



การศึกษาการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮโดรด์บนยางธรรมชาติ
โดยการฉายรังสีแกมมา

โดย

นางสาวสิริวรรณ พงษ์สถิตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การศึกษาการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ
โดยการฉายรังสีแกมมา

โดย

นางสาวสิริวรรณ พงษ์สถิตย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



GRAFTING OF MALEIC ANHYDRIDE ONTO NATURAL RUBBER
LATEX INDUCED BY GAMMA IRRADIATION

BY

Miss Siriwan Pongsathit



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER DEGREE OF ENGINEERING
ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY MANAGEMENT
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวสิริวรรณ พงษ์สถิตย์

เรื่อง

การศึกษาการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ โดยการฉายรังสีแกมมา

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2559

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



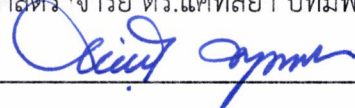
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชราภรณ์ จิตติวงศ์เสวต)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



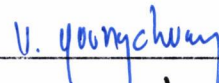
(รองศาสตราจารย์ ดร.แคทลียา ปัทมัทพรหม)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



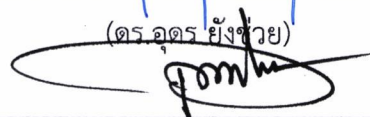
(อาจารย์ ดร.นพรัตน์ พฤกษ์วิศักดิ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.อุตร ยังช่วย)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ประภัสสร วังศกาญจน์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการกรรพต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยาง ธรรมชาติ โดยการฉายรังสีแกมมา
ชื่อผู้เขียน	นางสาวสิริวรรณ พงษ์สถิตย์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	เทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. แคทลียา ปัทมพรหม
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การศึกษาการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ลงบนน้ำยางธรรมชาติ ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้มากขึ้น ในอดีตการต่อกิ่งของยางธรรมชาติด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ จะใช้สารเคมีเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และในปัจจุบันมีความต้องการลดการใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยา การฉายรังสีจึงได้ถูกนำมาใช้ริเริ่มปฏิกิริยาในการต่อกิ่งของยางธรรมชาติกับมอนอเมอร์บางชนิด โดยยังไม่เคยมีการศึกษากับมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาการต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนน้ำยางธรรมชาติ โดยการฉายรังสีแกมมา ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้รังสีแกมมาของธาตุโคบอลต์-60 (Co-60) ที่ปริมาณรังสีตั้งแต่ 0 - 10 kGy และที่ปริมาณความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (MA) 1%, 3%, 5%, 7% และ 9% ของยางแห้ง ผลการวิเคราะห์ด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ Proton Nuclear Magnetic Resonance (^1H NMR) พบว่า เกิดการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ โดยพบการเพิ่มขึ้นของ C-O ของหมู่คาร์บอนิลในมาเลอิก แอนไฮไดรด์ และมีแนวโน้มของการต่อกิ่งด้วยปฏิกิริยาแบบ Alder-ene reaction และพบว่ายางต่อกิ่งที่ได้นี้มีค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของหมู่ C-O ที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ และปริมาณรังสีแกมมาที่ใช้ ซึ่งแสดงถึงปริมาณการต่อกิ่งของยางที่มากขึ้น สำหรับการทดสอบการบวมตัวในโทลูอีนพบว่ายางต่อกิ่งนี้มีทั้งที่ละลาย (sol) และไม่ละลาย (gel) ในโทลูอีน ที่ปริมาณรังสีคงที่ที่ 2 kGy พบว่าปริมาณเจลและปริมาณการต่อกิ่งซึ่งได้จากอัตราส่วนพีการดูดกลืนมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ MA 7% ของยางแห้ง และเมื่อปรับปริมาณรังสีตั้งแต่ 0-10 kGy ที่ความเข้มข้นของ MA คงที่ที่ 9% ของยางแห้ง พบว่าปริมาณการต่อกิ่งมีความแปรผกผันกับปริมาณเจล โดย

ที่ปริมาณรังสี 10 kGy มีปริมาณการตอ่กึ่งสูงสุด และเมื่อนำยางตอ่กึ่งที่ได้นี้ไปศึกษาการใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในกรปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทก (Impact test) ของ PLA/NR blend พบว่า ยางตอ่กึ่งสามารถช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงกระแทกให้กับ PLA/NR blend ได้ โดยสภาวะที่ให้ค่า Impact strength สูงที่สุดคือที่ MA 9% ของยางแห้ง และปริมาณรังสี 4 kGy ซึ่งจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางนี้มีส่วนร่วมกับค่าความต้านทานแรงกระแทก พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกระแทก โดยเมื่อขนาดของยางเล็กลงจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น ซึ่งที่ MA 9% ของยางแห้ง และการฉายรังสี 4 kGy นั้นให้ขนาดของยางเล็กที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่ายางตอ่กึ่งนี้ไม่สามารถช่วยเพิ่มผลึกให้กับ PLA ได้

คำสำคัญ: การตอ่กึ่งโดยการฉายรังสี, มาเลอิก แอนไฮไดรต์, น้ำยางธรรมชาติ

Thesis Title	GRAFTING OF MALEIC ANHYDRIDE ONTO NATURAL RUBBER LATEX INDUCED BY GAMMA IRRADIATION
Author	Miss Siriwan Pongsathit
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Energy and Environmental Technology Management Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assoc.prof. Cattaleeya Pattamaprom, Ph.D.
Academic Years	2015

ABSTRACT

The grafting of maleic anhydride (MA) onto natural rubber latex (NRL) has received wide attention as it could extend applications of natural rubber (NR). In the past, grafting of MA onto NRL has been carried out by the chemical method. Nowadays, there is a need to reduce the use of chemicals in the reaction and irradiation method becomes more interesting. So far, there was no reports on grafting of MA onto polymers by using radiation technique and is therefore of interest. In this study, the effectiveness of MA grafting onto NR in the latex state was investigated by exposing the MA-swollen NRL to cobalt-60 gamma irradiation at various radiation doses ranging from 0-10 kGy and various concentrations of MA (1, 3, 5, 7, 9% of dry rubber). The FTIR spectra (Fourier transform infrared spectrometer) and ¹H-NMR spectra (Proton nuclear magnetic resonance) confirmed the successful grafting by showing the increase in the characteristic carbonyl peak (C=O) of MA in the grafted samples. Furthermore, it could be indicated that the majority of the grafting reactions occurred by Alder-ene mechanism. From the FTIR spectra, it was found that the absorbance ratio of the C=O group in the grafted NRL, which indicates the amount of MA grafted onto NRL, increased with increasing concentrations of MA. For the swelling test in toluene, the

grafted natural rubber contained both the soluble (sol) and insoluble (gel) fractions. At gamma radiation dose of 2 kGy, the gel content and the %grafting determined from the absorbance ratio increased to the maximum at 7% MA. By increasing the radiation doses from 0-10 kGy at 9 % MA, it was found that the %grafting and the gel content were inversely proportional, where the %grafting was the highest at the radiation dose of 10 kGy. The grafted natural rubber was then used to improve the impact property of poly(lactic acid) /natural rubber (PLA/NR blends). It was found that the MA grafted NRL (NR-g-MA) could improve the impact strength of the PLA/NR blend, where the optimum grafting condition was when using 9% MA at the radiation dose of 4 kGy. It was also found that the average particle size of rubber affected the impact strength, where the smaller rubber size resulted in the higher impact strength. However, the thermal property tests have shown that the NR-g-MA could not improve the crystallinity of PLA.

Keywords: Radiation grafting, Maleic anhydride, Natural rubber latex

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี จากความช่วยเหลือ และการอบรมสั่งสอน ของรองศาสตราจารย์ ดร.แคทลียา ปัทมพรหม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ เป็นอย่างดีมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์มา ณ ที่นี้

ขอกราบของพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรภรณ์ ฐิติวงศ์เสวต อาจารย์ ดร. นพรัตน์ พงษ์ทวีศักดิ์ และ ดร.อุตร ยังช่วย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงให้คำแนะนำในการแก้ไขจนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบของพระคุณ ดร.อติตย์สา เพ็ชรสุข ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลการทดลองและชี้แนะแนวทางในด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำเอกสาร และใช้เครื่องมือในการทำวิจัยต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อสุพงษ์ และคุณแม่ฉวีราพร พงษ์สถิตย์ พร้อมคุณตา คุณยาย คุณปู่ คุณย่า ที่เป็นกำลังสำคัญให้ทุนการศึกษาในระดับปริญญาโท และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณน้องๆ ในห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงาน ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

นางสาวสิริวรรณ พงษ์สถิตย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ยางธรรมชาติ	4
2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของยางธรรมชาติ	4
2.1.2 รูปแบบของยางธรรมชาติ	6
2.1.3 คุณสมบัติของยางธรรมชาติ	8
2.1.4 การเกิดเจลในยางธรรมชาติ	10

2.2	น้ำยางชั้น	12
2.2.1	วิธีการทำน้ำยางชั้น	12
2.2.2	คุณสมบัติของน้ำยางชั้น	15
2.3	การปรับปรุงและดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติ	16
2.3.1	การดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติ	16
2.3.2	การดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยมาเลอิก แอนไฮไดรด์	20
2.4	การฉายรังสีแกมมาเพื่อปรับโครงสร้างของพอลิเมอร์	24
2.4.1	ความรู้พื้นฐานของรังสี	24
2.4.2	การฉายรังสีแกมมาในพอลิเมอร์	29
2.4.3	การดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยการฉายรังสีแกมมา	31
บทที่ 3 วิธีการวิจัย		32
3.1	สารเคมีและอุปกรณ์	32
3.1.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
3.1.2	อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย	33
3.2	วิธีการทดลองและวิเคราะห์	35
3.2.1	แผนผังการทดลอง	35
3.2.2	กระบวนการเตรียมน้ำยางชั้นที่บวมตัวด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ก่อนการฉายรังสี	36
3.2.3	การเตรียมขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางตอกิ่ง	38
3.3	การทดสอบคุณสมบัติของน้ำยางชั้นตอกิ่ง	39
3.3.1	การทดสอบหาปริมาณเจลของยางตอกิ่ง	39
3.3.2	การทดสอบหาปริมาณการตอกิ่ง	40
3.3.3	การทดสอบค่าต้านทานแรงกระแทก (Impact strength)	41
3.3.4	การทดสอบสมบัติทางความร้อน	43
3.3.5	การทดสอบโครงสร้างและการกระจายตัวของยางธรรมชาติใน PLA	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล		45
4.1	การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำยางชั้น 60% ของยางแห้งที่ใช้ในงานวิจัย	45

4.1.1 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นก่อนการตอ่กิ่ง	45
4.1.2 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางชั้นก่อนการตอ่กิ่ง	47
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการตอ่กิ่งและปริมาณเจลของน้ำยางชั้น หลังการทำปฏิกิริยา	49
4.2.1 ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างหลังการทำปฏิกิริยาการตอ่กิ่งของ มาเลอิก แอนไฮไดรต์ บนน้ำยางชั้นโดยการฉายรังสีแกมมา	49
4.2.2 อิทธิพลของปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรต์ต่อการเกิดปฏิกิริยา การตอ่กิ่งกับยางธรรมชาติ	53
4.2.3 อิทธิพลของปริมาณรังสีแกมมาในการเกิดปฏิกิริยาการตอ่กิ่ง กับยางธรรมชาติ	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	72
รายการอ้างอิง	73
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางตอ่กิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมาด้วยการทดสอบ FTIR	76
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบการวิเคราะห์อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio; Ar)	89
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางชั้นและน้ำยางตอ่กิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมา	90
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางตอ่กิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมาด้วยการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$	98
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของน้ำยาง	4
2.2 The molecular weight between crosslinks ของ gel fraction และ ค่า number average molecular weight ของส่วนที่ละลายจาก gel fraction จากยางชนิดต่างๆ	11
2.3 ส่วนประกอบของน้ำยางชั้นโดยวิธีการระเหยน้ำ	13
2.4 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำยางชั้น	15
2.5 ตัวอย่างของมอนอเมอร์ ในการกราฟต์บนยางธรรมชาติ	18
2.6 ตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) ของรังสีชนิดต่าง ๆ	28
3.1 สูตรน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสีแกมมา	36
3.2 สูตรการบดผสมของยางต่อกิ่งกับ PLA และยางแท่ง	41
4.1 สมบัติทางความร้อนจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางชั้น (NRL) หรือน้ำยางชั้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)	69
4.2 สมบัติทางความร้อนจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางชั้น (NRL) หรือน้ำยางชั้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)	70
ข-1 ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ Absorbance ratio	89

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างทางเคมีของ cis-1,4-polyisorene	4
2.2	ส่วนต่างๆ ของน้ำยางสดที่ปั่นด้วยความเร็วรอบสูง	5
2.3	แบบจำลองของอนุภาคของยางธรรมชาติ	5
2.4	โครงสร้างที่เป็นไปได้ของกิ่งก้านสาขาที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุลยางและโครงสร้างหลังการถูกทำลายโดยการเติมเอทานอล	10
2.5	โครงสร้างส่วนของเจลและโซลของยางธรรมชาติหลังจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน	11
2.6	วิธีการดัดแปรยางธรรมชาติ	17
2.7	ปฏิกิริยาการกราฟต์ของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ	21
2.8	ผลการวิเคราะห์โดยวิธี FTIR ในการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 10 phr บนยางธรรมชาติ	22
2.9	แบบจำลองของกระบวนการการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติที่สกัดโปรตีนออก	24
2.10	ความสามารถในการทะลุผ่านของรังสีต่างๆ	25
2.11	ชนิดประจุของธาตุกำมะถันตรังสีในสนามแม่เหล็ก	25
2.12	กลไกการเกิดปฏิกิริยาการต่อกิ่งของพอลิเมอร์	29
2.13	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์	29
2.14	กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล โดยการฉายรังสี	30
2.15	กลไกการเกิดปฏิกิริยา polymerization	31
3.1	แผนผังการทดลองและวิเคราะห์	35
3.2	แผนผังการเตรียมน้ำยางชั้นที่บวมตัวด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์	37
3.3	แผนผังการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางต่อกิ่ง	38
3.4	เทอร์โมแกรมจากการทดสอบ DSC	43
4.1	สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ	45
4.2	ผลการทดสอบ FTIR ของแผ่นฟิล์มน้ำยางชั้น ในงานวิจัย	46
4.3	ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของแผ่นฟิล์มน้ำยางชั้น ในงานวิจัย	48
4.4	กลไกปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของยางธรรมชาติ และมาเลอิก แอนไฮไดรด์	49

4.5	การเกิดปฏิกิริยาแบบ Alder-ene reaction	50
4.6	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นและน้ำยางตอ่กิ่งมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 9% ที่ 2 kGy	51
4.7	ผลการทดสอบ ¹ H-NMR ของน้ำยางข้นและน้ำยางตอ่กิ่งมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 9% โดยการฉายรังสี 10 kGy	52
4.8	แสดงผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นและน้ำยางตอ่กิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 2 kGy	54
4.9	ผลวิเคราะห์ปริมาณการตอ่กิ่งจากการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นและน้ำยางตอ่กิ่ง โดยการฉายรังสีแกมมา ที่ 2 kGy	55
4.10	ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอ่กิ่งโดยการฉายรังสีแกมมา ที่ 2 kGy	55
4.11	ค่าความต้านทานแรงกระทำของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจาก น้ำยางข้น (NRL) หรือ น้ำยางข้นตอ่กิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น ต่างๆ โดยการฉายรังสีที่ 2 kGy (NR-g-MA)	56
4.12	ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาจากผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกหักในสภาวะ freeze fracture ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ PLA/NR blend ร่วมกับ NR-g-MA ที่ 2 kGy	58
4.13	ผลการวิเคราะห์อนุภาคยางเฉลี่ยของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจาก น้ำยางข้น (NRL) หรือน้ำยางข้นตอ่กิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสี ที่ปริมาณ 2 kGy (NR-g-MA)	59
4.14	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นและน้ำยางตอ่กิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณ 9% ของยางแท่ง โดยการฉายรังสีแกมมา	61
4.15	ผลการทดสอบ ¹ H-NMR ของน้ำยางข้นและน้ำยางตอ่กิ่งมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณ 9% ของยางแท่ง โดยการฉายรังสี	62
4.16	ผลวิเคราะห์ปริมาณการตอ่กิ่งจากการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นและ น้ำยางตอ่กิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% ของยางแท่ง โดยการฉายรังสีแกมมา	63
4.17	ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอ่กิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณ 9% ของยางแท่ง โดยการฉายรังสีแกมมา	64
4.18	ค่าความต้านทานแรงกระทำของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจาก	65

	น้ำยางชั้น (NRL) หรือ น้ำยางชั้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วย มาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA)	
4.19	ผลการศึกษาสัญฐานวิทยาจากผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกหักในสภาวะ freeze fracture ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ PLA/NR blend ร่วมกับ NR-g-MA ที่ปริมาณ 9%	66
4.20	ผลการวิเคราะห์อนุภาคยางเฉลี่ยของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจาก น้ำยางชั้น (NRL) หรือน้ำยางชั้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วย มาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)	67
4.21	เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC โดยการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางชั้น (NRL) หรือน้ำยางชั้น ต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)	68
4.22	เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC โดยการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางชั้น (NRL) หรือน้ำยางชั้น ต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)	69
ก-1	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นที่มีปริมาณยางแท่ง 60%	76
ก-2	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 1% ของ ยางแท่ง โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy	76
ก-3	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 1% ของ ยางแท่ง โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy	77
ก-4	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 1% ของ ยางแท่ง โดยการฉายรังสีแกมมา 6 kGy	77
ก-5	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 1% ของ ยางแท่ง โดยการฉายรังสีแกมมา 8 kGy	78
ก-6	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 1% ของ ยางแท่ง โดยการฉายรังสีแกมมา 10 kGy	78
ก-7	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 3% โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy	79
ก-8	ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 3% โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy	79

ค-13	ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy	97
ง-1	ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นที่มีปริมาณยางแห้ง 60%	98
ง-2	ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy	99
ง-3	ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy	99
ง-4	ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 6 kGy	100
ง-5	ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 8 kGy	100
ง-6	ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 10 kGy	101

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
AR	Absorbance ratio
CaCl ₂	Calcium Chloride
CDCl ₃	deuterated chloroform
CH ₂ O ₂	Formic acid
DSC	Differential Scanning Calorimeter
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
¹ H-NMR	Proton Nuclear Magnetic Resonance
kGy	The kilogray (radiation absorbed dose unit)
KOH	Potassium hydroxide
MA	Maleic anhydride
Na ₂ CO ₃	sodium carbonate
NRL	Natural rubber latex
NR-g-MA	Grafting of maleic anhydride onto natural rubber latex
PLA	Poly (lactic acid)
SDS	Sodium dodecyl sulfate
SEM	Scanning Electron Microscope

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

พอลิเมอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งจากแหล่งทรัพยากรธรรมชาติก็คือ ยางพาราหรือยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติจัดว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญมากชนิดหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งในยางธรรมชาติเหล่านี้จะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ โดยจะอยู่ล้อมรอบอนุภาคทรงกลมของยางธรรมชาติ โปรตีนเหล่านี้จะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลยาง ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางสังเคราะห์ อาทิเช่น ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทานต่อแรงดึงและการฉีกขาดได้ดี เป็นต้น (จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์, 2553) แต่ก็มีข้อจำกัดต่างๆ อาทิเช่น สมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพไม่มีความเสถียรภาพ โดยจะขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิ ซึ่งจะอ่อนตัวและเหนียวเหนอะหนะเมื่ออุณหภูมิสูง และจะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ รวมไปถึงความสะดวกและคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในการนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรม จึงมีการศึกษา ค้นคว้าและวิจัยการดัดแปลงและปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติขึ้นตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อให้ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติตรงตามความต้องการการใช้งานต่างๆ และเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับยาง โดยวิธีการปรับปรุงหรือดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติเหล่านี้มีหลากหลายวิธีการ (สุวดี ก้องพารากุล, 2556)

จากการศึกษาตั้งแต่ในอดีตที่ผ่านมาการดัดแปลงและปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติ จะใช้วิธีการเชื่อมขวาง (crosslink) ซึ่งโครงสร้างของยางธรรมชาติจะเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่เป็นแบบร่างแห เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่นให้กับยางธรรมชาติ วิธีการปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติที่นิยมรองลงมาคือ การต่อกิ่ง (grafting) โดยการปรับปรุงโครงสร้างของยางธรรมชาติด้วยวิธีการต่อกิ่งนี้ เป็นการนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ต่างๆ ซึ่งในอดีตการต่อกิ่งของมอนอเมอร์กับยางธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ จะใช้สารเคมีเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (initiator) อาทิเช่น การต่อกิ่งยางธรรมชาติในรูปแบบของน้ำยาง (Latex) ด้วยบิวทิลอะคริเลต, เมทิลเมทาคริเลตและอะคริโลไนไตรต์ หรือการต่อกิ่งยางธรรมชาติในรูปแบบของสารละลาย (Solution) หรือวิธีการบดผสม (reactive melt mixing) ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการต่อกิ่งด้วยมอนอเมอร์ต่างๆ เหล่านี้สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์นั้นๆ โดยคุณสมบัติที่ได้นี้จะเป็คุณสมบัติร่วมของยางและพอลิเมอร์นั้นๆ

ต่อมาได้มีการศึกษาการต่อกิ่งโดยการฉายรังสี ซึ่งเริ่มมีการนำมาใช้กับมอนอเมอร์บางชนิด อาทิเช่น การใช้รังสีแกมมา (โคบอลต์ -60) เป็นตัวริเริ่มในการต่อกิ่งยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยาง

(Latex) ของบิวทิลอะครีเลต, เมทิลเมทาครีเลตและอะคริโลไนไตรต์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของ ยางธรรมชาติ และในปัจจุบันยังไม่พบว่ามี การต่อกิ่งโดยการฉายรังสีของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยาง ธรรมชาติในรูปแบบของน้ำยาง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาการต่อกิ่งโดยการฉายรังสี แกมมาของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติในรูปแบบน้ำยาง เนื่องจากน้ำยางเป็นรูปแบบยาง ธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารา โดยผ่านกระบวนการแปรรูปน้อยมาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงศึกษากลไกและอิทธิพลของรังสีแกมมาในการทำปฏิกิริยาการต่อ กิ่งบนยางธรรมชาติของมาเลอิก แอนไฮไดรด์โดยการฉายรังสี เพื่อหาแนวทางลดการใช้สารเคมีในการ ทำปฏิกิริยา ซึ่งจะเป็นแนวทางในการลดค่าใช้จ่าย เพิ่มความสะดวก ลดสารตกค้าง และลดผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต โดยอย่างที่ได้นี้ยังสามารถพัฒนาเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในการ ปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติและนำประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการต่อกิ่งมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride; MA) บนน้ำยางธรรมชาติโดยใช้การฉายรังสีแกมมา

1.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบและโครงสร้างของยางธรรมชาติหลัง การต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์

1.2.3 เพื่อศึกษาผลเบื้องต้นของการนำยางต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ไปใช้ในการ เพิ่มสมบัติรับแรงกระแทกของ PLA และสมบัติทางความร้อน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ยางธรรมชาติที่ใช้เป็นน้ำยางชั้นชนิด High Ammonia (HA) ที่มีปริมาณเนื้อยาง 60%

1.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของมอนอเมอร์ (% MA; 1%, 3%, 5%, 7% และ 9% ของยางแห้ง)

1.3.3 ศึกษาผลของปริมาณรังสีแกมมา (2 kGy, 4 kGy, 6 kGy, 8 kGy, 10 kGy)

1.3.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการต่อกิ่ง โดยวิธี Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Proton Nuclear Magnetic Resonance ($^1\text{H-NMR}$) และ gel content

1.3.5 ศึกษาสมบัติรับแรงกระแทก การกระจายตัวของอนุภาคของยาง และสมบัติทางความร้อน เมื่อใช้ยางตอกกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ใน PLA ที่ปริมาณอัตราส่วน PLA: ยางแท่ง: ยางตอกกิ่ง 90: 5: 5

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้วิธีการปรับปรุงโครงสร้างยางธรรมชาติวิธีใหม่ ซึ่งสามารถลดปริมาณสารเคมีที่ใช้การตอกกิ่งยางธรรมชาติลงได้

1.4.2 สามารถปรับปรุงโครงสร้างและคุณสมบัติของยางธรรมชาติได้

1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารรับแรงกระแทกในอุตสาหกรรมพลาสติกได้

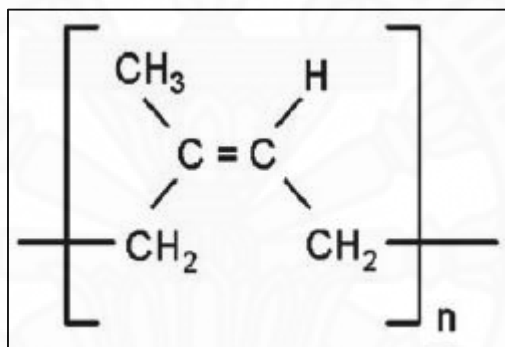
บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติหรือยางพารา เป็นยางที่ได้จากต้นฮีเวียบราซิลเลียนซิส (heavea brasiliensis) เป็นสารไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) มีสูตรทางเคมีคือ C_5H_8 มีหน่วยย่อย (building block) เป็น หน่วยไอโซพรีน (isoprene unit) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ cis-1,4-polyisoprene (ภาพจาก <http://www.at-thai.com/index.php/9-knowlege-products?start=4> สืบค้นเมื่อ 25 มกราคม 2558)

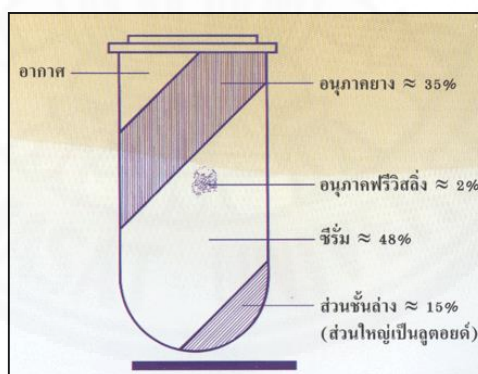
น้ำยางที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารา เรียกว่า น้ำยางสด (fresh or field latex) ซึ่งน้ำยางที่ได้จากต้นยางพารานี้จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทันทีที่ไหลออกจากต้น โดยน้ำยางนี้จะมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายอยู่ เป็นของเหลวสีขาว มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) 6.0 – 7.0 surface free energy 40 – 45 mJm^{-2} ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 $Mg m^{-3}$ ความหนืด (viscosity) 12-15 cP ซึ่งองค์ประกอบในน้ำยางดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2. 1

องค์ประกอบของน้ำยาง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (% m/m)
ส่วนที่เป็นของแข็งทั้งหมด (total solids)	36
เนื้อยางแห้ง (dry rubber)	33
โปรตีน (proteinaceous substances)	1-1.5
เรซิน (resinous substances)	1-1.25
ขี้เถ้า (ash)	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	100 (ปริมาณเมื่อรวมกับยางและสารอื่น)

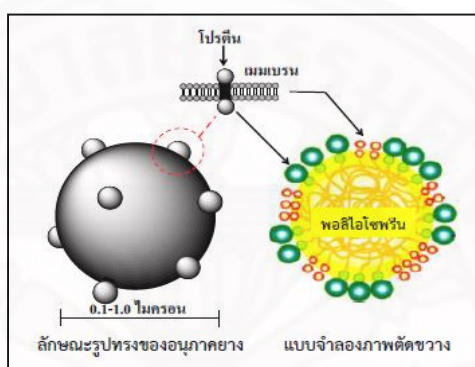
หากนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วรอบสูงๆ ประมาณ 13,000 รอบต่อนาทีขึ้นไป จะพบว่า น้ำยางสดเกิดการแยกชั้นกัน โดยสารต่างๆ ที่อยู่ในน้ำยางสดกระจายอยู่ในส่วนหรือเฟส (phase) ต่างๆ ได้เป็น ส่วนหลักๆ ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ส่วนต่างๆ ของน้ำยางสดที่ปั่นด้วยความเร็วรอบสูง. จาก เทคโนโลยียางธรรมชาติ *Natural Rubber Technology*, โดย จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิษฐ์, 2553, กรุงเทพฯ: เทคโนโลยี คอมมิวนิเคชันส์

- ส่วนที่ 1 ส่วนเนื้อยาง (rubber phase)

เป็นส่วนของชั้นยางสีขาวอยู่ชั้นบนสุด มีอยู่ประมาณ 35% จะเป็นส่วนที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็น cis-1,4-polyisoprene ดังภาพที่ 2.3 โดยอนุภาคของยางธรรมชาติจะมีขนาด 0.1-1.0 ไมครอน มีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งที่ผิวของอนุภาคจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นของโปรตีนและไขมัน ทำให้อนุภาคของยางสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างเสถียร แต่ถ้าหากหลังจากการกรีตไม่มีการเติมสารเคมียับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย ก็จะทำให้น้ำยางเสียความเสถียรได้ เนื่องจากแบคทีเรียและเอนไซม์ทำปฏิกิริยากับชั้นของโปรตีนและไขมัน



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองของอนุภาคของยางธรรมชาติ. จาก เทคโนโลยีการตัดแปรรยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้ (Natural Rubber Modification Technology and Its Applications), โดย สุวดี ก้องพารากุล, 2556

- ส่วนที่ 2 อนุภาคเฟรย์-วิสลิง (Frey-Wyssling)

ในส่วนของอนุภาคเฟรย์-วิสลิงนี้จะมีอยู่ประมาณ 2% และมีสีเหลืองกว่าส่วนที่ 1

- ส่วนที่ 3 ส่วนของชั้นน้ำหรือเซรัม (serum phase)

เป็นส่วนที่มีอยู่ประมาณ 48% มีสีเหลืองแต่ใส โดยจะประกอบไปด้วยสารที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน โปรตีนบางชนิด คาร์โบไฮเดรตประเภทน้ำตาล เอนไซม์ และไอออนของโลหะ เป็นต้น

- ส่วนที่ 4 ส่วนตกตะกอน (bottom phase)

เป็นส่วนที่อยู่ชั้นล่างสุด มีอยู่ประมาณ 15% ส่วนประกอบที่สำคัญในชั้นนี้ คือ ส่วนของลูทอยด์ (lutoid) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นตะกอนสีเหลืองหรือสีคล้ำ และมีความหนืดมาก และภายในอนุภาคลูทอยด์นี้จะประกอบไปด้วยสารจำพวก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต (น้ำตาล) เกลือต่างๆ

และกรด (pH 5.5) ดังนั้นในน้ำยางที่ไม่ได้ถูกกำจัดอนุภาคคอลลอยด์นี้ออกไป ก็มักจะเกิดการจับตัวมันเองตามธรรมชาติ (spontaneous coagulation)

2.1.2 รูปแบบของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 7 ประเภท ตามลักษณะรูปแบบของยางดิบได้แก่

1). น้ำยาง

- น้ำยางสด มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม มีสภาพเป็นคอลลอยด์หรือสารแขวนลอย มีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิเมตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 6.5-7.0 ความหนืดของน้ำยางมีค่าประมาณ 12-15 cP

- น้ำยางข้น คือน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้น แล้วจะมีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 55-65 ซึ่งสูงกว่าน้ำยางสดที่มีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 25 - 30 ทำให้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก

2). ยางแผ่นผึ่งแห้ง

ยางแผ่นผึ่งแห้งเป็นยางที่ได้จากการนำน้ำยางมาจับตัวเป็นแผ่นโดยสารเคมีที่ใช้จะต้องตามเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนการทำให้แห้งอาจใช้วิธีการผึ่งลมในที่ร่ม หรือ อบในโรงอบก็ได้แต่ต้องปราศจากควัน

3). ยางแผ่นรมควัน

ยางแผ่นรมควันมีกระบวนการผลิตโดยเริ่มจากการนำน้ำยางสดมาผ่านกระบวนการทำให้เป็นยางดิบ จากนั้นจึงพิมพ์ลาย แล้วนำไปอบรมควัน และคัดคุณภาพของแผ่นยางเพื่อส่งออกจำหน่ายต่อไป

4). ยางเครพ (Crepe Rubber)

ยางเครพเป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดด้วยเครื่องรีดยางสองลูกกลิ้ง โดยทั่วไปจะมีการใช้น้ำในการทำความสะดวกในระหว่างการรีด เพื่อนำสิ่งสกปรกออกจากยางในขณะรีดยาง เนื่องจากยางที่ใช้โดยมากเป็นยางที่มีมูลค่าต่ำ จึงมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก หลังจากรีดในเครื่องรีดยางแล้วนั้น ก็จะนำยางที่ได้ไปผึ่งแห้ง หรืออบแห้งด้วยลมร้อน โดยยางเครพที่ได้จะมีสีค่อนข้างเข้ม และมีหลายรูปแบบ เช่น ยาง Brown crepe, Flat bark crepe, Skim crepe และ Blanket crepe เป็นต้น ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ส่วนยางเครพขาวเป็นยางเครพที่ได้มาจากน้ำยาง ที่มีการกำจัดสารเกิดสีในน้ำยางหรือสารเบต้าแคโรทีน ซึ่งจะมีสีเหลืองอ่อน โดยการฟอกสียางให้มีสีขาวด้วยสารเคมี

5). ยางแท่ง

การผลิตยางแท่ง สามารถผลิตได้ทั้งจากน้ำยางหรือยางแท่งที่จับตัวแล้ว หลักสำคัญของการผลิตยางแท่ง คือ การตัดย่อยก้อนยางให้เป็นเม็ดหรือชิ้นเล็กๆ อย่างรวดเร็ว ล้างสิ่งสกปรกออก แล้วจึงนำยางไปบอบแห้ง และอัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมให้ขนาดตามที่ต้องการ โดยยางแท่งเป็นยางที่มีการกำหนดมาตรฐาน คุณสมบัติทางเทคนิคตามกระบวนการวิทยาศาสตร์

6). ยางแท่งความหนืดคงที่

ยางแท่งความหนืดคงที่ เป็นยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการควบคุมความหนืดของยางที่ใช้ในการแปรรูป เช่น อุตสาหกรรมยางท่อ, อุตสาหกรรมทำกาว โดยยางแท่งความหนืดคงที่นี้จะมี 3 เกรด คือ STR 5 CV, STR 10 CV และ STR 20 CV

7). ยางสกิน

ยางสกิน เป็นยางธรรมชาติที่ผลิตจากหางน้ำยาง หรือ น้ำยางสกิน (Skim latex) ในกระบวนการปั่นแยก โดยหางน้ำยางจะถูกเติมด้วยกรดซัลฟูริกเพื่อให้เนื้อยางจับตัวกัน จากนั้นยางสกินจะถูกส่งผ่านเครื่องตัดเพื่อตัดยางให้เป็นก้อนๆ แล้วจึงล้างน้ำ และนำเข้าเตาอบ แล้วอัดเป็นแท่งๆ เพื่อจัดจำหน่ายต่อไป

2.1.3 คุณสมบัติของยางธรรมชาติ

1). ความยืดหยุ่น (elasticity)

ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูงมาก โดยสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมหรือขนาดที่ใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว ภายหลังจากเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากมีแรงภายนอกมากระทำ

2). ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)

ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูงเนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดการตกผลึกเมื่อได้รับแรงดึง (strain-induced crystallization)

3). ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength)

ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูง เนื่องจากการเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง (strain-induced crystallization) ของยางธรรมชาตินั้นเอง โดยผลึกที่เกิดขึ้นนี้จะมี การเรียงตัวกันในแนวเดียวกับแรงดึง และตั้งฉากกับรอยฉีกขาด จึงเป็นการขัดขวางการฉีกขาดนั้นเอง

4). การกระด้างกระดอง (rebound resilience)

ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดองที่สูงมากและในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีการสูญเสียพลังงาน (hysteresis) ที่ต่ำโดยเมื่อนำไปใช้งานในทางไดนามิกส์ยางธรรมชาติก็จะมีความร้อนสะสม (heat build-up) ที่ต่ำอีกด้วย

5). ความทนทานต่อการขัดถู (abrasion resistance)

ยางธรรมชาติมีสมบัติในการทนทานต่อการขัดถูที่ดี

6). ความเหนียวติดกัน (tack)

ยางธรรมชาติมีความเหนียวติดกันที่สูง โดยเฉพาะในยางที่ไม่ผ่านการคงรูป โดยสามารถยึดติดกับวัสดุอื่นๆ ได้ เช่น โลหะ สิ่งทอ เป็นต้น

7). ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation)

ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมากโดยยางธรรมชาติจะมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 1×10^{15} ถึง 2×10^{15} โอห์ม-ซม.

