

การทดลองการอุณหภูมิตามธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟโดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม

งานวิจัยที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการทำความร้อนโดยใช้ระบบไมโครเวฟในยางธรรมชาติคอมพาวด์ยังมีอยู่ค่อนข้างน้อย ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการทำความร้อนโดยใช้ระบบไมโครเวฟในยางคอมพาวด์หรือยางรีเครม ซึ่งมีส่วนผสมของยางสังเคราะห์รวมอยู่ด้วย เนื่องจากโมเลกุลของยางสังเคราะห์เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว (polar) ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานไมโครเวฟ การเกิดความร้อนจึงเกิดขึ้นได้ง่ายและเร็วกว่า ดังเช่นที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ในส่วนงานวิจัยของ [2-2] - [2-5] , [2-9] งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นส่วนใหญ่ใช้ระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในแบบสายพานลำเลียงหรือแบบที่ใช้ในครัวเรือนเป็นอุปกรณ์ทดลอง ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นอุปกรณ์แบบคลื่นโหมดผสม (Multi mode) การทำความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางความร้อนของตัววัสดุทำได้ค่อนข้างยาก ซับซ้อน การจะนำไปทำการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีก็ทำได้ยากกว่าคลื่นโหมดเดี่ยว (Single mode) ส่วนงานวิจัยของ Paiphansiri et al. [4-1] ได้ทำการศึกษาการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางสกี (ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำน้ำยางข้นโดยวิธีปั่นเหวี่ยง) โดยใช้กัมมะถันและเปอร์ออกไซด์เป็นสารวัลคาไนซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับพรีวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์พบว่า อัตราการบวมตัวของแผ่นฟิล์มที่ได้จากยางสกีที่พรีวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันต่ำกว่า หลังจากนั้นก็ทำการเตรียมอนุภาคของยางธรรมชาติร่วมกับยางสกีที่พรีวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันโดยใช้สารช่วยในการจับตัวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว (heterocoagulation) เป็นตัวช่วยให้ PEO (สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีไอออน) ดูดซับอนุภาคของยางสกีที่พรีวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถัน และสารลดแรงตึงผิวดังเดิมบนอนุภาคยางธรรมชาติ ค่าเซต้า (zeta) ที่แฝงอยู่ในอนุภาคของสารช่วยในการจับตัวไม่เป็นเนื้อเดียวและความต้านทานต่อน้ำมันที่ดีกว่าของฟิล์มจากน้ำยางคอมโพสิตเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มยางธรรมชาติแสดงให้เห็นโครงสร้างของยางธรรมชาติร่วมกับยางสกีที่ พรีวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถัน Kurien et al. [4-2] การใช้สารตัวเร่งสองชนิดเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการวัลคาไนซ์ยางซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้สารตัวเร่งแค่ตัวเดียว การใช้สารตัวเร่งกลุ่มไทอูเรีย เช่น TMTD, MBTS และ CBS ในระบบสารตัวเร่งสองชนิดทำให้เกิดพันธะ S-S, S-C หรือ S-N ซึ่งแสดงให้เห็นกลไกการเกิดปฏิกิริยานิวคลีโอฟิลิก (nucleophilic) ในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์นี้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่

มีผลสรุปยืนยันเกี่ยวกับกลไกนี้ สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากอนุพันธ์ของไทยูเรียที่มีชื่อว่าอะมิไดโนไทยูเรีย (ATU) ที่ถูกใช้เป็นสารตัวเร่งทุติยภูมิร่วมกับ TMTD, MBTS หรือ CBS ในระบบการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยกำมะถัน ซึ่งพอจะประเมินค่าถึงเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองที่แตกต่างกันกับสูตรอ้างอิง การศึกษานี้จะช่วยสนับสนุนกลไกการเกิดปฏิกิริยานิวคลีโอฟิลิกในกระบวนการวัลคาไนซ์ สำหรับการศึกษาการใช้สารตัวเร่งสองชนิดนี้จะทำการพิจารณาแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของ ATU ให้แตกต่างจากสารตัวเร่งปฐมภูมิและต้องหาปริมาณของ ATU ที่เหมาะสมด้วย ลักษณะการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงรายละเอียดของค่าการทนแรงดึง และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ของส่วนผสมที่ต่างกัน Peethambaran et al. [4-3] ได้ทำการศึกษาผลของการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางคอมพาวด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยระบบทั่วไปและระบบประสิทธิภาพที่มีต่อสมบัติในกระบวนการผลิตและโครงสร้างตาข่ายสำหรับผลิตเป็น latex thread โดยทำการศึกษาลงจากการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 70°C ผลของรูปแบบการเชื่อมโยง (crosslink) และช่วงเวลาในการให้ความร้อนที่ต่างกัน ผลที่ได้พบว่าระบบการวัลคาไนซ์ที่ทำการศึกษาส่งผลต่อรูปแบบการเชื่อมโยง (crosslink) ในระหว่างกระบวนการพรีวัลคาไนซ์ โครงสร้างตาข่ายของยางวัลคาไนซ์พบว่ามีปริมาณโพลีซัลฟิดิก (polysulphidic) สูงเท่ากับการเพิ่มช่วงของการพรีวัลคาไนซ์น้ำยางคอมพาวด์ผลที่ได้ทำให้ทราบว่าช่วงของการพรีวัลคาไนซ์มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของ latex thread ที่มีการบ่มแรงและไม่บ่มแรง Ascroft et al. [4-4] ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสารเคมีที่ให้กำมะถัน (sulfur donor) 5 ชนิด ได้แก่ TMTD, TisoPPD, DMDS, DisoPXD และ DisoPTD กับสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กับยางธรรมชาติ (ที่มีซิงค์ออกไซด์และกรดลอริก) ส่วนใหญ่ระบบการใช้สารเคมีที่ให้กำมะถันร่วมกันสองชนิดต้องยึด TMTD/ DMDS และ DisoPPD /DMDS เป็นหลัก นอกจากนี้คอมพาวด์ที่สนใจกันส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของ DisoPPD และ DMDS ซึ่งจะเกิดการบวมน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสารกลุ่มไทยูเรม มีการวิเคราะห์ถึงผลการทำงานร่วมกันและผลต่อการเกิดการเชื่อมโยง (crosslink) Ong et al. [4-5] ได้นำเสนอผลที่ได้จากทดลองซึ่งศึกษาถึงผลจากสมบัติของวัสดุและกระบวนการในการวัลคาไนซ์ที่ต่างกัน ที่มีต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์ โดยนำเสนอสูตรที่ดีที่สุดที่ใช้ quinoid ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ การวัลคาไนซ์ด้วย quinoid ทำให้ค่าโมดูลัสของยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์หลังจากการบ่มแรงแล้วไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้โครงสร้างพันธะแบบตาข่ายต้านทานความร้อน สมบัติการทนแรงดึงที่ดีเป็นตัวชี้ชัดของการเกิดผลึกเนื่องจากการดึง การวัลคาไนซ์ด้วย quinoid ไม่ช่วยให้ค่าการทนแรงดึงของยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์สูงเท่ากับการใช้กำมะถันทั้งในยางธรรมชาติและยางบิวทิล John et al. [4-6] ได้ทำการศึกษาการเตรียมยาง

