คือ ต้องเติมส่วนผสมลงไปก่อนที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หรือส่วนประกอบ ช่วงของส่วนที่ใช้ในเทคโนโลยีน้ำยางใช้ได้กว้างกว่าในยางที่เป็นของแข็ง หลักพื้นฐานของการผสม คือ ให้มีจำนวนของสารเติมที่น้อยที่สุด เพื่อที่จะเป็นแบบของกระบวนการและสมบัติผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยทั่วไปส่วนผสมน้ำยางส่วนใหญ่ จะประกอบด้วยสารเคมีดังต่อไปนี้

2.4.1 สารเร่งปฏิกิริยารังสี หรือสารเซนซิไทเซอร์ (sensitizer)

เหตุผลของการใช้สารเร่งรังสีก็เพื่อการลดเวลาหรือลดอุณหภูมิของการรังสี ยาง และยังเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติให้กับผลผลิตอีกด้วย ในการลดเวลาการรังสียางนั้น โดยปกติจะขึ้นอยู่กับปริมาณหรือชนิดของสารที่ใช้ อย่างไรก็ตามหลักการโดยทั่ว ๆ ไปที่ปฏิบัติกัน สรุปได้ดังนี้

2.4.1.1 ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยารังสีเพียงชนิดเดียว (primary accelerators) ให้พอเพียงที่จะรังสียางตามเวลาที่ต้องการ

2.4.1.2 ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยารังสีตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยประกอบด้วยชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณมาก (primary accelerator) และอีกชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณน้อย (secondary accelerator 10-20% of the total) เพื่อช่วยเสริมและปรับปรุงคุณสมบัติของผลผลิต การใช้ระบบรังสีโดยสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ดังกล่าวนี้อาจได้ผลผลิตที่มีคุณสมบัติดีกว่าการใช้ระบบสารใดสารหนึ่งเพียงอย่างเดียว

2.4.1.3 ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยารังสีที่มีปฏิกิริยาช้า (delayed action accelerators) สารประเภทนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาขณะกรรมวิธีก่อนการรังสี ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาการเกิดยางรังสีก่อนเวลา อย่างไรก็ตามสารดังกล่าวนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยารังสีเมื่อถึงอุณหภูมิของการรังสี

2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับน้ำยางพรีวัลคาไนซ์

2.5.1 การพรีวัลคาไนซ์น้ำยางธรรมชาติ หมายถึง การทำให้อนุภาคถูกเชื่อมโยงทางเคมี (chemical cross-linked) ซึ่งเมื่อยางแห้งจะได้แผ่นฟิล์มยางที่เกิดการวัลคาไนซ์โดยไม่ต้องให้ความร้อน วิธีการดังกล่าวให้คำจำกัดความว่า “น้ำยางวัลคาไนซ์แล้ว” หรือชื่อทางสามัญ คือ “น้ำยางพรีวัลคาไนซ์”

2.5.2 การวัลคาไนซ์ของแผ่นฟิล์มที่ได้จากน้ำยาง (Vulcanization of Latex Film) ในอุตสาหกรรมที่ได้จากน้ำยางมีการใส่ส่วนผสมลงไปในน้ำยาง เช่น สารคงตัว ซัลเฟอร์ซิงค์ ออกไซด์ สารตัวเร่งหนึ่งตัวหรือมากกว่านั้น และแผ่นฟิล์มยางถูกวัลคาไนซ์โดยความร้อน (ปกติที่ 100-140°C) หรือให้อยู่ในช่วงความร้อนที่ 50-70°C การคลออสลิงค์จะเกิดขึ้นจนกระทั่งส่วนผสมของน้ำทั้งหมดถูกขจัดออกไปจากยางและยางอยู่ในระยะต่อเนื่อง (continuous phase) ดังนั้นการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นเกือบหมดในมวลของยางในระยะนี้ หรือในกรณีนี้ 2 เกิดจากการ

กระทำของสารตัวเร่งและช่วงเวลาของการใช้ความร้อนถูกจัดให้มีดีกรีของการวัลคาไนซ์ซึ่งเกิดขึ้นก่อนที่ยางจะตกตะกอน (prevulcanize) การคลอสลิงค์จะเกิดขึ้นภายในอนุภาคยางแต่ละอนุภาคที่อยู่ในระยะกระจาย (disperse phase) ของน้ำยาง นอกจากนี้การคลอสลิงค์ยังเกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนภายหลังซึ่งสันนิษฐานว่าเกิดจากการรวมของอนุภาคยางเข้าด้วยกัน

2.5.3 ผลทางโครงสร้างทางฟิสิกส์ในแผ่นฟิล์มน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ การคลอสลิงค์ที่เกิดขึ้นในการวัลคาไนซ์น้ำยาง จะมีประสิทธิภาพมากกว่าในยางก้อนที่ต้องมาบด เนื่องจากในน้ำยางมีปลายสายโซ่อิสระ ที่ช่วยทำให้การวัลคาไนซ์แข็งแรงขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มน้ำยางจะช่วยยึดดีกรีของโครงสร้างภายในของเฟสน้ำยางซึ่งอนุภาคยางอยู่ใกล้กันใน surface-active interfacial film หรือชั้นที่ประกอบด้วยโปรตีนและฟอสโฟไลปิด ยกเว้นเมื่อมีการเติมสบู่หรือสารคงตัวลงไป ในการระเหยน้ำออก เมื่อแผ่นฟิล์มแห้งโครงสร้างนี้ซึ่งมีโปรตีน (หรือส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง) ปรากฏเป็นร่างแหที่ยึดกันอยู่แผ่กว้างออกไป ซึ่งส่วนนี้จะถูกทำลายอย่างมากเมื่อทำการบดด้วยลูกกลิ้ง

2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับการทดสอบคุณสมบัติของยางในลักษณะฟิล์มบาง

2.6.1 คุณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength)

ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ เป็นการทดสอบที่แสดงสมรรถนะและความสามารถในการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางนั้นๆ ในด้านของการรับแรงดึง มาตรฐานที่มักใช้ในการทดสอบสมบัติด้านการดึง คือ ASTM D412, ISO 37 และ JIS K6251 (Sirinthorn Thongsang n.d.) โดยการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงนี้สามารถทดสอบจากลักษณะการยืดออกของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก โดยอาศัยเทอม 2 เทอม ที่สัมพันธ์กัน คือ

2.6.1.1 ความเค้น (stress, ω) คือแรงที่ใช้ในการดึงตัวอย่างหรือยึดตัวอย่างต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด

$$\omega (\text{MPa}) = \frac{F}{A}$$

2.6.1.2 ความเครียด (strain, κ) คืออัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดึงต่อความยาวเริ่มต้น (เต็มสุข แดงหอม ม.ป.ป.)

$$\kappa = \frac{L - L_0}{L_0}$$

2.6.2 ความสามารถในการยืดตัวสูงสุด (Elongation at break)

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการยืดตัวของตัวอย่าง ณ จุดขาด (ชนิดพร มาตรฐาน 2552)

$$\text{Elongation at break (\%)} = \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) \times 100\%$$

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

3.1.1 น้ำยางข้น ชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Latex, HA) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ผลิตโดยบริษัท ฉลอง อุตสาหกรรมน้ำยางข้น

3.1.2 น้ำยางข้น ชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low Ammonia Concentrated Latex, LA) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ผลิตโดยบริษัท ฉลอง อุตสาหกรรมน้ำยางข้น

3.1.3 เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) ทำหน้าที่เป็นสารเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ผลิตโดยบริษัท Sigma-ALDRICH Chemistry Co.,Ltd.

3.1.4 เตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) ทำหน้าที่เป็นสารเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ผลิตโดยบริษัท Lab Scan Asia Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.5 ไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane, $CHCl_3$) ทำหน้าที่เป็นสารเซนซิไทเซอร์ (sensitizer) ผลิตโดยบริษัท Lab Scan Asia Co., Ltd. ประเทศไทย

3.1.6 อะซิโตน (acetone, CH_3COCH_3) ผลิตโดยบริษัท J.T.Baker Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย

3.1 แผ่นกระจก สำหรับเตรียมฟิล์มบางขนาด 30×40 เซนติเมตร

3.2 ปีกเกอร์ขนาดต่างๆ

- 3.3 มีดปาดฟิล์ม (casting knife)
- 3.4 หลอดหยด
- 3.5 แท่งแก้วคน
- 3.6 เครื่องกวนผสมสารเคมีกับน้ำยาง ผลิตโดยบริษัท MERIT TECH Co., Ltd
- 3.7 ไขพืดกวนน้ำยางผสมสารเคมี ชนิด 4 ไขพืด
- 3.8 กระปุกพลาสติกขนาดเล็ก สำหรับใส่น้ำยางในการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแกมมา
- 3.9 ถังพลาสติก สำหรับใส่น้ำยางในการวัลคาไนซ์ด้วยรังสียูวี
- 3.10 มีดตัดดัมเบลล์ ASTM D-412-C ผลิตโดย บริษัท INTERNATIONAL INC
- 3.11 เครื่องวัดความหนา (thickness meter) ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร. ผลิตโดย บริษัท TECLOCK ประเทศญี่ปุ่น
- 3.12 อุปกรณ์พื้นฐานอื่นๆ เช่น มีด คัตเตอร์ กรรไกร ไม้บรรทัด เทปกาว เป็นต้น
- 3.13 เครื่องชั่งสาร เป็นเครื่องชั่งระบบดิจิทัล มี 2 แบบ คือทศนิยม 2 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง ผลิตโดยบริษัท Mettler Co., Ltd
- 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น Quanta400
- 3.15 เครื่องทดสอบแรงดึง (universal testing machine) ยี่ห้อ LLOYD instrument รุ่น LR10K ผลิตโดยบริษัท อินโทรเอ็นเตอร์ไพร์ส จำกัด
- 3.16 ตู้อบอากาศร้อน (Hot Air Oven) รุ่น D06061 ผลิตโดยบริษัท Memmert Co., Ltd ประเทศเยอรมันนี
- 3.17 เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่น Gammacell 220 Excel ที่ศูนย์ฉายรังสีแกมมา สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.)
- 3.18 หลอดรังสียูวี รุ่น VL-215.MC 230V 50/60Hz ความยาวคลื่น 254/312 nm ผลิตโดยบริษัท VILBER LOURMAT ประเทศฝรั่งเศส

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมน้ำยางธรรมชาติและสารเคมี ก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์

ในการเตรียมตัวอย่างยางซึ่งเป็นน้ำยางนั้น เนื่องจากมีปริมาณน้ำมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณในหน่วยของ phr ก่อนที่จะผสมสารเคมีแต่ละชนิดในหน่วยของกรัม โดยการคำนวณจากปริมาณเนื้อยางแห้งที่อยู่ในน้ำยาง

วิธีการคำนวณในหน่วย phr

จากน้ำยาง 60% มียางแห้ง 60 phr และน้ำ 40 phr

ยางแห้ง 60 กรัม จากน้ำยาง 100 กรัม

ยางแห้ง 100 กรัม จากน้ำยาง 166.67 กรัม หรือ 100 phr

ดังนั้นในการเตรียมน้ำยางธรรมชาติสำหรับทำการวัลคาไนซ์ สามารถทำได้โดยการเตรียมน้ำยาง 166.67 กรัม จะได้น้ำยางที่มีเนื้อยาง 100 phr หลังจากนั้นชั่งสารเคมีตามสูตรที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณน้ำยางธรรมชาติและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

สารเคมี	น้ำหนักแห้ง (phr)	น้ำหนักเปียก (g)
60% Latex	100	166.67
n-BA	5	5
C ₂ Cl ₄	5	5
CHCl ₃	5	5

เตรียมน้ำยางตามสูตรประมาณ 2.5 เท่า ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร หลังจากนั้นเติมสารเคมีตามลำดับดังตารางที่ 3.2 จนครบตามสูตรอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางเหนียว จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนผสมสารเคมีกับน้ำยางเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ค้างคืนที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25°C)

ตารางที่ 3.2 ลำดับของการผสมสารเคมี

ลำดับการผสมสารเคมี	เวลา (นาที)	เวลาสะสม (นาที)
1. เติม n-BA	1	1
2. เมื่อผ่านไป 5 นาที เติม C_2Cl_4	1	7
3. เมื่อผ่านไป 5 นาที เติม $CHCl_3$	1	13



รูปที่ 3.1 ชุดกวนน้ำยางผสมสารเคมี

หลังจากเติมน้ำยางและสารเคมีจนครบตามสูตรที่ต้องการแล้วจะได้น้ำยางที่มีสูตรดังตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 สำหรับน้ำยางชนิดแอมโมเนียสูงและชนิดแอมโมเนียต่ำตามลำดับ (คมกฤษ ฤทธิรงค์ 2552)

ตารางที่ 3.3 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ผสมสารเคมี

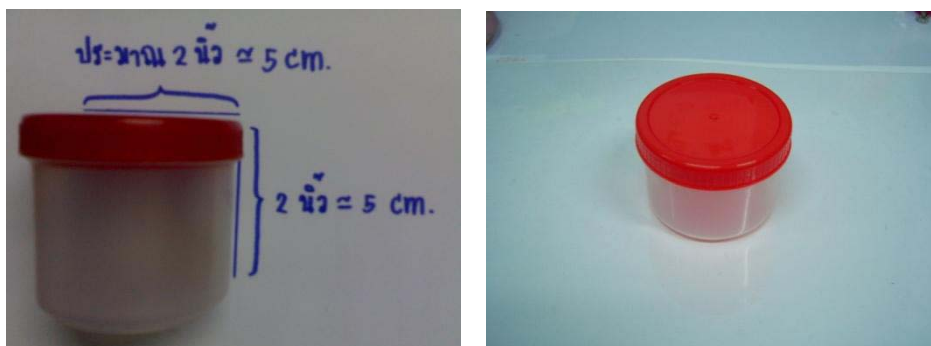
ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	HAPn ₅	HAPn ₅ C ₅	HAPn ₅ CH ₅	HAPn ₅ C ₅ CH ₅
60% HA-Latex	100	100	100	100
n-BA	5	5	5	5
C ₂ Cl ₄	-	5	-	5
CHCl ₃	-	-	5	5

ตารางที่ 3.4 สูตรน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA) ผสมสารเคมี

ส่วนผสม (phr)	สูตร			
	LAPn ₅	LAPn ₅ C ₅	LAPn ₅ CH ₅	LAPn ₅ C ₅ CH ₅
60% LA-Latex	100	100	100	100
n-BA	5	5	5	5
C ₂ Cl ₄	-	5	-	5
CHCl ₃	-	-	5	5

3.3.2 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสี

3.3.2.1 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา นำน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียที่แตกต่างกัน ทั้งชนิดแอมโมเนียสูง (HA) และแอมโมเนียต่ำ (LA) ตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ บรรจุลงในกระปุกพลาสติกขนาดเล็ก ประมาณ 70 กรัม เพื่อให้น้ำยางได้รับปริมาณรังสีอย่างทั่วถึง



รูปที่ 3.2 กระปุกพลาสติกขนาดเล็ก สำหรับใส่น้ำยางเพื่อฉายรังสีแกมมา

หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำยางที่เตรียมได้ไปผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 โดยให้ได้รับโดสรังสีในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ โดยมีอัตราการรับรังสีประมาณ 10 kGy/hr



รูปที่ 3.3 เครื่องฉายรังสีแกมมา รุ่น Gammacell 220 Excel ที่ศูนย์ฉายรังสีแกมมา

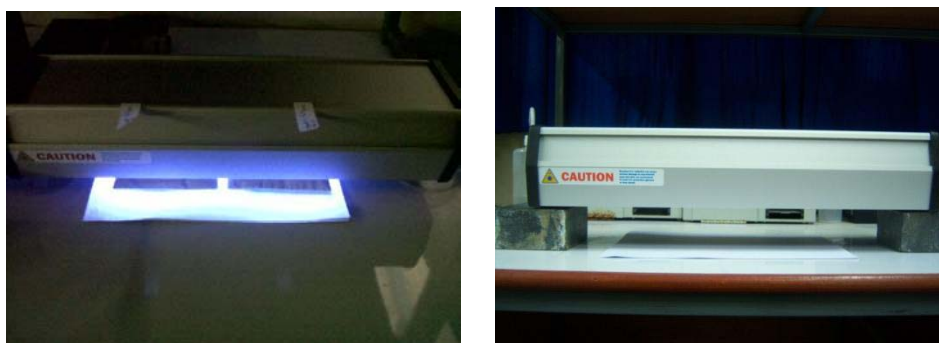
สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.)

3.3.2.2 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือรังสียูวี นำน้ำยางธรรมชาติชนิดที่มีปริมาณแอมโมเนียสูง (HA) ตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ บรรจุลงในถุงพลาสติกปิดผนึกให้มิดชิดโดยให้อากาศภายในถุงน้อยที่สุดและไม่มีฟองอากาศ เพื่อให้น้ำยางได้รับปริมาณรังสีอย่างทั่วถึง



รูปที่ 3.4 ถังพลาสติก สำหรับใส่น้ำยางเพื่อฉายรังสียูวี

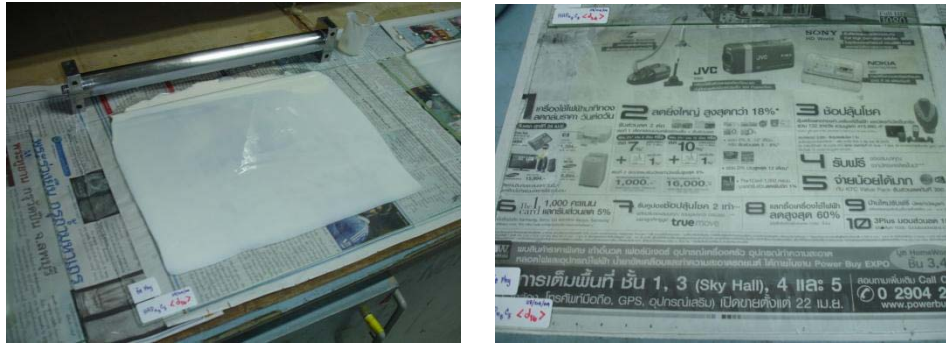
หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำยางที่เตรียมได้ไปผ่านกระบวนการฉายรังสียูวี ที่มีความยาวคลื่น 254 nm ที่ระยะห่างระหว่างตัวอย่างและหลอดยูวี 3 เซนติเมตร โดยให้เวลาในการฉายรังสีที่แตกต่างกันคือ 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยจะมีการกลับตัวอย่าง 1 ครั้งเมื่อเวลาในการฉายรังสีผ่านไปครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งหมด



รูปที่ 3.5 หลอดรังสียูวี รุ่น VL-215.MC 230V 50/60Hz ที่ใช้ในการฉายรังสี

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำยางเป็นแผ่นฟิล์มบาง

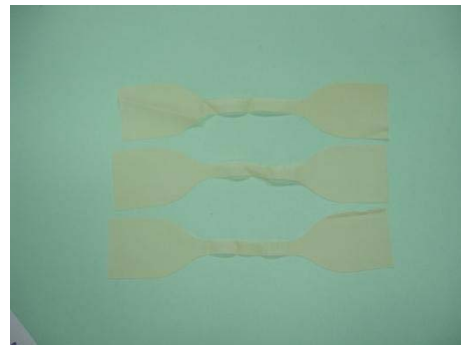
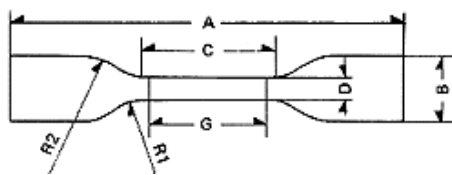
หลังจากนำตัวอย่างน้ำยางที่ได้ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยรังสีแล้ว นำน้ำยางที่ได้ประมาณ 30 ml มาทำเป็นแผ่นฟิล์มบางในลักษณะฟิล์มบาง โดยเทลงบนแผ่นกระจกใส แล้วปาดด้วยมีดปาดฟิล์ม ทิ้งไว้ให้แห้งจนใสที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 20-25°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C สำหรับตัวอย่างน้ำยางชนิดแอมโมเนียสูง และอบที่อุณหภูมิ 80°C สำหรับตัวอย่างน้ำยางชนิดแอมโมเนียต่ำ ตามลำดับ (คมกฤษ ฤทธิรงค์ 2552) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางในลักษณะแผ่นฟิล์มบาง (ซ้าย)
และแผ่นฟิล์มที่ผ่านการอบ (ขวา)