8). ความทนทานต่อสารเคมี (chemical resistance)

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน จึงไม่สามารถทนทานต่อสารเคมีที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม และตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง เช่น เบนซีน (benzene) โทลูอิน (toluene) และเฮกเซน (hexane) เป็นต้น แต่สามารถทนทานต่อตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้งได้ เช่น อะซิโตน (acetone) แอลกอฮอล์ (alcohol) เป็นต้น

9). สมบัติการเสื่อมสภาพ (aging property) เนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด

ยางธรรมชาติมีความไวในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ และมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแล้วนั้นก็ยิ่งจะทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์แล้ว ยางธรรมชาติมีความทนต่อการเสื่อมสภาพมากกว่ายางสังเคราะห์ เนื่องจากยางธรรมชาติมีโปรตีนที่จะช่วยยับยั้งการเสื่อมสภาพของยางได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพจึงต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (anti-degradant) หรือสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant) ลงในยางธรรมชาติ

10). สมบัติทางกายภาพ

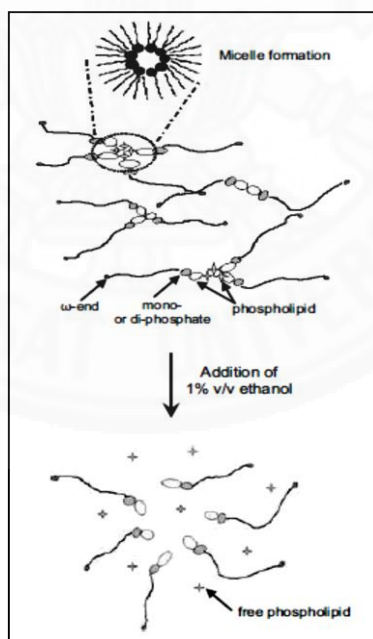
ยางธรรมชาติมีค่าความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 20°C เท่ากับ 0.934 และจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าหากยางถูกแช่แข็งหรือถูกยืด มีค่าความร้อนจำเพาะที่ 20°C เท่ากับ 0.502

11). ความสามารถในการแปรรูป ยางธรรมชาติ

เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่สูงทำให้การแปรรูปนั้นทำได้ยาก จึงต้องทำการบดก่อนแปรรูปทุกครั้ง การบดอย่างทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดต่ำลง และทำให้ยางนิ่มลง แต่อาจทำให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่น ในกรณีการอัดเข้าอากาศขัง (Air trap) ในยางได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติมีสมบัติความเหนียวติด (Tack) ที่ดี ไหลได้ง่ายและมีความต้านทานต่อการฉีกขาดที่อุณหภูมิสูงได้ดี จึงไม่มีปัญหาในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยการอัดเข้า

2.1.4 การเกิดเจลในยางธรรมชาติ

การเกิดเจลในยางธรรมชาตินั้นเกิดจากโครงสร้างร่างแห 2 ลักษณะ ลักษณะแรกคือ พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของโปรตีน และลักษณะที่สองคือพันธะที่เกิดกับฟอสโฟไลปิด เนื่องจากฟอสโฟไลปิดสามารถละลายได้บางส่วน ทั้งในสารละลายที่มีขี้และไม่ขี้ และธรรมชาติของโมเลกุลฟอสโฟไลปิดสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลข้างเคียงได้ ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถทำให้อนุมานได้ว่าจุดกำเนิดโครงสร้างร่างแหในยางธรรมชาติ เกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของฟอสโฟไลปิด รวมทั้งอาจเกิดจากพันธะไอออนิกได้ด้วย



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของกิ่งก้านสาขาที่เกิดจากหมู่ฟังก์ชันที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุลยาง และโครงสร้างหลังการถูกทำลายโดยการเติมเอทานอล จาก *เทคโนโลยียางธรรมชาติ Natural Rubber Technology*, โดย จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์, 2553, กรุงเทพฯ: เทคโนบิซ คอมมิวนิเคชั่นส์

ยางธรรมชาติประกอบด้วยเจลแบบอ่อนนุ่ม (soft-gel) และเจลแบบแข็ง (hard gel) ซึ่งเจลแบบอ่อนนุ่มสามารถสลายตัวได้โดยการทำปฏิกิริยาดีโปรตีนในเซชัน (Deproteinization) โดยใช้เอนไซม์ หรือโดยการเติมตัวทำละลายที่มีขั้ว (polar solvent) ลงไปในสารละลายยางเล็กน้อย และ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยง (The molecular weight between crosslinks) ของเจลอยู่ที่ประมาณ 0.7 ถึง 1.0×10^6 ซึ่งมีค่าเป็น 2-3 เท่าของค่า number average molecular weight แสดงให้เห็นว่าในสายโซ่ของโมเลกุลที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงจะประกอบด้วยโมเลกุลยาง 2-3 โมเลกุล ดังตารางที่ 2.2

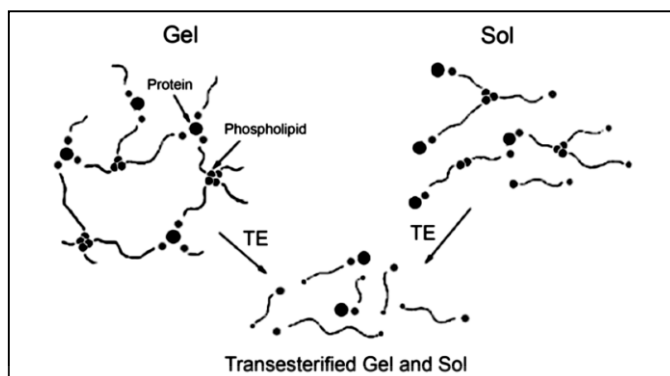
ตารางที่ 2.2

The molecular weight between crosslinks ของ gel fraction และค่า number average molecular weight ของส่วนที่ละลายจาก gel fraction จากยางชนิดต่าง ๆ

ตัวอย่างยาง	The molecular weight between crosslinks ($\times 10^5$)	Number average molecular weight ($\times 10^5$)
ยางเครพขาว	7.3	3.5
น้ำยางข้น	7.6	3.2
น้ำยางข้นโปรตีนต่ำ	11.0	3.3

หมายเหตุ. จาก เทคโนโลยียางธรรมชาติ *Natural Rubber Technology*, โดย จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์ (น. 34), 2553, กรุงเทพฯ: เทคโนโลยีซ คอมมิวนิเคชั่น.

จากที่ได้กล่าวมา โครงสร้างของส่วนเจล (gel phase) และส่วนที่ละลายได้หรือโซล (sol phase) สามารถเป็นไปดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยจุดที่เกิดการแตกกิ่งจะมี 2 ส่วนในสายโซ่โมเลกุลยาง ในส่วนของสายโซ่ที่เป็นการเชื่อมโยงประกอบด้วยโมเลกุลยาง 1-2 โมเลกุล ซึ่งในส่วนของโซลอาจไม่พบโครงสร้างการเชื่อมโยงในเชิงสามมิติ โดยส่วนที่เป็นหมู่ฟอสเฟตสามารถถูกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ทำให้ได้โมเลกุลที่ไม่สามารถเกิดโครงสร้างการเชื่อมโยงในเชิงสามมิติได้ เนื่องจากจุดที่จะเกิดการเชื่อมโยงได้ถูกกำจัดออกไปแล้วผ่านทางปฏิกิริยา



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างส่วนของเจลและโซลของยางธรรมชาติหลังจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จาก เทคโนโลยียางธรรมชาติ *Natural Rubber Technology*, โดย จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์, 2553, กรุงเทพฯ: เทคโนโลยีซ คอมมิวนิเคชันส์

2.2 น้ำยางชั้น

น้ำยางชั้นผลิตจากน้ำยางจากต้นยางพารา หรือ น้ำยางสด (fresh or field latex) ซึ่งมีสัดส่วนของปริมาณเนื้อยาง (Dry Rubber Content) เฉลี่ยประมาณ 35% ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber solid) 5% และน้ำ มาผ่านกระบวนการแปรรูปให้อยู่ในรูปของน้ำยางชั้นที่มีความเข้มข้นหรือมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content; DRC) ประมาณร้อยละ 60 น้ำยางชั้นเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตสินค้าอื่นๆ เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย หัวนมยาง ยางยืด และ กาว เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของน้ำยางชั้นได้เป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่

1. น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia: HA) จะใช้แอมโมเนีย 0.7% ต่อน้ำหนักยาง
2. น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia: LA) จะใช้แอมโมเนีย 0.2% ต่อน้ำหนักยาง และเติมสารละลายอื่นๆ ซึ่งทำให้ได้น้ำยางที่เหมาะสมสำหรับการเก็บไว้ใช้ประโยชน์ หรือเข้าสู่กระบวนการผลิตเพื่อทำผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามความต้องการของผู้ใช้

2.2.1 วิธีการทำน้ำยางข้น

การทำน้ำยางข้น ในเชิงพาณิชย์สามารถทำได้ 4 วิธี ดังนี้

1). การใช้เครื่องปั่น

การผลิตน้ำยางข้นทำได้โดยการนำน้ำยางสดที่ถูกรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย หรือผสมสารรักษาสภาพ เช่น เตตระเมทิลไทอูเรมไดซัลไฟด์กับซิงค์ออกไซด์ (Tetramethyl Thiuram Disulphide/ Zinc Oxide; TMTD/ ZnO) มาตรวจสอบคุณภาพของน้ำยางจากแหล่งต่างๆ โดยการเก็บตัวอย่างเพื่อทดสอบหาปริมาณเนื้อยางแห้ง และสถานะของการเก็บรักษาความเสถียร ซึ่งได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย และค่าปริมาณกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acid; VFA No.) จากนั้น น้ำยางสดเหล่านี้จะถูกลำเลียงลงในถังรวมขนาดใหญ่เพื่อรอปั่นเข้าเครื่องปั่น โดยเครื่องปั่นน้ำยางข้น มีอัตราการผลิตต่างๆ หากเป็นเครื่องเล็กจะผลิตได้ประมาณ 15 ลิตร/ชั่วโมง และหากเป็นเครื่องใหญ่ ระดับอุตสาหกรรมจะผลิตได้ประมาณ 400-600 ลิตร/ชั่วโมง ซึ่งปกติจะเดินเครื่องผลิตต่อเนื่องได้ไม่เกิน 3 ชั่วโมง โดยจะหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดและล้างตะกอน (sludge) ที่ติดอยู่ในหัวปั่นและจาน แยกน้ำยาง เมื่อน้ำยางสดถูกปั่นเข้าเครื่องปั่นแล้วนั้น เครื่องปั่นจะแยกน้ำยางสดเป็นส่วนของน้ำยางข้นที่มีเนื้อยางแห้ง (dry rubber content; DRC) ไม่น้อยกว่า 60% และส่วนของหางน้ำยาง (skim latex) ที่มีเนื้อยางแห้งประมาณ 3-6% รวมทั้งแยกสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber contents) ออกจากน้ำยาง ซึ่งทำให้น้ำยางข้นมีสิ่งอื่นๆ เจือปนลดลงด้วย ส่วนของหางน้ำยางจะถูกแปรรูปเป็น ยางสกิมบล็อคหรือยางสกิมเครพ โดยการลดปริมาณแอมโมเนีย (deammoniation) และทำให้ยางจับตัว (coagulation) ด้วยกรด ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้กรดกำมะถัน และส่วนของน้ำยางข้นจะถูกเติมและปรับ ปริมาณแอมโมเนีย และสารรักษาความเสถียรของน้ำยาง เช่น แอมโมเนียมลอเรต จากนั้นจึงลำเลียง ออกจากโรงงานเพื่อรอจำหน่ายต่อไป

2). การใช้วิธีการระเหยน้ำ

การทำน้ำยางข้นโดยวิธีการระเหยน้ำออกจากน้ำยางสดนั้น เริ่มจากทดสอบ คุณภาพน้ำยางสดที่ได้รวบรวมจากแหล่งต่างและรักษาสภาพ จากนั้นจึงนำเข้าสู่กระบวนการระเหย น้ำซึ่งควบคุมความดันต่ำและอุณหภูมิสูงซึ่งส่วนประกอบของน้ำยางข้นจากการระเหยน้ำโดยประมาณ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3

แสดงส่วนประกอบของน้ำยางชั้นโดยวิธีการระเหยน้ำ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
สารของแข็ง	75
ยาง	60
Caustic potash	1.5
สารเพิ่มความเสถียร โปรตีนและอื่นๆ	13.5

หมายเหตุ. จาก เทคโนโลยีน้ำยาง *Latex Technology*, โดย วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2555, กรุงเทพมหานคร: วนิตการพิมพ์.

น้ำยางชั้นที่ได้จากการระเหยน้ำจะมีความเสถียรสูง จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการเติมสารตัวเติมปริมาณมาก เช่น การใช้งานในรูปของผสม latex-cement อีกทั้งยังมีจุดเด่นมากเมื่อการใช้งานต้องการความเหนียวติด ซึ่งเป็นผลของปริมาณสารอื่นๆที่ไม่ใช่ยางและความเสถียรสูงของน้ำยาง โดยตัวอย่างการนำไปใช้งาน เช่น การใช้เป็น binder or adhesives, modify bitumen or asphalt

3). การใช้วิธีครีมมิ่ง

การเกิดครีมมิ่งนี้จะเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของอนุภาคที่กระจัดกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว ซึ่งความหนาแน่นของอนุภาคน้อยกว่าความหนาแน่นของตัวกลาง เช่นกรณีของน้ำยาง หากอนุภาควางมีความหนาแน่นประมาณ 0.93 Mg m^{-3} จะมีแนวโน้มลอยสู่ผิวหน้าของตัวกลาง ก็คือ เซรุ่ม ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 Mg m^{-3} โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้คือครีมมิ่ง ซึ่งส่วนที่ชั้นที่ลอยอยู่บนผิวของตัวกลางคือ ส่วนของครีมหรือน้ำยางชั้น และส่วนที่อยู่ด้านล่างของน้ำยางชั้นคือสกิม ซึ่งเป็นส่วนที่เจือจางของน้ำยาง และเนื่องจากความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาควางจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาควาง ซึ่งการเกิดครีมมิ่งจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่ออนุภาควางมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นในการทำน้ำยางโดยการครีมมิ่ง จะเติมสารประเภท water-soluble hydrocolloids หรือ creaming agent เช่น ammonium หรือ sodium alginate, locust bean gum, gum tragacanth, methyl cellulose เป็นต้น เพื่อทำให้อนุภาควางมีขนาดใหญ่ขึ้นและหยุดการเคลื่อนซึ่งเป็นการเพิ่มและเร่งอัตราการเกิดครีมมิ่ง

ตัวอย่างขั้นตอนการผลิตน้ำยางชั้นโดยวิธีครีมมิ่ง คือ เริ่มจากการรวบรวมน้ำยางสดจากแหล่งต่างๆ แล้วเติมแอมโมเนียประมาณ 1% m/m สารละลาย creaming agent ประมาณ 0.1% m/m จากนั้นกวนน้ำยางประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้อีกประมาณ 40 ชั่วโมง น้ำยางก็จะเกิดการแยกชั้นเกือบสมบูรณ์ โดยแยกส่วนล่างซึ่งเป็นส่วนของสกิมออก และเติมแอมโมเนียในส่วนของน้ำยางครีมที่เหลืออยู่หลังจากการแยกส่วนสกิมออกไปประมาณ 0.8% m/m น้ำยางครีมที่ได้จะถูกรวบรวมไว้ในถังรวมนานหลายวัน เพื่อให้เกิดการครีมมิ่งที่สมบูรณ์ และทำการแยกส่วนของสกิมออกอีกครั้ง แล้วจึงกวนน้ำยางครีมเพียงเบาๆ 1-2 วัน เพื่อความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำออกจำหน่าย

ข้อดีของน้ำยางชั้นที่ได้จากการครีมมิ่ง คือ

1. มีอุปกรณ์และเครื่องการผลิตที่ง่าย สะดวก และมีราคาที่ไม่แพง
2. ไม่ต้องใช้พลังงานที่สูงในการผลิต
3. มีการสูญเสียส่วนของเนื้อยางไปกับส่วนของสกิมเพียงเล็กน้อย

ข้อเสียของน้ำยางชั้นที่ได้จากการครีมมิ่ง คือ

1. ใช้ระยะเวลาในการผลิตค่อนข้างนาน
2. อาจเกิดผลกระทบต่อสมบัติความเป็นคอลลอยด์ของน้ำยางและสมบัติของฟิล์มยางเนื่องจากการตกค้างของ creaming agent

ตารางที่ 2.5

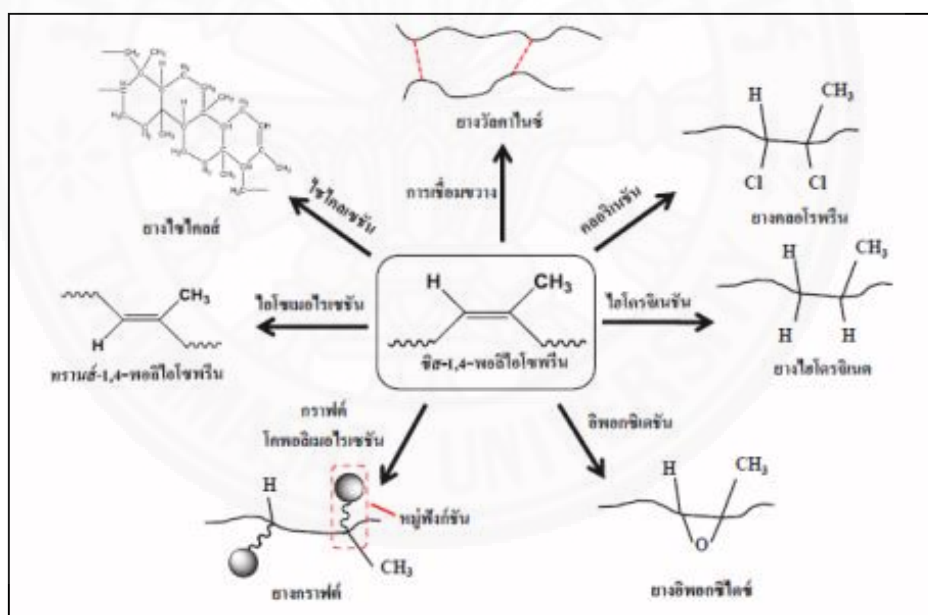
คุณสมบัติทางเคมีของน้ำยางชั้น (ต่อ)

Characteristic	ISO 2004 - 1997			มอก. 980 - 2533			Method of Test
	Limits			Limits			
	Type HA	Type LA	Type XA	Type HA	Type LA	Type XA	
Copper content, mg/kg of total solids, max.	8	8	8	8	8	8	ISO 8053
Manganese content, mg/kg of total solids, max.	8	8	8	8	8	8	ISO 7780
Sludge content, % (m/m), max.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	ISO 2005
Volatile fatty acid (VFA) number, max.	0,06 or as agree between two parties						ISO 506
KOH number, max.	0,07 or as agree between two parties						ISO 127

2.3 การปรับปรุงและดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติ

2.3.1 การดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติ

การปรับปรุงหรือดัดแปลงยางธรรมชาติ เป็นการพัฒนาคุณสมบัติยางธรรมชาติให้ดีขึ้น โดยนิยมนศึกษาและวิจัยการปรับปรุงคุณภาพผ่านกระบวนการทางเคมี เนื่องจากโครงสร้างยางธรรมชาติมีความไม่อิ่มตัวสูง จึงทำให้โครงสร้างของยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอนได้ง่าย โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอนสามารถเกิดได้ภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลหรือเป็นการเติมหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมไป ปฏิกิริยาที่บริเวณพันธะคู่ของคาร์บอน จึงเกิดเป็นพันธะเคมีขึ้นใหม่ โดยมีลักษณะและคุณสมบัติร่วมกันระหว่างยางธรรมชาติและหมู่ฟังก์ชันหรือมอนอเมอร์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา ซึ่งการปรับปรุงหรือดัดแปลงยางธรรมชาตินั้นมีหลายวิธีการ ดังภาพที่ 2.6 โดยวิธีการปรับปรุงหรือดัดแปลงยางธรรมชาติสามารถแบ่งตามวิธีการทางเคมีได้เป็น 3 วิธีการ ดังนี้ (Gelling and Porter, 1988)



ภาพที่ 2.6 วิธีการดัดแปลงยางธรรมชาติ จาก เทคโนโลยีการดัดแปลงยางธรรมชาติและการประยุกต์ใช้ (Natural Rubber Modification Technology and Its Applications), โดย สุวดี ก้องพารากุล, 2556.

1). การจัดเรียงพันธะเคมีใหม่ (Modification by bond rearrangement)

เป็นวิธีที่จะไม่มีอะตอมใหม่บนโมเลกุลของยางธรรมชาติ อาทิ เช่น ปฏิกริยาไซโคลเซชัน (Cyclization), ปฏิกริยาการเปลี่ยนไอโซเมอร์ซิสทรานส์ (cis, trans-Isomerization) โดยวิธีการตัดแปลงยางธรรมชาติด้วยการจัดเรียงพันธะใหม่นี้จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น ยางธรรมชาติเหลว (Liquid natural rubber ; LNR), ยางธรรมชาติไฮโดรจีเนท (Hydrogenated natural rubber ; HNR) และยางไซโคลส์ (Cyclized rubber)

2). การเพิ่มหมู่เคมี (Attachment of new chemical groups)

เป็นวิธีการตัดแปลงโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยผ่านกลไกของปฏิกริยาการเติม (Addition reaction) หรือปฏิกริยาแทนที่ (Substitution reaction) ซึ่งปฏิกริยานี้จะเกิดที่ตำแหน่งพันธะคู่ของโมเลกุลของยางธรรมชาติ และจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น ยางธรรมชาติคลอรีเนท (Chlorinated natural rubber ; CNR) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber ; ENR)

3). การเกิดปฏิกริยาการต่อกิ่ง (Modification by grafting reaction)

เป็นวิธีการตัดแปลงโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยการนำยางธรรมชาติมาทำปฏิกริยากับมอนอเมอร์ต่างๆ โดยปริมาณของยางธรรมชาติ มอนอเมอร์ ตัวริเริ่ม อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมในการทำปฏิกริยาเป็นปัจจัยหลักๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกราฟต์ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติร่วมกันระหว่างยางธรรมชาติและมอนอเมอร์นั้นๆ ที่นำมาทำปฏิกริยา ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2. 6

ตัวอย่างของมอนอเมอร์ ในการกราฟต์บนยางธรรมชาติ

มอนอเมอร์	รูปแบบยางธรรมชาติ	ตัวริเริ่ม	ผลิตภัณฑ์/การประยุกต์ใช้	อ้างอิง
สไตรีน	latex	บิวทิลไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และ เตตระเอทิลินเพนตา มีน (BHP/TEPA)	เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี	Songsing และคณะ (2013)
2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต	latex	คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (CHPO) และ TEPA	สารช่วยเพิ่มการยึดเกาะบนผิวไม้อัด	Yoopadee และคณะ (2009)
พอลิอะคริเลต (เมทิลอะคริเลต, เอทิลอะคริเลต, บิวทิลอะคริเลต, เฮกซิลอะคริเลต, ลอริลอะคริเลต)	latex	2,2'-อะโซบิส(2-เมทิลบิวไทโรไนไตรล์), 2,2'-อะโซบิส(4-เมทอกซี-2,4-ไดเมทิลวาเลโรไนไตรล์) และ CHPO	ฟิล์มใสที่มีพื้นผิวไม่มีขั้ว สามารถยึดตัวได้ดี ไม่มีรอยแตก	Ragupathy และคณะ (2011)
ไดเมทิล(อะคริโลอิล เมทิล)ฟอสโฟเนต และ ไดเมทิล(เมทาคริโลอิล ออกซีเอทิล)ฟอสโฟเนต	latex	N,N'-ไดเอทิลไดไฮโดรคาร์บาเมท ไตรไฮเดรท (DEDNa) และเตตระบิวทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (TBAB)	ใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในการผสมพอลิเมอร์มากกว่า 2 ชนิด เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน สามารถใช้เป็นวัสดุทนไฟ	Derouet และคณะ (2009)
ไดเมทิลอะมิโนเอทิล เมทาคริเลต		CHPO/TEPA	เพิ่มความมีขั้วของยางธรรมชาติ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารตัวเติมในการผสมพอลิเมอร์	Oliveira และคณะ (2005)
บิวทิลอะคริเลต	latex	รังสีแกมมา (โคบอลต์-60)	แผ่นฟิล์มทนต่อแรงดึง	Hossain และคณะ (2010)

ตารางที่ 2. 7

ตัวอย่างของมอนอเมอร์ ในการกราฟต์บนยางธรรมชาติ (ต่อ)

มอนอเมอร์	รูปแบบยางธรรมชาติ	ตัวริเริ่ม	ผลิตภัณฑ์/การประยุกต์ใช้	อ้างอิง
เมทิลเมทาคริเลต	latex	CHPO/TEPA	วัสดุทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์	Rezaifard และคณะ (1994)
เมทิลเมทาคริเลต	latex	รังสีแกมมา (โคบอลต์-60)	ใช้เป็นสารยึดติดในอ็อกซีเรซิน	George และคณะ (1987)
มาเลอิกแอนไฮไดรด์	ยางแท่ง	เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์	สารเพิ่มความเข้ากันได้	Nakason และคณะ (2004)
แป้ง	latex	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	เยื่อเลือกผ่านสำหรับควบคุมการปลดปล่อยยูเรียในปุย	Riyajan และคณะ (2012)
อะครีโลไนไตรล์	latex	รังสีแกมมา (โคบอลต์-60)	วัสดุทนน้ำมัน	Claramma และคณะ (1989)
สไตรีน/อะครีโลไนไตรล์		เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์	สารเพิ่มความเข้ากันได้	Angnanon และคณะ (2011)

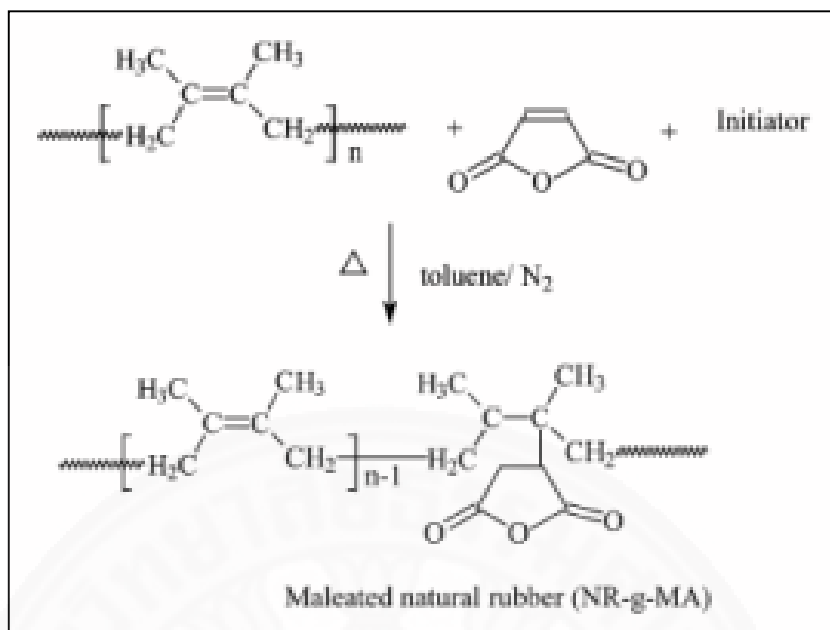
หมายเหตุ. จาก เทคโนโลยีการดัดแปรยางธรรมชาติและ การประยุกต์ใช้ (Natural Rubber Modification Technology and Its Applications), โดย สุวดี ก้องพารากุล, 2556.

2.3.2 การดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยมาเลอิก แอนไฮไดรด์

การดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติ โดยใช้ปฏิกิริยาการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride ; MA) บนยางธรรมชาติ คือ การแตกตัวของโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยใช้สารเคมีเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) หรือการใช้ความร้อนเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Thermal initiator) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งการดัดแปลงโมเลกุลของยางธรรมชาตินี้ สามารถทำได้ทั้งในสถานะสารละลาย (Solution state), สถานะหลอมหรือบดผสม (molten state) และสถานะน้ำยาง (Latex state) ดังนี้

1). สถานะสารละลาย (Solution state)

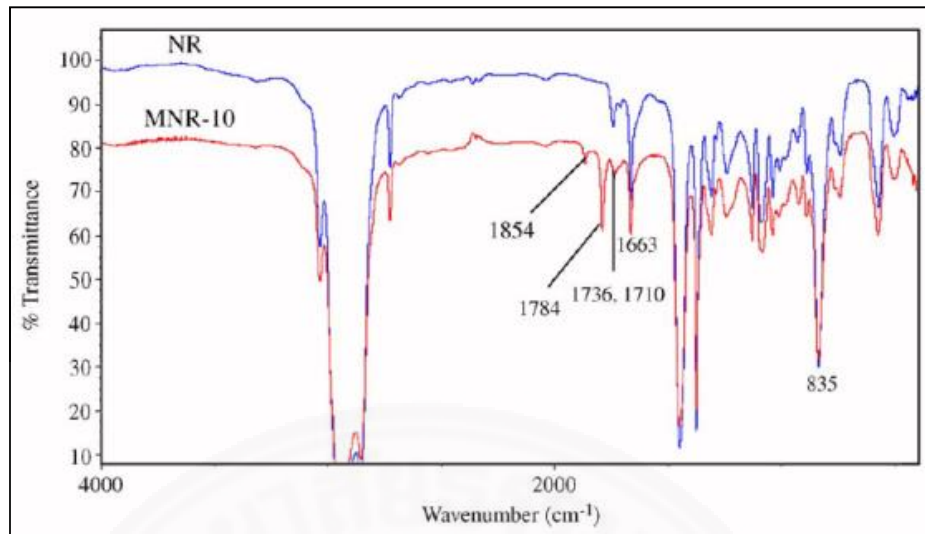
การทำปฏิกิริยาในสถานะสารละลายจะใช้สารเคมีเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งจะเป็นสารเคมีจำพวกเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ดังตัวอย่างการศึกษาของ Nakason,C และคณะ (2004) ได้ศึกษาการตอ่กิ่งของยางธรรมชาติกับมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (MA) โดยใช้ bezoyl peroxide (BPO) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งศึกษาผลจากความเข้มข้นของ monomer และ ตัวริเริ่ม ร่วมกับอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาของปฏิกิริยา และใช้วิธีการไทเทรต carboxylic acid และ IR absorbance ratio ในการวิเคราะห์หาปริมาณการตอ่กิ่งซึ่งจากการทดสอบและศึกษาจะพบว่า ปริมาณการตอ่กิ่งของ MA บนยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ monomer และตัวริเริ่ม การเพิ่มขึ้นของเวลาและอุณหภูมิของปฏิกิริยาส่งผลให้ระดับการตอ่กิ่ง ของ MA เพิ่มขึ้นได้อีกด้วย และที่ความเข้มข้นมากกว่า 3.0 phr อุณหภูมิมากกว่า 80°C และใช้เวลามากกว่า 2 ชั่วโมง ยังจะทำให้ปริมาณ gel content เพิ่มขึ้น นอกจากนี้หากต้องการเพิ่มค่า T_g ทำได้โดยเพิ่มความเข้มข้น monomer เข้าไปปฏิกิริยา



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาการกราฟต์ของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ จาก *The grafting of maleic anhydride onto natural rubber* (P35-41), by Nakason et al., 2004.

2). สภาวะหลอมหรือบดผสม (molten state)

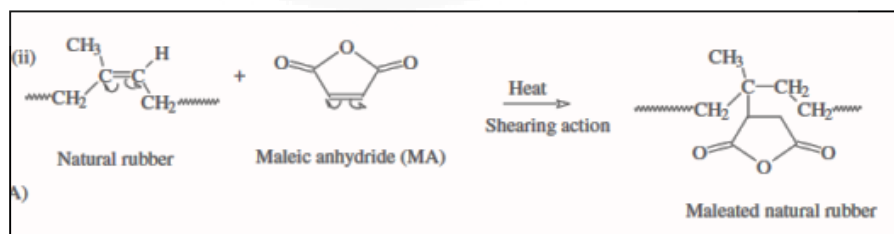
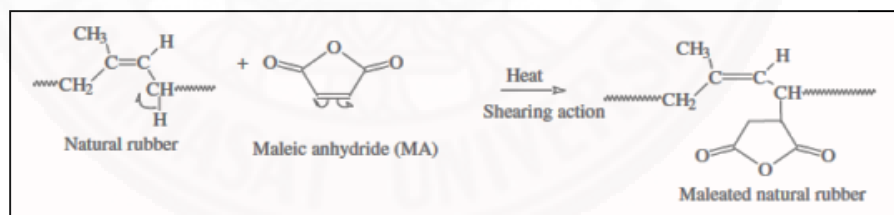
การทำปฏิกิริยาในสภาวะหลอมหรือบดผสม จะใช้ความร้อนและแรงเฉือนเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ในเครื่องบดผสมแบบระบบปิด (Internal mixer) โดยจะใช้อุณหภูมิที่สูง ซึ่งมีการค้นพบว่าหากใช้ปฏิกิริยานี้ในการต่อกิ่งมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ จะมีการต่อกิ่งจำนวนมากขึ้นและจะทำให้จำนวน gel content ลดน้อยลงได้อีกด้วย (Saedan, Navarat and Sombat, 1997) สูง ดังตัวอย่างการศึกษา Nakason, C และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการต่อกิ่งมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ โดยวิธีการบดผสมและใช้ความร้อน (Shearing action) ที่อุณหภูมิ 135°C เป็นตัวริเริ่ม ซึ่งปราศจากตัวริเริ่มที่เป็นสารเคมี โดยความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ใช้คือ 6, 8, 10 และ 12 phr ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10 นาที โดยจะพบว่า ปริมาณการต่อกิ่งจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ซึ่งจะใช้การทดสอบ FTIR ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า เกิดการดูดกลืนแสงในช่วง 1784 cm^{-1} และ 1854 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=O ที่เกิดจากการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ และในช่วง 835 cm^{-1} จะแสดงถึงพันธะ C-H ที่ต่อกับ C=C ของยางธรรมชาติ ดังแสดงในภาพที่ 2.8



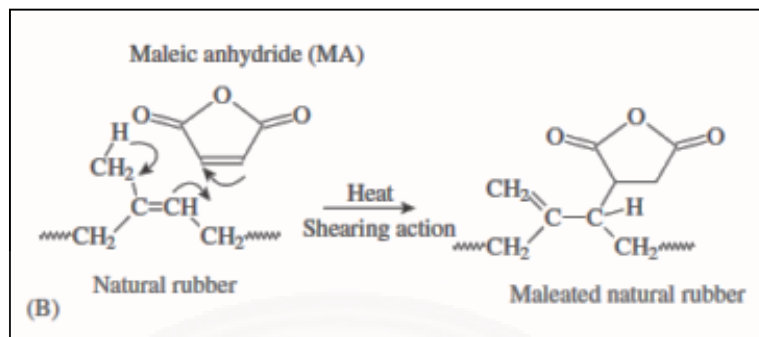
ภาพที่ 2.8 ผลการวิเคราะห์โดยวิธี FTIR ในการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์ 10 phr บนยางธรรมชาติ จาก *A general review of recent developments on chemical modification of NR*, by Hashim et al., 2002

โดยปฏิกิริยาการต่อกิ่งของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาตินี้ สามารถเกิดขึ้นได้ 2 ปฏิกิริยา ดังนี้

1. Free radical mechanism เป็นปฏิกิริยาเกิด free radical ที่อะตอมคาร์บอนของยาง



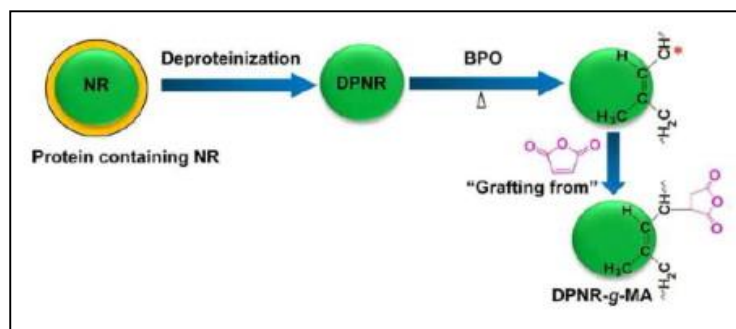
2. Diels-Alder reaction เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการแทนที่ของอะตอมไฮโดรเจนที่อะตอมคาร์บอนของยาง



3). สถานะน้ำยาง (Latex state)

การทำปฏิกิริยาในสถานะน้ำยางจะใช้สารเคมีเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

เช่นเดียวกับสถานะสารละลาย แต่ในสถานะน้ำยาง ยางธรรมชาติที่นำมาทำปฏิกิริยาจะอยู่ในสถานะของเหลว ดังตัวอย่างการศึกษาของ Wongthonga,P และคณะ (2013) ได้ศึกษาการตอกิงมาเลอิค แอนไฮโดรด์บนน้ำยางธรรมชาติที่สกัดโปรตีนออก (Deproteinized natural rubber ; DPNR) โดยใช้ benzoyl peroxide (BPO) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ดังภาพที่ 2.9 ซึ่งใช้ Potassium hydroxide (KOH) และ sodium carbonate anhydrous (Na_2CO_3) หรือ sodium bicarbonate (NaHCO_3) เป็นตัวรักษาความเป็นกรด-เบส ของระบบให้ได้เท่ากับ 10 และใช้ Isopropano และ Sodium dodecyl sulfate (SDS) เป็นตัวรักษาเสถียรภาพของระบบ จากนั้นใช้ FTIR ^1H NMR และ X-ray เป็นตัววิเคราะห์ประสิทธิภาพของการตอกิงมาเลอิค แอนไฮโดรด์ บนน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการตอกิงและการเกิด gel content ก็คือ ความเข้มข้นของตัวริเริ่ม (initiator) มอนอเมอร์ อุณหภูมิและเวลาของปฏิกิริยา โดยจากผลการศึกษาพบว่าการสกัดโปรตีนออกจากน้ำยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการตอกิงและลด gel content ได้โดยที่อัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพการตอกิงมากที่สุดคือ DPNR: MA: initiator = 85: 9: 6 (% โดยน้ำหนัก) ที่ 60°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง



ภาพที่ 2.9 แบบจำลองของกระบวนการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติที่สกัดโปรตีนออก จาก *Modification of deproteinized natural rubber via grafting polymerization with maleic anhydride*, by Wongthong et al., 2013

2.4 การฉายรังสีแกมมาเพื่อปรับโครงสร้างของพอลิเมอร์

2.4.1 ความรู้พื้นฐานของรังสี

รังสี (Radiation) คือพลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดรังสีที่ไม่เสถียรผ่านอากาศหรือสสาร โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1). พลังงานที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดรังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพลังงานรูปแบบนี้จะไม่มีการดูดซับและกระจาย อาทิ เช่น คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด ความร้อน แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์

2). พลังงานที่แผ่ออกมาจะเป็นกระแสของอนุภาคที่เคลื่อนที่เร็ว ซึ่งพลังงานรูปแบบนี้จะมีทั้งมวลและประจุ อาทิ เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีคอสมิก หรือบางพลังงานอาจมีเฉพาะมวลแต่ไม่มีประจุ เช่น รังสีนิวตรอน เป็นต้น

