



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาประสิทธิภาพการอบรมล้อ

โดย ดร.วิบูลย์ เลิศวิมลนันท์ และคณะ

กรกฎาคม 2553

ສັນຖາເລຂທີ RDG5250070

รายงานວິຈัยฉบับສມບູຮົນ

ໂຄຮກການ ກາຣພົມນາປະສິທິກາພກກາຮອບຍາງລ້ອ

ຄະນະຜູ້ວິຊຍ

- ດຣ. ວິບູລົງ ເລີຄວິມລັນທີ
- ຝສ.ດຣ. ຊາງູ້ທຸກ ໄກລິຕະວາງ
- ນາງສາວ ຈິວຸ້ນຊ ເຂົ້ອຄວິງ

ສັກັດ

- ກາຄວິຫາວິຫາວຽກງານເຄື່ອງກຳແລະກາຣບິນ-ອວກາສ
ມາກາວິຫາຍາລັຍເທັກໃນໂລຢີປະຈອມເກຳພະນັກງານ
ກາຄວິຫາວິຫາວຽກງານເຄື່ອງກຳແລະກາຣບິນ-ອວກາສ
ມາກາວິຫາຍາລັຍເທັກໃນໂລຢີປະຈອມເກຳພະນັກງານ
ກາຄວິຫາວິຫາວຽກງານເຄື່ອງກຳແລະກາຣບິນ-ອວກາສ
ມາກາວິຫາຍາລັຍເທັກໃນໂລຢີປະຈອມເກຳພະນັກງານ

ຊັດໂຄຮກການ ວິຈัยຂາດກລາງເຮື່ອງຍາງພາຣາ

ສັບສົນໄດ້ສຳນັກງານກອງທຸນສັບສົນກາຣວິຈຍ (ສກວ.)
(ຄວາມເຫັນໃນວາງນານນີ້ເປັນຂອງຜູ້ວິຊຍ ສກວ. ໄນຈະເປັນຕໍ່ອັນເຫັນດ້ວຍເສມອໄປ)

แบบสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)

การพัฒนาประสิทธิภาพการอบยางล้อ

ชื่อโครงการ (ภาษาอังกฤษ)

Development of tire curing process efficiency in industrial tire

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล

วิบูลย์ เลิศวิมลนันท์

หน่วยงาน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.พิบูลสงคราม แขวง/เขต บางซื่อ

โทรศัพท์ : +66 (0)2-913-2500 ต่อ 8310 โทรสาร : +66(0)2-586-9541

E-mail address: wbln@kmutnb.ac.th

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย

1) ผศ.ดร. ชาญยุทธ โกลิตะวงศ์ (ผู้ร่วมวิจัย)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

2) น.ส. จิรุณ อรุณารักษ์ (นักศึกษาร่วมวิจัย)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

งบประมาณทั้งโครงการ 325,000 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ 18 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน 2552 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2554

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ในกระบวนการอบยางล้อนั้น อุณหภูมิในการอบและเวลาที่ใช้ในการอบเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การอบยางรูปแบบใหม่ ๆ หรือไม่เดลใหม่ ๆ จำเป็นต้องมีการทดสอบกระบวนการอบเพื่อให้ได้มาซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม การทดสอบดังกล่าวมักอาศัยความเชี่ยวชาญของผู้ปฏิบัติเป็นหลัก ซึ่งมักใช้เวลานานและวัดถูกต้องในการทดสอบจำนวนครั้นข้างมาก กว่าจะได้มาซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ต้องน้ำหนาการนำเอาเทคนิคการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบมาประยุกต์ใช้ เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมก่อนทำการทดสอบจริงจะช่วยให้กระบวนการทดสอบสั้นลงและลดภาระในการทดสอบลงได้

วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการอบยางเพื่อให้ยางคงรูป และคุณสมบัติการนำความร้อนของยางเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณซึ่งตัวเลขเพื่อสามารถทำงานการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางได้
- 2) เพื่อกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการอบยางล้อให้เหมาะสมสำหรับ ขนาดและรูปร่างที่ต่างกัน
- 3) เพื่อลดต้นทุนในการทดสอบตัวแปรในการอบยางไมเดลใหม่ ๆ ให้ได้ไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาและทดสอบการเกิดปฏิกิริยาวัลค่าไนซ์เข้มข่องยางคอมปาวด์ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางล้อ ทั้งในสภาพอุณหภูมิคงที่และสภาพอุณหภูมิไม่คงที่ด้วยเทคนิค ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีอยู่เพื่อให้ได้มาซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา, คุณสมบัติการนำความร้อน อัตราการอบคงตัวและเปอร์เซ็นต์การอบคงตัวที่สภาพต่าง ๆ จากข้อมูลการทดสอบ ดังกล่าว เราได้ทำการจำลองกระบวนการรอบคงรูปยางล้อด้วยเทคนิคเครื่องไฟฟ้าต่อคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่จุดต่างๆ ภายในยางล้อในระหว่างกระบวนการรอบ ผลการคำนวณอุณหภูมิได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดจริงในกระบวนการ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าผล การคำนวณด้วยเทคนิคเครื่องไฟฟ้าต่อคอมพิวเตอร์มีความใกล้เคียงกับผลจากการวัด ทำให้สามารถทราบถึงตำแหน่งที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิข้าที่สุด และจากตำแหน่งดังกล่าวสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพื่อนำ กลับไปคำนวณหาเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการรอบยางล้อสำหรับยางล้อไมเดลที่ใช้ทดสอบ การคำนวณด้วย เทคนิคดังกล่าวสามารถทำให้การกำหนดสภาพในกระบวนการรอบยางล้อไมเดลใหม่ๆ ที่ไม่เคยทำมาก่อนได้อย่าง เหมาะสม และไม่เสื่อมเปลืองเวลาและต้นทุนในการทดสอบหากค่าตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการรอบยางล้อ

สรุปผลการวิจัย

บทสรุปของงานวิจัยนี้คือกระบวนการในการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการ การรอบยางล้อ ทำให้สามารถหาสภาพที่เหมาะสมทั้งในด้านของอุณหภูมิที่ใช้และเวลาในการรอบยาง ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปต่อยอดในการทำ Optimization กระบวนการรอบได้ เช่น การใช้ความร้อนที่สะสมอยู่ในเนื้อยาง หลังจากนำยางล้อออกจากแม่พิมพ์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาวัลค่าไนซ์เข้มต่อเนื่องต่อไป การทำดังกล่าวสามารถทำ ให้ประหยัดพลังงานและเวลาที่ใช้ในกระบวนการรอบได้

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่ออยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

จุดสำคัญที่ควรมีการวิจัยและศึกษาเพิ่มเติมประกอบด้วย

1. การทดสอบและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยยางล้อหลากหลายรูปแบบเพื่อให้ทราบถึงข้อ จำกัดของเทคนิคการคำนวณ และเป็นการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับสูตรยาง คอมปาวด์ต่างๆ ที่ใช้จริงในการผลิต
2. ศึกษาเพิ่มเติมกระบวนการถ่ายเทความร้อนหลังจากนำยางล้อออกจากแม่พิมพ์เพื่อประเมินความ สามารถในการเกิดปฏิกิริยาวัลค่าไนซ์เข้มด้วยพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ เพื่อนำไปสู่การ ประยุกต์พลังงานและเวลาที่ใช้ในกระบวนการรอบคงรูป
3. ศึกษาถึงผลกระทบของความดันในการขึ้นรูประหว่างกระบวนการรอบยาง และอุณหภูมิของ แม่พิมพ์ทั้งด้านในและด้านนอกรวมถึงกระบวนการให้ความร้อนที่แม่พิมพ์ เพื่อให้เกิดการถ่ายเท ความร้อนที่เหมาะสมสำหรับยางล้อในแต่ละไมเดล

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

- [1] จิรนุช เอื้ออาเรียวงศ์, วิญญาณ์ เลิศวิมลนันท์, ชาญญาทธ์ โภลิตวงศ์, การศึกษากระบวนการรอบคงรูปยางโดย การทดสอบของศูนย์เทคโนโลยีมิเตอร์และดิฟเฟอร์เรนซ์เทียลสแกนนิ่งแคลลอริมิเตอร์, การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, จ.สงขลา, ประเทศไทย
- [2] คาดว่าจะส่งนำเสนอการประชุมวิชาการ และเอกสารที่พิมพ์ทางวิชาการประมาณ 2 หัวข้อ

บทคัดย่อ

กระบวนการครอบยางเป็นกระบวนการสุดท้ายเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ในกระบวนการครอบยางนั้นจำเป็นต้องทราบถึงสภาพที่เหมาะสม เช่นเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการครอบ การใช้สภาพที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดปัญหาอย่างไม่สุกเนื่องจากเวลาในการครอบไม่เพียงพอหรือในบางกรณีเกิดการไหม้ของยางในบางส่วนปัญหาดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อมีการผลิตยางล้อ莫เดลใหม่ๆ ที่ไม่เคยผลิตมาก่อนหรือในกรณีมีการเปลี่ยนแปลงสูตรยางคอมปาวด์ โดยที่ร่วงไปการแก้ปัญหาทำโดยการทดสอบภายใต้สภาพที่กำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญในแต่ละโรงงานโดยอาศัยประสบการณ์เป็นหลัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจะศึกษากระบวนการครอบยางล้อเพื่อให้ได้มาซึ่งหลักการและวิธีการในการกำหนดสภาพในกระบวนการครอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพัฒนาระบบวงจรร้อนทั้งภายในสภาวะอุณหภูมิคงที่และอุณหภูมิไม่คงที่ด้วยเทคนิค Oscillating Disc Rheometer (ODR) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) จากเทคนิคดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณหาอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate of reaction) และเปอร์เซ็นต์การครอบคง (Degree of vulcanization) รวมทั้งความร้อนที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาในสภาวะต่างๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ได้ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของยางคอมปาวด์ เช่น ความหนาแน่น ρ , ค่าความจุความร้อน C_p และสมประสิทธิภาพนำความร้อน k เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้คำนวณการกระจายตัวและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเนื้อยางล้อระหว่างกระบวนการครอบ การคำนวณทำโดยใช้เทคนิคกึ่งไฟในต่ออิเล็กเตอร์ที่ได้จาก ODR และ DSC การเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาระหว่างการทดสอบวัดจริงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟในต่ออิเล็กเตอร์พบว่า ผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงในกระบวนการผลิต จากการคำนวณพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน. ดำเนนที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขึ้นที่สุดมีค่าเท่ากับ $1.58^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถนำไปประเมินเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการครอบเพื่อให้มั่นใจว่ายางเกิดวัลคainizii เช่นอย่างสมบูรณ์ทุกจุดทำให้สามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวลดเวลาในการทดสอบยางรูปแบบใหม่ๆ และวัตถุคุณภาพในการทดสอบหาสภาพที่เหมาะสมได้

ABSTRACT

Curing process is the final step of tire production. In this process, the curing temperature and curing time are the most important parameter. Using wrong conditions such as short curing time cause uncured problems or too long curing time may cause the rubber overcured problem. These problems mainly occur during the production of new tire models or in the cases have changed the rubber compound formulas. In General, problem-solving by experiment under conditions set by the experts

of factory based on experience is a key. Therefore, this research aims to study curing process to obtain the principles and methods for setting the curing process parameters.

This research studied the behavior of rubber curing process under isothermal and non-isothermal conditions using Oscillating Disc Rheometer (ODR) and Differential Scanning Calorimetry (DSC), respectively. Using the existing mathematical models, the rate of reaction and degree of vulcanization of rubber compounds as well as the heat of reaction in various conditions could be calculated. In addition, the various rubber compound properties such as density ρ , specific heat capacity C_p , and thermal conductivity coefficient k , are determined. The temperature distribution and the variation of temperature with time during curing process are calculated using finite element techniques, with physical parameter determined by ODR and DSC. The results shown that, the finite element technique is useful for determining the evolution of temperature during curing process. It should be used to determine the position which the increasing of temperature is lowest. By calculated result, the lowest heating rate is $1.58^{\circ}\text{C}/\text{min}$. This point will be used to determine the suitable time for curing process to ensure that the vulcanization is occurred. The result can be used for reducing the time necessary for testing the curing process of new tire model or in the case of changed rubber compound formula.

เนื้อหาด้านวิจัย

1/ บทนำ

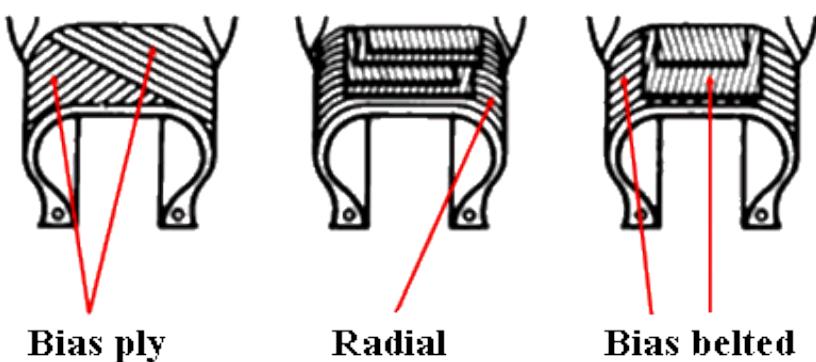
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางล้อระหว่างกระบวนการครอบด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการอบยางล้อ การศึกษาจะแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ ในส่วนแรกนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติการนำความร้อนของยางคอมปาวด์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นส่วนประกอบของยางล้อ โดยเฉพาะยางคอมปาวด์ที่ใช้ในส่วนที่เป็นดอกยางและยางคอมปาวด์ที่ใช้ในส่วนที่เป็นแก้มยาง จากนั้นจึงทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาลดค่าในช่วงของยางคอมปาวด์ ในส่วนที่สองจะเป็นการศึกษากระบวนการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางล้อในกระบวนการผลิตจริง การศึกษาในส่วนนี้จะนำเอาเทคนิควิธีการคำนวณเชิงตัวเลขรวมถึงค่าคุณสมบัติที่วัดได้ในช่วงแรกมาใช้ เพื่อคำนวณทำการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในยางล้อและเบรียบเที่ยบผลที่ได้กับการวัดจริงในกระบวนการ ผลที่ได้ในส่วนนี้จะนำไปปรับ校准เพื่อหาค่าอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการอบยาง

2/ ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะเป็นกล่าวถึงความรู้ที่ໄปเกี่ยวกับยางล้อ และทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการครอบยาง

2.1/ ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับยางล้อรถยนต์

ยางล้อรถยนต์คือส่วนประกอบหนึ่งของล้อรถยนต์ ซึ่งยางล้อจะเป็นส่วนที่สมผัสกับพื้นถนน เป็นตัวรองรับน้ำหนักทั้งหมดจากตัวรถและยึดเกาะถนนให้เป็นไปตามที่ควบคุม รวมทั้งส่งผ่านแรงจากตัวรถไปยังพื้นถนน ยางพานะทางบกเกือบทั้งหมดมีล้อที่มียางเป็นส่วนประกอบ เพราะฉะนั้นยางล้อจึงเป็นส่วนที่สำคัญ ใช้งานยางล้อมีหลากหลายรูปแบบ ทั้งยางลม และยางตัน ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษายางล้อแบบยางลม ซึ่งยางล้อแบบดังกล่าวสามารถแบนออกได้เป็น 3 ประเภทตามลักษณะโครงสร้างภายใน ดังแสดงในรูปที่ 2.1

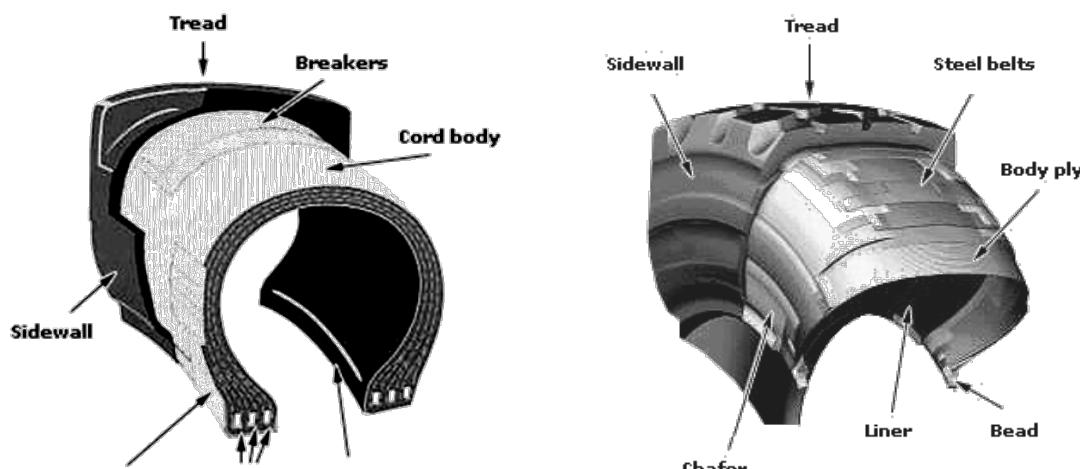


รูปที่ 2.1 ประเภทของยางล้อแยกตามโครงสร้างภายใน [1,2]

