

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การลดมวตโมเลขุขของยงษรรมชชชติโดยใช้ค้ล้ันไมโครเวฟ



T119516



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... **119516**
วัน,เดือน,ปี... - **8 S.A. 2554**

b. **10816524**
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE REDUCTION OF MOLECULAR WEIGHT OF NATURAL
RUBBER BY MICROWAVE INDUCED THERMOLYSIS**



THIS REPORT IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาบัตรเรื่อง การลดมวลงโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

โดย นายกวิน โนคำ
นายณัฐพัชร์ ภิรมย์กิจ
นางสาวพิชามณัฐ องค์ศรีตระกูล

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

กรรมการ

(ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมภนิสรณ์)

กรรมการ

(ผศ.รินฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

การลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

โดย

นายกวิน

โนคำ

นายณัฐพัชร์

ภิรมย์กิจ

นางสาวพิชามณูช

องค์ศรีตระกูล

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.สุรัตน์

อารีรัตน์

ปริญญานิพนธ์

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยกระบวนการสลายตัวเชิงความร้อน (Thermolysis) ซึ่ง โมเลกุลของอะเซทิลีนแบล็ค (Acetylene Black) ที่ผสมกับยางธรรมชาติจะเห็นขนาดคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นพลังงานความร้อน ป้อนไปยังที่มีผลต่อการลดมวลโมเลกุลที่ใช้คือ เครื่องไมโครเวฟดัดแปลงที่สามารถปรับกำลังของเครื่องไมโครเวฟเป็น 360, 720, 1,440 และ 1,600 วัตต์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5, 10, 15 และ 20 นาที เมื่อควบคุมปริมาณอะเซทิลีนแบล็คคงที่ 0.1 phr โดยใช้เทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC) ตรวจวัดค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย (\bar{M}_w , \bar{M}_n) และค่าการกระจายตัวแบบผสม (PDI) ของยางธรรมชาติก่อนและหลังการลดมวลโมเลกุล และใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันจากสลายตัวเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่เวลาต่างๆ

จากผลที่ได้พบว่าเมื่อให้ระยะเวลาในการเหนี่ยวนำ 5 นาที การเพิ่มกำลังของเครื่องไมโครเวฟไม่ส่งผลต่อการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติมากนัก แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเหนี่ยวนำ 20 นาที และเพิ่มกำลังของเครื่องไมโครเวฟเป็น 1,600 วัตต์ จะส่งผลให้มวลโมเลกุลและค่าการกระจายตัวแบบผสมของยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลงเหลือ 2.37×10^5 กรัมต่อโมล และค่าการกระจายตัวแบบผสม 1.18 ซึ่งลดจากยางธรรมชาติที่มีมวลโมเลกุลเริ่มต้น 1.23×10^6 กรัมต่อโมล และค่าการกระจายตัวแบบผสม 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติพบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสองซึ่งค่าคงที่อัตราจะเพิ่มขึ้นตามกำลังของเครื่องไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น โดยค่าคงที่อัตราที่มีค่ามากที่สุดคือ $9.96 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$ เมื่อกำลังของเครื่องไมโครเวฟเท่ากับ 1,600 วัตต์ และเมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นหลังจากการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยเครื่อง FT-IR พบว่าไม่ว่ามีความแตกต่างระหว่างยางธรรมชาติก่อนและหลังการลดน้ำหนักโมเลกุล เพียงแต่ยางธรรมชาติหลังการลดมวลโมเลกุลจะมีสายโซ่ที่สั้นกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title THE REDUCTION OF MOLECULAR WEIGHT OF
NATURAL RUBBER BY MICROWAVE INDUCED
THERMOLYSIS

By Mr. Kawin Nokum
Mr. Natthapatch Piromkit
Ms. Pichamon Ongsritrakul

Degree Bachelor of Engineering

Program Chemical Engineering

Year 2010

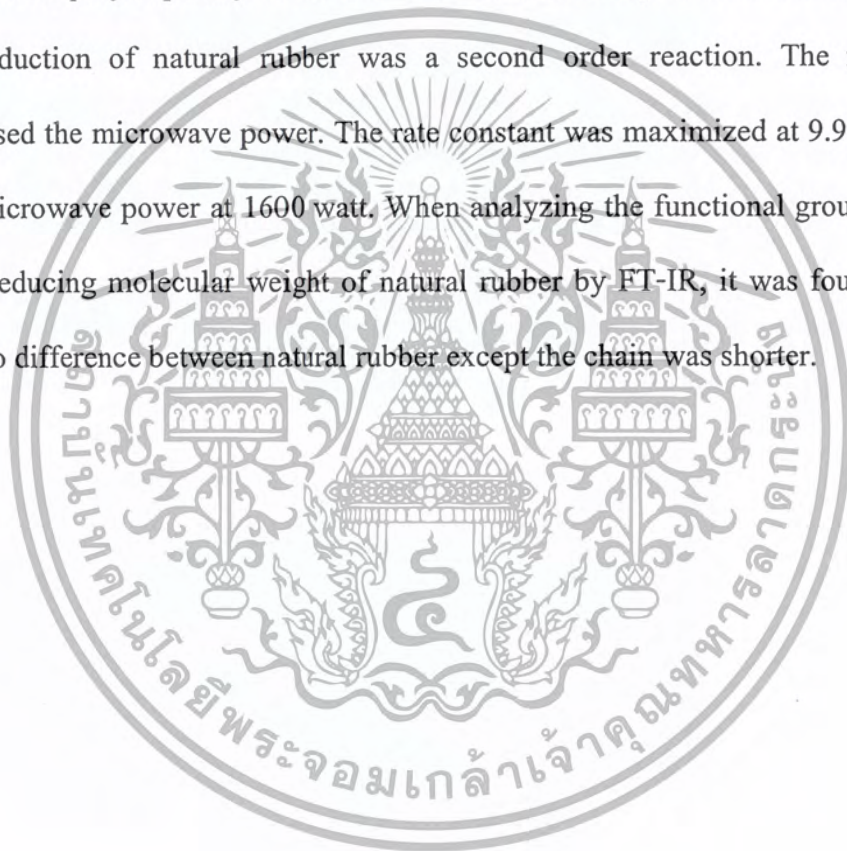
Thesis Advisor Asst.Prof.Dr. Surat Areerat



ABSTRACT

This project studied the effects of microwave power, (360 – 1,600 watts) and reaction time (5 – 20 minutes) on the molecular weight reduction of natural rubber (M_w of NR) by using microwave-induced pyrolysis of NR- Acetylene Black (AC) mixture and controlling the amount acetylene black fixed at 0.1 phr in natural rubber. The heat caused by the microwave induced molecular of acetylene black that mixed in natural rubber. Our goal in this study is to find the suitable condition which produces a lower molecular weight NR. Average molecular weight and polydispersity index (PDI) of natural rubber were detected by using Gel Permeation Chromatography (GPC). Functional groups of natural rubber was analyzed by Fourier Transform Infrared (FT-IR) technique.

We found that with 5 min induction time microwave power does not affect the molecular weight of natural rubber. However when the time of induction was at 20 minutes and microwave power at 1600 watt, the resulted in the molecular weight of natural rubber and polydispersity index was decreased rapidly. The molecular weight of natural rubber was down to 2.37×10^5 g / mol and the polydispersity index was 1.2 , It can be reduced from natural rubber with a molecular weight of default was 1.23×10^6 g / mol and polydispersity index was 4.2. From the analysis the molecular kinetics of the reduction of natural rubber was a second order reaction. The rate constant increased the microwave power. The rate constant was maximized at $9.96 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$ at a microwave power at 1600 watt. When analyzing the functional groups that occur after reducing molecular weight of natural rubber by FT-IR, it was found that there was no difference between natural rubber except the chain was shorter.



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลต่างๆที่สนับสนุนเมตตาในการให้ความอนุเคราะห์และให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์กับงานปริญญาโทและกับคณะผู้จัดทำ ทางคณะผู้จัดทำจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้

ขอขอบพระคุณผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำรวมทั้งความรู้และประสบการณ์ในการทำงาน

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณ คุณอติฬ ดือเร๊ะ และคุณ โชคชัย บุญช่วย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษา มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือและการสนับสนุนที่ดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นายควิน

โนคำ

นายณัฐพัชร์

ภิรมย์กิจ

นางสาวพิชามณูษ์

องค์ศรีตระกูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญรูป.....	IX
สารบัญตาราง.....	XII
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของ โครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ขงธรรมชาติ.....	4
2.1.1 โครงสร้างของขงธรรมชาติ.....	4
2.1.2 สมบัติทางกายภาพ.....	5
2.1.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของขงธรรมชาติ.....	5
2.1.4 ขงธรรมชาติเหลว.....	6
2.2 คลื่นไมโครเวฟ.....	6
2.2.1 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ.....	7
2.2.2 หลักการให้ความร้อน.....	7
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ.....	8
2.2.4 ข้อได้เปรียบของระบบคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 อะเซทิลีนแบล็ค (Acetylene Black).....	13
2.4 เครื่องมือการวิเคราะห์.....	14
2.4.1 Gel Permeation Chromatography : (GPC).....	14
2.4.2 Fourier Transform Infrared Spectrometer.....	14
2.5 จลนพลศาสตร์ของการลดน้ำหนัก โมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	16
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานโครงการ.....	20
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	20
3.3 วิธีการทดลอง.....	20
3.3.1 วิธีการเตรียมการทดลอง.....	20
3.3.2 การหาค่าแห่งที่เหมาะสมในการวางตัวอย่าง.....	21
3.3.3 วิธีการทดลอง.....	21
3.3.4 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	23
4.1 การหาค่าแห่งที่เหมาะสมในการวางตัวอย่างทดสอบในเครื่องไมโครเวฟ.....	24
4.2 การศึกษาผลของอะเซทิลีนแบล็คกับการลดมวล โมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	24
4.3 GPC โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวล โมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	25
4.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ต่อการลดมวล โมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	27
4.5 การศึกษาผลของกำลังของเครื่อง ไมโครเวฟต่อ การลดมวล โมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	29
4.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติโดยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR Spectrometer).....	30
4.7 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการลดมวล โมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	35
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
บรรณานุกรม.....	37
ภาคผนวก.....	39
ภาคผนวก ก.....	40
ภาคผนวก ข.....	42
ภาคผนวก ค.....	47



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (<i>cis</i> -1,4-polyisoprene).....	4
รูปที่ 2.2	TGA Thermogram ของสารละลายยางธรรมชาติที่ผสมกับอะเซทิลีนแบล็คที่ ปริมาณคงที่ 0.5 phr	5
รูปที่ 2.3	แบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนขึ้นของวัสดุ.....	6
รูปที่ 2.4	อะเซทิลีนแบล็ค	13
รูปที่ 2.5	สูตรโครงสร้างของอะเซทิลีนแบล็คในส่วนของแกรไฟต์	14
รูปที่ 2.6	แสดงแผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer	15
รูปที่ 2.7	แสดง อินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectrum)	15
รูปที่ 2.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลา ที่กำลังไฟฟ้าต่างๆของเครื่องไมโครเวฟ	17
รูปที่ 2.9	กระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางธรรมชาติความหนา 1 และ 3 cm ที่เวลา 5 นาที	18
รูปที่ 2.10	แสดงความร้อนที่ใช้ในการ ไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟกับเตาเผาไฟฟ้า	19
รูปที่ 3.1	เครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง	22
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะความสูงจากพื้น เครื่องไมโครเวฟที่กำลัง 1,440 วัตต์ เวลา 10 นาที	23
รูปที่ 4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวล โมเลกุลของยางธรรมชาติกับเวลา (นาที) เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ไม่เติมอะเซทิลีนแบล็คและยางธรรมชาติที่เติม อะเซทิลีนแบล็ค 0.1 phr กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์.....	24
รูปที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) กับเวลา (นาที) กำลังไมโครเวฟ 1,440 วัตต์ เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ไม่ได้ใส่อะเซทิลีนแบล็คและยาง ธรรมชาติที่ใส่อะเซทิลีนแบล็ค	25
รูปที่ 4.4	สูตร GPC โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ เวลา 20 นาที	26

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 GPC โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ที่กำลังของเครื่อง ไมโครเวฟ 1,440 วัตต์	26
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) กับเวลา (นาที) ที่กำลังไมโครเวฟต่างๆ	27
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติกับเวลา (นาที)	28
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Polydispersity Index (PDI) กับเวลา (นาที)	28
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ กำลังของเครื่องไมโครเวฟ (วัตต์)	29
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Polydispersity Index (PDI) กับกำลังของเครื่อง ไมโครเวฟ (วัตต์)	30
รูปที่ 4.11 Spectrumpatternsของเครื่องFTIRของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลด้วย คลื่นไมโครเวฟเปรียบเทียบกับระหว่างยางธรรมชาติที่ผ่านและไม่ผ่านไมโครเวฟขณะ ทำการทดลอง	31
รูปที่ 4.12 Spectrumpatternsของเครื่องFTIRของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลด้วย คลื่นไมโครเวฟที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟต่างๆ ที่เวลา 20 นาที เปรียบเทียบกับ ยางธรรมชาติ	32
รูปที่ 4.13 จดณพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติอันดับสอง	33
รูปที่ 4.14 มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ได้จากสมการจลนพลศาสตร์	34
รูปที่ ก-1 ยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุล	40
รูปที่ ก-2 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลัง 360 วัตต์	40
รูปที่ ก-3 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลัง 720 วัตต์	41
รูปที่ ก-4 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลัง 1,440 วัตต์	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก-5	ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลัง 1,600 วัตต์	41
รูปที่ ข-1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติกับ Elution Time	42
รูปที่ ข-2	โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ไม่ผสม อะเซทิลีนแบดส์ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์.....	43
รูปที่ ข-3	โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ผสมอะเซทิลีนแบดส์ค 0.1 phr กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 360 วัตต์	43
รูปที่ ข-4	โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ผสมอะเซทิลีนแบดส์ค 0.1 phr กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 720 วัตต์	44
รูปที่ ข-5	โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ผสมอะเซทิลีนแบดส์ค 0.1 phr กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์.....	44
รูปที่ ข-6	โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ผสมอะเซทิลีนแบดส์ค 0.1 phr กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,600 วัตต์.....	45
รูปที่ ค-1	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติอันดับสอง ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 360 วัตต์	44
รูปที่ ค-2	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติอันดับสอง ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 720 วัตต์	44
รูปที่ ค-3	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลำดับสอง ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์	45
รูปที่ ค-4	จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลำดับสอง ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1660 วัตต์	45

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน.....	9
ตารางที่ 2.2	แสดงการเปรียบเทียบอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นต่อเวลา.....	19
ตารางที่ 4.1	ค่าคงที่อัตราในแต่ละกำลังของเครื่องไมโครเวฟ.....	33
ตารางที่ ข-1	แสดงค่าต่างๆที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ได้จากเครื่อง GPC	46
ตารางที่ ค-1	ค่าองศาการเกิดพอลิเมอร์ (DP _w) ที่เวลาและกำลังของเครื่องไมโครเวฟต่างๆ	47



คำอธิบายสัญลักษณ์

DP_w	=	องศาการเกิดพอลิเมอร์	
$DP_{w(0)}$	=	ความสัมพันธ์ขององศาที่เวลาเริ่มต้น	
$DP_{w(t)}$	=	ความสัมพันธ์ขององศาที่เวลาใดๆ	
H_i	=	ค่าความเข้มของสัญญาณ	มิลลิโวลต์
k	=	ค่าคงที่อัตรา	นาที ⁻¹
M_i	=	มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ	กรัม โมล ⁻¹
\bar{M}_n	=	มวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน	กรัม โมล ⁻¹
\bar{M}_w	=	มวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก	กรัม โมล ⁻¹
$M_{monomer}$	=	มวลโมเลกุลของไอโซพรีน	กรัม โมล ⁻¹
PDI	=	ดัชนีการกระจายแบบพสม	
t	=	เวลาที่อนุภาคของสารอยู่ในคอลัมน์	นาที



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีกำลังในการผลิตยางธรรมชาติมากที่สุดเป็นอันดับหนึ่งของโลก คือ มากกว่า 3 ล้านตันต่อปี โดยเกือบทั้งหมดเป็นการส่งออกในรูปของยางดิบและมีราคาไม่สูงมากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ผ่านการแปรรูปให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามหากต้องการนำยางธรรมชาติมาใช้ประโยชน์สำหรับเป็นสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีนั้น จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางก่อน เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์มีโครงสร้างสายโมเลกุลยาวและมีมวลโมเลกุลสูง ไม่เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้โดยตรงดังนั้นจึงต้องผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ซึ่งวิธีการลดมวลโมเลกุลที่แพร่หลายในปัจจุบันเช่น กระบวนการเชิงกลร่วมกับกระบวนการเชิงความร้อน (Thermal method) การใช้สารเคมีย่อยยาง (Chemical peptizers) และกระบวนการทางโฟโตเคมี (Photo-chemical method) เป็นต้น [1-3] แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังไม่สามารถควบคุมมวลโมเลกุลที่แน่นอนของยางธรรมชาติได้ อีกทั้งยังก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในยาง และ ใช้เวลาในกระบวนการลดมวลโมเลกุลค่อนข้างนาน ทั้งยังเป็นกระบวนการที่มีการให้ความร้อนจากภายนอกเพื่อทำให้สายโซ่ของโมเลกุลยางขาดออก ซึ่งอาจจะทำให้สมบัติของยางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปได้