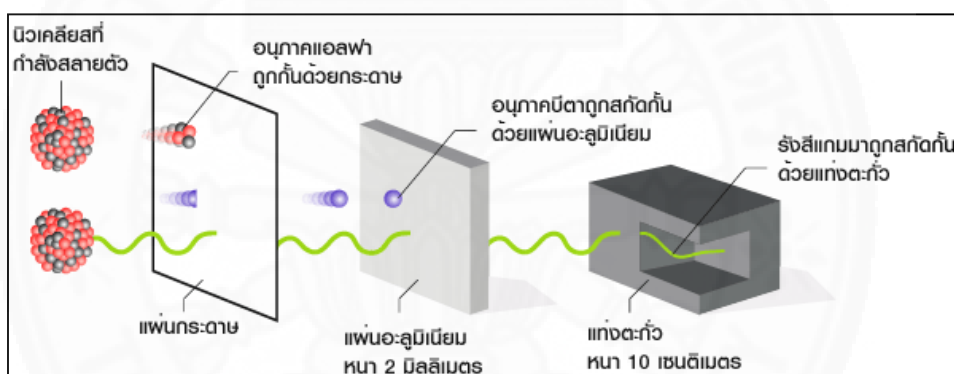
นอกจากนี้ถ้าจำแนกตามคุณสมบัติทางกายภาพ จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1). รังสีชนิดก่อไอออน (Ionizing Radiation) คือ รังสีที่มีพลังงานสูงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม หรือโมเลกุลได้ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไม่ว่าจะเป็นอากาศหรือตัวกลางใด ๆ ทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต โดยรังสีชนิดนี้จะได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ อนุภาคนิวตรอนอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง โปรตอนที่มีความเร็วสูง รังสีเหล่านี้อาจทำให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้

2). รังสีชนิดไม่ก่อไอออน (Non-Ionizing Radiation) คือ รังสีที่เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะไม่ทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งได้แก่ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรด แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

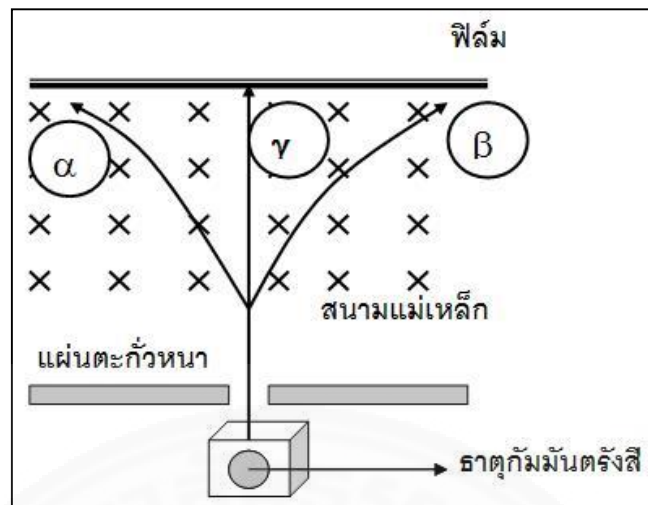
รังสีแกมมา (Gamma Rays)

รังสีแกมมาเป็นกัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ที่เกิดจากสภาวะความไม่เสถียรภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุที่เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotope elements) ซึ่งรังสีแกมมานี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีอำนาจทะลุทะลวงสูง จึงสามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ดี ดังแสดงในภาพที่ 2.10 และไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า เนื่องจากไม่มีประจุและมวล ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 ความสามารถในการทะลุผ่านของรังสีต่างๆ

(ภาพจาก <http://kranbaan.blogspot.com> สืบค้นเมื่อ 4 มีนาคม 2558)



ภาพที่ 2.11 ชนิดประจุของธาตุกัมมันตรังสีในสนามแม่เหล็ก

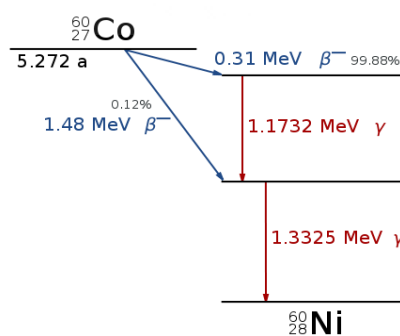
(ภาพจาก <http://www.myfirstbrain.com> สืบค้นเมื่อ 4 มีนาคม 2558)

ปฏิกิริยาการเกิดรังสีแกมมา

การแผ่รังสีแกมมา เกิดจากเสื่อมสลายของสารกัมมันตรังสี เช่น ธาตุเรเดียม ธาตุโคบอลต์-60 (Co-60) ซึ่งโคบอลต์-60 นี้เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของโคบอลต์-59 โดยมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 60 และไม่ปรากฏอยู่ในธรรมชาติ แต่สามารถผลิตขึ้นได้ โดยการนำนิวไคลด์ที่เสถียร ซึ่งก็คือ โคบอลต์-59 ไปอาบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ดังสมการนิวเคลียร์



โคบอลต์-60 ที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี ซึ่งมีครึ่งชีวิต 5.26 ปี และจะสลายตัวไปเป็นนิกเกิล-60 (Ni-60) โดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตาพลังงาน 0.318 Mev (ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) รังสีแกมมาพลังงาน 1.33 mev และ 1.17 Mev ดังสมการที่ (2)



(2)

มาตรวัด (measure) ที่เกี่ยวข้องกับผลทางชีววิทยา เมื่อต้องปฏิบัติงานกับ รังสีแกมมา ได้แก่

1). เอกซ์โพเชอร์ (exposure) เป็นการวัดความแรงของสนามรังสี ณ ตำแหน่งใด ๆ ในอากาศด้วยเครื่องสำรวจรังสี (survey meter) โดยจะวัดปริมาณของประจุ ซึ่งก็คือการแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุลในมวลจำนวนหนึ่งของอากาศ (ionization) หรือ ผลรวมของไอออนที่มีประจุเดียวกัน ที่เกิดขึ้นในมวลของอากาศ 1 หน่วย ที่โฟตอนปฏิสัมพันธ์ (interacting photons) ถูกดูดกลืนอย่างสมบูรณ์ในมวลนั้น มีหน่วยวัดที่นิยมใช้ คือ เรินต์เกน (roentgen: R) โดย 1 เรินต์เกน หมายถึง ปริมาณของพลังงานโฟตอนที่ต้องใช้ในการผลิต คู่ไอออน (ion pair) จำนวน 1.610×10^{12} คู่ ในอากาศแห้ง (ที่ 0°C) ปริมาตร 1 cm^3 (2.08×10^9 คู่ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP)) ทั้งนี้ ถ้าอากาศมีมวล 1 กิโลกรัม และสนามรังสีมีความแรง 1 เรินต์เกน จะสามารถสะสมประจุได้ 2.58×10^{-4} คูลอมป์

โดยการวัดรังสีในหน่วยนี้สามารถวัดได้โดยตรงด้วยเครื่องสำรวจรังสี แต่ก็สามารถใช้วัดได้เฉพาะสนามรังสีในอากาศเท่านั้น

2). ปริมาณรังสี (dose) หรือ ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose)

คือ ปริมาณของพลังงานที่รังสีชนิดก่อไอออนถ่ายโอนให้กับมวลของสสารส่วนที่พิจารณาอยู่ กล่าวคือ เกี่ยวข้องกับปริมาณการแตกตัวเป็นไอออนในอากาศที่เกิดจากรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา จนถึงระดับที่ก่อความเสียหายทางชีวภาพ (biological damage) แก่เนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในสนามรังสีนั้น โดยหน่วยของปริมาณรังสีดูดกลืนที่ใช้ทั่วไป คือ rad (radiation absorbed dose) ซึ่งมีนิยามว่า ปริมาณรังสีที่เทียบเท่ากับพลังงาน 100 เออร์ก ต่อ 1 กรัม ของน้ำหนักวัสดุที่พิจารณา และในหน่วยเอสไอ (SI unit) คือ “เกรย์” (gray ย่อว่า Gy) โดยมีนิยามว่า ปริมาณรังสีที่เทียบเท่ากับพลังงาน 1 จูล ต่อมวล 1 กิโลกรัม ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบหน่วยทั้งสองนี้ เมื่อ 1 จูลเท่ากับ 10⁷ เออร์ก และ 1 กิโลกรัมเท่ากับ 1000 กรัม จึงได้ว่า 1Gy เท่ากับ 100 rad โดยขนาดของปริมาณรังสีดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับ ความเข้ม (intensity) หรือ กัมมันตภาพ (activity) ของต้นกำเนิดรังสี ระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีไปยังวัสดุที่ได้รับรังสี และ ระยะเวลา ที่วัสดุนั้นได้รับรังสีนั้นๆ โดยกัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสี หมายถึง อัตราปริมาณรังสีนั่นเอง และอาจมีหน่วยเป็น แร็ดต่อชั่วโมง (rad/hr.) มิลลิเรินต์เกนต่อชั่วโมง (mR/hr.) มิลลิเกรย์ต่อวินาที (mGy/sec) เป็นต้น

3). ปริมาณรังสีสมมูล (dose equivalent)

ในกรณีที่รังสีเกิดปฏิสัมพันธ์กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (living tissue) สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ต้องพิจารณา ได้แก่ ชนิดของรังสี เนื่องจากในปริมาณรังสีที่ถ่ายโอนให้กับเนื้อเยื่อเท่า ๆ กัน รังสีบางชนิดจะส่งผลกระทบรุนแรง มากกว่ารังสีอื่น เช่น ในปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากันรังสีแอลฟา ก่อผลเสียหายแก่เนื้อเยื่อ มากกว่ารังสีบีตาประมาณ 20 เท่าตัว เมื่อคำนึงถึงความแปรผันดังกล่าวนี้ ต่อความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์จากการรับรังสี จึงใช้เป็น “ปริมาณรังสีสมมูล” โดยกำหนดว่าจะเท่ากับ “ปริมาณรังสีดูดกลืน คูณกับ ตัวประกอบคุณภาพ หรือ ตัวประกอบปรับแก้ (quality or adjustment factors)” ซึ่งมีความจำเพาะ ต่อศักยภาพความเสียหายทางชีวภาพของเนื้อเยื่อต่อรังสีชนิดนั้น ๆ

ดังนั้น ในศาสตร์ว่าด้วยการป้องกันรังสี จึงมีการพัฒนา ตัวประกอบเชิงคุณภาพ หรือ แฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor ย่อว่า Q) ขึ้นมาใช้สำหรับเป็นตัวถ่วงน้ำหนักของปริมาณรังสีดูดกลืน โดยเป็นการคำนึงถึง ความยังผลทางชีวภาพที่สันนิษฐานไว้ก่อน (presumed biological effectiveness.) กล่าวคือ รังสีชนิดที่ค่า Q สูงกว่า จะก่อความเสียหายต่อเนื้อเยื่อได้มากกว่า นั่นคือ เมื่อคูณปริมาณรังสีดูดกลืนด้วย Q จะได้เป็น ปริมาณรังสีสมมูล (dose equivalent) ซึ่งมีหน่วยพิเศษเรียกว่า เร็ม (rem ย่อมาจาก roentgen equivalent in man) และหน่วยเอสไอคือ ซีเวิร์ต (sievert ย่อว่า Sv) โดย 1 เร็ม เท่ากับ 0.01 ซีเวิร์ต ในสหรัฐอเมริกา หน่วยเร็มยังนิยมใช้ ในหมู่ผู้ปฏิบัติงานทางรังสี แต่ในอุตสาหกรรมกำลังเปลี่ยนมาใช้หน่วยเอสไอ ซึ่งก็คือ ซีเวิร์ต อนึ่ง ในกรณีการได้รับรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา ตัวประกอบเชิงคุณภาพเท่ากับ 1 ดังในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.8

แสดงตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) ของรังสีชนิดต่าง ๆ (สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข, 2558)

ชนิดของรังสี (Type of radiation)	แรด (Rad)	ตัวประกอบเชิง คุณภาพ (Q Factor)	เรม (Rem)	ซีเวิร์ต (Sievert)
รังสีเอกซ์ (X-Ray)	1	1	1	0.01
รังสีแกมมา (Gamma Ray)	1	1	1	0.01
รังสีบีตา (Beta Particles)	1	1	1	0.01
นิวตรอนช้า (Thermal Neutrons)	1	5	5	0.5
นิวตรอนเร็ว (Fast Neutrons)	1	10	10	0.1
อนุภาคแอลฟา (Alpha Particles)	1	20	20	0.2

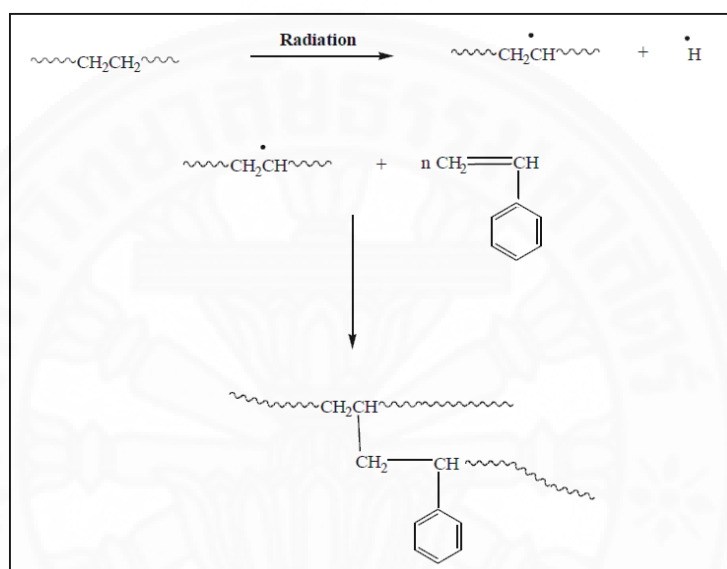
หมายเหตุ. จาก <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc55/content55/nstkc55-012.html> สืบค้นเมื่อวันที่ 5 มีนาคม 2558

4. อัตราปริมาณรังสี (dose rate)

อัตราปริมาณรังสี เป็นการวัดเวลาของการได้รับปริมาณรังสี โดยมักแสดงด้วยหน่วย เรินต์เกินต่อชั่วโมง (R/hr) มิลลิเรินต์เกินต่อชั่วโมง (mR/hr) เรมต่อชั่วโมง (rem/hr) มิลลิเรมต่อชั่วโมง (mrem/hr) การทราบอัตราปริมาณรังสีช่วยให้สามารถ คำนวณปริมาณรังสีที่ได้รับในเวลาช่วงหนึ่งได้ ยกตัวอย่าง สมมติว่า อัตราปริมาณรังสีเท่ากับ 0.8 เรมต่อชั่วโมง ผู้ที่ปฏิบัติงานในบริเวณนี้นาน 2 ชั่วโมง ก็จะได้รับปริมาณรังสีเท่ากับ 1.6 เรม เป็นต้น

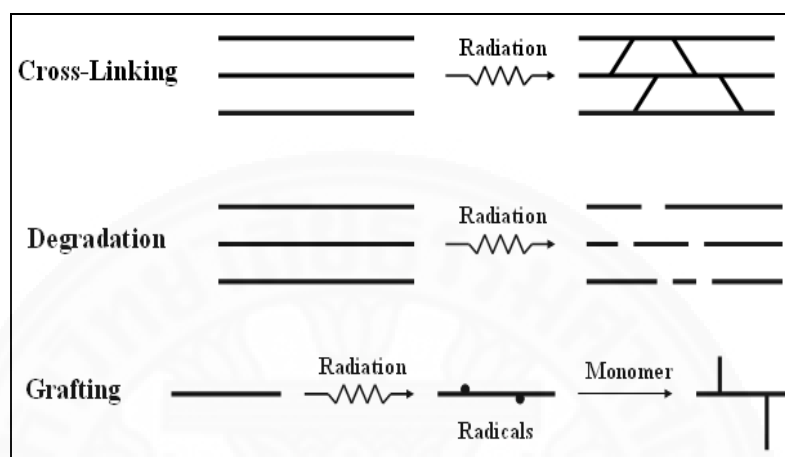
2.4.2 การฉายรังสีแกมมาในพอลิเมอร์

การฉายรังสี เช่น รังสีแกมมา (gamma rays) หรือ ลำอิเล็กตรอน (electron beam) พลังงานจากต้นกำเนิดรังสี จะถูกถ่ายโอนไปสู่พอลิเมอร์ ซึ่งพลังงานนี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยจะกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระบน โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ต้องการตัดแปลง จากนั้นมอนอเมอร์จะเข้าไปทำปฏิกิริยาการต่อกิ่งกับอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นดังกล่าว กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการต่อกิ่งของพอลิเมอร์ (ภาพจาก <http://www.seem.kmutt.ac.th> สืบค้นเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2558)

การฉายรังสีกับพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเหล่านี้ ดังแสดงภาพที่ 2.13 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้



ภาพที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ (ภาพจาก <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc5003/nkc5003f.html> สืบค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2558)

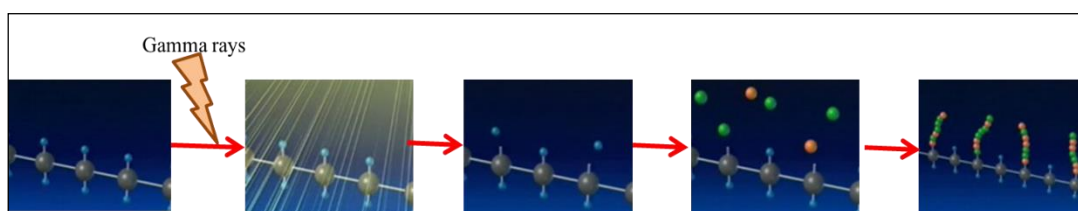
1). การเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (cross-linking) คือ การเกิดพันธะเคมี ที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ กลายเป็นโครงร่างที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น มีโครงสร้างแบบเชื่อมโยง (crosslink) หรือร่างแห (network) ดังภาพที่ 2.13 ทำให้ยางเปลี่ยนสมบัติจากอ่อนนิ่ม เป็นยางที่มีสมบัติแข็งและเหนียวขึ้น เหมาะแก่การใช้งาน ดังนั้นการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรม เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว ความทนทานต่อสารเคมี และสมบัติสำคัญอื่น ๆ



ภาพที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล โดยการฉายรังสี (ดัดแปลงจาก <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc5003/nkc5003f.html>)

2). การแตกสลายของพันธะเคมีของพอลิเมอร์ (degradation) การแตกสลายของพันธะเคมี จะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สั้นลง และมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ซึ่งส่งผลให้ขั้นตอนการขึ้นรูปของพอลิเมอร์นั้นทำได้ง่ายขึ้น

3). การต่อกิ่ง (grafting) คือ การต่อมอนอเมอร์เข้ากับพอลิเมอร์ เมื่อนำไปฉายรังสีหมู่ฟังก์ชัน (functional group) บางส่วน อาจหลุดจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ และกลายเป็นจุดตั้งต้นของปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (polymerization) ของมอนอเมอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสายโซ่ของพอลิเมอร์เส้นใหม่ที่เกาะอยู่บนพอลิเมอร์เส้นเดิม ดังภาพที่ 2.14 ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของพอลิเมอร์



ภาพที่ 2.15 กลไกการเกิดปฏิกิริยา polymerization

(ดัดแปลงจาก <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc5003/nkc5003f.html>)

2.4.3 การดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยการฉายรังสีแกมมา

จากการศึกษาของ Nguyen Tan Man และคณะ (2003) ได้ศึกษาผลของการต่อกิ่งยางธรรมชาติด้วย methyl methacrylate (MMA) และ styrene (St) โดยการฉายรังสีแกมมา ซึ่งผลของปริมาณการต่อกิ่งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของรังสี และปริมาณการต่อกิ่งที่ดีที่สุดของ methyl methacrylate คือที่ปริมาณรังสี 6 kGy โดยนอกจากปริมาณการต่อกิ่งของ methyl methacrylate จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของรังสีแกมมาแล้วยังเพิ่มขึ้นตามปริมาณของความเข้มข้นของ methyl methacrylate อีกด้วย โดยที่ปริมาณรังสี 6 kGy ที่ความเข้มข้นของ methyl methacrylate 25 phr, 50 phr และ 75 phr จะมีปริมาณการต่อกิ่ง 60%, 72% และ 80% ตามลำดับ ส่วนปริมาณการต่อกิ่งที่ดีที่สุดของ styrene คือที่ปริมาณรังสี 50 kGy ความเข้มข้นของ styrene 25 phr, 50 phr และ 75 phr จะมีปริมาณการต่อกิ่ง 46%, 51% และ 75% ตามลำดับ และเมื่อทดสอบความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และทดสอบหาค่า modulus จะพบว่า มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ monomer ซึ่งจะทำให้เห็นว่ายางต่อกิ่งด้วย methyl methacrylate และ styrene โดยการฉายรังสีมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งจะมีความยืดหยุ่นและสามารถทนต่อแรงดึงและการฉีกขาดได้ดีขึ้น

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำยาล้างจาน ที่มีเนื้อเยื่อ 60% ของยี่ห้อแห่งหนึ่ง ซึ่งซื้อจากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ประเทศไทย
2. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 99% (Sodium dodecyl sulfate; SDS) ยี่ห้อ Sigma Aldrich
3. โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH) ความเข้มข้น 85% ซื้อจากศึกษาภัณฑ์
4. โซเดียม คาร์บอเนต (sodium carbonate; Na_2CO_3) ความเข้มข้น 99.5% ซื้อจากศึกษาภัณฑ์
5. มาเลอิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride; MA) ความเข้มข้น 100% ยี่ห้อ Merck Schuchardt OHG
7. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride; CaCl_2) ความเข้มข้น 99% ยี่ห้อ Ajax Finechem
8. กรดฟอร์มิก (CH_2O_2) ความเข้มข้น 85% ซื้อจาก บริษัทแกมมาโก
8. พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactice acid); PLA) เกรด 4043D ซื้อจาก บริษัทเนเจอร์เวิร์ก
9. ยางแท่ง เกรด CV60 ซื้อจาก บริษัทศรีเจริญรับเบอร์

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

1. เครื่องบดผสม (Internal mixer) Mixer type 50 EHT รุ่น lab station ผลิต
โดยบริษัท Brabender



2. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (Compression machine) รุ่น PR1D-W300L300
HD ของบริษัท CHAREON TUT CO., LTD

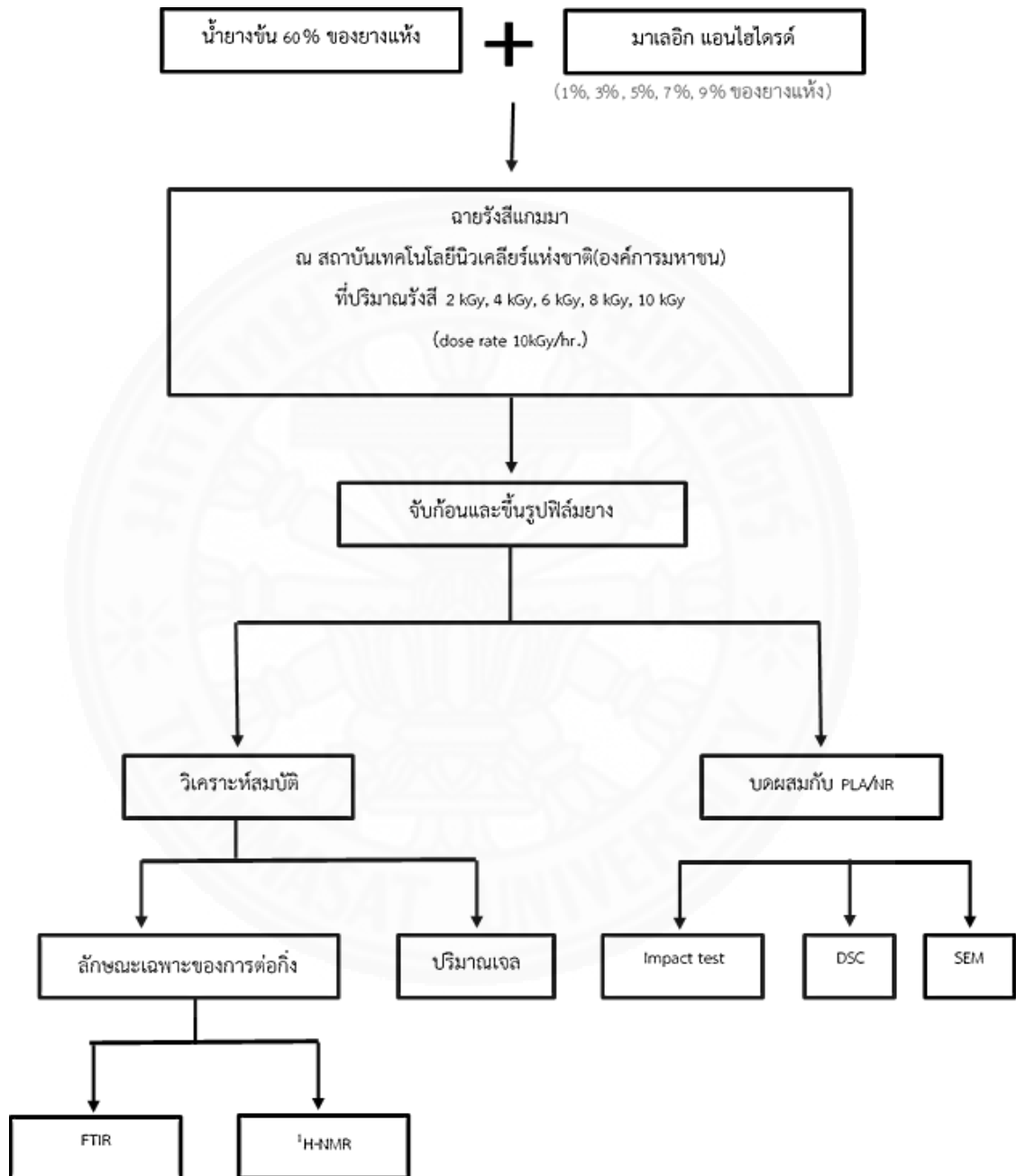


3. เครื่องฉายรังสีแกมมา (Co-60) โดยมี dose rate 10 kGy/hr. ณ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)



3.2 วิธีการทดลองและวิเคราะห์

3.2.1 แผนผังการทดลอง



ภาพที่ 3.1 แผนผังการทดลองและวิเคราะห์

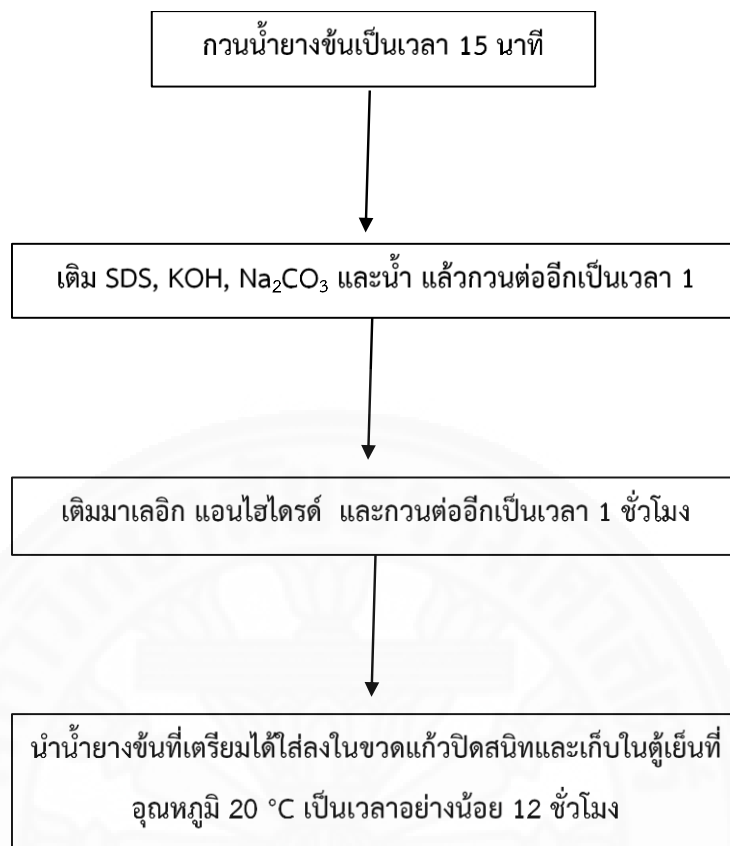
3.2.2 กระบวนการเตรียมน้ำยางชั้นที่บวมตัวด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ก่อนการฉายรังสี

ก่อนการฉายรังสี น้ำยางชั้นจะถูกทำให้บวมตัวด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยกระบวนการเตรียมจะประกอบไปด้วย สูตรดังตารางที่ 3.1 และขั้นตอนการเตรียมดังภาพที่ 3.2

ตารางที่ 3.1

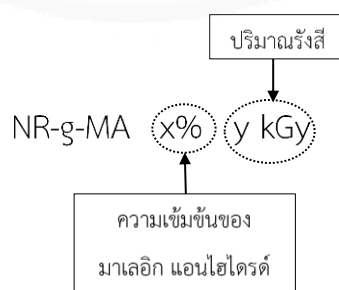
สูตรน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมา

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (g)
น้ำยางชั้นที่มีปริมาณยางแห้ง 60% (NRL)	100
โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS)	0.8
โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ (KOH)	0.4
โซเดียม คาร์บอเนต (Na_2CO_3)	0.4
น้ำกลั่น (Deionized water)	100
มาเลอิก แอนไฮไดรต์ (MA) ที่ความเข้มข้น 1%, 3%, 5%, 7%, 9% ของยางแห้ง	0.6, 1.8, 3, 4.2, 5.4



ภาพที่ 3.2 แผนผังการเตรียมน้ำยางข้นที่บวมตัวด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์

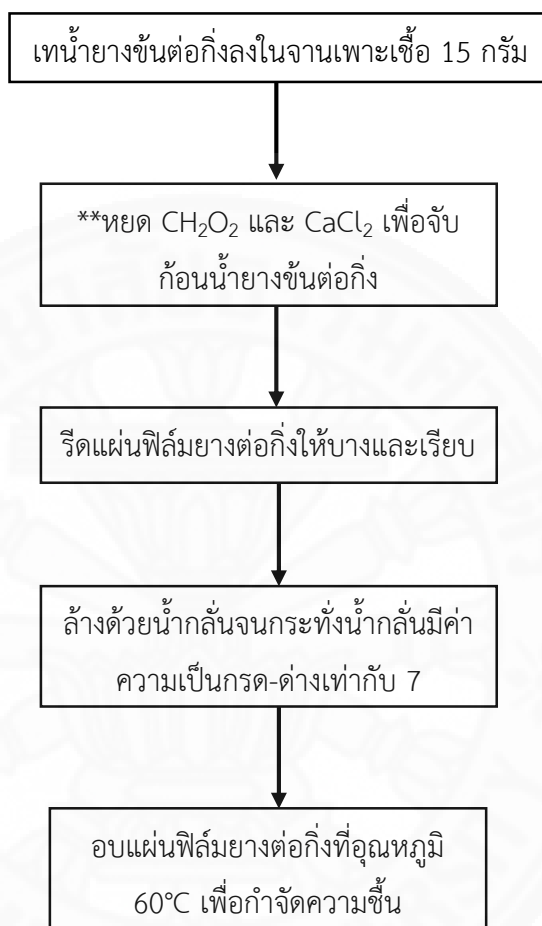
โดยน้ำยางข้นที่บวมตัวด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ หลังการฉายรังสีแล้วนั้น ยางที่ผลิตได้จะถูกเรียกชื่อตามปริมาณความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ และปริมาณรังสีที่ใช้ ซึ่งจะมีชื่อว่า NR-g-MA x% y kGy เมื่อ x คือ ปริมาณความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ และ y คือ ปริมาณรังสีที่น้ำยางได้รับ ดังนี้



ดังนั้น NR-g-MA จึงหมายถึง ยางจากน้ำยางต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสีแกมมา

3.2.3 การเตรียมชั้นรูปแผ่นฟิล์มยางตอกิ่ง

หลังจากฉายรังสี น้ำยางตอกิ่งที่ได้จะถูกนำไปจับก้อนและแยกออกจากน้ำเซรัม โดยกระบวนการดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3. 3 แผนผังการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มยางตอกิ่ง

** สาร coagulant ที่ใช้เพื่อจับก้อนน้ำยางชั้นตอกิ่งมี 2 ชนิด คือ

1. กรดฟอร์มิก (CH_2O_2) ที่ความเข้มข้น 20% wt/wt
2. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่ความเข้มข้น 25% wt/wt

โดยหยุด CaCl_2 2 ส่วน แล้วตามด้วย CH_2O_2 1 ส่วน สลับกันไปเรื่อยๆจนเกิดการจับก้อน ซึ่งที่ความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์สูงๆ ต้องใช้จำนวนหยดของสาร coagulant สูงขึ้นเช่นกัน

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของน้ำยางชั้นต่อกิ่ง

3.3.1 การทดสอบหาปริมาณเจลของยางต่อกิ่ง

- 1). แช่ในโทลูอีน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงกรองแยกเจล
- 2). แช่ในโทลูอีน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 สัปดาห์ (เก็บในที่มืด) แล้วจึงกรองแยกเจล
- 3). แช่ในโทลูอีน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 สัปดาห์ (เก็บในที่มืด) แล้วจึงปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกชั้นและกรองแยกเจล

$$\text{ปริมาณเจล (gel content)} = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100$$

เมื่อ m_0 คือ น้ำหนักแผ่นยางก่อนการละลายโทลูอีน

m_1 คือ น้ำหนักผ้า

m_2 คือ น้ำหนักยางรวมผ้าหลังกรองและอบ

3.3.2 การทดสอบหาปริมาณการตอกิ่ง

1). การทดสอบ FTIR

Fourier Transform Infrared (FTIR) เป็นอุปกรณ์ซึ่งใช้หลักการกระจายแสงของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงแสงอินฟราเรด โดยวัดความเข้มของแสงที่ถูกดูดซับโดยพันธะภายในโมเลกุลที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ซึ่งใช้เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน การเกิดพันธะและปริมาณการตอกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ บนสายโซ่โมเลกุลของน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้เครื่อง FTIR spectrometer โหมด Attenuated Total Reflectance (ATR) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum One ความละเอียด 4.0 cm^{-1} ช่วงแถบความยาวคลื่น $500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$

อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio; Ar) = $T_{\text{C-O}} / T_{\text{C-H}}$

$T_{\text{C-O}}$ = ปริมาณความเข้มข้นของ C-O ที่ตำแหน่งแถบการดูดกลืน 1215 cm^{-1} และ 1250 cm^{-1}

$T_{\text{C-H}}$ = ปริมาณความเข้มข้นของ C-H ที่ตำแหน่งแถบการดูดกลืน 1377 cm^{-1}

2). การทดสอบ $^1\text{H-NMR}$

Nuclear magnetic resonance (NMR) เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นวิทยุของนิวเคลียสในโมเลกุลของสารตัวอย่าง ซึ่งใช้เพื่อหาโครงสร้างและลักษณะการตอกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ บนสายโซ่โมเลกุลของน้ำยางธรรมชาติ ในรูปแบบสเปกตรัมของ ^1H โดยใช้เครื่อง NMR 500 Mhz ยี่ห้อ Bruker รุ่น Avance III HD และใช้สารละลาย deuterated chloroform (CDCl_3) วิเคราะห์สัญญาณ NMR ของโปรตอนในช่วง chemical shift ที่ $0 - 9 \text{ ppm}$

3.3.3 การทดสอบค่าต้านทานแรงกระแทก (Impact test)

1). การเตรียมตัวอย่างการทดสอบค่าต้านทานแรงกระแทก

การบดผสมยางต๋อกิ่งกับยางแท่งและ PLA จะบด โดยใช้เครื่องบดผสมระบบปิด (Internal mixture) ยี่ห้อ Barbender ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต โดยบดผสมที่ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที อุณหภูมิเริ่มต้น 160 °C เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งสูตรการบดผสมแสดง ดังตารางที่ 3.2 แล้วจึงขึ้นรูปเป็นแผ่นสำหรับทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทก (impact test) โดยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด และใช้แม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหนา 3 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 190 °C ความดัน 90 บาร์ เป็นเวลา 20 นาที

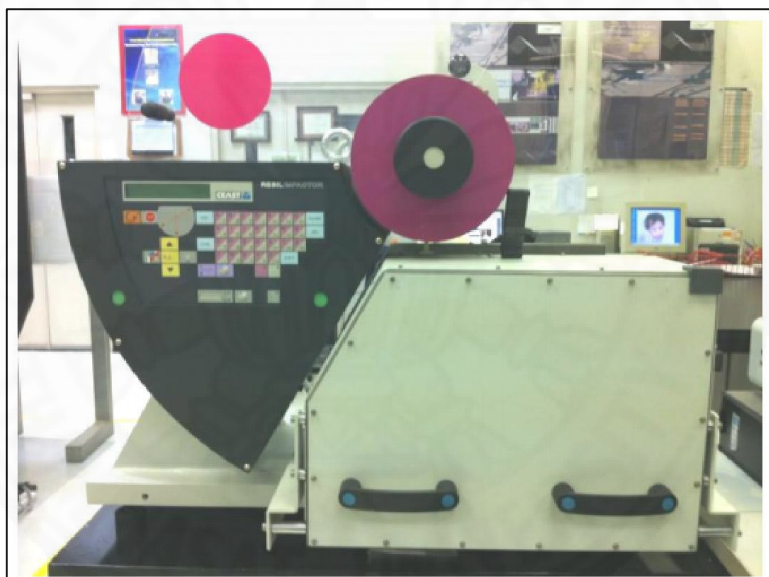
ตารางที่ 3.2

สูตรการบดผสมของยางต๋อกิ่งกับ PLA และยางแท่ง

สูตรที่	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณ PLA (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณยางแท่ง (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณยางต๋อกิ่ง (% โดยน้ำหนัก)
1	PLA	100	-	-
2	PLA/NR	90	10	-
3	PLA/NR/NRL	90	5	5
3	PLA/NR/NR-g-MA 1% 2 kGy	90	5	5
4	PLA/NR/NR-g-MA 3% 2 kGy	90	5	5
5	PLA/NR/NR-g-MA 5% 2 kGy	90	5	5
6	PLA/NR/NR-g-MA 7% 2 kGy	90	5	5
7	PLA/NR/NR-g-MA 9% 2 kGy	90	5	5
8	PLA/NR/NR-g-MA 9% 4 kGy	90	5	5
9	PLA/NR/NR-g-MA 9% 6 kGy	90	5	5
10	PLA/NR/NR-g-MA 9% 8 kGy	90	5	5
11	PLA/NR/NR-g-MA 9% 10 kGy	90	5	5

2). การทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทก

การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก เป็นการวัดพลังงานที่ทำให้วัสดุแตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทก แสดงผลในรูปของความสามารถในการดูดซับแรงหรือพลังงานที่เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานจลน์ของมวลที่เคลื่อนที่ไปยังตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ ซึ่งจะมีหน่วยเป็นจูลต่อความกว้างของตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ โดยการทดสอบสมบัติรับแรงกระแทกในงานวิจัยนี้เป็นแบบไอซอด (Izod Impact test) ด้วยเครื่อง Rasil Impactor ซึ่งจะตัดตัวอย่างชิ้นงานให้มีขนาดความกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ความยาว 63.5 มิลลิเมตร และมีความหนา 3 มิลลิเมตร แล้วจึงบากชิ้นงานบริเวณกึ่งกลางเป็นรูปตัววี (V) และนำชิ้นงานที่ได้ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 23 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 1 วัน ก่อนการทดสอบเพื่อคลายความเค้น (stress relaxation) จากนั้นจึงนำไปทดสอบหาค่าต้านทานแรงกระแทก โดยค้อนขนาด 2.7 จูล กระแทกบนชิ้นงานด้วยความเร็ว 3.46 เมตรต่อวินาที



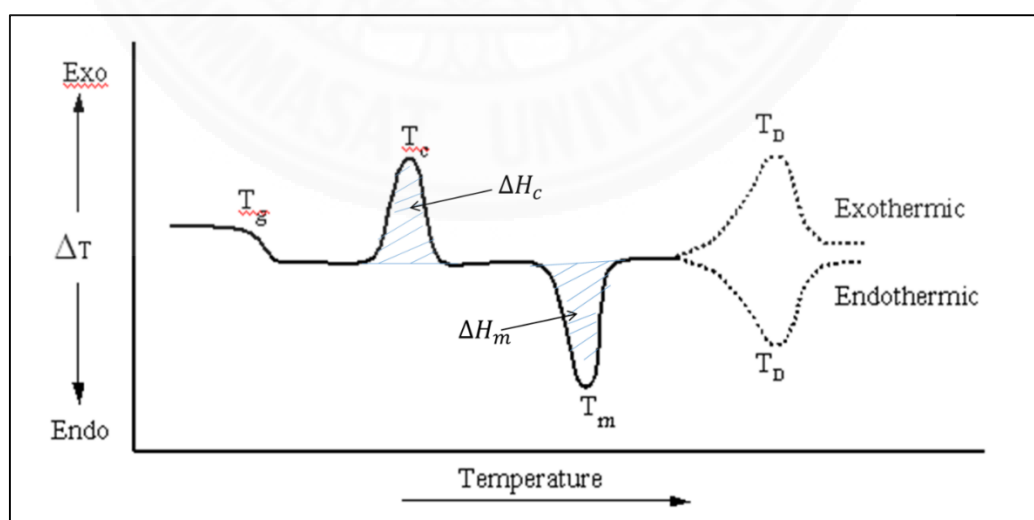
3.3.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลลอรี่มิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC) จะให้ความร้อนกับตัวอย่างครั้งที่ 1 (1st heating) ที่อุณหภูมิ 25°C - 200°C และอัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที แล้วลดความร้อนลงจนถึง 25°C ที่อัตราการให้ความเย็น -5°C/นาที จากนั้นจึงให้ความร้อนกับตัวอย่างครั้งที่ 2 (2nd heating) ที่อุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนเท่ากับครั้งที่ 1 เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อน อันได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature; T_m) อุณหภูมิการตกผลึก crystallization temperature; T_c) เอนทัลปีในการหลอมเหลว (enthalpy of melting; ΔH_m) และเอนทัลปีในการตกผลึก (enthalpy of crystallization; ΔH_c) ดังแสดงในภาพที่ 3.4 โดยปริมาณผลึก (% crystallinity) สามารถหาได้จากสมการ (3.1)

$$\text{crystallinity (\%)} = \frac{\Delta H_m - \Delta H_c}{(X_{PLA})(\Delta H_f)} \times 100$$

เมื่อ X_{PLA} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA (weight fraction)

ΔH_f คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวของ PLA ที่ตกผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 93.1 J/g
(Lim, Auras, Rubino, 2008, p.824)



ภาพที่ 3.4 เทอร์โมแกรมจากการทดสอบ DSC

3.3.5 การทดสอบโครงสร้างและการกระจายตัวของยางธรรมชาติใน PLA

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้แสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิว การกระจายตัวของอนุภาค ขนาดอนุภาค เป็นต้น โดยภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดนี้จะเป็นภาพ 2 มิติ และการทดสอบการกระจายตัวของยางตอกิ่งใน PLA นี้ทำได้โดยการนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วไปตัดเป็นแท่งเล็ก ๆ ขนาดพื้นที่หน้าตัด 2x2 ตารางมิลลิเมตร และให้มีความยาวพอสมควร จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปแช่ในไตรเจนเหลวเป็นเวลา 30 นาที และนำขึ้นมาหักทันที แล้วนำตัวอย่างที่หักได้ไปเคลือบผิวหน้าด้วยทองเป็นเวลา 220 วินาที และนำไปตรวจสอบดูสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด ยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-3400N Type II ที่ 15 kV กำลังขยาย 1000 เท่า และ 5000 เท่า และใช้โปรแกรม Image J เพื่อวัดขนาดอนุภาคยางเฉลี่ยใน PLA

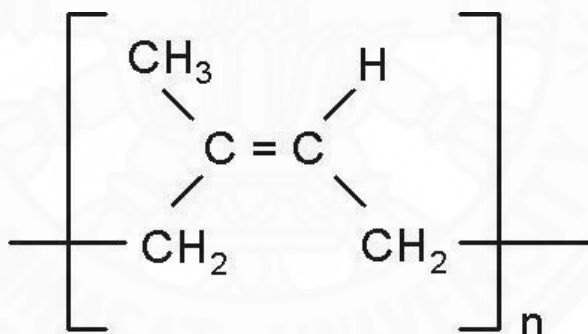
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

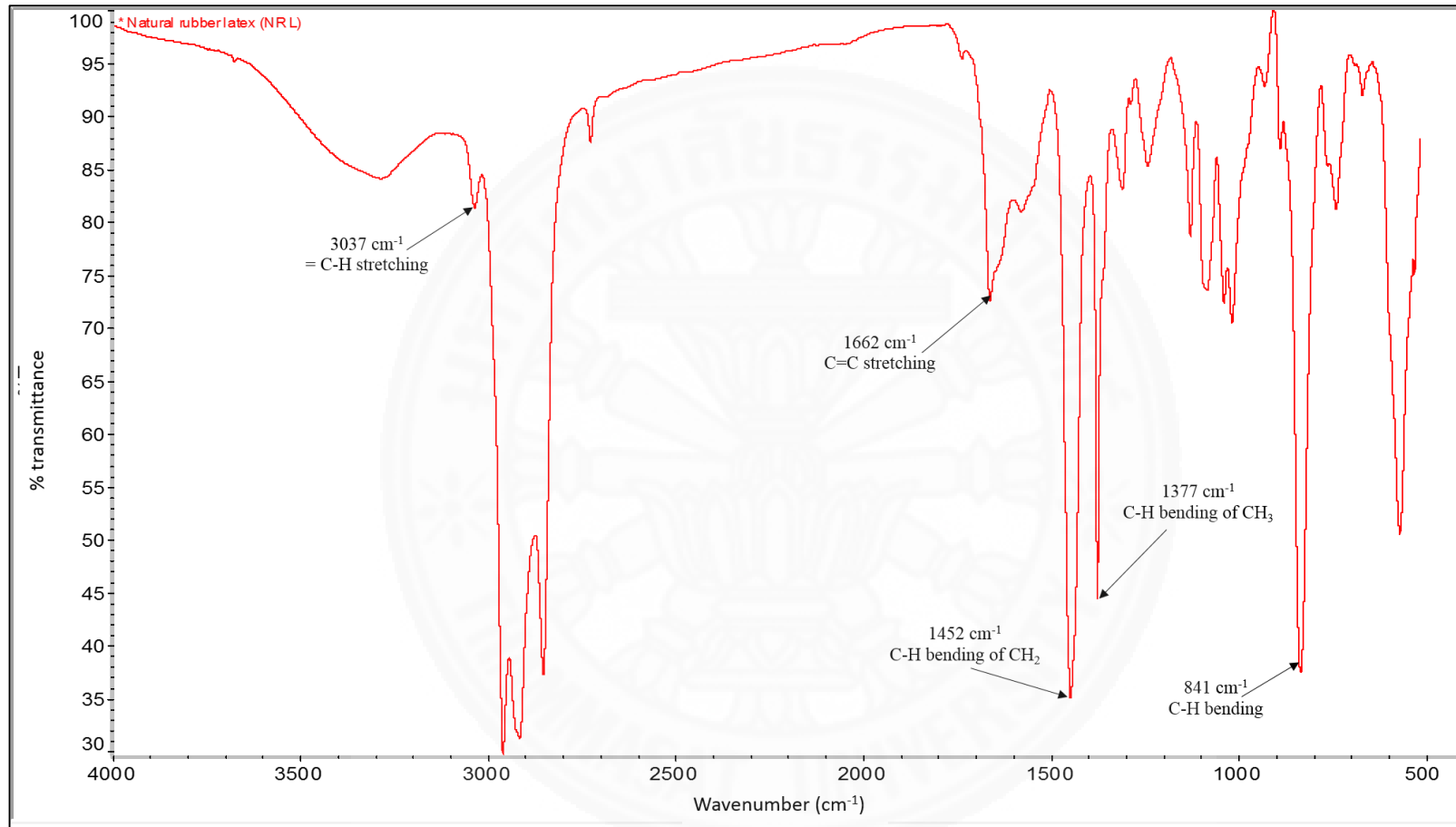
4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของน้ำยางชั้น 60% ของยางแห้งที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นก่อนการตอ่กิ่ง

น้ำยางชั้นมีหน่วยโครงสร้างของพอลิไอโซพรีนตามสูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ ดังภาพที่ 4.1 โดยการทดสอบ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ดังภาพที่ 4.2 พบว่ามีการปรากฏของแถบการดูดกลืนต่างๆ ได้แก่ แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3037 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ =C-H stretching , แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1662 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีค C=C ของหมู่แอลคีน (Alkene), แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1452 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C-H bending ของเมทิลีน (CH_2), แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1377 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ C-H bending ของเมทิล (CH_3) และ แถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 841 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีค =C-H bending ที่ต่อกับ C=C



ภาพที่ 4.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ (ภาพจาก <http://www.at-thai.com/index.php/9-knowlege-products?start=4> สืบค้นเมื่อ 25 มกราคม 2558)

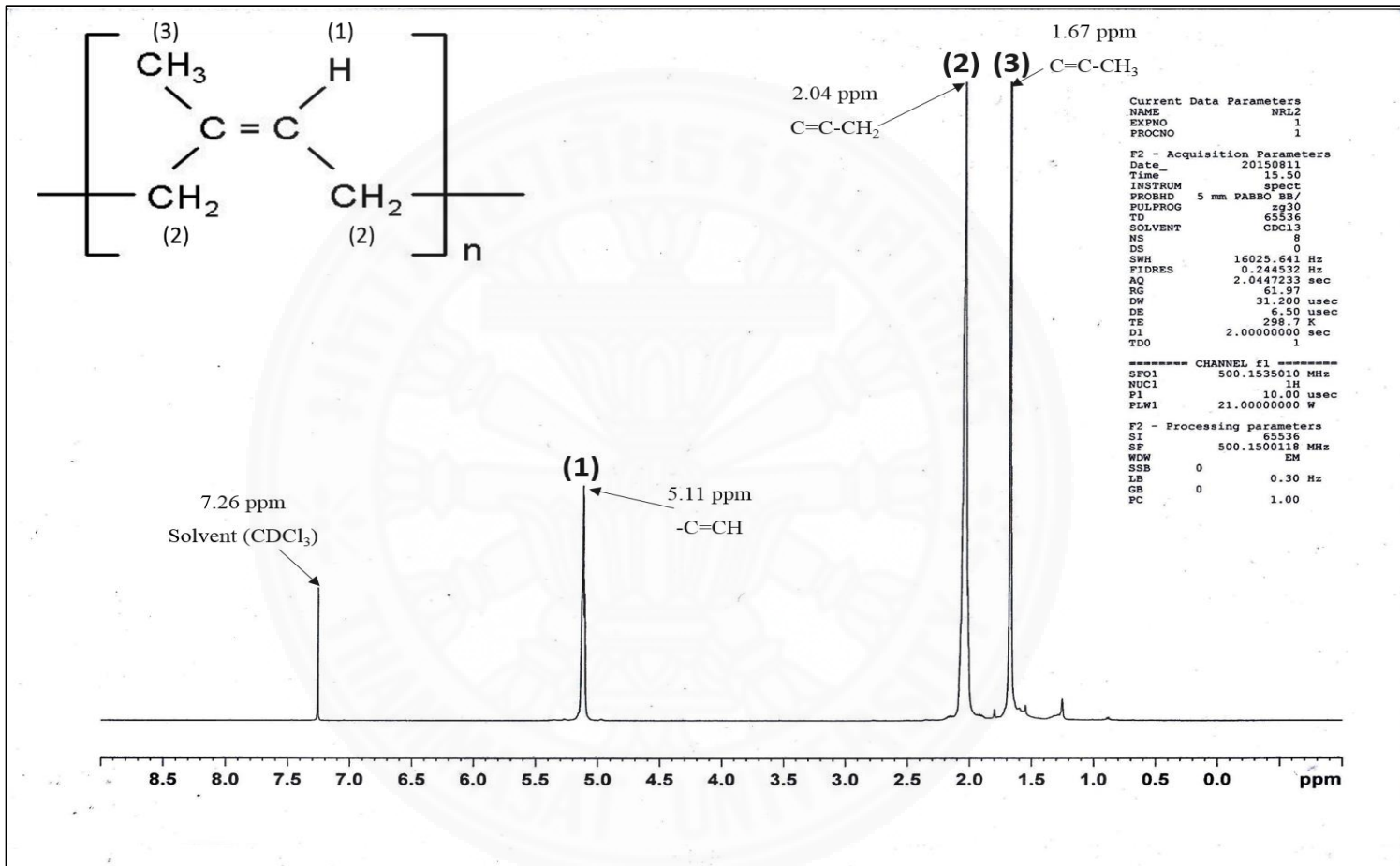


ภาพที่ 4.2 ผลการทดสอบ FTIR ของแผ่นฟิล์มน้ำยางชั้น ในงานวิจัย

4.1.2 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางชั้นก่อนการตอ่กิ่ง

จากการศึกษาและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของน้ำยางชั้น โดยการทดสอบ Proton Nuclear Magnetic Resonance ($^1\text{H NMR}$) ดังภาพที่ 4.3 พบว่ามีการปรากฏตำแหน่ง chemical shift ต่างๆ โดยปรากฏพีคของตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (Chloroform) ซึ่งใช้ในการละลายยางที่ตำแหน่ง 7.26 ppm ส่วนพีคที่แสดงโปรตอนของหน่วยย่อยไอโซพรีนซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติ ได้แก่ พีคตำแหน่งที่ 5.11 ppm ซึ่งเป็นพีคที่แสดงโปรตอนของ $=\text{CH}$, พีคตำแหน่งที่ 2.04 ppm ซึ่งเป็นพีคที่แสดงโปรตอนของ $\text{C}=\text{C}-\text{CH}_2$ และพีคที่ตำแหน่ง 1.67 ppm ซึ่งเป็นพีคที่แสดงโปรตอนของ $\text{C}=\text{C}-\text{CH}_3$



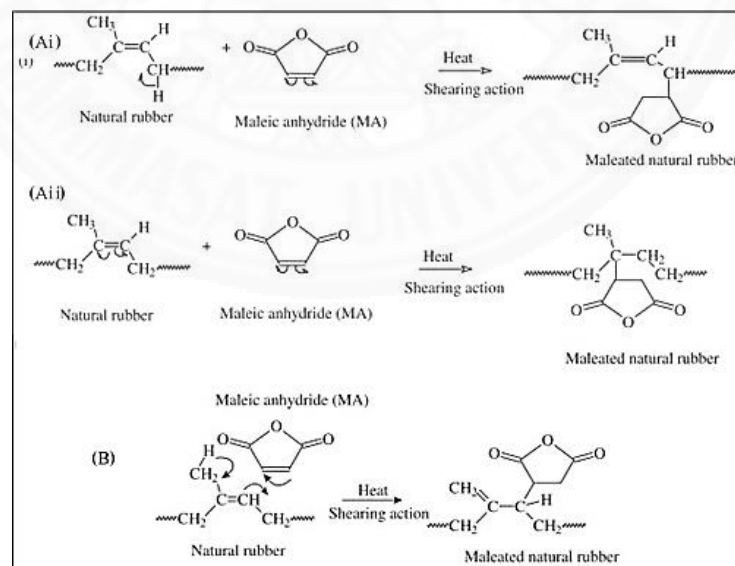


ภาพที่ 4.3 ผลการทดสอบ ¹H-NMR ของแผ่นฟิล์มน้ำยางชั้น ในงานวิจัย

4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการตอ่กิ่งและปริมาณเจลของน้ำยางชั้นหลังการทำปฏิกิริยา

4.2.1 ลักษณะเฉพาะของโครงสร้างหลังการทำปฏิกิริยาการตอ่กิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรต์ บนน้ำยางชั้นโดยการฉายรังสีแกมมา

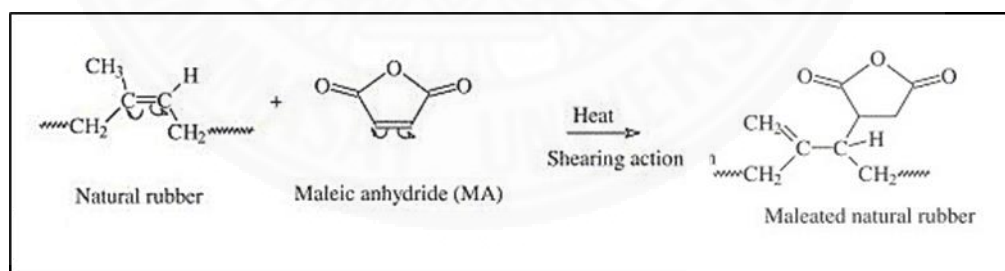
จากการศึกษาวิจัยของ C.Nakason และคณะ (Nakason et al., 2006) ได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับมาเลอิก แอนไฮไดรต์โดยวิธีการบดผสมแบบใช้เครื่องบดผสมภายใน (Internal mixer) ซึ่งสามารถเป็นไปได้อีก 2 แบบ คือ (A) Free radical mechanism และ (B) Diels-Alder reaction ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ Free radical mechanism (Ai) มีการตอ่กิ่งที่พันธะของคาร์บอนที่ตำแหน่งถัดจากตำแหน่งพันธะคู่ C=C (allyl group) โดยเป็นการทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่ง CH₂ ของโมเลกุลยาง จึงทำให้ตำแหน่งนั้นเกิดเป็นพันธะ =C-CH ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาแบบ Free radical mechanism (Ai) จะทำให้ปริมาณของ CH₂ ลดลง และปริมาณของ CH เพิ่มขึ้น ส่วนกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ Free radical mechanism (Aii) และ (B) Alder-ene reaction มีการตอ่กิ่งที่พันธะคู่ C=C ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาแบบ Free radical mechanism (Aii) จะทำให้ปริมาณพันธะคู่ C=C ลดลง แต่การเกิดปฏิกิริยาแบบ (B) Diels-Alder reaction นั้น จะทำให้พันธะคู่ C=C นั้นย้ายไปที่ตำแหน่ง CH₃ เกิดเป็นพันธะ -C=CH₂ จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาแบบ (B) Diels-Alder reaction จะไม่ทำให้จำนวนของพันธะคู่ C=C ลดลง แต่จะทำให้ปริมาณของ CH₃ ลด และปริมาณของ CH₂ เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.4



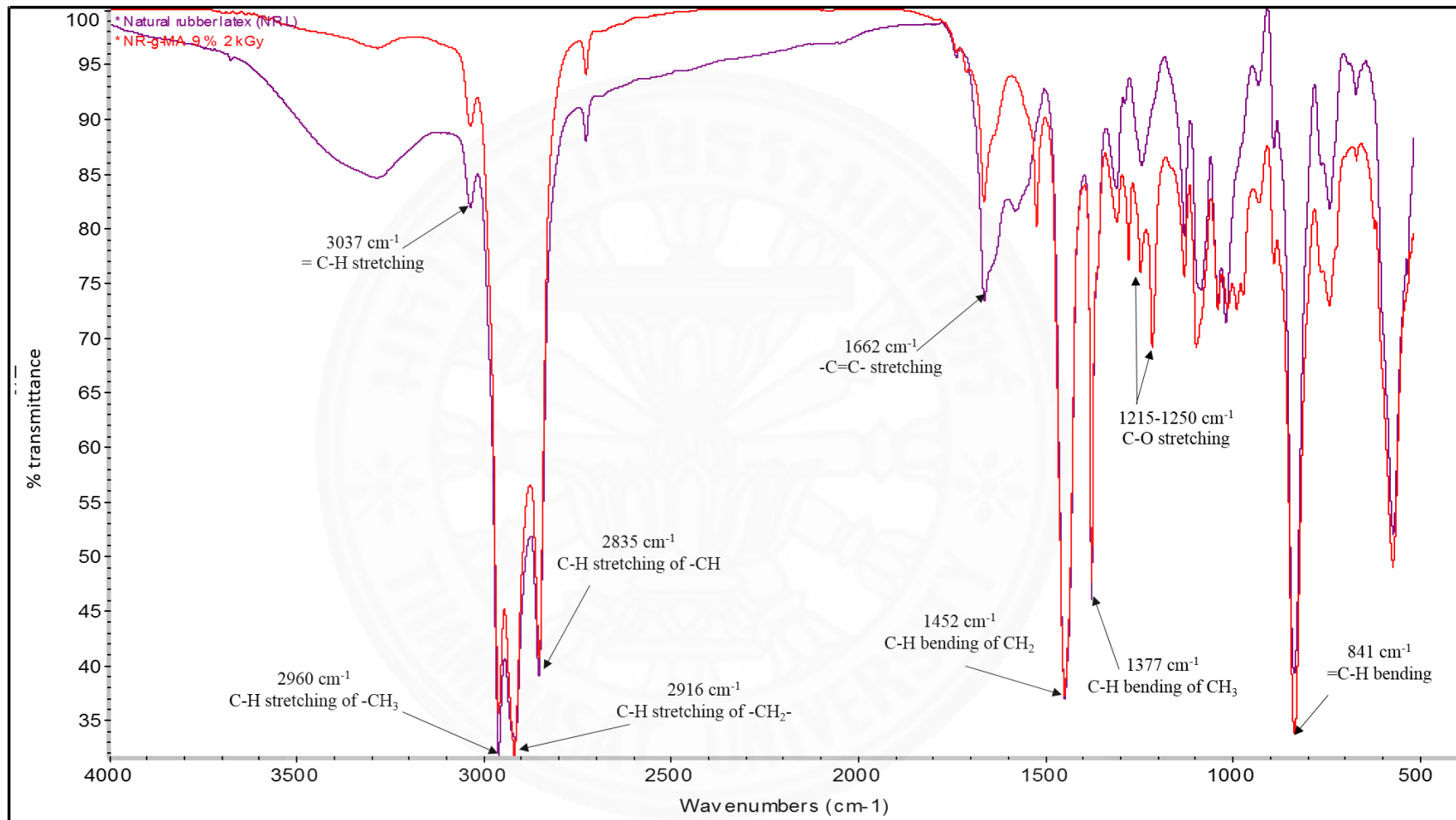
ภาพที่ 4.4 กลไกปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ของยางธรรมชาติ และมาเลอิก แอนไฮไดรต์

(A) Free radical mechanism และ (B) Alder-ene reaction (แก้ไขจาก C.Nakason และคณะ; 2006)

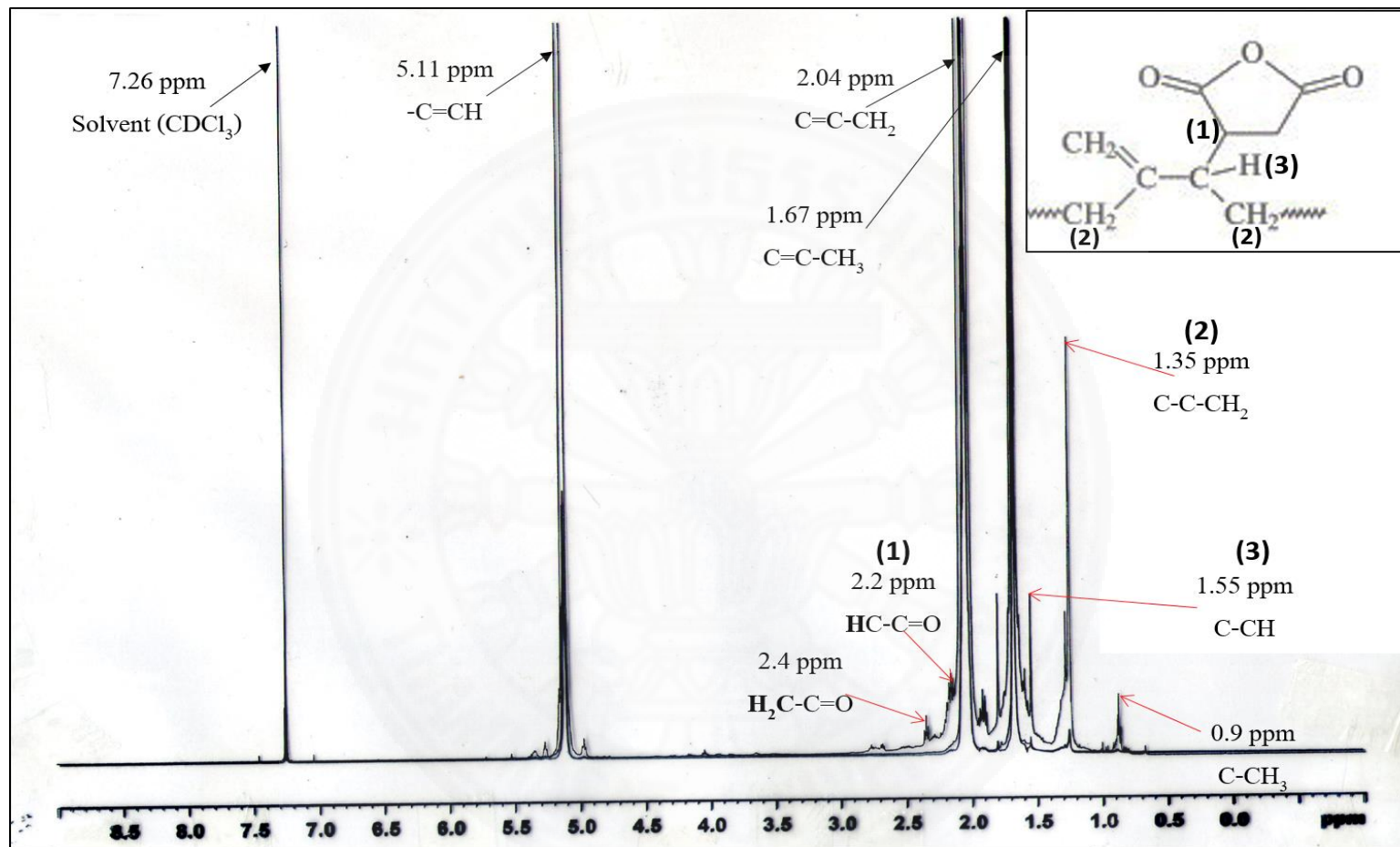
จากกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่น่าจะเป็นไปได้ดังภาพที่ 4.4 สามารถวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของปฏิกิริยาการต่อกิ่งระหว่างมาเลอิก แอนไฮไดรด์และยางธรรมชาติได้โดยการศึกษาผลการทดสอบ FTIR ก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนน้ำยางธรรมชาติ ซึ่งผลการทดสอบ FTIR ดังภาพที่ 4.6 ปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง $1215 - 1250 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคของ C-O stretching ทำให้ทราบว่า มีหมู่คาร์บอนิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในมาเลอิก แอนไฮไดรด์ และมีแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1662 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของพันธะคู่ของคาร์บอน C=C stretching และแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 836 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ =C-H bending (alkene) ที่มีอยู่ในยางธรรมชาติ นั้นมีการเปลี่ยนแปลงของพีคน้อยมาก ทำให้สามารถอนุมานได้ว่า พันธะคู่ในโครงสร้างของยางนั้นยังคงอยู่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 2960 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ CH_3 นั้นมีปริมาณลดลงเล็กน้อย และมีปริมาณแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 2916 ซึ่งเป็นพีคของ CH_2 นั้นเพิ่มขึ้น อีกทั้งจากผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ดังภาพที่ 4.7 ปรากฏพีคแสดงโปรตอนตำแหน่ง 2.2 ppm ซึ่งเป็นพีคโปรตอนของ HC-C=O โดยทำให้ทราบว่า มีหมู่ คาร์บอนิลของมาเลอิก แอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นหลังจากการฉายรังสี และปรากฏพีคแสดงโปรตอนตำแหน่ง 1.35 ppm ซึ่งเป็นพีคโปรตอนของ C-C-CH_2 และปรากฏพีคแสดงโปรตอนตำแหน่ง 1.55 ppm ซึ่งเป็นพีคโปรตอนของ C-CH โดยมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นหลังการทำปฏิกิริยาการต่อกิ่ง จึงสามารถวิเคราะห์ความน่าจะเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาการต่อกิ่งบนน้ำยางธรรมชาติโดยการฉายรังสีแกมมา เป็นปฏิกิริยาแบบ Alder-ene reaction จากงานวิจัยของ C.Nakason และคณะ (Nakason et al., 2006) ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การเกิดปฏิกิริยาแบบ Alder-ene reaction



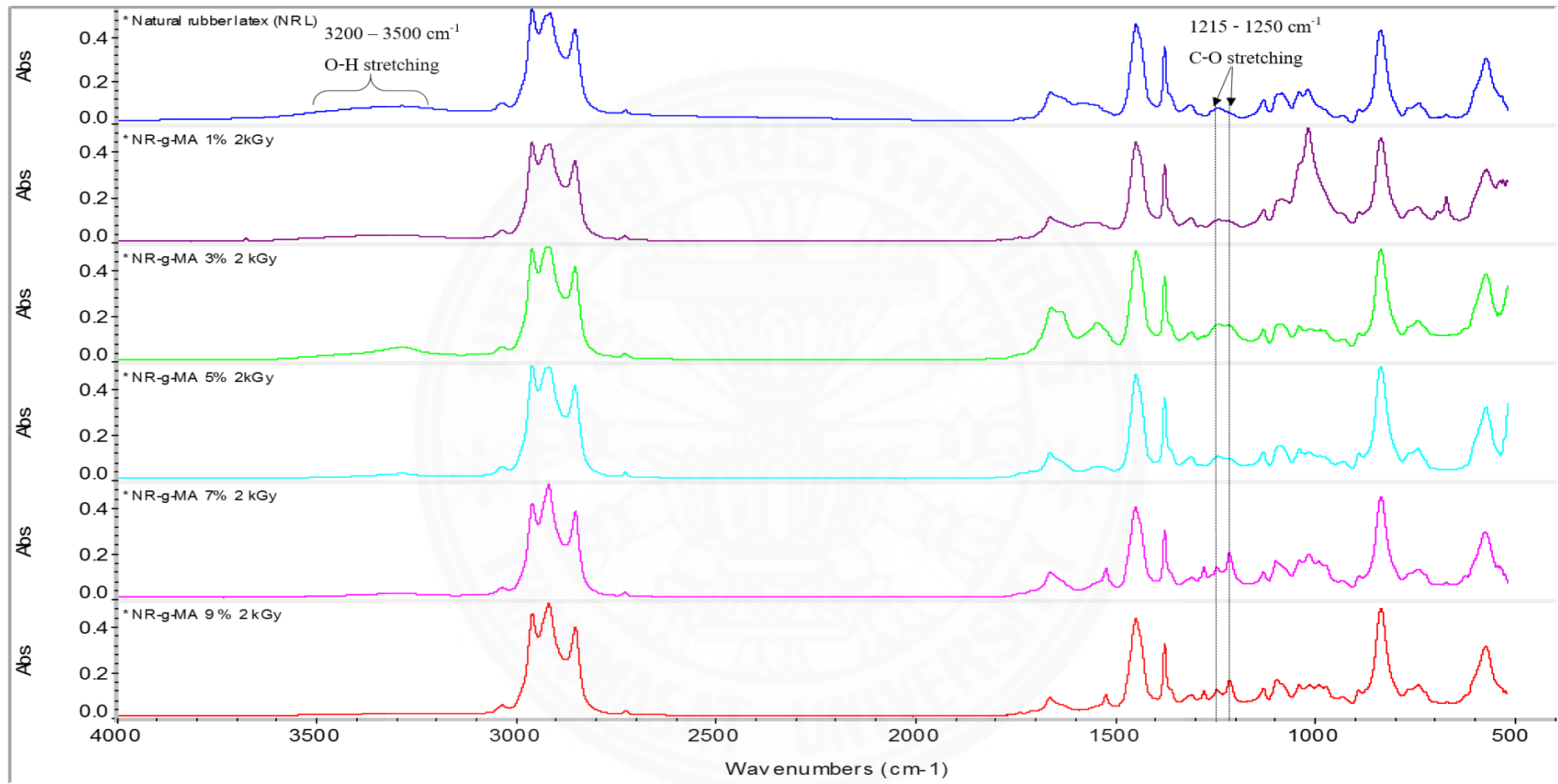
ภาพที่ 4.6 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นและน้ำยางต่อกิงมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ที่ 2 kGy



ภาพที่ 4.7 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางชั้นและน้ำยางต่อกิ่งมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% โดยการฉายรังสี 10 kGy

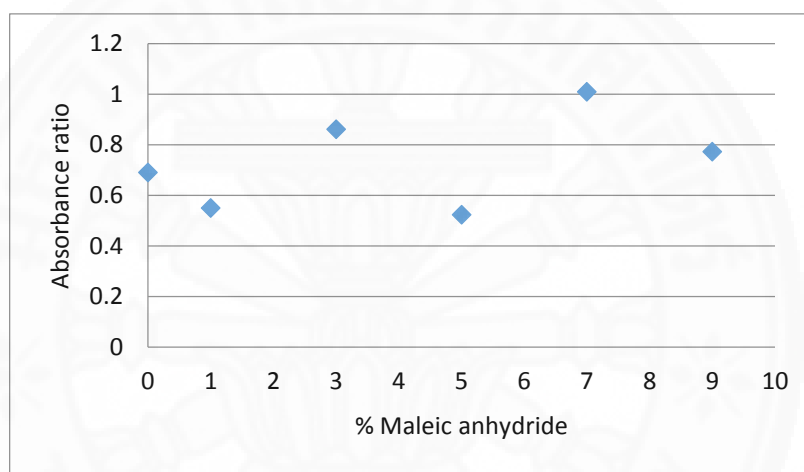
4.2.2 อิทธิพลของปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรต์ต่อการเกิดปฏิกิริยาการต่อกิ่งกับยางธรรมชาติ

จากภาพที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นและน้ำยางต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 2 kGy ที่ปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 1%, 3%, 5%, 7% และ 9% พบแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1215 cm^{-1} และ 1250 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของตำแหน่ง C-O stretching ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในมาเลอิก แอนไฮไดรต์ แสดงให้เห็นถึงการต่อกิ่งของหมู่คาร์บอนิลในมาเลอิก แอนไฮไดรต์ บนยางธรรมชาติ และมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของมาเลอิก แอนไฮไดรต์ นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นในช่วง $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงที่มีพีคซ้อนทับกันระหว่างพีคของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H; Hydroxyl groups) ที่มีลักษณะเป็นพีคกว้าง (broad) กับพีคของหมู่เอไมด์ (N-H; Amide) ที่มีลักษณะเป็นพีคค่อนข้างแหลม โดยพีคที่มีลักษณะกว้างของหมู่ไฮดรอกซิลมีการลดลงแต่พีคที่มีลักษณะแหลมของหมู่เอไมด์ยังคงอยู่ ซึ่งลักษณะพีคในงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากพีคในการต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์บนยางธรรมชาติโดยวิธีการบดผสมของคุณสุดารัตน์ (สุดารัตน์ สมบูรณ์ชัย, 2556) และโดยวิธีทางเคมีของ Nakason และคณะ (Nakason และคณะ, 2013) โดยการวิเคราะห์ผลการทดสอบ FTIR ของคุณสุดารัตน์ และของ Nakason จะพบการเพิ่มขึ้นของแถบการดูดกลืนในลักษณะเป็นพีคกว้าง (broad) ที่ความยาวคลื่น $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคของหมู่ไฮดรอกซิล (Alcohol O-H ; Hydroxyl groups) เมื่อเพิ่มปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรต์ ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากวิธีการทำปฏิกิริยาการต่อกิ่ง เนื่องจาก ทั้งงานวิจัยของคุณสุดารัตน์และ Nakason ใช้ยางธรรมชาติต่างชนิดกัน แต่ผลการวิเคราะห์ FTIR ก็ไม่แตกต่างกันโดยงานวิจัยของคุณสุดารัตน์เป็นการทำปฏิกิริยาการต่อกิ่งของยางสгим ยางSTR5L และยางธรรมชาติโปรตีนต่ำจากยางสгим และงานวิจัยของ Nakason เป็นการทำปฏิกิริยาการต่อกิ่งของยางธรรมชาติโปรตีนต่ำจากน้ำยางข้น ส่วนในงานวิจัยนี้เป็นการทำปฏิกิริยาการต่อกิ่งของน้ำยางข้น โดยใช้รังสีแกมมาเป็นตัวริเริ่ม

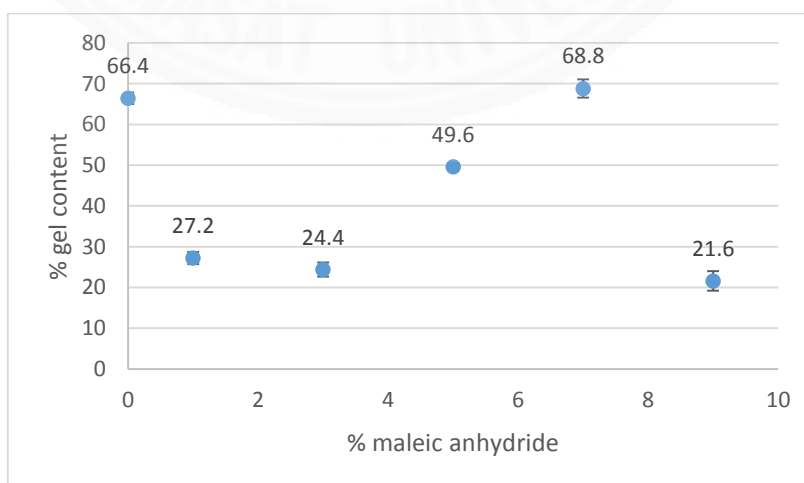


ภาพที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 2 kGy

เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio; Ar) ของค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1215 cm^{-1} และ 1250 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนของ C-O ในหมู่คาร์บอนิลมีหมู่คาร์บอนิล องค์ประกอบหลักในมาเลอิก แอนไฮไดรด์ และค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1377 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนของ C-H ในยางธรรมชาติ ดังภาพที่ 4.9 ซึ่งจะพบว่าที่ปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 7% ของยางแห้งจะมีค่าอัตราส่วนการดูดกลืนสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติมากที่สุด และปริมาณเจล (gel content) ดังภาพที่ 4.10 ซึ่งจะพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 7% ของยางแห้งนั้นจะมีปริมาณเจลมากที่สุด