3.3.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มยางในลักษณะฟิล์มบาง

3.3.4.1 การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด หลังจากผ่านการอบ ลอกแผ่นตัวอย่างออกจากกระจกและตัดตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 ด้วยเครื่องตัดตัวอย่าง die C ดังแสดงในรูป 3.7 วัดความหนา 3 แห่ง ในช่วง G เพื่อบันทึกหาค่าเฉลี่ยด้วยเครื่องวัดความหนา (thickness meter) ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.7 ชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลล์ (die C) สำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง

นำตัวอย่างรูปดัมเบลล์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (universal testing machine) ยี่ห้อ LLOYD instrument รุ่น LR10K โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ Load cell 100 N บันทึกค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break) หรือค่าความต้านทานแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation at break)



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดึง (universal testing machine) ยี่ห้อ LLOYD instrument รุ่น LR10K ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง

3.3.4.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) โดยตัดตัวอย่างแผ่นฟิล์มยางที่ต้องการทดสอบแช่ในไนโตรเจนเหลว จากนั้นหักให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วติดบนแท่งทองเหลือง ฉาบด้วยไอทองคำ แล้วถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น Quanta400 (เฉพาะตัวอย่างที่ให้ผลค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีที่สุด)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสี

4.1.1 การวัลคาไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา

เพื่อศึกษาถึงผลของการฉายรังสีแกมมาต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะแผ่นฟิล์มบาง

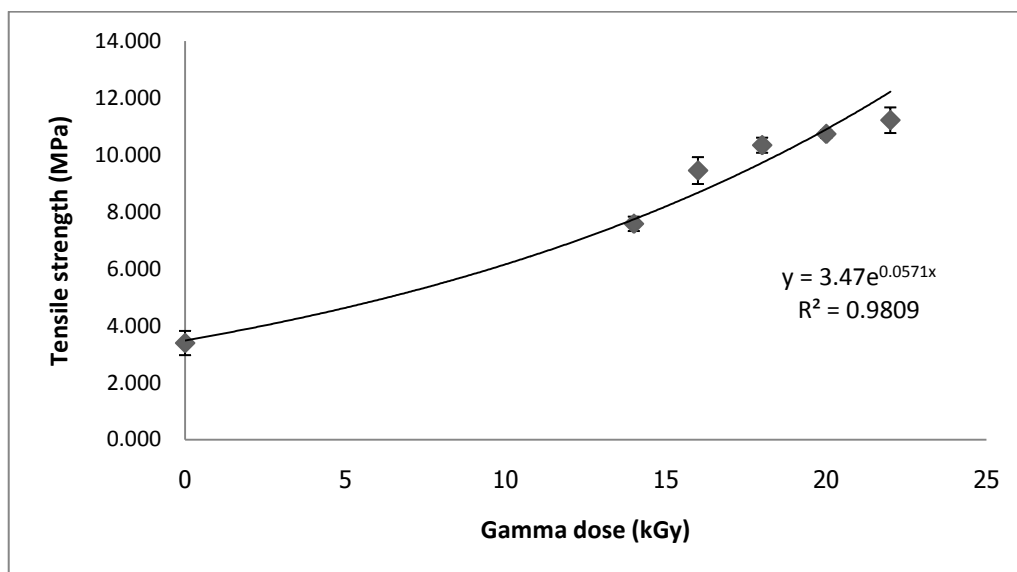
4.1.1.1 การฉายรังสีแกมมาบนน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร HAPn₅

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

Gamma dose (kGy)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	3.392	0.425	1261.7	38.8
14	7.578	0.253	1222.7	50.2
16	9.449	0.472	1217.0	41.3
18	10.338	0.265	1185.3	40.8
20	10.732	0.141	1156.3	18.5
22	11.217	0.450	1094.3	44.2

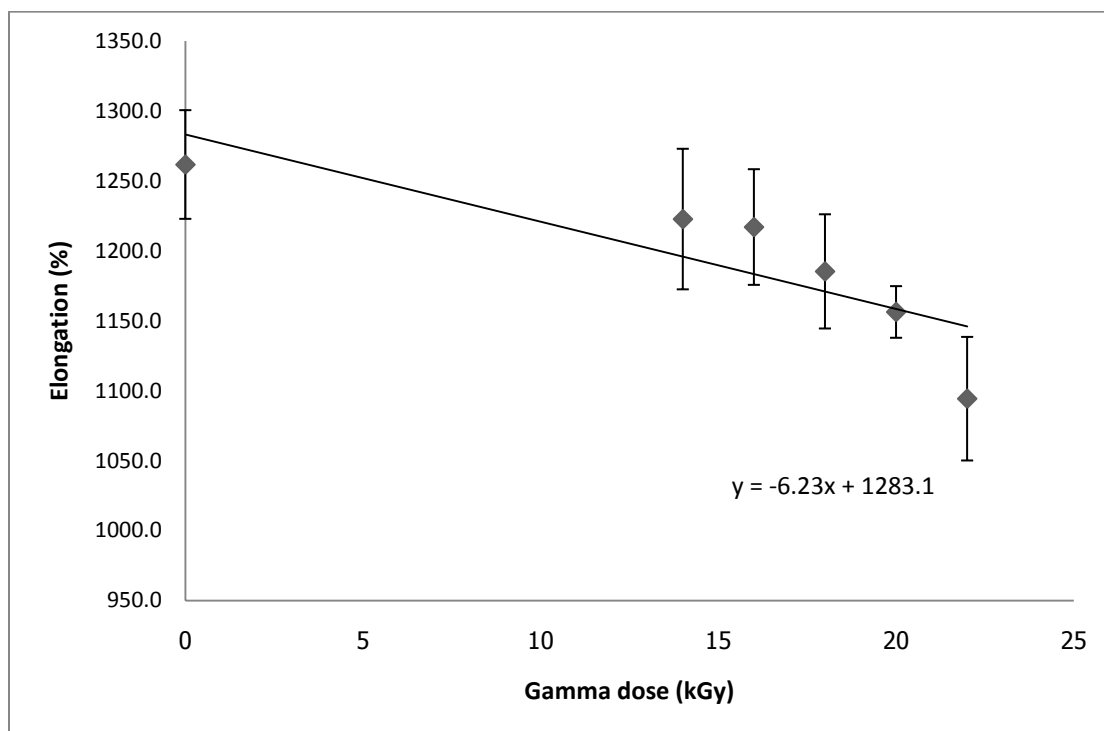
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.1 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าความต้านทานแรงดึงของ น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.1 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อ ตัวอย่างน้ำยางได้รับปริมาณโดสรังสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 11.217 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 kGy) ที่ให้ค่าเท่ากับ 3.392 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ถึง 230.69%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนกราฟให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 3.47e^{0.0571x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9809$



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร HAPn₅ ตามแสดงในรูปที่ 4.2 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของโดสรังสีแกมมาให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุดคือมีค่าเท่ากับ 1094.3%

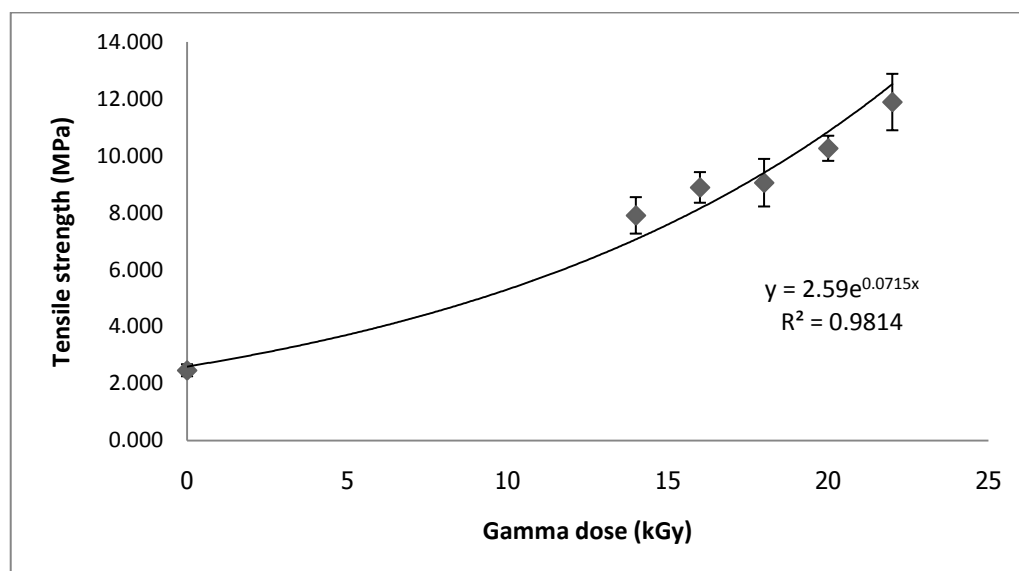
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ได้เป็น $y = -6.23x + 1283.1$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร HAPn₅C₅

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn₅C₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

Gamma dose (kGy)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	2.464	0.211	1204.3	27.2
14	7.903	0.640	1255.0	69.0
16	8.885	0.538	1232.3	36.2
18	9.051	0.835	1205.7	59.5
20	10.259	0.441	1164.7	111.5
22	11.883	0.991	1138.3	66.5

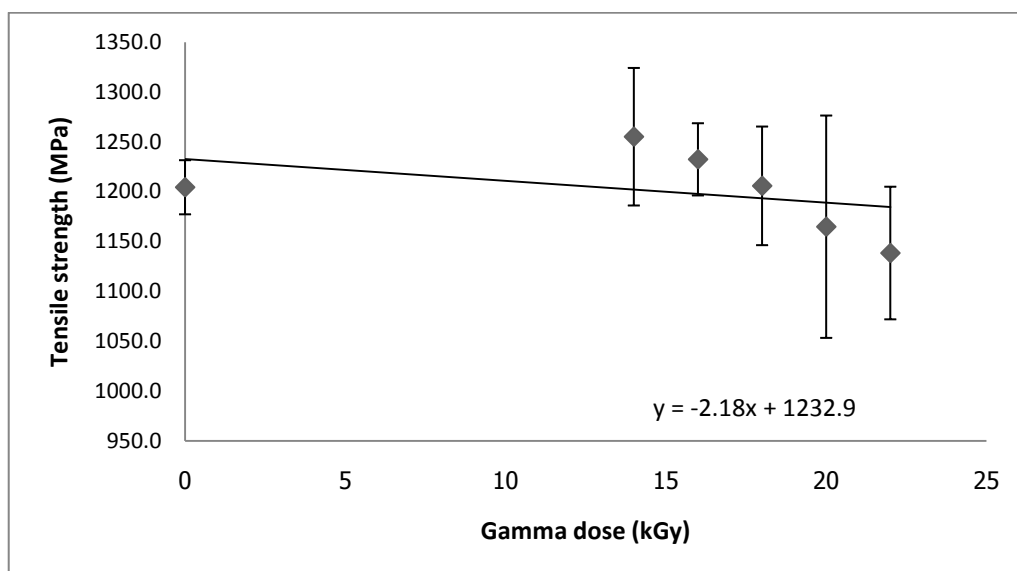
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅C₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅C₅

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.3 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาไปแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น เมื่อตัวอย่างน้ำยางได้รับปริมาณโดสรังสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 11.883 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 kGy) ที่ให้ค่าเท่ากับ 2.464 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ถึง 382.26%

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 2.59e^{0.0715x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9814$



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร HAPn_5C_5 ตามรูปที่ 4.4 นั้น พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดสรังสีแกมมาให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือ ที่ความแรงของโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1138.3%

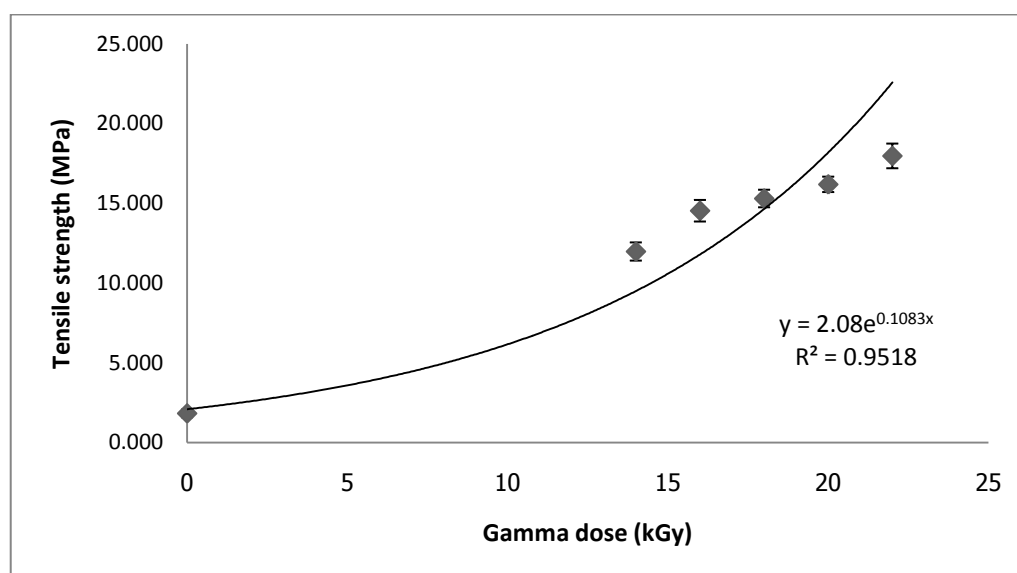
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ได้เป็น $y = -2.18x + 1232.9$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร HAPn_5CH_5

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn_5CH_5 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

Gamma dose (kGy)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.817	0.243	1339.3	43.5
14	11.973	0.570	1357.1	118.2
16	14.530	0.676	1159.7	49.2
18	15.295	0.551	1153.3	58.0
20	16.183	0.482	1118.7	37.0
22	17.967	0.774	1097.7	51.8

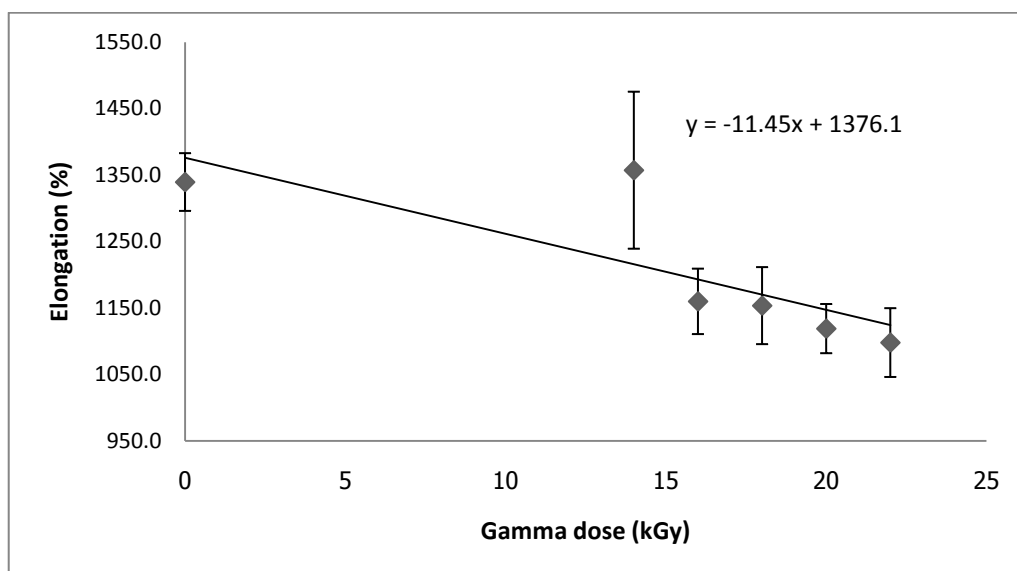
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.3 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5 ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.5 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อตัวอย่างน้ำยางได้รับปริมาณโดสรังสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 17.967 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 kGy) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.817 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้มากถึง 888.82%

จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 2.08e^{0.1083x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.9518$



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร HAPn_5CH_5 ตามรูปที่ 4.6 นั้น พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดสรังสีแกมมาให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมี ค่าเท่ากับ 1097.7%

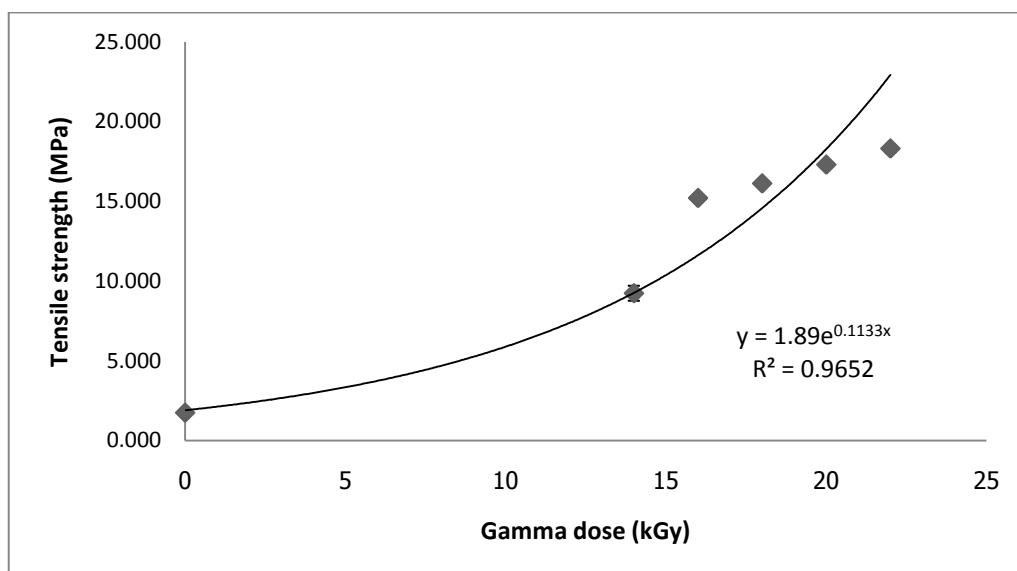
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ได้เป็น $y = -11.45x + 1376.1$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

Gamma dose (kGy)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.740	0.068	1218.7	62.7
14	9.228	0.471	1240.7	21.1
16	15.200	0.079	1234.7	50.8
18	16.114	0.078	1206.7	101.7
20	17.293	0.145	1183.7	70.9
22	18.303	0.224	1098.3	47.3