ธรรมชาติที่สามารถนำพลังงานได้โดยการใช้โพลิอะนิลีน (Pani) โดยเตรียมให้อยู่ในรูปของผงแบ่ง
 ยางธรรมชาติที่ใช้จะอยู่ในรูปของน้ำยางนำมาทำการโพลิเมอไรเซชันกันอะนิลีน สมบัติไดอิเล็กตริก
 กวัดโดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์คนาไลเซอร์ รุ่น HP8510 ใช้ช่วงความถี่ในการวัดตั้งแต่ 2-4 GHz.
 สำหรับสมบัติทางความร้อนใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกและเครื่อง DSC ในการวิเคราะห์
 Gonzales et al. [4-7] ทำการศึกษาการใช้ CBS เป็นสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วย
 กำมะถัน โดยระบบวัลคาไนซ์ที่ใช้จะใช้แบบทั่วไป (conventional) และระบบประสิทธิภาพ
 (efficient) ผลการทดลองที่ได้จะนำเสนอในรูปแบบของ allylic hydrogen และกลไกการเกิดการ
 เชื่อมโยงที่มีการเติมลงไปในพื้นที่พันธะคู่ ปฏิกิริยาการเติมจะช่วยให้ปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันระหว่าง
 พันธะคู่ข้างเคียงเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายที่ไม่เหมือนกัน ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ
 ของยางวัลคาไนซ์ งานวิจัยของ [4-1] - [4-7] ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสารเคมีที่ใช้เป็นผสม
 ของยางคอมพาวด์ เช่น สารตัวเร่ง ระบบการวัลคาไนซ์ ที่ใช้เป็นส่วนผสมในยางคอมพาวด์ ซึ่ง
 การศึกษาส่วนใหญ่ผลที่ได้จะเกี่ยวข้องกับสารเคมีแต่ละชนิดที่มีต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์
 สมบัติทางกายภาพ หรือแม้แต่สมบัติไดอิเล็กตริก

งานวิจัยในบทนี้เป็นการศึกษาการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยไมโครเวฟโดยใช้
 ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode: TE_{10}) โครงสร้างของตัวเครื่อง
 ประกอบด้วย แมกนีตรอนซึ่งแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz.)
 สามารถแปรเปลี่ยนกำลังไมโครเวฟได้ตั้งแต่ 0-1,500 วัตต์ คลื่นที่เกิดขึ้นภายในโพรง (cavity) หรือ
 บริเวณที่ใส่ชิ้นงานเป็นแบบคลื่นโหมดเดียว (single mode) ซึ่งเป็นคลื่นที่ไม่ซับซ้อน โดยศึกษาทั้ง
 ในส่วนของสมบัติทางความร้อน ได้แก่ สมบัติไดอิเล็กตริก และลักษณะการถ่ายเทความร้อน
 รวมถึงการศึกษาในส่วนโครงสร้างทางเคมีซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการวัลคาไนซ์ โดยจะ
 ทำการตรวจดูการเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่ายแบบสามมิติ (3D-network) ในยางธรรมชาติ
 คอมพาวด์ที่ทำการอุ่นให้ร้อนด้วยไมโครเวฟ ตัวแปรในการศึกษา คือ กำลังไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไป
 ในชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ ความหนาของชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ และองค์ประกอบของ
 ส่วนผสมยางธรรมชาติคอมพาวด์ ในส่วนขององค์ประกอบของส่วนผสมยางธรรมชาติคอมพาว
 วด์จะทำการแปรเปลี่ยนปริมาณของกำมะถันที่เติมลงไปในแต่ละสูตร นอกจากนี้ยังมีการเติมเขม่า
 ดำเพิ่มลงไปเพื่อศึกษาค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ได้เปรียบเทียบกับยาง
 ธรรมชาติคอมพาวด์ที่ไม่เติมเขม่าดำ

4.1 หลักการพื้นฐาน

หลักการทำงานของระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟต่อยางธรรมชาติคอมพาวด์ คือ การถ่ายเทพลังงานจากสนามไฟฟ้า (Electric Field, E) ไปยังโมเลกุลของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ส่งผลให้เกิดการโพลาไรซ์เพื่อทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์เกิดการมีขั้วชั่วคราว หลังจากนั้นโมเลกุลของยางธรรมชาติคอมพาวด์ก็จะเกิดการสั่นและเกิดความร้อนกระจายตามการเคลื่อนตัวของโมเลกุลภายในตัวยางธรรมชาติคอมพาวด์ หลังจากนั้นก็จะเกิดการแผ่กระจายของพลังงานไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิในตัวยางธรรมชาติคอมพาวด์มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่ายแบบสามมิติ (3D-network) ในยางธรรมชาติคอมพาวด์ ซึ่งการเชื่อมโยงโครงสร้างตาข่ายแบบสามมิติ (3D-network) ในยางธรรมชาติคอมพาวด์จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของกำมะถันที่เติมลงไปและพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วย (ความร้อนที่ตัวยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้รับต้องเหมาะสมในการทำให้เกิดการเชื่อมโยง)

4.2 ระเบียบวิธีวิจัย

4.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- ยางแท่ง STR 20
- Vulcanizing agent
- Accelerator
- Activator
- Filler (Carbon black)