โครงการนี้จึงได้นำเสนอวิธีการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 1 มิลลิเมตรถึง 1 เมตร โดยคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างคลื่นวิทยุ และคลื่นอินฟราเรด การนำคลื่นไมโครเวฟไปใช้ในการให้ความร้อนสามารถทำได้เนื่องจากเมื่อคลื่นไมโครเวฟเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุต่างๆ ที่ประกอบด้วยโมเลกุลมีความเป็นขั้ว หรือโมเลกุลที่ประจุบวกและประจุลบมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โมเลกุลเหล่านั้นจะมีการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงกระทำจากสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ โมเลกุลเหล่านั้นจะพยายามหมุนตามการสลับขั้วของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดการชนกันระหว่างโมเลกุลหรือเกิดแรงเสียดทานภายในโมเลกุลเกิดเป็นความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว กระบวนการที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุเมื่อได้รับคลื่นไมโครเวฟเรียกว่า Dielectric Heating ซึ่งพลังงานของคลื่นไมโครเวฟซึ่งอยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการนำเทคโนโลยีไมโครเวฟมาใช้มากมาย เช่น การอบแห้ง การฆ่าเชื้อโรค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดคาบไชนซ์ การเร่งปฏิกิริยาเคมี การกำจัดสารพิษ และการกำเนิดพลาสมา เป็นต้น [4-6] และเนื่องจากวิธีทั่วไปเป็นกระบวนการที่ต้องให้ความร้อนโดยการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสี แต่วิธีการดังกล่าวมีปัญหาต่างๆ เช่น ใช้เวลานานและ Temperature Gradient กว้าง ซึ่งแตกต่างกับวิธีการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนที่เป็นการเหนี่ยวนำในระดับโมเลกุล ส่งผลให้การกระจายความร้อนในยางธรรมชาติ มีความทั่วถึงและมีความรวดเร็วมากกว่ากระบวนการที่ต้องให้ความร้อนจากภายนอก อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีค่า Dielectric ต่ำจึงสามารถเหนี่ยวนำคลื่นไมโครเวฟและทำให้เกิดความร้อนได้น้อย จึงจำเป็นต้องมีวัสดุช่วยกระตุ้นหรือเป็นวัสดุที่มีอันตรกิริยากับคลื่นไมโครเวฟ และทำหน้าที่เป็นวัสดุเหนี่ยวนำความร้อนให้เกิดขึ้น ก่อนถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วให้กับยางธรรมชาติ โดยการทดลองนี้ได้เลือกใช้อะเซทิลีนแบล็คเป็นวัสดุช่วยกระตุ้นเนื่องจากอะเซทิลีนแบล็คไม่ถือว่าเป็นสิ่งเจือปนในยางธรรมชาติเพราะอะเซทิลีนแบล็คเป็นอนุภาครูปแบบหนึ่งของผงเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงในยาง [5]

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้จึงได้มีการศึกษาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยใช้กระบวนการสลายตัวเชิงความร้อนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำคลื่นไมโครเวฟ ของอะเซทิลีนแบล็ค โดยศึกษาผลของคลื่นไมโครเวฟจากกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟและเวลาในการทำปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวเชิงความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟของยางธรรมชาติ
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1.3 ขอบเขตของงานของโครงการ

1. ศึกษาผลของคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟ 360, 720, 1,440 และ 1,600 วัตต์ และเวลาในการทำปฏิกิริยา 5, 10, 15 และ 20 นาที ต่อมวลโมเลกุลยางธรรมชาติ
2. วิเคราะห์มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติหลังจากผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟ ด้วยเทคนิค Gel Permeation Chromatography (GPC)
3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของการสลายตัวเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่เวลาต่างๆ ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-IR)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถนำช่างธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมล โมเลกุลแล้วมาใช้เป็นสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
2. สามารถนำช่างธรรมชาติที่ผ่านการลดมล โมเลกุลมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางสังเคราะห์ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของช่างธรรมชาติ
3. สามารถยกระดับมาตรฐานของภาคอุตสาหกรรมการผลิตช่างธรรมชาติ ให้สามารถผลิตช่างที่มีความหลากหลายและมีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

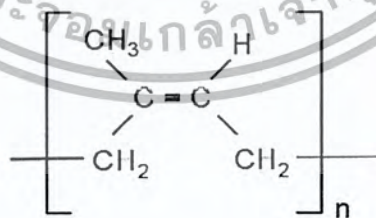
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [7]

ยางธรรมชาติหรือยางพาราส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea brasiliensis* ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากกลุ่มน้ำเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ประมาณ 30% (โดยน้ำหนัก) แขนงลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของเนื้อยางแห้งขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ยาง อายุต้นยาง และฤดูกาล

2.1.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) ในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยซ้ำของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรงประมาณ 3,000 ถึง 5,000 หน่วย โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีมวลโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 กรัมต่อโมลของยางธรรมชาติ และมีการกระจายตัวของมวลโมเลกุลที่กว้างมาก ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติมีลักษณะในกระบวนการแปรรูปที่ดีเลิศ (Excellent process behavior) ยางธรรมชาตินอกจากประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนแล้ว ยังมีสิ่งเจือปนอื่นประมาณ 5 % ด้วย ได้แก่ สารโปรตีน เถ้า สารที่สกัดได้ด้วยอะซิโตนและความชื้น



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (*cis*-1,4-polyisoprene)

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสถานะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อยางถูกยืด โมเลกุลบางส่วนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบ ยางจึงสามารถเกิดผลึก (Crystalline) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำหรือที่เรียกว่า

“Low Temperature Crystallization” จะพบในกรณีที่เก็บยางไว้ที่อุณหภูมิประมาณ -26°C การตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

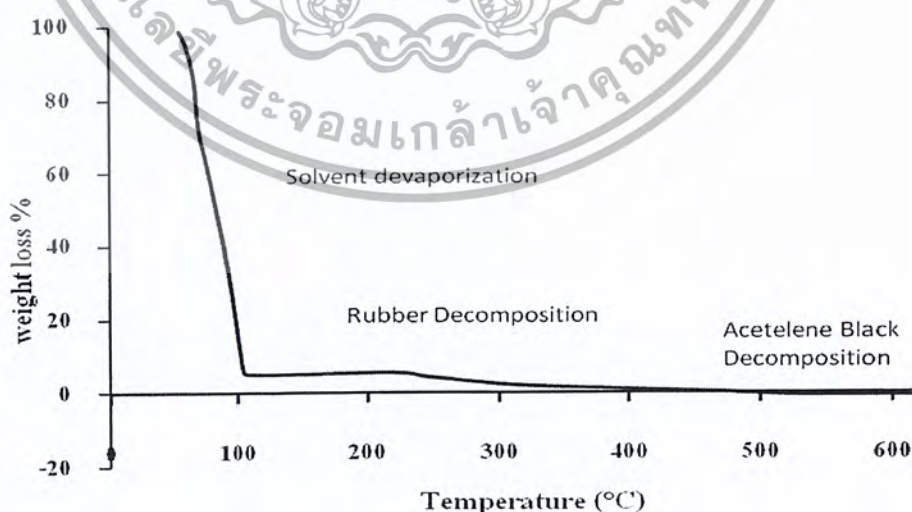
ผลึกที่อุณหภูมิต่ำนี้จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถนำยางไปผสมให้เข้ากับสารเคมีหรือสารตัวเติมอื่นๆ ได้ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นก็จะถูกทำลาย ยางจะอ่อนตัวลงและกลับสู่สภาพเดิม ด้วยเหตุนี้ประเทศเมืองหนาวจึงต้องนำเอายางมาอบที่อุณหภูมิประมาณ 50-70 °C เพื่อทำให้ยางอ่อนก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

2.1.2 สมบัติทางกายภาพ

ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นประมาณ 0.93 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 °C และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำให้ยางเย็นจนแข็งตัวหรือเมื่อยืดยาง มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature ; T_g) ประมาณ -73 °C ซึ่งที่อุณหภูมินี้สมบัติของยางจะเปลี่ยนจากมีความยืดหยุ่นเป็นแข็งและแตก ได้คล้ายแก้ว ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Specific Resistivity) ประมาณ $1 \times 10^5 - 2 \times 10^5$ ohms-cm อย่างไรก็ตามปัจจัยที่เป็นตัวแปรของสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในยางที่ละลายน้ำได้

2.1.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติ

รูปที่ 2.2 เป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิในการสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ของยางธรรมชาติที่ผสมอะเซทีลีนแบล็ค 0.5 phr จะพบว่ายางธรรมชาติจะเริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 210 - 290 °C ซึ่งกระบวนการสลายตัวเชิงความร้อนคาดว่าสามารถทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบ depolymerization ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลงเป็นอย่างมาก [8]



รูปที่ 2.2 TGA Thermogram ของสารละลายยางธรรมชาติที่ผสมกับอะเซทีลีนแบล็คที่

ปริมาณคงที่ 0.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ยางธรรมชาติเหลว [9]

ยางธรรมชาติเหลว (Liquid Natural Rubber, LNR) คือยางธรรมชาติที่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่า 100,000 g/mol และมีความหนืด 1,500 Poise ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C นิยมใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมยางสังเคราะห์ โดยใช้เป็นสารช่วยผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ และสามารถประหยัดพลังงานระหว่างกระบวนการผสม เพราะโดยทั่วไปสารช่วยผสมจะเป็นสารกลุ่มของน้ำมันไฮโดรคาร์บอน น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันเนฟธานิก และน้ำมันพาราฟินิก ซึ่งมีราคาถูก แต่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารอะโรเมติกในบรรยากาศเนื่องจากการเกิดเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Migration) ของสารอะโรเมติกมาที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ และจากการที่สารอะโรเมติกเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง จึงทำให้แนวโน้มของปริมาณการใช้งานสารช่วยผสมที่ได้จากน้ำมันอะโรเมติกลดลง ส่งผลให้มีความสนใจในการพัฒนายางธรรมชาติเหลวเพิ่มขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติเหลวยังคงมีพันธะคู่ในโมเลกุล ซึ่งสามารถเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเป็นร่างแห (Crosslink) ในขั้นตอนการวัลคาไนซ์ได้ ดังนั้นการใช้ยางธรรมชาติเหลวที่ไม่มีสารตกค้างจากสารช่วยผสมของไนธรรมชาติและยางสังเคราะห์จึงเป็นที่น่าสนใจในอนาคต

2.2 คลื่นไมโครเวฟ [10]

เป็นคลื่นความถี่วิทยุชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 0.3 GHz – 300 GHz ส่วนในการใช้งานนั้นส่วนมากนิยมใช้ความถี่ระหว่าง 1 GHz – 60 GHz เพราะเป็นย่านความถี่ที่สามารถผลิตขึ้นได้ด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หลักการสำคัญของเตาไมโครเวฟ คือตัวแม่กนิตรอนที่จะเป็นตัวที่จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ

ในระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่สิ่งที่ต้องการให้ความร้อนจากทุกทิศทางโดยรอบผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่สิ่งที่ต้องการให้ความร้อน เมื่อคลื่นไปกระทบจะทำให้โมเลกุลสิ่งที่ต้องการให้ความร้อนเกิดการสั่นและเสียดสีกัน ก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อน หลักการนี้คล้ายกับการถูมือกันไปมาเร็วๆ จนรู้สึกร้อนขึ้นมาทันที จากคุณสมบัติเด่นของคลื่นไมโครเวฟที่สามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว รวมถึงยังมีความสะดวก ประหยัด ปลอดภัย และไร้เขม่าควันไฟ จึงนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้อย่างกว้างขวาง

2.2.1 คุณสมบัติของคลื่นไมโครเวฟ

1. ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการเคลื่อนที่
2. อัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดในสุญญากาศเท่ากับอัตราเร็วของแสง
3. เป็นคลื่นตามขวาง
4. ถ่ายเทพลังงานจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง
5. ถูกปล่อยออกมาและถูกดูดกลืนได้โดยสสาร
6. ไม่มีประจุไฟฟ้า
7. คลื่นสามารถแทรกสอด สะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนได้

คลื่นไมโครเวฟมีลักษณะเด่น 3 ประการคือ

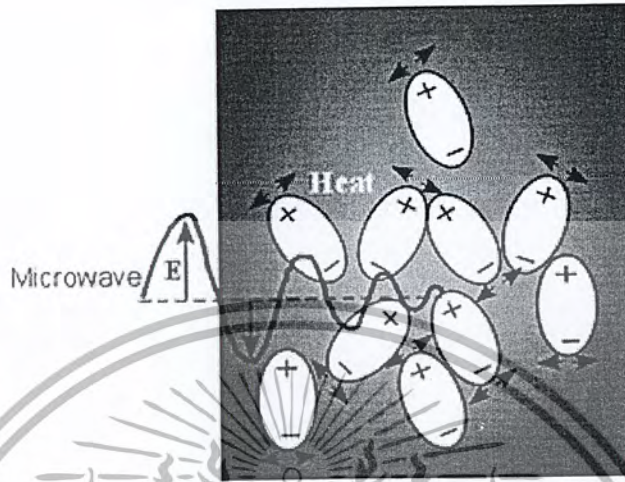
- การสะท้อนกลับ (Reflection) เมื่อคลื่นไมโครเวฟ ไปกระทบกับวัตถุที่เป็น โลหะ หรือมีส่วนผสมของโลหะ คลื่นไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุดังกล่าวได้ และจะเกิดการสะท้อนกลับหมด ทำให้ไม่สามารถให้ความร้อนแก่วัตถุได้
- การส่งผ่าน (Transmission) คลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว กระจก ไม้ เซรามิก และพลาสติกได้ เพราะวัตถุดังกล่าวไม่มีส่วนผสมของโลหะ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในไมโครเวฟ
- การดูดซึม (Absorption) ส่วนใหญ่วัตถุที่ต้องการให้ความร้อน จะประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำ เมื่อ โมเลกุลของน้ำดูดซึมคลื่นไมโครเวฟแล้วจะสลายตัวในทันที และไม่สะสมภายในวัตถุนั้น

2.2.2 หลักการให้ความร้อน

การให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟนี้แตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยเตาทั่วไป คือ เตาทัวไรจะให้ความร้อนด้วยความร้อนโดยเปลวไฟแบบเตาแก๊สหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สิ่งที่ต้องการให้ความร้อนร้อนด้วยการถ่ายเทความร้อน คือการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน แต่ในกรณีของเตาไมโครเวฟนั้นจะทำให้ชิ้นงานร้อนโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูง สอดคล้องกับรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงแบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนขึ้นของวัสดุ ไดอิเล็กตริกโดยโมเลกุลไดโพลจะถูกบังคับให้หมุนภายใต้สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ตามเวลาของคลื่นไมโครเวฟ การชนกันระหว่างโมเลกุลขณะหมุนทำให้เกิดแรงเสียดทาน และเกิดเป็นความร้อนขึ้น เพื่อทำให้โมเลกุลของน้ำภายในชิ้นงานเกิดการสั่นสะเทือนและชน โมเลกุลอื่นๆต่อไป จนเกิดเป็นพลังงานจลน์ ซึ่งพลังงานจลน์นี้จะกลายสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นพลังงานความร้อน ทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะรวดเร็วกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีอื่นๆ ทั้งการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แก๊สหุงต้ม หรือไฟฟ้า เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟแล้วเกิดเป็นความร้อนขึ้นของวัสดุ

ข้อได้เปรียบของการใช้ไมโครเวฟ คือไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเนื่องจากไมโครเวฟสามารถถ่ายโอนพลังงานผ่านสู่กระบวนการได้โดยตรงด้วยการเติมสารกระตุ้น ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นพลังงานความร้อนได้ ไม่ต้องอาศัยกระบวนการนำและการพาความร้อน จึงให้ความร้อนสูงในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิต่ำได้ อย่างไรก็ตาม เฉพาะคลื่นไมโครเวฟไม่สามารถกระตุ้นหรือเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนในวัสดุได้ทุกชนิด โดยเฉพาะวัสดุประเภทพอลิเมอร์และยางจึงจำเป็นต้องมีวัสดุช่วยกระตุ้นหรือเป็นวัสดุที่มีอันตรกิริยากับคลื่นไมโครเวฟและทำหน้าที่เป็นวัสดุเหนี่ยวนำความร้อนให้เกิดขึ้นก่อนถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วให้กับพอลิเมอร์และยางในขั้นตอนต่อไป

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

1. ค่าความชื้น (Moisture content)

ค่าความชื้นอิสระในสสารมีผลอย่างมากต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องประมาณ 78 เหตุนี้เมื่อมีปริมาณน้ำมากในสสารหรือวัสดุย่อมทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นตามไปด้วยโดยปกติจะเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน และเมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกหลายชนิดมาผสมกันพฤติกรรมที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนและยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อการอธิบายได้ แต่อย่างไรก็ตามได้มีกฎหลัก (Rules of thumb) สำหรับอธิบายปรากฏการณ์นี้ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ความชื้นสูงชันมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงชัน
- โดยปกติค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric loss) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น แต่อยู่ในช่วงความชื้นประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็เป็นไปได้ที่จะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นไปสูงชันมากกว่านี้ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ)
- ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุผสมจะอยู่ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแต่ละองค์ประกอบ

สำหรับวัสดุหลายๆประเภทซึ่งประกอบด้วยแอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์ จะมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมสำหรับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำ ดังแสดงค่าสมบัติตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน

วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ดี	วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ต่ำ
น้ำ (Water)	ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)
กรดแอนไฮไดรด์ (Acid Anhydrides)	ฮาโลเจน ไฮโดรคาร์บอน (Halogen Hydrocarbon)
แอลกอฮอล์ (Alcohols)	อัลคาลิเฮไลด์ เช่น เกลือ (Alkali Halides, e.g., Salt)
อัลดีไฮด์ (Aldehydes)	ออกไซด์อนินทรีย์ เช่น อะลูมิเนียม (Inorganic Oxides, e.g., Alumina)
คีโตน (Ketones)	ธาตุบางชนิด เช่น ซัลเฟอร์ (Some Element, e.g., Sulfur)
เอไมด์ (Amides)	โบรอนไนไตรด์ (Boron Nitride)
เอมีน (Amines)	ไมก้า (Mica)
ไซยาไนด์ (Cyanides)	
โปรตีน (Proteins)	
เฟอร์ไรต์ (Ferrites)	
เฟอร์โรอิเล็กตริก (Ferroelectrics)	
สารละลายไอออนิก (Ionic Solutions)	

2. ความหนาแน่น

โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลง

ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในลักษณะที่ซับซ้อน โดยอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะแสดงว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าไดอิเล็กตริกทอสแฟกเตอร์จะมีค่าต่ำ และในช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งจะไม่สามารถชี้ชัดถึงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น ด้วยเหตุที่ทั้งค่าความชื้นและอุณหภูมิมิมีความสำคัญต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกและกระบวนการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงอันตรกิริยาของคลื่นและวัสดุไดอิเล็กตริกอย่างถ่องแท้ ยกตัวอย่างเช่น ไม้ที่มีค่าความชื้นต่ำระดับหนึ่งพบว่าค่าไดอิเล็กตริกทอสแฟกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจึงมีผลให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรีโอะเวย์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ไม้เกิดการไหม้ได้หากถูกอบแห้งอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

4. ความถี่

ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำมีผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามด้วยเหตุที่กระบวนการทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมถูกจำกัดด้วยความถี่ที่คงที่ อยู่แล้วตามมาตรฐาน ISM ทำให้วิศวกรถูกจำกัดการใช้งานในเรื่องของความถี่นี้

5. การนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าคือความสามารถของวัสดุในการนำกระแสไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน โดยทั้งอิเล็กตรอนและไอออนสามารถที่จะเป็นผลกระทบหลักในการทำความร้อนและการอบแห้งเนื่องจากผลของน้ำที่ถูกเคลื่อนย้ายออกสู่ภายนอกทำให้ความเข้มข้นของไอออนภายในสูงขึ้น

6. ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนมีบทบาทที่ลดลงในกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับกระบวนการทำความร้อนแบบวิธีเก่า อันเนื่องมาจากพลังงานไมโครเวฟส่งผลทำให้ความเร็วในการทำความร้อนมีค่าสูงกว่าจนค่าการนำความร้อนมีผลกระทบกับระบบไม่มากนัก อย่างไรก็ตามมีบางกรณีที่ค่าการนำความร้อนมีบทบาทหลัก ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความลึกของวัสดุที่ต้องการทำความร้อน ดังนั้นการนำความร้อนจึงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่คลื่นทะลุเข้าไปไม่ถึง

7. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

โดยปกตินักวิจัยและวิศวกรหรือผู้ออกแบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะตัดตัวแปรนี้ทิ้งไป และมุ่งพิจารณาที่ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามโดยความเป็นจริง ค่าความจุความร้อนจำเพาะเป็นตัวแปรสำคัญซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุมีความร้อนเพิ่มได้มากขึ้นในธรรมชาติ ดังนั้นการพิจารณาทั้งค่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะจึงนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ค่าความลึกในการทะลุทะลวง

ปกติตัวแปรนี้มีการเรียกกันในหลายชื่อเช่น ความลึกในการทะลุทะลวง (Penetration depth) หรือความลึกเชิงกำลัง (Power penetration depth) เป็นต้น แต่ไม่ว่าจะเรียกชื่อใดก็ตามก็มีความหมายทางกายภาพเดียวกัน แม้ว่าค่าความลึกในการทะลุทะลวงจะไม่ได้เป็นคุณสมบัติของวัสดุแต่ก็ส่งผลต่อคุณสมบัติหลายๆอย่างของวัสดุและค่านี้ยังมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุที่การทำความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) ดังนั้นความลึกในการทะลุทะลวงของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งหากคลื่นไม่สามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุไปได้ การทำความร้อนจะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่ว่าผิวของวัสดุเท่านั้น

2.2.4 ข้อได้เปรียบของระบบคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก

การทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากระบบดั้งเดิมที่ใช้เชื้อเพลิง โดยระบบดั้งเดิมที่ใช้จะเกิดความล่าช้าในการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผิวของวัสดุเข้าสู่ภายในซึ่งถูกกำหนดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกที่ร้อนกับภายในที่เย็นกว่า ในขณะที่การทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะมีผลในเชิงการทำความร้อนทั่วถึงทั้งก้อน (Bulk heating) ซึ่งเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุตลอดเนื้อวัสดุ โดยในทางทฤษฎีการทำความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและรวดเร็วแม้ว่าในทางปฏิบัติอาจจะไม่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเหมือนทางทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของการทำความร้อนเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบเชิงอุตสาหกรรมซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้เวลาเพียงช่วงวินาทีหรืออนาที่ในบางกระบวนการผลิต ในขณะที่วิธีการดั้งเดิมใช้เวลาเป็นนาที ชั่วโมง หรือเป็นวันเพื่อให้กระบวนการดำเนินอย่างเสร็จสมบูรณ์ ยกตัวอย่างระบบการทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมที่มีความเร็วสูงที่สุดซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่คือ การให้ความร้อนพลาสติกบางชนิดที่สามารถทำได้ในอัตรา $30,000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ในทางตรงกันข้าม หากต้องการทำความร้อนที่ระดับต่ำมาก สามารถทำได้ที่อัตรา $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อ 100 วินาที

สำหรับตัวแปรที่กำหนดความเร็วของการทำความร้อนได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะ สมบัติไดอิเล็กตริก ลักษณะรูปร่าง ประสิทธิภาพของการเกิดคัปปลิงของคลื่นภายในควาวิตี (Coupling Efficiency) พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นภายในวัสดุและกำลังไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไปรวมถึงตัวแปรอื่นที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากันพบว่า ความเร็วในการทำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อกำลังที่ป้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า

กล่าวโดยสรุป ข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเบี่ยงประเด็นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ใช้เวลาน้อย (High speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสีย เนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary part)

2. การทะลุทะลวงของพลังงาน (Energy penetration) ไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน วัสดุ ในขณะที่การให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนที่ผิววัสดุซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่ผิวด้านนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังได้รับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ นอกจากนั้นยังใช้เวลานานมากเพราะมีข้อจำกัดทางด้านความสามรถในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า

3. ความสามารถในการเลือกที่จะซับพลังงานไมโครเวฟภายในวัสดุ (Selective energy absorption) วัสดุบางชนิดสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ทันทีแต่วัสดุบางชนิดไม่สามารถดูดซับพลังงานได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ ตัวอย่างเช่น สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อได้โดยไม่ทำลายหีบห่อ

4. การควบคุมระบบสามารถทำได้ดีและรวดเร็วกว่า โดยธรรมชาติของการเปิดปิดสามารถเปลี่ยนแปลงระดับการทำความร้อนอย่างทันทีทันใด เพียงแค่ทำการควบคุมพลังงานในช่วงขาออกของแหล่งกำเนิดทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำในการควบคุมการทำความร้อน อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเก่าเช่น เตาอบลมร้อนหรือไฟฟ้า ต้องใช้เวลานานในการปรับอุณหภูมิ แต่ตัวไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาน้อยมาก (ภายในเสี้ยววินาที)

5. ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากระดับการทำความร้อนที่สูงจะไม่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ เหมือนที่เกิดขึ้นกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม

6. สามารถทำให้เกิดผลกระทบทางกายภาพและเคมีเท่าที่ต้องการได้ โดยปกติปฏิกิริยาทางเคมีและกายภาพจะถูกร่งให้เกิดขึ้นจากความร้อนที่สร้างด้วยวิธีนี้ซึ่งได้แก่ ปฏิกิริยาการพองตัว (Puffing) การอบแห้ง (Drying) การหลอมละลาย (Melting) การทำให้โปรตีนเปลี่ยนแปลงไป (Protein denaturation) การที่แป้งเกิดเจลาตินไนเซชัน (Starch Gelatinization) หรือปฏิกิริยาอื่นๆที่คล้ายกัน

7. มีประสิทธิภาพสูง (High efficiency) การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามากเมื่อเทียบกับการเกิดปริมาณความร้อนภายในวัสดุที่เท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 10-30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์) โดยในการทำ

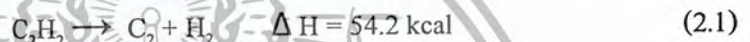
ความร้อนด้วยวิธีนี้ พลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกแปลงโดยตรงเพื่อทำให้วัสดุเกิด

ความร้อนขึ้น โดยไม่เกิดการสูญเสียไปกับอากาศ ผงของเตา สายพานลำเลียงหรือส่วนอื่นๆของระบบ อันจะนำไปสู่การประหยัดพลังงาน

8. ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (Clean processing) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะ ต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ทำให้มีก๊าซไอเสียออกมาด้วย

2.3 อะเซทิลีนแบล็ค (Acetylene Black) [11]

อะเซทิลีนแบล็คเป็นของผงเขม่าดำ (Carbon Black) รูปแบบหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการสลายตัวของอะเซทิลีนที่อุณหภูมิ 800-1,000 °C และความดันบรรยากาศ แสดงดังสมการที่ (2.1) ซึ่งกระบวนการผลิตอะเซทิลีนแบล็คในประเทศไทย สามารถผลิตได้จากก๊าซอะเซทิลีนที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเอทิลีน ด้วยวิธีการแตกสลายด้วยความร้อนของสารแนฟทา



รูปที่ 2.4 อะเซทิลีนแบล็ค

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของอะเซทิลีนแบล็คเป็นคาร์บอน (99.7 %) ที่มีโครงสร้างกึ่งกลางระหว่างแกรไฟต์และอสัณฐาน มีสูตรโครงสร้างในส่วนของแกรไฟต์แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 40 nm ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ประมาณ 19.0 kg/m³ สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก จากลักษณะโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบสูงและสามารถนำไฟฟ้าได้ ทำให้มีการนำอะเซทิลีนแบล็คมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเหนียวนำคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากกระจายตัวได้ดีในวัสดุอย่างเช่นพอลิเมอร์โดยเฉพาะยางธรรมชาติ จึงมีการเลือกอะเซทิลีนแบล็คมาใช้ในงานวิจัยสำหรับลดความไวของยางธรรมชาติโดยเทคนิคเชิงความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ และยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของอะเซทิลีนแบล็คที่ผลิตได้ภายในประเทศอีกด้วย



รูปที่ 2.5 สูตร โครงสร้างของอะเซทิลีนแบล็คในส่วนองแกรไฟต์

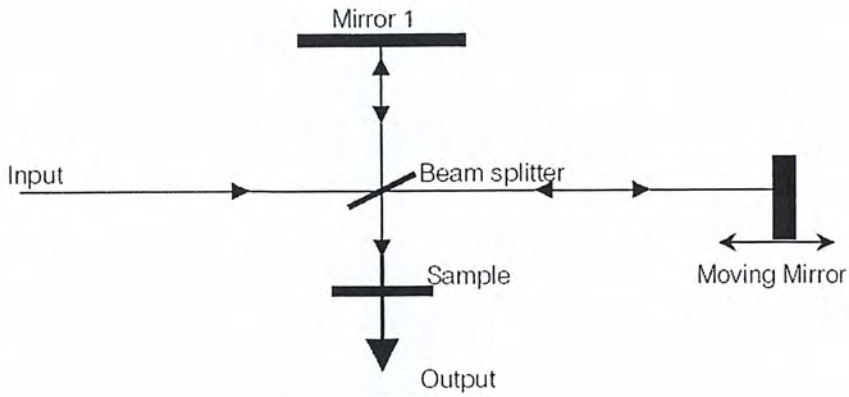
2.4 เครื่องมือวิเคราะห์

2.4.1 เจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (Gel Permeation Chromatography : GPC)

เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อศึกษาการกระจายของมวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า size exclusion chromatography โดยอาศัยวิธีการแยกขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์ การแยกเกิดขึ้นในคอลัมน์โครมาโตกราฟีที่บรรจุเม็ด (Bead) ของแข็งที่มีรูพรุนหรือเจล (Gel) โดยทั่วไปมักใช้เม็ดพอลิस्टาไครีนที่ผ่านการเชื่อม โขงระหว่างโมเลกุล และมีรูพรุน หรือแก้วที่เป็นรูพรุนเมื่อบรรจุตัวอย่างของสารละลายพอลิเมอร์เจือจางในคอลัมน์แล้วจะด้วยกระแสของตัวทำละลาย โมเลกุลของพอลิเมอร์จะสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุน ซึ่งลักษณะการแพร่นี้ขึ้นกับขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์และขนาดของรูพรุน โมเลกุลขนาดต่างๆจะถูกชะออกมาจากคอลัมน์ตามลำดับ โมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้จะผ่านคอลัมน์ออกมาเป็นอันดับแรก ส่วนโมเลกุลขนาดเล็กจะติดอยู่ในรูพรุนของเจลและใช้เวลาอยู่ในคอลัมน์นานกว่าและถูกชะออกมาภายหลัง

2.4.2 Fourier Transform Infrared Spectrometer[12,13]

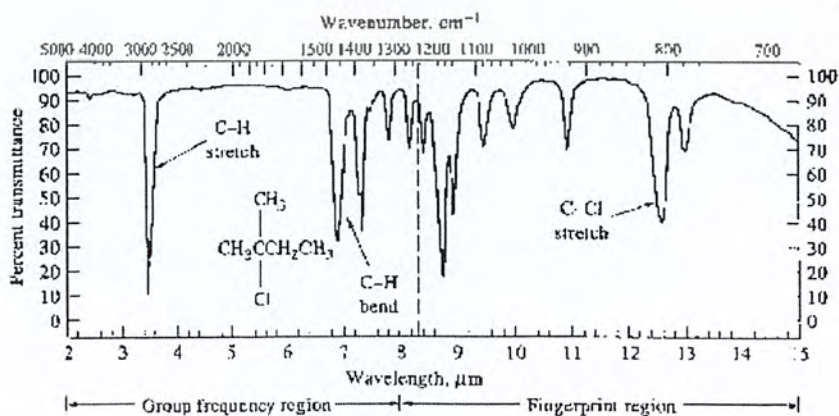
Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR Spectrometer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงที่พัฒนามาจาก เครื่อง IR Spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยได้ แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FT-IR Spectrometer เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรดสู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมันแล้วสะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญคือตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่คลื่นที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะเวลาเคลื่อนที่ของกระจกให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า The Michelson Interferometer ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงแผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรดแบ่งเป็นช่วงๆคือ ช่วง wave number 4,000 – 12,800 cm^{-1} (2.5 – 0.78 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region) ช่วง wave number 200 – 4,000 cm^{-1} (50-2.5 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วง wave number 10 – 200 cm^{-1} (1,000 – 50 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจและใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น

คลื่นอินฟราเรดในช่วง wavenumber 4,000 – 400 cm^{-1} ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่การสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล โมเลกุลจะเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ wavenumber กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่าอินฟราเรด สเปกตรัม (Infrared Spectrum – IR spectrum) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectrum)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... (The text is partially obscured and difficult to read due to low resolution and overlapping text.)

