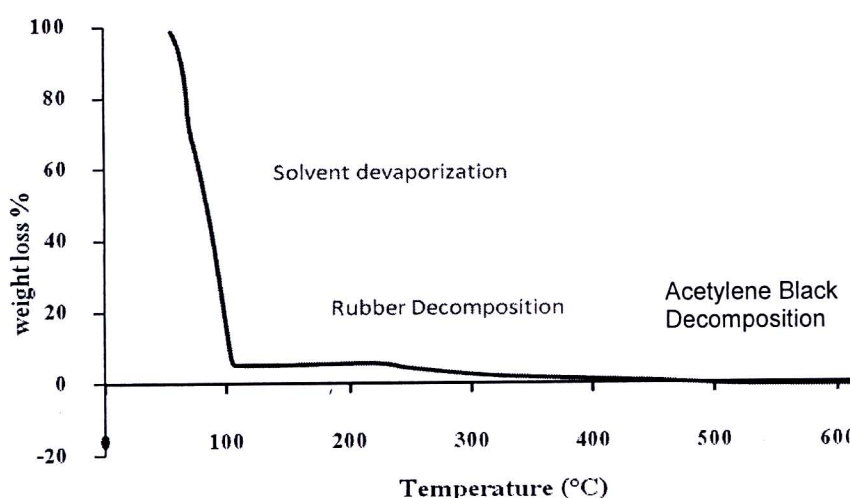


3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยวิธีทางกายภาพ และวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยเครื่องมือเจลเพอมีเอชันโครมาโทกราฟี (GPC) รวมถึงวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นจากการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยเครื่องมือ FT-IR ซึ่งค่าน้ำหนักโมเลกุลที่เกิดขึ้นหลังจากการลดน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นข้อมูลสำคัญที่ยืนยันสมมติฐานว่าสามารถลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติได้จริง ในงานวิจัยนี้จะใช้ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟกระตุ้นโมเลกุลของอะเซทิลีนแบล็ค ทำให้อะเซทิลีนแบล็คทำให้อะเซทิลีนแบล็คเกิดการสั่น ส่งผลให้เกิดการสลายโมเลกุลของยางธรรมชาติ ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ กำลังวัตต์ของเครื่องไมโครเวฟ เวลาที่ใช้ในการสลายตัวทางความร้อน ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติ

เนื่องจากการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางวิธีนี้จะใช้ความร้อนจากการสั่นของโมเลกุลเพื่อสลายพันธะของยางธรรมชาติดังนั้นในขั้นตอนแรกของการทดลองนั้นจำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิในการสลายตัวของยางธรรมชาติซึ่งสามารถวิเคราะห์อุณหภูมิในการสลายตัวของยางธรรมชาติด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติที่ผสมอะเซทิลีนแบล็ค 0.1 phr แสดงดังรูปที่ 3 พบว่ายางธรรมชาติเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 210 – 260 °C ซึ่งคาดว่ากระบวนการสลายตัวเชิงความร้อนสามารถทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบ Depolymerization ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลงเป็นอย่างมาก

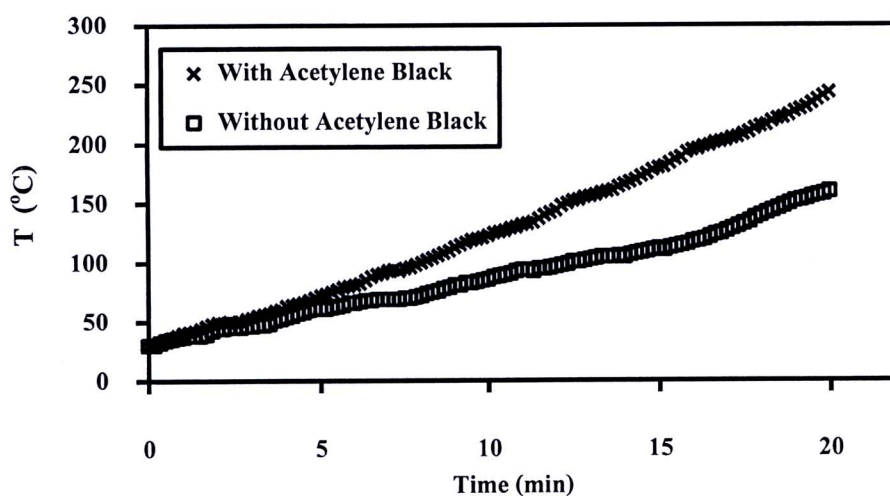


รูปที่ 3 TGA Thermogram ของสารละลายยางธรรมชาติที่ผสมกับอะเซทิลีนแบล็ค



3.2 ผลของการเติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็คต่ออุณหภูมิยางธรรมชาติ