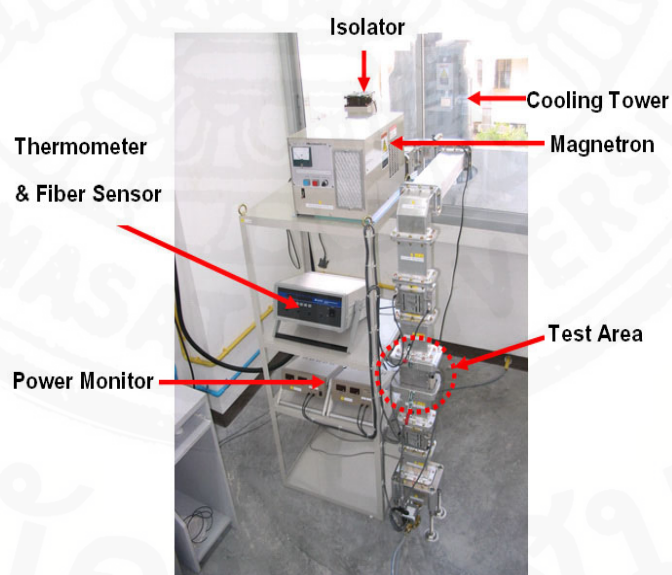
ในการเตรียมขึ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์นั้นจะต้องทำการบดยางแท่งให้ نرم ก่อน เพื่อให้สารเคมีที่จะเติมลงไปสามารถละลายได้ โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) อุณหภูมิในการผสมประมาณ 70°C เมื่อยางเริ่มอ่อนตัวก็ให้เติมสารเคมีตามสัดส่วนและตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.1 ในการผสมต้องพยายามผสมโดยใช้เวลาน้อยที่สุดและต้องให้สารเคมีกระจายตัวให้ดีด้วย หลังจากใส่กำมะถันลงไปแล้วต้องรีบผสมให้เร็วที่สุดเพราะหากใช้เวลานานอาจทำให้ยางเกิดการ scorch (การคงรูปก่อนกำหนดยางคงรูปที่ได้มีสมบัติแข็งกลไม่ดี) ได้ หลังจากนั้นนำยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ผสมได้ไปอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์โดยใช้อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปประมาณ 70°C

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรต่าง ๆ

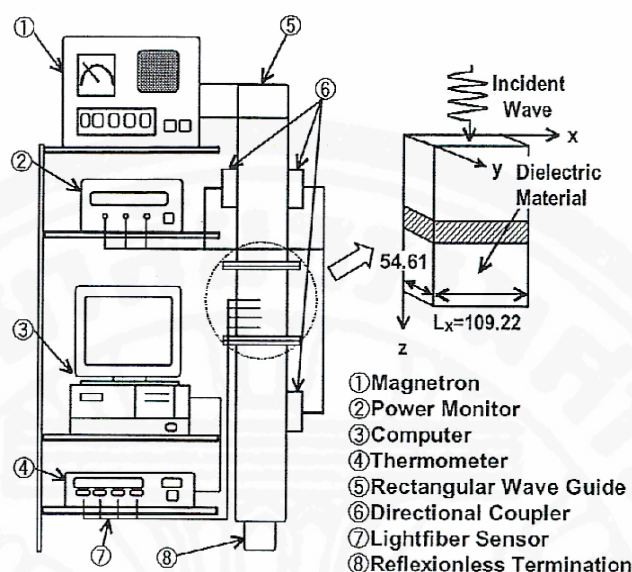
วัตถุดิบ	สูตรที่			
	1	2	3	4
NR	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1
MBTS	0.8	0.8	0.8	0.8
DPG	0.2	0.2	0.2	0.2
Carbon black	10	10	10	10
Sulphur	1.5	2.0	2.5	3.0

4.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode:TE₁₀)



(ก) อุปกรณ์ทดลองจริง



(ข) แบบจำลองแสดงรายละเอียดเครื่อง

ภาพที่ 4.1 ระบบไมโครเวฟท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode:TE₁₀)

ภาพที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของระบบไมโครเวฟชนิดท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Mode:TE₁₀) (ก) เป็นภาพของอุปกรณ์ทดลองจริง และ(ข) แบบจำลองแสดงรายละเอียดระบบไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟที่อยู่ในท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นคลื่นโหมดเดียว (monochromatic หรือ single-mode) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีรูปแบบเป็น TE₁₀ mode (transverse electric wave) ซึ่งง่ายต่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์ สามารถผลิตคลื่นไมโครเวฟได้หนึ่งย่านความถี่คือ 2.45 GHz คลื่นไมโครเวฟดังกล่าวกำเนิดจากแมกนีตรอน (Micro Denshi Co., model UM-1500) และเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างภายในท่อนำคลื่นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดภายในเท่ากับ 109.22 มม. x 54.61 มม. ตามทิศทางในแนวแกน z โดยมีน้ำดูดซับคลื่นหรือพลังงานที่เหลือทั้งหมดบริเวณขอบเขตด้านล่าง (lower absorbing boundary) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟไปสู่วัสดุทดสอบ นอกจากนั้นยังมีไอโซเลเตอร์ (isolator) เป็นตัวดักคลื่นไมโครเวฟที่สะท้อนจากวัสดุทดสอบบริเวณขอบเขตด้านบน (upper absorbing boundary) เพื่อป้องกันความเสียหายของแมกนีตรอน กำลังไมโครเวฟของไมโครเวฟที่ออกจากแมกนีตรอนสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0-1,500 วัตต์ การวัดค่ากำลังไมโครเวฟคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่าน ของวัสดุทดสอบภายในท่อนำคลื่นสามารถวัดได้โดยวัตต์มิเตอร์ (Micro Denshi Co., model DR-500)

ในระหว่างการทดลองอุณหภูมิวัสดุทดลองสามารถวัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ใยแก้วนำแสง (Luxtron fluoptic thermometer model 790 (accurate to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)) และค่าอุณหภูมิที่

ได้จากเทอร์โมมิเตอร์โดยแก้วนำแสงจะถูกบันทึกข้อมูลลงเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ที่เชื่อมต่อข้อมูลกับเทอร์โมมิเตอร์ทันที

ตัวอย่างชิ้นทดสอบที่นำมาให้ความร้อน คือยางธรรมชาติคอมพาวด์ขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 107 มม. x 52 มม. ที่ความหนา 1, 2 และ 3 มม. ภาชนะบรรจุวัสดุทดสอบทำจากโพลีโพรพิลีน (polypropylene) หนา 1 มม. เมื่อบรรจุลงบริเวณทำความร้อนภายในท่อนำคลื่นของเครื่องไมโครเวฟท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะมีขนาดพอดีกับพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่น (109.22 มม. x 54.61 มม.)