- **ยางล้อประเภท Bias Tire** ยางล้อประเภทนี้โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยชั้นผ้าใบวางหักกันโดยมีเส้นใยทำมุงกัน 20 – 40 องศา ชั้นผ้าใบสามารถมีเดิ้งแต่ 2 ชั้นสำหรับยางล้อที่ใช้รับน้ำหนักเบา และอาจถึง 20 ชั้นสำหรับยางล้อที่ใช้รับน้ำหนักมาก ยางล้อประเภท Bias ส่วนใหญ่จะเป็นยางล้อที่ใช้สำหรับรถบรรทุก ที่มีการใช้ความเร็วไม่สูงและต้องการการรับภาระแรงกดมาก

- **ยางล้อประเภท Radial Tire** ยางล้อประเภทนี้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยชั้นลวดโดยที่ชั้นผ้าใบสามารถมีได้มากกว่า 1 ชั้น การวางแผนว่างชั้นผ้าใบกับลวดจะตั้งจากกันโดยลวดจะเรียงตัวเป็นแนวตามวงล้อ ส่วนผ้าใบจะวางตัวขวางระหว่างขอบล้อชั้นลวดจะอยู่เหนือชั้นผ้าใบตามแนวเส้นรอบวงโดยมีหน้าที่รองรับแรงจากออกยาง มุนของชั้นลวดจะทำมีมุนขนาดเล็กประมาณ 20 องศา
- **ยางล้อประเภท Bias Belts Tire** ยางประเภทนี้จะมีการเสริมลวดระหว่างชั้นผ้าใบกับชั้นดอกยาง โดยโครงสร้างชั้นผ้าใบเหมือนยางเสริมผ้าใบ ลวดที่ใช้เป็นลวดที่มีความแข็งแรงสูง การใส่ลวดเข้าไปเพื่อทำให้ดอกยางมีความคงรูปและแข็ง- แรงขึ้นกว่ายางล้อเสริมผ้าใบ ปกติยางชนิดนี้มีมุนผ้าใบ 25-45 องศา และมุนของลวด 20-35 องศา

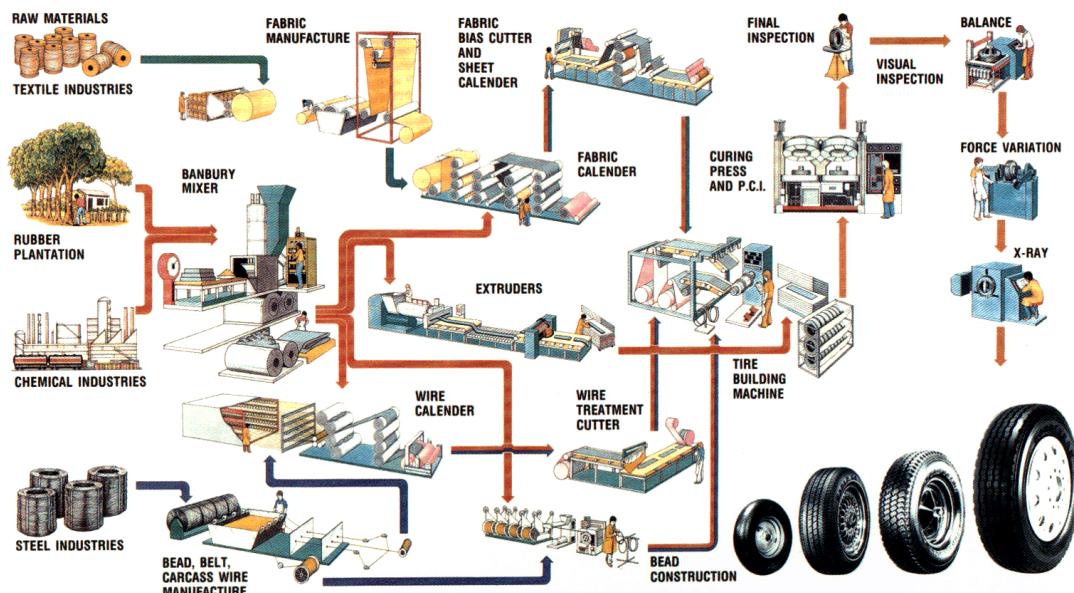
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบภายในของยางล้อประเภท Bias และ ยางล้อประเภท Radial จากรูป 2.2 จะพบว่าโครงสร้างส่วนที่มียางค่อนบ้าดเป็นหลักจะประกอบด้วย ส่วนที่เป็นดอกยาง (Tread) และส่วนที่เป็นแก้มยาง (Sidewall) โครงสร้างในส่วนอื่นๆ นั้นจะเป็น เส้นใยฉบับด้วยยาง ไม่ว่าจะเป็นในส่วน ชั้นผ้าใบ (Cord body, Body ply, Breakers) หรือชั้nlวด (Steel belts) สำหรับโครงสร้างในส่วนอื่นๆ เช่น Chafer ซึ่งมีหน้าที่รองรับแรงและการสียูรูปรวมถึงการเพิ่มความแข็งแรงให้กับลวดขอบล้อ (Bead) หรือ Liner ทำจากยางสังเคราะห์ เป็นแผ่นบางๆ มีหน้าที่กันอากาศไม่ให้รั่วซึ่งทำหน้าที่แทนท่ออากาศแทนยางในสำหรับยาง Radial นั้นจะเป็นยางค่อนบ้าดอย่างเดียวแต่มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นดอกยางและแก้มยาง



(ก) ยางล้อประเภท Bias

(ข) ยางล้อประเภท Radial

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของยางล้อประเภท Bias และ ยางล้อประเภท Radial [3]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของยางล้อປะงเกท Bias และ ยางล้อປะงเกท Radial [4]

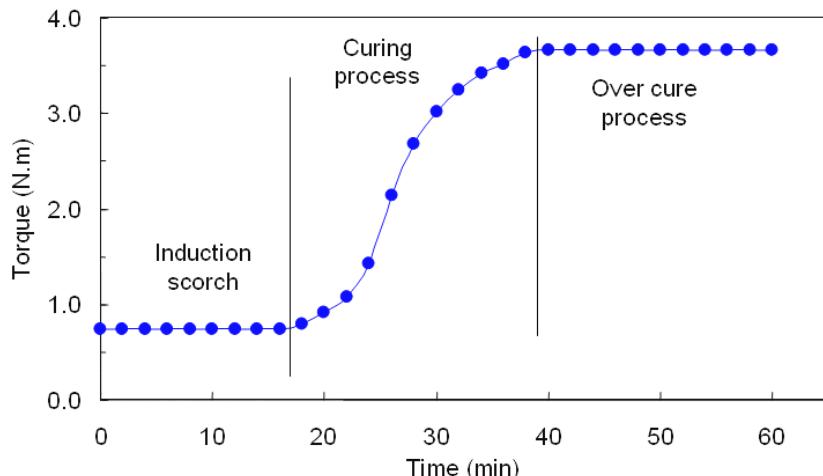
รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงภาพรวมของกระบวนการผลิตยางล้อ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการรอบยางเป็นกระบวนการสุดท้ายในการผลิต การรอบยางจะเกิดขึ้นโดยการนำยางล้อที่ผ่านการประกอบชั้นส่วนของโครงสร้างเข้าด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นดอกยาง, แก้มยาง, ขอบล้อ, ผังด้านใน ฯลฯ ซึ่งเรียกว่า “Green Tire” ใส่ลงในแม่พิมพ์ ตามด้วยกระบวนการกดอัด (Compression Molding) และการให้ความร้อนเพื่อทำให้ยางคอมปาวด์ทุกส่วนเกิดการวัลคาไนซ์ เช่น ซึ่งจะทำให้ยางคงรูปและนำไปใช้งานได้

2.2/ กระบวนการรอบคงรูปยาง

ในกระบวนการรอบคงรูปยางล้อเป็นการให้ความร้อนกับยางคอมปาวด์โดยอาศัยคุณสมบัติการนำความร้อนผ่านผิวของแม่พิมพ์ ความร้อนจะค่อย ๆ กระจายตัวเข้าไปในเนื้อยาง ซึ่งการกระจายตัวของความร้อนนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของคุณภาพที่อัตราความร้อนค่าหนึ่ง ในระหว่างกระบวนการรอบคงรูปยางจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เช่น (Vulcanization Reaction) โดยในการศึกษาสภาพการรอบคงรูปของยางนั้น การเกิดวัลคาไนซ์เช่น จะเกิดได้ทั้งในกรณีที่คุณภาพมีค่าที่และไม่คงที่

2.2.1 การรอบคงรูปยางในสภาพอุณหภูมิคงที่

การศึกษากระบวนการรอบคงรูปของยางโดยทั่วไปจะทำการศึกษาโดยใช้เครื่องทดสอบโอดีอาร์ (ODR, Oscillating Disc Rheometer) ในระหว่างการทดสอบ เครื่องโอดีอาร์จะทำการวัดการเปลี่ยนไปของคุณสมบัติด้านความแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เช่นภายในยางคอมปาวด์ ค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปจะวัดผ่านการเปลี่ยนไปของแรงบิดที่เกิดจากการสั่นของตัววัด (Disc) ภายในช่องวัด (Chamber) ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ การทดสอบดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าปรอร์เซนต์การรอบคงรูปยางภายใต้สภาพอุณหภูมิคงที่ได้ รูปที่ 2.4 แสดงกราฟเอกลักษณ์ (Typical curve) ของการทดสอบโอดีอาร์สำหรับยางโดยทั่วไป



รูปที่ 2.4 กราฟเอกสารลักษณ์ของการทดสอบโดยดีอาร์ของยางทั่วไป

รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของยางในระหว่างปฏิกรณ์ราบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ [5]

ช่วงที่ 1: ช่วงของการเริ่มต้น (Induction Scorch) ในช่วงนี้ความหนืดของยางจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากความร้อน แต่ยังไม่เกิดปฏิกรณ์การคงรูป ดังนั้นค่าแรงบิดที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตามแรงบิดที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับเวลา

ช่วงที่ 2: ช่วงของการเกิดพันธะเคมี (Curing Process) เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ในช่วงนี้อัตราความเร็วของการเกิดปฏิกรณ์ (ความเร็วในการเพิ่มขึ้นของแรงบิด) ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ชนิดของยาง และระบบของสารที่ใช้ทำให้ยางคงรูป

ช่วงที่ 3: ช่วงการผ่านจุดที่ยางคงรูปเต็มที่ (Over cure Process) ในช่วงนี้ ปฏิกรณ์การเชื่อมโยงจะเริ่มหมดไป ยางจะแข็งหรือมีค่าโมดูลัสสูงสุด และถ้าหากให้ความร้อนกับยางต่อไป ยางอาจจะแข็งเพิ่มมากขึ้น (Marching) หรืออาจจะกลับคืน (Reversion) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง

การคำนวณระดับการเกิดวัลคาไนซ์ชั้น (Degree of vulcanization) จากการทดสอบโดยดีอาร์นั้น คำนวณได้จากการเกิดปฏิกรณ์วัลคาไนซ์ชั้นซึ่งจะทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยสามารถได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงบิด (Torque) หรือช่วง Curing Process ตามรูปที่ 2.4 เปอร์เซ็นต์การอบคงรูป α ในสภาวะอุณหภูมิคงที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-1

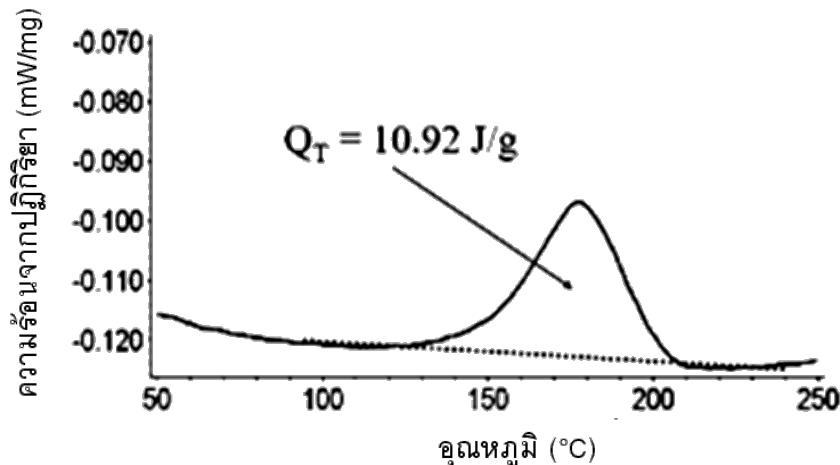
$$c_{isothermal} = \frac{M_t - M_0}{M_\alpha - M_0} \quad 2-1$$

โดยที่	$c_{isothermal}$	คือเปอร์เซ็นต์การอบคงรูป (Degree of Vulcanization)
	M_0	คือค่าแรงบิด (Torque) ตอนเริ่มต้น
	M_t	คือค่าแรงบิด (Torque) ณ. เวลา t ไดๆ
	M_α	คือค่าแรงบิด (Torque) สูงสุดเมื่อสิ้นสุดการเกิดปฏิกรณ์

2.2.2 การอบคงรูปยางในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่

การศึกษากระบวนการอบคงรูปยางในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่โดยทั่วไปสามารถได้โดยการใช้เทคนิคการทดสอบดีเอสซี (DSC, Differential Scanning Calorimetry) ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการเพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา

การเพิ่มเขื่นคงที่ เพื่อทำการหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (Heat of Reaction) ที่เกิดขึ้นโดยเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจะมีการขยายพลังงานความร้อนออกมาน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบดีเอสซีโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.5

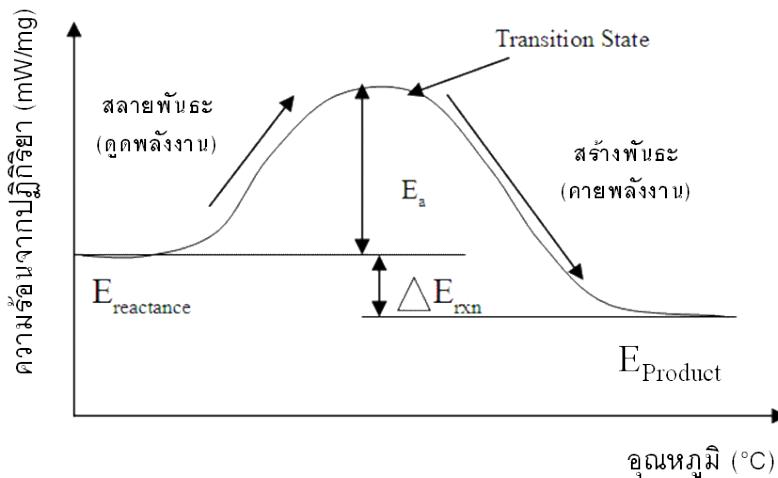


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผลลัพธ์ของค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (Heat of Reaction) ที่ได้จากการทดสอบดีเอสซี [6]

การทดสอบดีเอสซีสามารถนำไปวิเคราะห์หาค่าอัตราและเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของยางจากแบบจำลองทางจนพลศาสตร์ (Kinetic Model) ได้ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป นอกจากนี้ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถนำไปใช้ในแบบจำลองการนำความร้อน เพื่อหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อกำลังความร้อน (Heat Generation) ที่เกิดจากปฏิกิริยาแล้วคำนวณเช่น

2.2.3 การเกิดปฏิกิริยาแล้วคำนวณเช่น

ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลของยางจะมีการให้ความร้อนเพื่อสถาปัตยนิเวศเคมีเดิมแล้วสร้างเป็นพันธะใหม่เพื่อให้ยางคงรูป ซึ่งในการดำเนินไปของปฏิกิริยาอ่อนที่ยางจะเกิดการคงรูปจะต้องผ่านสภาวะหนึ่งคือสภาวะทรานзиชัน (Transition State) ซึ่งเป็นสภาวะชั่วคราว ไม่เสถียร มีพลังงานสูงกว่าสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เนื่องจากมีการบิดเบี้ยวทางโครงสร้าง ซึ่งจะเรียกสารที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ว่าสารเชิงชั้อนกอก้มันต์ (Activated Complex) ซึ่งต้องมีการให้พลังงานเพิ่มขึ้นมากพอที่จะเข้าชนะพลังงานภายใต้ (Activated Energy) เพื่อให้ผ่านสภาวะนี้ไปได้ยางจึงเกิดการคงรูป และในขณะที่มีการให้ความร้อนนี้ก็มีการขยายพลังงานความร้อนออกมานั่นกันซึ่งสามารถวัดค่าความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ได้โดยใช้เทคนิควิวิเดอสซี (DSC, Differential Scanning Calorimetry) ซึ่งจะสนใจศึกษาในช่วง สภาวะทรานзиชัน (Transition State) เนื่องจากเป็นช่วงที่สามารถมองเห็นการเกิดปฏิกิริยาได้ชัดเจนที่สุด โดยสามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการดำเนินไปของปฏิกิริยาของยางจากการทดสอบดีเออชี [7]