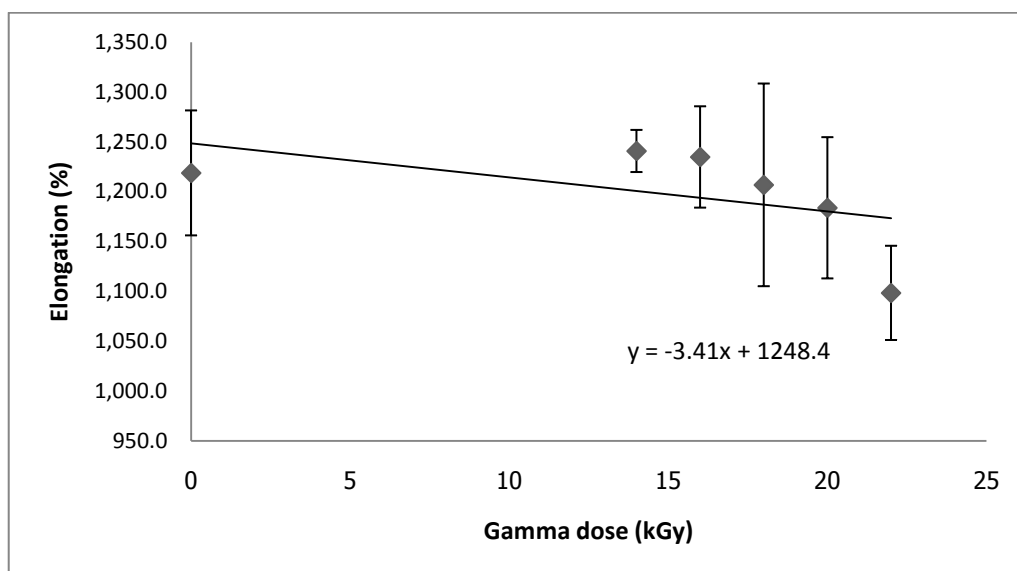
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.4 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.7 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อตัวอย่างน้ำยางได้รับปริมาณโดสรังสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 18.303 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 kGy) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.740 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้มากถึง 951.89%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 1.89e^{0.1133x}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.9652$

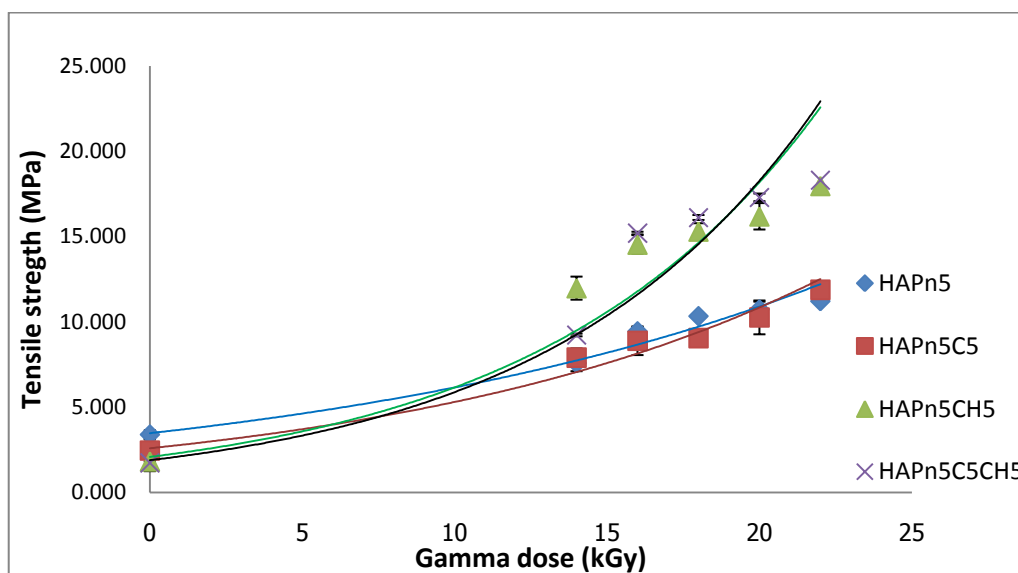


รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ตามรูปที่ 4.8 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดสรังสีแกมมาให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 1098.3%

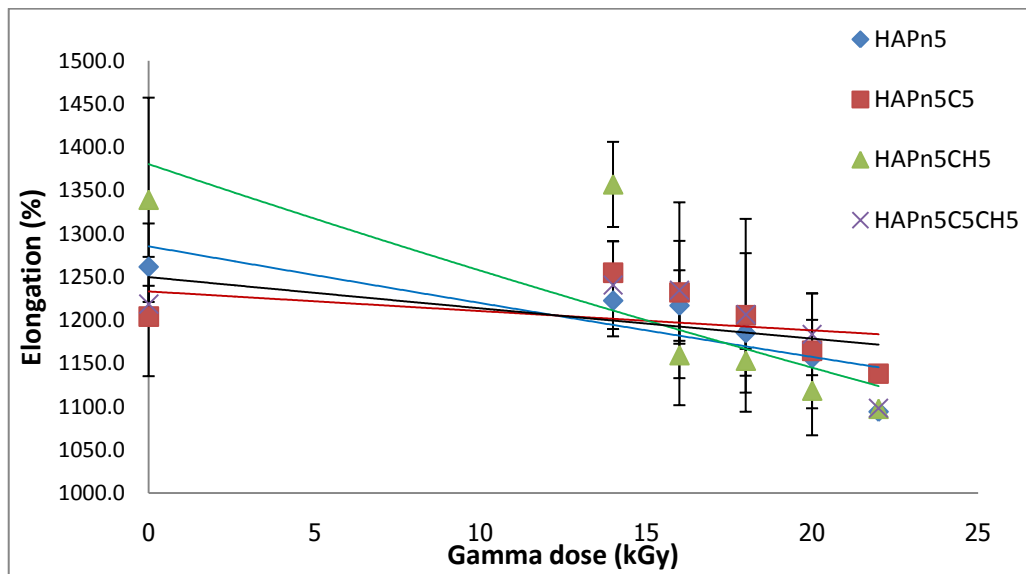
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ได้เป็น $y = -3.41x + 1248.4$

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.1-4.4 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตรที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณโดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับ ในรูปที่ 4.9 เปรียบเทียบกัน พบว่าตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติทั้ง 4 สูตรให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อปริมาณโดสรังสีมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย โดยปริมาณโดสรังสีที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดคือ 22 kGy ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ฉายรังสี (0 kGy) พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้มากกว่า 200%



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

ในทำนองเดียวกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตรที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณโดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับในรูปที่ 4.10 พบว่า ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติทั้ง 4 สูตรให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อปริมาณโดสรังสีมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง โดยปริมาณโดสรังสีที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุดคือ 22 kGy

นอกจากปริมาณโดสรังสีแกมมาที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตรแล้ว ผลของชนิดและจำนวนของสารเซนซิไทเซอร์ที่ผสมลงในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงก็ส่งผลต่อค่าผลการทดลองเช่นกัน นั่นคือ เมื่อพิจารณาชนิดของสารเซนซิไทเซอร์ทั้ง 3 ชนิด คือ เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane, $CHCl_3$) พบว่า ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่มีการผสมไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) เป็นสารเซนซิไทเซอร์ จะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโดสรังสีได้ดีที่สุด กล่าวคือ เมื่อปริมาณโดสรังสีเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าผลการทดลองทั้งค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่มีไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) ในส่วนผสมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและชัดเจน สำหรับจำนวนของสารเซนซิไทเซอร์ที่ผสมลงในตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่ผสมสารเคมีตามสูตร

โดยมีจำนวนของสารเซนซีไทเซอ์ที่ผสมต่างกัน พบว่า น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่ผสมสารเซนซีไทเซอ์มากกว่า 1 ชนิดจะส่งผลให้ค่าผลการทดลองที่ได้มีค่าสูงกว่าการผสมสารเซนซีไทเซอ์ชนิดเดียว กล่าวคือ จากตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงทั้ง 4 สูตร น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $HAPn_5C_5$ และ $HAPnCH_5$ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) กับเตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) และเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) กับไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) หรือคลอโรฟอร์มเป็นสารเซนซีไทเซอ์ 2 ชนิด ตามลำดับ จะให้ผลการทดลองที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ $HAPn_5$ ซึ่งเป็นน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่ผสมสารเซนซีไทเซอ์เพียงชนิดเดียว และพบว่า $HAPn_5C_5CH_5$ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) หรือคลอโรฟอร์ม เป็นสารเซนซีไทเซอ์ 3 ชนิดจะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตรอื่น

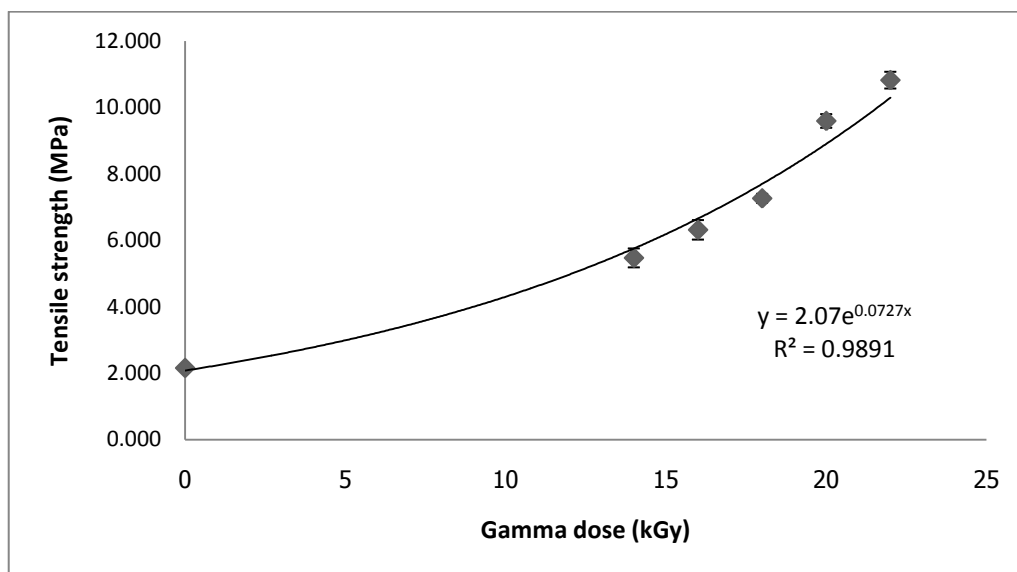
4.1.1.2 การฉายรังสีแกมมาบนน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA)

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร $LAPn_5$

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร $LAPn_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

Gamma dose (kGy)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	2.156	0.073	1406.7	7.0
14	5.470	0.285	1358.0	87.7
16	6.315	0.294	1339.9	155.5
18	7.262	0.136	1311.5	152.0
20	9.592	0.206	1071.9	177.2
22	10.820	0.252	1027.7	82.1

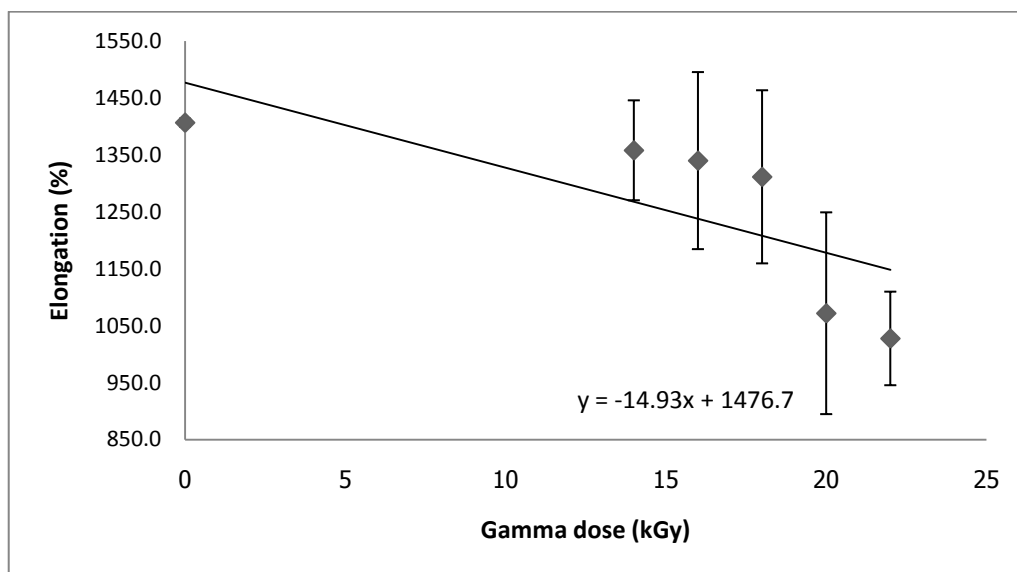
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.5 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสิ่ง 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.11 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น เมื่อตัวอย่างน้ำยางได้รับปริมาณโดสรังสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 10.820 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 kGy) ที่ให้ค่าเท่ากับ 2.156 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ถึง 401.86%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 2.07e^{0.0727x}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.9891$



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅

ในขณะที่เดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร LAPn₅ ตามรูปที่ 4.12 นั้น พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดสรังสีแกมมาให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 1027.7%

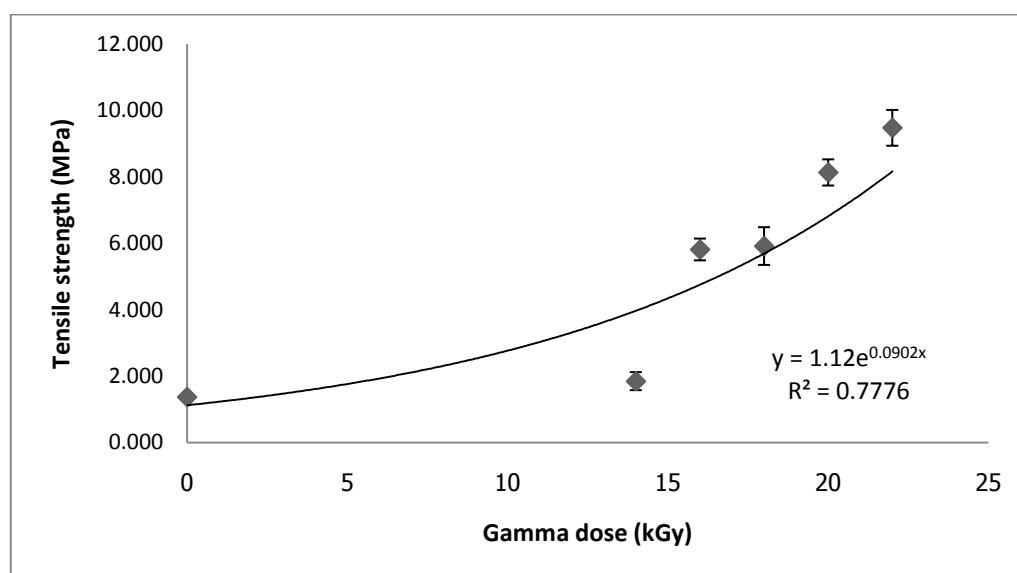
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ได้เป็น $y = -14.93x + 1476.7$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร LAPn₅C₅

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร LAPn₅C₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

Gamma dose (kGy)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.371	0.098	1499.3	14.5
14	1.845	0.271	1435.7	24.4
16	5.808	0.328	1426.0	38.0
18	5.911	0.568	1410.0	33.1
20	8.127	0.394	1288.0	110.8
22	9.469	0.539	1276.7	80.8

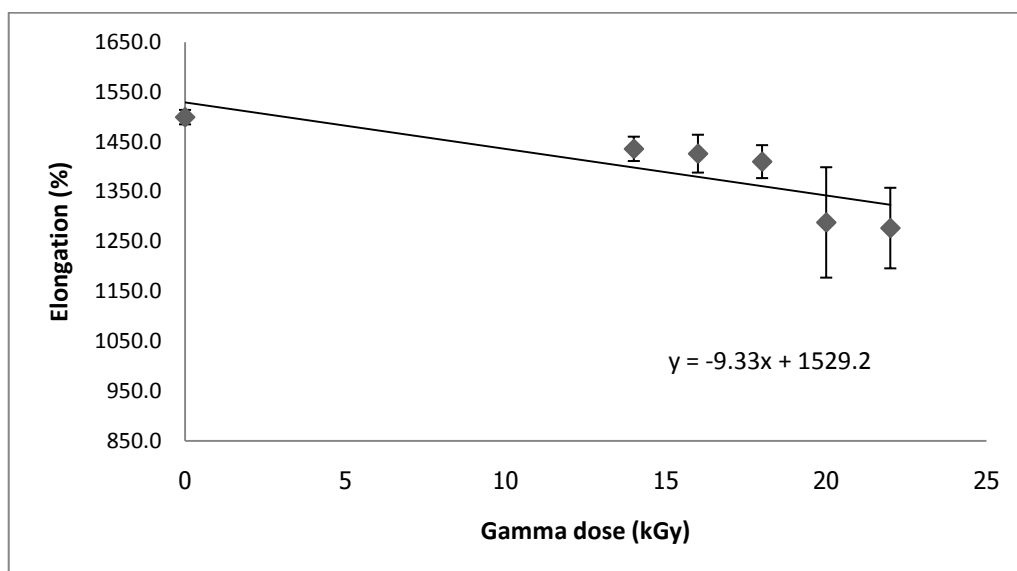
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.6 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.13 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาไปแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อตัวอย่างน้ำยางได้รับปริมาณโดสรังสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 9.469 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 kGy) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.371 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ถึง 590.66%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 1.12e^{0.0902x}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.7776$



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅C₅

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร LAPn₅C₅ ตามรูปที่ 4.14 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดสรังสีแกมมาให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมี ค่าเท่ากับ 1276.7%

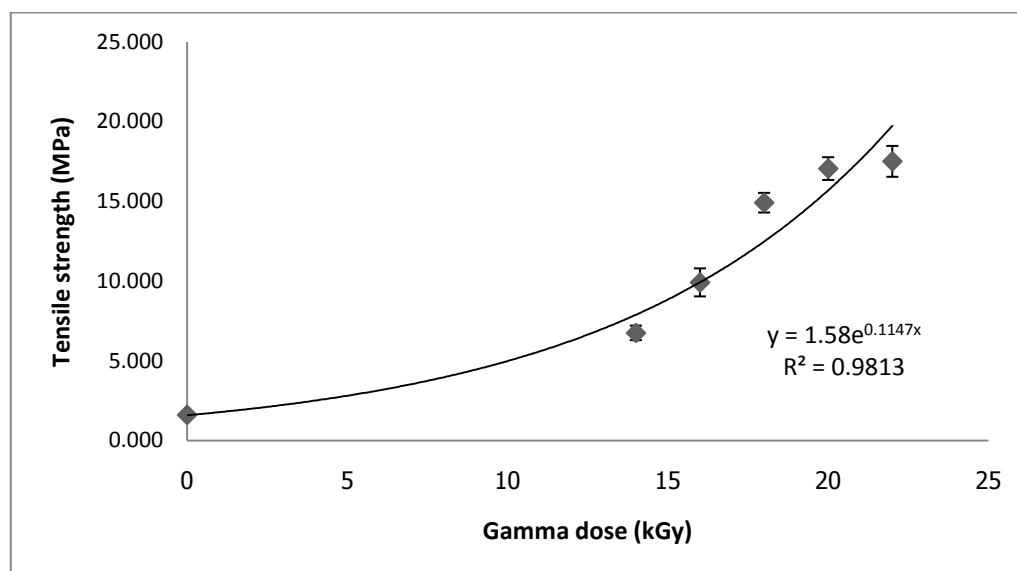
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ได้เป็น $y = -9.33x + 1529.2$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร LAPn₅CH₅

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร LAPn₅CH₅ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

Gamma dose (kGy)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.611	0.084	1384.7	51.3
14	6.743	0.456	1465.0	48.0
16	9.910	0.878	1366.7	38.6
18	14.907	0.616	1264.7	18.8
20	17.047	0.713	1220.3	64.6
22	17.500	0.968	1184.0	31.5