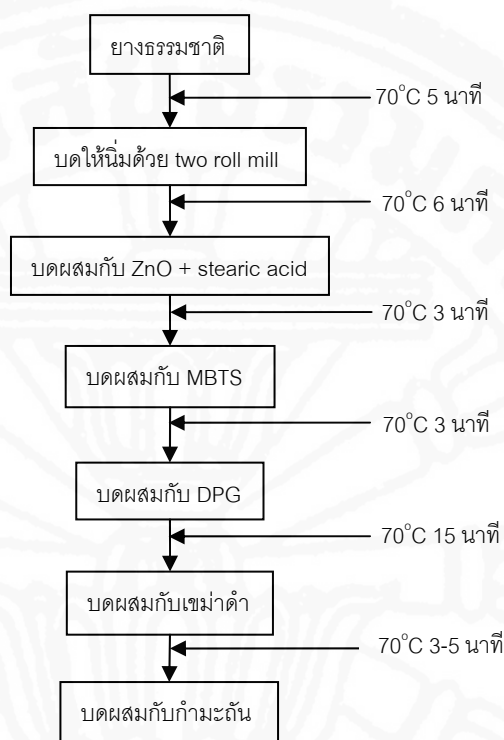
2) เครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill machine)



ภาพที่ 4.2 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

เนื่องจากยางดิบไม่สามารถนำไปใช้งานตามลำพังได้ จำเป็นต้องมีการผสมกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน สารกระตุ้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตัวเติม เป็นต้น ยางธรรมชาติคอมพาวด์ (Natural rubber-compound) ได้จากการนำยางดิบมาทำการบดให้นิ่มเพราะยางธรรมชาติมีความเหนียวและความหนืดสูงมากยากที่สารเคมีต่าง ๆ จะสามารถกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ การบดยางจึงถือเป็นการลดความหนืดของยางโดยการตัดโมเลกุลของยาง (ลดน้ำหนักโมเลกุล) ด้วยกระบวนการเชิงกล นั่นคืออาศัยแรงเฉือนของลูกกลิ้งในเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ขั้นตอนนี้เรียกว่า "มาสติเคชัน (mastication)" การบดยางที่อุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพการบดที่ดีเนื่องจากยางจะมีความหนืดสูงส่งผลทำให้เกิดแรงเฉือนสูง โมเลกุลยางฉีกขาดได้ดี การบดยางที่ใช้เวลานานเกินไปจะทำให้ยางอ่อนเกินไป ไม่สามารถรับสารตัวเติมในปริมาณมากได้ ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติยางคงรูป ดังนั้นจึงควรใช้เวลาในการบดยางเท่าที่จำเป็น (ใช้เวลาให้สั้นที่สุด)

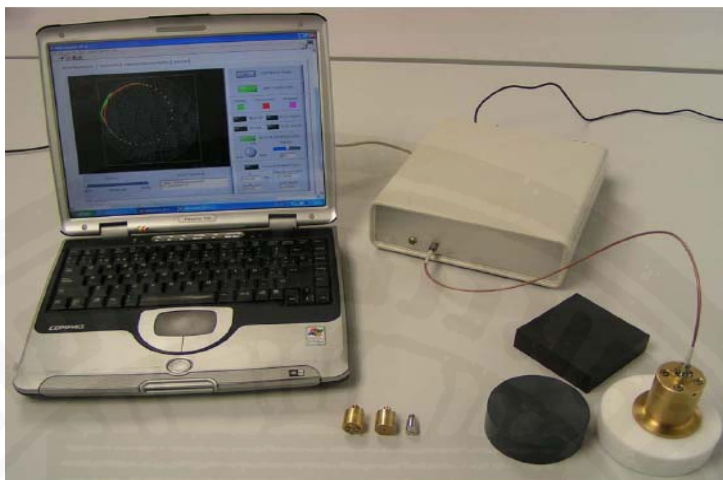
เท่าที่จะทำได้) เพราะนอกจากจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติที่ดีแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย ขั้นตอนการผสมแสดงดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ขั้นตอนการผสมยางธรรมชาติคอมพาวด์

3) เครื่องเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network Analyzer)

สมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ เพราะสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นการรู้ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกในวัสดุที่ต้องการทำความร้อนด้วยระบบไมโครเวฟจึงจำเป็นอย่างยิ่ง ภาพที่ 4.3 แสดงเครื่องเน็ตเวิร์คอะนาไลเซอร์ (Network Analyzer) โดยแบ่งออกเป็นสองส่วน คือในส่วนของตัวเครื่องมือวัด ซึ่งประกอบด้วย ตัวปล่อยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave reflectometer) สายส่งคลื่น (Coaxial cable) และหัววัด (Coaxial cavity) ส่วนที่สองคือส่วนของตัวซอฟต์แวร์ที่ถูกเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ มีหน้าที่ประมวลผลและแสดงค่าสมบัติไดอิเล็กตริก



ภาพที่ 4.4 เครื่องเน็ตเวิร์คออนไลน์เซอร์ (Network Analyzer)

4) เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างโพลิเมอร์ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)



ภาพที่ 4.5 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

โดยทั่วไปเทคนิคสเปกโทรสโกปีมักใช้หลักการการกระจายแสง (dispersion) ของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่สนใจเป็นตัวกำหนด บันทึกผลค่าความเข้มของแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น หรือ Wave number ซึ่งได้ออกมาเป็นสเปกตรัมเรียกว่า Frequency – Domain Spectrum แต่ถ้าใช้วิธีการวัดความเข้มของแสง หรือกำลังของแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

กันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกว่า Time – Domain Spectrum หรือโดยทั่วไปเรียกว่า Fourier Transform Spectroscopy จากนั้น Time – Domain Spectrum จะถูกเปลี่ยนเป็น Frequency – Domain Spectrum ด้วย Fourier Transform จากการใช้ดิฟิรอลคอมพิวเตอรส์ สิ่งทีสเปกตรัมทั้งสองแตกต่างกันก็คือ Frequency – Domain Spectrum เป็นสเปกตรัมทีได้จากการวัดการดูดกลืนแสงทีความถี่ต่าง ๆ กันทีละครั้งในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่ Fourier Transform Spectroscopy ได้จากการวัดการดูดกลืนทีความถี่ต่าง ๆ กัน พร้อมกันทั้งหมดดั่งนั้น Fourier Transform จึงทำให้เกิดการวิเคราะห์ทีรวดเร็วขึ้น การแยก (Resolution) ก็ดีขึ้น หรือเป็นการทำให้ Signal to noise ratio ดีขึ้นกว่าวิธีธรรมดา ข้อดีของการใช้เทคนิค Fourier Transform ทีเห็นได้ชัดก็คือ ช่วยให้การวิเคราะห์หรือการวัดสเปกตรัมของสารตัวอย่างทำได้รวดเร็วกว่าเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ธรรมดาหลายเท่า เพราะการวัดด้วยเครื่องธรรมดาจะเป็นการวัดแบบทีละความถี่ แต่ FTIR วัดความถี่ต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง (Simultaneously) เรียกว่า Fellgetts Advantage สามารถใช้ circular entrance aperture แทน entrance slit ได้ ทำให้ได้กำลังแสงสูงขึ้นเรียกว่า Jacquinot's Advantage และยังช่วยให้การแยกและความถูกต้องดีขึ้น ประการสุดท้าย FTIR ช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายและสะดวกขึ้นด้วยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมและทำงาน ข้อเสียทีสำคัญก็คือ FTIR เป็นเครื่องทีมีราคาแพงและต้องเสียค่าทะนุบำรุงสูง ต้องอยู่ในห้องควบคุมความชื้นตลอดเวลา