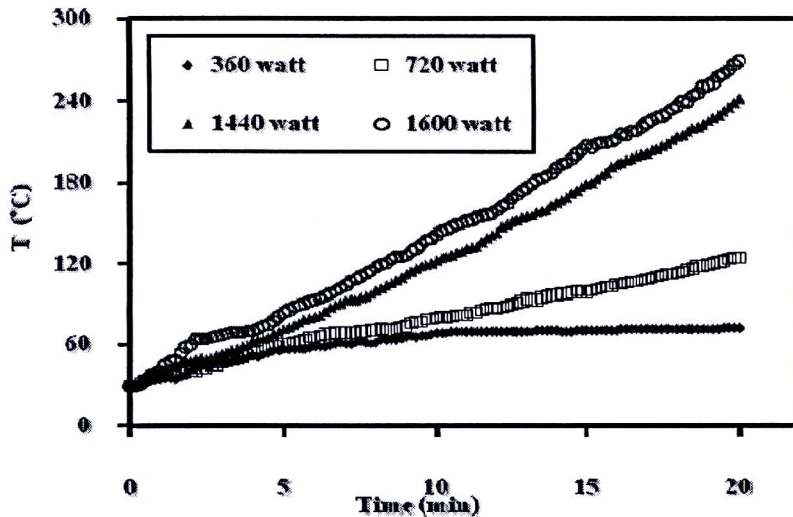
การเปรียบเทียบผลของการเติมและไม่เติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็ค 0.1 phr ต่ออุณหภูมิของยางธรรมชาติที่กำลังวัตต์ของเครื่องไมโครเวฟคงที่ 1440 W โดยอุณหภูมิของยางที่เวลาต่างๆ นั้นสามารถวัดได้ด้วยการใช้เทอร์โมคัปเปิลสอดเข้าไปในเครื่องไมโครเวฟโดยให้สัมผัสกับสารละลายยางที่เตรียมเป็นฟิล์มบางเคลือบบนแผ่นสไลด์ แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าการเติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็คลงในยางธรรมชาติ นั้นมีผลทำให้อุณหภูมิของยางธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของยางธรรมชาติมากกว่าการไม่เติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็ค ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [2-4] เนื่องจากความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่กระตุ้นอนุภาคของอะเซทิลีนแบล็คที่ในยางธรรมชาติ ทำให้เกิดการสั่นของอนุภาคอะเซทิลีนแบล็คในโมเลกุลของยางธรรมชาติ



รูปที่ 4 อุณหภูมิของยางธรรมชาติเปรียบเทียบระหว่างการเติมและไม่เติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็ค

จากการทดลองข้างต้นนั้นทำให้ยืนยันได้ว่าการเติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็คช่วยเพิ่มอุณหภูมิของยางธรรมชาติมากกว่าการไม่เติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็คซึ่งการทดลองดังกล่าวได้ทดลองที่เวลาต่าง ๆ กำลังวัตต์คงที่ 1440 W จึงได้ทำการศึกษาต่อถึงผลของการเติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็คต่ออุณหภูมิที่กำลังวัตต์ของเครื่องไมโครเวฟอื่นๆ ซึ่งผลการทดลองแสดงไคดังรูปที่ 5 จากกราฟพบว่าพบว่ามีเวลาและกำลังของเครื่องไมโครเวฟเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของยางธรรมชาติก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