จากภาพที่ 2-7 ข้างต้นเป็นการแสดงการแสดงการดำเนินไปของปฏิกิริยาในช่วงสภาวะทราบเชิง (Transition State) เมื่อ $E_{reactants}$ คือพลังงานของสารตั้งต้น, $E_{product}$ คือพลังงานสารผลิตภัณฑ์, E_a คือพลังงานภายใน (Activated Energy), ΔE_{rxn} คือพลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา [7]

2.2.4 แบบจำลองทางเคมีศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการครอบคงรูปของยางจะอาศัยหลักการเกิดปฏิกิริยา vulcanization (Vulcanization Reaction) จากสารตั้งต้นเป็นสารผลิตภัณฑ์ยางที่คงรูป ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลองทางเคมีศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา นอกจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วการคุณสมบัติการนำความร้อนของยางก็มีส่วนสำคัญในกระบวนการครอบคงรูปยางล้อ เนื่องจากในกระบวนการครอบต้องมีการนำความร้อนจากแม่พิมพ์เข้าสู่เนื้อยางซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาที่เหมาะสมเพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาล้ำค่าในรูปที่เข้มข้นสมบูรณ์ทุกจุดภายในยางล้อ

❖ แบบจำลองทางเคมีศาสตร์ (Kinetic Model) ของการเกิดปฏิกิริยา

จากการทดสอบหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคดีเออชี (DSC, Differential Scanning Calorimetry) ในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ (รูปที่ 2.5) สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาอัตราการครอบคงรูปในภายใต้สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่จากสมการที่ 2-2 [11, 12]

$$\frac{dc_{nonisothermal}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{reaction}}{Q_{total}} \quad 2-2$$

โดยที่ $\frac{dc_{nonisothermal}}{dt}$ คืออัตราการเกิดปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์การครอบคงรูปต่อนาที)

$\dot{Q}_{reaction}$ คืออัตราการคายความร้อนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (mW/mg)

Q_{total} คือปริมาณความร้อนรวมของการเกิดปฏิกิริยา (J/g)

จากแบบจำลองทางเคมีศาสตร์ข้างต้น การคำนวนหาเปอร์เซ็นต์การครอบคงรูป (Degree of vulcanization) ของยางภายใต้สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่สามารถทำได้โดยการอินทิเกรทสมการที่ 2-2 ซึ่งเปอร์เซ็นต์การครอบคงรูปภายใต้สภาวะดังกล่าวสามารถนิยามได้ดังสมการที่ 2-3

$$c_{nonisothermal} = \frac{Q_{change}}{Q_{total}} \quad 2-3$$

เมื่อ $c_{nonisothermal}$	คือเปอร์เซ็นต์การอบคงรูป (Degree of vulcanization) ที่สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่
Q_{change}	คือปริมาณความร้อนที่ออกมากที่เวลาได ๆ (J/g)
Q_{total}	คือปริมาณความร้อนรวมของการเกิดปฏิกิริยา (J/g)

ในการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การอบคงรูป (Degree of vulcanization) ทั้งในแบบวิธีทางจุลภาค (Mechanistic approach) และวิธีทางสภาพ (Phenomenological approach) [11] สำหรับงานวิจัยนี้เราจะใช้แบบจำลองในแบบมหภาคเนื่องจากเป็นการศึกษากระบวนการภาพรวม (Whole process) ของการอบคงรูปอย่างล้อ สำหรับสภาพที่อุณหภูมิไม่คงที่นั้น จนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาвлัดค่าในร์เซ่นและเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปสามารถจำลองไดโดยใช้แบบจำลองของ Kamal-Sourour [13-14] ดังแสดงในสมการที่ 2-4

$$\frac{dc}{dt} = (k_1 + k_2 c^m)(1 - c)^n \quad 2-4$$

เมื่อ m และ n คือ อันดับของปฏิกิริยา (Reaction order)

c คือ เปอร์เซ็นต์การอบคงรูป (Degree of vulcanization)

k_1 และ k_2 คือค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant) ซึ่งสามารถหาได้จากการสมการ อาร์เรนียส (Arrhenius equation) ดังแสดงในสมการที่ 2-5 และ 2-6

$$k_1 = a_1 \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \quad 2-5$$

$$k_2 = a_2 \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) \quad 2-6$$

โดยที่ a_1 และ a_2 คือค่าคงที่ได้จากการ Fitting

E_1 และ E_2 คือ Activation Energy ของการเกิดปฏิกิริยา

R คือค่าคงที่ของกําซ (Universal gas constant)

จากสมการข้างต้น (สมการที่ 2-4, 2-5 และ 2-6) มีตัวแปรไม่ทราบค่า 6 ตัว คือ m, n, a_1, a_2, E_1, E_2 โดย m, n, a_1, a_2, E_2 หาได้จากการ Fit curve ของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบดีเออสซี (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) โดยกำหนดให้ตัวแปร m, n, a_1, a_2 จะถูกเขียนอยู่ในรูปของ Power series ที่เป็นพังก์ชันกับอุณหภูมิและกำหนดให้ E_2 เป็นค่าคงที่ (สมการที่ 2-7 และ 2-8) การทำ Curve fitting เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ สามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [11-12] สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์ช่วยในการคำนวณ

$$X_i = \alpha_{i0} + \alpha_{i1}T + \alpha_{i2}T^2 + O(T^3) \quad 2-7$$

α_{ij} เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการ Fitting เมื่อ $i, j = 1, 2, 3$

$$\begin{Bmatrix} m \\ n \\ a_1 \\ a_2 \\ E_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} \\ \alpha_{51} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ T \\ T^2 \end{Bmatrix} \quad 2-8$$

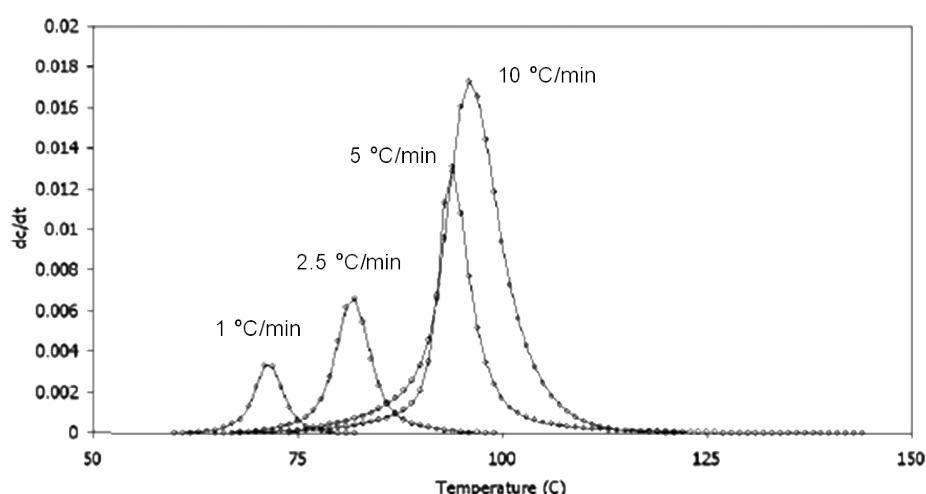
สำหรับค่า E_1 นั้นสามารถหาได้จากสมการของ基辛格方程 (Kissinger Equation) ดังนี้ [12]

$$\frac{d\left(\ln \frac{\dot{T}}{T_{peak}^2}\right)}{d\left(\frac{1}{\dot{T}}\right)} = -\frac{E_1}{R} \quad 2.9$$

เมื่อ \dot{T} คืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (ในการทดสอบดีเอสซี อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมนั้นผู้ทดสอบเป็นผู้กำหนด) และ

T_{peak}^2 คืออุณหภูมิ ณ. จุดที่เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาสูงสุด (Peak ของกราฟในรูปที่ 2.5)

รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ของการทำ Curve Fitting โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Kamal-Sourour และ Kissinger เพื่อหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาและ Energy activation ในระหว่างการเกิดวัสดุในชั้นเชื้อ



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากการทำ Curve fitting โดยใช้แบบจำลองของ Kamal-Sourour และ Kissinger [8]

2.3/ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการนำความร้อน

ในการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการอบยางลักษณะนี้ คุณสมบัติการนำความร้อนของยางก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ ในงานวิจัยนี้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในยางล้อจะถูกพิจารณาโดยใช้ระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylinder coordinate) สมการอนุพันธ์สำหรับการถ่ายเทความร้อนในของแข็งภายใต้สถานะทั่ว ๆ ไปที่ไม่อยู่ตัว คือ

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \quad 2-10$$

โดยที่ ρ คือค่าความหนาแน่น

C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ

k คือค่าสมประสิทธิ์การนำความร้อนและ

\dot{Q} คือค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (Heat of reaction หรือ Heat of generation)

สำหรับการคำนวณด้วยเทคนิควิธีไฟนิตอลิเม้นต์ (Finite element) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการของ กัลเลอร์กินไฟนิตอลิเม้นต์ (Galerkin Finite Element) ดังนี้ [15-17]

$$[M]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{F\} \quad 2-11$$

เมื่อ $[M]$, $[K]$ และ $\{F\}$ คือแมสเมททริกซ์ (Mass Matrix), สติฟเนสเมททริกซ์ Stiffness Matrix และ โหลดเวกเตอร์ Load Vector ตามลำดับ

$$M_{ij} = \iiint \rho C_p \varphi_i \varphi_j dx dy dz \quad 2-12$$

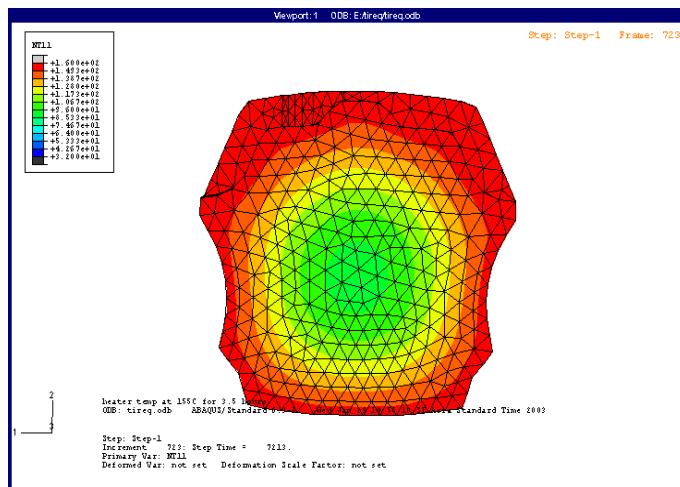
$$K_{ij} = \iiint k \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \frac{\partial \varphi_j}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial z} \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} \right) dx dy dz \quad 2-13$$

$$F_i = \iiint \varphi_i \dot{Q} dx dy dz + \int_{\Gamma} \varphi_i k \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \quad 2-14$$

เมื่อ φ_i และ φ_j เป็นฟังก์ชันในการประมาณค่า (Interpolation Function), $\{T\}$ เป็นเวกเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของอุณหภูมิที่จุดใด ๆ (Nodal Temperature) $\{\dot{T}\}$ เป็นค่าอนุพันธ์เทียบกับเวลา (First Time Derivative) และ n_x , n_y และ n_z เป็นค่าอัรบอมอlov เวกเตอร์ (Normal Vector) ได้สมการสุดท้ายสำหรับใช้งานคือ

$$([M]^a + \theta \Delta t [K]^a) \{T\}^{n+1} = ([M]^a - \Delta t [1 - \theta] [K]^a \{T\}^n) + ((1 - \theta) \{F\}^n + \theta \{F\}^{n+1}) \Delta t \quad 2-15$$

ในการใช้วิธีทางไฟนิตอลิเม้นต์เพื่อคำนวณหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยใช้แบบจำลองการนำความร้อนสามารถทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในยางได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8

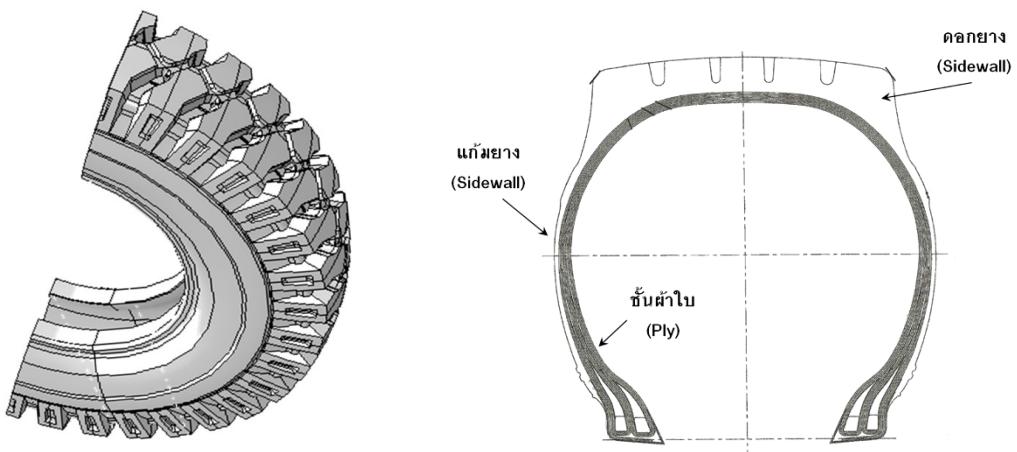


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างผลลัพธ์ของกระบวนการตัวของอุณหภูมิภายในยางโดยใช้ระบบวิธีทางไฟนิตี้เอลิเมนต์ [15]

3/ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

3.1/ ยางล้อ

ยางล้อที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นยางล้อจริงที่มีการผลิตในเชิงพาณิชย์ เป็นยางล้อในกลุ่มของยางล้อประเภทไบแอส (Bias Tire) รูปที่ 3.1 แสดงรูปร่างลักษณะของยางล้อที่ใช้ในการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบยาง เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น ในรายงานฉบับนี้จะเรียกยางล้อในรูปที่ 3.1 ว่ายางล้อโมเดล A ยางล้อโมเดล A จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ คือ แก้มยาง, ดอกยาง, ชั้นผ้าใบ และส่วนที่ใช้รัดขอบกะทะล้อ ยางคอมปาวด์ที่ใช้ผลิตด้วยวิธีการรีไซเคิลยาง สำหรับยางล้อโมเดล A นั้นเป็นยางคอมปาวด์ต่างชนิดเดียวกัน รหัสที่ใช้สำหรับเรียกยางคอมปาวด์ชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.1

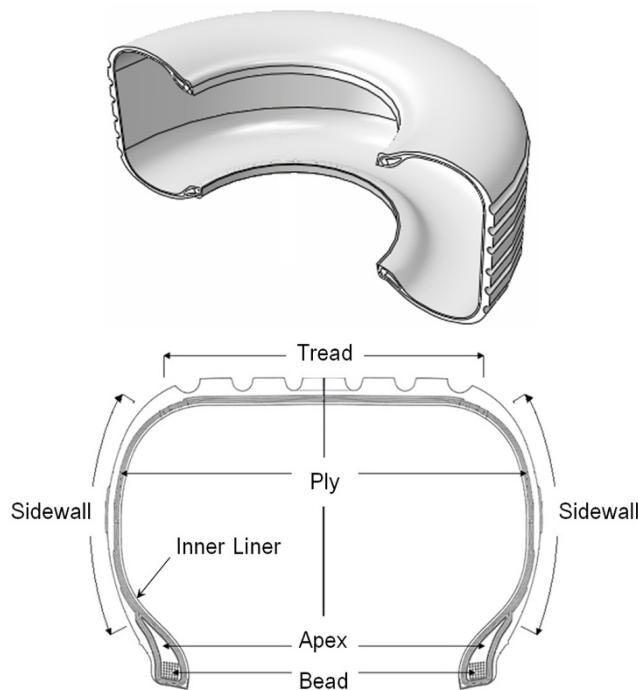


รูปที่ 3.1 รูปร่างลักษณะยางล้อโมเดล A ที่ใช้ในการงานวิจัยนี้

นอกจากยางไมเมเดล A แล้ว งานวิจัยนี้ยังศึกษาพฤติกรรมการเกิดวัลคาไนซ์เข็มขันของยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการผลิตยางล้อใบแอสกีโมเมเดลหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะเรียกต่อไปในรายงานว่ายางล้อโมเมเดล B ส่วนประกอบของยางล้อโมเมเดล B นั้นจะประกอบไปด้วย ดอกยางและแก้มยางซึ่งสำหรับยางล้อโมเมเดล B นั้นเป็นยางคอมปาวด์ชนิดเดียวกัน, ส่วนที่เป็นชั้นผ้าใบ, Inner Liner และ ส่วนที่เป็นขอบล้อ (Apex และ Bead) ยางล้อโมเมเดล B นั้นก็เดียวกัน ยางที่เป็นชั้นผ้าใบ, Inner Liner และ ส่วนที่เป็นขอบล้อ (Apex และ Bead) ยางล้อโมเมเดล B มาก เนื่องจากความหนาของดอกยางนั้น น้อยกว่า ปัญหาทางไนซ์เข็มไม่สมบูรณ์ จึงเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย รหัสที่ใช้สำหรับเรียกยางคอมปาวด์ชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รหัสของยางคอมปาวด์ที่ใช้ในรายงานฉบับนี้*

