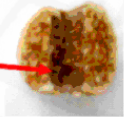
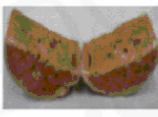
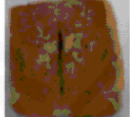
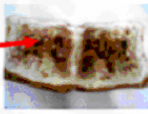
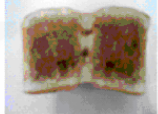
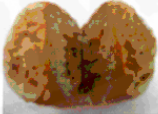
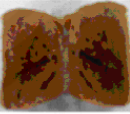
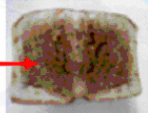
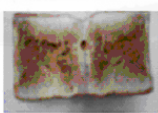
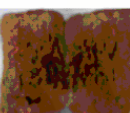


ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Review of Literature)

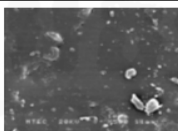
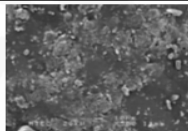
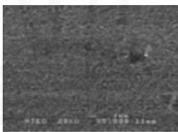
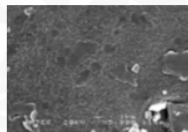
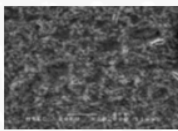
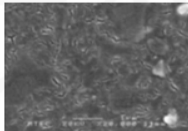
การนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้งานในยางธรรมชาติคอมพาวด์เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีผู้ศึกษาวิจัยในประเทศไทยค่อนข้างน้อย ทั้งที่ประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติและส่งออกได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก เนื่องจากผู้ที่มีความรู้เกี่ยวกับยางธรรมชาติมีอยู่น้อย นอกจากนี้ ไมโครเวฟก็ยังเป็นเรื่องใหม่สำหรับประเทศไทยในการนำไปใช้งานกับวัสดุต่าง ๆ อีกทั้งยังต้องอาศัยองค์ความรู้หลาย ๆ ด้านในการวิเคราะห์พฤติกรรม เช่น ความรู้ทางด้านการถ่ายเทมวลสารและความร้อน ความรู้ทางด้านไมโครเวฟ รวมไปถึงความรู้เกี่ยวกับยางธรรมชาติ

ที่ผ่านมากลุ่มนักวิจัยที่ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไมโครเวฟในกระบวนการทำความร้อนยางธรรมชาติ ได้แก่ ผดุงศักดิ์ และคณะ [2-1] ได้ทำการศึกษาการนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับยางพาราและอุตสาหกรรมทางด้านเซรามิกส์ โดยที่การวิจัยดังกล่าวใช้อุปกรณ์คือ เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง จากการทดลองในส่วนของการยางพาราก็พบว่าสามารถช่วยลดขั้นตอนในการรีดแผ่นยาง โดยสามารถนำยางพาราทั้งก้อนไปทำการอบได้เลยซึ่ง

จำนวนแมกนีตรอน				
ความหนา	3 ตัว	4 ตัว	7 ตัว	14 ตัว
3 ซม.				
6 ซม.				
9 ซม.				

ภาพที่ 2.1 ยางพาราหลังได้รับการอบด้วยระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงอย่างต่อเนื่อง (ผดุงศักดิ์ และคณะ [2-1])

สังเกตได้จากผลการทดลองดังภาพที่ 2.1 และยางพาราที่ได้ก็มีคุณภาพที่ดีกว่าเดิม สังเกตได้จากจัดเรียงโครงสร้างภายในของยางพาราดังภาพที่ 2.2 Matin et al. [2-2] ได้ทำการเปรียบเทียบผล

	ยางอบด้วยไมโครเวฟ	ยางแผ่นรมควัน
กำลังขยาย 500		
กำลังขยาย 5000		
กำลังขยาย 20000		

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างภายในของยางพาราระหว่างวิธีการอบด้วยระบบไมโครเวฟ
กับวิธีรมควันธรรมดา (ผดุงศักดิ์ และคณะ [2-1])