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลของสารนั้นว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งใด เช่น สารกลุ่ม แอลกอฮอล์ จะมีพีคของพันธะ O-H ในช่วง wave number 3,300-3,600 ซม.⁻¹ หมู่เอมีนมีพีคของพันธะ N-H ที่ 3,500 ซม.⁻¹ สารเอสเทอร์มีพีคของหมู่ C-O ช่วง 1,000-1,300 ซม.⁻¹ เป็นต้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏใน IR spectrum พีคในช่วง 1,350 – 4,000 ซม.⁻¹ จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในของหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่ฟังก์ชัน (Group functional region) และในช่วงประมาณ 910 – 1,350 ซม.⁻¹ จะได้แถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่าย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger print region)

การใช้เครื่อง FT-IR Spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาไม่นานและประหยัดสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณาเปรียบเทียบจากอินฟราเรด สเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับสารตัวอย่างที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันพีคต่อพีคถ้าตรงกันเหมือนกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่นการวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างโพลีเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการเทียบค่า % Transmittance เช่น การหาปริมาณด้วยยา สารออกฤทธิ์ในยาเม็ด เป็นต้น

2.5 จลนพลศาสตร์การลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ

จลนพลศาสตร์การลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติจากงานวิจัยของปราณี และคณะ [14] ซึ่งศึกษาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติจากปฏิกิริยาการออกซิเดชัน ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆกัน โดยทำการทดสอบมวลโมเลกุลด้วย GPC พบว่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย (\bar{M}_w, \bar{M}_n) มีแนวโน้มที่ลดลงจากยางธรรมชาติ เริ่มต้นเมื่อเวลาของการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจากข้อมูลการวัดมวลโมเลกุลที่ลดลงนี้สามารถคำนวณองศาการเกิดพอลิเมอร์ (DP_w) ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติ (\bar{M}_w) ต่อหน่วยซ้ำไอโซพรีน ($M_{monomer} = 68 \text{ g mol}^{-1}$) ดังสมการที่ (2.2)

$$(DP_w) = \frac{\bar{M}_w}{M_{monomer}} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

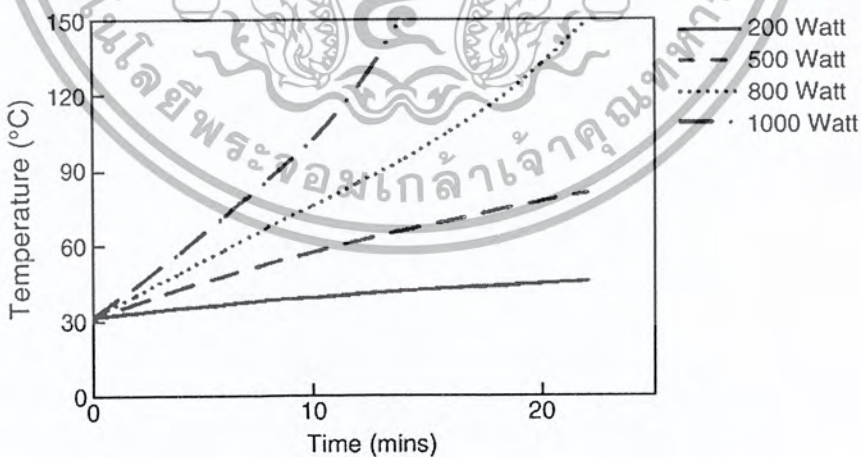
การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์แสดงได้ด้วยความผันผวนขององศาเริ่มต้น ($DP_{w(0)}$) และที่เวลาใดๆ ($DP_{w(t)}$) เป็นฟังก์ชันของค่าคงที่อัตรา (k) และเวลา (t) ดังสมการที่ (2.3)

$$kt = \frac{1}{DP_{w(t)}} - \frac{1}{DP_{w(0)}} \quad (2.3)$$

จากการคำนวณหาค่าคงที่อัตรา (k) ของการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ด้วยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง $1/DP_{w(t)} - 1/DP_{w(0)}$ เทียบกับเวลา (t) ด้วยเทคนิคกฏอัตราอุปอินทิเกรต ซึ่งจากความชันของกราฟที่ได้พบว่าได้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง จึงนำมาใช้ในงานวิจัยการหาค่าจลนพลศาสตร์การลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังวัตต์และเวลาต่างๆกัน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการเกิดวัลลาไนซ์ของยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz พบว่าอุณหภูมิของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟมากขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มกำลังของเครื่องไมโครเวฟให้สูงถึง 1,000 วัตต์ อุณหภูมิของยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 150 °C ในเวลาประมาณ 12 นาที การศึกษานี้ได้อธิบายเกี่ยวกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในชิ้นงานเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.8

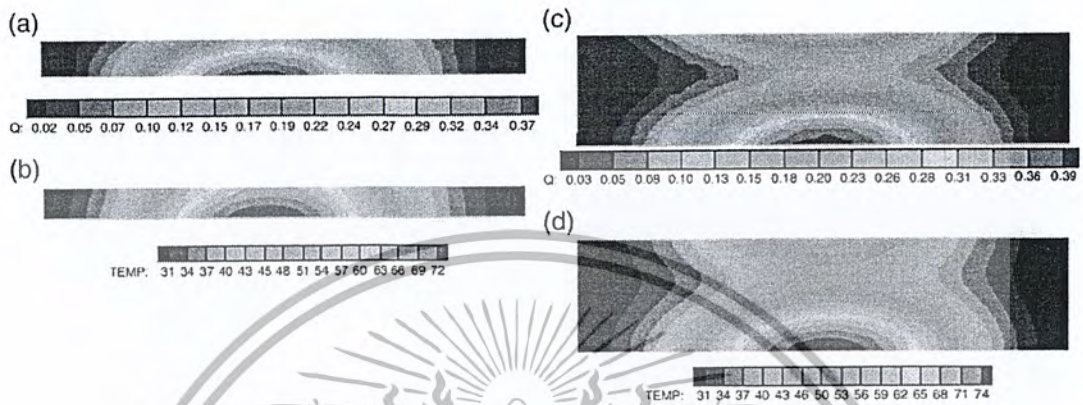


รูปที่ 2.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเวลาที่กำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟต่างๆ

นอกจากนี้การทดลองยังได้ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

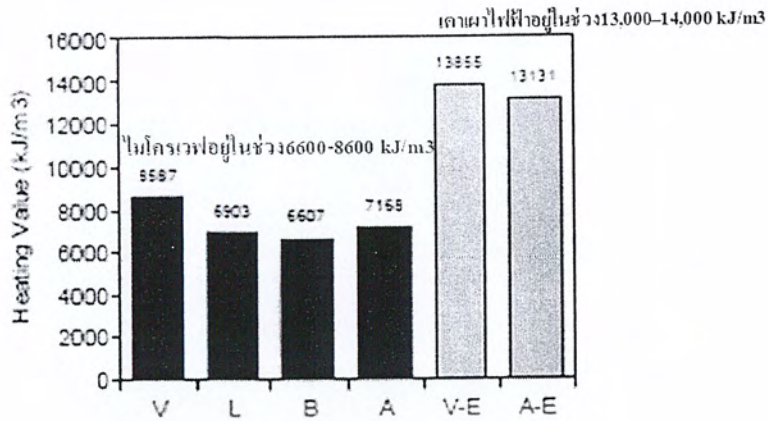
อีกด้วย ซึ่งผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของชิ้นงานบริเวณด้านล่างสูงกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจาก

คลื่นไมโครเวฟเกิดการทะลุผ่านชิ้นงานและไปสะท้อนที่บริเวณด้านล่างของเครื่องไมโครเวฟกลับเข้าไปที่ด้านล่างของชิ้นงานทำให้บริเวณดังกล่าวได้รับคลื่นไมโครเวฟมากกว่าบริเวณอื่นจึงทำให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากกว่าบริเวณอื่นดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในทรงกลมขนาดความหนา 1 และ 3 cm ที่เวลา 5 นาทีที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,000 วัตต์

Instituto Nacional del Carbon [15] ได้ศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟกับเตาเผาไฟฟ้าว่าแบบใดมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับกากเปียกจากน้ำเสีย จากโรงงานมากกว่าโดยนำแก๊สที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ ด้วยการนำกากน้ำเสียจากโรงงานทั้ง 4 แห่งมาบำบัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน จากนั้นนำกากที่ผ่านการบำบัดแล้วมาเหวี่ยงน้ำออก และใช้กาก 15 กรัมผ่านคลื่นไมโครเวฟโดยให้กำลัง 1000 วัตต์และความถี่ 2450 MHz จากนั้นจึงเก็บแก๊สที่เหลือจากการให้ความร้อนมาวิเคราะห์โดยให้ V-E คือการเผาจากกากโรงงาน V ด้วยเตาไฟฟ้า A-E คือการเผาจากโรงงาน A โดยใช้เตาไฟฟ้าจากตารางจะเห็นได้ว่าการไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟให้อัตราความร้อนที่มากกว่าเตาเผาไฟฟ้าจากรูปพบว่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยวิธีใช้คลื่นไมโครเวฟน้อยกว่าใช้เตาเผาไฟฟ้า จึงสรุปได้ว่าการไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟเหมาะสมสำหรับกากเปียกจากน้ำเสียของโรงงานมากกว่าเพราะเร็วและมีประสิทธิภาพดีกว่า



รูปที่ 2.10 แสดงความร้อนที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟกับเตาเผาไฟฟ้า

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นต่อเวลา

Sludge Type	T_{max} (°C)	R (°C/min)	Heating time (min)	Soaking time (min)
V	1000	200	5	1
L	800	200	4	1
B	1000	167	6	0
A	1200	300	4	1
V-E	1000	71.5	14	10
A-E	1000	71.5	14	10

จากงานวิจัยของ T.Chaowasakoo และคณะ [16] ซึ่งทำการบ่มคอมโพสิตของเส้นใยและอีพอกซีเปรียบเทียบระหว่างการให้ความร้อนและคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้ N-2 (aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane เป็นสารเชื่อม พบว่าคอมโพสิตที่บ่มด้วยไมโครเวฟใช้เวลาบ่มน้อยกว่าและมีความแข็งแรงพื้นฐานสูงกว่าการบ่มด้วยความร้อน โดยเฉพาะ impact strength และ strain at break แต่คอมโพสิตที่บ่มโดยให้ความร้อนมี tensile และ flexural moduli สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก Mettler Toledo รุ่น AX 205/USA
2. เครื่องปั่นกวน Yellow line Big squid/Germany
3. ตัวกรองขนาด 0.22 ไมโครเมตร
4. เครื่อง Gel Permeation Chromatography
5. เครื่องไมโครเวฟที่ดัดแปลงให้มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,600 วัตต์
6. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer
7. นาฬิกาจับเวลา
8. ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ Union พร้อมเทอร์โมคัพเบิล

3.2 สารเคมี

1. คลอโรฟอร์มเกรด HPLC/RCI จากบริษัท Labscan
2. ยางธรรมชาติ STR5L จาก MTEC
3. อะเซทิลีนแบล็ค
4. แก๊สไนโตรเจน 99.99% เกรด OFN
5. โพรพิโอนัลดีไฮด์ (Propionaldehyde) 97 % เกรด GC

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 วิธีการเตรียมการทดลอง

1. เตรียมสารละลายยางธรรมชาติ โดยการนำยางธรรมชาติหนัก 4 กรัม ละลายในคลอโรฟอร์ม 250 มิลลิลิตรทำการกวนด้วยเครื่องปั่นกวนจนยางละลายหมด
2. เติมอะเซทิลีนแบล็ค ลงให้สารละลายยางธรรมชาติ ให้มีความเข้มข้น 0.1 phr โดยการเตรียมอะเซทิลีนแบล็ค 0.0004 กรัม ทำการกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเพื่อให้อนุภาคอะเซทิลีนแบล็คกระจายตัวสม่ำเสมอในสารละลายยางธรรมชาติ
3. นำสารละลายยางธรรมชาติที่ได้หยดลงบนแผ่นสไลด์เพื่อให้เป็นแผ่นฟิล์มบางๆเคลือบบนสไลด์แล้ว รอจนคลอโรฟอร์มระเหยหมดจนได้น้ำหนักสารละลายแห้ง

3.3.2 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวอย่าง

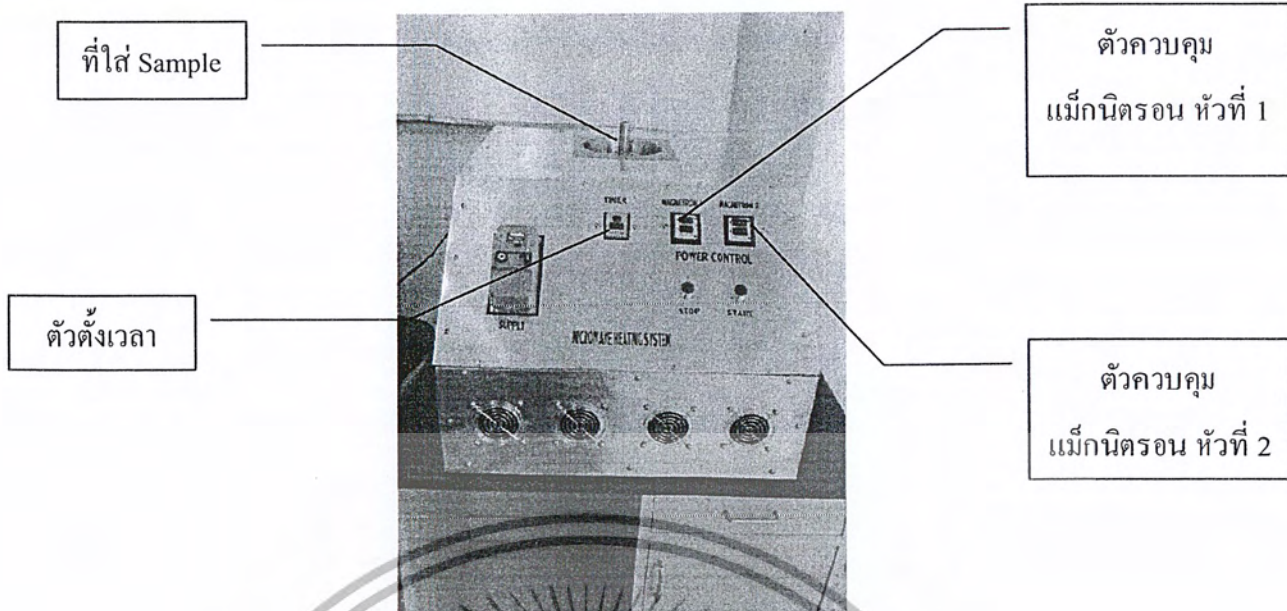
1. เดินเครื่องไมโครเวฟพร้อมกับใช้เทอร์โมคัพเปิดวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเครื่องไมโครเวฟ พร้อมทั้งจดบันทึก
2. เปลี่ยนตำแหน่งของเทอร์โมคัพเปิด แล้วทำซ้ำข้อที่ 1 จนกว่าจะสามารถหาตำแหน่งที่อุณหภูมิภายในเครื่องไมโครเวฟมีค่าสูงที่สุด

3.3.3 วิธีการทดลอง

1. นำแผ่นฟิล์มบางของสารละลายยางธรรมชาติกับอะเซทิลีนแบล็ค ที่เตรียมบนแผ่นสไลด์ เข้าเครื่องไมโครเวฟที่ผ่านแก๊สไนโตรเจน 99.99% โดยที่เตาประกอบด้วยเม็กนิตรอนสองหัวที่สามารถควบคุมกำลังของเครื่องไมโครเวฟ
2. ศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่เวลา 5, 10, 15 และ 20 นาทีตามลำดับ พร้อมวัดอุณหภูมิภายในเครื่องไมโครเวฟ โดยใช้เทอร์โมคัพเปิด
3. ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 โดยเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟเป็น 360, 720, 1,440 และ 1,600 วัตต์ ตามลำดับ
4. นำสไลด์ที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลมาละลายในคลอโรฟอร์ม 10 มิลลิลิตร และใส่โพพิโอนิคไธด์ 97% 32 ไมโครลิตร เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของมวลโมเลกุล

3.3.4 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. นำสารละลายยางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลกับคลอโรฟอร์ม ผ่านตัวกรองขนาด 0.22 ไมโครเมตร
2. นำสารละลายที่ผ่านการกรองแล้วฉีดเข้าเครื่อง Gel Permeation Chromatography ประมาณ 2 ไมโครลิตร โดยอัตราตัวพา 1 มิลลิลิตรต่อนาที คอลัมน์ที่ใช้คือ โพลีสไตรีน อุณหภูมิ 40 °C
3. นำตัวอย่างยางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลแล้วมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.1 เครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง

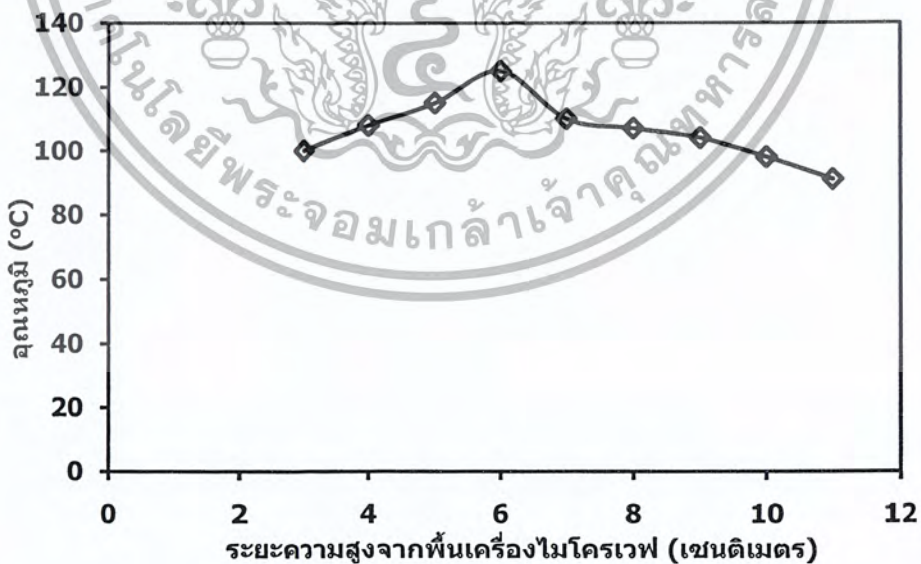


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

โครงการนี้ศึกษาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยวิธีทางกายภาพโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟเหนี่ยวนำ และหาค่ามวลโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromatography รวมถึงศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectrometer เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติที่เกิดขึ้นทั้งก่อนและหลังการลดมวลโมเลกุล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการลดมวลโมเลกุลจะเป็นข้อมูลสำคัญที่ยืนยันสมมติฐานว่าคลื่นไมโครเวฟสามารถลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติได้จริง

การทดลองโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจะให้ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟกระตุ้นโมเลกุลของอะเซทิลีนแบล็คที่เดิมอยู่ในรูปของสารละลายยาง ทำให้เกิดการสั่นภายในโมเลกุลของสารละลายยาง เพื่อให้เกิดการเสื่อมสลายโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ (Degradation) ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาโดยวิธีนี้คือ เวลาในการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ความเข้มข้นของอะเซทิลีนแบล็ค และกำลังของเครื่องไมโครเวฟ โดยกำหนดตัวแปรควบคุมคือ ใช้น้ำหนักของยางธรรมชาติประมาณ 0.1 กรัม