4.2.3 วิธีการทดลอง

1) หาค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) เริ่มจากการผสมยางธรรมชาติคอมพาวด์ตามตารางที 4.1 โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งหลังจากนั้นนำมาอัดขึ้นรูปใช้อุณหภูมิประมาณ 70°C นำขึ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์มาหาค่าสมบัติไดอิเล็กตริก โดยใช้เครื่อง network analyzer ทำการวัดตัวอย่างละ 5-7 ครั้ง หลังจากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยและบันทึกผลทีได้

2) ทดลองหาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ทีได้จากข้อ 1 เริ่มจากการนำยางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรต่าง ๆ มาทำการให้ความร้อนด้วยระบบไมโครเวฟทีกำลังไมโครเวฟต่าง ๆ กันเพื่อดูว่าทีกำลังไมโครเวฟต่างกันส่งผลอย่างไรบ้างต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และส่วนประกอบในยางธรรมชาติคอมพาวด์ทีต่างกันส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างไร สุดท้าย คือ ความหนาของชิ้นงานทีเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างไร

3) ตรวจดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของยางธรรมชาติคอมพาวด์จากข้อ 2 โดยนำมาหาค่าการเชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลแบบ 3-D หรือ cross-linked เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและยางธรรมชาติคอมพาวด์ทีให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดา

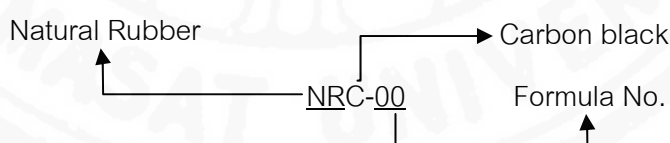
4.3 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

4.3.1 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์

ตารางที่ 4.2 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริก

ชื่อ	ค่า Dielectric constant (ϵ'_r)	ค่า Dielectric loss factor (ϵ''_r)	ค่า Loss tangent coefficient ($\tan \delta$)	Penetration depth (m.)
NR-01	2.043	0.000002	0.000001	28,535
NR-02	2.161	0.000004	0.000002	13,873
NR-03	2.017	0.000009	0.000004	7,180
NR-04	2.273	0.000004	0.000002	13,527
NRC-01	3.642	0.0287	0.0079	2.71
NRC-02	3.439	0.0183	0.0054	4.07
NRC-03	3.544	0.0338	0.0095	2.28
NRC-04	3.366	0.0142	0.0042	5.29

หมายเหตุ สัญลักษณ์ของยางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรต่าง ๆ มีความหมายดังนี้

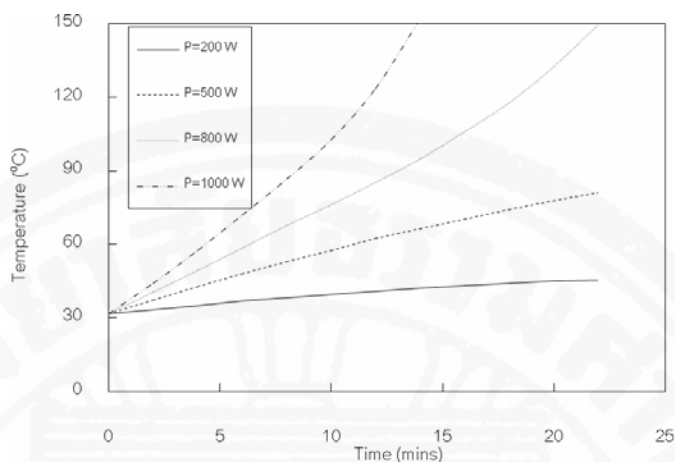


ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่วัดโดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยจะแบ่งเป็นยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำและไม่เติมเขม่าดำ ในส่วนของยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ไม่เติมเขม่าดำพบว่าค่าความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับเป็นพลังงานความร้อน ($\tan \delta$) ต่ำกว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำมาก เนื่องจากโดยปกติแล้วยางธรรมชาติเป็นวัสดุประเภทไม่มีขั้ว (non-polar) ทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ (Q) มีค่าน้อยมาก เมื่อเติมเขม่าดำลงไปยางธรรมชาติจึงส่งผลให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์กลายเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้มากขึ้น เนื่องจากตัวเขม่าดำเป็นวัสดุที่มีความเป็นขั้วสูง ความเป็นขั้วของ

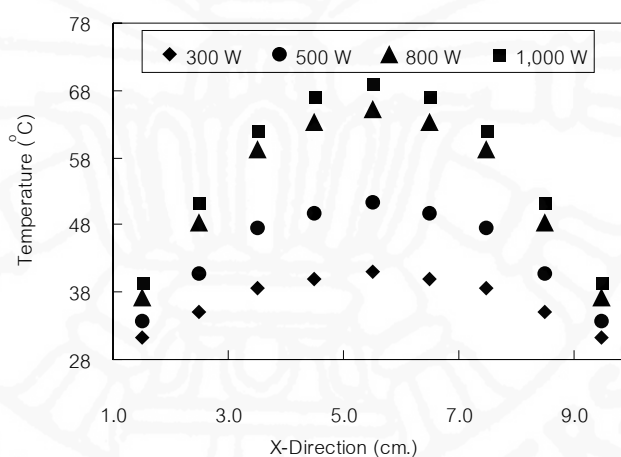
เขม่าดำมาจากการที่ผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันเคมีโดยเฉพาะหมู่ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเขม่าดำ เขม่าดำสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้เป็นอย่างดี ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้างและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น หลังจากที่มีส่วนผสมเข้าไปในยางธรรมชาติคอมพาวด์ เขม่าจะเข้าไปกระจายตัวอยู่ในเนื้อของยางธรรมชาติคอมพาวด์ เมื่อไม่ใคร่เวฟผ่านเข้าไปในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีเขม่าดำกระจายตัวอยู่ยางธรรมชาติคอมพาวด์จะสามารถดูดซับพลังงานไม่ใคร่เวฟและเปลี่ยนเป็นความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์สามารถเกิดความร้อนได้ดีจึงต้องมีการเติมเขม่าดำลงไปก่อนนำมาทำการอุ่นด้วยระบบไม่ใคร่เวฟ ส่วนค่าความลึกทะลุทะลวง (Penetration depth; D_p) คำนวณโดยใช้สมการที่ 3.23 จากตารางที่ 4.2 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าสมบัติไดอิเล็กตริก กล่าวคือ ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำจะมีค่าความลึกทะลุทะลวงสูงกว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ไม่เติมเขม่าดำ เนื่องจากค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าความลึกทะลุทะลวง (ดังสมการที่ 3.23) ดังนั้นเมื่อยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเขม่าดำมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงจึงมีค่าความลึกทะลุทะลวงสูงตามไปด้วย