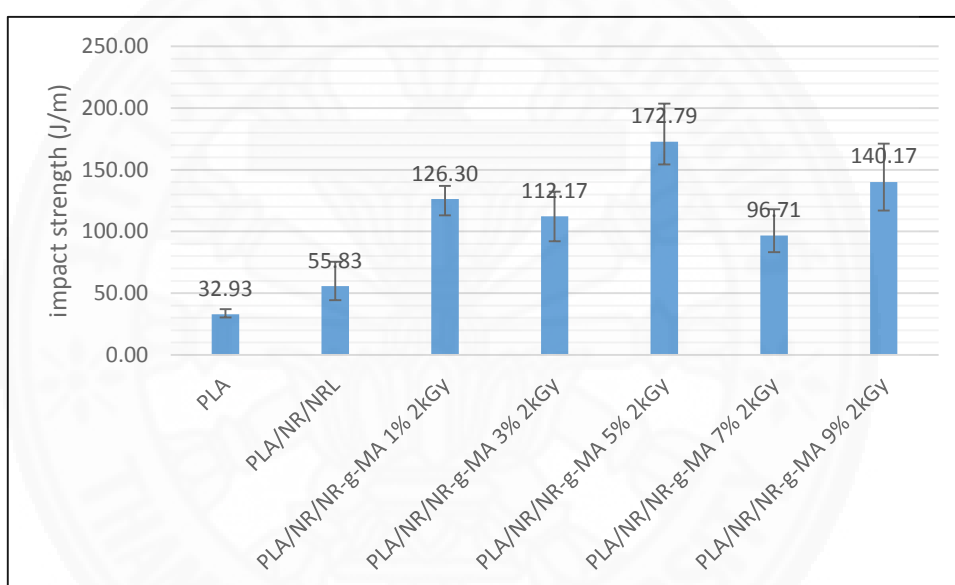


ภาพที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ปริมาณการต่อกิ่งจากการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นและน้ำยางต่อกิ่ง โดยการฉายรังสีแกมมา ที่ 2 kGy



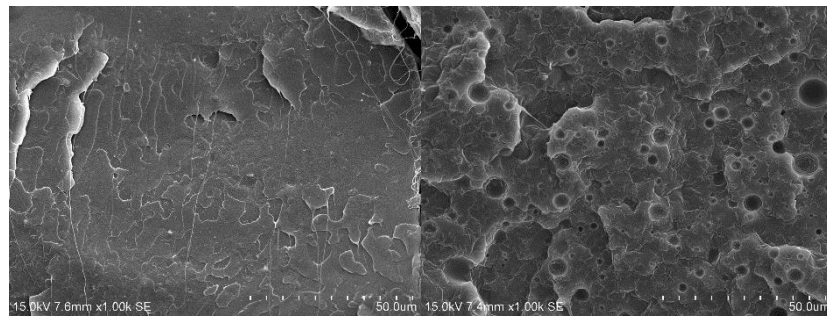
ภาพที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางชั้นและน้ำยางต่อกิ่งโดยการฉายรังสีแกมมา ที่ 2 kGy

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact test) โดยการนำไป บดผสมกับ Polylactic acid (PLA) และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางข้น (NRL) หรือ น้ำยางข้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสี (NR-g-MA) ในเครื่องบดผสมแบบปิด (internal mixer) ได้ผลดังภาพที่ 4.11 ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่ายางต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ 2 kGy ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 1% - 9% ของยางแท่ง สามารถช่วยเพิ่มค่าต้านทานแรงกระแทกให้กับ PLA/NR blend ได้ โดยน้ำยางต่อกิ่งที่ความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 5% ของยางแท่ง ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ดีที่สุด ในขณะที่ค่าต้านทานแรงกระแทกของน้ำยางต่อกิ่งที่ปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 7% ของยางแท่งมีค่าต่ำที่สุด



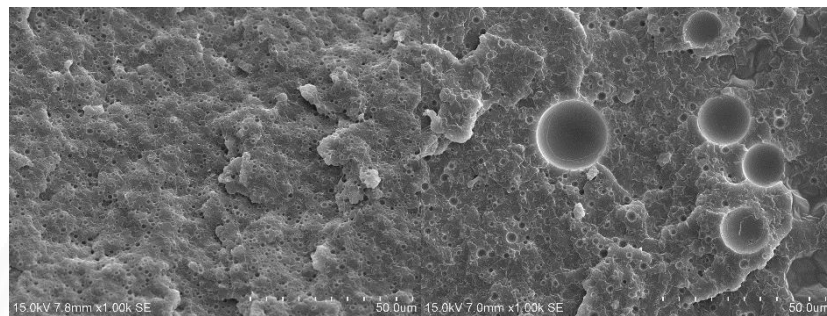
ภาพที่ 4.11 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางข้น (NRL) หรือ น้ำยางข้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยการฉายรังสีที่ 2 kGy (NR-g-MA)

จากผลการศึกษาสัญฐานวิทยาของ Polylactic acid (PLA) บดผสมยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางข้น (NRL) หรือ น้ำยางข้นต่อกึ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ โดยการฉายรังสี ที่ปริมาณ 2 kGy (NR-g-MA) ซึ่งวิเคราะห์จากผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกหักในสภาวะ freeze fracture ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังภาพที่ 4.12 พบว่า มีอนุภาคยางทั้งขนาดเล็กและใหญ่กระจายตัวปะปนอยู่ใน PLA และเมื่อวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของยางด้วยโปรแกรม Image J ดังภาพที่ 4.13 ซึ่งเห็นได้ว่า ขนาดของอนุภาคยางเฉลี่ยที่ PLA บดผสมยางแท่งร่วมกับน้ำยางข้นต่อกึ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 1% - 9% ของยางแท่ง โดยการฉายรังสี 2 kGy มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางที่เล็กกว่าขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของยางใน PLA/NR/NRL ยกเว้นอนุภาคของยางใน PLA ของ PLA/NR/NR-g-MA 3% จะมีขนาดอนุภาคของยางขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับขนาดอนุภาคของยางขนาดเล็ก โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางจาก PLA/NR/NR-g-MA 5% มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางนี้ร่วมกับค่าความต้านทานแรงกระแทก จะพบว่าถ้าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางมีขนาดเล็กจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น



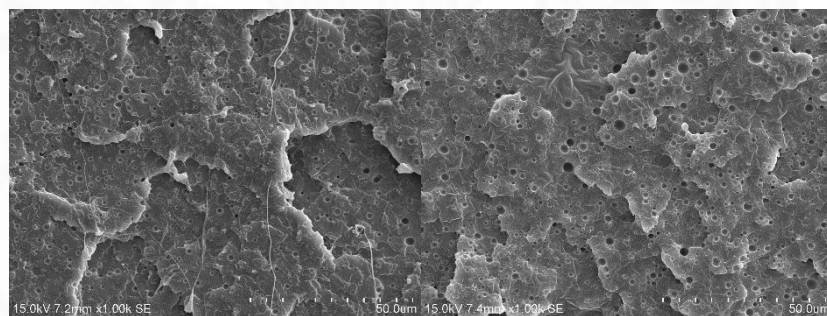
(a) PLA

(b) PLA/NR/NRL



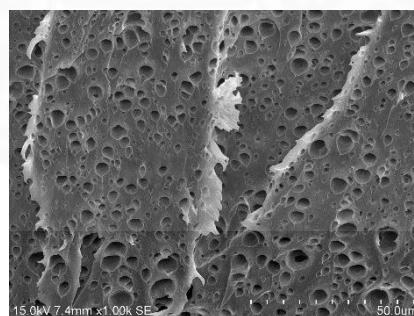
(c) PLA/NR/NR-g-MA 1% 2 kGy

(d) PLA/NR/NR-g-MA 3% 2 kGy



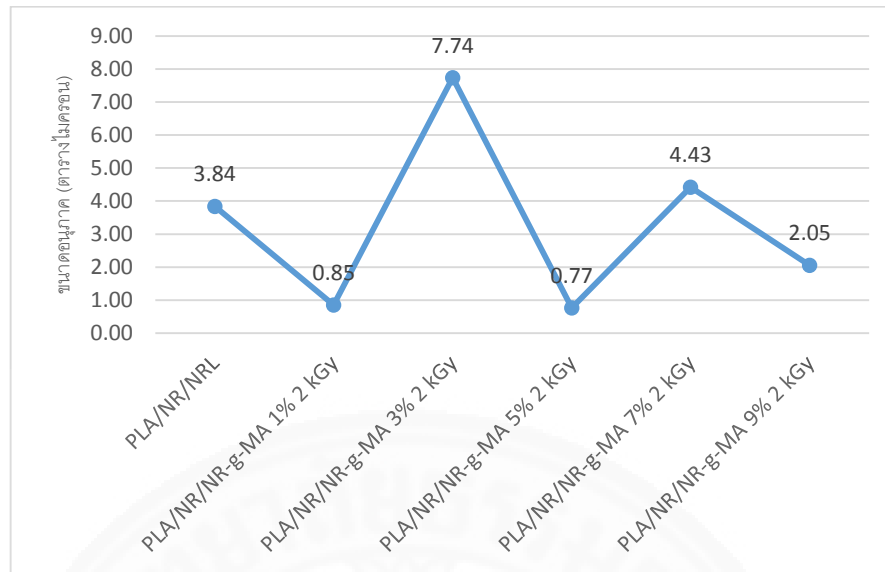
(e) PLA/NR/NR-g-MA 5% 2 kGy

(f) PLA/NR/NR-g-MA 7% 2 kGy



(g) PLA/NR/NR-g-MA 9% 2 kGy

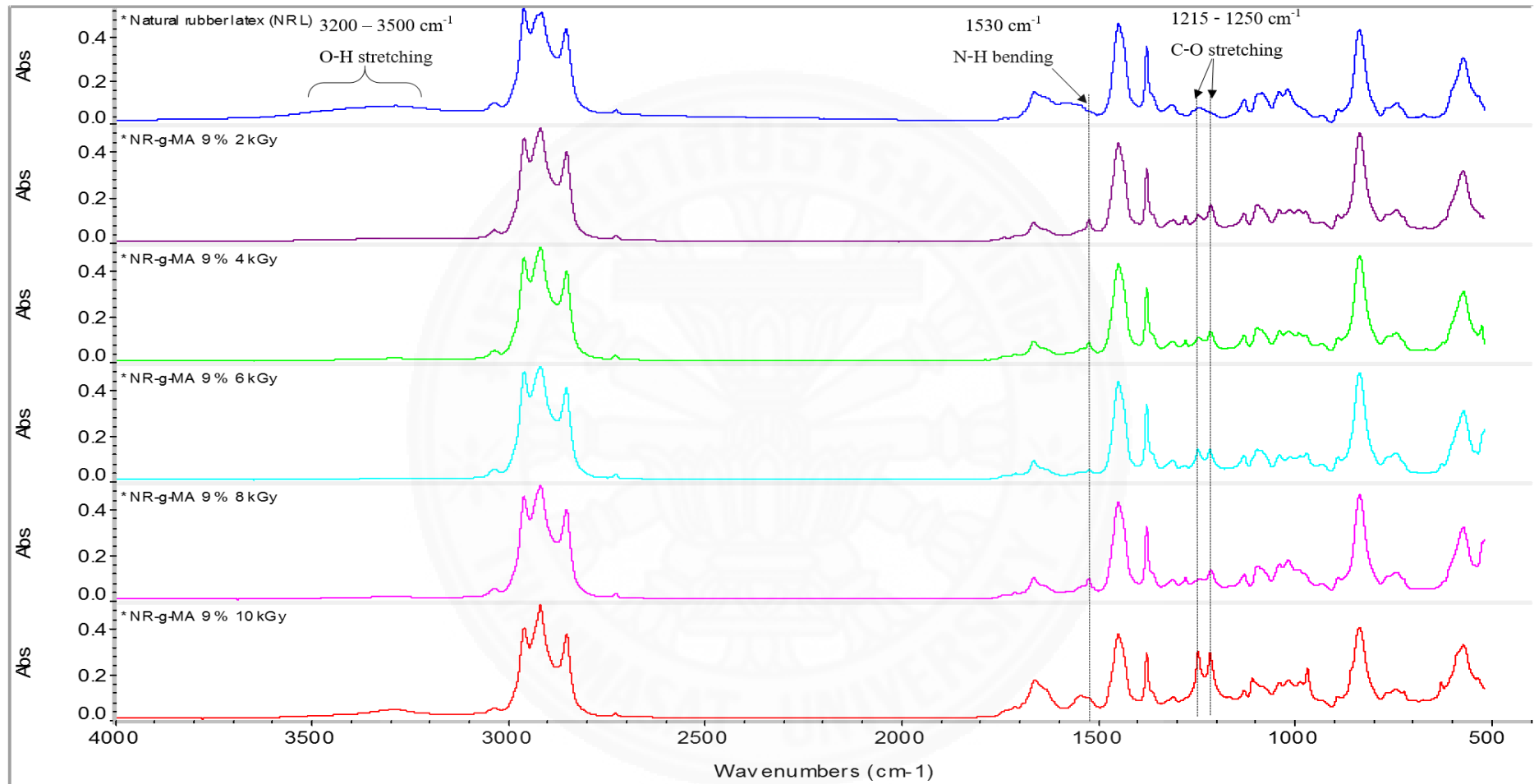
ภาพที่ 4.12 ผลการศึกษาสัญญาณวิทยาจากผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกหักในสภาวะ freeze fracture ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (a) PLA, (b) PLA/NR/NRL, (c) PLA/NR/NR-g-MA 1% 2 kGy, (d) PLA/NR/NR-g-MA 3% 2 kGy, (e) PLA/NR/NR-g-MA 5% 2 kGy, (f) PLA/NR/NR-g-MA 7% 2 kGy และ (g) PLA/NR/NR-g-MA 9% 2 kGy



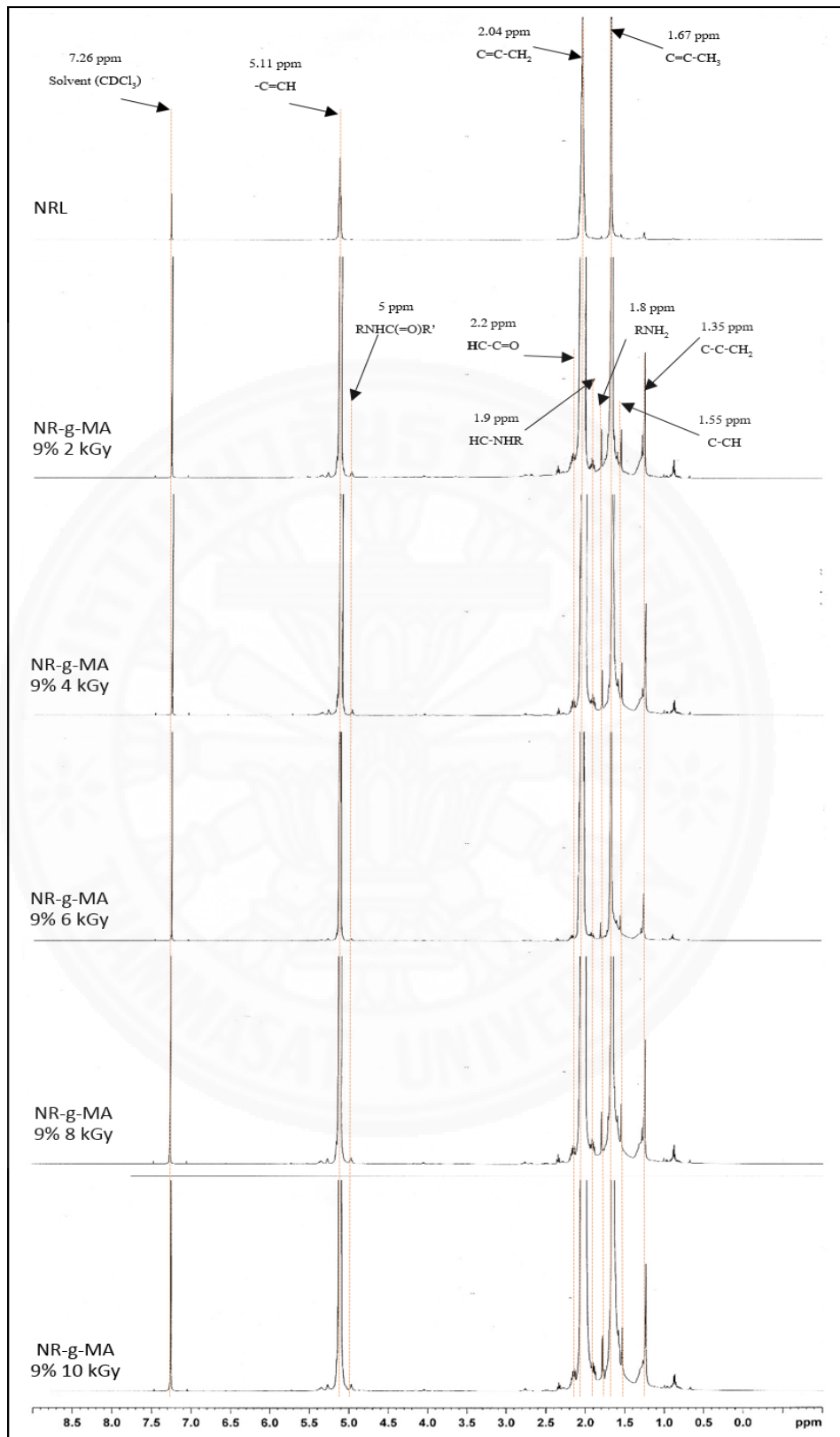
ภาพที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแรงดึงของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางชั้น (NRL) หรือน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีที่ปริมาณ 2 kGy (NR-g-MA)

4.2.3 อิทธิพลของปริมาณรังสีแกมมาในการเกิดปฏิกิริยาการต่อกิ่งกับยางธรรมชาติ

จากภาพที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นและน้ำยางต่อกิ่งด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 2 kGy, 4 kGy, 6 kGy, 8 kGy, 10 kGy พบแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1215 cm^{-1} และ 1250 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของตำแหน่ง C-O stretching แสดงให้เห็นถึงการต่อกิ่งของหมู่คาร์บอนิลในมาเลอิก แอนไฮไดรด์ บนยางธรรมชาติ และมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของรังสี โดยพบว่าการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 10 kGy มีลักษณะของพีคเด่นชัดที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นในช่วง $3200\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงที่มีพีคซ้อนทับกันระหว่างพีคของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H; Hydroxyl groups) ที่มีลักษณะเป็นพีคกว้าง (broad) กับพีคของหมู่เอไมด์ (N-H; Amide) ที่มีลักษณะเป็นพีคค่อนข้างแหลม ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาการต่อกิ่งโดยการฉายรังสีแล้ว พีคที่มีลักษณะกว้างของหมู่ไฮดรอกซิลมีการลดลงแต่พีคที่มีลักษณะแหลมของหมู่เอไมด์ยังคงอยู่ อีกทั้งพบแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1530 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของตำแหน่ง N-H bending นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์สารตัวอย่างชุดเดียวกันกับภาพที่ 4.14 โดยใช้การทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ดังภาพที่ 4.15 พบว่ามีความสอดคล้องกันโดยปรากฏพีคแสดงโปรตอนตำแหน่ง 2.2 ppm ซึ่งเป็นพีคโปรตอนของ HC-C=O ของหมู่คาร์บอนิล ในมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ซึ่งมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของรังสี และปรากฏพีคแสดงโปรตอนตำแหน่ง 1.8 ppm, 1.9 ppm และ 5 ppm ซึ่งเป็นพีคโปรตอนของหมู่ฟังก์ชัน N-H ในหมู่อะมิโน (Amino) หมู่เอมีน (Amine) และหมู่เอไมด์ (Amide) ตามลำดับ อีกทั้ง $^1\text{H-NMR}$ ยังปรากฏพีคแสดงโปรตอนตำแหน่ง 1.35 ppm และ 1.55 ppm ซึ่งเป็นพีคโปรตอนของหมู่ฟังก์ชัน C-C-CH₂ และ C-CH ตามลำดับ มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นหลังทำปฏิกิริยาการต่อกิ่งโดยการฉายรังสี

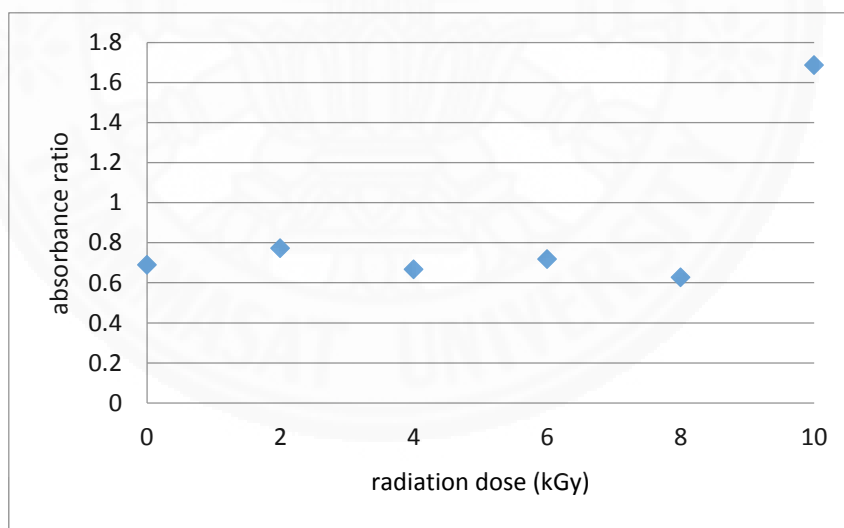


ภาพที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา

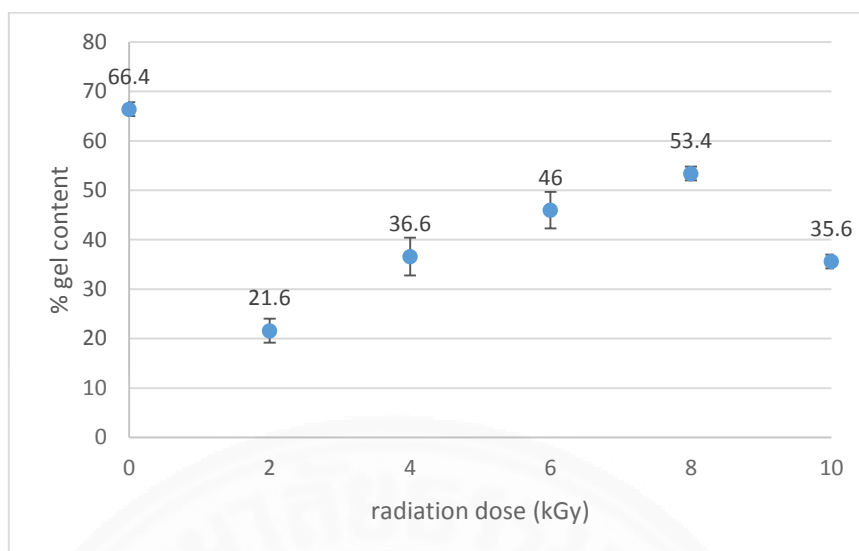


ภาพที่ 4.15 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางชั้นและน้ำยางต่อกิ่งมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสี

เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio; Ar) ของค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1215 cm^{-1} และ 1250 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนของ C-O ในหมู่คาร์บอนิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ และค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1377 cm^{-1} ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนของ C-H ในยางธรรมชาติ ดังภาพที่ 4.16 ซึ่งจะพบว่าค่าอัตราส่วนการดูดกลืนมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณรังสีแกมมา โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 10 kGy มีค่าอัตราส่วนการดูดกลืนสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณการต่อกิ่งของมาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติมากที่สุด และปริมาณเจล (gel content) ดังภาพที่ 4.17 ซึ่งจะพบว่าที่ปริมาณ เจลของน้ำยางขึ้นก่อนการฉายรังสีมีปริมาณมากที่สุด และลดลงเมื่อทำปฏิกิริยาการต่อกิ่ง ซึ่งน้ำยางขึ้นต่อกิ่งจะมีปริมาณเจลเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีแกมมา โดยการฉายรังสีที่ปริมาณ 8 kGy จะมีปริมาณเจลมากที่สุด และปริมาณเจลจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีเป็น 10 kGy ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการดูดกลืนและปริมาณเจลแสดงให้เห็นว่าน้ำยางขึ้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 10 kGy มีประสิทธิภาพการต่อกิ่งที่ดี เนื่องจากมีค่าอัตราส่วนการดูดกลืนที่มากที่สุดและปริมาณเจลที่น้อยลง

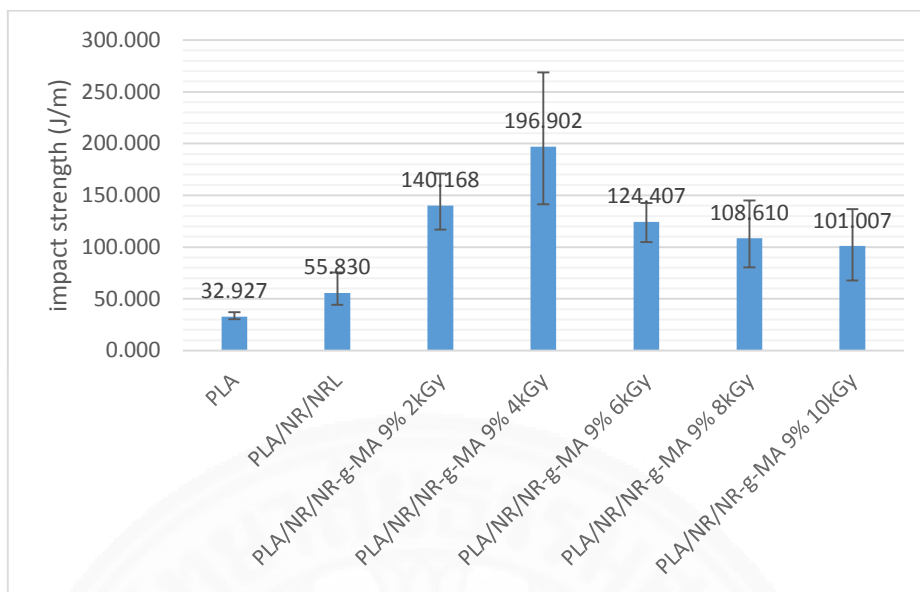


ภาพที่ 4.16 ผลวิเคราะห์ปริมาณการต่อกิ่งจากการทดสอบ FTIR ของน้ำยางขึ้นและน้ำยางต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา



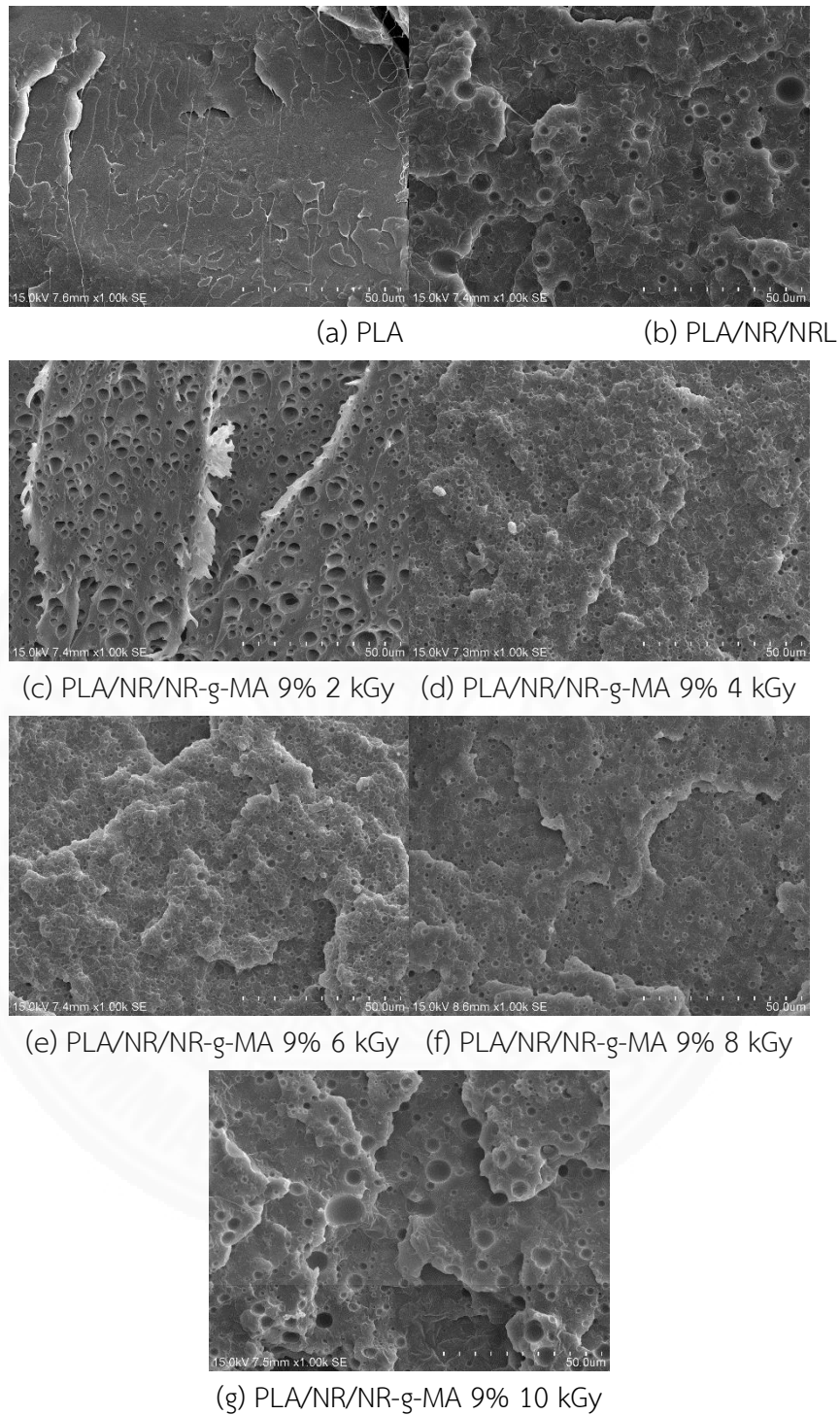
ภาพที่ 4.17 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ ปริมาณ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา

เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact test) โดยการนำไป บดผสมกับ Polylactic acid (PLA) และยางแห้ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางข้น (NRL) หรือ น้ำยาง ข้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสี (NR-g-MA) ในเครื่องบดผสมแบบปิด (internal mixer) ได้ผลดังภาพที่ 4.18 ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่า น้ำยางข้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ ความเข้มข้น 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีที่ปริมาณตั้งแต่ 2 kGy – 10 kGy สามารถช่วยเพิ่มค่า ต้านทานแรงกระแทกให้กับ PLA/NR blend ได้ โดยน้ำยางข้นต่อกิ่งที่ปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา มีค่าความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสี แกมมา และที่น้ำยางข้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณ 4 kGy ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูง ที่สุด และลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มมากขึ้น และค่าต้านทานแรงกระแทกของน้ำยางต่อกิ่งโดยการ ฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 10 kGy ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดน้อยลง

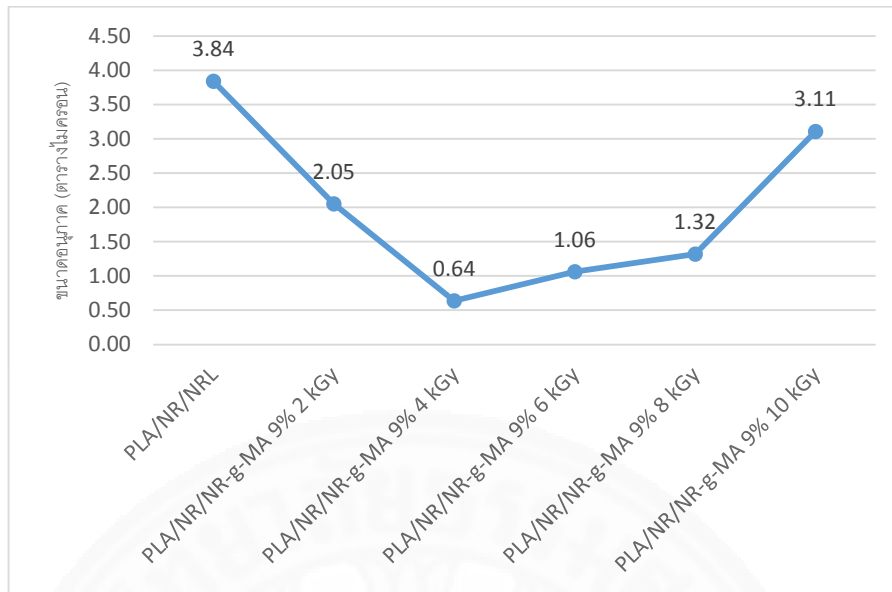


ภาพที่ 4.18 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางชั้น (NRL) หรือ น้ำยางชั้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA)

จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของ Polylactic acid (PLA) บดผสมยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางชั้น (NRL) หรือ น้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ที่ปริมาณ 9% ของยางแท่ง โดยการฉายรังสี (NR-g-MA 9%) ที่ปริมาณรังสีต่างๆ ซึ่งวิเคราะห์จากผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกหักในสภาวะ freeze fracture ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังภาพที่ 4.19 พบว่า มีอนุภาคยางกระจายตัวอยู่ใน PLA และเมื่อวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของยางด้วยโปรแกรม Image J ดังภาพที่ 4.20 ซึ่งเห็นได้ว่า ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของยางใน PLA บดผสม NR ร่วมกับ NR-g-MA มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางที่เล็กกว่ายางใน PLA/NR/NRL โดยอนุภาคเฉลี่ยของยางจากการฉายรังสี 4 kGy มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางนี้มีร่วมกับค่าความต้านทานแรงกระแทก จะพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของยางมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกระแทก โดยเมื่อขนาดของยางเล็กลงจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น

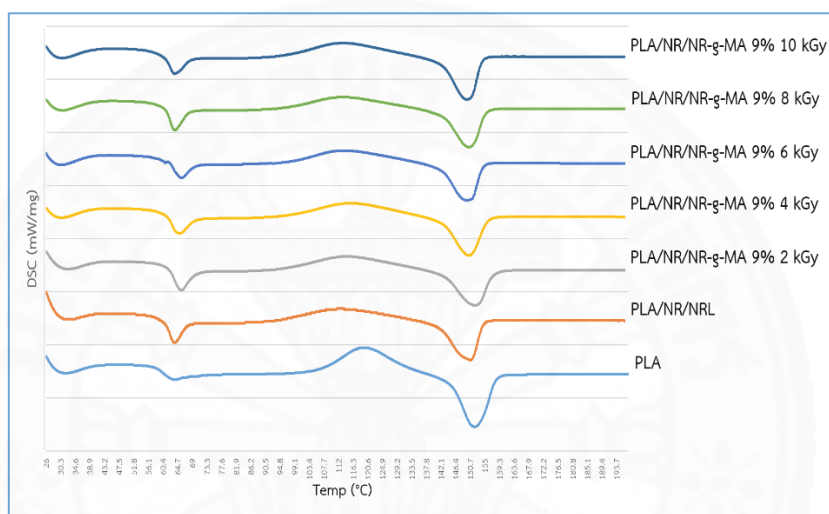


ภาพที่ 4.19 ผลการศึกษาสัญญาณวิทยาจากผิวหน้าชิ้นงานที่ถูกหักในสภาวะ freeze fracture ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (a) PLA, (b) PLA/NR/NRL, (c) PLA/NR/NR-g-MA 9% 2 kGy, (d) PLA/NR/NR-g-MA 9% 4 kGy, (e) PLA/NR/NR-g-MA 9% 6 kGy, (f) PLA/NR/NR-g-MA 9% 8 kGy และ (g) PLA/NR/NR-g-MA 9% 10 kGy



ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์อนุภาคยางเฉลี่ยของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางชั้น (NRL) หรือน้ำยางชั้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่ง แคลลอรี่มิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC) โดยจะให้ความร้อนกับตัวอย่างครั้งที่ 1 (1st heating) ที่อุณหภูมิ 25°C - 200°C และอัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที ดังภาพที่ 4.21 และสรุปดังตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า PLA/NR/NRL และ PLA/NR/NR-g-MA 9% มีการแสดง T_g ในลักษณะที่มีแนวโน้มสูงกว่า PLA เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจะทำให้เห็นว่า NRL และ NR-g-MA 9% สามารถช่วยให้ PLA ทนต่อความร้อนและอยู่ในสถานะของแข็งได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ไม่สามารถช่วยให้ค่า T_c และ T_m มีค่าสูงขึ้น อีกทั้งยังไม่ทำให้ PLA มีปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้นได้อีกด้วย



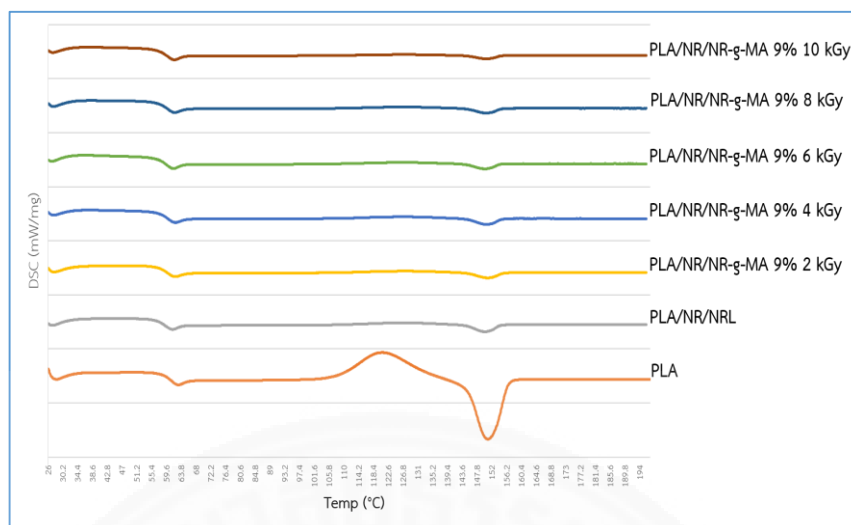
ภาพที่ 4.21 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC โดยการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางข้น (NRL) หรือน้ำยางข้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)