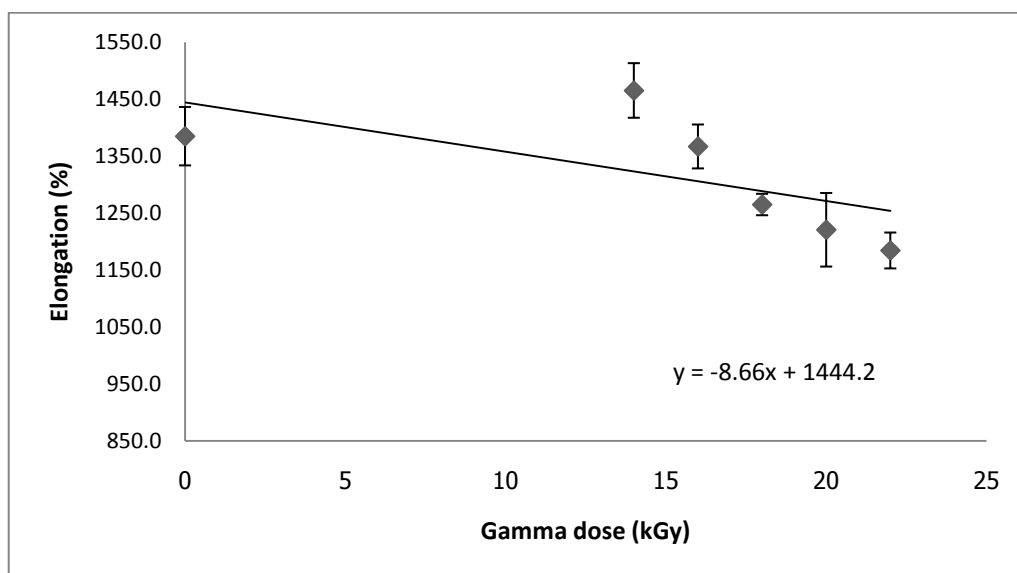
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.7 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅CH₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร LAPn₅CH₅

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.15 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อตัวอย่างน้ำยางได้รับปริมาณโดสรังสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือมีค่าเท่ากับ 17.500 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 kGy) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.611 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ถึง 968.28%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 1.58e^{0.1147x}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.9813$



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5CH_5$

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร $LAPn_5CH_5$ ตามรูปที่ 4.16 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดสของรังสีแกมมาให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือที่ความแรงของโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 1184.0%

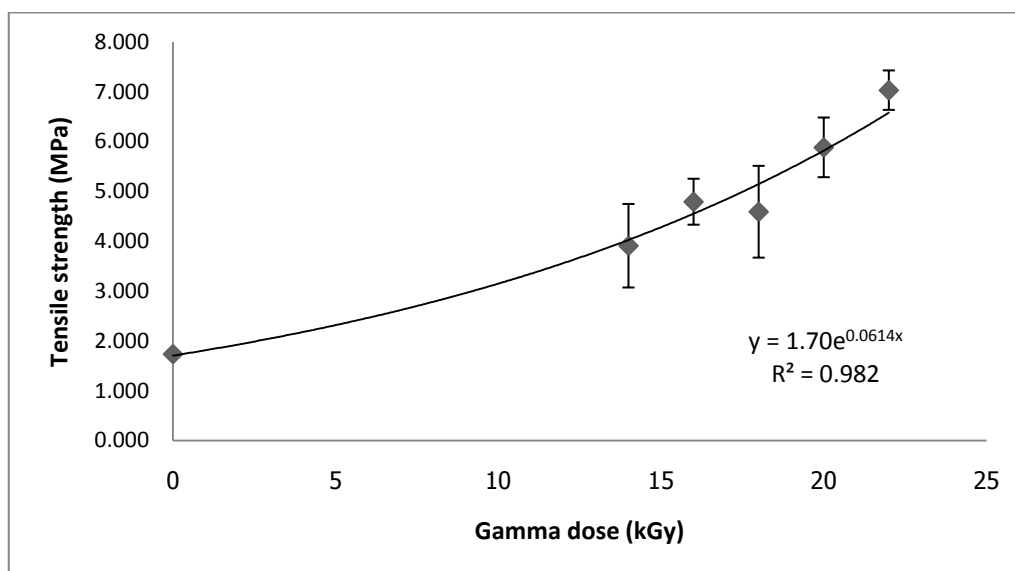
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ได้เป็น $y = -8.66x + 1444.2$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

Gamma dose (kGy)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.732	0.048	1383.0	37.0
14	3.907	0.838	1357.3	113.5
16	4.790	0.461	1332.3	94.9
18	4.589	0.921	1297.0	39.0
20	5.881	0.599	1238.0	138.2
22	7.029	0.396	1173.0	91.3

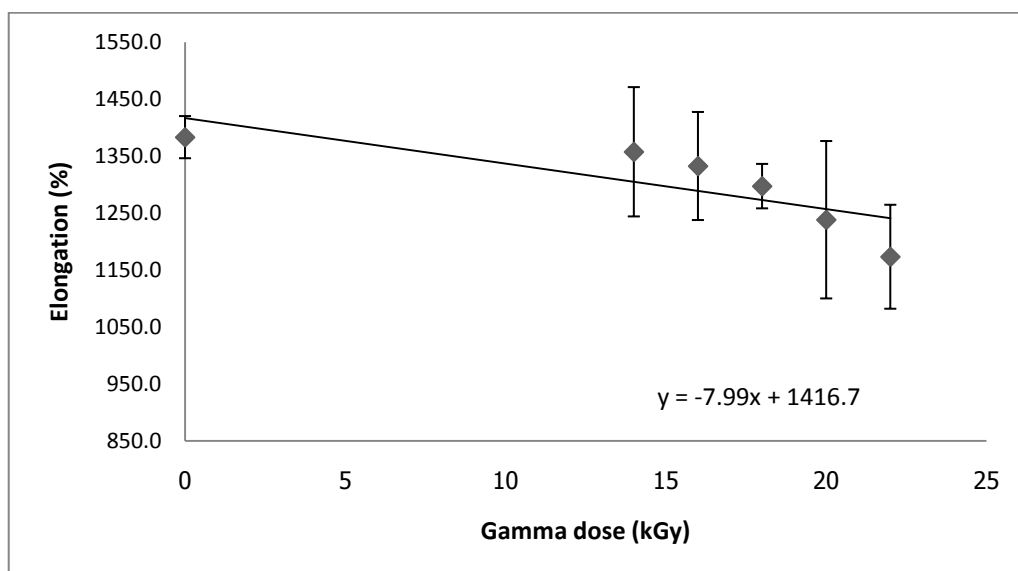
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.8 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร $\text{LAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.17 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาไปแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อตัวอย่างน้ำยางได้รับปริมาณโดสรังสีที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 7.029 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 kGy) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.732 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ถึง 305.83%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 1.70e^{0.0614x}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.9820$

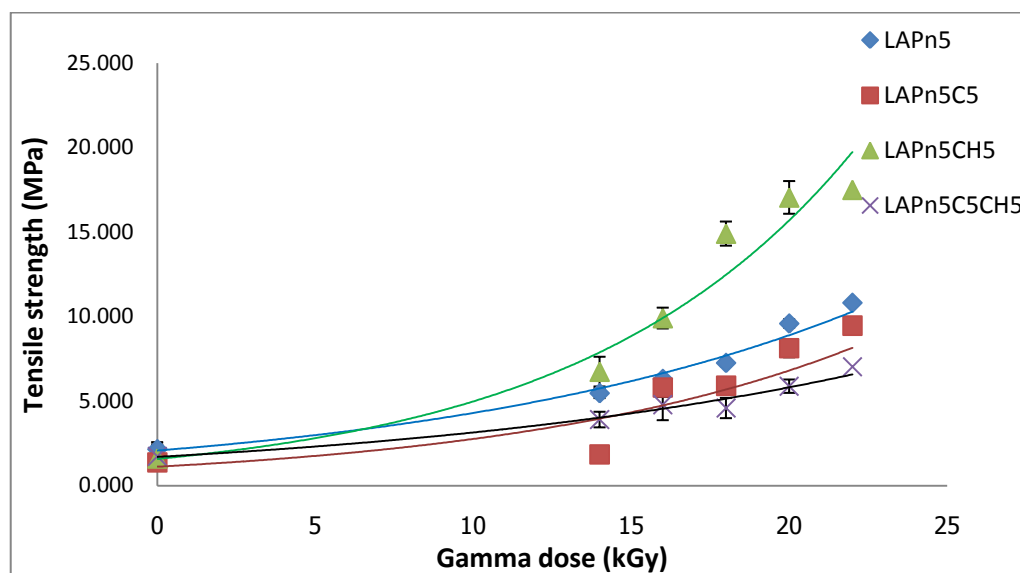


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร $LAPn_5C_5CH_5$ ตามรูปที่ 4.18 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโดสรังสีแกมมาให้สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือที่ปริมาณโดสรังสี 22 kGy จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 1173.0%

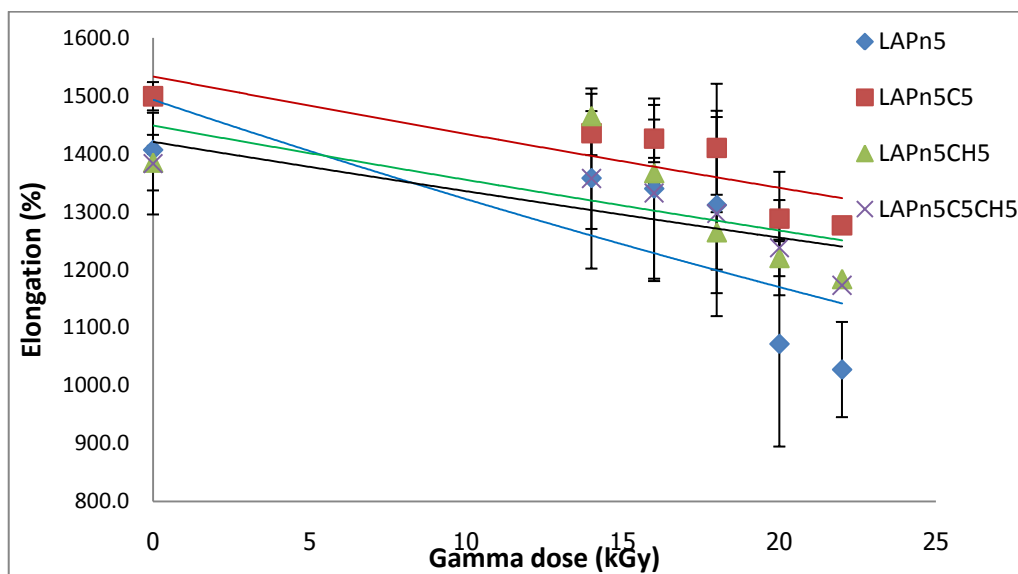
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ได้เป็น $y = -7.99x + 1416.7$

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.5-4.8 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาที่โดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมากับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตรที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณโดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับในรูปที่ 4.19 เปรียบเทียบกัน พบว่าตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติทั้ง 4 สูตรให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อปริมาณโดสรังสีมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย โดยปริมาณรังสีที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดคือ 22 kGy ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ฉายรังสี (0 kGy) พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้มากกว่า 300%



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

ในทำนองเดียวกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโดสรังสีแกมมา กับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตรที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณโดสรังสี 0, 14, 16, 18, 20 และ 22 kGy ตามลำดับในรูปที่ 4.20 พบว่า ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติทั้ง 4 สูตรให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อปริมาณโดสรังสีมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดต่ำลง โดยปริมาณรังสีที่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุดคือ 22 kGy

เช่นเดียวกับกับน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง นอกจากปริมาณโดสรังสีแกมมาที่ฉายลงบนตัวอย่างน้ำยางที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดแล้ว สารเซนซีไทเซอร์ที่ใช้ผสมลงในตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำส่งผลต่อค่าผลการทดลองที่ได้ แต่แตกต่างจากในกรณีของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงตรงที่ในกรณีของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ การใช้สารเซนซีไทเซอร์ชนิดเตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) เป็นตัวผสมในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำจะส่งผลทำให้ค่าผลการทดลองที่ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารเซนซีไทเซอร์ชนิดอื่น นั่นคือ น้ำยางธรรมชาติแอมโมเนียต่ำสูตร LAPn₅C₅ และ LAPn₅C₅CH₅ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) กับ เตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) และ เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA), เตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) กับ ไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) เป็นสารเซนซีไทเซอร์ ตามลำดับ ให้ค่าผลการทดลองที่ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตรอื่นๆ ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างเตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) ที่ใช้เป็นสารเซนซีไทเซอร์ในตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติ

ชนิดแอมโมเนียต่ำกับทีเอ็มทีดี 0.013% และซิงค์ออกไซด์ 0.013% ซึ่งเป็นสารที่ใช้รักษาสภาพในน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำร่วมกับแอมโมเนีย 0.2% โดยศัพท์ทางวิชาการยางพาราใช้กันว่า LA-TZ ซึ่งย่อมาจาก Low Ammonia-Tetramethyl-thiuram disulphide/Zinc oxid สำหรับน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร LAPn₅CH₅ ที่ผสมเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) และ ไตรคลอโรมีเทน (CHCl₃) เป็นสารเซนซิไทเซอร์ 2 ชนิดจะให้ค่าผลการทดลองที่ได้ทั้งค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดดีกว่า น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร LAPn₅ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) เป็นสารเซนซิไทเซอร์ชนิดเดียว และนอกจากนี้ยังพบว่า เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) และ ไตรคลอโรมีเทน (CHCl₃) ที่ใช้เป็นสารเซนซิไทเซอร์ที่ผสมลงในตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโครงสร้างอย่างเด่นชัด นั่นคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโครงสร้างที่ฉายลงบนตัวอย่างน้ำยางให้เพิ่มขึ้น ค่าผลการทดลองที่ได้จากตัวอย่างน้ำยางที่ใช้เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) และ ไตรคลอโรมีเทน (CHCl₃) เป็นส่วนผสมจะให้ค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและชัดเจน

4.1.2 การวัดค่าไนซ์ด้วยการฉายรังสียูวี

เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้และผลของการฉายรังสียูวีต่อสมบัติความต้านทานแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มยางในลักษณะแผ่นฟิล์มบาง

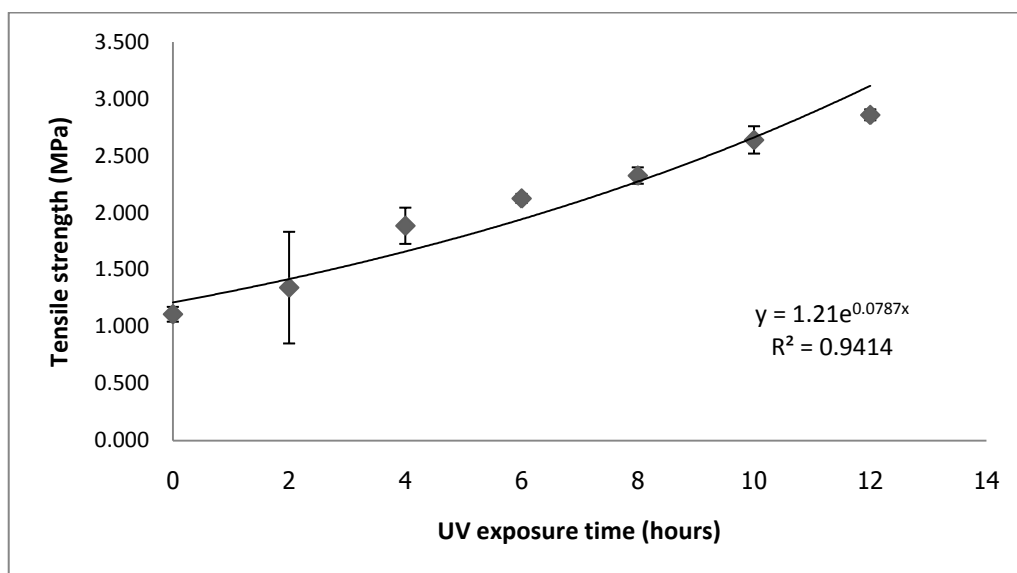
4.1.2.1 การฉายรังสียูวีบนน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร HAPn₅

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn₅ ที่ผ่านการฉายรังสียูวี

UV exposure time (hours)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.108	0.065	1178.7	57.7
2	1.342	0.490	1116.0	105.2
4	1.885	0.159	1118.0	85.9
6	2.125	0.040	1108.7	100.3
8	2.326	0.072	993.4	79.8
10	2.639	0.120	901.9	67.7
12	2.859	0.048	894.7	35.4

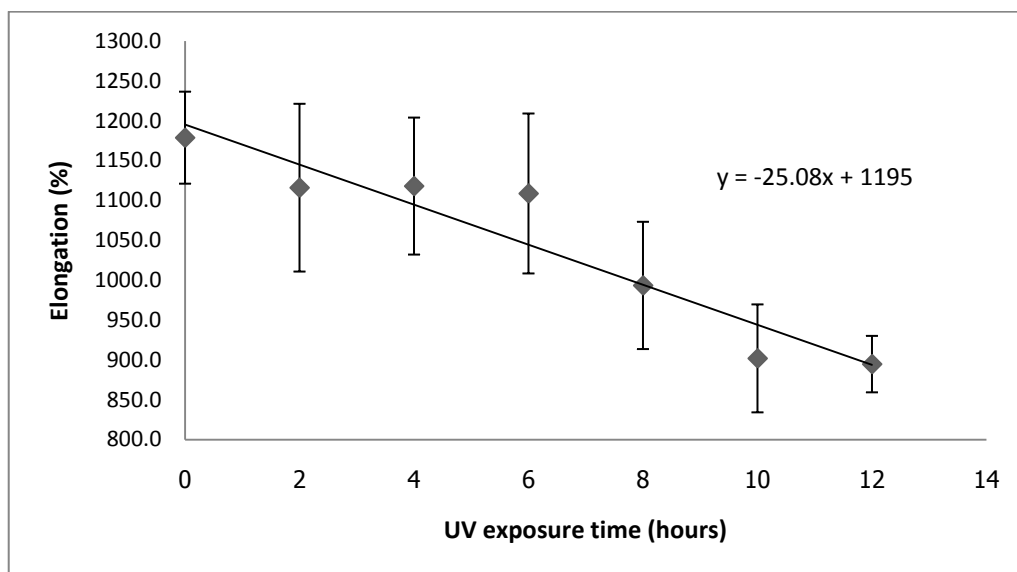
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.9 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสียูวีโดยใช้เวลาในการฉายรังสีนาน 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ตามแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.21 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅ ที่ผ่านการฉายรังสียูวีมาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการฉายรังสียูวีบนตัวอย่างน้ำยางเพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่เวลาในการฉายรังสีนาน 12 ชั่วโมง จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 2.859 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 ชั่วโมง) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.108 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ 158.03%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 1.21e^{0.0787x}$ โดยที่มีค่า $R^2 = 0.9414$



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅

ในขณะที่เดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร HAPn₅ ตามรูปที่ 4.22 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาในการฉายรังสีให้นานขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือที่เวลาในการฉายรังสีนาน 12 ชั่วโมง จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 894.7%