ระหว่างการใช้อิเล็กทรอนิกส์บีบเพียงอย่างเดียวกับการใช้อิเล็กทรอนิกส์บีบร่วมกับไมโครเวฟในการวัลคาไนซ์ยางคอมพาวด์ที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอินและเขม่าดำ ในงานวิจัยนี้ขึ้นทดสอบจะใช้ยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอินและเขม่าดำผสมกันแล้วนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาด $150 \times 50 \times 2 \text{ mm}^3$ ในโพลีเอทิลีนเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ แล้วนำขึ้นทดสอบไปผ่านอิเล็กทรอนิกส์บีบเปรียบเทียบกับการให้อิเล็กทรอนิกส์บีบร่วมกับไมโครเวฟ เมื่อนำไปทดสอบหาค่า tensile strength, residual elongation และ 300% modulus ผลที่ได้พบว่าในช่วงที่ไม่มีไมโครเวฟจะใช้ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์บีบ 200-250 kGy เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ แต่ถ้าใช้อิเล็กทรอนิกส์บีบร่วมกับไมโครเวฟปริมาณรังสีที่ใช้และเวลาในการฉายรังสีจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด 2-6 เท่า Bovton et al. [2-3] ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟกับการวัลคาไนซ์ยางคอมพาวด์ โดยใช้ยาง 3 ชนิด คือ ยางธรรมชาติ ยางคอมพาวด์ที่ใช้กับระบบวัลคาไนซ์ทั่วไป และยางคอมพาวด์ที่เหมือนกับแบบที่ 2 แต่มีการเติมเขม่าดำเพิ่มเข้าไป เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลและสมบัติไดอิเล็กตริกเมื่อใช้ไมโครเวฟ 20 GHz ผลจากการศึกษาพบว่า เป็นไปได้อย่างยิ่งว่าการเปลี่ยนแปลงค่า dielectric permittivity และ dielectric loss เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นของสภาพผิวและกลุ่มของโมเลกุลระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ ความแตกต่างของพฤติกรรมระหว่างที่ยังไม่มีการวัลคาไนซ์และเกิดการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์สามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้นเนื่องจากการทดลองนี้จะใช้

เครื่องมือวัดสมบัติไดอิเล็กตริกที่มีความไวสูง มีเครื่องมือที่ได้รับข้อมูลแล้วแสดงผลออกมาระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ Wicks et al. [2-4] ได้ศึกษากระบวนการวัลคาไนซ์ยางและผลิตภัณฑ์ยางที่วัลคาไนซ์แล้วรวมถึงเศษยางวัลคาไนซ์ โดยเลือกแตกพันธะเคมีด้วยรังสีไมโครเวฟ การใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนกับเศษยางอย่างสม่ำเสมอ นั้นทำให้ได้เศษยางที่ผ่านการปรับปรุงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการผสมยางสูตรใหม่เนื่องจากมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น สามารถใช้เป็นส่วนผสมในยางสูตรใหม่เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์คอมโพสิตรีไซเคิล (composite recycle) ที่มีสมบัติดีได้ Sejimo et al. [2-5] ได้ศึกษาวิธีการวัลคาไนซ์ที่ต่อเนื่องโดยทำเป็นสองขั้นตอน คือ ใช้การวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟและการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีดั้งเดิม โดยการนำพาความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นตัวให้ความร้อน ชั้นของเรซินสังเคราะห์ที่ใส่ตัวต้านทานความร้อนซึ่งมีค่าอุณหภูมิหลอมตัวสูงกว่าอุณหภูมิของการวัลคาไนซ์จะหุ้มไว้ด้านนอกของท่อยางในความหนาที่ไม่สม่ำเสมอกัน ชั้นนี้จะสัมผัสกับท่ออย่างใกล้ชิดแต่ไม่ยึดติดกับท่อยาง หลังจากชั้นของเรซินถูกทำให้เย็นตัวลงและแข็งตัว ท่อยางจะถูกนำมาให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟก่อน จากนั้นนำไปวัลคาไนซ์ด้วยการพาความร้อนผ่านตัวกลางที่ให้ความร้อนในระบบปกติ หลังจากการวัลคาไนซ์เสร็จสมบูรณ์ ชั้นของเรซินจะถูกดึงออกจากท่อยาง ตูลยพงษ์ [2-6] ได้ทำการศึกษาผลของความชื้นและปริมาณน้ำที่มีต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและสารตัวเร่ง จากการศึกษาพบว่าสารตัวเร่งบางชนิดมีความไวในการทำปฏิกิริยากับน้ำ ดังนั้นปริมาณน้ำที่มีอยู่ในยางคอมพาวด์ และสภาพความชื้นในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา จึงมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ที่ผสมกับสารตัวเร่งเหล่านี้ การวิจัยนี้ใช้ MBS (N-Morpholybenzothiazole-2-sulfenamide) เป็นสารตัวเร่งหลัก ตัวอย่างยางคอมพาวด์จะถูกทำให้มีความชื้นในปริมาณที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างและทำการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ พบว่าระยะเวลาการวัลคาไนซ์ก่อนกำหนด (scorch time) ของยางคอมพาวด์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำ ขณะที่อัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความชื้นและปริมาณน้ำ จากการศึกษากลไกปฏิกิริยาของน้ำที่มีผลต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของสารตัวเร่ง MBS จะยับยั้งการชะลอการเริ่มต้นการวัลคาไนซ์ก่อนกำหนด (Delay-scorch action) และทำให้เกิด MBT (2-Mercaptobenzothiazole) ขึ้น ซึ่ง MBT มีผลทำให้อัตราการการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์เพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่ายางคอมพาวด์ที่ผสมกับสารตัวเร่ง Benzothiazole sulfonamide ชนิดอื่น จะแสดงพฤติกรรมในลักษณะที่คล้ายคลึงกันและสามารถลดอิทธิพลของความชื้นที่มีต่ออุณหภูมิและใช้ระยะเวลาสั้นที่สุด จาก