ตารางที่ 4.1

สมบัติทางความร้อนจากการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยาง
ชั้น (NRL) หรือน้ำยางชั้นต่อกิ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความ
เข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)

ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔH_m (J/g)	%crystallinity
PLA	57.8	119.5	152	27.96	26.8	0.00
PLA/NR/NRL	61.5	113.7	151.6	19.17	19.35	0.19
PLA/NR/NR-g-MA 9% 2 kGy	62.8	115.8	153.2	20.99	19.34	0.00
PLA/NR/NR-g-MA 9% 4 kGy	62.2	116.3	151.3	20.36	18.95	0.00
PLA/NR/NR-g-MA 9% 6 kGy	62.7	115	150.8	18.19	18.11	0.00
PLA/NR/NR-g-MA 9% 8 kGy	61.8	113.7	151.3	17.29	18.86	1.69
PLA/NR/NR-g-MA 9% 10 kGy	61.3	114.1	150.6	20.08	19.83	0.00

เมื่อให้ความร้อนกับตัวอย่างครั้งที่ 2 (2nd heating) ที่อุณหภูมิและอัตราการให้ความ
ความร้อนเท่ากับครั้งที่ 1 ดังภาพที่ 4.22 และสรุปดังตารางที่ 4.2 หลังจากลดความร้อนลงจนถึง 25°C
ที่อัตราการให้ความเย็น -5°C/นาที จะเห็นได้ว่า PLA/NR/NRL และ PLA/NR/NR-g-MA 9% มีค่า T_g
ในลักษณะที่มีแนวโน้มที่ลดลงจาก PLA และ T_c มีแนวโน้มค่าที่สูงขึ้น แต่ในขณะที่ค่า T_m มีการ
เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นผลึก (%crystallinity) จะพบว่าไม่มีผลึก
เกิดขึ้นหรือมีน้อยมาก



ภาพที่ 4.22 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย DSC โดยการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางข้น (NRL) หรือน้ำยางข้นต่อกึ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)

ตารางที่ 4.2

สมบัติทางความร้อนจากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA และยางแท่ง (NR) ร่วมกับยางจากน้ำยางข้น (NRL) หรือน้ำยางข้นต่อกึ่งโดยการฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ ด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ความเข้มข้น 9% (NR-g-MA 9%)

SAMPLE	T_g (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔH_m (J/g)	%crystallinity
PLA	58.5	120.8	151	26.82	26.02	0.00
PLA/NR/NRL	57.7	126.9	151.1	2.461	2.438	0.00
PLA/NR/NR-g-MA 9% 2 kGy	58.5	127.7	151.9	2.116	1.888	0.00
PLA/NR/NR-g-MA 9% 4 kGy	58.3	127.4	151.8	2.329	2.093	0.00
PLA/NR/NR-g-MA 9% 6 kGy	58	127.4	151.2	1.708	1.813	0.11
PLA/NR/NR-g-MA 9% 8 kGy	58.2	128.4	151.8	1.646	1.674	0.03
PLA/NR/NR-g-MA 9% 10 kGy	58	127.9	151.6	1.538	1.112	0.00

ดังนั้นจากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ทำให้เห็นว่า ยางจากน้ำยางข้นและน้ำยางต่อกึ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสีไม่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและสมบัติทางความร้อนให้กับ PLA/NR blend ได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกราฟต์มาเลอิก แอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ โดยการฉายรังสีแกมมาของธาตุโคบอลต์-60 (Co-60) ที่ปริมาณรังสีตั้งแต่ 0 - 10 kGy และที่ความเข้มข้นของมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (MA) 1%, 3%, 5%, 7% และ 9% ของยางแห้ง โดยการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางและความเป็นไปได้ในการต่อกิ่ง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบและโครงสร้างของยางธรรมชาติหลังการต่อกิ่ง ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Proton Nuclear Magnetic Resonance (^1H NMR) และทดสอบหาปริมาณเจลที่เกิดขึ้น ซึ่งยางต่อกิ่งที่ได้ก็นำไปศึกษาการใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติการรับแรงกระแทก (Impact test) และสมบัติทางความร้อนของ PLA/NR blend โดยสามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 จากผลการทดสอบ FTIR และ ^1H -NMR ของ NR-g-MA พบว่าอาจจะเกิดการต่อกิ่งของหมู่คาร์บอนิลในมาเลอิก แอนไฮไดรด์ ด้วยปฏิกิริยาแบบ Alder-ene reaction เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของ CH_2 และการลดลงของ CH_3 ของโมเลกุลยาง อีกทั้งพันธะคู่ $\text{C}=\text{C}$ ในโมเลกุลยางยังไม่มีเปลี่ยนแปลงอีกด้วย

5.1.2 จากการวิเคราะห์หาปริมาณการต่อกิ่งที่ความเข้มข้นของ MA 9% ของยางแห้ง พบว่าปริมาณเจลที่เกิดขึ้นแปรผกผันกับปริมาณการต่อกิ่งที่ได้จากการคำนวณอัตราส่วนการดูดกลืนของหมู่ $\text{C}=\text{O}$ และเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสี โดยสถานะที่ให้ปริมาณการต่อกิ่งสูงสุดก็คือ ที่ NR-g-MA 9% และการฉายรังสี 10 kGy

5.1.3 จากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกระแทก (Impact strength) ร่วมกับสัณฐานวิทยาของ PLA บดผสม NR ร่วมกับ NRL หรือร่วมกับ NR-g-MA พบว่าขนาดอนุภาคของยางใน PLA มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกระแทก โดยเมื่อขนาดอนุภาคของยางเล็กลงจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น โดยสถานะที่ให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกสูงสุด คือ ที่ NR-g-MA 9% 4 kGy ในขณะที่สถานะที่ให้ % การกราฟต์ที่สูง กลับให้ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่ต่ำและมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่

5.1.4 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน NRL และ NR-g-MA ไม่สามารถเพิ่มปริมาณผลึกให้กับ PLA ได้ จึงไม่สามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า T_g ของ PLA ได้

ดังนั้นยังต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสีแกมมา สามารถลดปริมาณเจลในยางธรรมชาติได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับงานอุตสาหกรรมพลาสติกได้ แต่อย่างไรก็ตามการนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวัสดุหรือพลาสติกที่ต้องการสมบัติการทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ จำเป็นต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของการใช้ร่วมกับสารก่อผลึก

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์หลักการทำงานของต่อกิ่งและตรวจสอบ functional group ด้วยวิธี FTIR และ $^1\text{H-NMR}$ ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมด้วยวิธี $^{12}\text{C-NMR}$

5.2.2 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานำยางต่อกิ่งไปประยุกต์ในเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับ PLA/NR blend ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มค่าต้านทานแรงกระแทกได้ ควรจะมีการศึกษาสมบัติอื่นๆเพิ่มเติม เช่น การทนต่อแรงฉีกขาด เป็นต้น เพื่อสามารถนำไปใช้งานในด้านอื่นๆได้

5.2.3 ในงานวิจัยนี้ยังต่อกิ่งไม่สามารถเพิ่มผลึกให้กับ PLA ได้ ควรศึกษาการนำพอลิเมอร์ตัวอื่นๆมาผสมกับยางต่อกิ่ง เช่น lactide เป็นต้น

5.2.4 ควรมีการทดสอบทางรีโอโลยี เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุลยางหลังการฉายรังสี

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- แคทลียา ปัทมพรหม. (2552). *พอลิเมอร์พื้นฐานสำหรับวิศวกรรม*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์. (2553). *เทคโนโลยียางธรรมชาติ Natural Rubber Technology*. กรุงเทพมหานคร: เทคโนโลยีช คอมมิวนิเคชั่นส์.
- วรารณณ์ ขจรไชยกูล. (2549). *ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).
- วรารณณ์ ขจรไชยกูล. (2555). *เทคโนโลยีน้ำยาง Latex Technology*. กรุงเทพมหานคร: วนิดาการพิมพ์.
- K. Makuuchi. (2003). *An Introduction to Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex*. Bangkok: T.R.I.Global Co., Ltd.

บทความวารสาร

- สุวดี ก้องพารากูล. (2556). เทคโนโลยีการดัดแปรยางธรรมชาติและ การประยุกต์ใช้ (Natural Rubber Modification Technology and Its Applications). *วารสารวิทยาศาสตร์ มข*, 41(3), 567-576.
- Aggour, Y., Al-Shihri, A., and Bazzt, M. (2012). Surface Modification of Waste Tire by Grafting with Styrene and Maleic Anhydride. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 2, 70-76.
- Derouet, D., Intharapat, P., Tran, N.Q., Gohier F., and Nakason, C. (2008). Graft copolymers of natural rubber and poly(dimethyl (acryloyloxymethyl) phosphonate) (NR-g-PDMAMP) or poly(dimethyl(methacryloyloxyethyl) phosphonate) (NR-g-PDMMEP) from photopolymerization in latex medium. *European Polymer Journal*, 45, 820–836

- George, V., Britto, I.J., and Sebastian, MS. (2003). Studies on radiation grafting of methyl methacrylate onto natural rubber for improving modulus of latex film. *Radiation Physics and Chemistry*, 66, 367-372.
- Hashim, A.s., Ong, S.K., and Jessy, R.S. (2002). A general review of recent developments on chemical modification of NR. *Natural rubber 28-4th quarter*. 3-9.
- Hossain, K., and Chowdhury, S., (2010). Grafting of n-butyl acrylate with natural rubber latex film by gamma radiation: a reaction mechanism. *Daffodil International University Journal of Science and Technology*, 5, 81-88.
- Nakason, C., Kaesaman, A., Supasanthitikul, P. (2004). The grafting of maleic anhydride onto natural rubber. *Polymer Testing*, 23, 35-41.
- Nakason, C., Saiwaree, S., Tatun, S., and Kaesaman, A. (2006). Rheological thermal and morphological properties of maleated natural rubber and its reactive blending with poly (methyl methacrylate). *Polymer Testing*, 25, 656-667.
- Ragupathy, L., Robert, G., Landfester, K., Ziener, U. (2011). Grafting polyacrylates on natural rubber latex by miniemulsion polymerization. *Colloid and Polymer Science*, 289, 229-235.
- Songsing, K., Vatanatham, T., and Hansupalak, N. (2013). Kinetics and mechanism of grafting styrene onto natural rubber in emulsion polymerization using cumene hydroperoxide–tetraethylenepentamine as redox initiator. *European Polymer Journal*, 49, 1007-1016.
- Wongthong, P., Nakason, C., PAN, Q., and Andrepel, G. (2013). Modification of deproteinized natural rubber via grafting polymerization with maleic anhydride. *European Polymer Journal*, 49, 4035-4046.
- Yoopadee, P., Pairote, K., and Jareerat, R. (2009). Grafting copolymerization of natural rubber with 2-hydroxyethyl methacrylate for plywood adhesion improvement. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 31, 453-457.

วิทยานิพนธ์

สุदारัตน์ สมบูรณ์ชัย. (2556). การศึกษาการเพิ่มมูลค่าของยางสกินโดยการปรับปรุงโครงสร้างด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์.(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะ วิศวกรรมศาสตร์.

Wannapa Chumeka. (2009). Improvement of compatibility of poly (lactic acid) blended with natural rubber by modified natural rubber. Prince of Songkla University, Songkla

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

เกศินี เหมวิเชียร และพิริยาธร สุวรรณมาลา. การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ด้วยรังสี. สืบค้นจาก <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc5003/nkc5003f.html>

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. ยางธรรมชาติ (Natural Rubber). สืบค้นจาก http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=4

จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. (2556). ปฏิบัติการตัดแปรรูปโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์. สืบค้นจาก <http://www.seem.kmutt.ac.th>

ปรียา อนุพงษ์อาจ. กัมมันตภาพรังสี. สืบค้นจาก http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/102/1/nuclear1/nuclear_6.htm

พงษ์ธร แซ่อู๋. ชนิดของยางและการใช้งาน. สืบค้นจาก <http://www.at-thai.com/index.php/9-knowlege-products?start=4>

สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข. (2554). มาตรฐานวัดเกี่ยวกับผลทางชีวภาพของการรับรังสี. สืบค้นจาก <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc55/content55/nstkc55-012.html>

อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว. (2543). ซ้ำทะเล "ธาตุซี" โคบอลต์-60. สืบค้นจาก <http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/65/nuclear1/co60leak.htm>

Nuclear Society of Thailand Articles. รังสี: ปริมาณและหน่วยวัดรังสี สืบค้นจาก <http://www.nst.or.th/article/article493/article493020.html>



ภาคผนวก

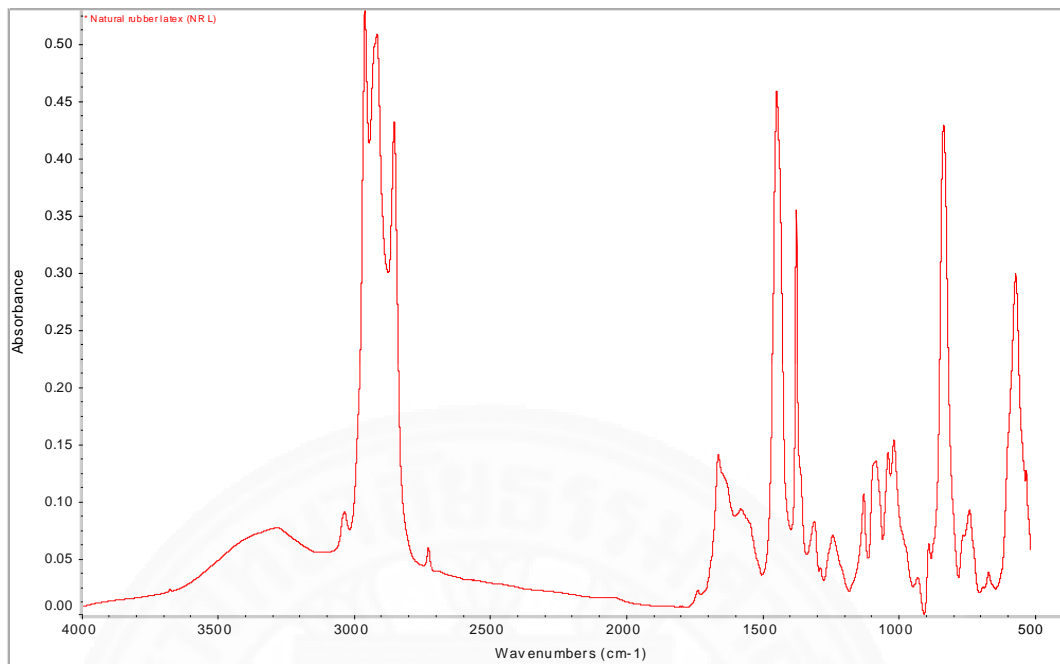
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางต๋อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมาด้วยการทดสอบ FTIR

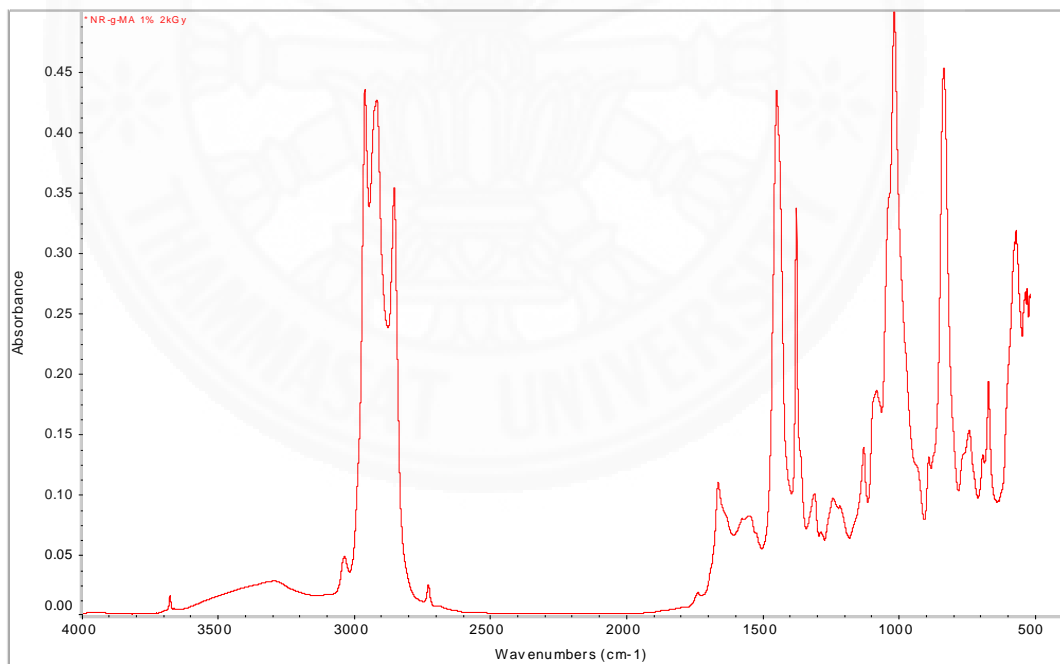
ตารางที่ ก-1

แถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางต๋อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมาด้วยการทดสอบ FTIR

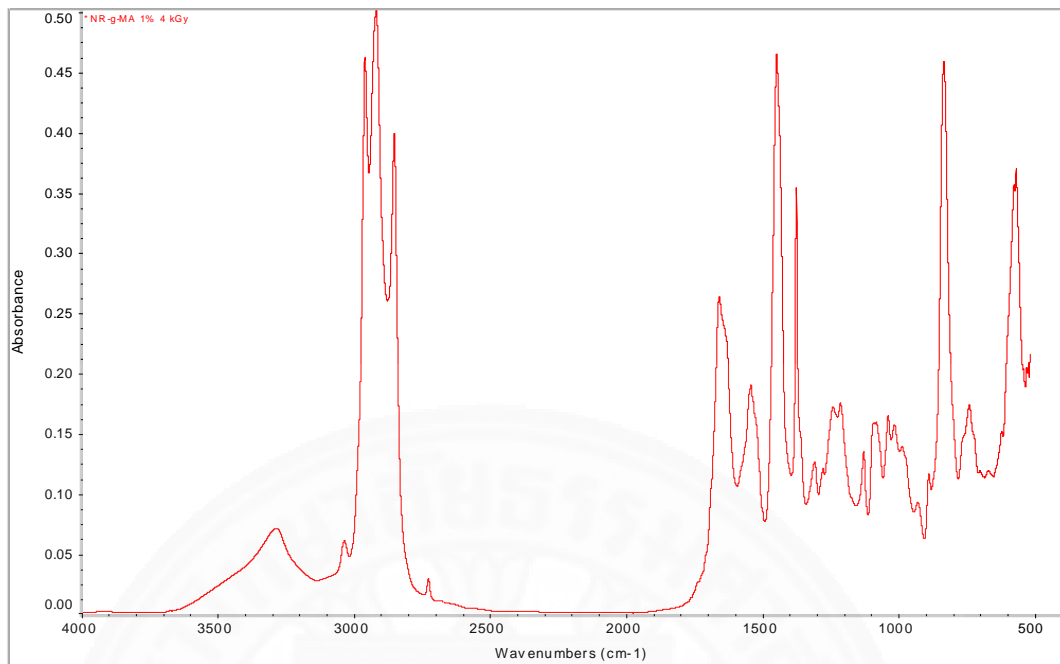
Functional group	Wavenumber (cm ⁻¹)
C-H bending	841
C-O stretching	1215-1250
C-H bending of CH ₃	1377
C-H bending of CH ₂	1452
C=C stretching	1662
C-H stretching of -CH	2835
C-H stretching of -CH ₂ -	2916
C-H stretching of -CH ₃	2960
=C-H stretching	3037



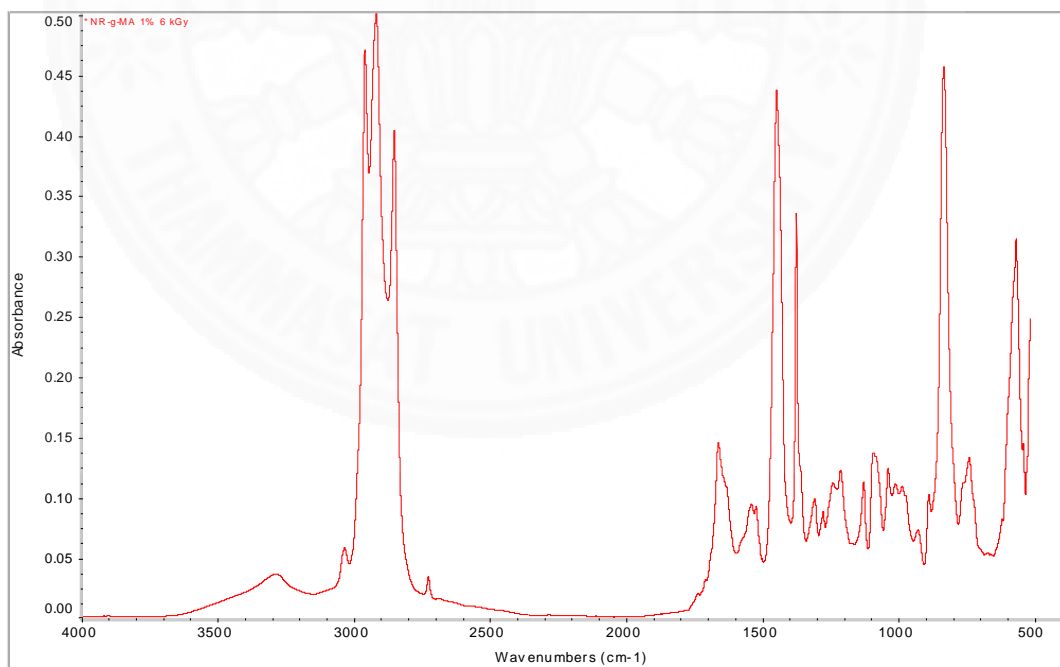
ภาพที่ ก- 1 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นที่มีปริมาณยางแห้ง 60%



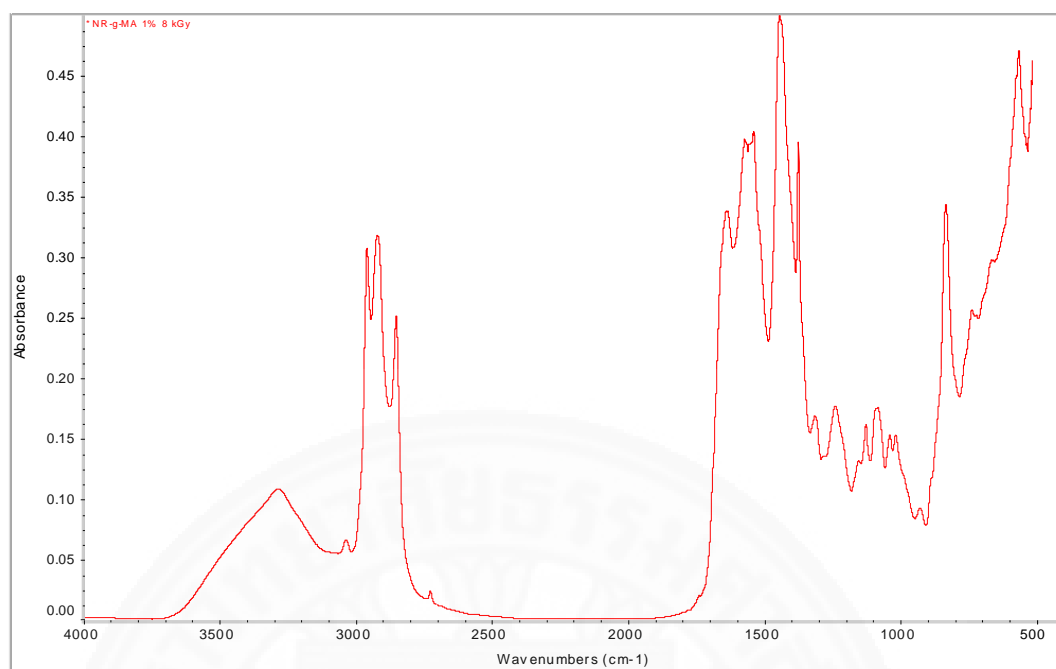
ภาพที่ ก- 2 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 1% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy



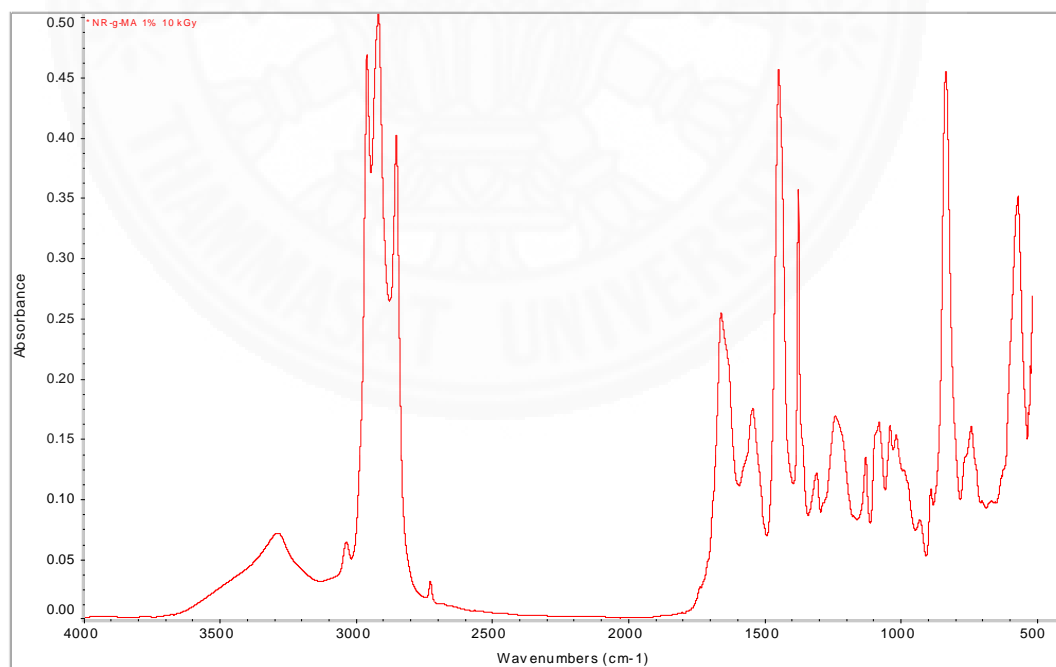
ภาพที่ ก- 3 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 1% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy



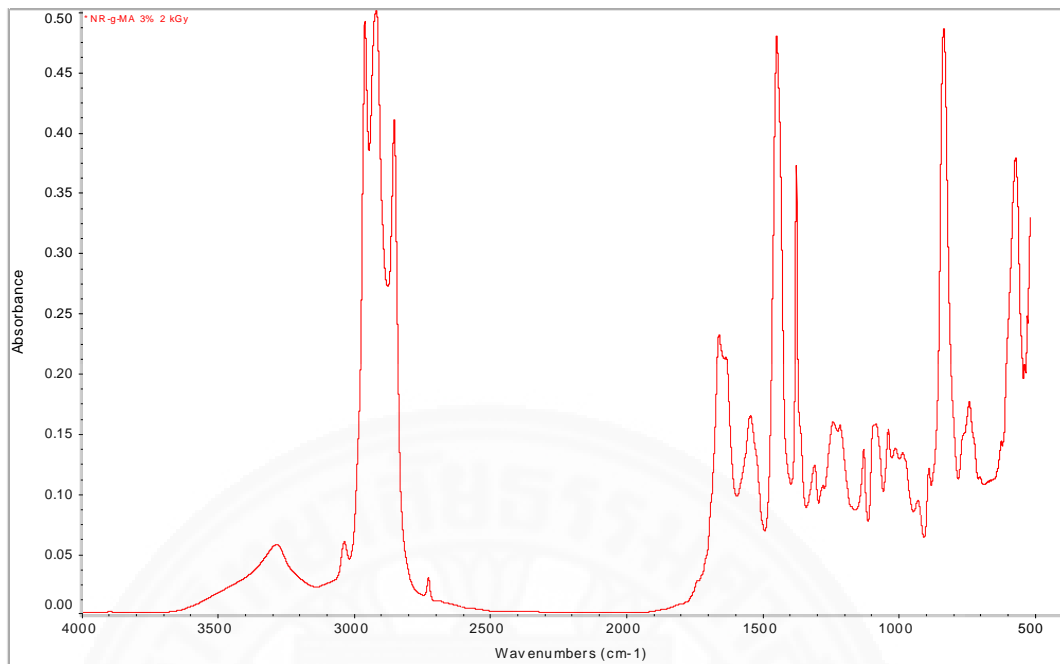
ภาพที่ ก- 4 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ที่ปริมาณ 1% โดยการฉายรังสีแกมมา 6 kGy



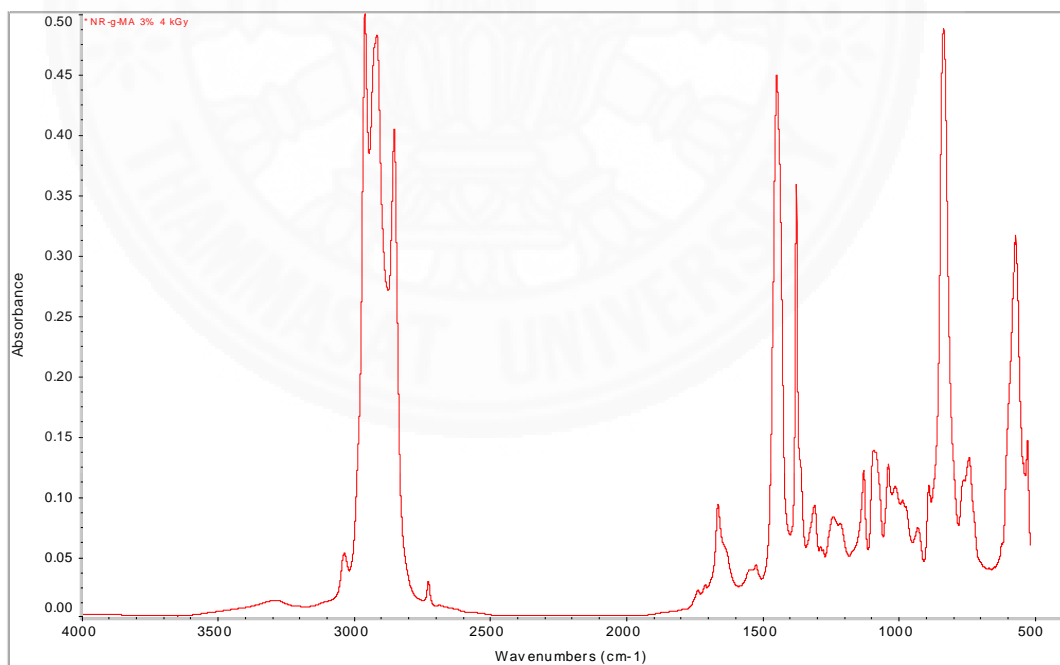
ภาพที่ ก- 5 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 1% โดยการฉายรังสีแกมมา 8 kGy



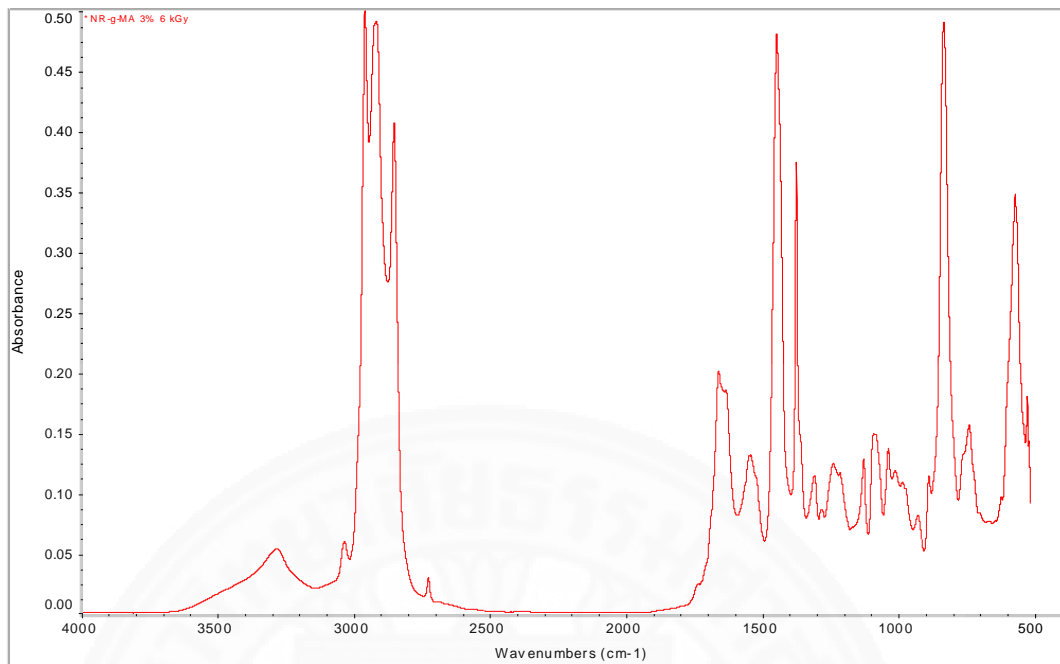
ภาพที่ ก- 6 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 1% โดยการฉายรังสีแกมมา 10 kGy



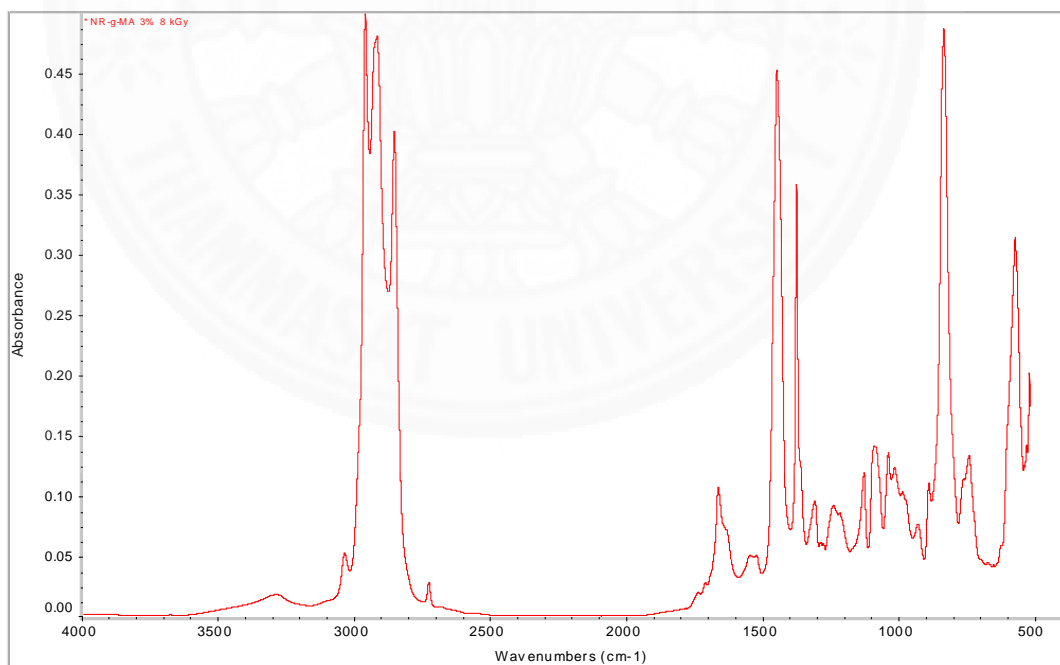
ภาพที่ ก- 7 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 3% โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy



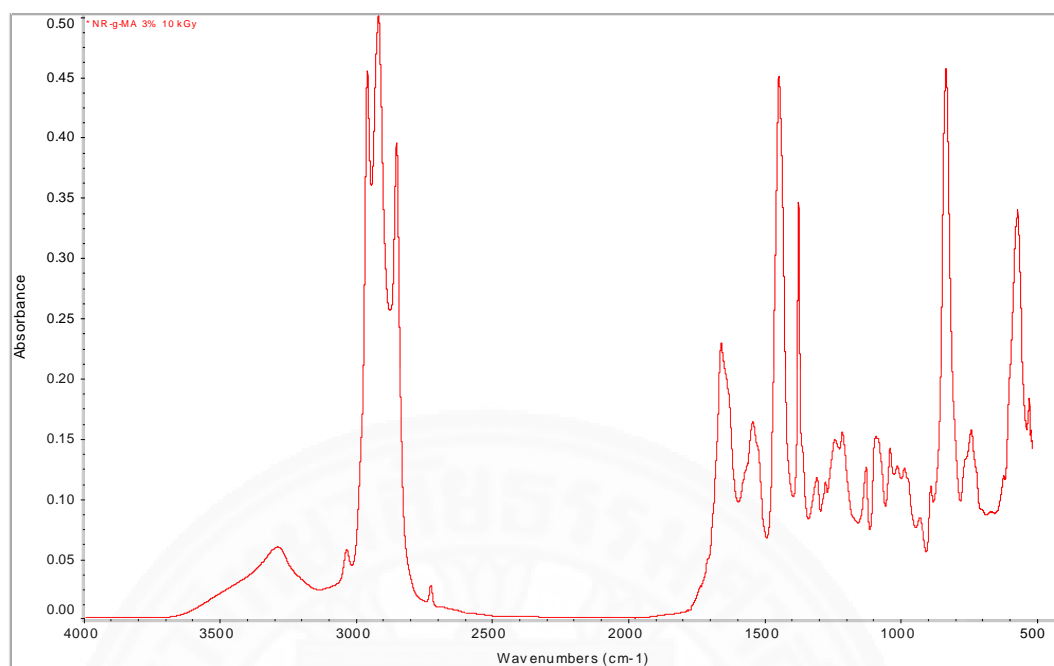
ภาพที่ ก- 8 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางข้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 3% โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy



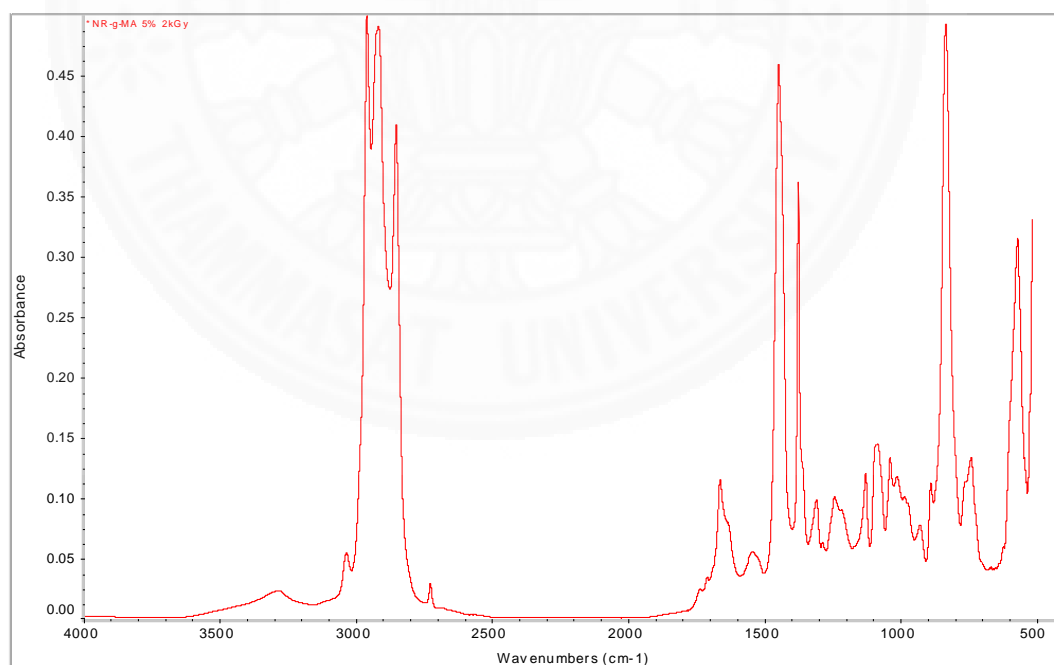
ภาพที่ ก- 9 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 3% โดยการฉายรังสีแกมมา 6 kGy



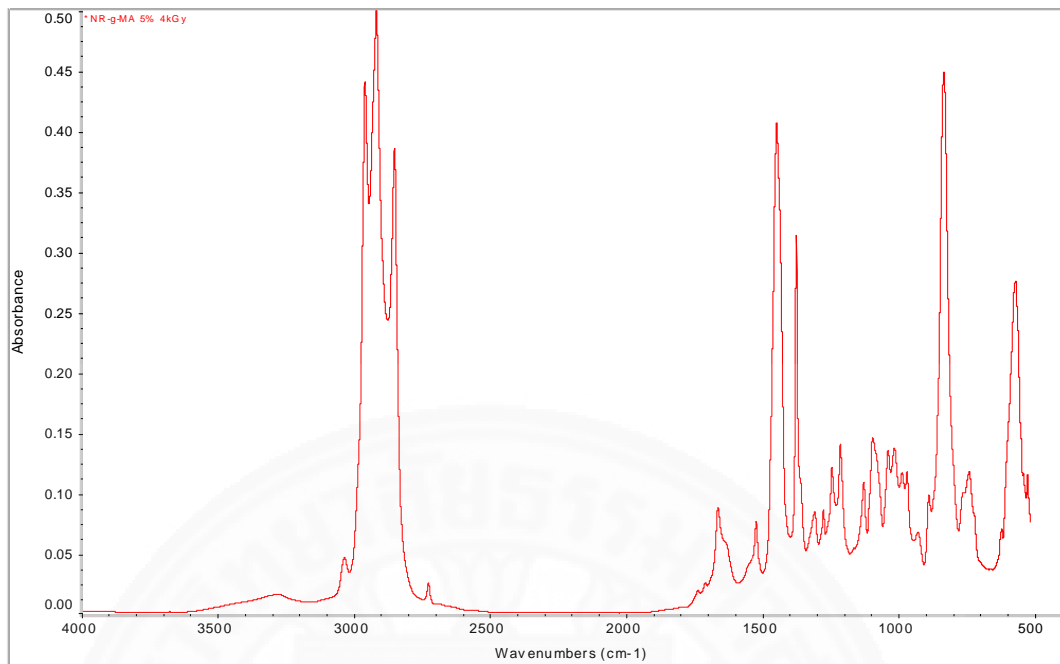
ภาพที่ ก- 10 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 3% โดยการฉายรังสีแกมมา 8 kGy



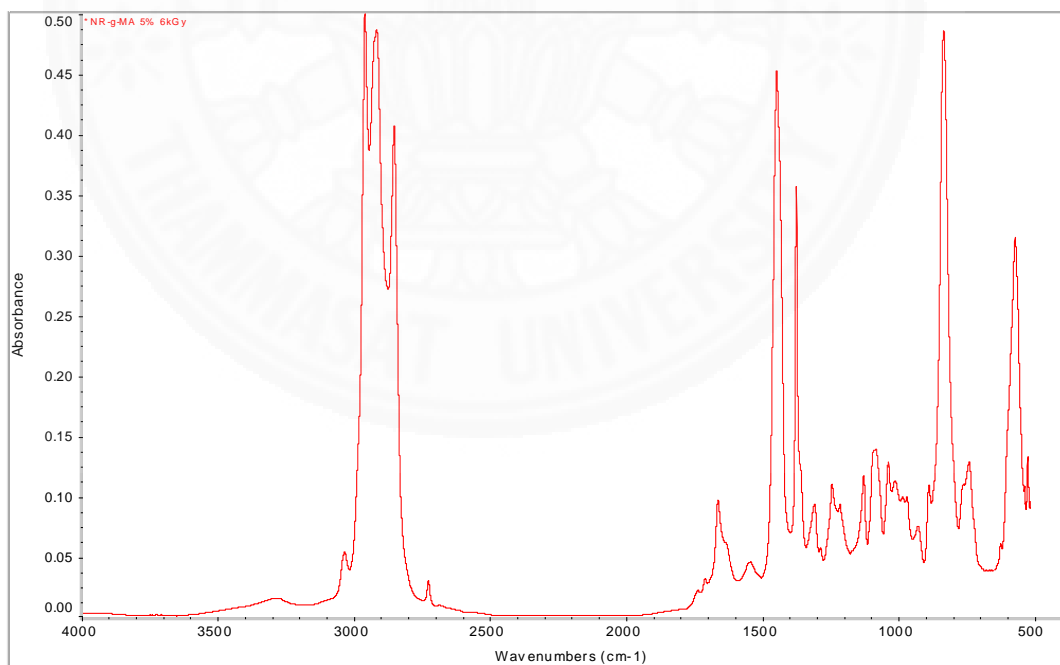
ภาพที่ ก- 11 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 3% โดยการฉายรังสีแกมมา 10 kGy



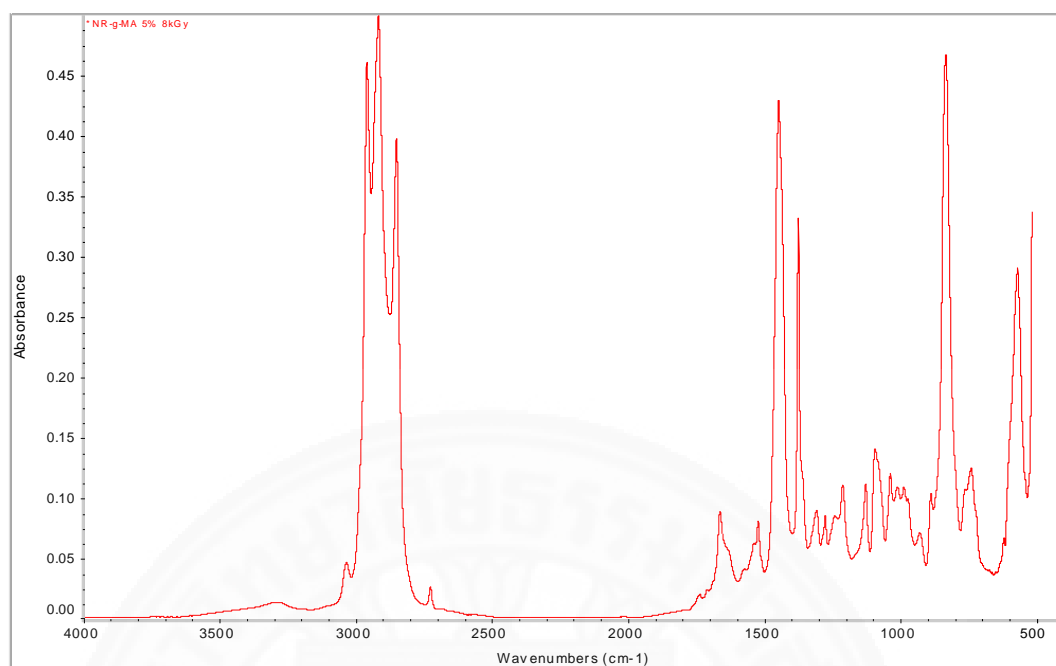
ภาพที่ ก- 12 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 5% โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy



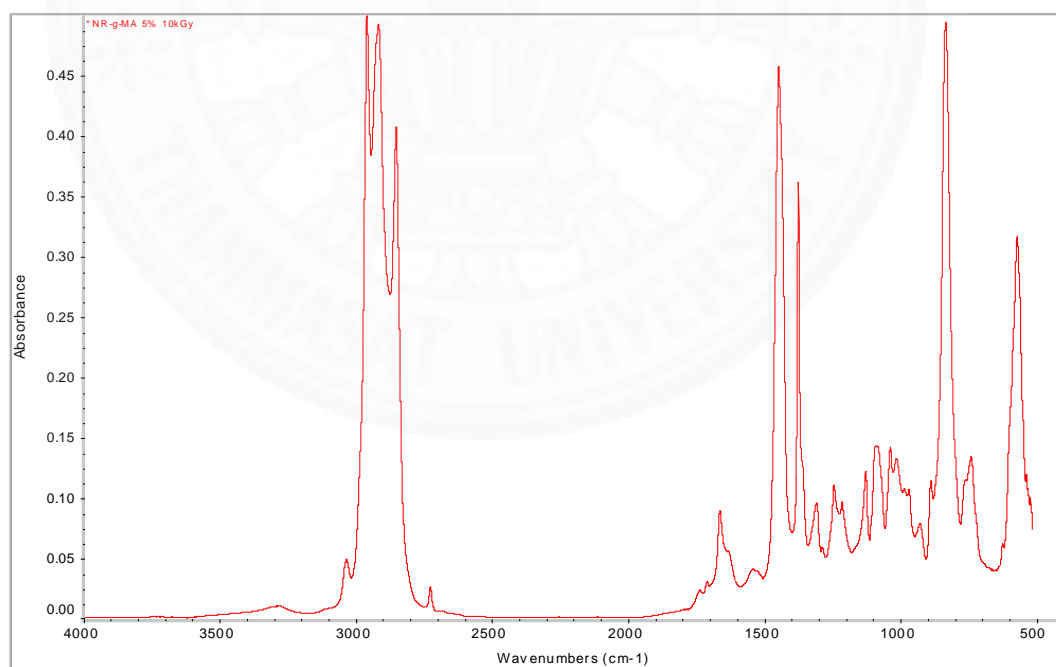
ภาพที่ ก- 13 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 5% โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy



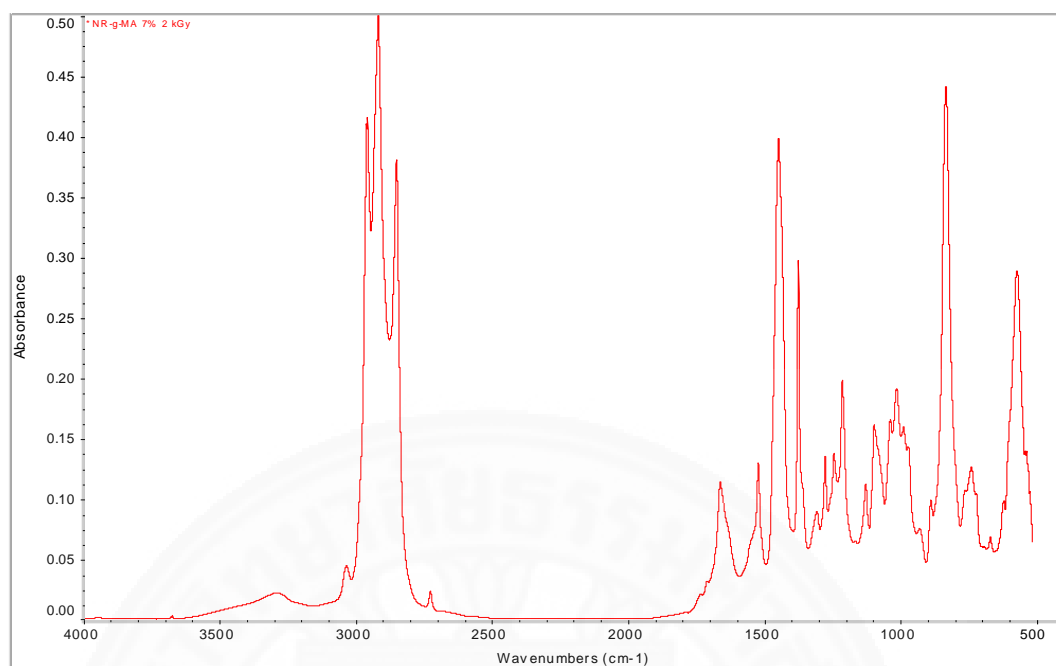
ภาพที่ ก- 14 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 5% โดยการฉายรังสีแกมมา 6 kGy



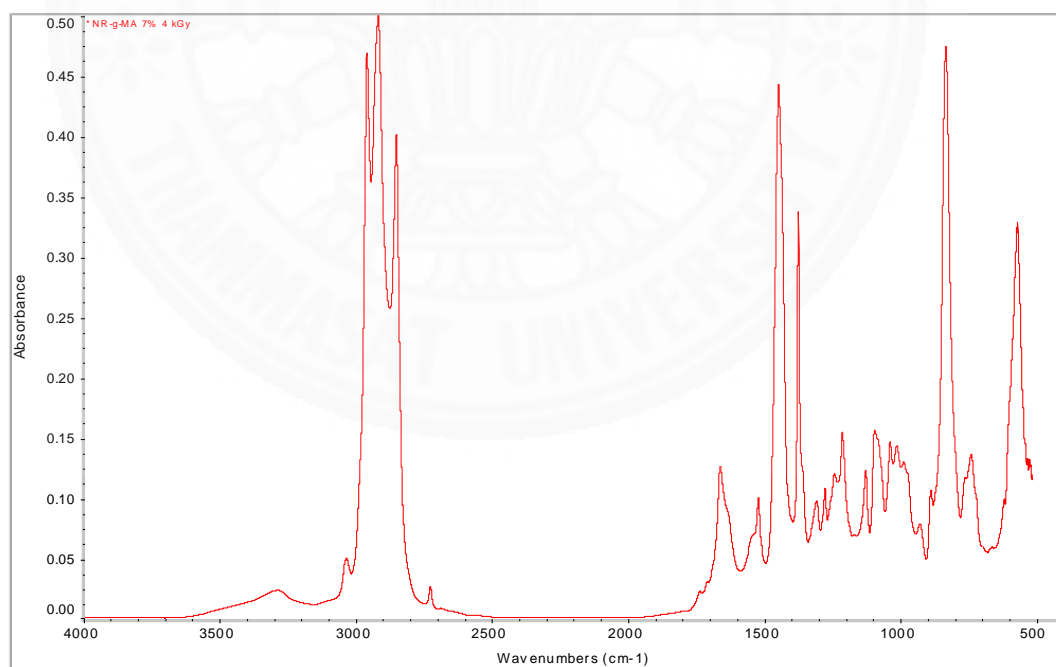
ภาพที่ ก- 15 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 5% โดยการฉายรังสีแกมมา 8 kGy



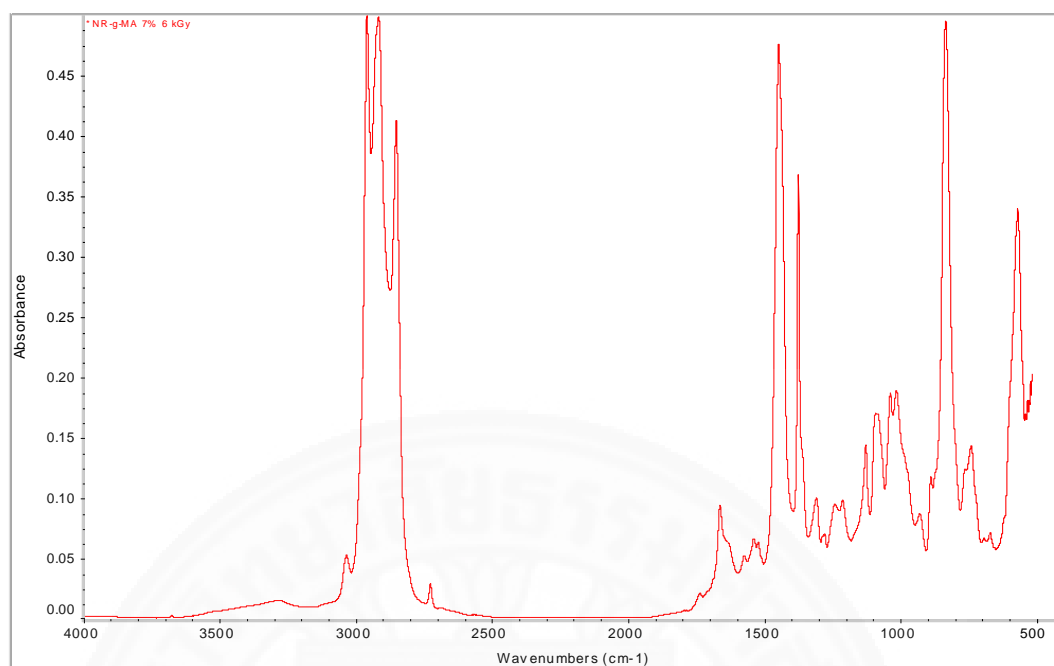
ภาพที่ ก- 16 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 5% โดยการฉายรังสีแกมมา 10 kGy



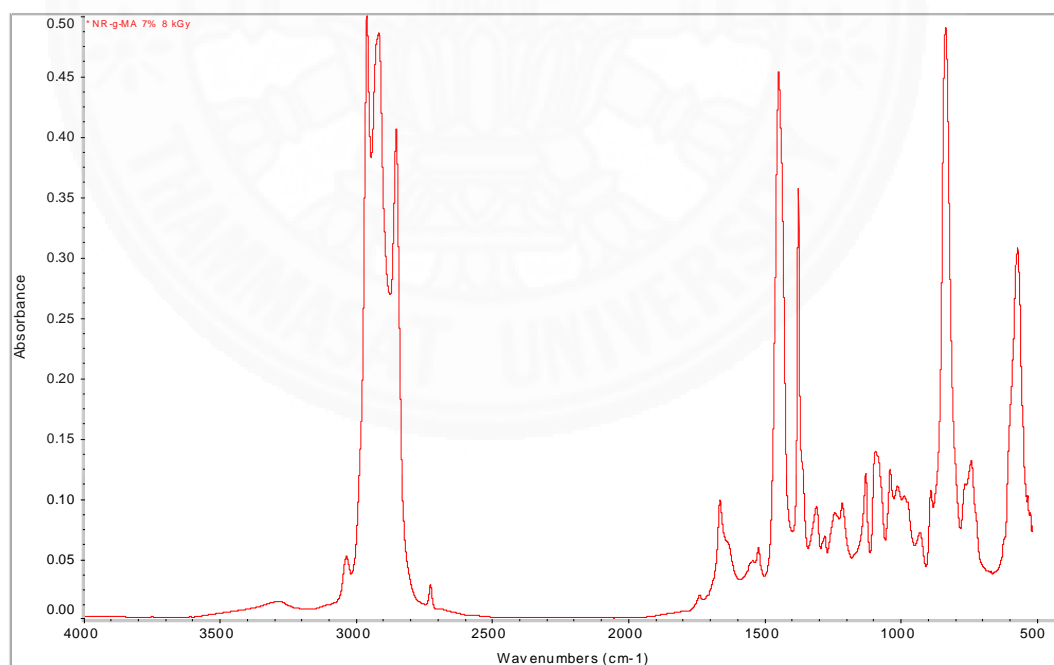
ภาพที่ ก- 17 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 7% โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy



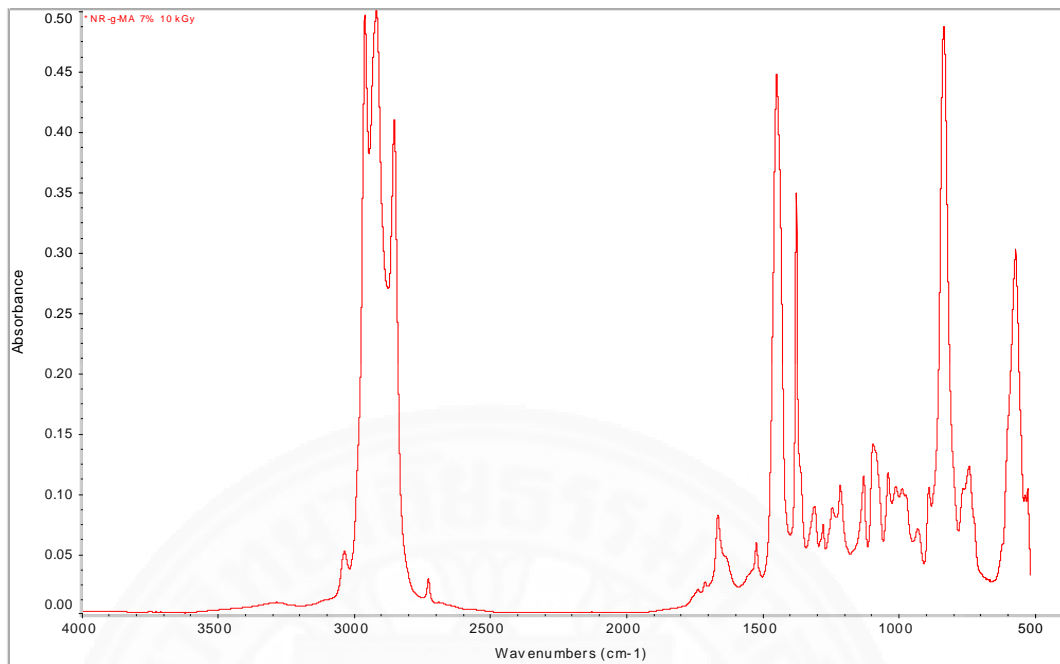
ภาพที่ ก- 18 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 7% โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy



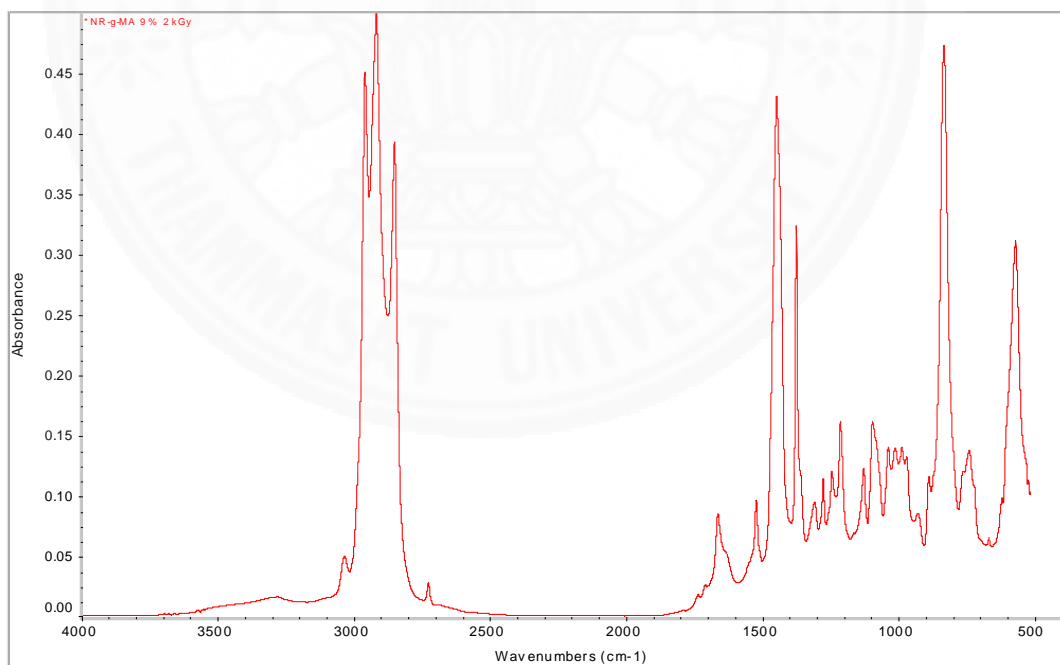
ภาพที่ ก- 19 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 7% โดยการฉายรังสีแกมมา 6 kGy



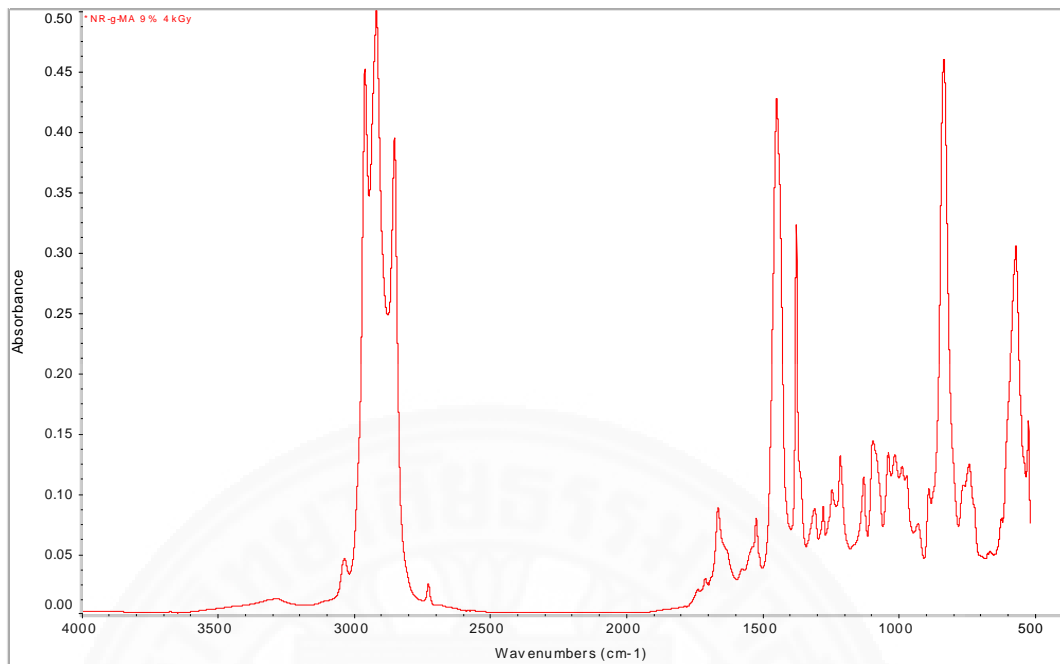
ภาพที่ ก- 20 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 7% โดยการฉายรังสีแกมมา 8 kGy



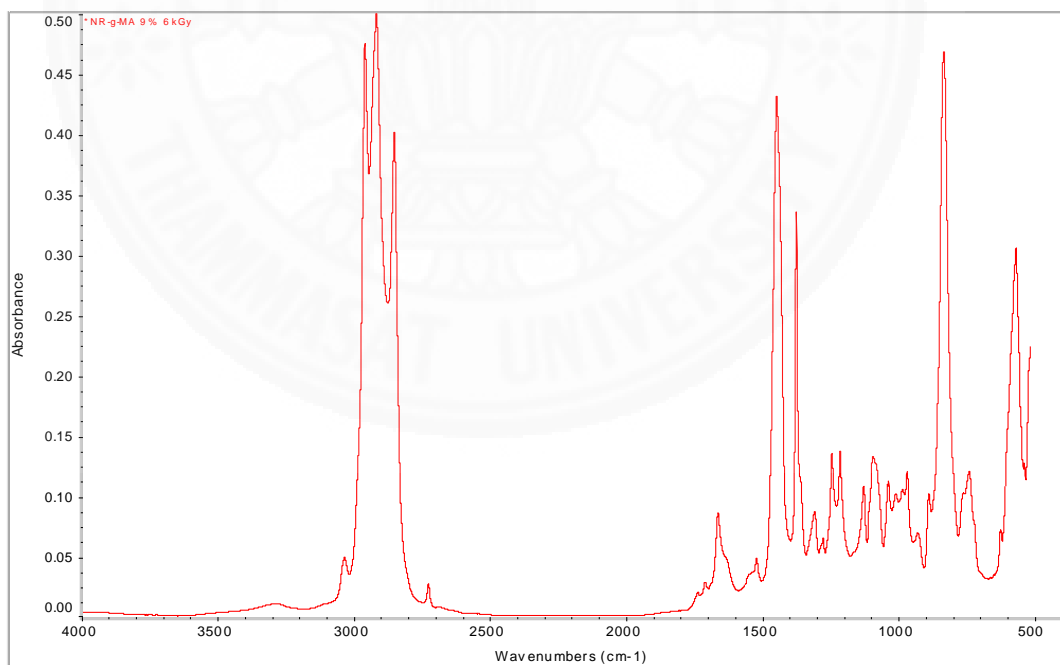
ภาพที่ ก- 21 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 7% โดยการฉายรังสีแกมมา 10 kGy



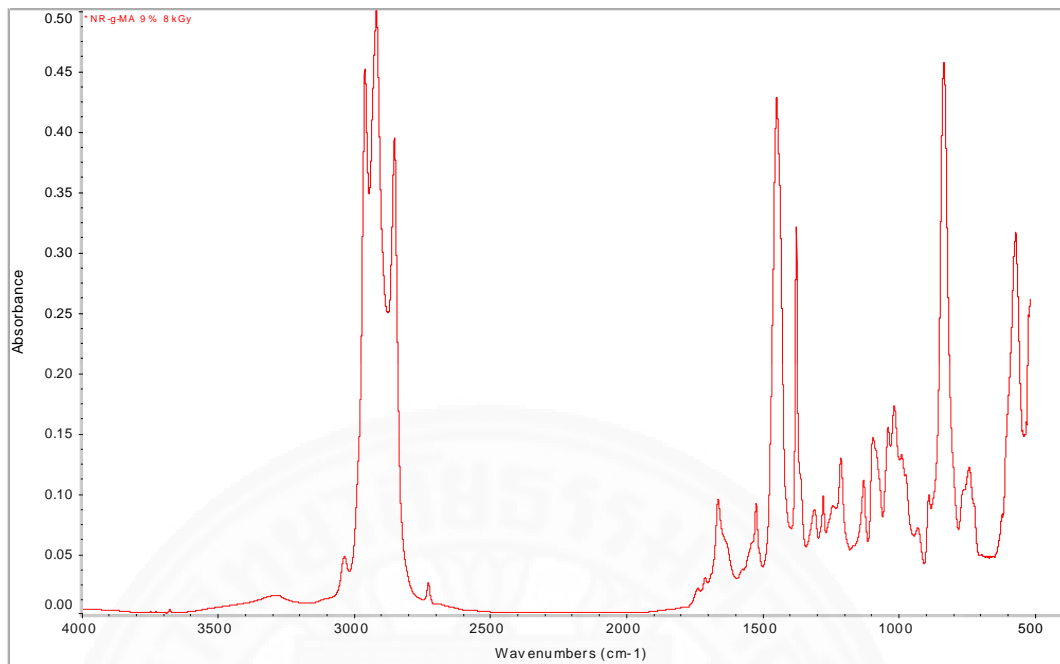
ภาพที่ ก- 22 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy



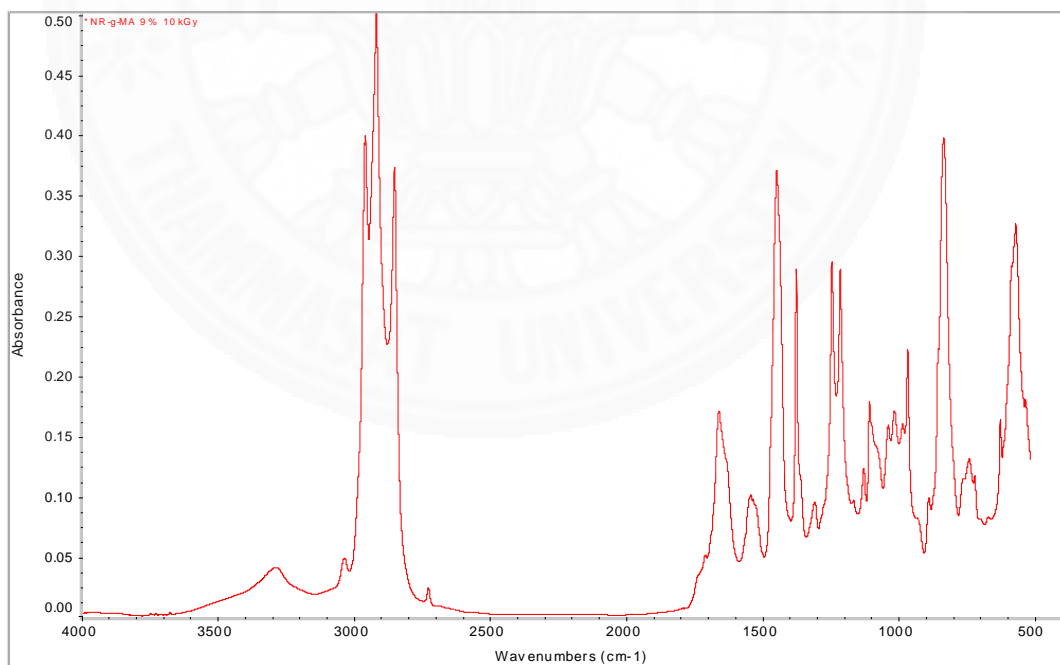
ภาพที่ ก- 23 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy



ภาพที่ ก- 24 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% โดยการฉายรังสีแกมมา 6 kGy



ภาพที่ ก- 25 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% โดยการฉายรังสีแกมมา 8 kGy



ภาพที่ ก- 26 ผลการทดสอบ FTIR ของน้ำยางชั้นต่อก่อด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ที่ปริมาณ 9% โดยการฉายรังสีแกมมา 10 kGy

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบการวิเคราะห์อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio; Ar)

การหาปริมาณการต่อกิ่งโดยการคำนวณอัตราส่วนการดูดกลืน จากการทดสอบ FTIR

$$\text{อัตราส่วนการดูดกลืน (Absorbance ratio; Ar)} = T_{\text{C-O}} / T_{\text{C-H}}$$

$T_{\text{C-O}}$ = ปริมาณความเข้มข้นของ C-O ที่ตำแหน่งแถบการดูดกลืน 1215 cm^{-1} และ 1250 cm^{-1}

$T_{\text{C-H}}$ = ปริมาณความเข้มข้นของ C-H ที่ตำแหน่งแถบการดูดกลืน 1377 cm^{-1}

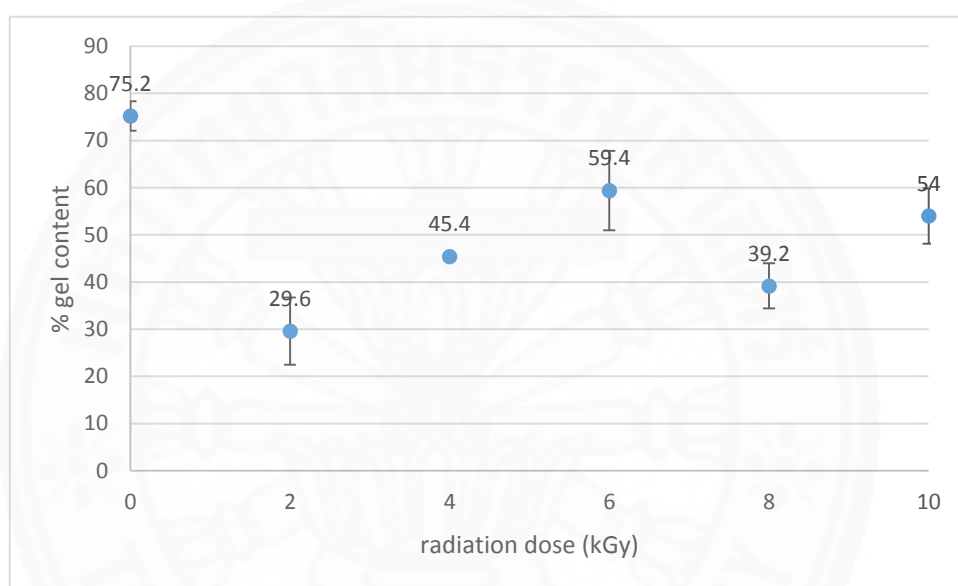
ตารางที่ ข- 1

ข้อมูลดิบการวิเคราะห์ Absorbance ratio

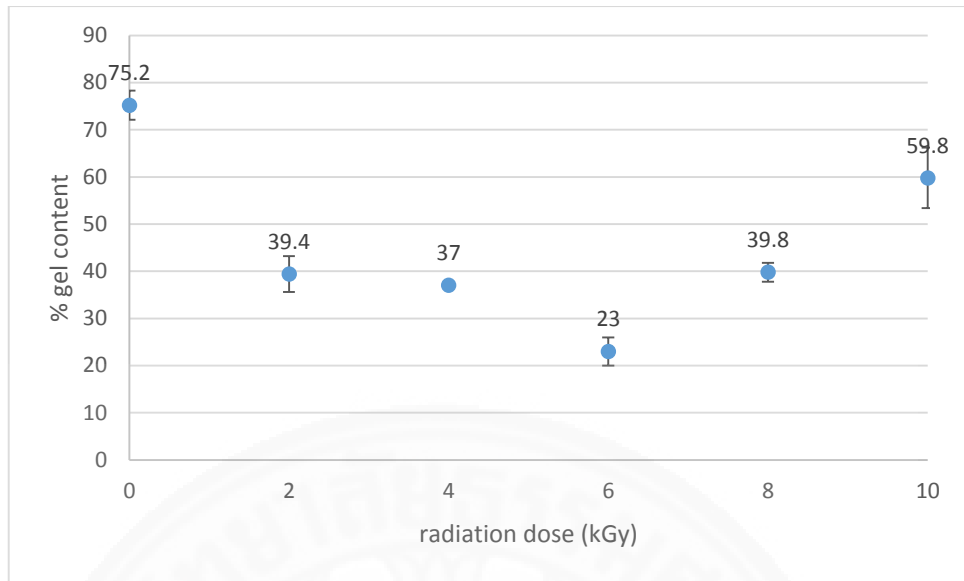
Dose rate (kGy)	Absorbance ratio					
	NRL	ปริมาณมาเลอิก แอนไฮไดรด์				
		1%	3%	5%	7%	9%
0	0.690567	-	-	-	-	-
2	-	0.550486	0.861355	0.523686	1.009449	0.772892
4	-	0.981155	0.446717	0.739825	0.774937	0.667943
6	-	0.69756	0.654347	0.545471	0.518629	0.718291
8	-	0.832306	0.494971	0.558432	0.507149	0.628409
10	-	0.931746	0.883762	0.534319	0.528589	1.687113