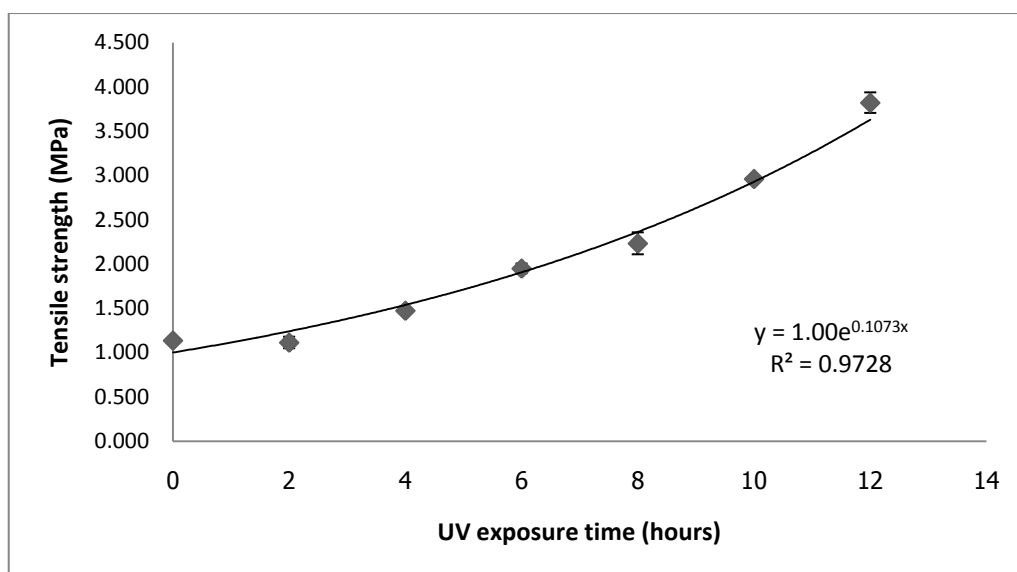
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการฉายรังสียูวีกับเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดได้เป็น $y = -25.08x + 1195$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร HAPn₅C₅

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn₅C₅ ที่ผ่านการฉายรังสียูวี

UV exposure time (hours)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.136	0.019	1067.7	56.9
2	1.113	0.065	1224.0	115.3
4	1.473	0.023	1148.7	89.5
6	1.949	0.055	1114.3	48.9
8	2.232	0.124	1027.1	130.8
10	2.960	0.014	1001.3	13.8
12	3.820	0.116	906.3	31.2

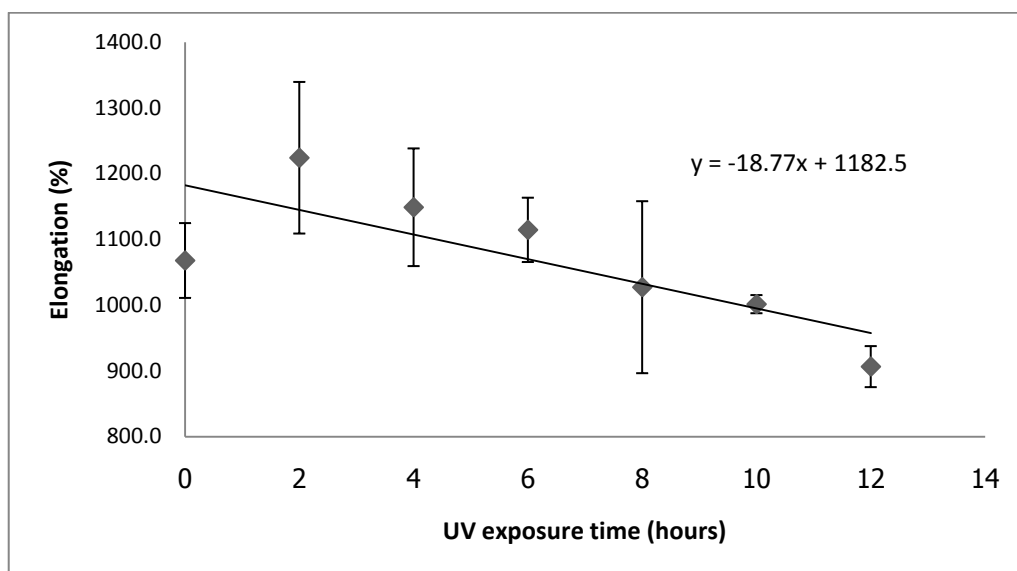
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.10 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅C₅ ซึ่งผ่านการฉายรังสียูวีโดยใช้เวลาในการฉายรังสีนาน 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ตามแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn₅C₅

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.23 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5 ที่ผ่านการฉายรังสียูวีมาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการฉายรังสียูวีบนตัวอย่างน้ำยางเพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่เวลาในการฉายรังสีนาน 12 ชั่วโมง จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 3.820 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 ชั่วโมง) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.136 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ 236.27%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 1.00e^{0.1073x}$ โดยที่มีค่า $R^2 = 0.9728$



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5C_5

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร HAPn_5C_5 ตามรูปที่ 4.24 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาในการฉายรังสีให้นานขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือ ที่เวลาในการฉายรังสีนาน 12 ชั่วโมง จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 906.3%

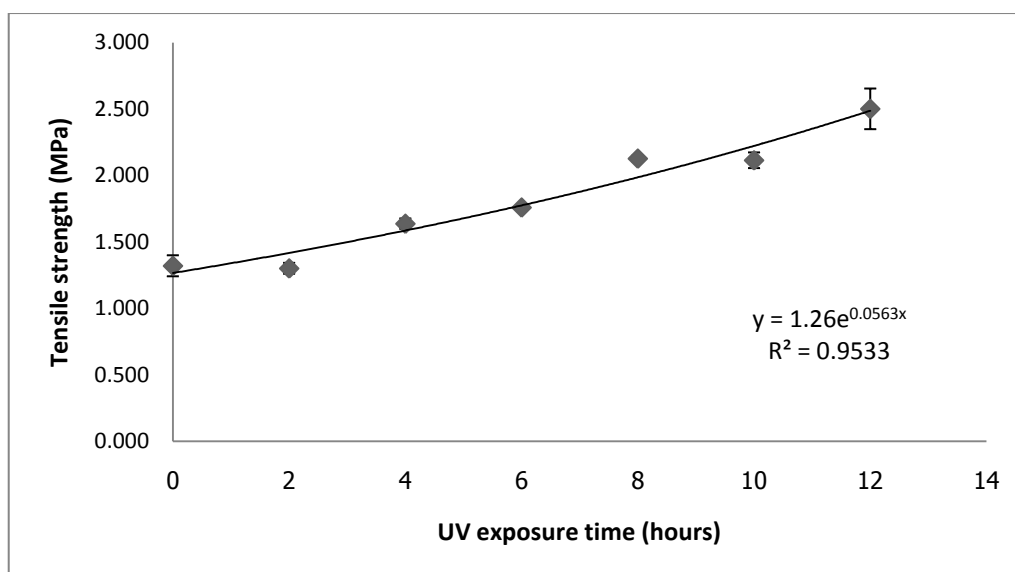
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการฉายรังสียูวีกับเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดได้เป็น $y = -18.77x + 1182.5$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร HAPn_5CH_5

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร HAPn_5CH_5 ที่ผ่านการฉายรังสียูวี

UV exposure time (hours)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.319	0.079	1094.0	81.1
2	1.300	0.041	1022.3	2.5
4	1.636	0.039	950.2	10.9
6	1.758	0.012	945.7	6.4
8	2.126	0.025	926.7	33.8
10	2.113	0.059	922.9	17.8
12	2.500	0.153	923.5	45.6

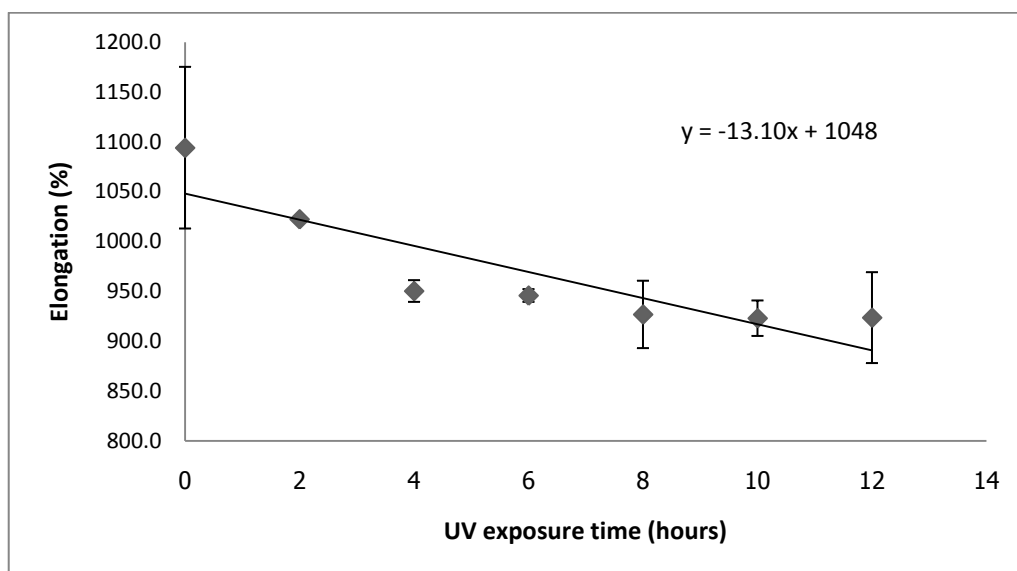
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.11 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5 ซึ่งผ่านการฉายรังสียูวีโดยใช้เวลาในการฉายรังสีนาน 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ตามแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.25 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5 ที่ผ่านการฉายรังสียูวีมาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการฉายรังสียูวีบนตัวอย่างน้ำยางเพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่เวลาในการฉายรังสีนาน 12 ชั่วโมง จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือมีค่าเท่ากับ 2.500 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 ชั่วโมง) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.319 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ 89.54%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 1.26e^{0.0563x}$ โดยที่มีค่า $R^2 = 0.9533$



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร HAPn_5CH_5

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร HAPn_5CH_5 ตามรูปที่ 4.26 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาในการฉายรังสีให้นานขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือ ที่เวลาในการฉายรังสีนาน 10 ชั่วโมง จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 922.9%

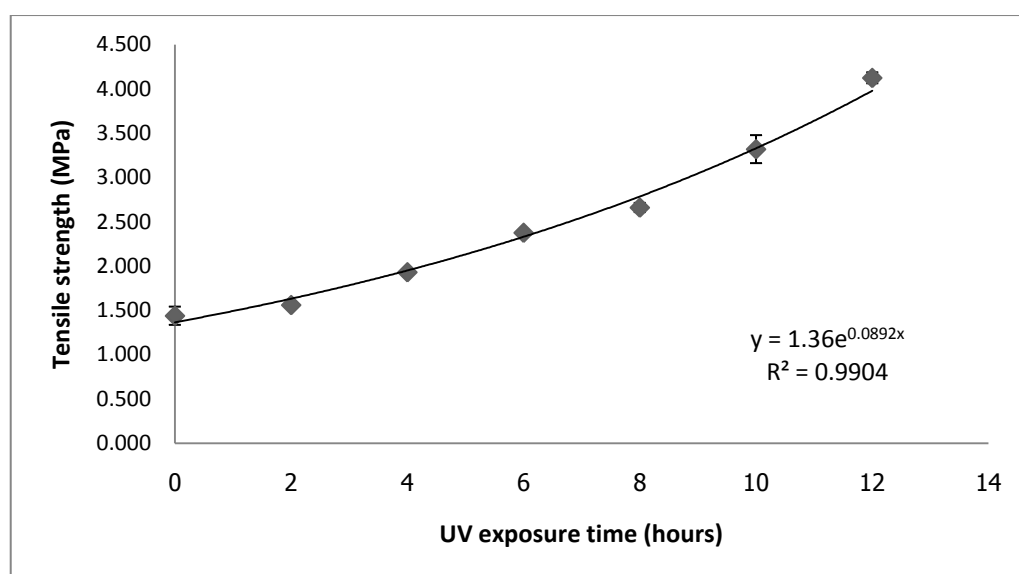
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการฉายรังสียูวีกับเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดได้เป็น $y = -13.10x + 1048$

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation) ของน้ำยางสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสียูวี

UV exposure time (hours)	tensile strength (MPa)		elongation (%)	
	tensile (MPa)	SD	elongation (%)	SD
0	1.437	0.103	1173.9	47.8
2	1.559	0.022	1097.7	84.6
4	1.929	0.016	1068.3	32.7
6	2.375	0.018	1030.7	18.6
8	2.659	0.052	1028.7	23.4
10	3.318	0.158	1006.9	81.5
12	4.123	0.062	937.5	23.9

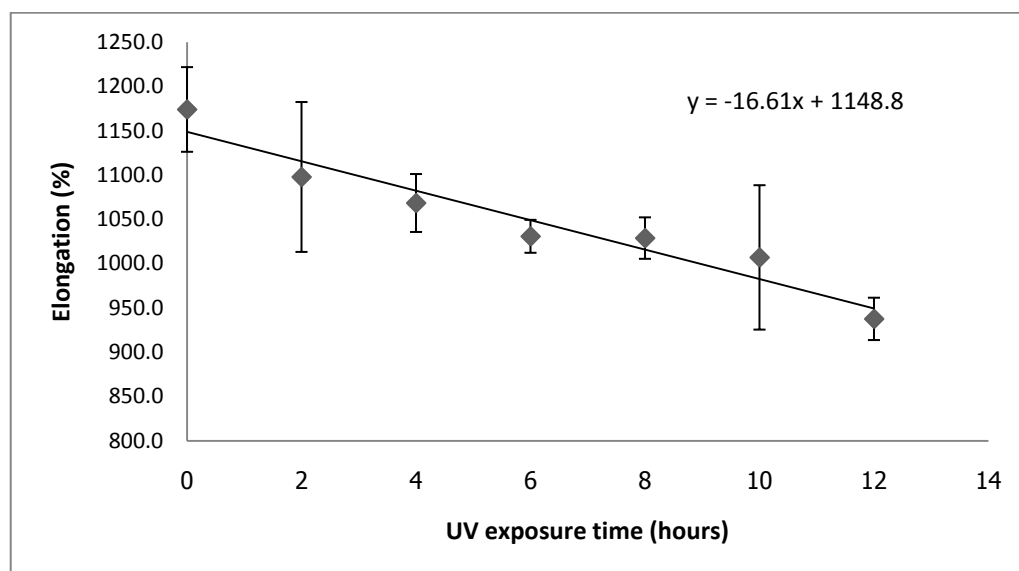
จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.12 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสียูวีโดยใช้เวลาในการฉายรังสีนาน 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ตามแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงในรูปที่ 4.27 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสียูวีมาแล้วนั้น มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการฉายรังสียูวีบนตัวอย่างน้ำยางเพิ่มขึ้น นั่นคือ ที่เวลาในการฉายรังสีนาน 12 ชั่วโมง จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด คือมีค่าเท่ากับ 4.123 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงในกรณีที่ไม่มีการฉายรังสี (0 ชั่วโมง) ที่ให้ค่าเท่ากับ 1.437 MPa พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้ 186.92%

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึง คือ $y = 1.36e^{0.0892x}$ โดยที่มีค่า $R^2 = 0.9904$

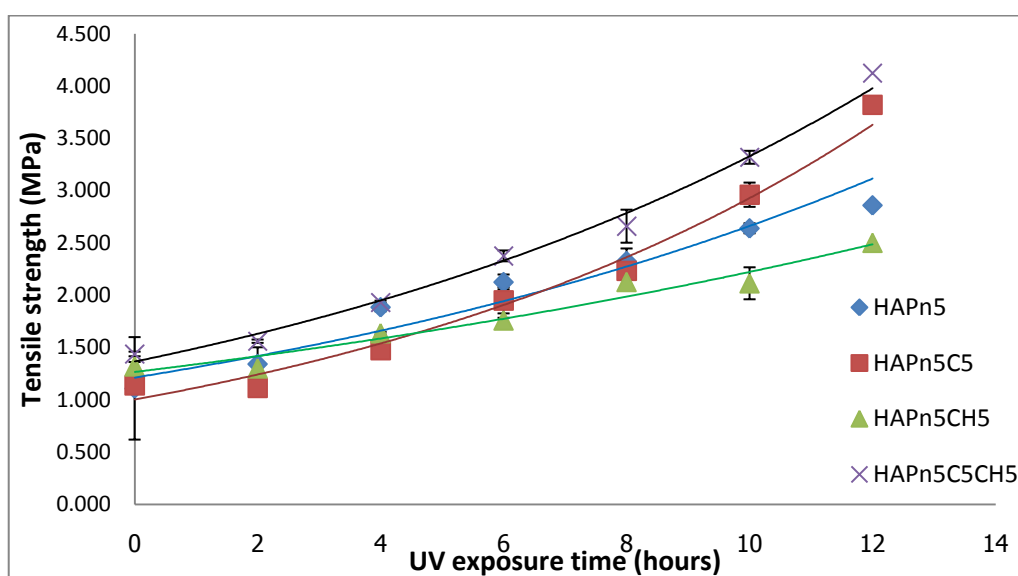


รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$

ในขณะเดียวกันจากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของตัวอย่างน้ำยางตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ตามรูปที่ 4.28 นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มเวลาในการฉายรังสีให้นานขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นั่นคือ ที่เวลาในการฉายรังสีนาน 12 ชั่วโมง จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 937.5%

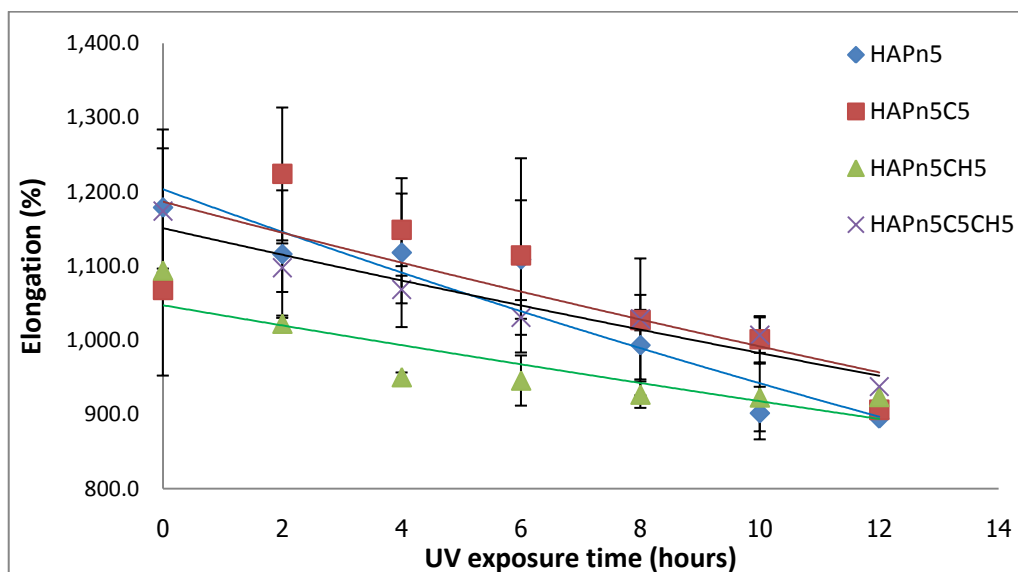
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการฉายรังสียูวีกับเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดได้เป็น $y = -16.61x + 1148.8$

จากตารางที่ 4.9-4.12 สามารถแสดงค่าความต้านทานแรงดึงและแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร ซึ่งผ่านการฉายรังสียูวีโดยให้เวลาในการฉายรังสีนาน 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ตามแสดงในรูปที่ 4.29 และ 4.30 ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าความต้านทานแรงดึงของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตรที่ผ่านการฉายรังสียูวีโดยให้เวลาในการฉายรังสีนาน 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับในรูปที่ 4.29 เปรียบเทียบกันพบว่า ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติทั้ง 4 สูตรให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อระยะเวลาในการฉายรังสียูวีบนตัวอย่างน้ำยางนานขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย โดยระยะเวลาในการฉายรังสียูวีให้ได้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดคือ 12 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ฉายรังสี (0 kGy) พบว่าสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงได้มากกว่า 80%