4.3.2 อิทธิพลกำลังไม่ใคร่เวฟต่ออุณหภูมิภายใต้กระบวนการทำความร้อนด้วยไม่ใคร่เวฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไม่ใคร่เวฟที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิแสดงใน ภาพที่ 4.6 ภาพ (ก) พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไม่ใคร่เวฟให้กับยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีขนาดเท่ากัน อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อกำลังไม่ใคร่เวฟมากขึ้น ทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามากขึ้นส่งผลทำให้การดูดซับพลังงานไม่ใคร่เวฟมีมากขึ้นด้วยทำให้เกิดความร้อนภายใน (Q) มากขึ้น เมื่อความร้อนมากก็จะส่งผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (จากสมการที่ 3.28) ที่กำลังไม่ใคร่เวฟ 200 วัตต์อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนที่ชิ้นงานได้รับมีน้อยและมีการถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นงานด้วย ที่กำลังไม่ใคร่เวฟ 500, 800 และ 1,000 วัตต์อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมีมากขึ้นตามลำดับเนื่องจากความเข้มของสนามไฟฟ้า (E) ที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์ดูดซับพลังงานไม่ใคร่เวฟและแปลงเป็นความร้อนได้มากขึ้นตามลำดับ ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนภายในชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ยังมีค่าเท่าเดิม (เนื่องจากปริมาตรเท่าเดิม) เช่นเดียวกับในภาพ (ข) ซึ่งเป็นภาพที่แสดงให้เห็นว่ากำลังไม่ใคร่เวฟของไม่ใคร่เวฟที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในแนวแกน x ของยางธรรมชาติคอมพาวด์เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่บริเวณตรงกลางเนื่องจากคลื่นไม่ใคร่เวฟมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากที่สุดบริเวณตรงกลาง ซึ่งเป็นพฤติกรรมของคลื่นแบบโหมดเดียว



(ก) อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเทียบกับเวลาของธรรมชาติคอมพิวเตอร์ 2 หน้า 2 ซม.



(ข) อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในแนวแกน x ของยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์ 3 หน้า 1 ซม.

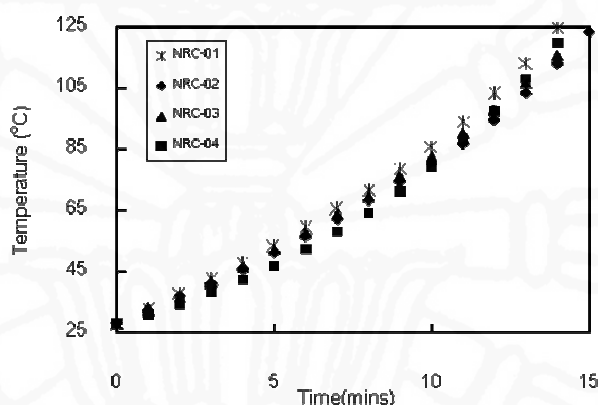
ภาพที่ 4.6 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์ที่ผสมเขม่าดำ หลังให้ความร้อนด้วยระบบไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟต่างกัน

4.3.3 อิทธิพลส่วนประกอบและความหนาของยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์

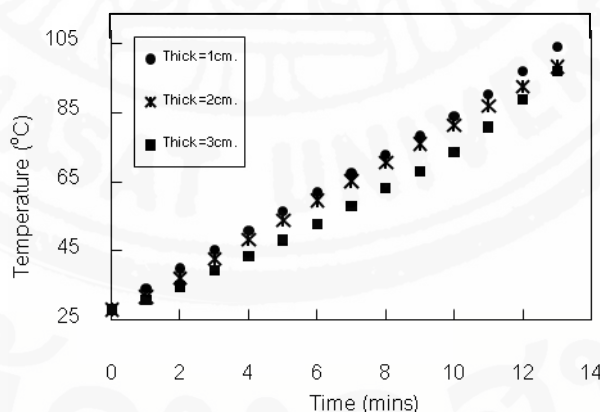
ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์กับเวลา

(ก) แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิยางธรรมชาติคอมพิวเตอร์ 4 สูตร (โดยแต่ละสูตรมีปริมาณกำมะถันต่างกัน) ที่ผ่านกระบวนการขึ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ตัวอย่างกรณีขึ้นงานหนา 3 ซม. กำลังไมโครเวฟที่ป้อน 1,000 วัตต์ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกำมะถันส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นนอกจากความเข้มของ

สนามแม่ไฟฟ้า (E) แล้วสมบัติของวัสดุหรือสมบัติไดอิเล็กตริกยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการผลิตปริมาณความร้อน (ดังสมการที่ 3.28) จากการวัดด้วยเครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) พบว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์ทั้ง 4 สูตรที่ไม่เติมเซมาดามีค่า $\tan \delta$ ใกล้เคียงกันมากจึงสามารถยืนยันได้ว่าปริมาณกำมะถันที่ต่างกันส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกและการผลิตปริมาณความร้อนน้อยมาก เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.7 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความหนาที่ต่างกัน คือ 1, 2 และ 3 ซม. พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก ที่ 1 และ 2 ซม. เวลาที่ใช้ในการเพิ่มของอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนที่ 3 ซม. ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาานกว่าแต่ก็ไม่มากเมื่อเทียบกับการใช้เวลาแบบดั้งเดิม