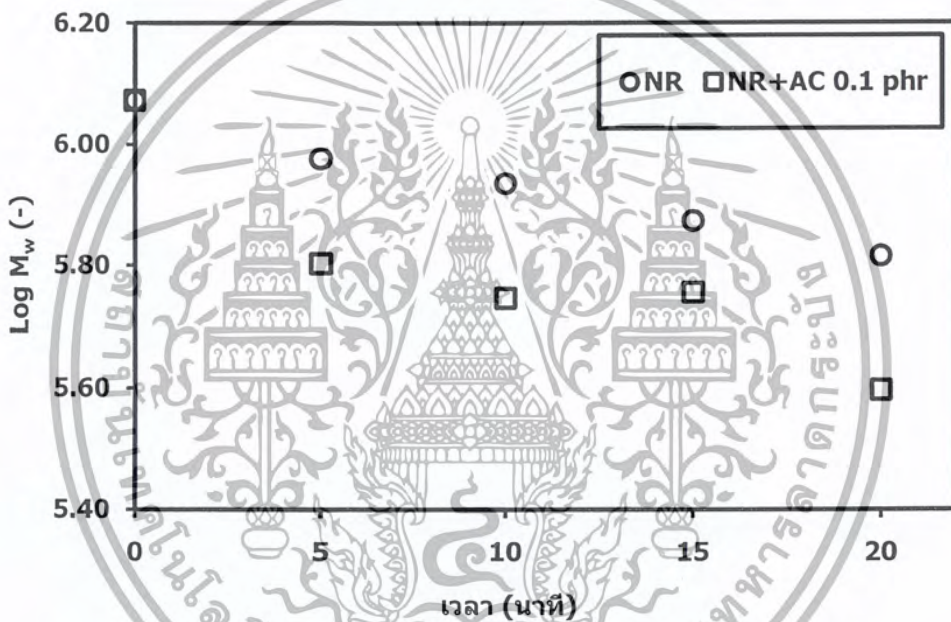


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะความสูงจากพื้นเครื่องไมโครเวฟ ที่กำลัง 1,440 วัตต์ เวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวอย่างทดสอบในเครื่องไมโครเวฟ

การหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวางตัวอย่างทดสอบในเครื่องไมโครเวฟ สามารถทำได้ โดยเปิดเครื่องไมโครเวฟแล้วใช้เทอร์โมคัพเปิดวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใน จากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งของจุดที่วัดอุณหภูมิไปเรื่อยๆเพื่อหาจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุด อันเป็นจุดที่มีคลื่นไมโครเวฟมากที่สุด จากการทดลองสามารถหาจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดได้คือ 6 เซนติเมตรนับจากพื้นของเครื่องไมโครเวฟ ซึ่งสามารถแสดงค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 4.1 ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์ และวัดอุณหภูมิที่เวลา 10 นาที ดังนั้นในการทดลองจึงวางตำแหน่งของตัวอย่างทดสอบที่ 6 เซนติเมตรจากพื้นของเครื่องไมโครเวฟ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติกับเวลา (นาที) ระหว่างยางธรรมชาติที่ไม่เติมอะเซทิลีนแบล็คและยางธรรมชาติที่เติมอะเซทิลีนแบล็ค 0.1 phr ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์

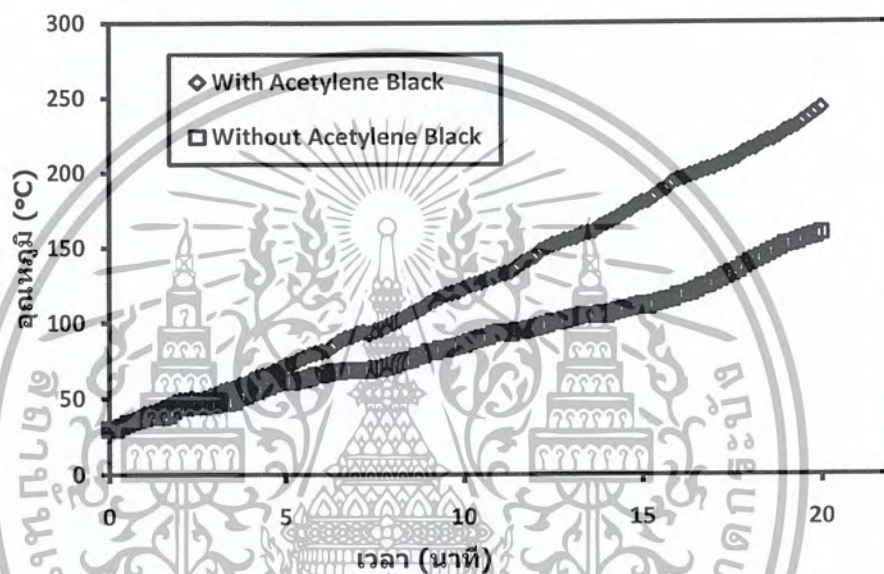
4.2 การศึกษาผลของอะเซทิลีนแบล็คกับการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ

การศึกษาผลของอะเซทิลีนแบล็คกับการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยทดลองเปรียบเทียบยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมอะเซทิลีนแบล็คและเติมอะเซทิลีนแบล็คปริมาณคงที่ 0.1 phr กำหนดกำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์และระยะเวลา 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่าเมื่อเติมอะเซทิลีนแบล็ค 0.1 phr มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง

ได้น้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมอะเซทิลีนแบล็ค แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามเผยแพร่ทางอินเทอร์เน็ตโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ของมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติกับเวลา ทั้งนี้เพราะการเติมอะเซทิลีนแบล็คผสมกับยางธรรมชาติจะทำให้โมเลกุลของอะเซทิลีนแบล็คสามารถเกิดการเหนี่ยวนำคลื่นไมโครเวฟ ส่งผลให้อุณหภูมิภายในขึ้นขามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดอุณหภูมิเทียบกับระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในโมเลกุลยางธรรมชาติเนื่องจากการเหนี่ยวนำด้วยอะเซทิลีนแบล็คดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดกระบวนการลดมวลโมเลกุลเชิงความร้อน (Thermolysis) เป็นเหตุให้มวลโมเลกุลมีแนวโน้มที่ลดลงมีค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมอะเซทิลีนแบล็ค



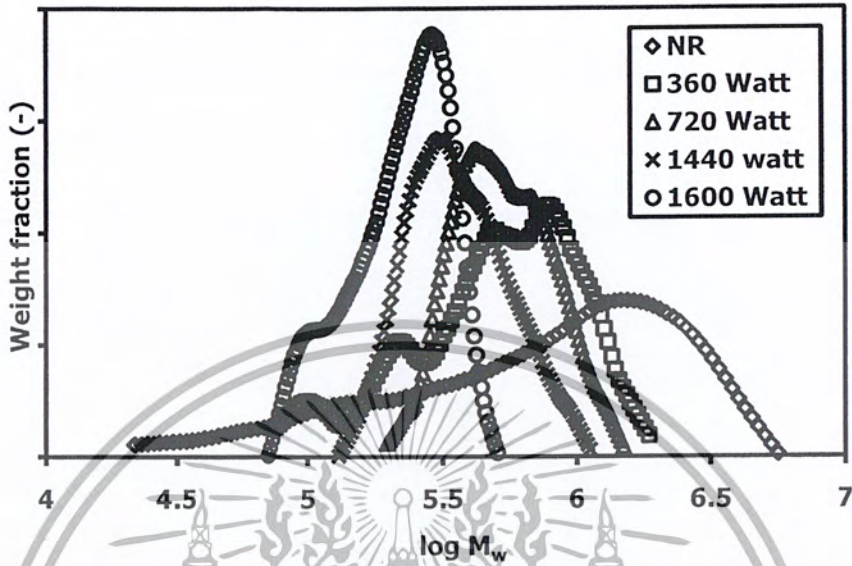
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) กับเวลา (นาที) ที่กำลังไมโครเวฟ 1,440 วัตต์ เปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ไม่ได้ใส่อะเซทิลีนแบล็คและยางธรรมชาติที่ใส่อะเซทิลีนแบล็ค 0.1 phr

4.3 GPC โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ

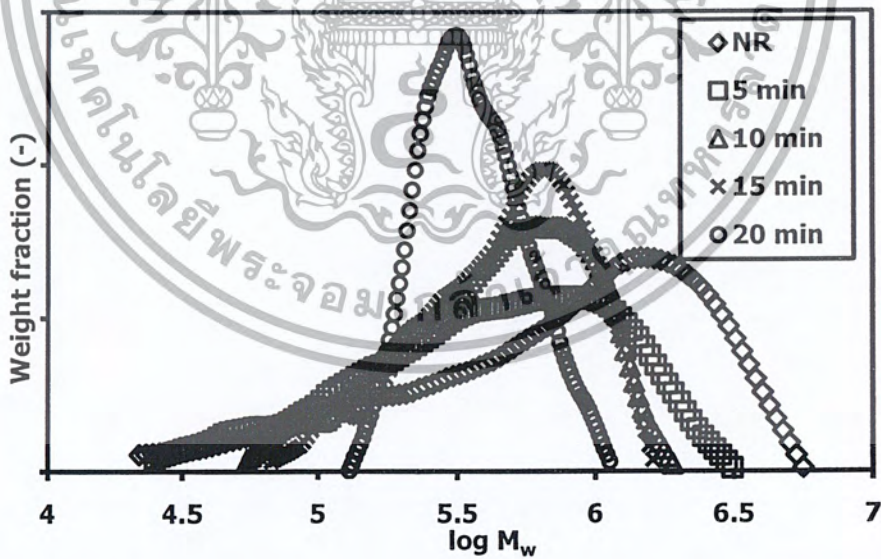
รูปที่ 4.4 แสดงโครมาโทแกรมของ GPC เปรียบเทียบการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติพบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังของเครื่องไมโครเวฟ มวลโมเลกุลและการกระจายมวลโมเลกุลมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติก่อนการลดมวลโมเลกุล ($M_w = 1.28 \times 10^6$, PDI = 4.16) ซึ่งสังเกตได้จากพีคของโครมาโทแกรมที่เลื่อนไปทางซ้ายและลักษณะของโครมาโทแกรมที่แคบลง ทั้งนี้เป็นผลจากการที่คลื่นไมโครเวฟเข้าไปเหนี่ยวนำโมเลกุลของอะเซทิลีนแบล็คที่ผสมอยู่ในเนื้อของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางธรรมชาติ ทำให้เกิดความร้อนภายในโมเลกุลของยางธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการสลายตัวเชิงความร้อน ทำให้มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลง



รูปที่ 4.4 GPC โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่เวลา 20 นาที



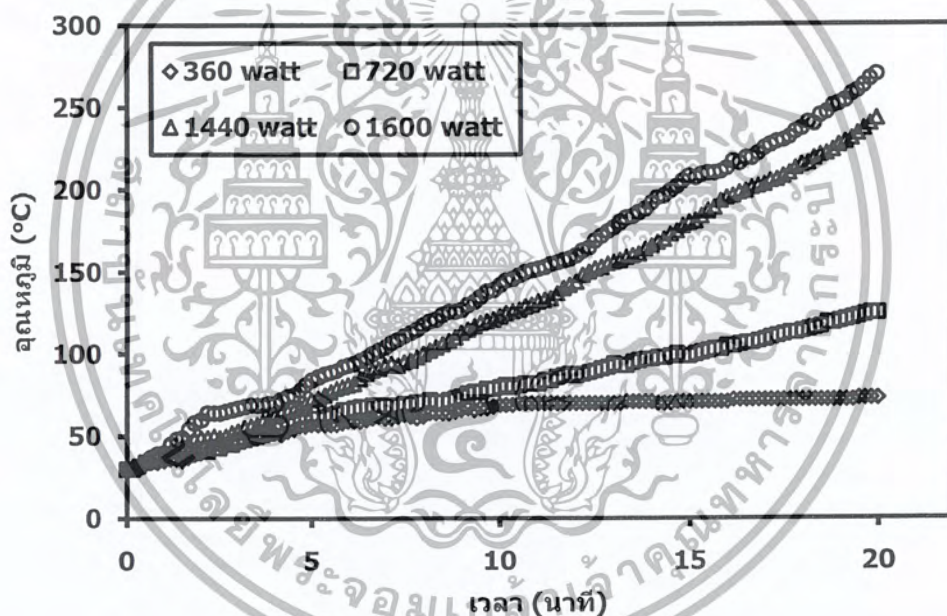
รูปที่ 4.5 GPC โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ
ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงโครมาโทแกรมของ GPC เปรียบเทียบการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่เวลาต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามากขึ้น มวลโมเลกุลและการกระจายมวลโมเลกุลมีแนวโน้มลดลง สังเกตได้จากพีคของโครมาโทแกรมที่เลื่อนไปทางซ้ายและลักษณะของโครมาโทแกรมที่แคบลงเช่นกัน

4.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ต่อการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ

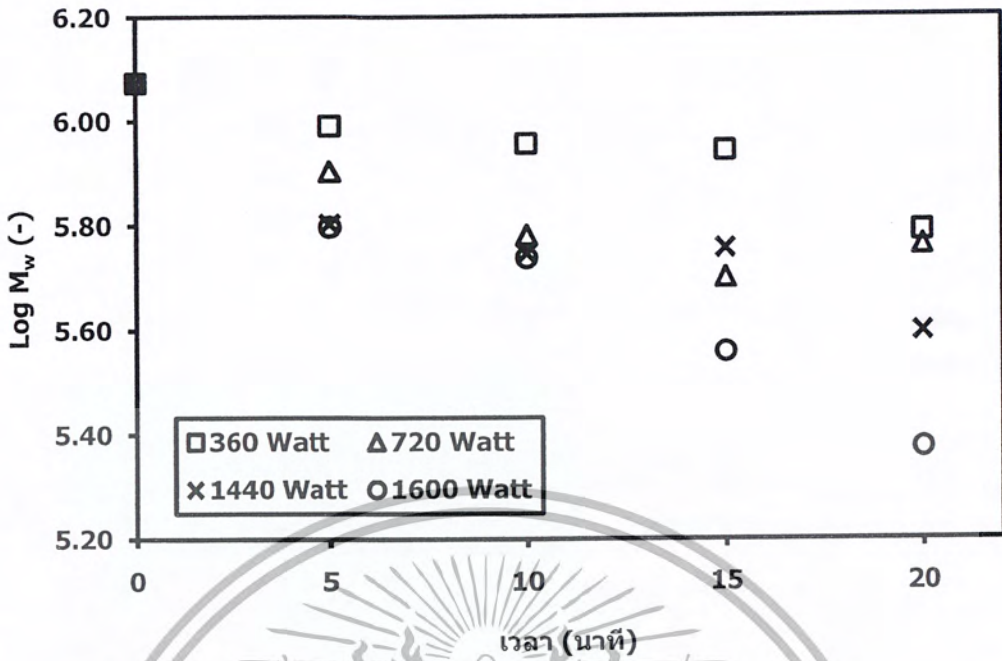
การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ต่อการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ซึ่งทำการทดลองวัดอุณหภูมิของยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นที่เวลา 5, 10, 15 และ 20 นาทีตามลำดับ โดยรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา จะเห็นว่าเมื่อเวลาและกำลังของเครื่องไมโครเวฟเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของยางธรรมชาตินี้ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย



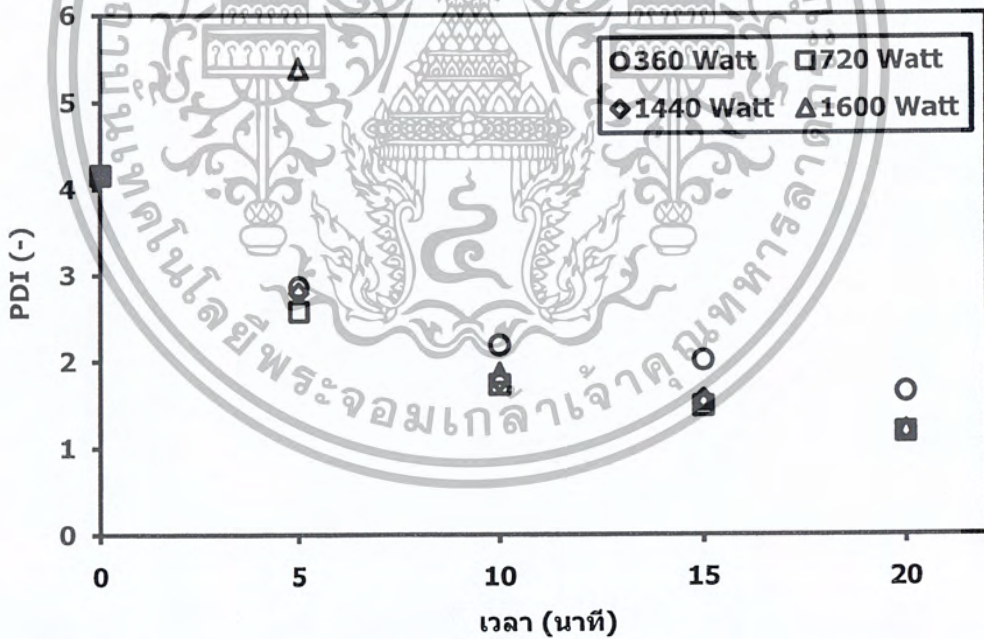
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) กับเวลา (นาที) ที่กำลังไมโครเวฟต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น มวลโมเลกุลของยางธรรมชาตินี้มีแนวโน้มลดลง โดยมวลโมเลกุลเริ่มต้นของยางธรรมชาตินี้มีค่า $1.28 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ และมวลโมเลกุลของยางธรรมชาตินี้ลดลงมากที่สุดเมื่อเวลา 20 นาที ซึ่งมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่สามารถลดได้มากที่สุดในการทดลองนี้มีค่า $2.37 \times 10^5 \text{ g mol}^{-1}$ ส่วนค่ามวลโมเลกุลอื่นๆที่ได้จากการทดลอง ระบุไว้ในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติกับเวลา (นาท)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Polydispersity Index (PDI) กับเวลา (นาท)