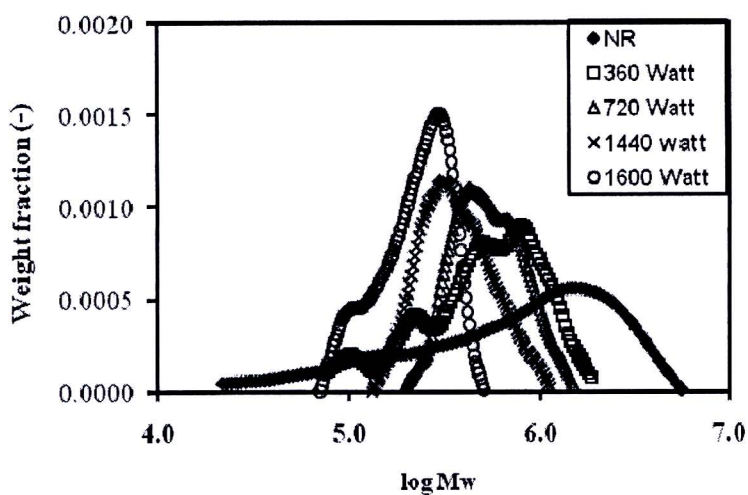




รูปที่ 5 อุณหภูมิของยางธรรมชาติที่เติมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็กคองที่ 0.1 phr ที่กำลังวัตต์ๆ

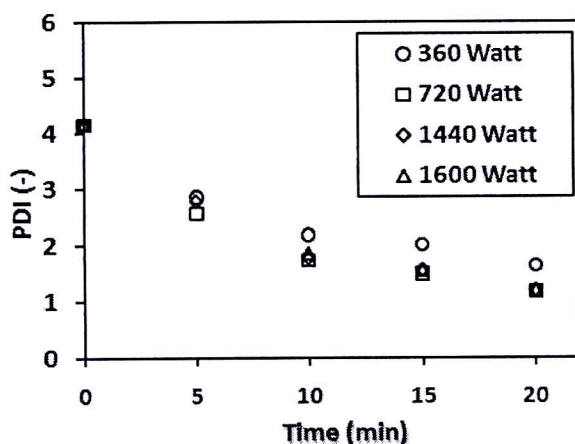
3.3 ผลของกำลังวัตต์ต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการเหนี่ยวนำอนุภาคอะเซทิลีนแบล็กให้เกิดสั่นภายใน โมเลกุลของยางธรรมชาติและทำให้เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนของโมเลกุลยาง ส่งผลให้เกิดการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ที่ปริมาณอะเซทิลีนแบล็กคองที่ 0.1 phr และระยะเวลาในการเหนี่ยวนำคองที่ 20 นาที พบว่าที่ กำลังวัตต์ต่ำการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเป็นลักษณะการกระจายที่กว้าง เมื่อเพิ่มกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายตัวแบบผสม (Polydispersity) มีแนวโน้มลดลง แสดงได้ดังรูปที่ 6 เมื่อเพิ่มกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงเลื่อนไปทางด้านซ้ายและลักษณะการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบลง



รูปที่ 6 GPC โครมาโทแกรมแสดงผลของกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟต่อการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติที่ระยะเวลาในการเหนี่ยวนำ 15 นาที

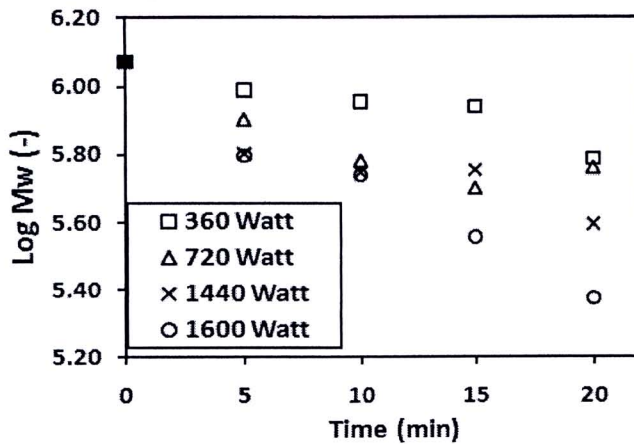
เมื่อพิจารณาค่าการกระจายตัวแบบผสม (Polydispersity, PDI) ของยางธรรมชาติเพื่ออธิบายถึงระดับความแตกต่างของความยาวสายโซ่ของยางธรรมชาติ ในการทดลองนี้จะศึกษาผลของกำลังไมโครเวฟต่อค่าการกระจายตัวแบบผสมของยางธรรมชาติที่แปรเปลี่ยนตามระยะเวลาการเหนี่ยวนำ 5-20 นาที ดังรูปที่ 7 พบว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการลดน้ำหนักนั้นจะมีค่าการกระจายตัวแบบผสมเท่ากับ 4.16 เมื่อนำยางธรรมชาติที่มอลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยการเหนี่ยวนำด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยการเพิ่มกำลังของเตาไมโครเวฟนั้นจะส่งผลให้มีค่าการกระจายตัวแบบผสมของยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลง โดยที่กำลังของเตาไมโครเวฟ 1600 W นั้นค่าการกระจายตัวแบบผสมของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลแล้วจะมีค่าเท่า 1.18 ซึ่งข้อมูลนี้จะสอดคล้องกับการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่ได้อธิบายในข้างต้นว่า เมื่อเพิ่มกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟนั้นส่งผลให้ลักษณะการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลแคบลงทำให้ค่าการกระจายตัวแบบผสมลดลง