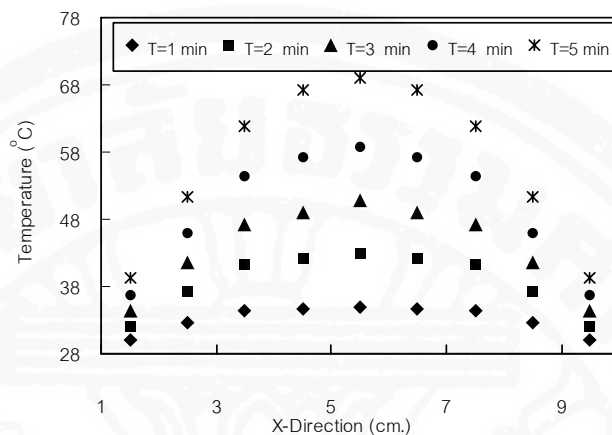
(ก) ยางธรรมชาติคอมพาวด์หนา 3 ซม. ที่สูตรต่างกัน



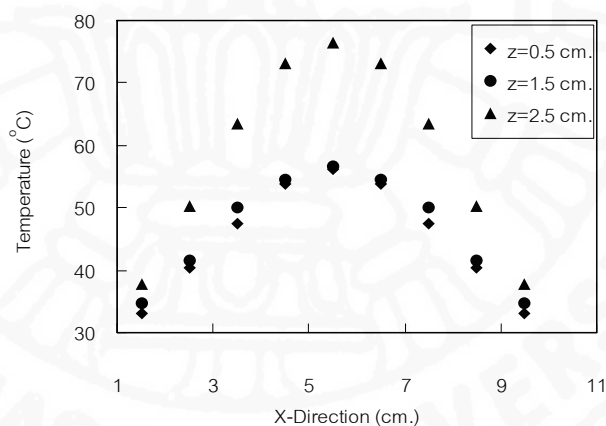
(ข) ยางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรที่ 3 ที่ความหนาต่างกัน

ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์กับเวลา ที่สูตรและความหนาต่างกันโดยใช้กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์

4.3.4 การกระจายอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์



(ก) ยางธรรมชาติคอมพาวด์หนา 1 ซม. ที่เวลาต่างกัน



(ข) ยางธรรมชาติคอมพาวด์หนา 3 ซม. ที่บริเวณต่าง ๆ กัน (วัดจากผิวด้านบน)

ภาพที่ 4.8 การกระจายอุณหภูมิของยางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรที่ 3 กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์

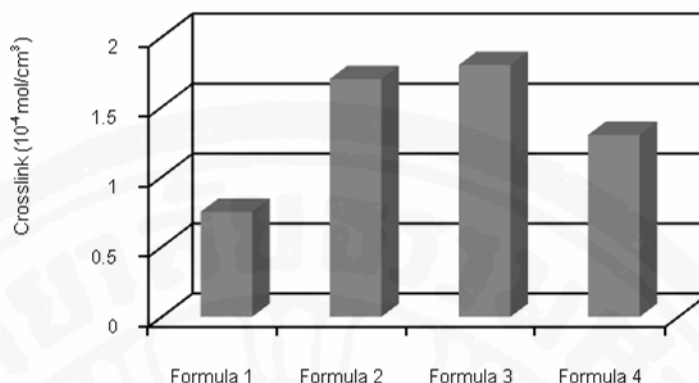
เมื่อทำการอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ ลักษณะการกระจายอุณหภูมิทั้งในแนวแกน x และแกน z แสดงดังภาพที่ 4.8 จากภาพ (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการกระจายอุณหภูมิในแนวแกน x ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องมาจากบริเวณตรงกลางของชิ้นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้รับพลังงานมากที่สุด (บริเวณตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด) ดังนั้นความร้อนจึงเกิดบริเวณตรงกลางมากที่สุดด้วยและเมื่อเวลา

ผ่านไปนานขึ้นตรงกลางจึงร้อนมากที่สุด ส่วนในภาพ (ข) พบว่าในแนวแกน z บริเวณที่ร้อนมากที่สุดคือบริเวณที่ห่างจากผิวด้านบน 2.5 ซม. เนื่องจากยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่าความลึกทะลุทะลวง (penetration depth; D_p) มากดังนั้นเมื่อขึ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ซึ่งมีความหนา น้อยกว่าค่า D_p ได้รับคลื่นไมโครเวฟ ทำให้คลื่นสามารถทะลุผ่านขึ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์ ได้แต่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขึ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์กับอากาศ คลื่นไมโครเวฟจะเกิดการ สะท้อนกลับเข้ามาในขึ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์บางส่วน ทำให้บริเวณด้านล่างของขึ้นงาน ยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้รับคลื่นมากกว่าบริเวณด้านบน บริเวณนี้จึงมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น

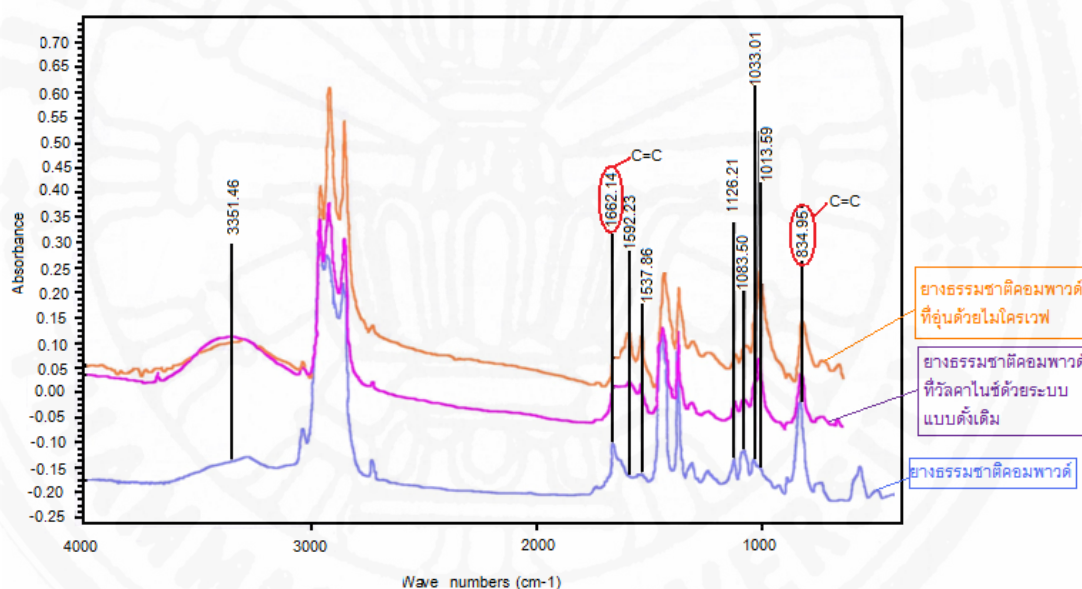
4.3.5 โครงสร้างทางเคมี

4.3.5.1 ความหนาแน่นของพันธะ (Crosslink density)