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร

ในทำนองเดียวกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฉายรังสียูวีกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตรที่ผ่านการฉายรังสียูวีโดยให้เวลาในการฉายรังสีนาน 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับในรูปที่ 4.30 พบว่า ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติทั้ง 4 สูตรให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ ระยะเวลาในการฉายรังสียูวีบนตัวอย่างน้ำยางนานขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดต่ำลง โดยระยะเวลาในการฉายรังสียูวีให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดคือ 12 ชั่วโมง

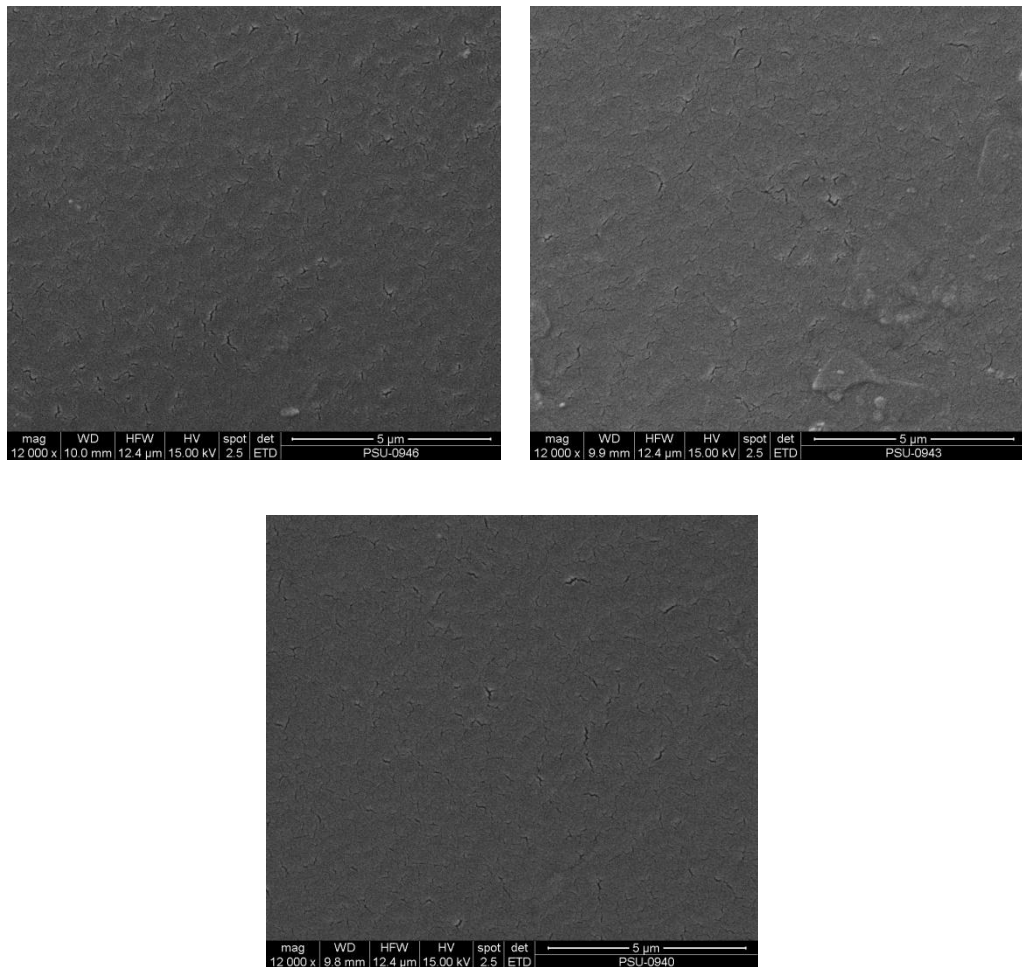
แต่เมื่อนำค่าที่ได้จากการฉายรังสียูวีไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการฉายรังสีแกมมา พบว่าค่าที่ได้จากการนำตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงไปผ่านการฉายรังสีด้วยยูวี จะให้ค่าที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากการนำตัวอย่างไปฉายด้วยรังสีแกมมา ซึ่งสันนิษฐานว่า เป็นผลมาจากค่าพลังงานของรังสียูวีที่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าพลังงานของรังสีแกมมา ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ในตัวอย่างน้ำยางได้น้อยกว่า และนอกจากนี้อำนาจทะลุทะลวงของรังสียูวีอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งส่งผลให้การฉายรังสียูวีมีผลต่อตัวอย่างน้ำยางไม่ทั่วถึง ทำให้ผลการทดลองที่ได้มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการฉายด้วยรังสีแกมมา

สำหรับจำนวนและชนิดของสารเซนซิไทเซอร์ที่ใช้ผสมลงในตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงและนำไปผ่านกระบวนการฉายรังสียูวีนั้น พบว่า ไม่ส่งผลต่อการทดลองมากนัก นั่นคือ ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่ได้จากตัวอย่าง น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตรให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก

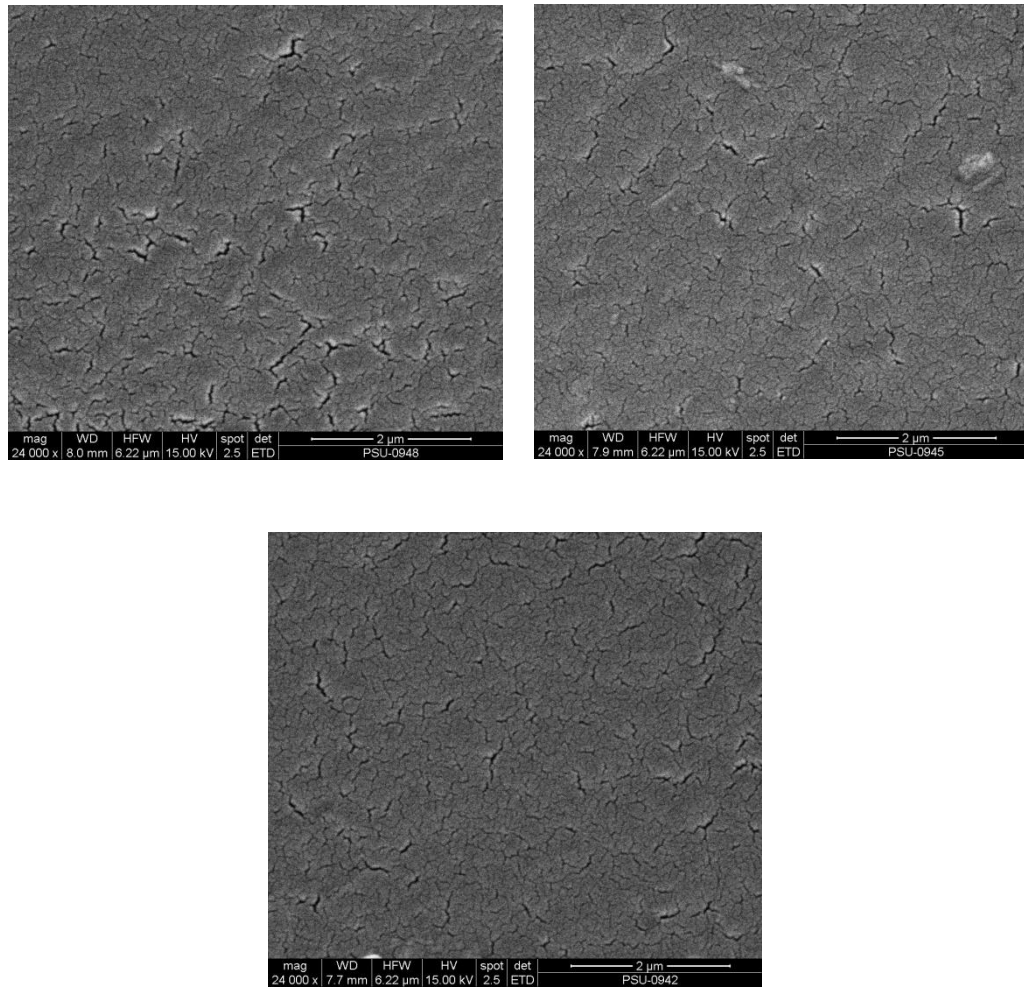
จากรังสียูวีที่ฉายลงบนตัวอย่างน้ำยางทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้น้อย โดยตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรที่ให้ผลดีที่สุดคือ $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน (CHCl_3) เป็นสารเซนซิไทเซอร์

4.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

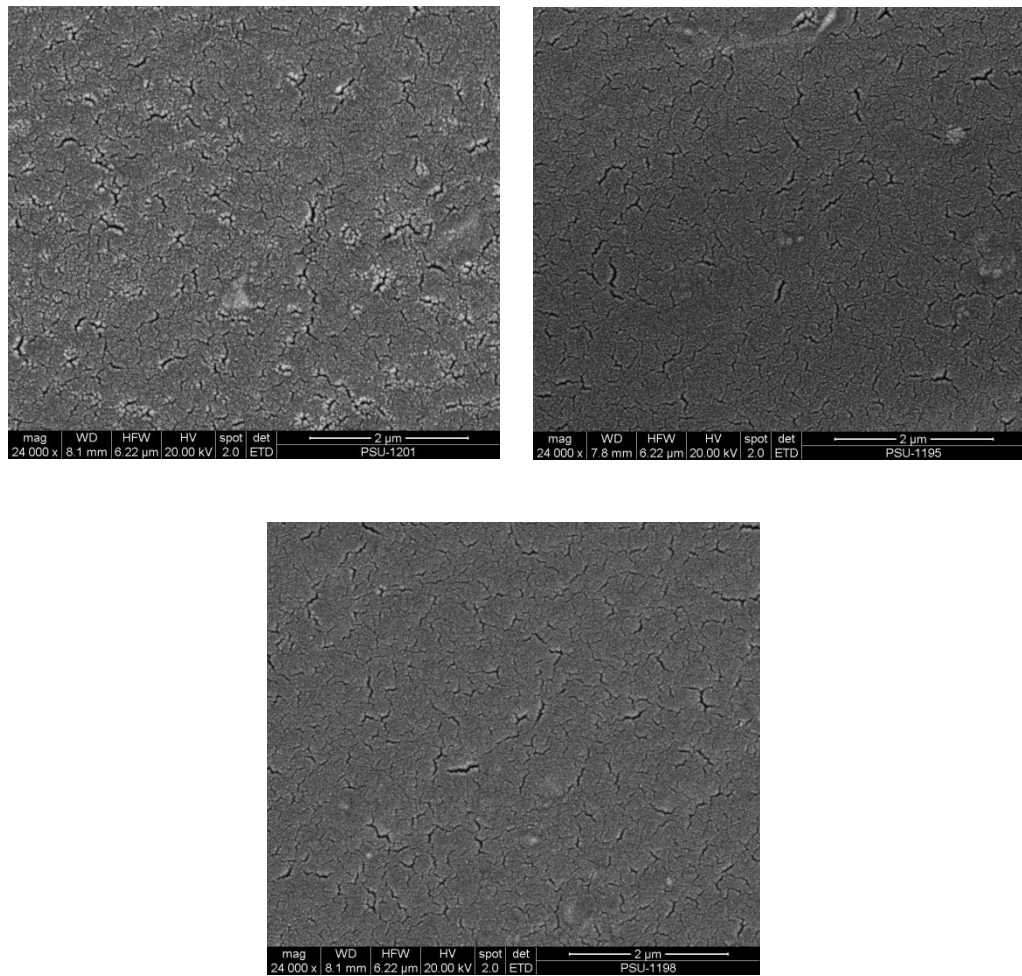
ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่นำไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) คือตัวอย่างน้ำยางที่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดดีที่สุด นั่นคือ ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผสมเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane, CHCl_3) เป็นสารเซนซิไทเซอร์รวมกันทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมา รังสียูวี และไม่ผ่านการฉายรังสีเลย ซึ่งลักษณะของพื้นผิวและภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์มยางที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายต่าง ๆ แสดงดังรูป 4.31-4.36 ตามลำดับ



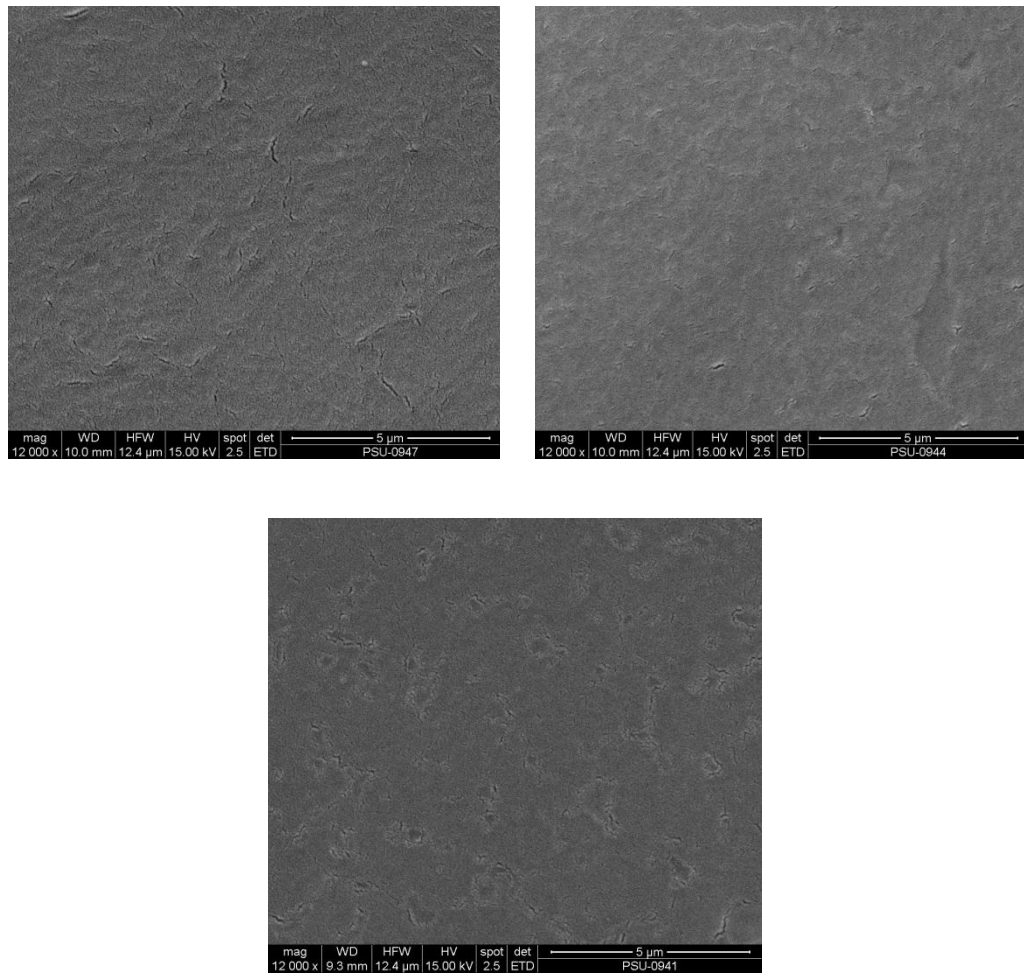
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายพื้นผิวด้านที่สัมผัสกับอากาศ (air interface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 12000 เท่า



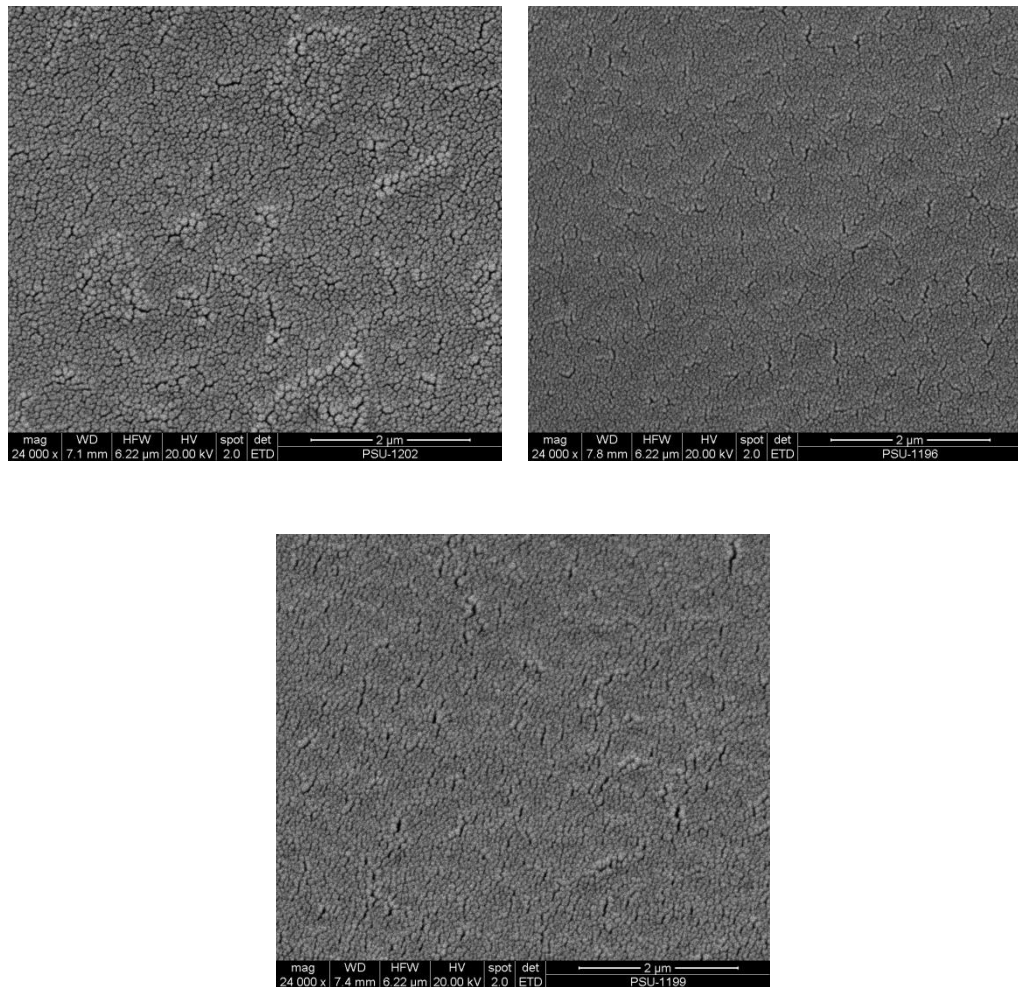
รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายพื้นผิวด้านที่สัมผัสกับอากาศ (air interface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสุด $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 24000 เท่า