โมเมเดลยางล้อ	รหัสยางคอมปาวด์		
	ดอกยาง	แก้มยาง	Inner Liner
โมเมเดล A	T301	T354	-
โมเมเดล B	T320	T302	F605



รูปที่ 3.2 รูปร่างลักษณะยางล้อโมเมเดล B ที่ใช้ในการงานวิจัยนี้*

ยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดสอบนั้นได้รับความอนุเคราะห์จากผู้ผลิตยางล้อ เป็นยางคอมปาวด์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง ดังนั้นในการทดสอบจึงทำกับยางคอมปาวด์ที่ได้รับมาโดยตรงปราศจากการปรับแต่งหรือเพิ่มเติมส่วนผสมต่างๆ ตารางที่ 3.1 สรุปรวมยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษาและทดสอบในงานวิจัยนี้

3.1/ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการศึกษาวิจัยประกอบด้วยเครื่อง Oscillating Disc Rheometer (ODR) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) สำหรับ Oscillating Disc Rheometer (ODR) นั้นใช้สำหรับการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เข็มในสภาพอุณหภูมิคงที่ และ DSC จะใช้สำหรับการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เข็มในสภาพที่อุณหภูมิไม่คงที่โดยกำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อเวลาเป็นค่าคงที่

❖ Oscillating Disc Rheometer, ODR

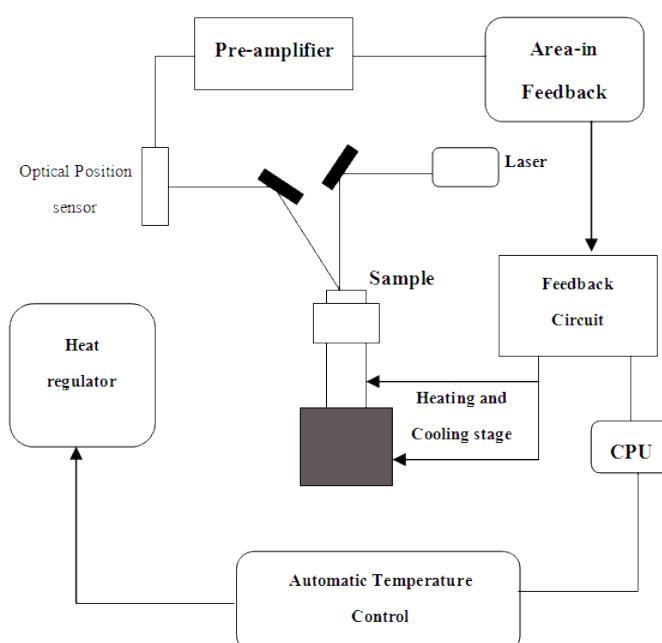
เครื่องโอดีอาร์ (Oscillating Disc Rheometer, ODR) ที่ใช้ทดสอบนั้นเป็นเครื่อง ODR รุ่น MONSANTO[®] 100S (รูปที่ 3.3) บริษัทยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดประมาณ 10-15 กรัม การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2084-07 Standard Test Method for Rubber Property-Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบโอดีอาร์ (Oscillating Disc Rheometer, ODR) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

รูปที่ 3.4 แสดงหลักการของการทดสอบ ODR ยางตัวอย่างจะถูกวางบนโรเตอร์และถูกอัดระหว่างแผ่นขัดที่ร้อนและมีแรงอัดโดยให้อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ จากนั้นโรเตอร์จะแกว่ง (Oscillate) ด้วยมุบบิดและความถี่ที่กำหนด ค่าแรงบิดที่ได้จะเปลี่ยนไปตามการเกิดปฏิกิริยาและเปอร์เซ็นต์การเกิดวัลคาไนซ์ เช่น

การทดสอบจะทำภายใต้สภาวะคงที่จะทำที่อุณหภูมิ 130°C, 150°C และ 165°C (170°C สำหรับยางโนเมเดล B) ความถี่และมุบบิดที่ใช้ในการทดสอบสำหรับยางคอมปาวด์ทุกชนิดที่ทำการศึกษามีค่าคงที่เท่ากับ 1 Hz และ 1 องศาตามลำดับ ตารางที่ 3.2 สรุปค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาการเกิดวัลคาไนซ์เช่นนี้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่



รูปที่ 3.4 พังก์ชันการทำงานของเครื่องทดสอบโอดีอาร์ (Oscillating Disc Rheometer, ODR) [19]

ตารางที่ 3.2 ສภาวะที่ใช้ในการทดสอบด้วยโอดีอาร์ (Oscillating Disc Rheometer, ODR)

ไมเดลยางล้อ	รหัสยางคอมปาวด์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	มุนบิด (องศา)	ความถี่ (赫ertz)
ยางล้อไมเดล A	T301 (Sidewall)	135°C, 150°C และ 165°C	1	1.7
	T354 (Tread)	135°C, 150°C และ 165°C	1	1.7
ยางล้อไมเดล B	T320 (Tread & Side wall)	130°C, 150°C และ 170°C	1	1.7
	F605 (Inner Liner)	130°C, 150°C และ 170°C	1	1.7

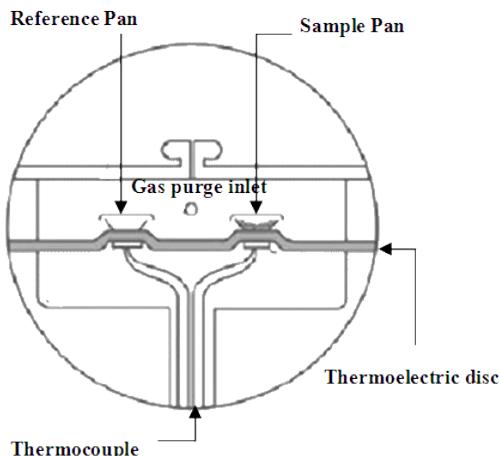
❖ Differential Scanning Calorimetry, DSC

การทดสอบยางคอมปาวด์ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) นั้น ใช้สำหรับศึกษาการเกิดปฏิกิริยาวัลคาโนซีเข้ากันภายใต้อุณหภูมิไม่คงที่และการวัดหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p) การศึกษาทำโดยใช้เครื่องทดสอบดีอีสซีรุ่น Perkin Elmer® DSC7 ดังแสดงในรูปที่ 3.6

การหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการถ่ายเทขายของความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีจะส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงของสารเซลล์ตัวอย่าง (Sample Cell) กับเซลล์อ้างอิง (Reference Cell) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สารตัวอย่างซึ่งในที่นี้คือยางคอมปาวด์จะถูกบรรจุในแคปซูลทำจากอลูมิเนียมโดยมีแคปซูลอลูมิเนียมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง (Reference) ความร้อนจะถูกให้ผ่านเข้าไปในช่องเทอร์โมอิเล็กทริกดิสก์ (Thermoelectric Disk) เข้าไปในเซลล์ตัวอย่างและเซลล์อ้างอิง ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของการให้ความร้อน (Heat Flow) โดยจะวัดความแตกต่างของอุณหภูมิโดยใช้ Thermocouple และใช้กฎของโอม (Ohm's law) ในการคำนวณหาการให้ความร้อน (Heat Flow) ดังสมการที่ 3-1

$$q = \frac{\Delta T}{R_\Omega} \quad 3-1$$

เมื่อ q คือความร้อนที่ให้ (Heat Flow) ΔT คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิ และ R_Ω คือความต้านทานของเทอร์โมอิเล็กทริกดิสก์ (Thermoelectric Disk)



รูปที่ 3.5 ส่วนประภากองต่างๆ ของเครื่องทดสอบ DSC [20]

การทดสอบ DSC นั้นสามารถใช้หาค่าความถี่ความร้อนจำเพาะของยางคอมปาวด์ได้จากการสามการที่ 3-2 เมื่อ m คือน้ำหนักของยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดสอบ

$$C_p = q/m * \Delta T \quad 3-2$$



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบ DSC ไมเดล Perkin Elmer® DSC7 และชั่งงานยางตัวอย่าง

ตัวแปรที่ใช้ในการการทดสอบหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาลักษณะนี้เขียนแสดงในตารางที่ 3.3 การทดสอบจะทำภายใต้สภาวะอากาศทั่วไป (Air condition) ยางคอมปาวด์ที่ใช้ทดสอบประกอบด้วยยางคอมปาวด์ T301 (แก้มยาง) และ T354 (ดอกยาง) สำหรับยางล้อไมเดล A และยางคอมปาวด์ T320 (แก้มยางและดอกยาง) และยางคอมปาวด์ F605 (Inner Liner) สำหรับยางล้อไมเดล B

สำหรับการทดสอบหาค่าความถี่ความร้อนจำเพาะซึ่งจำเป็นสำหรับการคำนวณการกระจายตัวอุณหภูมิในกระบวนการอบนั้น จะทดสอบสำหรับยางคอมปาวด์ที่ใช้ในยางล้อไมเดล A เท่านั้นเพื่อการ Validation โดยให้คัดกรองเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคงที่เท่ากับ $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 สำหรับยางล้อไมเดล B นั้นไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงได้ สืบเนื่องจากดอกยางมีความหนาน้อยจึงทำให้ไม่สามารถผ่านเทอร์โมคัปเปิลได้

ตารางที่ 3-3 แสดงสภาวะในการทดสอบดีอิลเมีย (Differential Scanning Calorimetry, DSC) เพื่อหาอัตรา

ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาลักษณะนี้เขียน

ไมเดลยางล้อ	รหัสยางคอมปาวด์	อุณหภูมิเริ่มต้น	อัตราการให้ความร้อน
-------------	-----------------	------------------	---------------------

		(องศาเซลเซียส)	(องศาเซลเซียส/นาที)
ยางล้อไมเดล A	T301 (Sidewall)	30	2, 5 และ 10
	T354 (Tread)	30	2, 5 และ 10
ยางล้อไมเดล B	T320 (Tread & Sidewall)	30	1, 5 และ 10
	F605 (Inner Liner)	30	1, 5 และ 10

ตารางที่ 3-4 แสดงสภาวะในการทดสอบดีอีซี (Differential Scanning Calorimetry, DSC) เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p)

ไมเดลยางล้อ	รหัสยางคอมปาวด์	ช่วงอุณหภูมิในการทดสอบ (องศาเซลเซียส)	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียส/นาที)
ยางล้อไมเดล A	T301 (Sidewall)	30-170	20
	T354 (Tread)	30-170	20

3.2/ การวัดคุณสมบัติการนำความร้อนของยางคอมปาวด์

คุณสมบัติการนำความร้อนของยางก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการการอบคงรูปยางล้อ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการสร้างกระบวนการทดสอบเพื่อศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน [18] โดยทำการทดสอบกับยาง Styrene-Butadiene Rubber (SBR) โดยมีส่วนผสมของยางธรรมชาติในสัดส่วนที่แตกต่างกันออกไป (ตั้งแต่ 0-10%wt.) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางไม่คงที่ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิหนึ่งค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางจะมีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและอุณหภูมิ ลักษณะการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสามารถจำลองได้จากความสัมพันธ์ (Empirical model) ดังสมการที่ 2-17 [18]

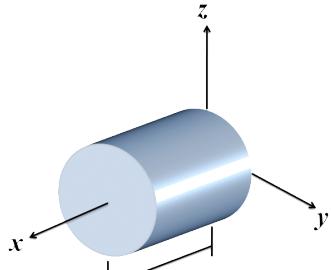
$$k = a + bT + cT^2 \quad 3.3$$

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางคอมปาวด์ในงานวิจัยนี้ จะสร้างกระบวนการทดสอบโดยอาศัยหลักการนำความร้อนของวัสดุแบบไม่คงที่ขึ้นกับเวลา (Transient) ในแนวทรงกระบอกแบบหนึ่งมิติ โดยการพิจารณาว่ายางมีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากันทุกจุด (Homogeneous material) ซึ่งในการทดสอบจะเป็นการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity) โดยมีสมมติฐานในการคำนวณดังนี้

1. เป็นวัสดุเนื้อดียกัน (Isotropic Material) และเป็นการนำความร้อนในแนวทรงกระบอกหนึ่งมิติ

2. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity, α) คงที่ และขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)
3. ไม่คิดความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการพาความร้อนและการแพร่องสีความร้อน (Convection and Radiation)

สมการอนุพันธ์สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิในหนึ่งมิติ (1D heat equation) [21] คือ



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3-4$$

เมื่อ D คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity), T คืออุณหภูมิ, t คือเวลา, และ L คือระยะตามแนวแกน x ในกรณีที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนที่ปลาย (จะเป็น $x = 0$ และ $x = L$) เงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3-5

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad 3-5$$

ถ้ากำหนดให้สภาวะเริ่มต้น อุณหภูมิภายในเป็นฟังก์ชันกับ x , $T(x,0) = f(x)$ ผลเฉลยแม่นตรงของสมการที่ 3-4 จะมีค่าเท่ากับ [21-22]

$$T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{n\pi x}{L} e^{-D\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t} \quad 3-6$$

โดยที่ $A_0 = \frac{1}{L} \int_0^L T(x) dx$ 3-7

และ $A_n = \frac{2}{L} \int_0^L T(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx$ 3-8

เมื่อ $T(t)$ คืออุณหภูมิที่เวลา t ใดๆ และ $T(x)$ คืออุณหภูมิที่ระยะ x ณ.เวลา t ใดๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางคอมปาวด์นั้นจะหาจากการวัดการเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิกับเวลาแล้วทำการประมาณของอุณหภูมิตัวอย่างสมการที่ 3-6 เพื่อหาค่าคงที่ D หรือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) และนำค่าที่ได้ไปคำนวนหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากสมการที่ 3-9 จากไปร่วงซ้ายคำนวนทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในภาคผนวก ก

$$k = D \times \rho \times C_p \quad 3-9$$

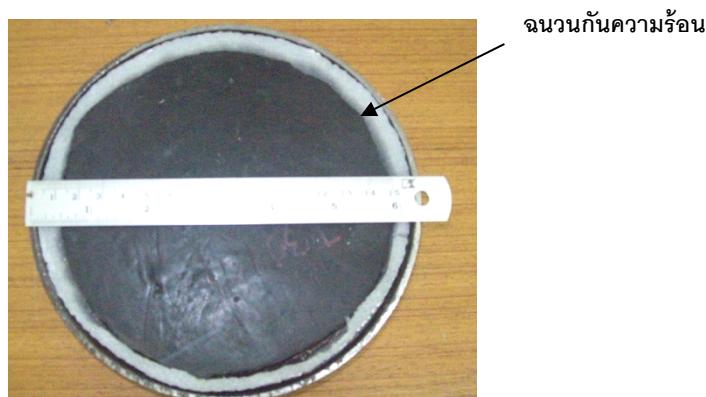
เมื่อ D คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity), ρ คือค่าความหนาแน่น (Density) และ C_p คือค่าความถูกความร้อนจำเพาะซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพ T

การทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อนของยางคอมปาวด์จะทำเฉพาะยางคอมปาวด์ T301 (Sidewall), T354 (Tread) และ ชิ้นฝ้าใบที่ใช้ในยางล้อไมเดล A การทดลองทำโดยใช้เครื่อง Compression ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7



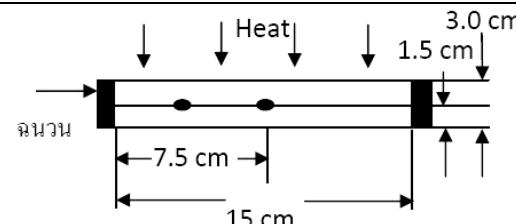
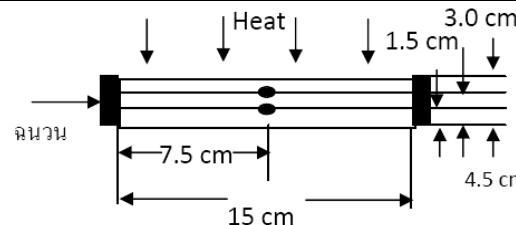
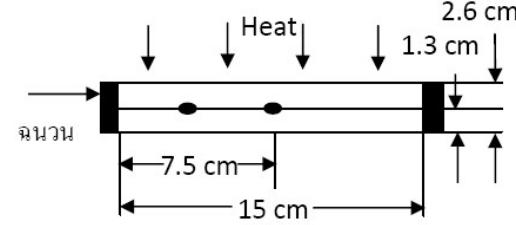
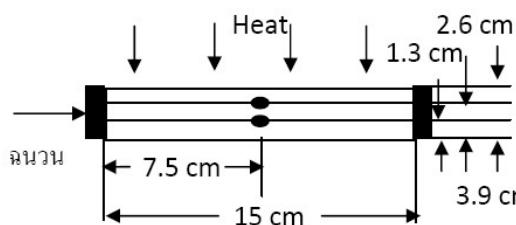
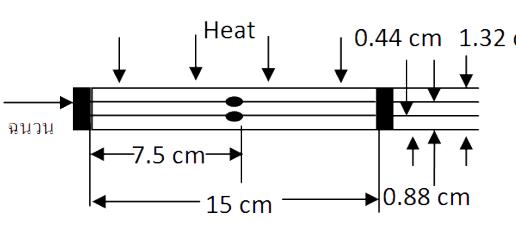
รูปที่ 3.7 เครื่อง Compression molding ใช้สำหรับการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การทดสอบจะทำที่อุณหภูมิ 130°C และ 150°C โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าเท่ากับ 60 นาที ยางคอมปาวด์จะถูกเตรียมให้อยู่ในลักษณะแผ่นกลม (รูปที่ 3.8) เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 cm. ตำแหน่งการผิงเทอร์โมคัปเปิลและความหนาของชิ้นงานทดสอบแสดงในตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ตารางที่ 3-5 แสดงสภาวะในการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