การศึกษาความเสถียรของสารตัวเร่งและสารตัวเร่งเบลนแสดงให้เห็นว่าสารตัวเร่งและสารตัวเร่งเบลนสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ และมีผลต่อพฤติกรรมของยางคอมพาวด์ที่นำไปใช้งานในภายหลัง ดังนั้นเป็นไปได้ว่าปริมาณน้ำในยางคอมพาวด์และความชื้นในอากาศในระหว่างการเก็บรักษาหรือการแปรรูปมีอิทธิพลต่อการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ ความเข้าใจถึงกลไกปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับระบบการวัลคาไนซ์ช่วยบอกได้ว่าสารตัวเร่งมีความไวในการทำปฏิกิริยากับน้ำสำหรับยางคอมพาวด์ที่ได้รับอิทธิพลจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับระบบสารตัวเร่งความแปรปรวนของปริมาณน้ำ (ซึ่งเกิดจากปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันของสารเคมีในยางคอมพาวด์หรือความชื้นในอากาศระหว่างการเก็บรักษาหรือการแปรรูป) จะทำให้พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ไม่สม่ำเสมอ การกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นหรือปริมาณน้ำกับพฤติกรรมการวัลคาไนซ์จะช่วยลดความแปรปรวนของพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์อันเนื่องมาจากความชื้นโดยการใช้ข้อมูลเพื่อควบคุมประวัติความชื้นและปริมาณน้ำของยางคอมพาวด์ หรืออีกนัยหนึ่ง ถ้าสามารถหาปริมาณของน้ำหรือความชื้นที่มีผลต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ได้ ก็สามารถทำนายลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ได้ สาริธ และคณะ [2-7] ได้ทำการศึกษา ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติและยางอีพียดีเอ็ม การคำนวณหาระดับการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติและยางอีพียดีเอ็ม โดยการใช้กัมมันตภาพใต้สภาวะที่แปรผันตามเวลาและอุณหภูมิ จากการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิการวัลคาไนซ์ยางเพิ่มขึ้น 10°C นั้น จะทำให้อัตราในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ซึ่งผลที่ได้นี้เป็นค่าที่ใช้กันทั่วไป แต่ในสภาวะที่เป็นจริงนั้น ยางที่ต่างชนิดกัน จะมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นต่างกัน การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นในการวัลคาไนซ์ของยางสองชนิด คือยางธรรมชาติ และยางอีพียดีเอ็ม โดยนำยางทั้งสองชนิดมาผสมโดยใช้สูตรเดียวกัน หาเวลาการวัลคาไนซ์และระดับการวัลคาไนซ์ (State of cure) โดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ $120-190^{\circ}\text{C}$ เพื่อหาตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และตัวแปรที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ได้แก่ ค่าคงที่อัตราในการวัลคาไนซ์ (Curing rate constant) ช่วงเวลาก่อนการวัลคาไนซ์ (Induction period) ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางสองชนิดได้ ความแตกต่างของระดับการวัลคาไนซ์ของยาง ที่เวลาและอุณหภูมิต่างกัมนั้นมีผลมาจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของยาง ระบบการวัลคาไนซ์ และสารเคมีอื่น ๆ ที่ผสมลงในสูตรยาง ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญได้แก่ ชนิดของยาง ซึ่งเมื่อกำหนดให้ใช้สารเคมีชนิดอื่น ๆ เหมือนกันแล้ว ค่าพลังงานกระตุ้นการวัลคาไนซ์ (Activation energy of vulcanization) และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ (Temperature coefficient of vulcanization) สามารถใช้เป็นค่าที่ใช้อ้างอิงถึงระดับการวัลคาไนซ์ยางที่เวลาหรือ

อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ สมการที่ใช้ในปัจจุบันจะมีพื้นฐานมาจากระดับการวัลคาไนซ์อย่างซึ่งพิจารณาใน ส่วนของอุณหภูมิและการวัลคาไนซ์ (Cure cycle time) และตัวแปรพื้นฐานในการวัลคาไนซ์อย่าง การใช้วิธีนี้จะทำให้ได้ผลที่รวดเร็วและเป็นการศึกษาที่มีระบบรู้ถึงผลกระทบหลัก และผลของตัวแปรต่าง ๆ ในการพิจารณาระดับการวัลคาไนซ์ของยาง เจริญ และคณะ [2-8] ได้ทำการศึกษ สมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์โดยการใช้ สารตัวเร่งชนิดต่าง ๆ จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (33%โดยโมล) เนื่องจากเป็นปริมาณหมู่อิพอกไซด์บนโครงสร้าง โมเลกุลยางธรรมชาติที่ค่อนข้างสูงซึ่งสามารถเปรียบเทียบสมบัติกับคอมพาวด์ยางธรรมชาติได้ อย่างชัดเจน นอกจากนี้ปริมาณหมู่อิพอกไซด์มากขึ้นถึงระดับหนึ่งยางจะสูญเสียสมบัติความเป็น ยาง เช่น มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดต่ำ มีความแข็งสูงไวต่อความชื้นและตัวทำละลายที่มีขั้ว เป็นต้น นอกจากนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารตัวเร่งต่อสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของ ยางธรรมชาติโดยการใช้สารตัวเร่ง 3 ชนิด คือ MBT, MBS และ TBBS โดยใช้ในระบบการวัลคา ไนซ์ด้วยกัมมะถันแบบปกติและทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานหมุนที่ อุณหภูมิ 150°C และทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติด้านการทนแรงดึง (Tensile strength) ดึงที่ความเร็ว 500 มม./นาที พบว่ายางธรรมชาติมีระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและ ระยะเวลาการวัลคาไนซ์นานกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ แต่มีค่าแรงบิดสูงสุดและผลต่างระหว่าง แรงบิดสูงสุดกับแรงบิดต่ำสุดน้อยกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติมีความ ต้านทานต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ แต่หลังจากบ่มเร่งยางธรรมชาติอิพอกไซด์ มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อการฉีกขาดมากกว่ายางธรรมชาติ Kumnuantip et al. [2-9] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณยางรีเคิลมที่ได้จากหน้ายางรถยนต์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและ สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ โดยการวัลคาไนซ์ด้วยคลื่นไมโครเวฟและการให้ความร้อน ด้วยระบบ thermal cure (CT) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีแบบ CT ทำให้ ได้สมบัติต่าง ๆ ที่ดีกว่ายกเว้นการเกิดการบวมพอง (swelling) ความแตกต่างของผลการทดลองที่ ได้ระหว่างสองวิธีนี้สามารถอธิบายได้ในรูปของความหนาแน่นและการเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้าง แบบตาข่ายของยางคอมพาวด์ การวัลคาไนซ์ด้วยไมโครเวฟจะส่งผลมากขึ้นหากเพิ่มปริมาณยาง รีเคิลม Marzocca et al. [2-10] ทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ในการสังเกตการเปลี่ยนแปลง dynamic modulus และ loss tangent ของยางวัลคาไนซ์กับโครงสร้างตาข่าย ขึ้นงานตัวอย่างจะ ถูกวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 413 และ 433 K เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างตาข่าย