ความหนาแน่นพันธะของยางธรรมชาติ (รายละเอียดการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค) ขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถันที่เติมลงไป ปริมาณกำมะถันมากการเกิดการเชื่อมโยงก็จะมีแนวโน้ม มากตามไปด้วยดังแสดงใน ภาพที่ 4.9 เห็นได้ว่ายางธรรมชาติคอมพาวด์สูตรที่ 1, 2 และ 3 ที่มี ปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้นตามลำดับ การเกิดการเชื่อมโยงก็มีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนยางธรรมชาติ คอมพาวด์สูตรที่ 4 แม้ว่าจะมีปริมาณที่เติมลงไปมากแต่ปริมาณการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่า สูตรที่ 2 และ 3 นั้นอาจเนื่องมาจากการที่เติมปริมาณกำมะถันมากเกินไปทำให้เกิดการบลูม (Bloom) ของกำมะถันขึ้นได้ การบลูม คือ การที่มีปริมาณกำมะถันในยางคอมพาวด์มากเกินไป ทำให้กำมะถันบางส่วนแทรกตัวออกมายังบริเวณผิวของขึ้นงาน ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีการ เชื่อมโยงพันธะมากจะก็มีความแข็งแรงมาก ซึ่งต่างกับเขม่าดำกล่าวคือ แม้จะเติมเขม่าดำลงไปก็ ไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะของยางธรรมชาติคอมพาวด์แต่อย่างใด เนื่องจากการเกิด การเชื่อมโยงพันธะเกิดจากการที่กำมะถันไปสร้างพันธะกับยางธรรมชาติเท่านั้น ปกติโครงสร้าง ของยางธรรมชาติที่ยังไม่เติมสารเคมีจะมีพันธะคู่อยู่ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา เมื่อเติม กำมะถันเข้าไปรวมกับการได้รับความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟซึ่งเป็นการเกิดความร้อนเชิง ปริมาตร (volumetric heat) กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นในขึ้นงานยางธรรมชาติคอมพาวด์จะ เกิดขึ้นในระดับโมเลกุล หลังจากที่เกิดความร้อนขึ้นจากภายในแล้วก็จะกระจายออกสู่ภายนอก ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงกระจายอย่างสม่ำเสมอ การแตกพันธะคู่ออกกลายเป็นพันธะเดี่ยวเชื่อมต่อกับอะตอมของกำมะถันจึงเกิดแบบสม่ำเสมอทั่วทั้งขึ้นงาน จึงทำให้สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยง พันธะได้ดีกว่าการให้ความร้อนแบบเก่าซึ่งให้ความร้อนที่ผิวขึ้นงานเท่านั้น เราสามารถตรวจสอบ โครงสร้างทางเคมีได้โดยเทคนิคอินฟราเรด ภาพที่ 4.10 แสดง FTIR spectrum ของยางธรรมชาติ (STR20), ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบดั้งเดิมและยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อุ่น



ภาพที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงพันธะ (crosslink)



ภาพที่ 4.10 FTIR spectrum ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติคอมพาวด์

ด้วยไมโครเวฟ จากสเปกตรัมเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ (STR20) พบว่าพีคที่ความยาวคลื่น 834 cm^{-1} และ $1,662 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C ของหมู่ไอโซพรีน ในยางธรรมชาติ (STR20) สังเกตได้ว่ามีค่าการดูดซับคลื่นที่ความยาวคลื่น 834 cm^{-1} มากกว่าทั้งยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ให้ความร้อนแบบดั้งเดิมและยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่อุ่นด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาตินั้นประกอบไปด้วยหมู่ของไอโซพรีนเป็นจำนวนมาก ในขณะที่เมื่อให้ความร้อนกับยางธรรมชาติคอมพาวด์ทั้งการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมและที่อุ่นด้วยไมโครเวฟจะเห็นได้ว่าค่าการดูดซับคลื่นที่ความยาวคลื่น 834 cm^{-1} มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนโครงสร้างโมเลกุล

ของยางธรรมชาติจะทำปฏิกิริยากับกำมะถันเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลระหว่างยางธรรมชาติกับกำมะถันขึ้น ดังนั้นจากสเปกตรัมในภาพที่ 4.10 แสดงว่ามีการเกิดการเชื่อมโยงทางพันธะเกิดขึ้น

4.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถนำมาใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. พลังงานไมโครเวฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ให้เริ่มร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการวัลคาไนซ์ได้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งค่าดังกล่าวแปรผันตรงกับการเปลี่ยนแปลงกำลังไมโครเวฟที่ป้อนเข้าไป
2. พลังงานไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนในยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีความหนา มาก ๆ ได้และสามารถให้ความร้อนสม่ำเสมอทุก ๆ ความหนา
3. พลังงานไมโครเวฟสามารถทำให้การอุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์มีปริมาณการเชื่อมโยงพันธะเกิดขึ้นด้วยโดยที่อุณหภูมิดังกล่าวยังไม่ถึงอุณหภูมิการคงรูป (cure) เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีธรรมดา ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากใช้อุ่นยางธรรมชาติคอมพาวด์ได้แล้วยังสามารถใช้ในการทำให้ยางคงรูปได้อีกด้วย
4. ปริมาณกำมะถันที่เติมเข้าไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนหรืออุณหภูมิที่เกิดขึ้นน้อยมาก ๆ แต่ปริมาณกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์ ส่วนการเติมเซมาดำจะไม่ส่งผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างของยางธรรมชาติคอมพาวด์
5. การเติมเซมาดำทำให้ยางธรรมชาติคอมพาวด์มีค่า $\tan\delta$ สูงขึ้น มีผลทำให้เกิดความร้อนภายในหรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกว่ากรณีไม่เติมเซมาดำ
6. จากงานวิจัยชิ้นนี้ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เหมาะสมกับการใช้กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในการอุ่นมากที่สุดคือ ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่เติมเซมาสูตรที่ 3 หนา 3 มม. ที่กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีต่อไป