ยางคอมปาวด์	อุณหภูมิ	ความหนา	ตำแหน่งการผังเทอร์โมคัปเบล	เวลาที่ใช้ทดสอบ
T301	130 °C	3.0 cm.		60 นาที
T301	150 °C	4.5 cm.		60 นาที
T354	130 °C	2.6 cm.		60 นาที
T354	150 °C	3.9 cm.		60 นาที
ขันผ้าใบ	150 °C	1.32 cm.		60 นาที

3.3/ การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของยางคอมปาวด์

ในการวัดค่าความหนาแน่นของยางคอมปาวด์ทำโดยเทคนิคการแทنที่น้ำ โดยการตัดยางคอมปาวด์ให้มีขนาดตามต้องการแล้วนำไปซึมน้ำหนัก จากนั้นใส่ชิ้นยางตัวอย่างที่ต้องการทดสอบลงไปแล้วทำการซั่นน้ำหนักของน้ำที่มียางเข้าไปแทนที่แล้วทำการหาความหนาแน่นของยางได้ดังสมการ

$$\rho_R = \frac{W_R}{W_w} \times \rho_w \quad 3-10$$

เมื่อ ρ_R , ρ_w , W_R และ W_w คือค่าความหนาแน่นของยาง, ค่าความหนาแน่นของน้ำ, น้ำหนักของยางและน้ำหนักของน้ำตามลำดับ จากการทดสอบพบว่ายางคอมปาวด์ T301 และ T354 มีความหนาแน่นเท่ากันคือ $1,120 \text{ kg/m}^3$ สำหรับชั้นผ้าใบนั้นค่าความหนาแน่นนำมาจาก Literature ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1,115 \text{ kg/m}^3$

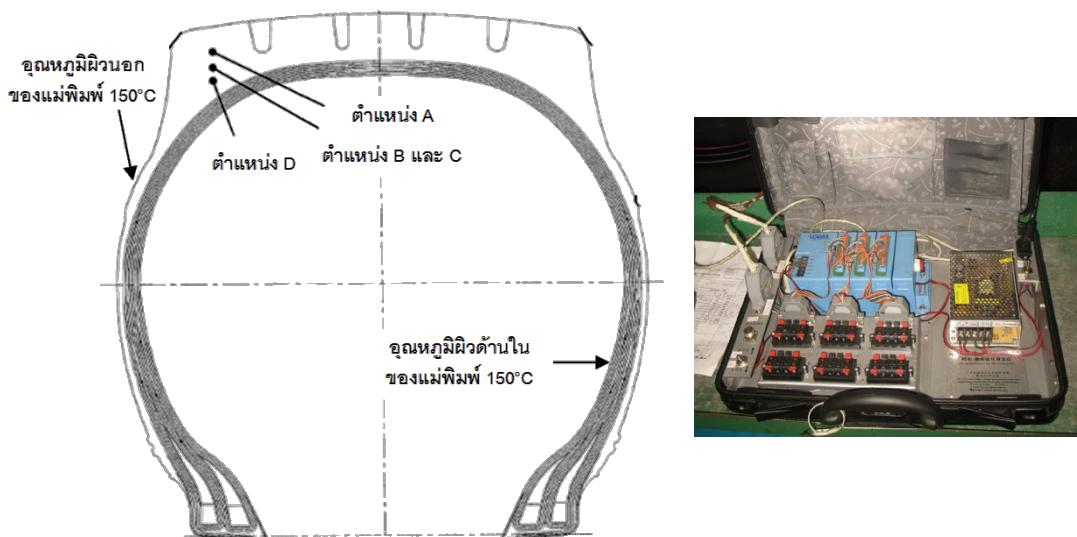
3.4/ การวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการอบคงรูปยางในกระบวนการผลิตจริง

เพื่อเป็นการเบริยบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข การวัดอุณหภูมิในยางล้อขัณฑ์ที่ทำการอบจริงเป็นสิ่งจำเป็น การวัดอุณหภูมิในกระบวนการผลิตจริงจะทำการวัดกับยางล้อโมเดล A เท่านั้นเนื่องจากดอกยางมีความหนาเพียงพอต่อการฝังเทอร์โมคัปเปลี่ยน ก่อนทำการวัดจำเป็นต้องมีการเตรียมแม่พิมพ์โดยการเจาะรูเพื่อให้สามารถสอดเทอร์โมคัปเปลี่ยน รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการเจาะแม่พิมพ์ยางล้อโมเดล A เพื่อใช้ในการฝังเทอร์โมคัปเปลี่ยน



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งการฝังเทอร์โมคัปเปลี่ยนแม่พิมพ์เพื่อใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิระหว่างกระบวนการอบ

การฝังเทอร์โมคัปเปลี่ยนทำทั้งหมด 4 จุดด้วยกันโดยที่ตำแหน่ง A จะห่างจากผิวดอกยาง 0.8 cm. ตำแหน่ง B, และ C จะห่างจากผิวดอกยางเท่ากันคือ 1.5 cm. เพื่อทดสอบ Reproducibility ของการวัด และตำแหน่งสุดท้ายคือตำแหน่ง D นั้นจะฝังลึกห่างจากผิวดอกยางเป็นระยะ 2.2 cm. รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปลี่ยนที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนไปของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบยางล้อ เมื่อเข้าสู่กระบวนการอบยางล้อ ยาง Green tire จะถูกนำเข้าสู่แม่พิมพ์ตามด้วยกระบวนการการกดขัด (Compression molding) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการกรดขัดจึงทำการสอดเทอร์โมคัปเปลี่ยนเข้าไปยังตำแหน่งต่างๆ โดยมีการเตรียมตัววัสดุระยะเพื่อให้วัดที่ความลึกที่ถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งในการผังเทอร์โนมีคัปเบลและชุดวัดและเก็บสัญญาณ

การอบยางเพื่อทดสอบนั้นจะทำการอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นระยะเวลา 100 นาที ในระหว่างกระบวนการอบ ค่าอุณหภูมิจะถูกบันทึกเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากเทคนิควิธีไฟในต่อวิลเมনต์ เนื่องจากการทดลองนี้มีความจำเป็นต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงทำการทดลองที่ 150°C ที่เวลาในการอบ 100 นาทีเท่านั้น



รูปที่ 3.11 แสดงการเตรียมผังเทอร์โนมีคัปเบลและการต่อสายเพื่อวัดสัญญาณ

4/ ผลลัพธ์ที่ได้

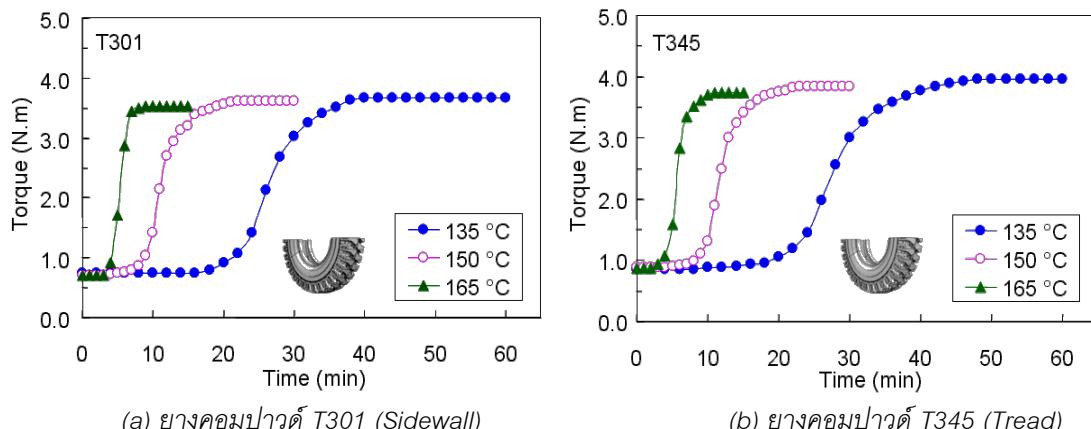
เพื่อที่จะสามารถคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการครอบยางล้อ จำเป็นที่ต้องศึกษาถึงพฤติกรรมการเกิดวัลคาไนซ์เข็んของยางคอมปาวด์แต่ละชนิด ที่เป็นส่วนประกอบของยางล้อเสียก่อน ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงผลที่ได้จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เข็นของยางคอมปาวด์ ด้วยเทคนิค Oscillating Disc Rheometer (ODR) สำหรับการครอบคงรูปที่สภาวะอุณหภูมิคงที่ และเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) สำหรับสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่

4.1/ การศึกษาการเกิดวัลคาไนซ์เข็นภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่

รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด (Torque) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ สำหรับยางคอมปาวด์ T301 ที่ใช้เป็นส่วนประกอบ Sidewall และยางคอมปาวด์ T345 ที่ใช้เป็นส่วนประกอบ Tread ในยางล้อไมเดล A การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เข็นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิในการครอบสูงขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวสามารถสังเกตุเห็นได้ทั้งยางคอมปาวด์ T301 และ T345 ผลลัพธ์ของแรงบิดที่ได้สามารถนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การครอบคงรูปซึ่งเป็นพังก์ชันกับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการครอบจากสมการที่ 4-1

$$c_{isothermal} = \frac{M_t - M_0}{M_\alpha - M_0} \quad 4-1$$

โดยที่	$c_{isothermal}$	คือเปอร์เซ็นต์การครอบคงรูป (Degree of Vulcanization)
	M_0	คือค่าแรงบิด (Torque) ตอนเริ่มต้น
	M_t	คือค่าแรงบิด (Torque) ณ. เวลา t ไดๆ
	M_α	คือค่าแรงบิด (Torque) สูงสุดเมื่อสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยา

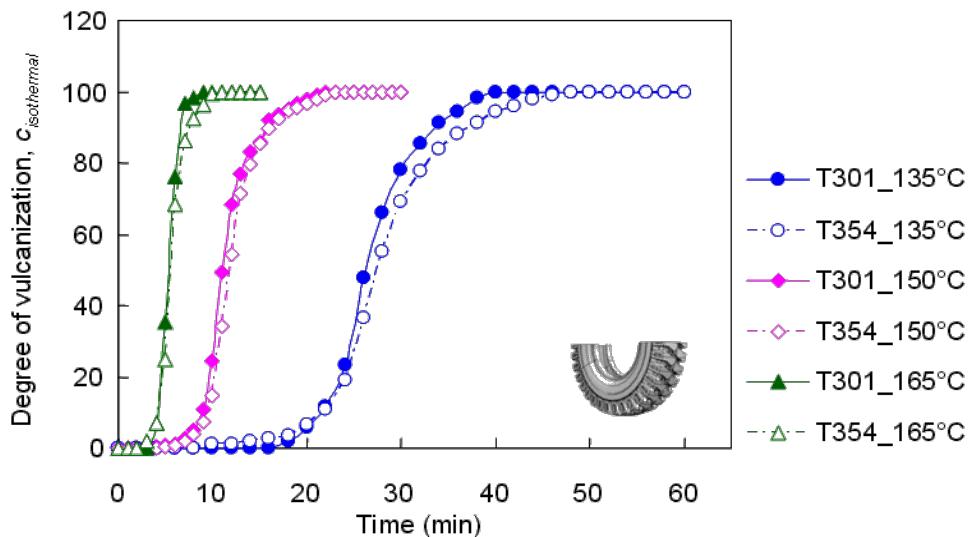


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิด (Torque) ต่อเวลาที่สภาวะอุณหภูมิคงที่จากการทดสอบ Oscillating Disc Rheometer สำหรับยางคอมปาวด์ (a) T301, side wall และ (b) T345, Tread ที่ใช้สำหรับยางล้อไมเดล A

รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์การครอบคงรูปของยางคอมปาวด์ T301 และยางคอมปาวด์ T345 ที่อุณหภูมิการครอบ 135°C, 150°C, และ 165°C ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ายางคอมปาวด์สองชนิดมีพฤติกรรมการเกิดวัลคาไนซ์เข็นใกล้เคียงกัน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ (135°C) การเพิ่มขึ้นของแรงบิดซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดวัลคาไนซ์เข็นจะเริ่มสังเกตุเห็นได้ที่เวลาประมาณ 20 นาที หลังจากเริ่มการครอบและปฏิกิริยาจะสิ้นสุดลงที่เวลาประมาณ 40 นาที ซึ่งพฤติกรรมการเกิดวัลคาไนซ์เข็นจะคล้ายกันทั้งยางคอมปาวด์ T301 และ T345 ระยะเวลาที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาจะลดลงและช่วงเวลาการ

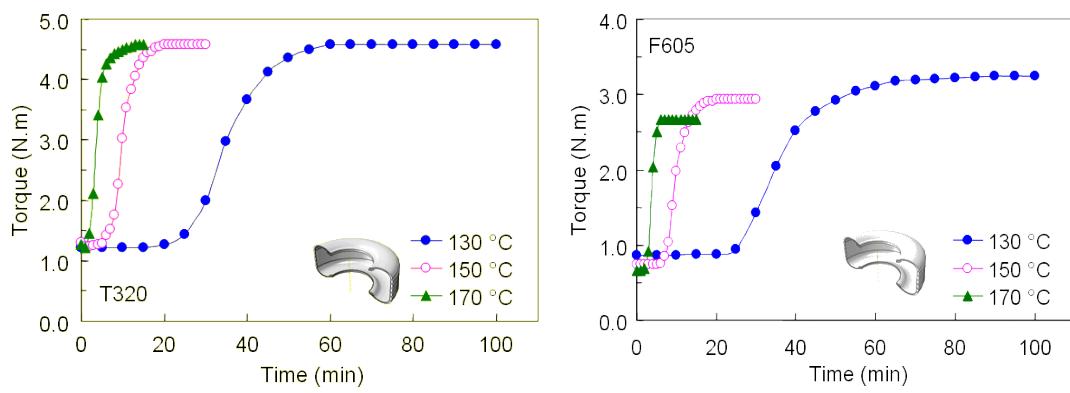
เกิดปฏิกิริยาจะสั่นลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้น สำหรับที่อุณหภูมิ 165°C การเริ่มเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ เช่นสามารถสังเกตเห็นได้ภายใน 5 นาทีหลังจากเริ่มกระบวนการอบและเวลาที่ใช้ในระหว่างกระบวนการการ กีดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์นี้มีค่าประมาณ 4 นาที ซึ่งที่ยางคอมปาวด์เกิดการคงรูป (Curing Process รูปที่ 2-4) จะแคบลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะมีพลังงานมากพอที่จะเข้าช่วย พลังงานภายในในการที่จะสร้างพันธะใหม่ทำให้สามารถผ่านสภาพทราบซึ่งกันในกระบวนการการเกิดปฏิกิริยาได้ ง่ายกว่ากระบวนการที่มีการให้อุณหภูมิต่ำกว่า

สำหรับทุกอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ พฤติกรรมการเกิดวัลคาไนซ์นั้นมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ซึ่งในการผลิตยางล้อนั้นจำเป็นต้องให้ยางคอมปาวด์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นส่วนประกอบ ของยางล้อมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เช่นกันใกล้เคียงกันให้มากที่สุด



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราการอบคงรูปของยางคอมปาวด์ T301 และยางคอมปาวด์ T354 สำหรับยางในเดล A ที่อุณหภูมิการอบ 135°C , 150°C , และ 165°C