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์
โดยการฉายรังสีแกมมา

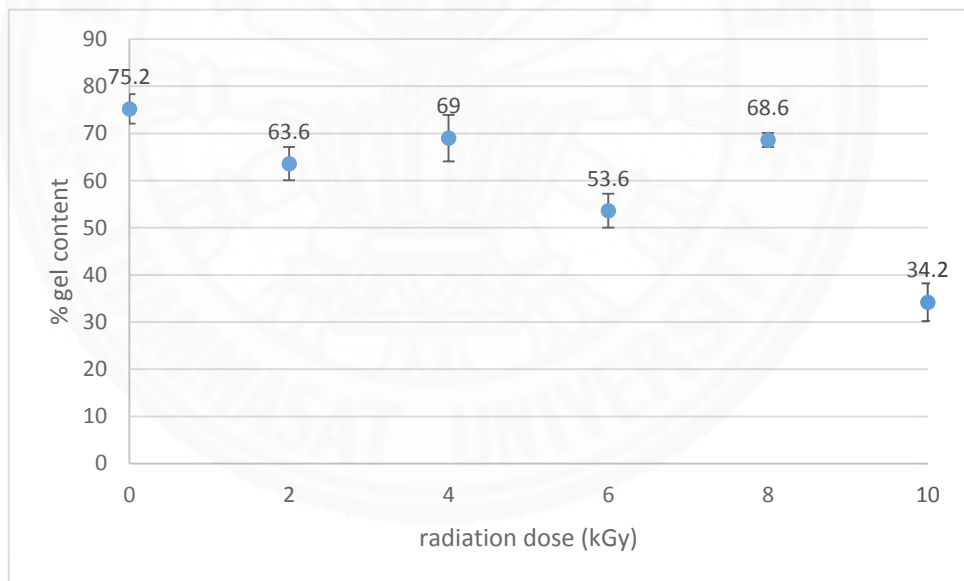
การทดสอบวิธีที่ 1 การวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงโดยการแช่ในโทลูอีน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงกรองแยกเจล



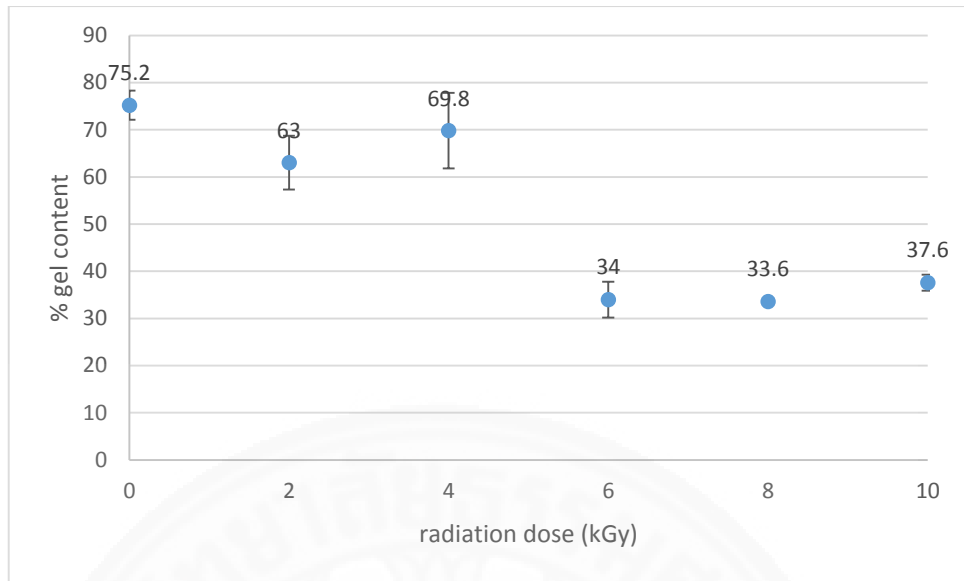
ภาพที่ ค- 1 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 1% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 1



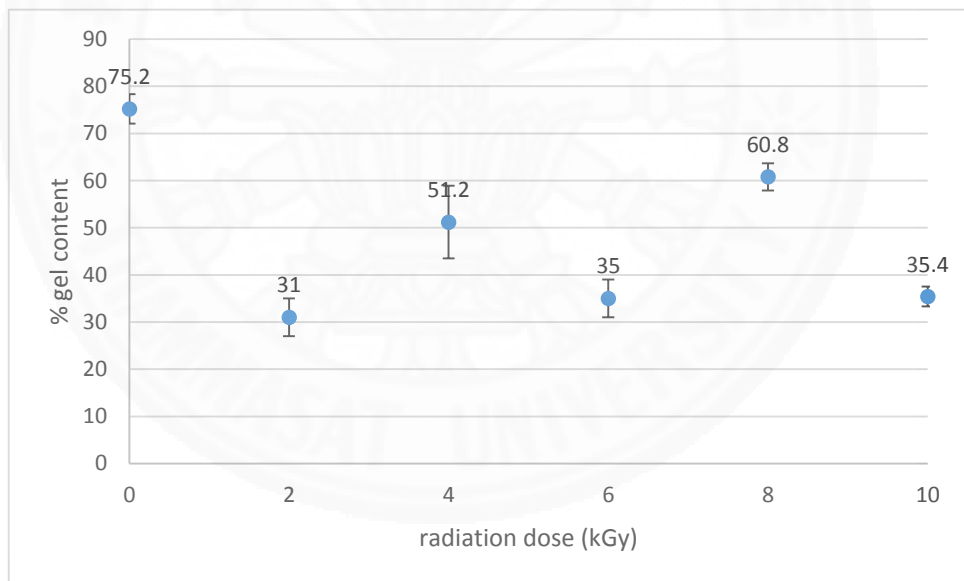
ภาพที่ ค- 2 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 3% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 1



ภาพที่ ค- 3 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 5% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 1

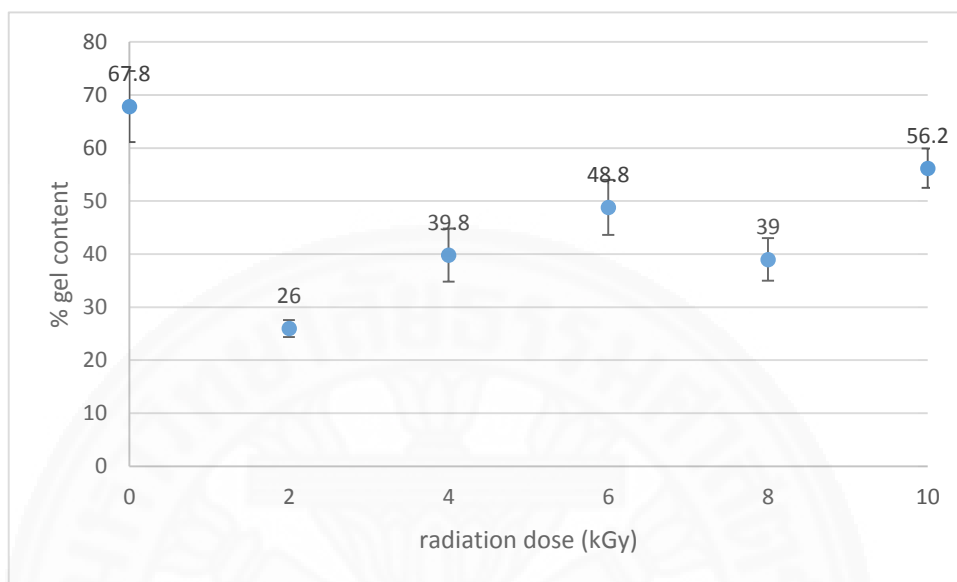


ภาพที่ ค- 4 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 7% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 1

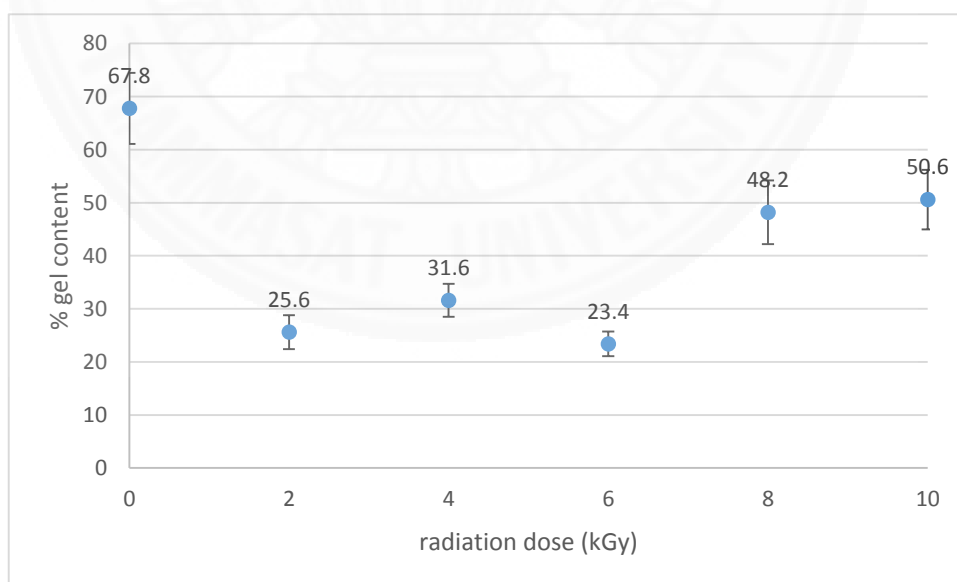


ภาพที่ ค- 5 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 1

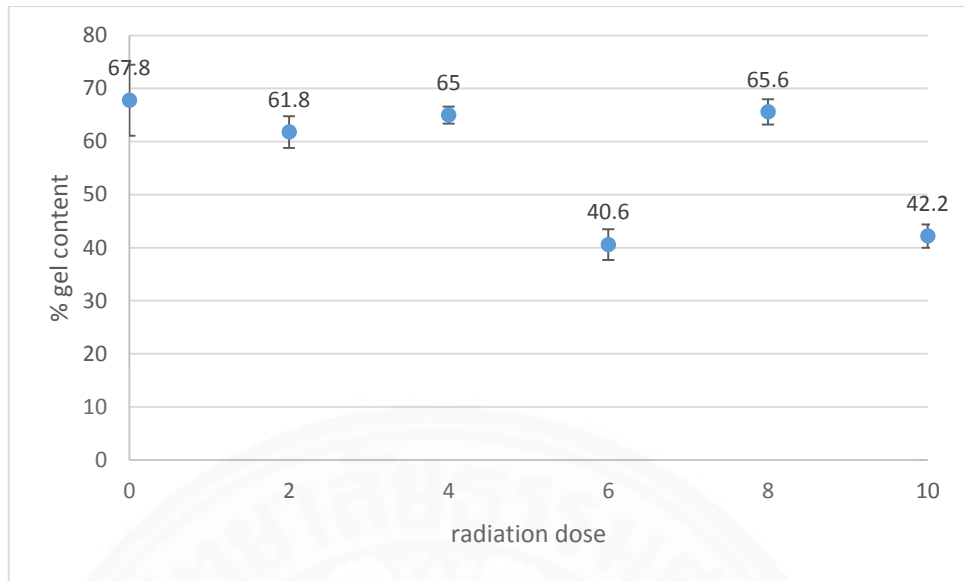
การทดสอบวิธีที่ 2 การวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงโดยการแช่ในโทลูอีน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 สัปดาห์ (เก็บในที่มืด) แล้วจึงกรองแยกเจล



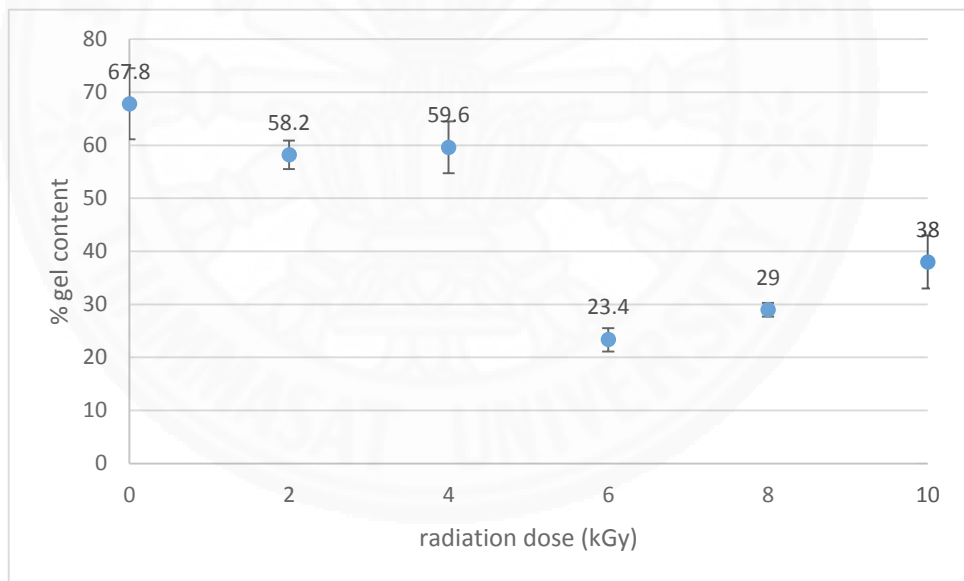
ภาพที่ ค- 6 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 1% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 2



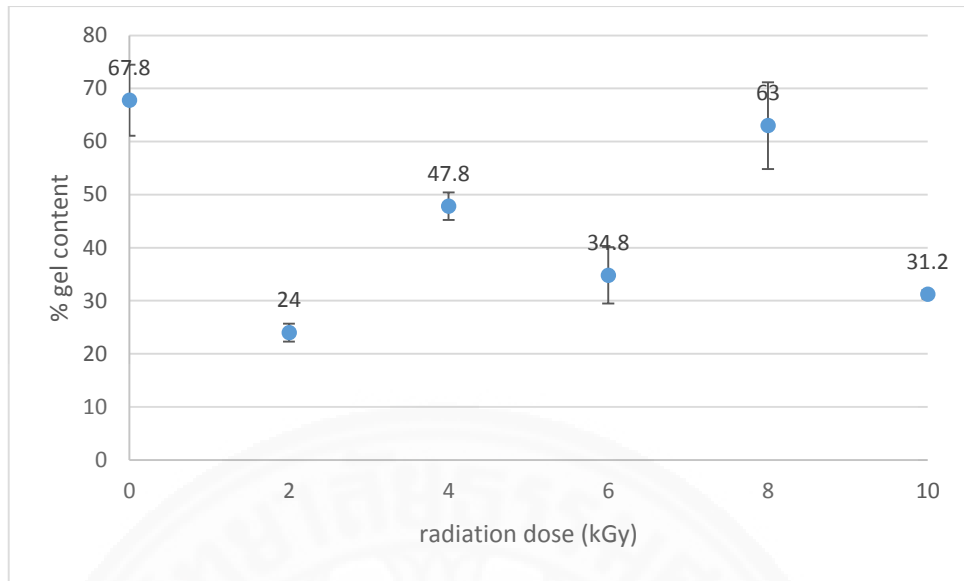
ภาพที่ ค- 7 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 3% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 2



ภาพที่ ค- 8 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 5% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 2

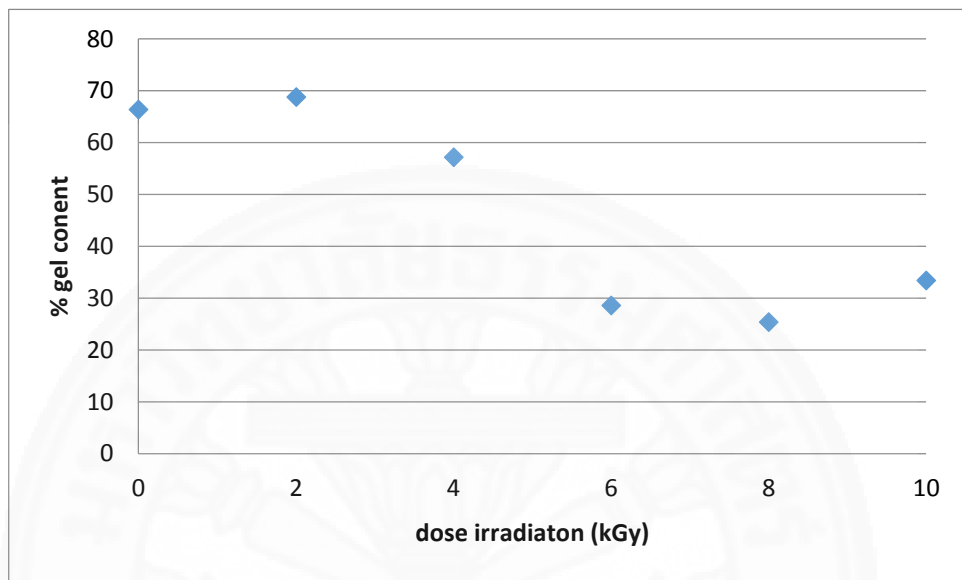


ภาพที่ ค- 9 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 7% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 2

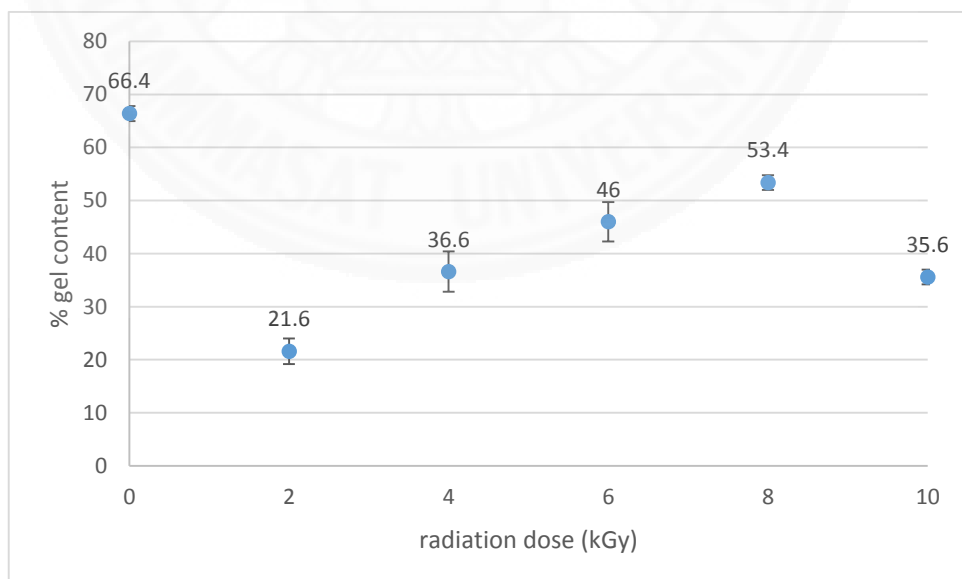


ภาพที่ ค- 10 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 2

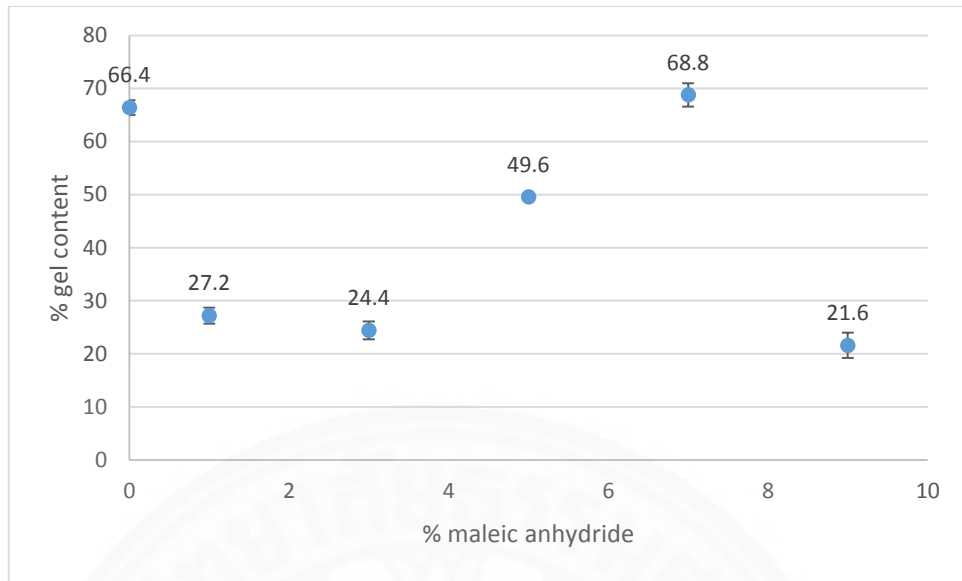
การทดสอบวิธีที่ 3 การวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงโดยการแช่ในโทลูอีน ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 สัปดาห์ (เก็บในที่มืด) แล้วจึงปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกชั้นและกรองแยกเจล



ภาพที่ ค- 11 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 7% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 3



ภาพที่ ค- 12 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกลงด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีที่ 3



ภาพที่ ค- 13 ผลวิเคราะห์ปริมาณเจลของน้ำยางข้นและน้ำยางตอกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy ด้วยวิธีที่ 3

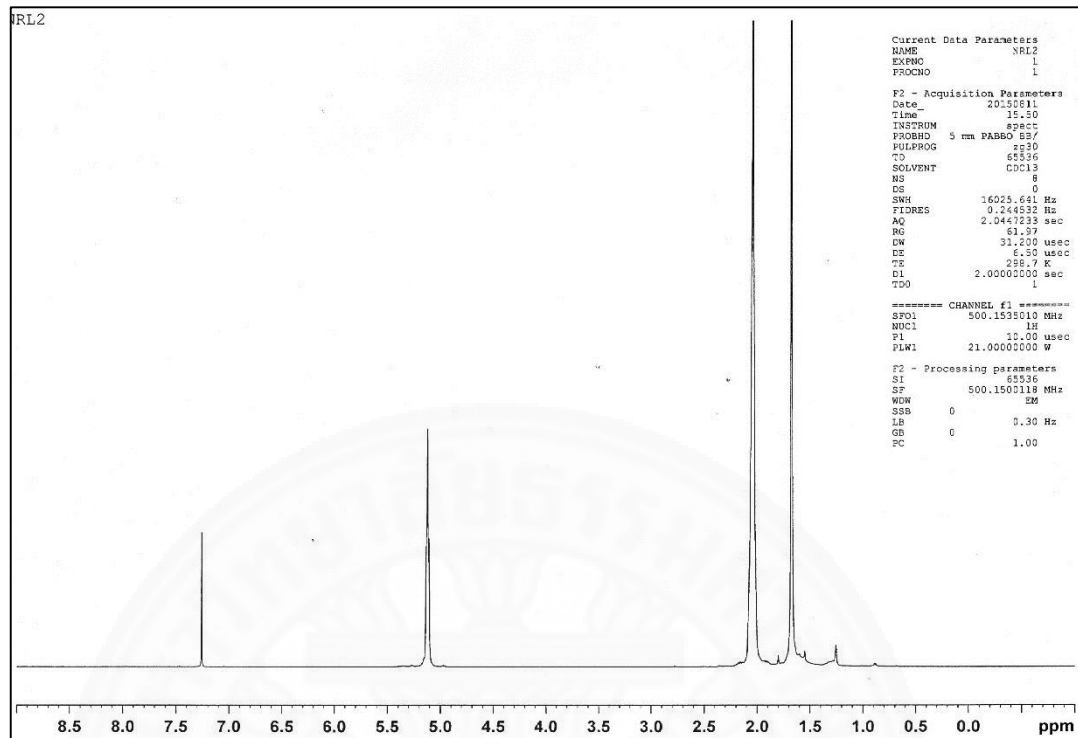
ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางต๋อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมาด้วยการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$

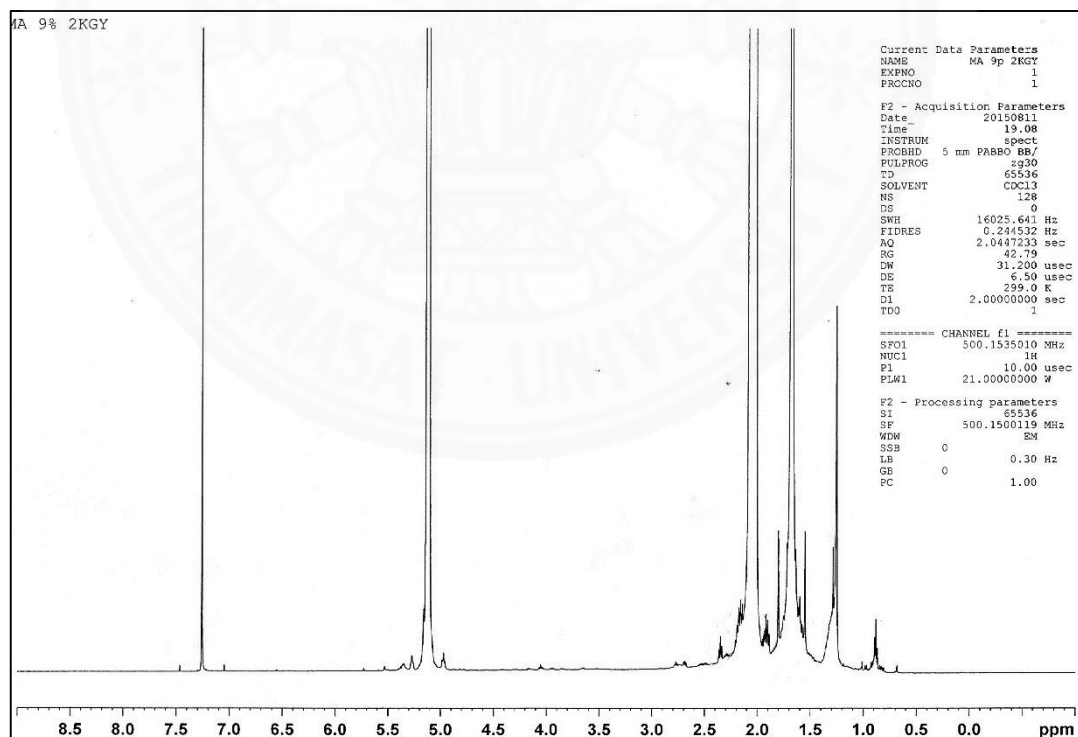
ตารางที่ ง-1

แถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติและยางต๋อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ โดยการฉายรังสีแกมมาด้วยการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$

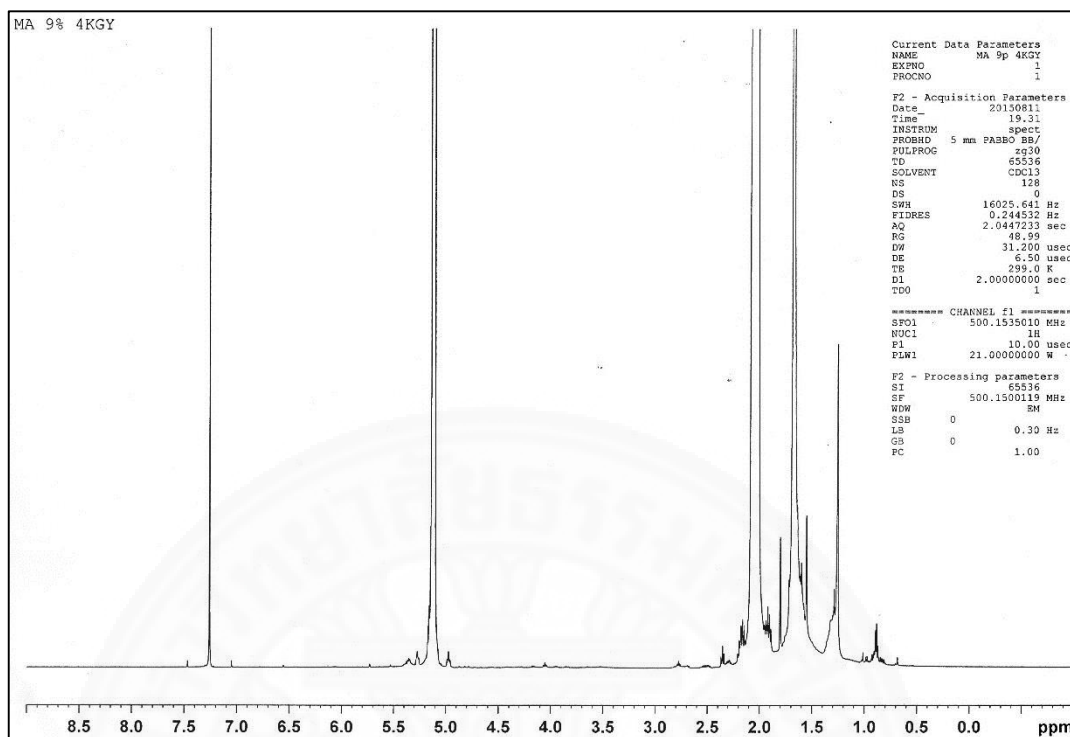
Functional group	Chemical shift (ppm)
C-CH ₃	0.9
C-C-CH ₂	1.35
C-CH	1.55
C=C-CH ₃	1.67
C=C-CH ₂	2.04
HC-C=O	2.2
H ₂ C-C=O	2.4
-C=CH	5.11
CDCl ₃ (Solvent)	7.26



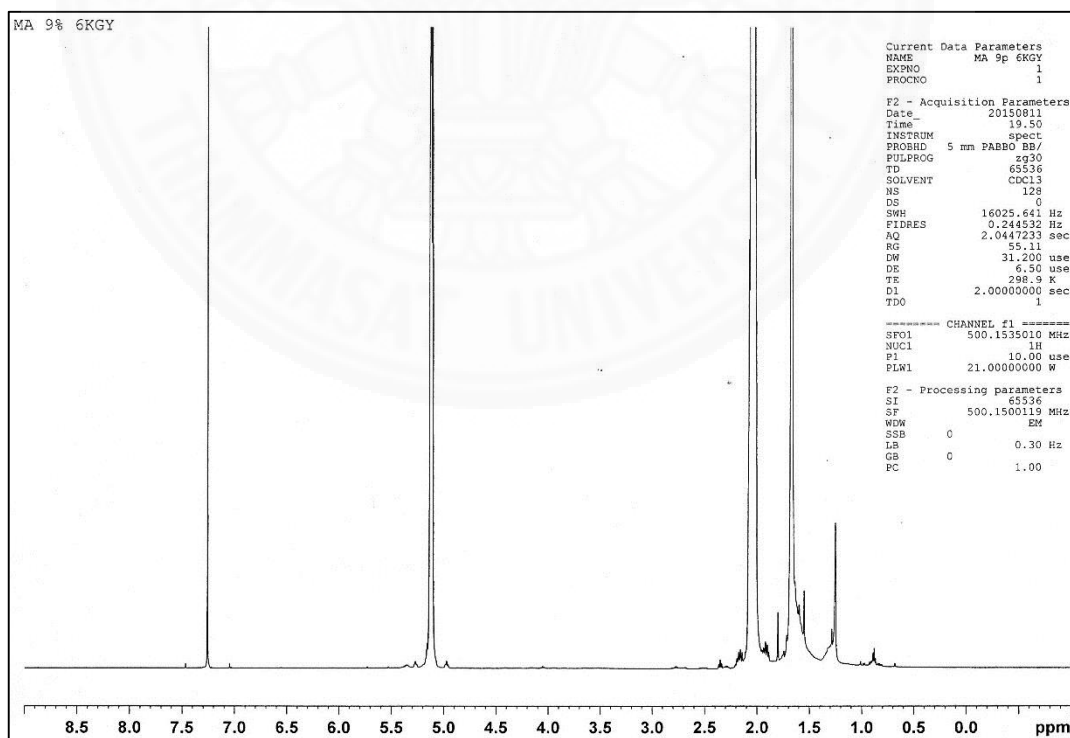
ภาพที่ ง- 1 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางชั้นที่มีปริมาณยางแห้ง 60%



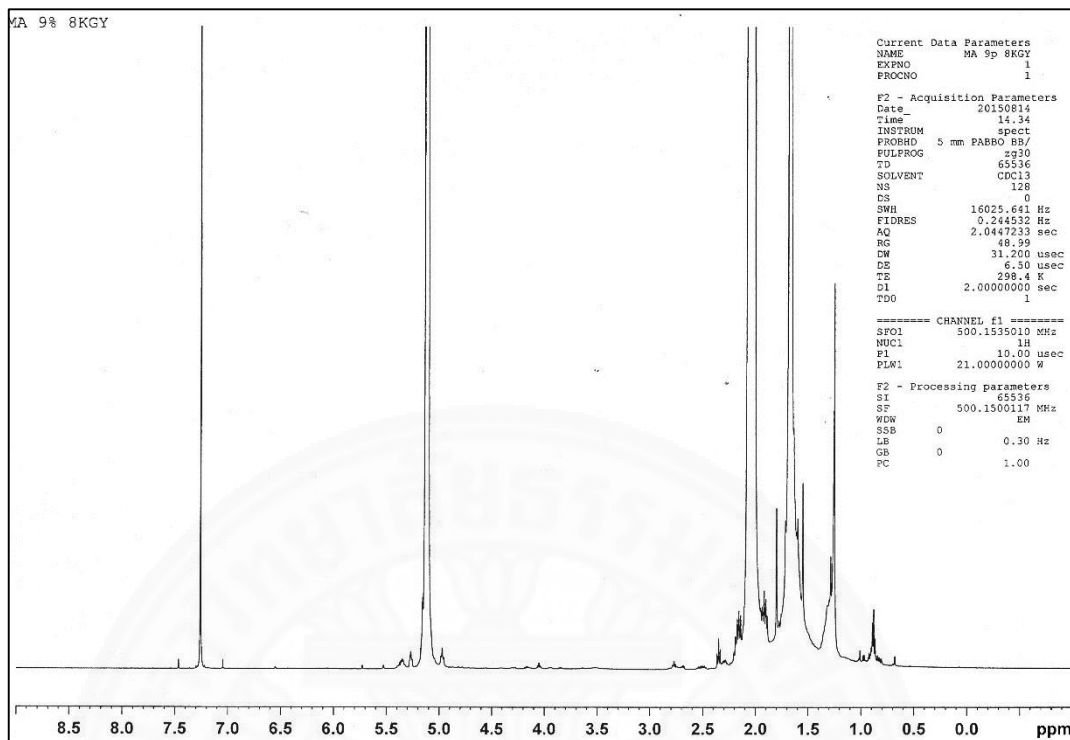
ภาพที่ ง- 2 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางชั้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 2 kGy



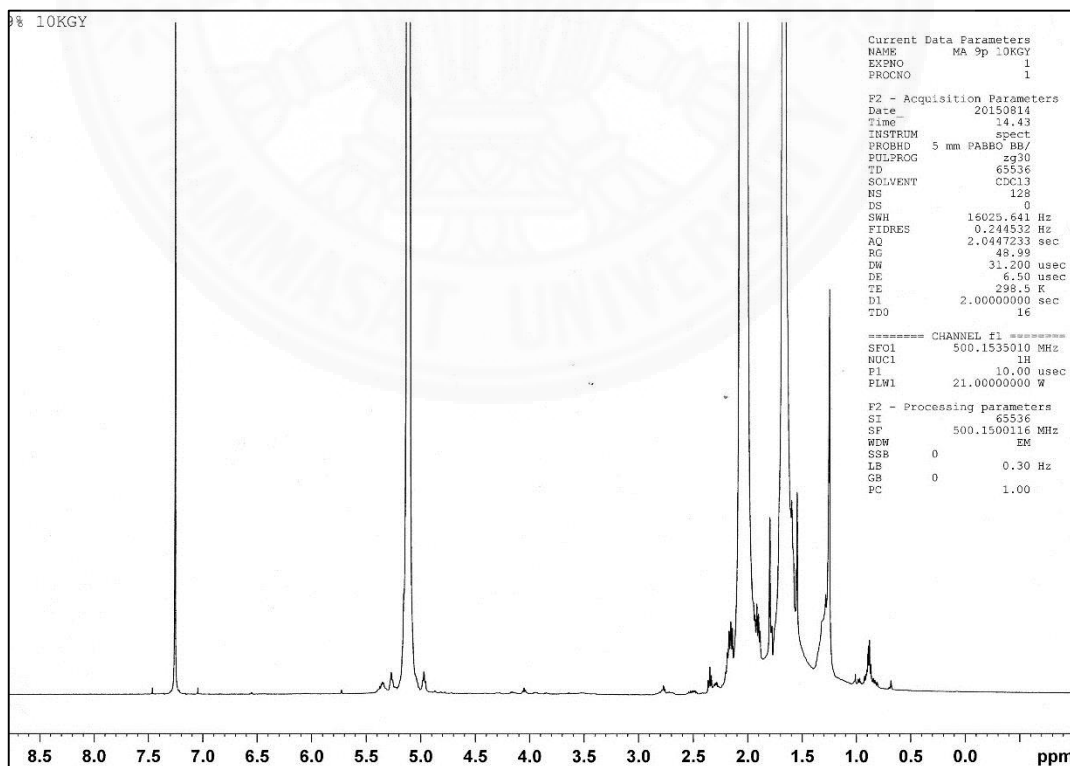
ภาพที่ ง- 3 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 4 kGy



ภาพที่ ง- 4 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 6 kGy



ภาพที่ ง- 5 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 8 kGy



ภาพที่ ง- 6 ผลการทดสอบ $^1\text{H-NMR}$ ของน้ำยางข้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรต์ 9% ของยางแห้ง โดยการฉายรังสีแกมมา 10 kGy

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสิริวรรณ พงษ์สถิตย์
วันเดือนปีเกิด	3 เมษายน 2534
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2555: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ทุนการศึกษา	ปีงบประมาณ 2558: ทุนสนับสนุนงานวิจัยทั่วไป ประเภททุนวิจัยทั่วไป สำหรับนักศึกษาระดับ บัณฑิตศึกษา

ผลงานทางวิชาการ

S.Pongsathit and C.Pattamaprom (2016). *Grafting of maleic anhydride onto natural rubber latex induced by gamma irradiation*. Proceeding of The 31st international conference of the polymer processing society.