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Polydispersity Index (PDI) กับเวลาพบว่าที่เวลา 5 นาที ค่า PDI เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

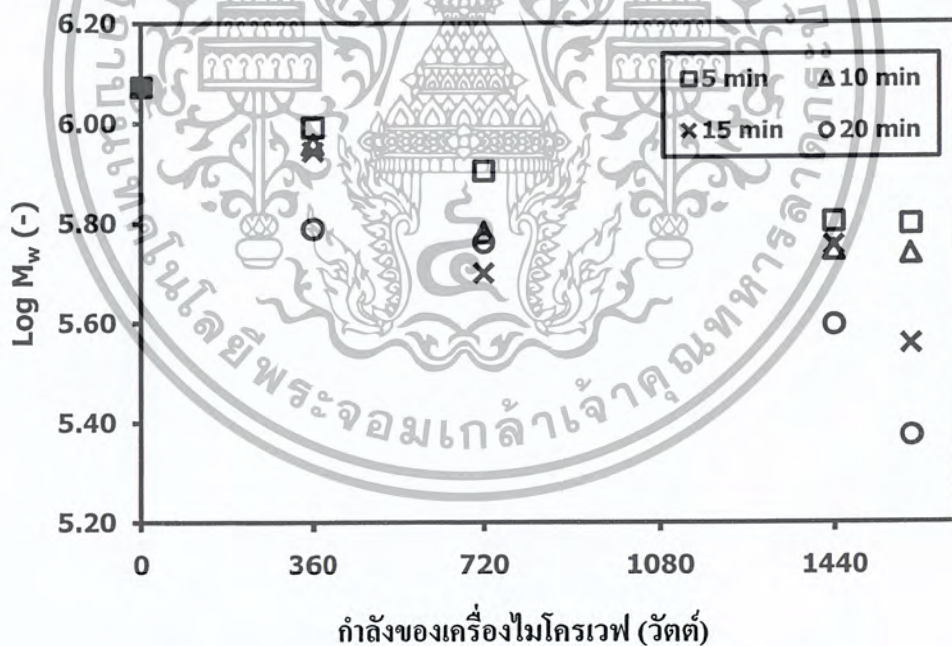
ค่า PDI จะค่อยๆ ลดลงจนน้อยกว่าค่า PDI ของยางธรรมชาติ ทั้งนี้เป็นเพราะที่เวลา 5 นาที การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นยางยังมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้มวลโมเลกุลที่ลดลงในแต่ละตำแหน่งมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นค่า PDI มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ แต่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นอีกอุณหภูมิภายในชิ้นงานเริ่มมีค่าเท่ากัน ทำให้ค่า PDI ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ผดุงศักดิ์และคณะ[2] ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ พบว่าอุณหภูมิภายในยางกระจายตัวไม่เท่ากันที่เวลา 5 นาที และเริ่มกระจายตัวเท่ากันเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

4.5 การศึกษาผลของกำลังของเครื่องไมโครเวฟต่อการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ

การศึกษาผลของกำลังของเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ต่อการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติทำการทดลองที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 360, 720, 1,440 และ 1,600 วัตต์ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อกำลังของเครื่องไมโครเวฟเพิ่มขึ้น มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติมีแนวโน้มที่ลดลงเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยมวลโมเลกุลเริ่มต้นของยางธรรมชาติมีค่า $1.28 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ และมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลงมากที่สุดเมื่อใช้กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,600 วัตต์ ซึ่งมวลโมเลกุลที่ลดลงมากที่สุดมีค่า $2.37 \times 10^5 \text{ g mol}^{-1}$

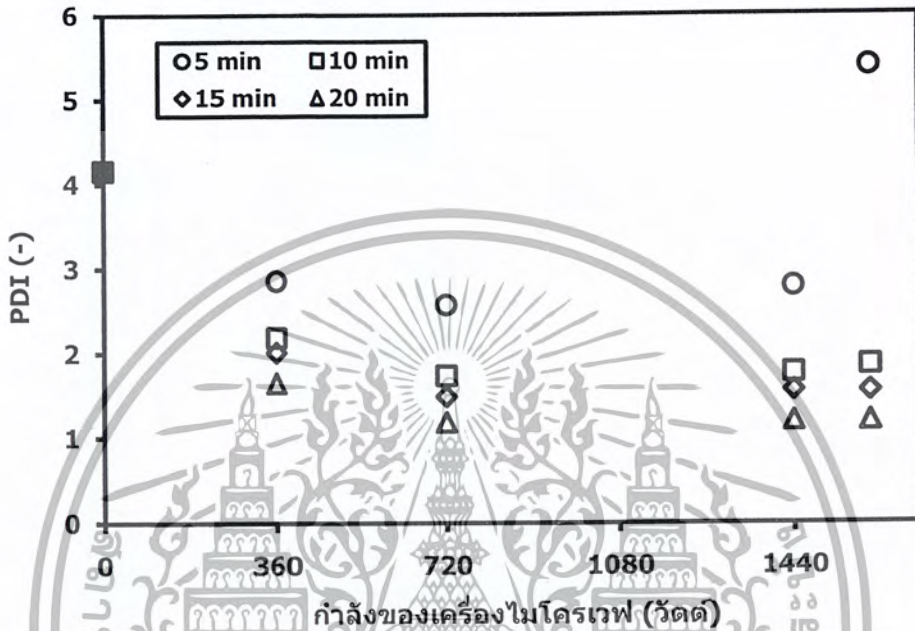


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติกับกำลังของเครื่องไมโครเวฟ (วัตต์)

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Polydispersity Index (PDI) กับกำลังของเครื่องไมโครเวฟจะพบว่าค่าที่ได้ค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน แสดงว่ากำลังของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครเวฟมีผลน้อยมากต่อการกระจายตัวของอนุภาคน้ำในชั้นยาง เนื่องจากในการทดลอง ปริมาณของอะเซทิลีนแบล็คมีค่าเท่ากันคือ 0.1 phr ทำให้การเหนียวน้ำคลื่นไมโครเวฟภายในยางธรรมชาติใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคน้ำในลักษณะเดียวกันในทุกกำลังของ เครื่องไมโครเวฟ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Polydispersity Index (PDI) กับกำลังของเครื่องไมโครเวฟ (วัตต์)

จากการสังเกตลักษณะภายนอกของยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุล เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลแล้ว พบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟจะมีสีเข้มขึ้น และจะเข้มมากขึ้นเมื่อกำลังของเครื่องไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ซึ่งสีที่เข้มขึ้นอาจมาจากยางธรรมชาติเกิดการออกซิเดชันแล้วเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและคาร์บอนิล ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบด้วยเครื่อง FT-IR ดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.6

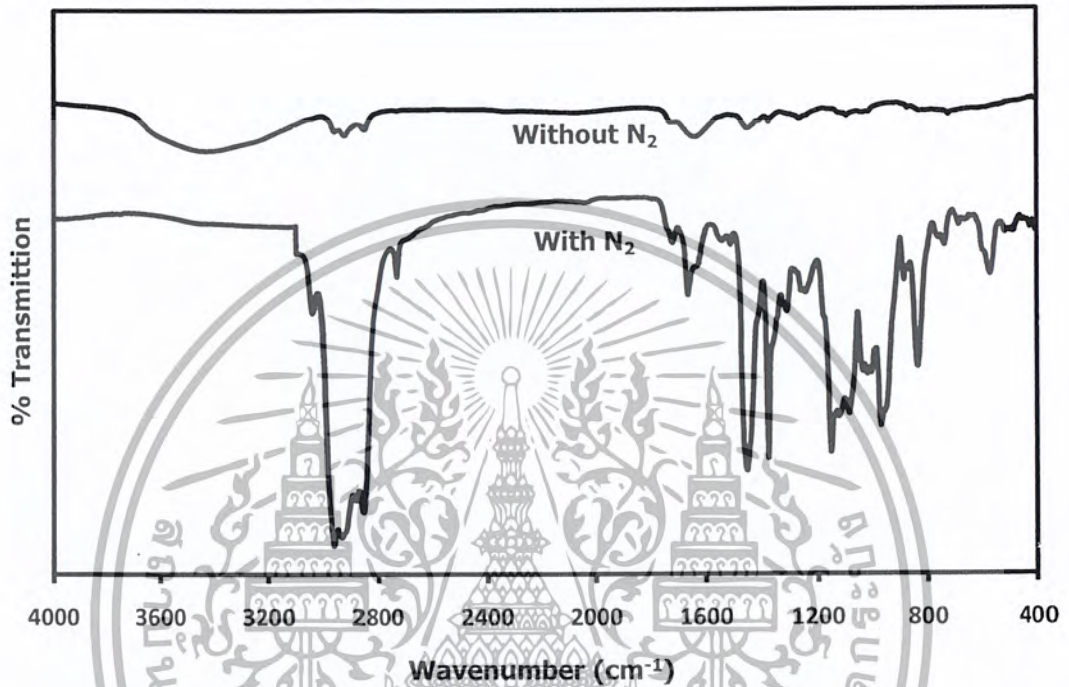
4.6 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR Spectrometer)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่น

ไมโครเวฟ ในรูปที่ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุล โดยมีการผ่านไนโตรเจนและไม่มีผ่านไนโตรเจนพบว่า หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านไนโตรเจนขณะทำการทดลองจะปรากฏหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล เนื่องจากในเครื่องไมโครเวฟมีออกซิเจนอยู่ในปริมาณมาก ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการออกซิเดชันเป็นหมู่ไฮดรอกซิล ในขณะที่ยางธรรมชาติที่ผ่านแก๊สไนโตรเจนจะไม่มีหมู่ไฮดรอกซิลเกิดขึ้น

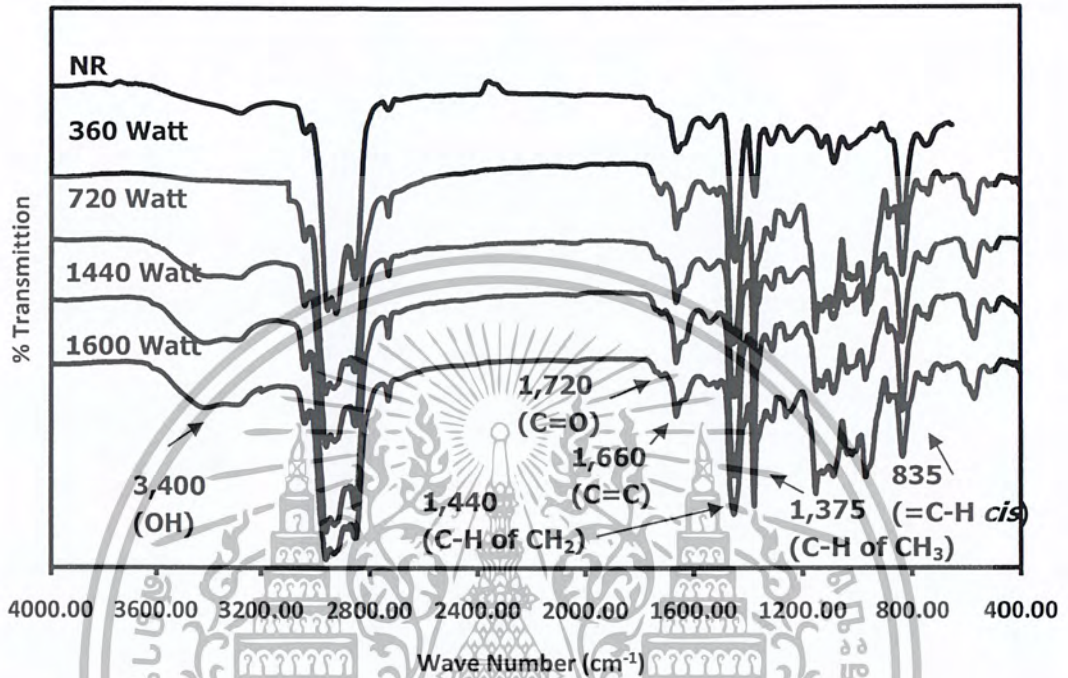


รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวล โมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ผ่านและไม่ผ่านไนโตรเจนขณะทำการทดลอง

ในรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวล โมเลกุลที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟต่างๆ กับยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ พบว่าการลดมวล โมเลกุลของยางธรรมชาติไม่มีผลต่อหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ โดยลักษณะพีคของยางที่ผ่านการลดมวล โมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟให้ผลที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านการลดมวล โมเลกุล แต่มีส่วนที่แตกต่างกันปรากฏให้เห็นแต่ไม่ชัดเจน ที่บริเวณความยาวคลื่น $3,400\text{ cm}^{-1}$ และ $1,720\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดได้ในระหว่างทำการทดลองมีออกซิเจนเหลืออยู่เล็กน้อย แม้จะทำการผ่านแก๊สไนโตรเจนแล้ว แต่เมื่อกำลังของเครื่องไมโครเวฟมีค่าสูง จะทำให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติกลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลขึ้น ทราบได้จากสีของยางธรรมชาติที่เข้มข้นจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาง แต่ก็มีปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันหลักอื่น แสดงว่าการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ นอกเหนือจากมีสายโซ่ที่สั้นกว่า ทำให้มีมวลโมเลกุลน้อยกว่า



รูปที่ 4.12 Spectrum patterns จากเครื่อง FTIR ของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟต่างๆ ที่เวลา 20 นาที เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

4.7 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ

จลนพลศาสตร์ของการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถหาได้จากการคำนวณองศาการเกิดพอลิเมอร์ (DP_w) ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติ (\bar{M}_w) ต่อหน่วยซ้ำไอโซพรีน ($M_{monomer} = 68 \text{ g mol}^{-1}$) ดังสมการที่ (2.2)

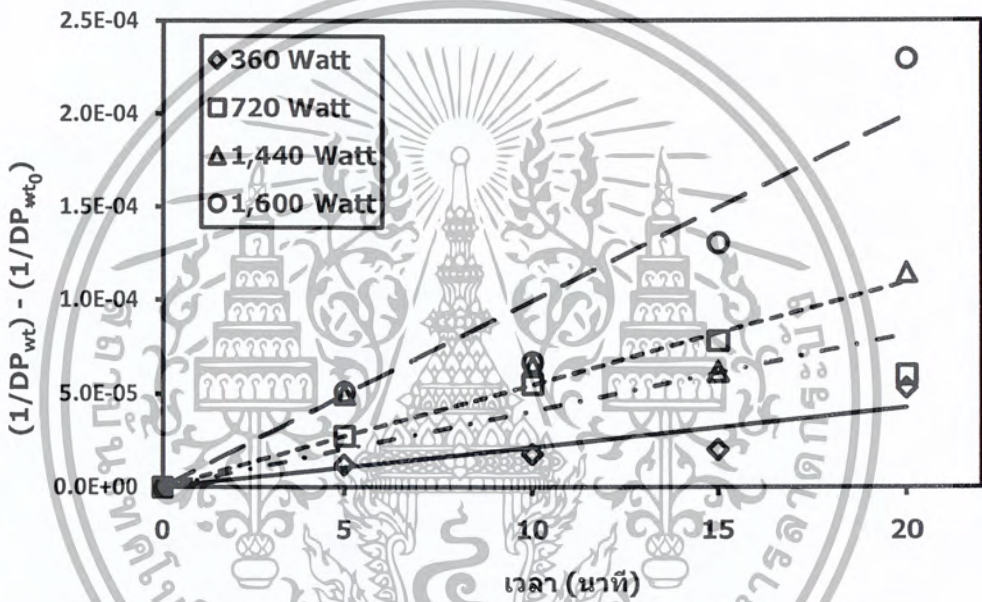
$$(DP_w) = \frac{\bar{M}_w}{M_{monomer}} \quad (2.2)$$

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางจลนศาสตร์แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ขององศาเริ่มต้น ($DP_{n(0)}$) และที่เวลาใดๆ ($DP_{n(t)}$) เป็นฟังก์ชันของค่าคงที่อัตรา (k) และเวลา (t) ดังสมการที่ (2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$kt = \frac{1}{DP_{w(t)}} - \frac{1}{DP_{w(0)}} \quad (2.3)$$

จากการคำนวณหาค่าคงที่อัตรา (k) ของการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/DP_{w(t)} - 1/DP_{w(0)}$ เทียบกับเวลา (t) ด้วยเทคนิคกฎอัตรารูปอินทิเกรต ซึ่งจากความชันของกราฟที่ได้พบว่าได้ผลลัพธ์เป็นแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง จึงนำมาใช้ในโครงการการหาค่าจลนพลศาสตร์การลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังวัตต์และเวลาต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 4.13 ซึ่งค่าคงที่อัตราจะเพิ่มขึ้นตามกำลังของเครื่องไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราในแต่ละกำลังของเครื่องไมโครเวฟจะแสดงในตารางที่ 4.1