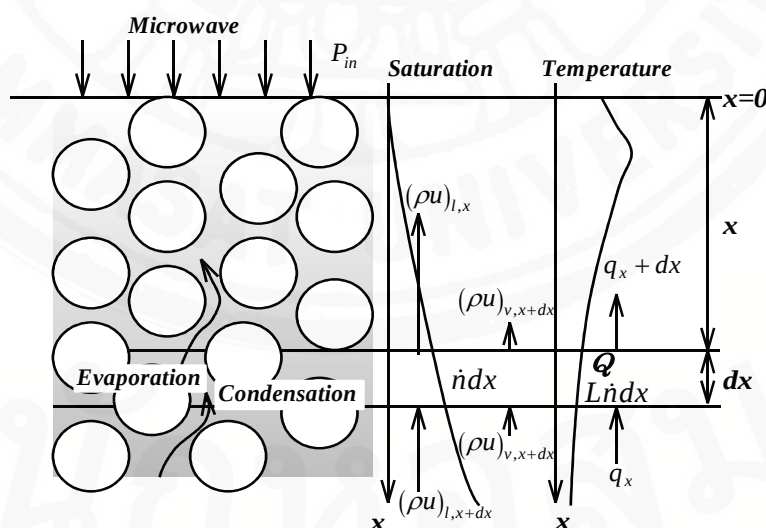
โครงสร้างตาข่ายนี้จะถูกวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค NMR เพื่อที่จะให้เห็นความแตกต่างของรูปแบบในการเชื่อมโยงของซัลเฟอร์ระหว่างการเกิดการวัลคาไนซ์ ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงพันธะได้จากการคำนวณโดยใช้เทคนิคการหาค่าการบวมพอง (swelling techniques) ในแต่ละสภาวะ dynamic mechanical ทดสอบโดยใช้ free decay pendulum ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 213 และ 373 K และความถี่ในการแกว่งอยู่ในช่วง 0.1 s^{-1} และ 20 s^{-1} ข้อมูลของ loss tangent จะทำการวิเคราะห์โดยใช้ KMF โมเดลและการเปลี่ยนแปลงของ monomeric friction coefficient ของความหนาแน่นในการเกิดการเชื่อมโยง ความแตกต่างเหล่านี้จะส่งผลต่อการเกิดโครงสร้างตาข่ายในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการวัลคาไนซ์ Moriwaki et al. [2-11] ได้ทำการศึกษาการขจัด HCl ออกจากขยะ PVC และเรซิน PVC โดยใช้เตาไมโครเวฟบ้าน ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การใส่คาร์บอนหรือเฟอไรต์เป็นตัวช่วยในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟส่งผลให้เกิดการสลายตัวและเกิดการขจัด HCl ออกจาก PVC การสลายตัวและการเกิดการขจัด HCl ออกจาก PVC จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าพลังงานของไมโครเวฟ การสลายตัว PVC เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการขจัด HCl และระหว่างที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟสารอินทรีย์ที่ระเหยได้จะระเหยออกจากโพลีเมอร์ประมาณ 15% และขยะเรซิน PVC เมื่อได้รับพลังงานไมโครเวฟจะมี HCl ออกมามากกว่า 90% หลังจากนั้น Moriwaki et al. [2-12] ได้ทำการศึกษาต่อเกี่ยวกับการเกิดปรากฏการณ์ thermal runaway ของ PVC ที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ จุดประสงค์ในการให้ความร้อนแก่ PVC ด้วยไมโครเวฟก็เพื่อกำจัด HCl ออกจาก PVC โดยจะต้องทำการวัดอุณหภูมิในระหว่างที่ให้ไมโครเวฟด้วย ซึ่งจะใช้ไฟเบอร์เทอร์โมเซนเซอร์ในการวัดเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับความสามารถในการดูดซับไมโครเวฟของ PVC ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อให้ความร้อนกับ PVC ด้วยไมโครเวฟแล้วก็ได้ก๊าซ HCl ออกมา จุดที่เกิด thermal runaway temperature อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสามารถระเบิดได้ สังเกตได้จากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ เนื่องจาก thermal runaway temperature ไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัววัสดุเท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับความเข้มของกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิของวัสดุก่อนได้รับคลื่นด้วย ในช่วงแรกที่ได้รับคลื่น อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับกำลังของไมโครเวฟและเวลาที่ได้รับคลื่น เมื่อกำลังของไมโครเวฟสูงขึ้นจนเลยจุดวิกฤติจะทำให้เกิด thermal runaway การอุ่น (pre-heat) PVC ทำให้ใช้เวลาในการให้ไมโครเวฟน้อยลง นอกจากนี้ยังส่งผลทำให้ระยะเวลาในการเกิด thermal runaway น้อยลงด้วย และสุดท้าย กว่า 90% ของการเกิด HCl เกิดจากการที่ PVC ได้รับคลื่นไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้รับไมโครเวฟพบว่าปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอรีนชันจะเกิดสมบูรณ์ที่สุด Tanaka et al. [2-13] ทำการหาค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซอสถั่วเหลืองในช่วงความถี่ 0.3-3 GHz. อุณหภูมิ 5-70°C โดยใช้