รูปที่ 7 ผลของกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟต่อค่าการกระจายตัวแบบผสมของยางธรรมชาติ

3.4 ผลของเวลาในการเหนี่ยวนำต่อการลดน้ำหนักโมเลกุลยางธรรมชาติ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการเหนี่ยวนำอนุภาคอะเซทิลีนแบล็คที่ผสมอนุภาคอะเซทิลีนแบล็คที่ปริมาณคงที่ 0.1 phr โดยใช้กำลังวัตต์ของเครื่องไมโครเวฟที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 8 พบว่าที่กำลังของเตาไมโครเวฟคงที่ 360 W นั้นการเพิ่มระยะเวลาการเหนี่ยวนำที่ไม่ส่งผลต่อการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ เมื่อที่กำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟสูงกว่า 360 W พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการเหนี่ยวนำขึ้นส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลและค่าการกระจายตัวแบบผสมของยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วโดยที่กำลังของเตาไมโครเวฟคงที่ 1600 W และระยะเวลาการเหนี่ยวนำคงที่ 20 นาทีสามารถลดน้ำหนักโมเลกุลเหลือ 2.37×10^5 g/mol จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มกำลังวัตต์ของเตาไมโครเวฟนั้นจะส่งผลต่อการลดระยะเวลาในการเหนี่ยวนำลง



รูปที่ 8 ผลของระยะเวลาในการเหนี่ยวนำต่อการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการแตกสลายของโมเลกุลยางธรรมชาติ

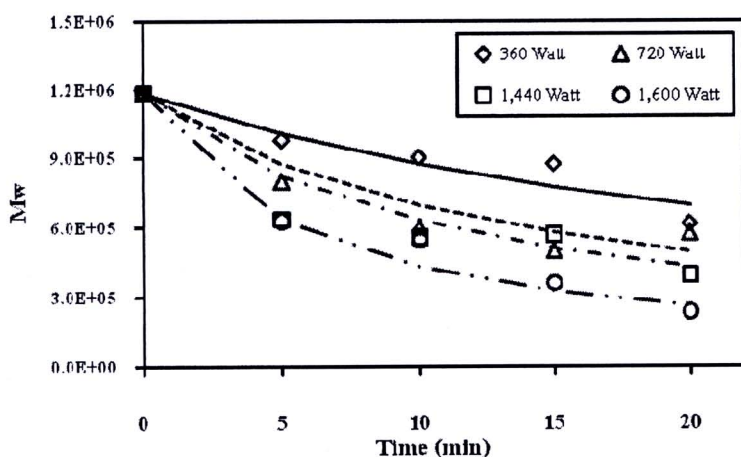
จลนพลศาสตร์การแตกสลายเชิงความร้อนของยางธรรมชาติได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ขององศาการเกิดพอลิเมอร์ที่เวลาเริ่มต้น $DP_w(t_0)$ และที่เวลาใดๆ $DP_w(t)$ เทียบกับเวลา t ดังสมการที่ 1 [7]

$$\left(\frac{1}{DP_w(t)} - \frac{1}{DP_w(t_0)} \right) = kt \quad (1)$$

จากการคำนวณหาค่าคงที่อัตรา (k) ของการแตกสลายเชิงความร้อนของยางธรรมชาติโดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/DP_w(t) - 1/DP_w(t_0)$ เทียบกับเวลา (t) ด้วยเทคนิคกฎอัตรารูปอินทิเกรตได้กราฟเป็นเส้นตรงแสดงว่า ค่าปฏิกิริยาเป็นแบบอันดับสองและค่าคงที่อัตราจากความชันของกราฟจะทำให้ได้ข้อมูลค่าคงที่อัตราที่กำลังของไมโครเวฟต่าง แสดงดังในตารางที่ 1 ซึ่งค่าคงที่อัตราจะเพิ่มขึ้นตามกำลังของเครื่องไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่าคงที่อัตราไปแทนในสมการที่ 1 เพื่อใช้ความสัมพันธ์นี้อธิบายพฤติกรรมของการแตกสลายเชิงความร้อนของยางธรรมชาติเทียบกับการทดลองการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยกระบวนการสลายตัวเชิงความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำด้วยคลื่นไมโครเวฟสามารถแสดงในรูปที่ 9 พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ 1 สามารถอธิบายการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในงานวิจัยนี้ได้