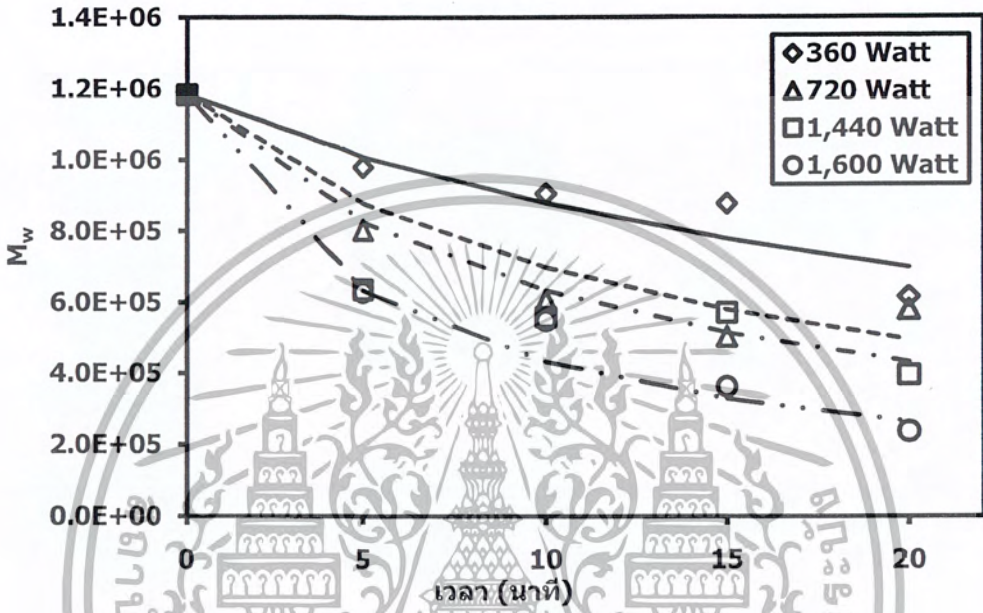
รูปที่ 4.13 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติอันดับสอง

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่อัตราเมื่อใช้กำลังของเครื่องไมโครเวฟต่างๆ

กำลังของเครื่องไมโครเวฟ (Watt)	ค่าคงที่อัตรา (min ⁻¹)
360	2.14 x 10 ⁻⁶
720	4.08 x 10 ⁻⁶
1,440	5.48 x 10 ⁻⁶
1,600	9.96 x 10 ⁻⁶

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าคงที่อัตราในแต่ละสถานะตามตารางที่ 4.1 กลับไปแทนในสมการที่ (2.3) เพื่อหาแนวโน้มในการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ จะได้เส้นแนวโน้มของการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นจากเส้นแนวโน้มว่า มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลงมากขึ้นเมื่อกำลังของเครื่องไมโครเวฟเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ได้จากสมการจลนพลศาสตร์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยวิธีทางกายภาพโดยการ ใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจะสามารถลดมวลโมเลกุลได้มากที่สุดเมื่อใช้กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,600 วัตต์ และเวลา 20 นาที ซึ่งสามารถลดลงเหลือ $2.37 \times 10^5 \text{ g mol}^{-1}$ จากมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติเริ่มต้น $1.23 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$

2. การเติมอะเซทิลีนแบล็คลงไปในยางธรรมชาติจะส่งผลให้อะเซทิลีนแบล็คเข้าไปเหนี่ยวนำคลื่นไมโครเวฟได้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของยางเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1.5 เท่า และสามารถลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติได้มากกว่าประมาณ 1.7 เท่า เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมอะเซทิลีนแบล็ค

3. จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติด้วยเครื่อง FT-IR พบว่าการผ่านไมโครเวฟเข้าไปในระหว่างทำการทดลองจะสามารถป้องกันการเกิดการออกซิเดชันของยางขณะทำการทดลองได้ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟต่ำๆ จะเห็นได้จากการ Spectrum patterns จากเครื่อง FT-IR ของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ไม่ผ่านไมโครเวฟขณะทำการทดลอง ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 360 วัตต์ ปรากฏหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลเกิดขึ้น ในขณะที่ยางธรรมชาติที่ผ่านไมโครเวฟจะไม่มีหมู่ไฮดรอกซิล เมื่อกำลังของเครื่องไมโครเวฟสูงขึ้นตั้งแต่ 720 วัตต์เป็นต้นไป จะมีการปรากฏของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิล เนื่องจากที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟสูงจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แม้จะมีออกซิเจนในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้เกิดออกซิเดชันได้ แต่ไม่มากเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ

4. จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติพบว่าการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นปฏิกิริยาลำดับสอง โดยค่าคงที่อัตราจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังของเครื่องไมโครเวฟเพิ่มขึ้น โดยค่าคงที่อัตราที่มีค่ามากที่สุดคือ $9.96 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$ ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,600 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรออกแบบเตาไมโครเวฟที่สามารถหมุนชิ้นงานได้ เพื่อที่จะให้คลื่นไมโครเวฟสามารถกระจายได้ทั่วชิ้นงาน
2. การวัดอุณหภูมิของยางธรรมชาติภายในเครื่องไมโครเวฟ ควรใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Non contact thermometer) เพื่อให้ค่าอุณหภูมิที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Rabek J.F., "Polymer Photodegradation Mechanisms and experiment methods." Chapman & Hall, 1995
- [2] Kanyarat Boonsomwong. "Reversion behavior, mechanical and thermal aging properties of natural rubber vulcanizates cured with various accelerators and sulfur to accelerator ratios." Mahidol University, 2009.
- [3] D.Bogdat , A Prociak . "Microwave-Enhanced Polymer Chemistry and Technology." 1st ed. Iowa: Blackwell Professional, 2007.
- [4] M. Yat Tse, M. Catherine Depew and Jeffrey K.S. Wan. "Applications of high power microwave catalysis in chemistry." *Research on Chemical Intermediates*, Vol. 13 (3), pp. 221-236
- [5] Natt Makul, Phadungsak Rattanadecho. "Microwave pre-curing of natural rubber-compounding using a rectangular wave guide." *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 914-923, 2010.
- [6] N. Doo-ngam. "Microwave pre-heating of natural rubber using a rectangular wave guide (MODE: TE₁₀)." *Songklanakarin Journal Science and Technology*, Vol. 29 (6), pp. 1599-1608, 2007.
- [7] บุญธรรม นิธิอุทัย. "ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์และคุณสมบัติ." คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2530.
- [8] อติฬ คือเร๊ะ, สุรัตน์ อารีรัตน์. "การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟเหนี่ยวนำความร้อน." สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553
- [9] H. M. Nor, J. R. Ebdon. "Telechelic liquid natural rubber: A review." *Prog. Poly. Sci.*, Vol. 23 (2), pp. 143-177, 1998
- [10] ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. "พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ." พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- [11] Claud Giet. "Acetylene black with high electrical conductivity and high absorptive power." U.S patent no.4279880, 1981.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] T.W. Boon. **“Fourier transform infrared spectroscopy.”** Perkin Elmer instruments, Singapore, 2001.
- [13] FT-IR explained. [ออนไลน์]
Available: <http://www.spectroscopy.co.uk/ftir/pages/explain.html>, 2010.
- [14] Chor. Wayakron Phetphaisit, Pranee Phinyocheep. “Kinetics and parameters affecting degradation of purified natural rubber.” **Journal of Applied Polymer Science**, Vol.90, pp. 3546–3555, 2003.
- [15] J.A. Menéndez, A. Dominguez, M. Inguanzo, J.J. Pis. “Microwave pyrolysis of sewage sludge : analysis of the gas fraction.” **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Vol. 71, pp. 657–667, 2004.
- [16] T. Chaowasakoo, N. Sombatsompop. “Mechanical and morphological properties of fly ash/epoxy composites using conventional thermal and microwave curing methods.” **Composites Science and Technology**, Vol.67, pp. 2282–2291, 2007.
- [17] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. “การทดสอบหาค่าเฉลี่ยของมวลโมเลกุลและการกระจายมวลโมเลกุลของโพลีเมอร์โดยให้โครมาโทกราฟีคัตขนาดโมเลกุล.” 2548.



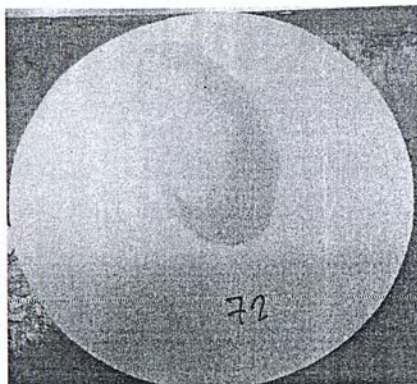


ภาคผนวก

สำนักงานเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สำนักงานเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓-3 ขางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 720 วัตต์



รูปที่ ๓-4 ขางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 1,440 วัตต์



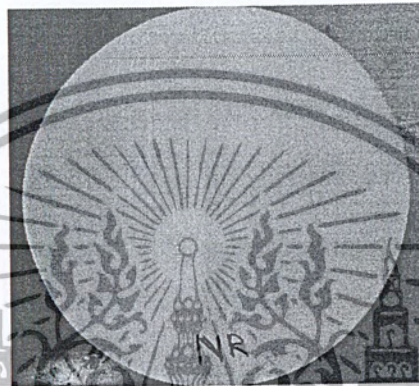
รูปที่ ๓-5 ขางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 1,600 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สีของยางธรรมชาติก่อนและหลังผ่านกระบวนการลดมวลโมเลกุล

ด้วยคลื่นไมโครเวฟ



รูปที่ ก-1 ยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการลดมวล โมเลกุล



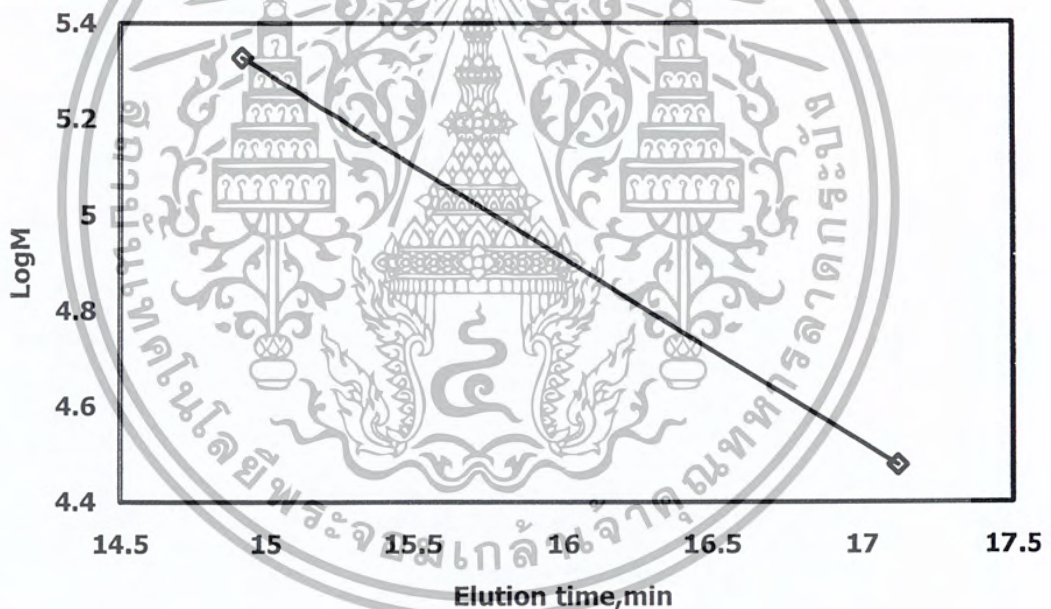
รูปที่ ก-2 ยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดมวล โมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลัง 360 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบหาค่ามวลโมเลกุลและการกระจายมวลโมเลกุลของยาง ธรรมชาติโดยใช้ GPC

1. การทำกราฟมาตรฐาน[17]

กราฟมาตรฐานสามารถทำได้โดยฉีดยางธรรมชาติที่รู้ค่ามวลโมเลกุลที่แน่นอนอย่างน้อย 2 ค่าในเครื่อง GPC เพื่อหาค่า Elution Time แล้วนำค่ามวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ทราบมวลโมเลกุลกับ Elution Time ที่ได้มาสร้างเป็นกราฟเพื่อหาสมการเส้นตรงที่สามารถคำนวณหามวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ (M_i) ดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติกับ Elution Time

จากกราฟจะได้สมการเส้นตรง $\text{Log } M_i = A_1 t + A_0$ (ข-1)

โดยที่ M_i คือ มวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ

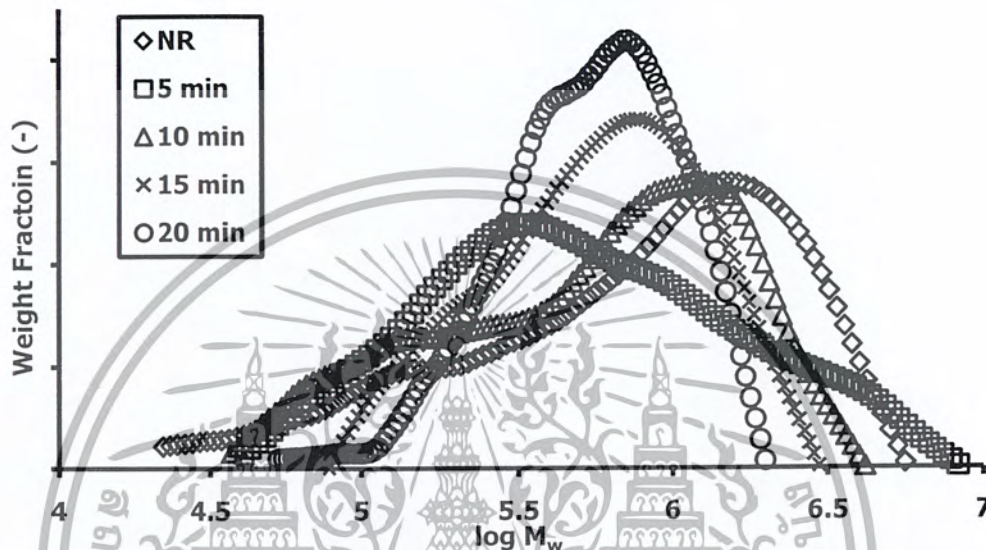
t คือ Elution time

A_0, A_1 คือ ค่าคงที่ของที่ได้จากความชันและจุดตัดแกน

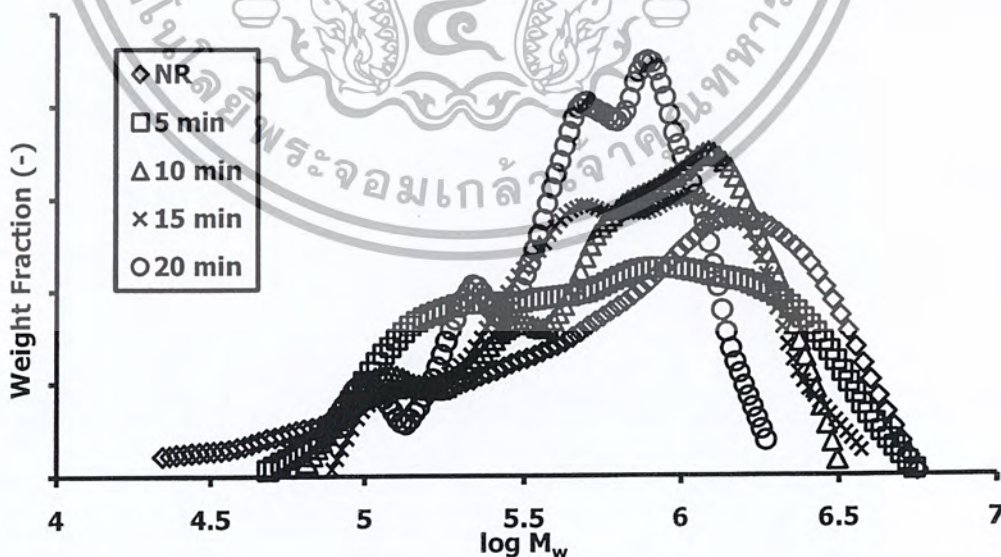
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ได้จากเครื่อง GPC

วิธีการคำนวณมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติที่ได้จากเครื่อง GPC เริ่มจากการเขียนกราฟโครมาโทแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ (M_w) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (ข-1) และค่าความเข้มของสัญญาณ (H_i) ซึ่งเป็นค่าที่อ่านได้จากเครื่อง GPC