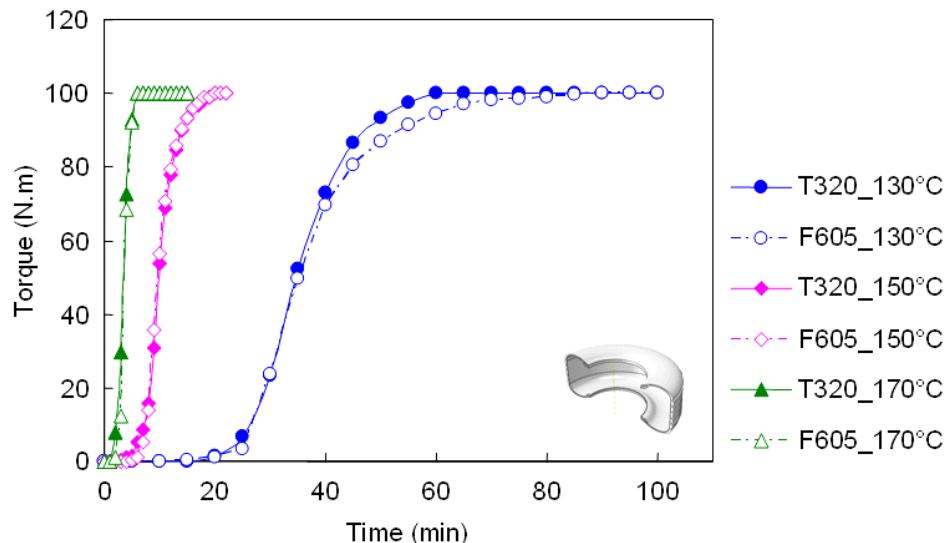
การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เช่นนี้ภายใต้สภาพอุณหภูมิคงที่ยังได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยการใช้ยางคอมปาวด์ T320 และ F605 ที่ใช้สำหรับยางล้อไมเดล B รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงการเกิดวัลคาไนซ์เช่นนี้โดยสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงบิด (Torque) พฤติกรรมที่เกิดขึ้นนั้นคล้ายกับกรณีของยางคอมปาวด์ T301 และ T354 กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเริ่มต้นของปฏิกิริยาวัลคาไนซ์จะเร็วขึ้น รวมถึงช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยาจะสั้นลงด้วย รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดวัลคาไนซ์ของยางทั้งสองชนิด (T320 และ F605) ซึ่ง พบว่าที่อุณหภูมิการอบเดียวกัน อัตราการเกิดวัลคาไนซ์เช่นนี้จะเหมือนกันซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดทั่วไปของการผลิตและการอบยางล้อ



(a) ยางคอมปาวด์ T320 (Sidewall & Tread)

(b) ยางคอมปาวด์ F605 (Inner Liner)

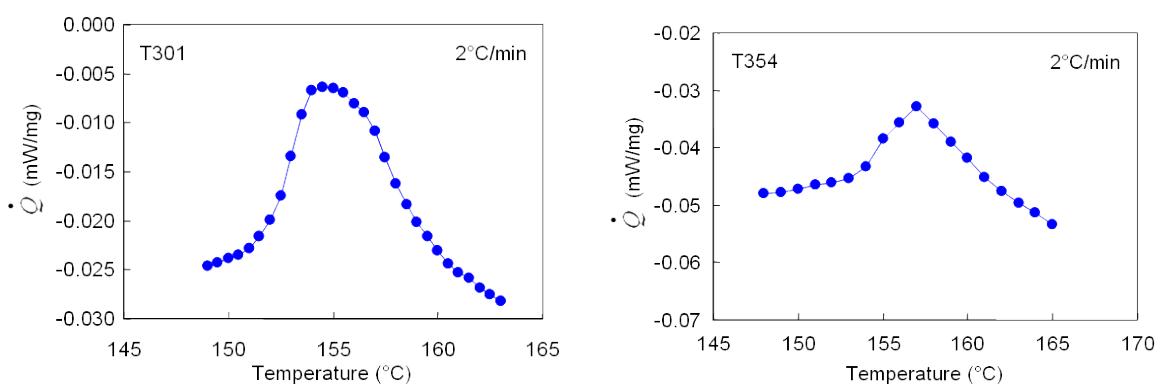
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิด (Torque) ต่อเวลาที่สภาวะอุณหภูมิคงที่จากการทดสอบ
Oscillating Disc Rheometer สำหรับยางคอมปาวด์ (a) T320, side wall & Tread และ
(b) F605, Inner Liner ที่ใช้สำหรับยางล้อโนเมเดล B

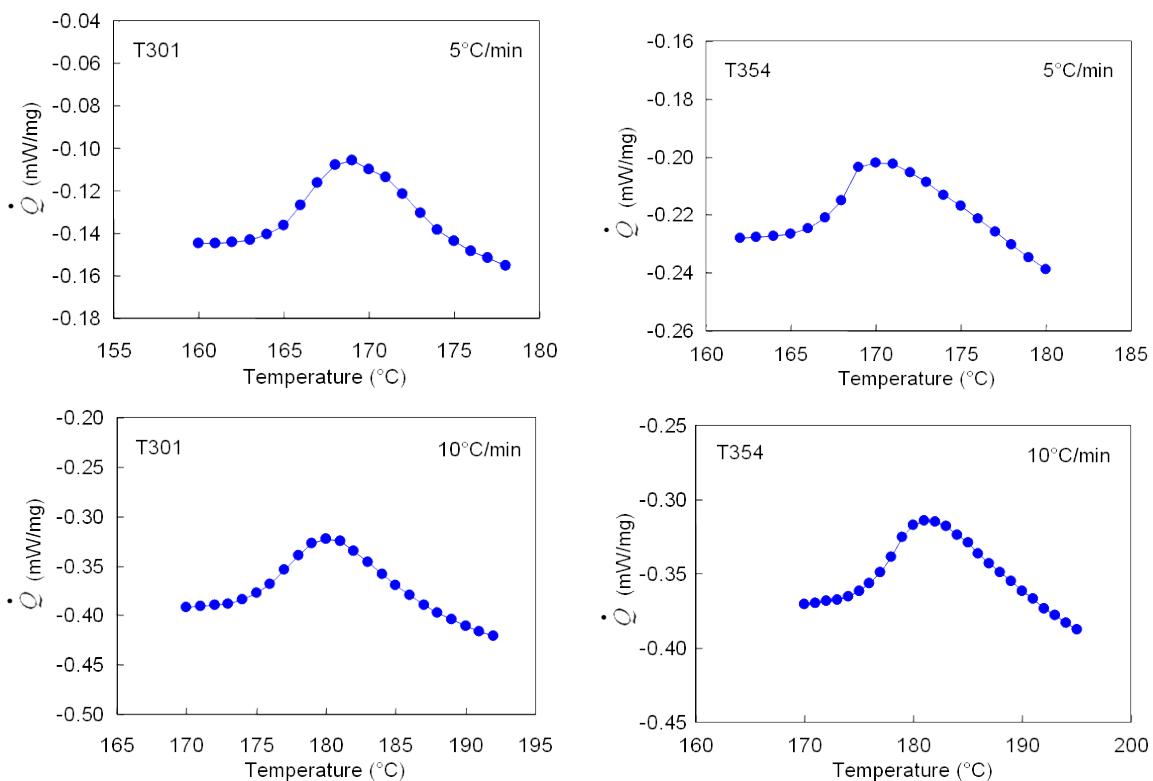


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบอัตราการอบคงรูปของยางคอมปาวด์ T320 และยางคอมปาวด์ F605 สำหรับยางโนเมเดล B ที่อุณหภูมิกการอบ 130°C, 150°C, และ 170°C

4.2/ การศึกษาการเกิดวัลคาไนซ์เข็นภายในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่

การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เข็นภายในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่จะทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) การศึกษาจะทำภายใต้สภาวะอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) คงที่ รูปที่ 4.5 แสดงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เข็นที่อัตราการให้ความร้อน 2, 5 และ 10°C/min สำหรับยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ที่ใช้สำหรับยางล้อโนเมเดล A





รูปที่ 4.5 ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา vulcanization สำหรับยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ที่อัตราการการให้ความร้อน (Heating rate) 2, 5 และ 10 °C/min

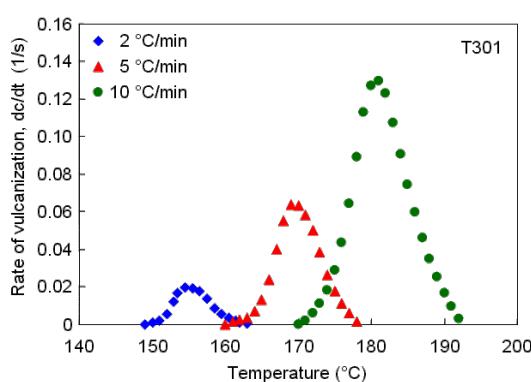
จากผลการทดลองเพื่อหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา vulcanization ที่ได้จากการวัดด้วย DSC สามารถน้าผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวนหาค่าอัตราการอบคงรูปของยางคอมปาวด์ชนิดต่าง ๆ จากสมการที่ 4-2

$$\frac{dc_{nonisothermal}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{reaction}}{Q_{total}} \quad 4-2$$

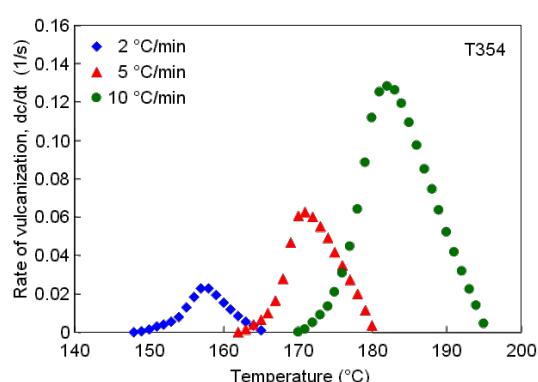
โดยที่ $\frac{dc_{nonisothermal}}{dt}$ คืออัตราการเกิดปฏิกิริยา (เบอร์เซ็นต์การอบคงรูปต่อนาที)

$\dot{Q}_{reaction}$ คืออัตราการความร้อนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา (mW/mg)

Q_{total} คือปริมาณความร้อนรวมของการเกิดปฏิกิริยา (J/g)



(a) ยางคอมปาวด์ T301



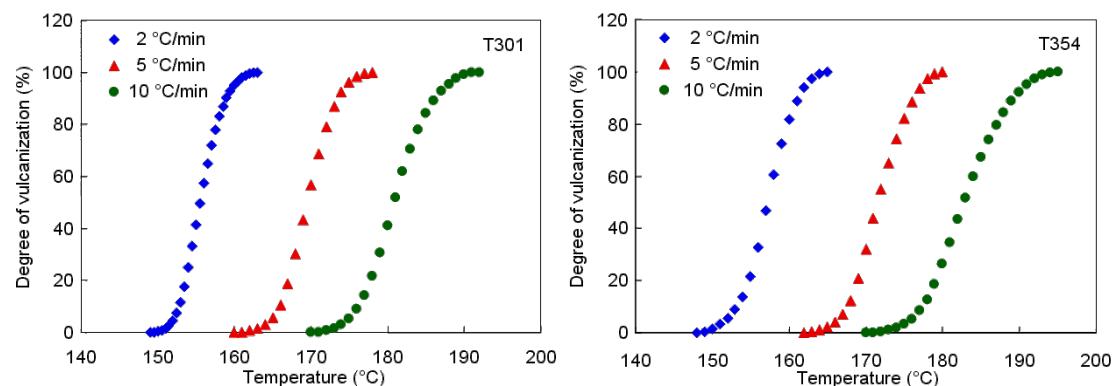
(b) ยางคอมปาวด์ T354

รูปที่ 4.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยา vulcanization (%) ของยางคอมปาวด์ (a) T301 และ (b) T354 ที่อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 2, 5 และ 10°C/min คำนวนจากสมการที่ 4-2

จากผลลัพธ์ของอัตราการเกิด vulcanization (%) (รูปที่ 4.6) สามารถนำไปคำนวนเปอร์เซ็นต์การอบคุณภาพ (Degree of vulcanization) ที่ช่วงอุณหภูมิต่างกันได้สภาวะอุณหภูมิการอบไม่คงที่ซึ่งถูกควบคุมให้มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นค่าคงที่ 2, 5 และ 10°C/min จากสมการที่ 4-3 โดยการอินทิเกรทสมการที่ 4-2 ซึ่งคำนวนจากพื้นที่ใต้กราฟรูปที่ 4.6

$$c = \frac{Q_{Change}}{Q_{Total}} \quad 4-3$$

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์การอบคุณภาพที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ จากผลลัพธ์ที่ได้ ยางคอมปาวด์ T301 และ T354 มีพฤติกรรมการเกิด vulcanization (%) ที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือที่อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ต่ำ ยางคอมปาวด์จะเริ่มเกิด vulcanization (%) ที่อุณหภูมิต่ำ ในกรณีที่ให้ความร้อนที่อัตรา 2°C/min ยางคอมปาวด์ทั้งสองชนิดเริ่มเกิด vulcanization (%) ที่ 150°C และปฏิกิริยาสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 160°C สำหรับในกรณีที่ใช้อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) สูง (10°C/min) การเกิด vulcanization (%) ของยางจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง สำหรับยางคอมปาวด์ทั้งสองชนิด การเกิด vulcanization (%) จะมีลักษณะเหมือนกันคือเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 175°C และสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 195°C สำหรับอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10°C/min จากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ จะเกิดการขยายความร้อนรวม (Heat Total) น้อยกว่าที่อัตราการให้ความร้อนสูง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในปริมาณน้อยจะเกิดการสะสมพลังงานความร้อนภายในการทำให้สามารถเข้าระบบพลังงานภายในพื้นที่เดิมเพื่อสร้างพื้นที่ใหม่ได้ดีกว่า

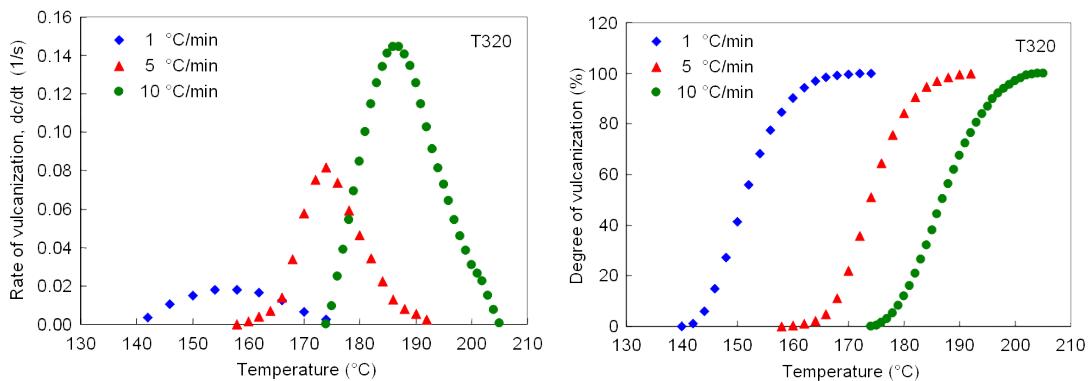


(a) ยางคอมปาวด์ T301

(b) ยางคอมปาวด์ T354

รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การอบคุณภาพ (Degree of vulcanization) ของยางคอมปาวด์ (a) T301 และ (b) T354 ที่อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 2, 5 และ 10°C/min คำนวนจากพื้นที่ใต้กราฟรูปที่ 4.5

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบและยืนยันพฤติกรรมที่สังเกตุได้จากการทดสอบ DSC เราได้ศึกษาอย่างคอมปาวด์ T320 ที่เข้าส่วนที่เป็นแก้มยางและดอกยางสำหรับยางล้อไมเดล B เพิ่มเติม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.8 แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยา vulcanization (%) และเปอร์เซ็นต์การอบคุณภาพของยางคอมปาวด์ T320 ภายใต้อัตราการให้ความร้อน 1, 5 และ 10°C/min พฤติกรรมการเกิด vulcanization (%) ของยางคอมปาวด์ T320 มีลักษณะเหมือนกับยางคอมปาวด์ (T301 และ T354) ที่เข้าส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่าการอบที่อัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น การเกิด vulcanization (%) จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าการอบที่อัตราการให้ความร้อนต่ำ



รูปที่ 4.8 อัตราการเกิดปฏิกิริยา vulcanization และเปอร์เซ็นต์การ vulcanization ของยางคอมปาวด์ T320 ที่อัตราการให้ความร้อน 1, 5 และ 10 °C/min

จากแบบจำลองทางจนพลศาสตร์ (Kinetic Model) ของ Kamal-Sourour [13-14] ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการ vulcanization (Vulcanization rate) และอุณหภูมิ (สมการที่ 2.4, 2.5 และ 2.6) ทำให้เราสามารถคำนวณหาค่า Activation Energy ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา vulcanization ได้โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical curve fitting) โดยการใช้โปรแกรมสำหรับจัดทำทางคณิตศาสตร์เข้าช่วยในการ Fit curve ผลการทดลองที่ได้จาก DSC กับสมการที่ 2-4 ถึงสมการที่ 2-8 ที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ จากแบบจำลองของ Kamal-Sourour ค่า Activation Energy, E_1 สามารถคำนวณได้จากสมการ Kissinger

$$\text{Equation (สมการ 2-9)} \text{ ค่า } \frac{E_1}{R} \text{ คือความชัน (Slope) ของกราฟที่ Plot ระหว่าง } \ln \frac{\dot{T}}{T_{peak}^2} \text{ กับ } \frac{1}{T}$$

$$\frac{d \left(\ln \frac{\dot{T}}{T_{peak}^2} \right)}{d \left(\frac{1}{T} \right)} = -\frac{E_1}{R} \quad 2.9$$