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราที่กำลังวัตต์ต่างๆ

กำลังของเครื่องไมโครเวฟ (Watt)	ค่าคงที่อัตรา (min ⁻¹)
360	2.14×10^{-6}
720	4.08×10^{-6}
1,440	5.48×10^{-6}
1,600	9.96×10^{-6}

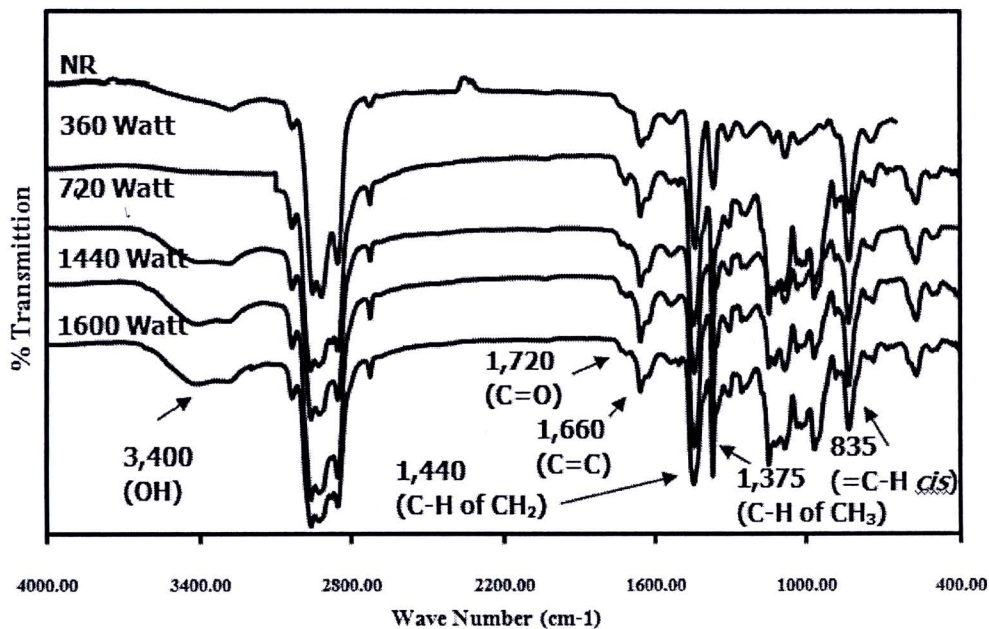


รูปที่ 9 แบบจำลองอธิบายความสามารถในการลดน้ำหนักโมเลกุลที่กำลังวัตต์ต่างๆ

3.6 การศึกษาผลของการลดน้ำหนักโมเลกุลโดยการเหนี่ยวนำด้วยไมโครเวฟที่มีต่อหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติโดยใช้เครื่อง FTIR

หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟ แสดงในรูปที่ 10 พบว่าการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆกัน ไม่มีผลต่อหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ ลักษณะพีคของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยคลื่นไมโครเวฟให้ผลที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการลดน้ำหนักโมเลกุล ส่วนที่แตกต่างปรากฏให้เห็นได้ไม่ชัดเจนนักที่เลขคลื่นเท่ากับ $1,766$ และ $3,435$ cm^{-1} เป็นหมู่ฟังก์ชัน

คาร์บอนิล (C=O) และไฮดรอกซิล (O-H) ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากการทดลองนั้นมียอกซิเจนเหลืออยู่ ถึงแม้ว่าในการทดลองจะทำในบรรยากาศแก๊สเฉื่อยแล้วก็ตามส่งผลให้ออกซิเจนในบรรยากาศสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติในตำแหน่งพันธะคู่กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล [7] ในผลิตภัณฑ์ แต่ก็มีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันหลักอื่นๆ นั่นแสดงว่าลักษณะ โครงสร้าง โมเลกุลของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยไมโครเวฟไม่มีความแตกต่างกันกับยางธรรมชาติดั้งเดิม แต่มีสายโซ่ที่สั้นกว่า



รูปที่ 10 FTIR สเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างๆ