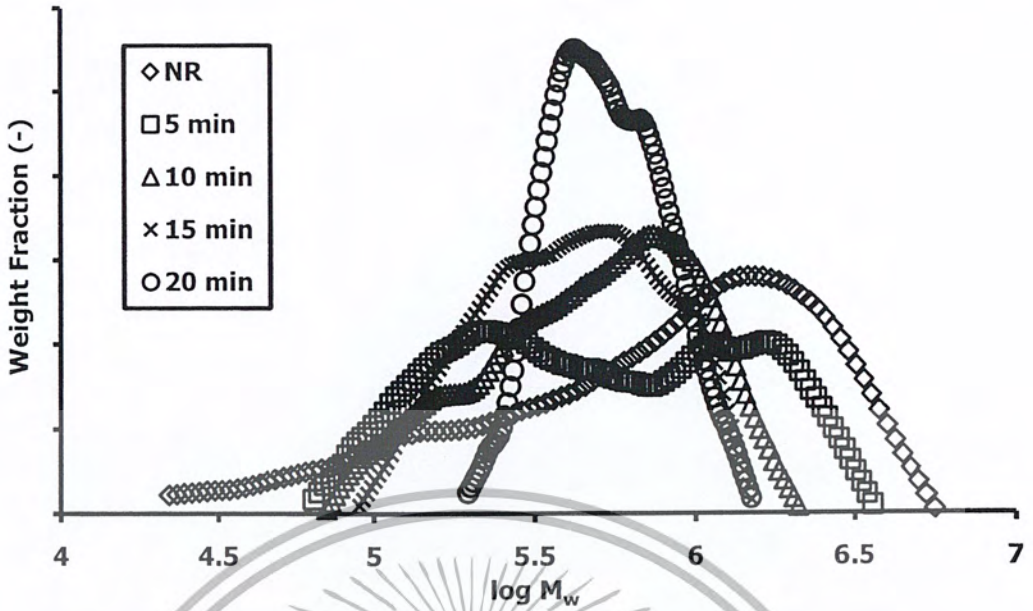


รูปที่ ข-2 โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติผสมอะเซทิลีนแบบลึกลับที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์

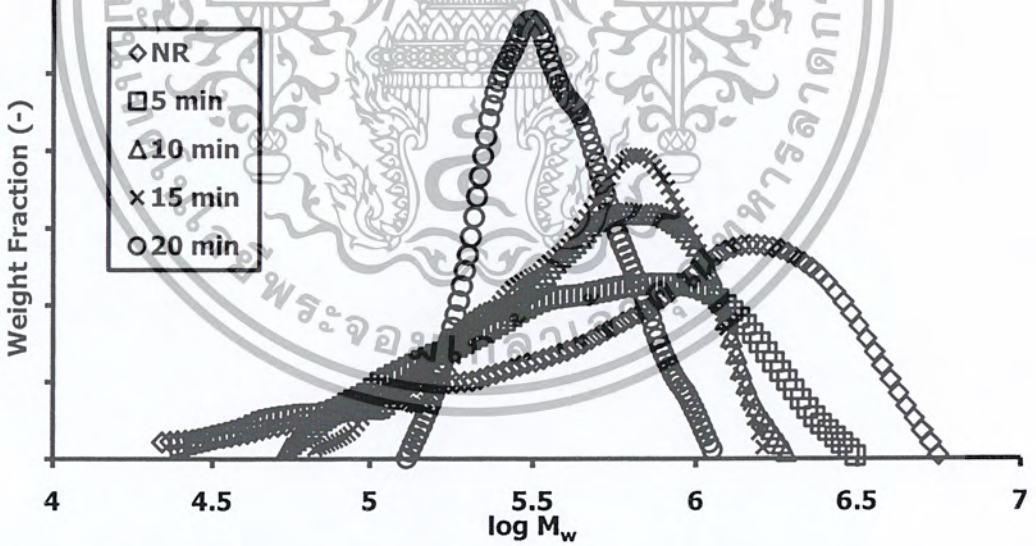


รูปที่ ข-3 โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติผสมอะเซทิลีนแบบลึกลับ 0.1 phr ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 360 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

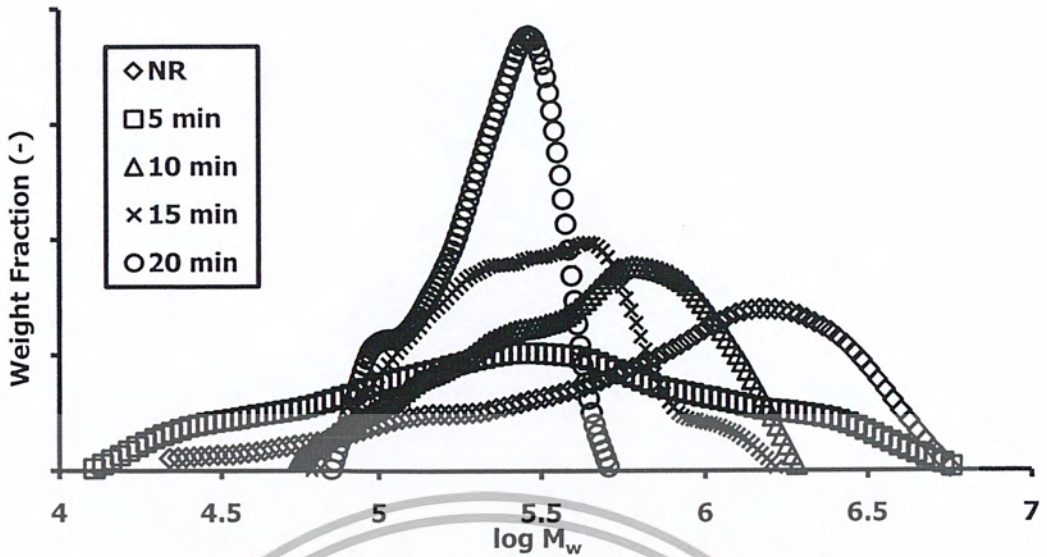


รูปที่ ข-4 โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติผสมอะเซทิลีนแบล็ค 0.1 phr ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 720 วัตต์



รูปที่ ข-5 โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติผสมอะเซทิลีนแบล็ค 0.1 phr ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๖-6 โครมาโทแกรมแสดงการกระจายมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติผสมอะเซทิลีนเบดส์ 0.1 phr ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,600 วัตต์

หลังจากที่ได้โครมาโทแกรมแล้ว จะสามารถคำนวณค่า Number average molecular weight (\bar{M}_n), Weight average molecular weight (\bar{M}_w) และค่าดัชนีการกระจายแบบผสม (Polydispersity index : PDI) ได้จากสมการที่ (๗-2) ถึงสมการที่ (๗-4)

$$\bar{M}_n = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i}{M_i}\right)} \quad (๗-2)$$

$$\bar{M}_w = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i * M_i)}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (๗-3)$$

$$PDI = \bar{M}_w / \bar{M}_n \quad (๗-4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง GPC และค่าที่คำนวณจากโครมาโทแกรม

กำลังของเครื่อง ไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลา (นาที)	ปริมาณของ อะเซทิลีนแบดส์ (phr)	\bar{M}_w (g mol ⁻¹)	\bar{M}_n (g mol ⁻¹)	PDI
0	0	0	1.23 x 10 ⁶	2.95 x 10 ⁵	4.16
1,440	5	0	9.46 x 10 ⁵	2.80 x 10 ⁵	3.38
1,440	10	0	8.62 x 10 ⁵	2.83 x 10 ⁵	3.05
1,440	15	0	7.48 x 10 ⁵	4.13 x 10 ⁵	1.81
1,440	20	0	6.55 x 10 ⁵	4.31 x 10 ⁵	1.52
360	5	0.1	9.80 x 10 ⁵	3.42 x 10 ⁵	2.86
360	10	0.1	9.05 x 10 ⁵	4.14 x 10 ⁵	2.19
360	15	0.1	8.76 x 10 ⁵	4.36 x 10 ⁵	2.01
360	20	0.1	6.15 x 10 ⁵	3.73 x 10 ⁵	1.65
720	5	0.1	8.02 x 10 ⁵	3.11 x 10 ⁵	2.57
720	10	0.1	6.04 x 10 ⁵	3.49 x 10 ⁵	1.73
720	15	0.1	5.02 x 10 ⁵	3.37 x 10 ⁵	1.49
720	20	0.1	5.78 x 10 ⁵	4.88 x 10 ⁵	1.18
1,440	5	0.1	6.35 x 10 ⁵	2.28 x 10 ⁵	2.79
1,440	10	0.1	5.58 x 10 ⁵	3.15 x 10 ⁵	1.77
1,440	15	0.1	5.70 x 10 ⁵	3.66 x 10 ⁵	1.56
1,440	20	0.1	3.95 x 10 ⁵	3.30 x 10 ⁵	1.20
1,600	5	0.1	6.28 x 10 ⁵	1.17 x 10 ⁵	5.39
1,600	10	0.1	5.48 x 10 ⁵	2.95 x 10 ⁵	1.86
1,600	15	0.1	3.62 x 10 ⁵	2.33 x 10 ⁵	1.55
1,600	20	0.1	2.37 x 10 ⁵	1.98 x 10 ⁵	1.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติ

จลนพลศาสตร์ของการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถหาได้จากการคำนวณ องศาการแตกสลายของพอลิเมอร์ (DP_w) ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติ (\bar{M}_w) ต่อหน่วยซ้ำไอโซพรีน ($M_{monomer} = 68 \text{ g mol}^{-1}$) ดังสมการที่ (2.2)

$$(DP_w) = \frac{\bar{M}_w}{M_{monomer}} \quad (2.2)$$

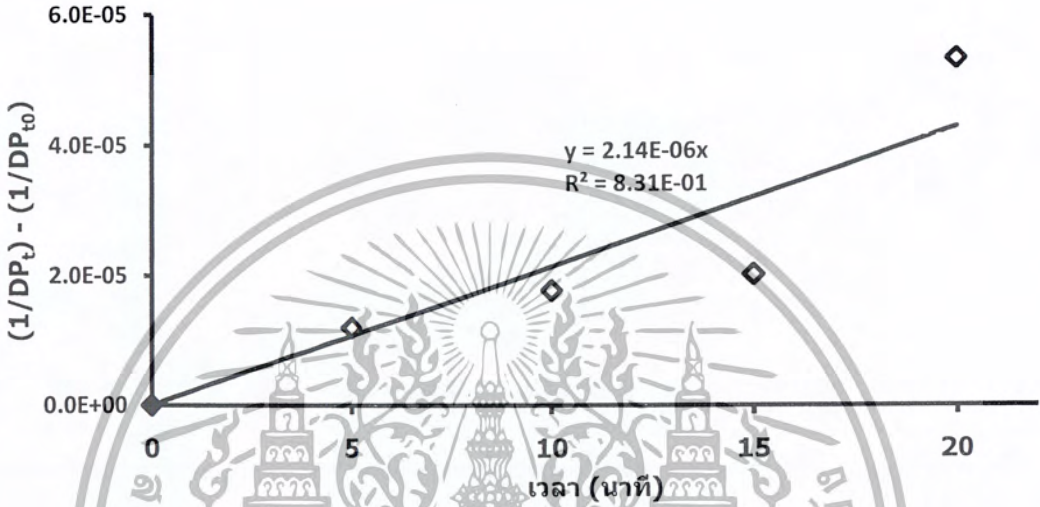
ตารางที่ ค-1 ค่าองศาการแตกสลายของพอลิเมอร์ (DP_w) ที่เวลาและกำลังต่างๆของเครื่องไมโครเวฟ

กำลังของเครื่องไมโครเวฟ (วัตต์)	เวลา (นาที)	องศาการแตกสลายของพอลิเมอร์
0	0	1.74×10^4
360	5	1.44×10^4
360	10	1.33×10^4
360	15	1.29×10^4
360	20	9.05×10^3
720	5	1.18×10^4
720	10	8.89×10^3
720	15	7.38×10^3
720	20	8.50×10^3
1,440	5	9.34×10^3
1,440	10	8.20×10^3
1,440	15	8.39×10^3
1,440	20	5.81×10^3
1,600	5	9.23×10^3
1,600	10	8.06×10^3
1,600	15	5.32×10^3
1,600	20	3.49×10^3

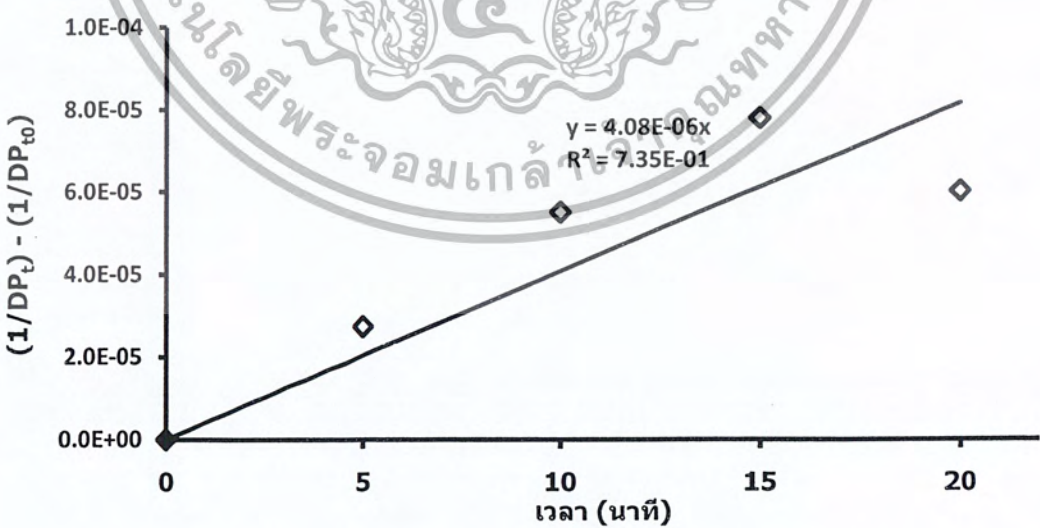
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ขององศาเริ่มต้น ($DP_{w(0)}$) ที่เวลาใดๆ ($DP_{w(t)}$) เป็นฟังก์ชันของค่าคงที่อัตรา (k) และเวลา (t) ดังสมการที่ (2.3)

$$kt = \frac{1}{DP_{w(t)}} - \frac{1}{DP_{w(0)}} \tag{2.3}$$

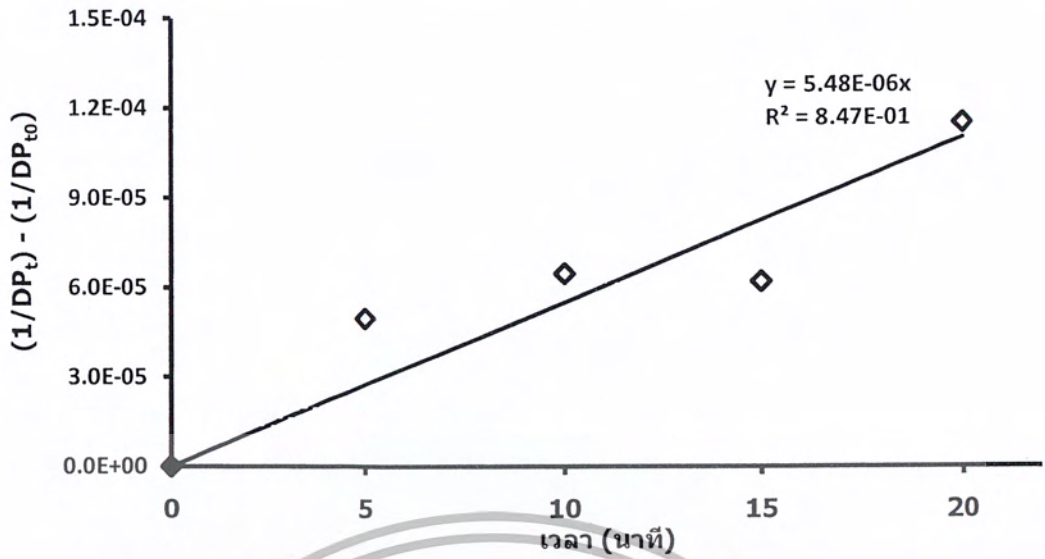


รูปที่ ๑-1 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลำดับสองที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 360 วัตต์

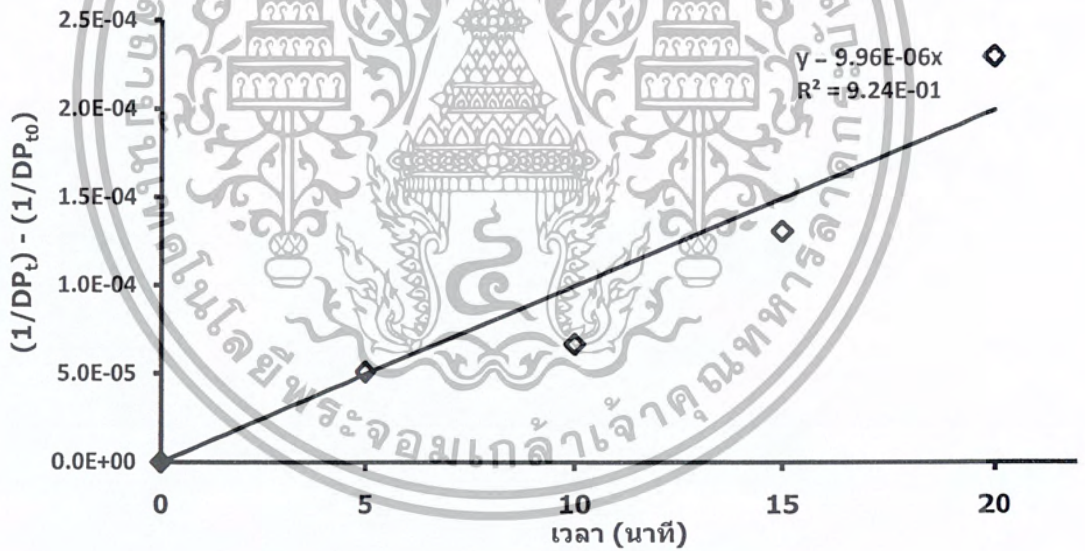


รูปที่ ๑-2 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลำดับสองที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 720 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-3 จดณพศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลำดับสองที่
กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,440 วัตต์



รูปที่ ค-4 จดณพศาสตร์ของปฏิกิริยาการลดมวลโมเลกุลของยางธรรมชาติลำดับสองที่
กำลังของเครื่องไมโครเวฟ 1,600 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้