ทฤษฎีความสัมพันธ์ของ Cole-Cole ในการวิเคราะห์สมบัติของซอสถั่วเหลืองและผลของความสามารถในการดูดซับพลังงานของไอออน โดยทำการศึกษาถึงตัวแปรที่สำคัญ เช่น ความยาวคลื่นรีเล็กเซชัน Static component ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และความสามารถในการดูดซับพลังงานของไอออน นำมาทำเป็นตารางแสดงค่าที่สภาวะต่าง ๆ กัน ค่าความผิดพลาดมาตรฐานเฉลี่ยของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าลอสมเพคเตอร์ คือ 1.61 และ 5.62 ตามลำดับ ค่าไดอิเล็กตริกกลอสเพคเตอร์มีความสัมพันธ์กับความถี่ที่ใช้ทดลองที่ค่าความผิดพลาดมาตรฐานเฉลี่ย 1.17 พิจารณาค่าความลึกปรากฏภายใต้สภาวะต่าง ๆ โดยมีค่าตั้งแต่ 0.12-0.85 cm. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความถี่ของคลื่น ความเข้มข้นและอุณหภูมิของซอสถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น ค่าลอสมเพคเตอร์ (loss factor) ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเพราะค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของไอออนลดลง Lai et al. [2-14] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของฟีนอลอมที่ทำจากอะคริลิกเรซินซึ่งเคียวโดยใช้ไมโครเวฟกับ conventional water bath โดยจะทำการศึกษถึงอิทธิพลของระดับพลังงานไมโครเวฟที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของฟีนอลอมที่ทำจาก PMMA หนา 10 มม. ในการศึกษาจะนำเอาชิ้นทดสอบมาใส่ในขวดแก้ว (flask) ขวดละ 2 ชิ้น จำนวน 2 ขวด นำมาใส่ไมโครเวฟที่กำลัง 80, 160, 240 และ 560 วัตต์ ใช้เวลา 15, 10, 7 และ 2 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปเคียวอีกครั้งโดยใช้เวลา 2 นาที กำลัง 560 วัตต์ สำหรับกระบวนการเคียวด้วยระบบ conventional water bath ใช้อุณหภูมิ 70°C เวลา 9 ชม. นำมาทดสอบค่าสมบัติความแข็ง ความพรุน ความหักงอ ความสามารถในการละลาย และน้ำหนักโมเลกุล นำชิ้นทดสอบมาย้อมสีแล้วใช้ transmission electron microscope ดูโครงสร้าง จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามกำลังของไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการเคียวด้วยไมโครเวฟกับการเคียวด้วย conventional water bath พบว่า พลังงานไมโครเวฟสามารถโพลิเมอร์ไรซ์และเคียวฟีนอลอมที่ทำจากโพลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระดับพลังงานไมโครเวฟจะทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้นด้วย จึงควรเลือกกำลังให้เหมาะสมกับเวลาที่ใช้เพื่อทำให้ได้ค่าความพรุนที่ต่ำที่สุด กระบวนการไมโครเวฟเหมาะสำหรับกระบวนการทำฟีนอลอมเพราะช่วยประหยัดเวลา

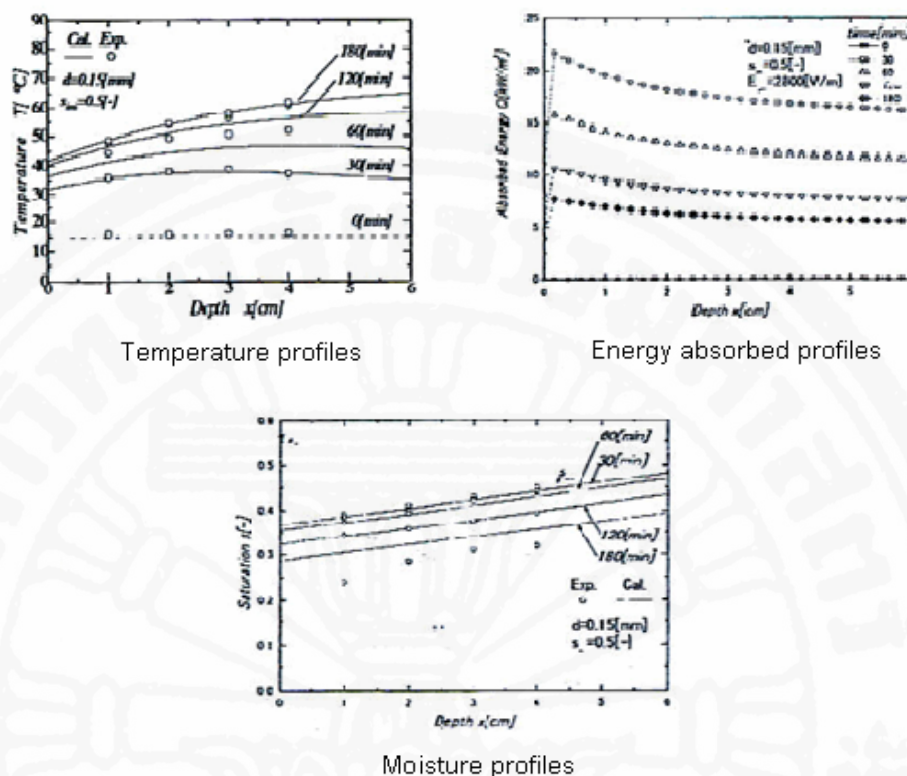
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าส่วนใหญ่จะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไมโครเวฟกับยางคอมพาวด์ โดยในยางคอมพาวด์จะมีส่วนผสมของยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติความเป็นขั้วรวมอยู่ด้วย ลักษณะการเกิดความร้อนจึงค่อนข้างไม่ซับซ้อนมากนัก หรือทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำยางรีไซเคิลมาปรับปรุงเพื่อให้สามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการได้อีกครั้ง หรือแม้แต่การนำไมโครเวฟมาใช้กับโพลิเมอร์เพื่อแยกสารประกอบบางอย่างออกมา รวมไปถึงวัดค่าไดอิเล็กตริก

ของวัสดุชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้ ลักษณะของไมโครเวฟที่ใช้มักจะใช้ในรูปแบบของเครื่องสายพาน (Continuous Microwave) หรือไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน ซึ่งเป็นไมโครเวฟแบบคลื่นผสม (Multi Mode) ยังมีอยู่ค่อนข้างน้อยมากที่ทำการศึกษาดังพฤติกรรมทางความร้อน การกระจายความร้อนของไมโครเวฟแบบคลื่นเดี่ยว (Single Mode)

การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการทำความร้อนแก่วัสดุนอกจากจะศึกษาในรูปแบบการทดลองแล้ว ยังได้มีการศึกษาในเชิงทฤษฎีอีกด้วย ดังเช่น Ratanadecho et al. [2-15] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน 1 มิติโดยวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุ Non-Hygroscopic ซึ่งก็คือวัสดุที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านเข้าสู่เนื้อในโครงสร้างได้ ทำการทดลองโดยใช้ระบบไมโครเวฟแบบคลื่นหลายโหมดและมีแบบจำลองทางกายภาพดังภาพที่ 2.3 และผลการวิเคราะห์ที่ได้ก็จะมีผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิ พลังงานการดูดซับ และค่าของความชื้นภายในวัสดุ ดังภาพที่ 2.4 Liu et al. [2-16] ได้ศึกษาการนำไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับการเชื่อมต่อวัสดุโพลีเมอร์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เพื่อทำความเข้าใจให้ลึกซึ้งกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่นรูปสัน (ridge) ร่วมกับการกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุโพลีเมอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้สมการแมกเวลล์ร่วมกับสมการการส่งผ่านความร้อนแล้วแก้ปัญหาโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสำหรับวัสดุโพลีเมอร์ในท่อนำคลื่นรูปสัน ใช้เทคนิคไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่ไหม้-โดเมน (FD-TD) ในการทำนายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและการกระจายตัวของกำลังภายในวัสดุโพลีเมอร์ใน



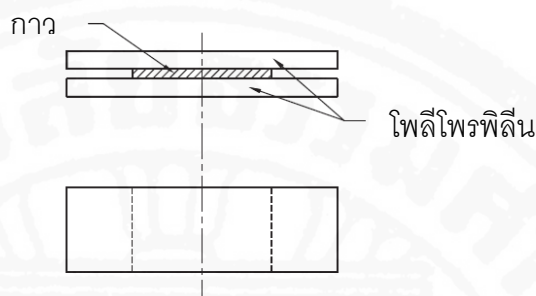
ภาพที่ 2.3 แบบจำลองทางกายภาพใน 1 มิติสำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในวัสดุที่เป็น Non-Hygroscopic ของ Ratanadecho et al. [2-11]



ภาพที่ 2.4 ผลการทดลองสำหรับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟในวัสดุที่เป็น Non-Hygroscopic ของ Ratanadecho et al. [2-11]

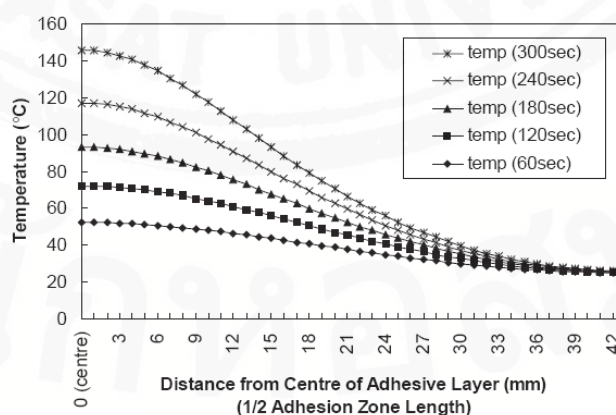
ท่อนำคลื่น โดยใช้ในลอน 6, 6 เป็นวัสดุในการศึกษาร่วมกับไมโครเวฟท่อนำคลื่นรูปสัน (ridge) จากการศึกษพบว่าสมการแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเชื่อมโยงกับสมการการส่งผ่านความร้อนได้อย่างเหมาะสมในการทำนายการกระจายกำลังของวัสดุโพลีเมอร์ โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองพบว่าผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิไม่เกิน 150°C Rattanadecho et al. [2-17] ได้ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการทำความร้อนของชั้นของเหลวโดยใช้ไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม พิจารณาชั้นของเหลวที่แตกต่างกันสองชนิด คือ น้ำและสารละลายเกลือ สมการความร้อนและสมการโมเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบ 2 มิติ เพื่ออธิบายอุณหภูมิและพฤติกรรมการไหลของเหลวที่ไม่คงที่ (unsteady state) ควบคู่ไปกับสมการแมกซ์เวลล์ที่สถานะไม่คงที่เช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาอิทธิพลของการนำไฟฟ้าและกำลังไมโครเวฟบนพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ สมการส่งถ่ายความร้อน และสมการการ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติไดอิเล็กตริกมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการเกิดความร้อน Soa et al [2-18] ได้ทำการศึกษาการใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนแก่ท่อนำคลื่นในการเชื่อมติดโพลีโพรพิลีน