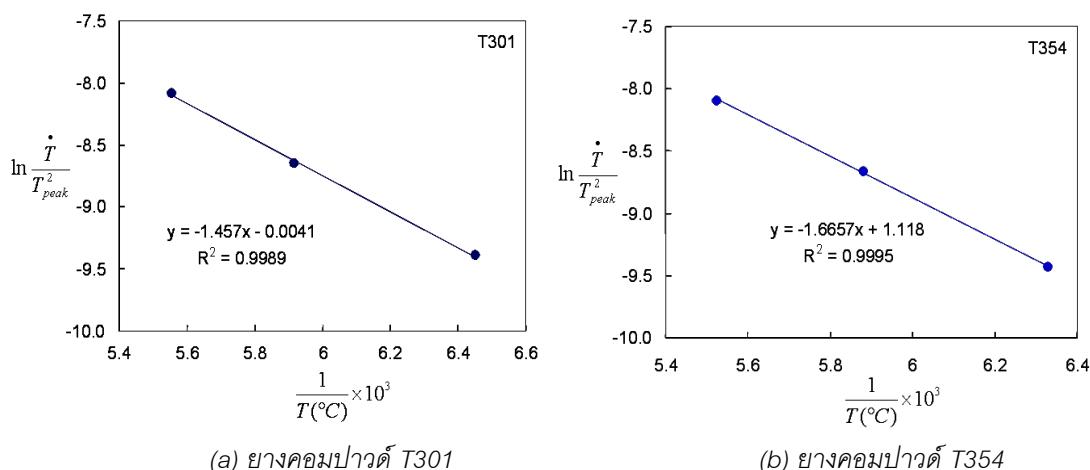
โดยที่ \dot{T} คืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (ในการทดสอบ DSC อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทดสอบยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ถูกกำหนดให้เป็น 2, 5 และ 10 °C/min) และ T_{peak}^2 คืออุณหภูมิ ณ. จุดที่เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาสูงสุด (Peak ของกราฟอัตราการเกิดปฏิกิริยา vulcanization) ตารางที่ 4.1 แสดงค่า T_{peak}^2 ที่ได้จากการทดสอบ DSC ของยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ที่สอดคล้องกับอัตราการให้ความร้อน (\dot{T}) ต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่า T_{peak}^2 สำหรับยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ที่วัดได้จากการทดสอบ DSC ที่อัตราการให้ความร้อน (\dot{T}) ที่ 2, 5, 10 °C/min

ยางล้อโมเดล A	Heating rate (°C/min)	T_{peak} (°C)
T301 (Sidewall)	2	155
	5	169

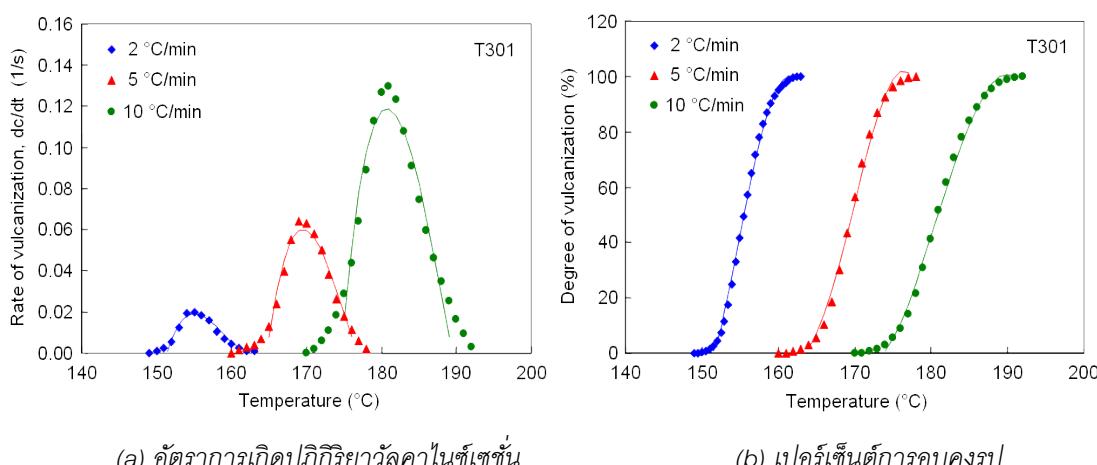
	10	180
	2	158
T354 (Tread)	5	170
	10	181

รูปที่ 4.9 แสดงการหาค่า Activation Energy, E_1 จากสมการ Kissinger Equation ของยางคอมปาวด์ T301 และ T354 สำหรับยางคอมปาวด์ T301 ค่า Activation Energy, E_1 มีค่าเท่ากับ 1.21×10^4 kJ/kmol และ 1.30×10^4 kJ/kmol สำหรับยางคอมปาวด์ T301 จากผลการทดลองสังเกตุได้ว่า ค่า Activation Energy สำหรับยางคอมปาวด์ทั้งสองชนิด (T301 และ T354) ที่ใช้ในยางล้อไมเมเดล A มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่ายางทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาการเกิดวัลคาไนซ์ เช่นกัน

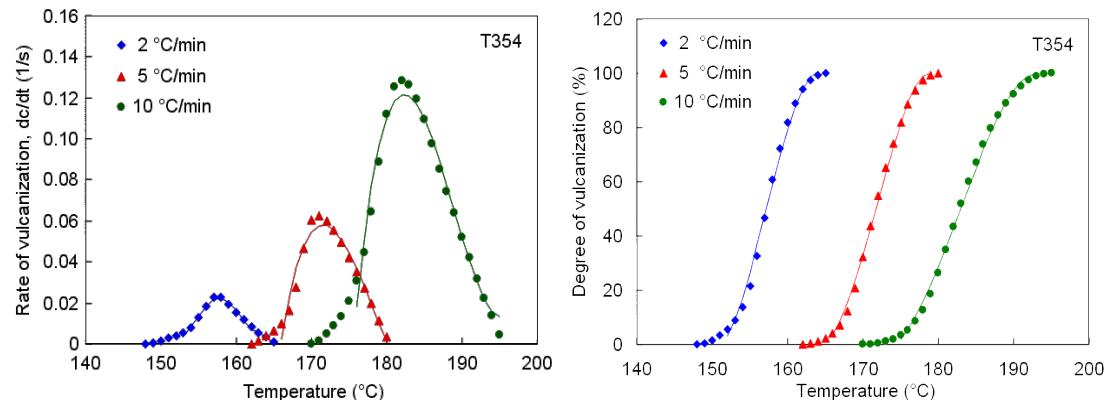


รูปที่ 4.9 การหาค่า Activation Energy สำหรับยางคอมปาวด์ T301 (a) และ ยางคอมปาวด์ T354 (b)
จากการทดสอบ DSC

รูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จาก DSC กับค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Kamal-Sourour สำหรับยางคอมปาวด์ T301 และ T354 (ใช้สำหรับยางล้อไมเมเดล A) จากรูปแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางจน looseness ของ Kamal-Sourour สามารถแสดงพฤติกรรมของการเกิดวัลคาไนซ์ เช่นที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ ได้ดีในระดับหนึ่ง ค่าคงที่จากการ Fit Curve ผลการทดลองด้วยสมการของ Kamal-Sourour แสดงในตารางที่ 4-2 ถึง ตารางที่ 4-4 สำหรับอัตราการให้ความร้อนที่ 2, 5, 10°C/min ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง DSC กับการ Fit curve ด้วยแบบจำลองทางจนพลศาสตร์ของ Kamal-Sourour ของยางคอมปาวด์ T301 ที่อัตราการให้ความร้อน 2, 5 และ 10°C/min



(a) อัตราการเกิดปฏิกิริยา vulcanization

(b) เบอร์เซ็นต์การอบคงรูป

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง DSC กับการ Fit curve ด้วยแบบจำลองทางจนพลศาสตร์ของ Kamal-Sourour ของยางคอมปาวด์ T354 ที่อัตราการให้ความร้อน 2, 5 และ 10°C/min

ตารางที่ 4-2 ค่าคงที่ทางจนพลศาสตร์ที่คำนวณจากแบบจำลองของ Kamal-Sourour สำหรับยางคอมปาวด์ T301 (Sidewall) และ T354 (Tread) ที่ใช้สำหรับยางล้อโมเดล A ที่อัตราความร้อน 2°C/นาที

ค่าคงที่	$\alpha_{i2} \times 1$		$\alpha_{i2} \times T$		$\alpha_{i2} \times T^2$	
	T301	T354	T301	T354	T301	T354
m	2.45×10^1	2.40×10^2	1.30×10^{-2}	-4.81×10^0	-1.81×10^{-4}	3.20×10^{-2}
n	-5.49×10^{-1}	-6.26×10^2	2.80×10^{-1}	1.24×10^1	-3.65×10^{-3}	-8.14×10^{-1}
a_1	-1.77×10^3	1.09×10^3	3.40×10^1	-2.10×10^1	-2.19×10^{-1}	1.36×10^{-1}
a_2	2.36×10^{-2}	-2.29×10^2	1.59×10^{-1}	4.29×10^0	-1.99×10^{-3}	-2.68×10^{-2}
E_2	-4.11×10^4	-5.40×10^4	0	0	0	0
E_1	1.21×10^4	1.30×10^4	0	0	0	0

ตารางที่ 4-3 ค่าคงที่ทางจนพลศาสตร์ที่คำนวณจากแบบจำลองของ Kamal-Sourour สำหรับยางคอมปาวด์ T301 (Sidewall) และ T354 (Tread) ที่ใช้สำหรับยางล้อโมเดล A ที่อัตราความร้อน 5°C/นาที

ค่าคงที่	$\alpha_{i2} \times 1$		$\alpha_{i2} \times T$		$\alpha_{i2} \times T^2$	
	T301	T354	T301	T354	T301	T354
m	2.60×10^2	5.24×10^1	-4.84×10^0	-9.20×10^{-1}	3.01×10^{-2}	5.36×10^{-3}
n	-1.79×10^3	-2.78×10^3	3.29×10^1	5.03×10^1	-2.02×10^{-1}	-3.03×10^{-1}
a_1	-8.27×10^1	-4.03×10^3	9.76×10^{-1}	7.03×10^1	-2.88×10^{-1}	-4.08×10^{-1}
a_2	-2.59×10^3	-2.83×10^2	4.50×10^1	4.83×10^0	-2.60×10^{-1}	-2.75×10^{-2}
E_2	-7.20×10^4	-6.25×10^4	0	0	0	0
E_1	1.21×10^4	1.30×10^4	0	0	0	0

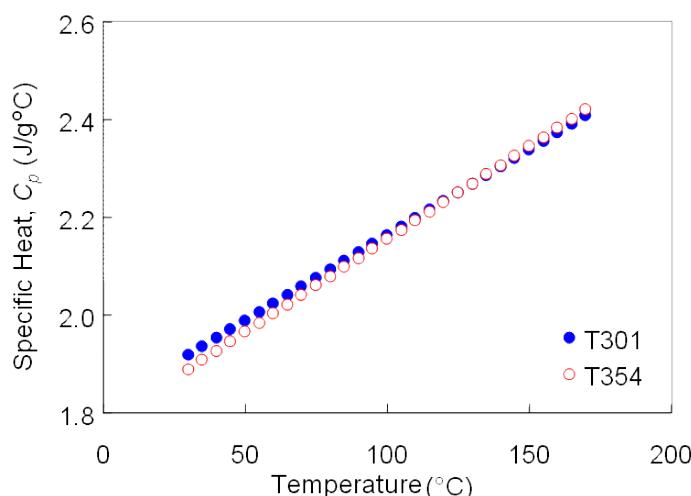
ตารางที่ 4-4 ค่าคงที่ทางจนผลศาสตร์ที่คำนวณจากแบบจำลองของ Kamal-Sourour สำหรับยางคอมปาวด์ T301 (Sidewall) และ T354 (Tread) ที่ใช้สำหรับยางล้อโมเดล A ที่อัตราความร้อน 10°C/นาที

ค่าคงที่	$\alpha_{i2} \times 1$		$\alpha_{i2} \times T$		$\alpha_{i2} \times T^2$	
	T301	T354	T301	T354	T301	T354
m	-5.28×10^{-2}	-5.86×10^{-2}	9.36×10^0	1.03×10^1	5.53×10^{-2}	-6.03×10^{-2}
n	3.41×10^3	2.73×10^2	-5.76×10^1	-4.33×10^0	3.24×10^{-1}	2.27×10^{-2}
a_1	-1.13×10^3	-1.68×10^3	1.78×10^1	2.72×10^1	-9.37×10^{-2}	-1.46×10^{-1}
a_2	-5.02×10^2	-3.03×10^{-2}	8.27×10^0	4.30×10^{-2}	-4.53×10^{-2}	-3.94×10^{-4}
E_2	-4.15×10^4	-6.44×10^4	0	0	0	0
E_1	1.21×10^4	1.30×10^4	0	0	0	0

4.3/ การศึกษาคุณสมบัติด้านความร้อนของยางคอมปาวด์

ในการศึกษาถึงกระบวนการการอบ vulcanization ที่มีความจำเป็นที่ต้องทราบถึงคุณสมบัติต่างๆ ด้านความร้อนของส่วนประกอบยางคอมปาวด์ ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงผลลัพธ์ของการวัดคุณสมบัติการนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมถึงค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ซึ่งเป็นยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการผลิตยางล้อโมเดล A ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปใช้ในการจำลองและทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการการอบยางด้วยเทคนิควิวีไฟโนต์อิลิเมนต์

รูปที่ 4.12 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ที่วัดด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางทั้งสองชนิดมีค่าไม่คงที่โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความจุความร้อนจำเพาะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ค่า C_p ของยางคอมปาวด์ทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันลดลงช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบ โดยมีค่าประมาณ 1.9 J/g°C ที่อุณหภูมิห้องและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่า 2.4 J/g°C ที่อุณหภูมิ 170°C

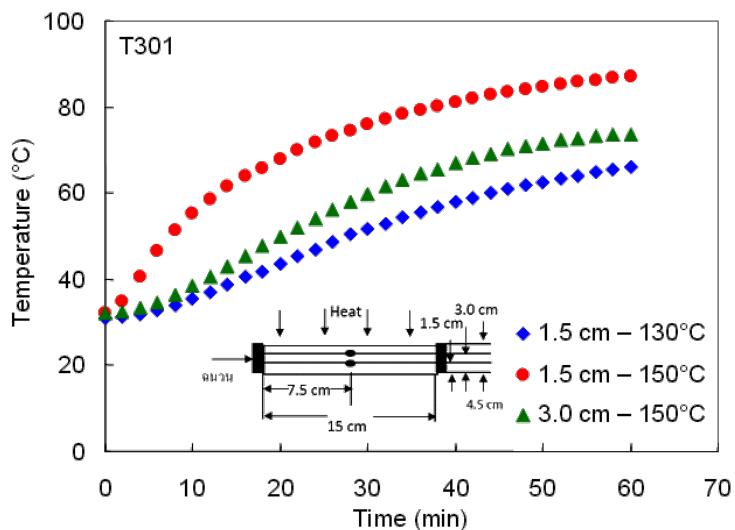


รูปที่ 4.12 ความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ที่ได้จากการทดสอบ DSC

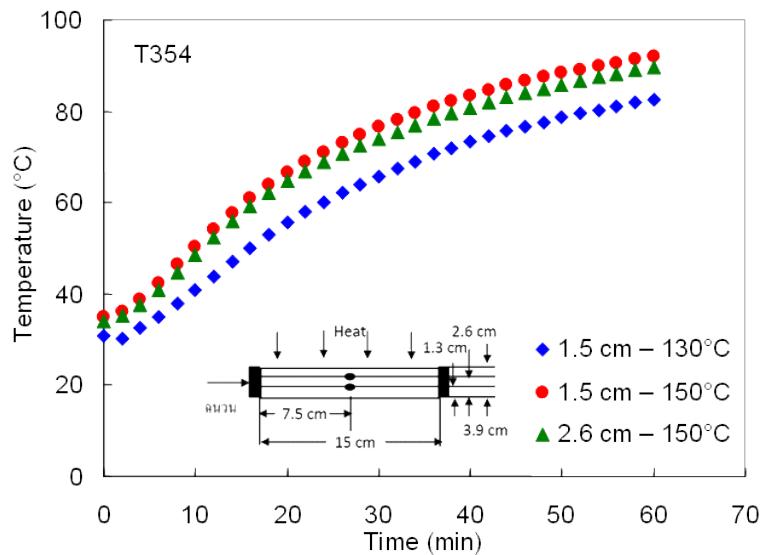
ในกรณีของขั้นผ้าใบ การทดสอบหาค่าความจุความร้อนจำเพาะด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) นั้นมีความยากลำบากเนื่องจากเป็นวัสดุคอมโพสิตโดยมีขนาดของเส้นใยที่ค่อนข้างใหญ่ ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบ DSC นั้นเล็กเกินกว่าที่จะทดสอบเพื่อคลดคุณผลลัพธ์ทั้งยางที่ใช้ชาบและเส้นใย ในงานวิจัยนี้จึงนำเอาค่าความจุความร้อนจำเพาะจาก Literature เพื่อใช้ในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการการอบยางในหัวข้อถัดไป ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p) จาก Literature ให้ไว้สำหรับผ้าใบชาบยางมีค่าเท่ากับ 2.006 J/g°C [17] ซึ่งถ้าเบริญเทียบกับยางคอม

ป่าวด์ที่ได้ทำการทดสอบ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของผ้าใบมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับยางคอมปาวด์ที่ได้ทำการทดสอบ (อยู่ระหว่าง 1.9 – 2.4 J/g°C)