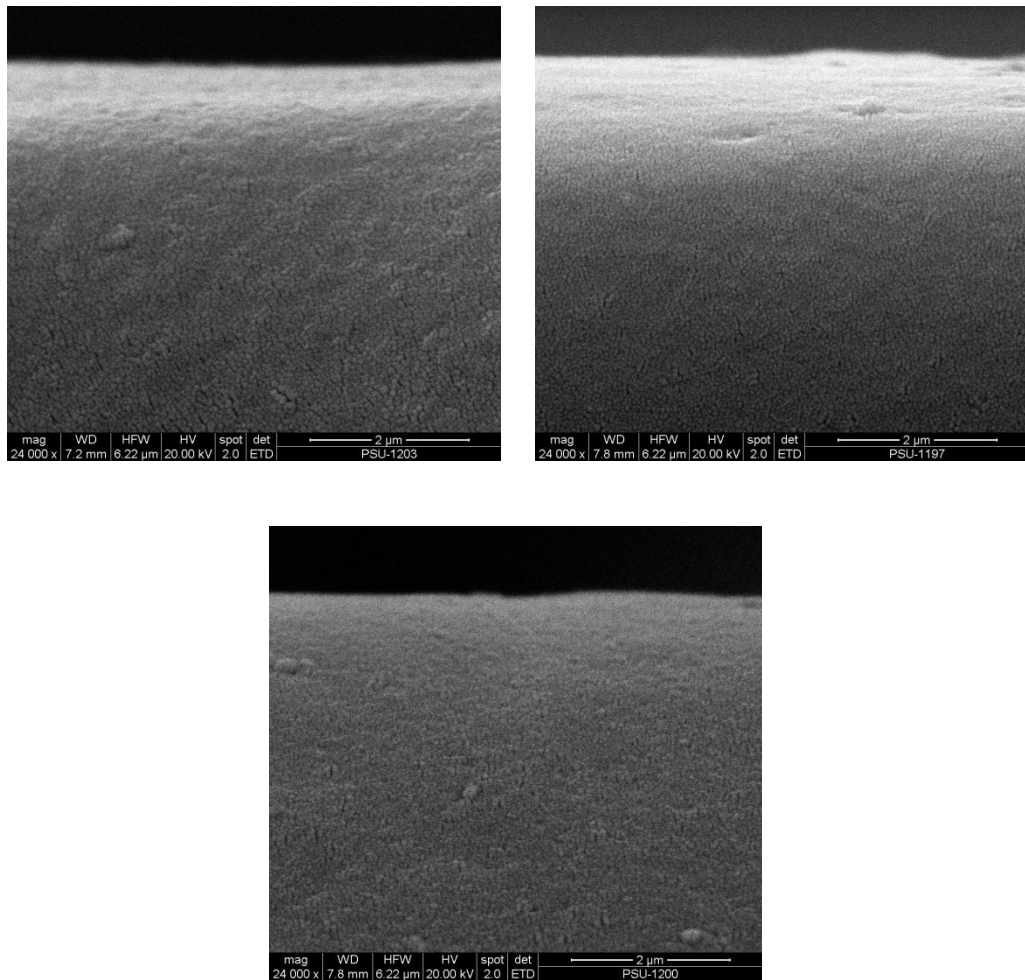
รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายพื้นผิวด้านที่สัมผัสกับกระจก (glass interface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 24000 เท่า



รูปที่ 4.34 ภาพถ่ายภาพตัดขวาง (cross section) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 12000 เท่า



รูปที่ 4.35 ภาพถ่ายภาพตัดขวาง (cross section) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 24000 เท่า



รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายภาพตัดขวาง (cross section) บริเวณขอบฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (ซ้าย) ผ่านการฉายรังสียูวี (ขวา) และไม่ผ่านการฉายรังสี (ล่าง) ด้วยกำลังขยาย 24000 เท่า

จากรูปภาพถ่ายพื้นผิวและภาคตัดขวางของตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง ผสมสารเคมีตามสูตร $\text{HAPn}_5\text{C}_5\text{CH}_5$ ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมา รังสียูวี และทั้งที่ไม่ผ่านการฉายรังสี พบว่า มีรอยแตกเกิดขึ้นบนพื้นผิวกระจายอยู่ทั่วไปบนตัวอย่าง เนื่องจากการนำตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติไปผ่านการฉายรังสีนั้น เป็นกระบวนการที่ช่วยทำให้พันธะของยางเกิดการแตกออกและเกิดการเชื่อมโยงกันใหม่ที่ก่อให้เกิดความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น หรือที่เรียกว่าเกิดการทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น ซึ่งการเกิดการวัลคาไนซ์จะส่งผลทำให้ตัวอย่างฟิล์มยางมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้เกิดรอยแตกบนพื้นผิวของยางเมื่อเกิดการหักงอ ดังนั้น รอยแตกที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของฟิล์มยางที่มากหรือน้อย จึงสามารถแสดงถึงความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มยางหรือแสดงถึงการเกิดการวัลคาไนซ์มากหรือน้อยด้วย โดยเมื่อเปรียบเทียบจากรอยแตกที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างทั้ง 3 พบว่ารอยแตกที่เกิดจากการนำตัวอย่างไปฉายด้วยรังสีแกมมาจะให้รอยแตกที่ใหญ่และมากที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสียูวีและตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสีเลย ตามลำดับ นั่นคือ รังสีแกมมาสามารถทำให้เกิดการวัลคาไนซ์บนตัวอย่างน้ำยางได้ดีที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสีเลยจะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้น้อยที่สุด

นอกจากรอยแตกที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นจากผลของการวัลคาไนซ์แล้ว ยังอาจจะเกิดได้จากการระเหยของน้ำในระหว่างกระบวนการทำน้ำยางธรรมชาติให้เป็นแผ่นฟิล์มบางได้อีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การวัดค่าไนซ์ด้วยการฉายรังสีแกมมา

5.1.1.1 การฉายรังสีแกมมาบนน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง (HA)

- ในการฉายรังสีแกมมาบนน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร คือ $HAPn_5$, $HAPn_5C_5$, $HAPn_5CH_5$ และ $HAPn_5C_5CH_5$ พบว่าผลที่ได้ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อเพิ่มปริมาณความแรงของโดสรังสีแกมมาที่ฉายลงบนตัวอย่างน้ำยาให้มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มที่ดีขึ้น กล่าวคือ จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ซึ่งจากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่า เมื่อค่าความแรงของโดสรังสีมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการครอสลิงค์หรือเกิดการเชื่อมโยงในตัวอย่างน้ำยาได้ดีขึ้น หรือทำให้เกิดการวัดค่าไนซ์ได้ดีขึ้น ซึ่งทำให้ตัวอย่างน้ำยาที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

- ผลของชนิดและจำนวนของสารเซนซิไทเซอร์ที่ผสมลงในน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงก็ส่งผลต่อค่าผลการทดลองเช่นกัน นั่นคือ เมื่อพิจารณาชนิดของสารเซนซิไทเซอร์ทั้ง 3 ชนิด คือ เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-butyl acrylate, n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (tetrachloroethylene, C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน (trichloromethane, $CHCl_3$) พบว่า ตัวอย่างน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่มีการผสมไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) เป็นสารเซนซิไทเซอร์ จะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโดสรังสีได้ดีที่สุด กล่าวคือ เมื่อโดสรังสีเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าผลการทดลองทั้งค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่มีไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) ในส่วนผสมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและชัดเจน สำหรับจำนวนของสารเซนซิไทเซอร์ที่ผสมลงในตัวอย่างน้ำยาธรรมชาติ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่ผสมสารเคมีตามสูตรโดยมีจำนวนของตัวเซนซิไทเซอร์ที่ผสมต่างกัน พบว่า น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่ผสมสารเซนซิไทเซอร์มากกว่า 1 ชนิดจะส่งผลให้ค่าผลการทดลองที่ได้มีค่าสูงกว่าการผสม

สารเซนซีไทเซอ์ชนิดเดี่ยว กล่าวคือ จากตัวอย่างน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงทั้ง 4 สูตร น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตร $HAPn_5C_5$ และ $HAPnCH_5$ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) กับเตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) และเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) กับไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) หรือคลอโรฟอร์มเป็นสารเซนซีไทเซอ์ 2 ชนิด ตามลำดับ จะให้ผลการทดลองที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ $HAPn_5$ ซึ่งเป็นน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่ผสมสารเซนซีไทเซอ์เพียงชนิดเดียว และพบว่า $HAPn_5C_5CH_5$ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) และไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) หรือคลอโรฟอร์มเป็นสารเซนซีไทเซอ์ 3 ชนิดจะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงสูตรอื่น นั่นคืออาจกล่าวได้ว่า จำนวนของสารเซนซีไทเซอ์ที่ผสมลงในตัวอย่างน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงมากขึ้น จะส่งผลให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้ดีขึ้น

5.1.1.2 การฉายรังสีแกมมาบนน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ (LA)

- ในการฉายรังสีแกมมาบนน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำผสมสารเคมีตามสูตรทั้ง 4 สูตร คือ $LAPn_5$, $LAPn_5C_5$, $LAPn_5CH_5$ และ $LAPn_5C_5CH_5$ พบว่าผลที่ได้ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อเพิ่มปริมาณความแรงของโดสรังสีแกมมาที่ฉายลงบนตัวอย่างน้ำยาให้มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มที่ดีขึ้น กล่าวคือ จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ซึ่งจากผลดังกล่าวอาจกล่าวได้ว่า เมื่อค่าความแรงของโดสรังสีมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้ดีขึ้น

- สารเซนซีไทเซอ์ที่ใช้ผสมลงในตัวอย่างน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำส่งผลต่อค่าผลการทดลองที่ได้ แต่แตกต่างจากในกรณีของน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงตรงที่ในกรณีของน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ การใช้สารเซนซีไทเซอ์ชนิดเตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) เป็นตัวผสมในน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำจะส่งผลทำให้ค่าผลการทดลองที่ได้ด้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารเซนซีไทเซอ์ชนิดอื่น นั่นคือ น้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร $LAPn_5C_5$ และ $LAPn_5C_5CH_5$ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) กับ เตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) และ เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA), เตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) กับ ไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) เป็นสารเซนซีไทเซอ์ ตามลำดับ ให้ค่าผลการทดลองที่ได้ด้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตรอื่นๆ ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาเคมีกันระหว่างเตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) ที่ใช้เป็นสารเซนซีไทเซอ์ในตัวอย่างน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำกับทีเอ็มทีดี 0.013% และซิงค์ออกไซด์ 0.013% ซึ่งเป็นสารที่ใช้รักษาสภาพในน้ำยาธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำร่วมกับแอมโมเนีย 0.2% โดยศัพท์ทางวิชาการทางการแพทย์ใช้กันว่า LA-TZ ซึ่งย่อมาจากคำว่า Low Ammonia-Tetramethyl-thiuram

disulphide/Zinc oxid สำหรับน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร $LAPn_5CH_5$ ที่มีการผสม เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) และไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) เป็นสารเซนซิไทเซอร์ 2 ชนิดจะให้ ค่าผลการทดลองที่ได้ทั้งค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดดีกว่า น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำสูตร $LAPn_5$ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) เป็นสารเซนซิไทเซอร์ชนิดเดียว และนอกจากนี้ยังพบว่า เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) และ ไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) ที่ใช้เป็นสารเซนซิไทเซอร์ที่ผสมลงในตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียต่ำ มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโครงสร้างอย่างเด่นชัด นั่นคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ฉายลงบนตัวอย่างน้ำยางให้เพิ่มขึ้น ค่าผลการทดลองที่ได้จากตัวอย่างน้ำยางที่ใช้เอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) และ ไตรคลอโรมีเทน ($CHCl_3$) เป็นส่วนผสมจะให้ค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและชัดเจน

5.1.2 การวัดค่าไนซ์ด้วยการฉายรังสียูวี

5.1.2.1 การฉายรังสียูวีบนน้ำยางธรรมชาติแอมโมเนียสูง (HA)

- ในการฉายรังสียูวีบนน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตร ทั้ง 4 สูตร คือ $HAPn_5$, $HAPn_5C_5$, $HAPn_5CH_5$ และ $HAPn_5C_5CH_5$ พบว่าผลที่ได้ไปในทิศทาง เดียวกัน นั่นคือ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการฉายรังสียูวีลงบนตัวอย่างน้ำยางให้มีระยะเวลานานขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มที่ดีขึ้น กล่าวคือ จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง แต่เนื่องจากค่าพลังงานของ รังสียูวีที่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าพลังงานของรังสีแกมมา และนอกจากนี้อาจจะถูกละวงของ รังสียูวีอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งส่งผลให้การฉายรังสียูวีมีผลต่อตัวอย่างน้ำยางไม่ว่าถึง ทำให้ค่าที่ได้ จากผลการทดลองมีค่าน้อย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า โอกาสการใช้รังสียูวีในการฉายบนน้ำยาง ธรรมชาติแอมโมเนียสูงเพื่อให้เกิดการวัดค่าไนซ์เป็นไปได้น้อย

- สำหรับจำนวนและชนิดของสารเซนซิไทเซอร์ที่ใช้ผสมลงในตัวอย่างน้ำยาง ธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงและนำไปผ่านกระบวนการฉายรังสียูวีนั้น พบว่า ไม่ส่งผลต่อค่าผล การทดลองมากนัก นั่นคือ ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่ได้จาก ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงที่ผสมสารเคมีทั้ง 4 สูตรให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรังสียูวีที่ฉายลงบนตัวอย่างน้ำยางทำให้เกิดการวัดค่าไนซ์ได้น้อย โดย ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงผสมสารเคมีตามสูตรที่ให้ผลดีที่สุดคือ $HAPn_5C_5CH_5$ ซึ่งมีเอ็น-บิวทิลอะคริเลต (n-BA) เตตระคลอโรเอทิลีน (C_2Cl_4) และไตรคลอโร มีเทน ($CHCl_3$) เป็นสารเซนซิไทเซอร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวัดค่าไนซ์ด้วยการฉายรังสียูวี

- ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติที่เตรียมในการฉายรังสียูวี ภายในภาชนะบรรจุควรทำให้มีอากาศน้อยที่สุดหรือมีสภาพเป็นสุญญากาศ เนื่องจากอากาศมีผลทำให้น้ำยางเกิดการแข็งตัว ถ้าสามารถลดอากาศหรือทำให้เป็นสุญญากาศได้อาจจะช่วยให้สามารถเพิ่มระยะเวลาในการฉายรังสีได้นานขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้เกิดการวัดค่าไนซ์ได้ดีขึ้นด้วย

- ในการฉายรังสียูวี ควรมีการเตรียมตัวอย่างน้ำยางให้มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ยางก่อนนำไปฉาย หรือมีการกวนน้ำยางตลอดเวลาในขณะที่มีการฉายรังสี ทั้งนี้เพื่อที่ตัวอย่างจะได้รับปริมาณรังสีอย่างทั่วถึง

- ในการฉายรังสียูวี อาจมีการเติมสารไวแสงเพื่อช่วยในการทำให้ตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยากับรังสียูวีได้ดีขึ้น

- อาจมีการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นของรังสียูวีที่ใช้ในการฉายรังสีบนตัวอย่างน้ำยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มพลังงานของรังสียูวี ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดการวัดค่าไนซ์ได้ดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- เกศินี เหมวิเชียร และพิริยาธร สุวรรณมาลา. ม.ป.ป. การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ด้วยรังสี. กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). <http://www.tint.or.th/nkc/nkc5003/nkc5003f.html>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม 2553).
- คมกฤษ ฤทธิรงค์. 2552. อิทธิพลของโดสรังสีแกมมาต่อสมบัติทางเทคโนโลยีของน้ำยางธรรมชาติฉายรังสี. วิทยาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชยากริต ศิริอุปถัมภ์, กฤษฎา สุชีวะ, จินดารมณ ชวเจริญพันธ์ และ พรรษา ช่วยปล้อง. 2549. การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสี. ฐานข้อมูลผลงานวิจัยสาขาเกษตรศาสตร์และชีววิทยา. <http://www.rubberthai.com/>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 18 พฤศจิกายน 2552).
- ชยากริต ศิริอุปถัมภ์, จินดารมณ ชวเจริญพันธ์, กฤษฎา สุชีวะ และวราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2549. การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสี (ระยะที่ 2 ระดับกิ่งห้องทดลอง). ฐานข้อมูลผลงานวิจัยสาขาเกษตรศาสตร์และชีววิทยา. <http://www.rubberthai.com/>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2553).
- ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ และมานิตย์ ช้อนสุข. 2539. การพัฒนากระบวนการผลิตน้ำยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ด้วยรังสีให้มีประสิทธิภาพโดยใช้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ร่วมกับสารไวปฏิกิริยา. ฐานข้อมูลผลงานวิจัยสาขาเกษตรศาสตร์และชีววิทยา. <http://www.rubberthai.com/>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2553).
- ชีวภัทร์ พรพิมลมิตร และชยากริต ศิริอุปถัมภ์. 2548. การเลือกใช้คอมแพททิบิลเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับยางธรรมชาติ-โพลีเอทีลีนเบลนด์ซึ่งครอสลิงค์โดยการฉายรังสีแกมมา. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐภา แสงคำ. 2553. ธรรมชาติของแสง-รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า. Edupark. http://www.tlcthai.com/webboard/view_topic.php?table_id=1&cate_id=121&post_id=87527&title=ธรรมชาติของแสง-รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า. (สืบค้นเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2553).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- ชนิดพร นาคกุล. 2552. ความเป็นไปได้ของการเตรียมเมมเบรนจากน้ำยางธรรมชาติ. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- เต็มสุข แดงหอม และคณะ. ม.ป.ป. บทที่ 5 การวิเคราะห์พอลิเมอร์. เคมีพอลิเมอร์.
http://www.sci.buu.ac.th/~chemistry/staff/thanida/Polymer_Chemistry/image_files/chapter5_3.html. (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2554).
- นวลจวี รุ่งชนเกียรติ. 2545. วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- บัณฑิต ศรีนวลสุข. 2550. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิต Polymer-Emulsified Bitumen โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นสารเชื่อมโยง. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัย และปรีชา ปองภัย. 2540. เทคโนโลยีน้ำยางชั้น. ปัตตานี: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปรีดีเปรม จงรักษ์ และ ปริญญา อรุณวิสุทธิ. 2537. ผลของสารป้องกันออกซิเดชันต่อน้ำยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยรังสี. สงขลานครินทร์ 2537, 16(4): 419-423.
- ฝ่ายวิศวกรรมนิวเคลียร์. 2009. รังสีกับสิ่งแวดล้อม. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
http://www2.egat.co.th/ned/index.php?option=com_content&view=article&id=162&Itemid=167. (สืบค้นเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน 2553).
- พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2547. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2548. แนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีการวัลคาไนซ์. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2548. สารเคมีสำหรับยาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- พรทิพย์ ศรีโสภากา. 2547. สารเคมีสำหรับยาง. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม.
http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2547_additives_rubber.pdf. (สืบค้นเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2553).
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- พัทจารี สุขสวัสดิ์ และจิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์. 2005. การเตรียมน้ำยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีหมู่ฟังก์ชัน โดยการย่อยสลายทางเคมีด้วยแสงร่วมกับการใช้ฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่ง. 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology.
- ภาควิชาฟิสิกส์. ม.ป.ป. ริงส์อัลตราไวโอเลต. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. http://www.electron.rmutphysics.com/physics-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=988&Itemid=82. (สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มีนาคม 2554).
- รักพงษ์ รุทธนานุกรักษ์ และชยากริต ศิริอุปถัมภ์. 2548. การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของโพลีเอททีลีนและยางธรรมชาติเบลนด์โดยวิธีฉายรังสีแกมมาเพื่อให้เกิดครอสลิงค์บางส่วน. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รังสรรค์ ศรีสาคร. ม.ป.ป. ผลงานนิเวศลิยร์ในประเทศไทย. http://dscl.srp.ac.th/content/digital_library/snet3/atom/nuclear4.html. (สืบค้นเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2552).
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2549. *ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว).
- วิกิพีเดีย. 2552. ยางธรรมชาติ. มุลนิธิวิกิมีเดีย. <http://th.wikipedia.org/wiki/ยางธรรมชาติ>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม 2552).
- วิกิพีเดีย. 2552. ริงส์อัลตราไวโอเลต. มุลนิธิวิกิมีเดีย. <http://th.wikipedia.org/wiki/ริงส์อัลตราไวโอเลต>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน 2552).
- วิกิพีเดีย. 2554. ผลงานนิเวศลิยร์. มุลนิธิวิกิมีเดีย. <http://th.wikipedia.org/wiki/ผลงานนิเวศลิยร์>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2554).
- วิกิพีเดีย. 2554. ไมโครเวฟ. มุลนิธิวิกิมีเดีย. <http://th.wikipedia.org/wiki/ไมโครเวฟ>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2554).
- วิกิพีเดีย. 2554. ริงส์อินฟราเรด. มุลนิธิวิกิมีเดีย. <http://th.wikipedia.org/wiki/ริงส์อินฟราเรด>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มีนาคม 2554).
- วิกิพีเดีย. 2554. แสง. มุลนิธิวิกิมีเดีย. <http://th.wikipedia.org/wiki/แสง>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มีนาคม 2554).
- สถาบันวิจัยยาง. 2540. *ข้อมูลทางวิชาการพารา*. กรมวิชาการเกษตร.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- สมพร จงคำ. 2546. การใช้ประโยชน์พลังงานนิวเคลียร์ทางด้านสิ่งแวดล้อม. ใน *สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่ม 27*.
- สมพร จงคำ. 2546. พลังงานนิวเคลียร์. ใน *สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่ม 27*.
- สมพร จงคำ และอารีรัตน์ คอนดวงแก้ว. ม.ป.ป. การใช้รังสีในกิจการอุตสาหกรรม. สถาบันนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. <http://www.nst.or.th/article/notes01/article008.htm>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม 2553).
- สุรศักดิ์ พงศ์พันธ์สุข. ม.ป.ป. รังสีชนิดก่อกำไอออน. สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). <http://www.tint.or.th/nkc/nkc5001/nkc5001c.html>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 4 ธันวาคม 2553).
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2544. อุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยาง. www.oie.go.th/industrystatus1/r_AprJun46/AprJun46_7_1.doc. (สืบค้นเมื่อวันที่ 17 พฤศจิกายน 2552).
- เสาวนีย์ ก่ออุฏติกุลรังษี. 2546. *การผลิตยางธรรมชาติ*. สงขลา: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- หน่วยเทคโนโลยียาง. 2549. ศัพท์ยางน่ารู้. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/terminology.htm>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 24 สิงหาคม 2553).
- หน่วยเทคโนโลยียาง. 2552. เทคโนโลยียางพื้นฐาน. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/rubbertech.htm>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม 2553).
- อนิรุทธิ์ ส่งศรี และชยากริต ศิริอุปถัมภ์. 2549. การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มยางจากน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ด้วยรังสี โดยการควบคุมอุณหภูมิขณะฉายรังสี. วิทยาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุษา กัลลประวิทย์. ม.ป.ป. *คุณสมบัติของรังสี*. กลุ่มงานวิชาการ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.
- A. K. Bhowmick. and J. R. White. 2002. Thermal, UV-and sunlight ageing of thermoplastic elastomeric natural rubber-polyethylene blends. *Journal of Materials Science* 37: 5141-5151.
- Blackley, D.C. 1997. *Polymer Latices Science and Technology, Volume 2: Type of Latices*. 2nd ed. London: Chapman&Haall Publ.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Chyagrit Siri-upathum. 2006. Technology Development of Products from Gamma Radiation Vulcanized Natural Latex.
<http://www.researchgate.net/publication/39025116>
 http://www.researchgate.net/publication/39025116_span_classsearchResultHighlighted_boldTechnologyspan_span_classsearchResultHighlighted_boldDevelopments_of_span_classsearchResultHighlighted_boldProductssearchResultHighlighted_boldfromspan_span_classsearchResultHighlighted_boldGammasspan_span_classsearchResultHighlighted_boldRadiationspan_span_classsearchResultHighlighted_boldVulcanizedspan_span_classsearchResultHighlighted_boldNaturalspan_span_classsearchResultHighlighted_boldLatexspan.
 (accessed December 22, 2010).
- C.V. Chaudhari., Y.K. Bhardwaj., N.D. Patil., K.A. Dubey., Virendra Kumar. and S. Sabharwal. 2005. Radiation-induced vulcanisation of natural rubber latex in presence of styrene-butadiene rubber latex. Radiation Physics and Chemistry 72: 613-618.
- Dafader N.C., Haque M.E., Akhtar F. And Ahmad M.U. 2006. Study on the Properties of Blend Rubber Between Grafted Rubber Latex and Natural Rubber Latex by Gamma Radiation. Polymer-Plastic Technology and Engineering 45, no.7: 889-892.
- Jaimon K. Kurian., N. R. Peethambaran., K. C. Mary. and Baby Kuriakose. 2000. Effect of vulcanization systems and antioxidants on discoloration and degradation of natural rubber latex thread under UV radiation. Journal of Applied Polymer Science Vol. 78, Issue 2: 304-310.
- live-rubber. 2009. ปัจจัยที่มีผลเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง. Live-rubber. <http://www.live-rubber.com/index.php/rubber-plantation-management/mature-rubber-stage/27-day-rubber-content>. (สืบค้นเมื่อวันที่ 27 มีนาคม 2554).
- M. D. Romero-sanchez., M. M. Pastor-Blas., J. M. Martin-Martinez., P. A. Zhdan. And J. F. Watts. 2001. Surface modifications of a vulcanized rubber using corona discharge and ultraviolet radiation treatments. Journal of Materials science 36: 5789-5799.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- M.E. Haque., N.C. Dafader., F. Akhtar. And M.U. Ahmad. 1996. Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. *Radiat.Phys.Chem.* 48, no.4: 505-510.
- M. M. Jayasuriya., K. Makuuchi. And F. Yoshi. 2001. Radiation vulcanization of natural rubber latex using TMPTMA and PEA. *European Polymer Journal* 37: 93-98.
- Sirinthorn Thongsang. n.d. Tensile properties. *Tool&Materials Engineering KMUTT.* [http://staff.kmutt.ac.th/~isirsang/men%20333%20Rubber%20resting%20\(W8\)%201-2553.pdf](http://staff.kmutt.ac.th/~isirsang/men%20333%20Rubber%20resting%20(W8)%201-2553.pdf). (accessed March 10, 2011)
- S. D. Gehman and I. Auerbach. 1956. Gamma-ray vulcanization of rubber. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes* Vol.1, Issue 1-2: 102-114.
- Yanti Sabarinah., S. F. Sundardi. And Arif H. Kuncoro. 1990. Radiation vulcanization of natural rubber latex using a combination of monofunctional acrylicmonomer and CCl_4 . *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry* Vol. 36, Issue 6: 815-818.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ระบบการวัดปริมาณรังสี

(DOSIMETRY SYSTEM)

ระดับชั้นของเครื่องวัดปริมาณรังสี (DOSIMETER CLASS)

1. Primary Standard Dosimeter

ห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติ หรือนานาชาติ จะเปรียบเทียบสภาพแวดล้อมทางรังสี และเครื่องวัดปริมาณรังสีระดับชั้นอื่นๆ เช่น ionization chamber, calorimeter

2. Reference Standard Dosimeter

เพื่อเปรียบเทียบสภาพแวดล้อมทางรังสี และเครื่องวัดปริมาณรังสีสำหรับงานประจำ (Routine Dosimeter)

TABLE 1 Examples of Reference-Standard Dosimeters

Dosimeter	Readout System	Useful Absorbed Dose, Gy	References ^A
Ionization chamber	Electrometer	10^4 to 10	(11, 12)
Calorimeter	Thermometer	10^2 to 10^5	(13)
Alanine	EPR spectrometer	1 to 10^5	(14)
Ceric cerous sulfate Solution	UV spectrophotometer or Electrochemical Potentiometer	10^3 to 10^5	(15, 16)
Ethanol chlorobenzene Solution	Spectrophotometer, color titration, high frequency conductivity	10 to $2\Delta 10^8$	(17, 18)
Ferrous sulfate solution	UV spectrophotometer	20 to $4\Delta 10^2$	(19)
Potassium/Silver dichromate	UV/Visible spectrophotometer	10^3 to 10^5	(20)

^A these references are not exhaustive; others may be found in the literature

3. Transfer Standard Dosimeter

ใช้ในการขนส่งข้อมูลปริมาณรังสีจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ได้รับการรับรองหรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติสู่โรงงานฉายรังสี เพื่อสอบย้อนกับค่าวัดปริมาณรังสีของโรงงานฉายรังสีนั้น โดยคัดเลือกจากเครื่องวัดปริมาณรังสีอ้างอิงหรือเครื่องวัดปริมาณรังสีที่ใช้ในงานประจำ เช่น Alanine Dosimeter, Fricke

4. Routine Dosimeter

เพื่อการควบคุมคุณภาพของกระบวนการฉายรังสี ติดตามวัดปริมาณรังสีและการสร้างแผนที่การกระจายของรังสี (Dose mapping)

TABLE 2 Examples of Routine Dosimeters

Dosimeter	Readout System	Useful Absorbed Dose, Gy	References ^A
Alanine	EPR spectrometer	1 to 10^5	(14)
Dyed polymethyl-methacrylate	Visible spectrophotometer	10^2 to 10^5	(21, 22, 23)
Clear polymethyl-methacrylate	UV spectrophotometer	10^3 to 10^5	(21, 24)
Cellulose acetate	Spectrophotometer	10^4 to $4\Delta 10^5$	(25)
Lithium borate, lithium fluoride	Thermoluminescence reader	10^{-4} to 10^3	(26)
Lithium fluoride (optical grade)	UV/Visible spectrophotometer	10^2 to 10^6	(27)
Radiochromic dye films, solution, optical wave guide	Visible spectrophotometer	1 to 10^5	(6, 8, 28)
Ceric cerous sulfate solution	Potentiometer or UV spectrophotometer	10^3 to 10^5	(15)
Ferrous cupric sulfate solution	UV spectrophotometer	10^3 to $5\Delta 10^3$	(29)
Ethanol chlorobenzene solution	Spectrophotometer, Color titration, high-Frequency conductivity	10 to $2\Delta 10^6$	(28)

TABLE 2 Examples of Routine Dosimeters (ต่อ)

Dosimeter	Readout System	Useful Absorbed Dose, Gy	References ^A
Amino acids	Lyoluminescence reader	10^{-5} to 10^4	(30)
MOSFET	Voltmeter	1 to 2×10^2	(31)

^A these references are not exhaustive; others may be found in the literature

การเปรียบเทียบระบบวัดปริมาณรังสี (Dosimetry System Calibration System)

ขั้นตอนที่สำคัญคือการฉายรังสี Dosimeter เพื่อการเปรียบเทียบ

- Primary Standard Dosimeter

ไม่ต้องเปรียบเทียบกับมาตรฐานอื่นๆ เนื่องจากการวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องวัดปริมาณรังสีเป็นไปตามทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์

- Reference Standard Dosimeter และ Transfer Standard Dosimeter

ฉายรังสีเพื่อการเปรียบเทียบที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติหรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ได้รับการรับรอง

- Routine Dosimeter

ฉายรังสีเพื่อการเปรียบเทียบได้ 3 วิธี

การเปรียบเทียบระบบวัดปริมาณรังสี

(Dosimetry System Calibration Routine Dosimeter)

1. ห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติหรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ได้รับการรับรอง
2. หน่วยงานเปรียบเทียบที่มีภายในโรงงานฉายรังสี โดยสอบย้อน Dose rate ไปยังห้องปฏิบัติการมาตรฐานแห่งชาติ หรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานนานาชาติ
3. เครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงานฉายพร้อมทั้งเครื่องวัดปริมาณรังสีชนิดมาตรฐานอ้างอิง หรือมาตรฐานการขนส่งที่สามารถสอบย้อนกลับไปยังห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติหรือนานาชาติ

การเปรียบเทียบโดยห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ

เปรียบเทียบ Routine Dosimeter สำหรับรังสีแกมมา อิเล็กตรอน หรือรังสีเอกซ์

ข้อดี

ปริมาณรังสีถูกต้อง ควบคุมสภาวะขณะฉายรังสีได้ดี

ข้อเสีย

1. เกิดความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมขณะฉายรังสีระหว่างเครื่องของห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ กับเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน (เกิดความไม่แน่นอน-uncertainty)
2. การขนส่งเครื่องวัดปริมาณรังสีไป-กลับห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ สภาพแวดล้อมขณะทำการขนส่งอาจมีผลต่อ Dosimeter

ข้อควรปฏิบัติ

1. สภาวะขณะฉายรังสีภายในห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ ควรจะใกล้เคียงกับสภาวะขณะฉายรังสีโดยเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน และปัจจัยอื่นๆ เช่น
 - พลังงานของรังสี
 - Dose rate (ควรปรับเทียบที่ค่าระหว่าง Dose rate เฉลี่ยและ Dose rate สูงสุดของเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน)
 - อุณหภูมิขณะฉายรังสี (การปรับเทียบควรทำที่อุณหภูมิคงที่ระหว่างค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างที่ทำการฉายผลิตภัณฑ์)
2. สภาวะแวดล้อมที่มีความแตกต่างกันมาก เช่น อุณหภูมิสูง-ต่ำ และความชื้น ระหว่างที่ทำการขนส่ง Dosimeter ไป-กลับจากโรงงานฉายรังสีอาจมีผลต่อค่าปริมาณรังสีที่อ่านได้ ดังนั้น
 - ภาชนะบรรจุเครื่องวัดปริมาณรังสีควรจะช่วยลดผลของสภาพแวดล้อมระหว่างที่ทำการขนส่ง
 - มี indicator ที่จะแสดงอุณหภูมิสูงสุดภายในภาชนะบรรจุเครื่องวัดปริมาณรังสีระหว่างที่ทำการขนส่งเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ (กรณีผลที่ได้จากการปรับเทียบไม่สามารถนำมาใช้ได้)
 - เพื่อสร้างความมั่นใจว่าสภาวะแวดล้อมในการขนส่งนั้นไม่ได้ทำให้ผลที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณรังสีเปลี่ยน ซึ่งอาจทำได้โดยการส่ง Dosimeter ที่ทราบปริมาณรังสีอยู่แล้วไปกับ Dosimeter ที่ส่งไปปรับเทียบ แล้วอ่านค่าจาก Dosimeter ทั้ง 2 ชุดเปรียบเทียบกัน

การปรับเทียบโดยหน่วยงานปรับเทียบภายในของโรงงานฉายรังสี

ข้อดี

1. สภาวะแวดล้อมขณะฉายรังสี และการเก็บรักษาเครื่องวัดปริมาณรังสีทั้งก่อนและหลังฉายรังสีสามารถควบคุมให้เหมือนกับการฉายรังสีในงาน routine
2. ช่วยลดความเปลี่ยนแปลงของผลที่อาจเกิดขึ้นจากความแตกต่างของสภาวะระหว่างการขนส่งเครื่องวัดปริมาณรังสี หลังจากทำการฉายรังสี

ข้อเสีย

ห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบภายในโรงงานอาจไม่เป็นไปตามมาตรฐาน (ISO/ASTM 51400)

ข้อควรปฏิบัติ

ควรจะสอบย้อน Dose rate ในการเปรียบเทียบไปยังห้องปฏิบัติการมาตรฐานแห่งชาติหรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานนานาชาติที่ได้รับการรับรอง โดยการวัดโดยตรงแล้วทำการเปรียบเทียบ หรือเปรียบเทียบโดยใช้ Transfer Standard Dosimeter จากห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ

• การสอบย้อน Dose rate ของส่วนปฏิบัติการเปรียบเทียบภายในของโรงงานควรจะทำอย่างน้อย 3 ปี ทำ 1 ครั้ง และหลังจากที่มีการเปลี่ยนแปลงความแรงของต้นกำเนิดรังสีหรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดวาง (Geometry) ใหม่

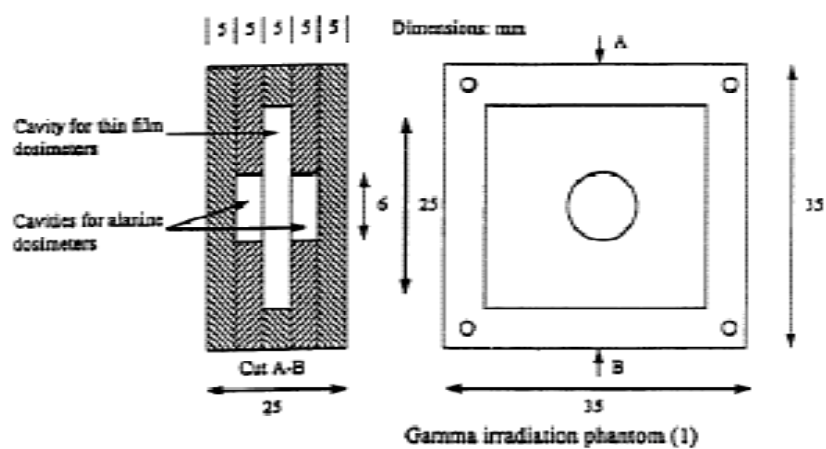
การเปรียบเทียบโดยเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ของโรงงาน

การเปรียบเทียบ Routine Dosimeter โดยการฉายรังสีพร้อมกับ Reference Standard Dosimeter หรือ Transfer Standard Dosimeter โดยเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์ (Standard Dosimeter มาจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ และส่งกลับไปวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานฯ)

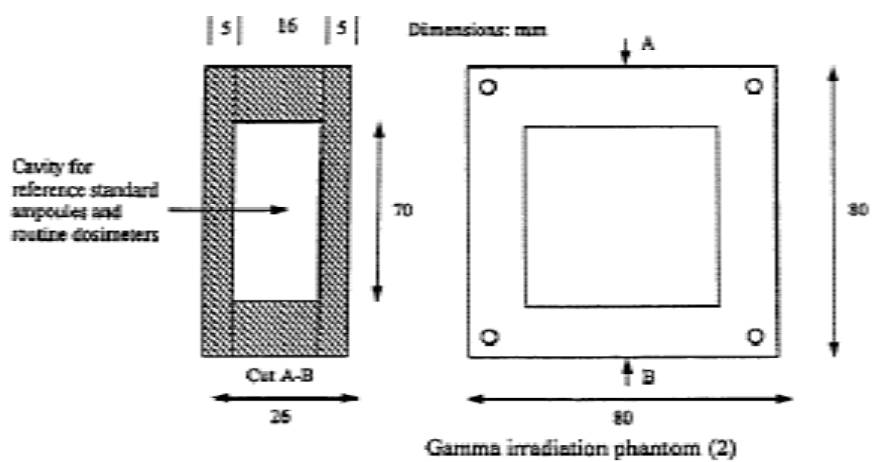
ข้อดี

1. สภาพแวดล้อมเหมือนกับการฉายรังสีผลิตภัณฑ์จริงในงานประจำ
2. ได้กราฟเปรียบเทียบปริมาณรังสี (calibration curve) ที่ถูกต้องสำหรับสภาวะระหว่างที่เปรียบเทียบเครื่องวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องฉายรังสีผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างการจัดรวม Routine Dosimeter และ Reference Standard Dosimeter หรือ Transfer Standard Dosimeter ในการฉายรังสีเพื่อการเปรียบเทียบ



รูปแสดงตัวอย่างการจัดรวม alanine dosimeter ซึ่งวางประกบทั้งสองข้างของ Thin film ซึ่งเป็น Routine dosimeter



รูปแสดงตัวอย่างการจัดรวมเครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิงซึ่งบรรจุอยู่ใน ampoule และ Routine dosimeter

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวณัฐชยา จันทรวีไชย	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010220048	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) เกียรตินิยมอันดับสอง	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

1. ปีการศึกษา 2550 – 2551 ได้รับทุนผู้ช่วยนักวิจัย จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์