ซึ่งมีค่า loss factor ต่ำมาก ๆ โดยให้ความร้อนแก่กาวอีพ็อกซีเพื่อเชื่อมติดกับโพลีโพรพิลีนที่มีขนาด 86x25x0.4 mm. ภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (mode:TE₁₀) ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แผนภาพลักษณะการเชื่อมติดของกาวอีพ็อกซีกับโพลีโพรพิลีน (Soa at el [2-18])

ทำการวัดอุณหภูมิของกาวที่บริเวณต่าง ๆ 4 จุด สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ไทม์โดเมนในการแก้สมการ อุณหภูมิที่บริเวณต่าง ๆ ของกาวหลังจากการเคียวที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ส่วนผลการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองแสดงดังภาพที่ 2.6 จากการศึกษพบว่า ขั้นตอนอบที่ทำให้ร้อนด้วยไมโครเวฟเกิดการเคียวอย่างสมบูรณ์ อัตราการเกิดความร้อนสูง และเมื่อสังเกตขั้นตอนที่เคียวแล้วพบว่าไม่มีบริเวณจุดเชื่อมต่อใดที่ต่อกันไม่สนิทหรือเกิดรอยร้าว ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงสามารถนำมาใช้ในการเคียวโพลีโพรพิลีนที่มีค่า loss factor ต่ำกับกาวได้ เมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับการทดลองก็พบว่าที่ความแม่นยำสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาระบวนการเคียวกาวกับวัสดุที่ต้องการยึดติดด้วยไมโครเวฟได้



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองแสดงการกระจายอุณหภูมิจากจุดตรงกลางของกาวที่ใช้เวลาต่าง ๆ กัน

(Soa at el [2-18])

Ratanadecho [2-19] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษากระบวนการทำความร้อนไม้ด้วยไมโครเวฟ โดยใช้ท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (mode: TE_{10}) ภายใต้อิทธิพลของความถี่และขนาดของไม้ ในการศึกษาจะใช้ไม้ขนาด $11 \times 5 \times 5.5$ cm. ใส่ในกล่องโพสโพรพิลินซึ่งไม่ดูดซับคลื่น ใช้กำลัง 1,000 วัตต์ วัดการกระจายอุณหภูมิด้วยไฟเบอร์ออปติก (fibre optics) และใช้กล้องอินฟราเรดดูการกระจายอุณหภูมิของตัวอย่าง ใช้เครื่องเน็ตเวิร์คแอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) ในการวัดค่าไดอิเล็กตริกของไม้ ซึ่งค่าไดอิเล็กตริกมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้ควบคุมตัวแปรต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการ ความถี่ที่ใช้คือ 2.45 GHz. และ 5 GHz. ค่าความลึกปรากฏ (penetration depth) ที่ความถี่ 2.45 GHz. เท่ากับ 1.54041 m. ที่ความถี่ 5 GHz. เท่ากับ 0.754 m. ผลจากการศึกษาพบว่า สามารถนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมทางความร้อนที่สภาวะต่าง ๆ ได้ อิทธิพลของเวลาในการแผ่รังสี ความถี่ที่ใช้ และขนาดของไม้ส่งผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและรูปแบบการเกิดความร้อนภายในชิ้นไม้ ลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับการทดลอง กล่าวคือ อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณตรงกลางของชิ้นไม้

จากงานวิจัย [2-15]-[2-19] พบว่ายังไม่มียานวิจัยใดที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายผลการกระจายอุณหภูมิ การถ่ายเทความร้อน รวมไปถึงจนถึงการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของยางธรรมชาติหรือยางธรรมชาติคอมพาวด์

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ จะทำการทดลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการอนุรักษ์ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่มีความหนาต่าง ๆ และมีการเติมเขม่าดำลงไปด้วย โดยในเชิงทฤษฎีจะอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขขั้นสูงเข้ามาช่วยในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนการทดลองก็จะทำการศึกษาถึงพฤติกรรมทางความร้อน และศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมี โดยใช้ไมโครเวฟแบบท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม (TE_{10})