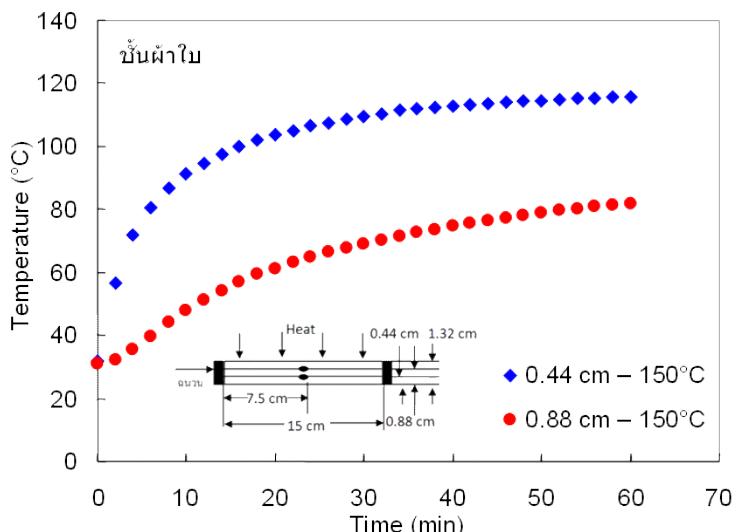
คุณสมบัติที่สำคัญด้านความร้อนนือกตัวหนึ่งคือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการวัดโดยตรง การวัดจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิในเนื้อยางภายใต้รูป่างและ Boundary conditions แล้วคำนวณกลับเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยใช้สมการ 3-6 ถึงสมการที่ 3-9 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 3-5 รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 แสดงการเปลี่ยนไปของอุณหภูมิที่วัดที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับยางคอมปาวด์ T301, T354 และ ขั้นผ้าใบ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้ทดสอบมีค่า 130°C และ 150°C



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของยางคอมปาวด์ T301 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 130°C และ 150°C



รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของยางคอมปาวด์ T354 โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 130°C และ 150°C



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ของชั้นผ้าใบ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ แม่พิมพ์ 150°C

ตารางที่ 4-5 แสดงอุณหภูมิ ณ. นาทีที่ 60 สำหรับยางคอมปาวด์ T301 และ T354 และชั้นผ้าใบที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3-5 เพื่อใช้เป็นค่าอุณหภูมิที่แปรผันตามตำแหน่ง x ในสมการ 3-7 และสมการ 3-8

ตารางที่ 4-5 อุณหภูมิของยางคอมปาวด์ T301, T354 และชั้นผ้าใบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามตารางที่ 3-5 ที่ได้จาก การทดสอบคุณสมบัติการนำความร้อน ณ.นาทีที่ 60

ยางคอมปาวด์	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิ		
		0 cm.	1.5 cm.	3.0 cm.
T301 (Sidewall)	130°C	130 °C	66 °C	56.3 °C
	150°C	150 °C	87.2 °C	73.6 °C
		0 cm.	1.3 cm.	2.6 cm.
T354 (Tread)	130°C	130 °C	79.5 °C	62.4 °C
	150°C	150 °C	91.9 °C	89.6 °C
		0 cm.	0.44 cm.	0.88 cm.
ชั้นผ้าใบ (Ply)	150°C	150 °C	115.7 °C	100.4 °C

จากการทดลองตั้งกล่าว สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนผ่านการวัดอุณหภูมิเป็นฟังก์ชัน กับเวลาและค่านวนหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity) จากสมการที่ 3-6 การหาค่าคงที่ ของสามการทำโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางคณิตศาสตร์โดยมีตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก ค่าคงที่

ที่ได้จากการ Fit Curve ผลการทดสอบการนำความร้อนสำหรับยางคอมปาวด์ T30 และ T354 และชั้นผ้าใบแสดงในตารางที่ 4-6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการดำเนินการต่างๆ และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนตามสมการที่ 3-9

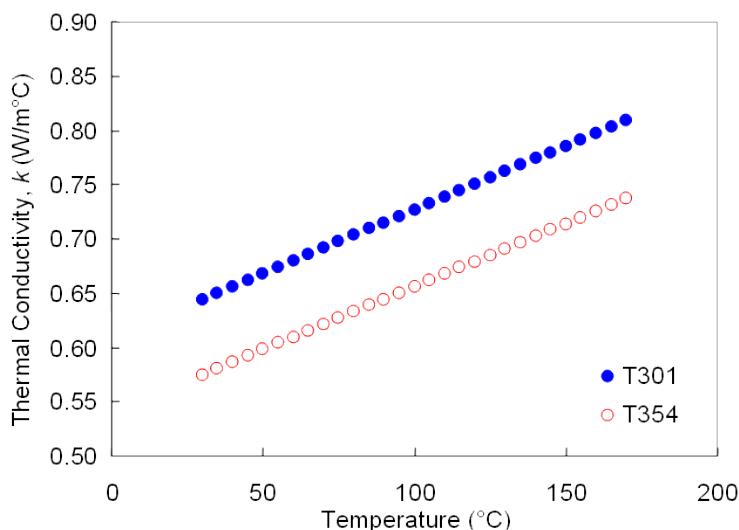
$$T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{n\pi x}{L} e^{-D\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t} \quad 3-6$$

$$k = D \times \rho \times C_p \quad 3-9$$

เมื่อ D คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity), ρ คือค่าความหนาแน่น (Density) และ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T รูปที่ 4.16 แสดงผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ที่คำนวณได้จากการ 3-9 จากผลการทดลองข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่คำนวณได้ของยางทั้งสองชนิดมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ $0.57 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ และ $0.65 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ สำหรับยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ตามลำดับ และเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึง $0.74 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ และ $0.80 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 170°C สำหรับยางคอมปาวด์ T301 และ T354 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิแบบเชิงเส้น เช่นกัน [22] ซึ่งเป็นผลมาจากการค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของยางที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยแนวโน้มของการแปรผันจะขึ้นกับชนิดของยางที่มีส่วนประกอบแตกต่างกัน

ตารางที่ 4-6 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Thermal Diffusivity) ของยางคอมปาวด์ T301, T354 และ ชั้นผ้าใบที่คำนวณจากสมการ 3-6

ยางคอมปาวด์	อุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)	Thermal Diffusivity, D (m^2/s)		Average Thermal Diffusivity, D (m^2/s)
T301 (Sidewall)		1.5 cm	3.0 cm	3.01×10^{-7}
	130°C	3.07×10^{-7}	-	
	150°C	3.16×10^{-7}	2.81×10^{-7}	
T354 (Tread)		1.3 cm	2.6 cm	2.71×10^{-7}
	130°C	2.76×10^{-7}	-	
	150°C	2.81×10^{-7}	2.57×10^{-7}	
ชั้นผ้าใบ (Ply)		0.44 cm	0.88 cm	3.01×10^{-7}
	150°C	3.06×10^{-7}	2.97×10^{-7}	

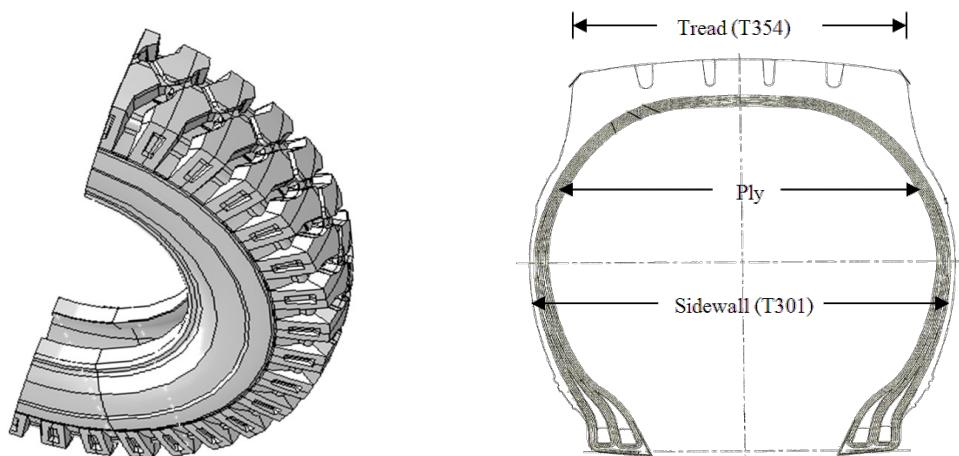


รูปที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, k) ของยางคอมปาวด์ T301 และ T354 เป็นพังก์ชันกับอุณหภูมิ

สำหรับชั้นของผ้าใบ (Ply) การทดสอบดังกล่าวให้ผลค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนเหมือนกับยางคอมปาวด์ T301 ในงานวิจัยนี้ค่าความร้อนของชั้นผ้าใบมีค่าคงที่เท่ากับ 2.006 J/g°C [17] ซึ่งต่างจากยางคอมปาวด์ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะเป็นค่าคงที่โดยมีค่าเท่ากับ 0.671 W/m°C

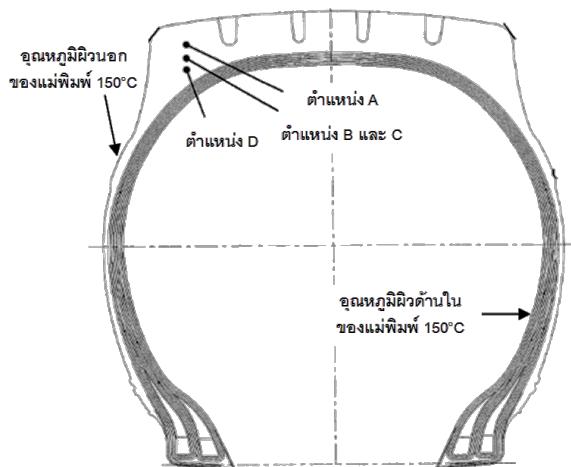
4.3/ การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อระหว่างกระบวนการครอบครุป

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ของการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการครอบครุป ยางล้อ และการทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างกระบวนการด้วยเทคนิควิไฟไนต์อิลิเมนต์ ยางล้อที่ใช้ศึกษาในหัวข้อนี้คือยางล้อโมเดล A ซึ่งเป็นยางล้อขนาดใหญ่และด้อยยางมีความหนาพอเพียงต่อการฝังเทอร์โมคัปเพื่อวัดอุณหภูมิ รูปที่ 4.17 แสดงรูปว่างของยางล้อโมเดล A ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งหนึ่ง



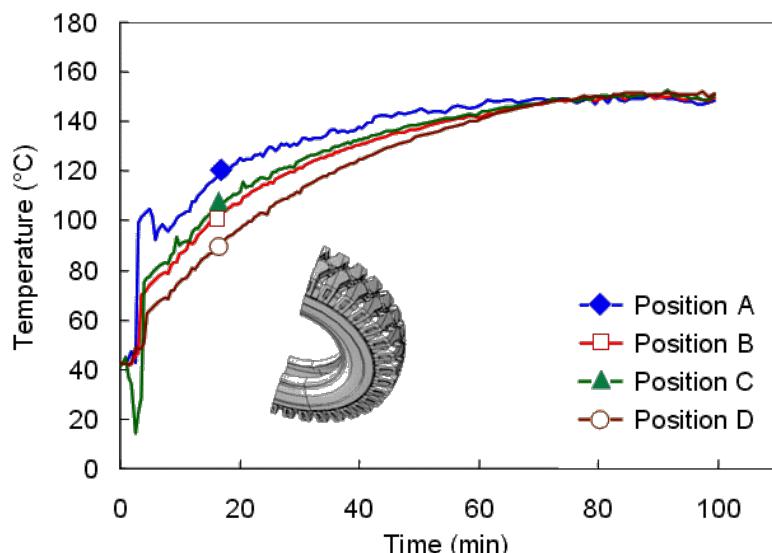
รูปที่ 4.17 รูปว่างลักษณะยางล้อโมเดล A ที่ใช้ศึกษา

การวัดทำโดยการฝังเทอร์โมคัปเบิล 4 ตำแหน่งคือที่ตำแหน่งชั้นดอกยาง (Cap) ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างดอกยางและชั้นลวด และตำแหน่งชั้นลวด (Base) ดังแสดงในภาพที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงตำแหน่งของเทอร์โมคัปเบลโดยที่ A ห่างจากผิวดอกยาง 0.8 cm. ตำแหน่ง B, และ C ห่างจากผิวดอกยางเท่ากันคือ 1.5 cm และตำแหน่ง D ห่างจากผิวดอกยางเป็นระยะ 2.2 cm.

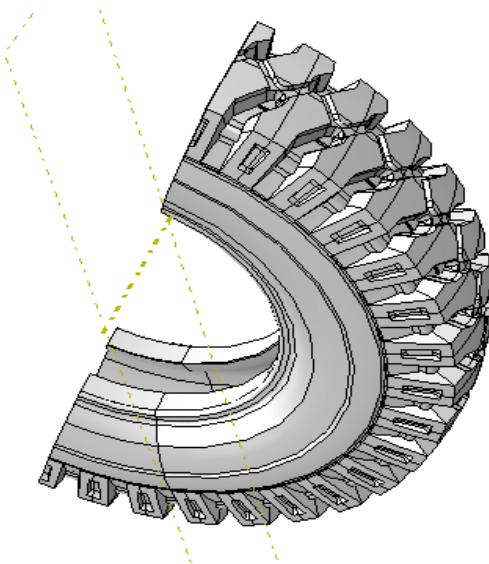
การทดสอบกำหนดให้อุณหภูมิแม่พิมพ์มีค่าเท่ากับ 150°C ทั้งผิวแม่พิมพ์ด้านในและผิวของแม่พิมพ์ด้านนอก ผิวแม่พิมพ์ด้านนอกเป็นการให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า (Induction) ส่วนผิวของแม่พิมพ์ด้านในนั้นให้ความร้อนด้วยระบบไอน้ำ เวลาที่ใช้ในการทดสอบคือ 99 นาที รูปที่ 4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในระหว่างกระบวนการครอบครุป จากรูปการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันกับเวลาที่ตำแหน่งที่ B และตำแหน่งที่ C นั้นมีค่าเหมือนกัน ซึ่งตำแหน่งที่ B และ C นั้nh่างจากผิวของแม่พิมพ์เท่ากันผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือและการทำซ้ำได้ของวิธีการวัด (Reproducibility) ที่ตำแหน่งที่ D ซึ่งห่างจากผิวด้านนอกมากที่สุดมีการเพิ่มน้ำหนักของอุณหภูมิขึ้นที่สุด ในขณะที่ตำแหน่ง A ที่อยู่ใกล้ผิวดอกของแม่พิมพ์ที่สุดมีการเพิ่มน้ำหนักของอุณหภูมิเร็วที่สุด อุณหภูมิภายในเนื้อยางเพิ่มน้ำหนักต่อเนื่องจนกว่าจะถึงเวลาประมาณ 80 นาที อุณหภูมิภายในเนื้อยางจึงมีค่าเท่ากับ 150°C เท่ากับอุณหภูมิของแม่พิมพ์ หลังจากการทดลองการครอบยางด้วยตราประดับดังกล่าวพบว่า ยางล้อเกิดการวัลคาไนซ์ เช่น และไม่พบจุดที่ยางเกิดการวัลคาไนซ์เช่นนี้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของยางโนเมเดล A ระหว่างกระบวนการครอบครุป โดยกำหนดให้อุณหภูมิผิวของแม่พิมพ์ทั้งด้านนอกและด้านในมีค่าเท่ากับ 150°C และเวลาที่ใช้ในการครอบเท่ากับ 99 นาที

การคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการครอบยางล้อเพื่อใช้ในการเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดจริงในโรงงานดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ทำโดยการสร้างแลลงจำลองด้วยโปรแกรมอะนาคัส (ABAQUS[®]) โดยอาศัยแบบจำลองการนำความร้อน (Heat Conduction) ของวัสดุในสภาพไม่คงที่ขึ้นและกับเวลา (Transient)

การสร้างแบบจำลองทำโดยการแบ่งส่วนประกอบของยางล้อโมเดล A ออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนที่เป็นแก้มยาง (ยางคอมปาวด์ T301) ส่วนที่เป็นดอกยาง (ยางคอมปาวด์ T354) และส่วนของชั้นผ้าใบ ซึ่งจากการทดสอบเพื่อหาอัตราและเปอร์เซ็นต์การครอบคงรูปยาง พบร่วมกันทั้งสองชนิดมีผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน และยางทั้งสองชนิดนี้มีสัดส่วนโดยมวลรวมกันประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์เทียบกับชนิดอื่น รูปที่ 4.20 แสดงแบบจำลองของยางล้อโมเดล A ที่ได้จากโปรแกรม ABAQUS[®] เพื่อใช้ในการคำนวณหากการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการครอบคงรูป ตารางที่ 4-7 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยางคอมปาวด์และเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) ของปัญหา การให้ความร้อนในการคำนวณนั้นกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวในและผิวนอกของแม่พิมพ์มีค่าคงที่เท่ากับ 150°C โดยสมมติให้เวลาในการครอบยางเท่ากับ 99 นาที



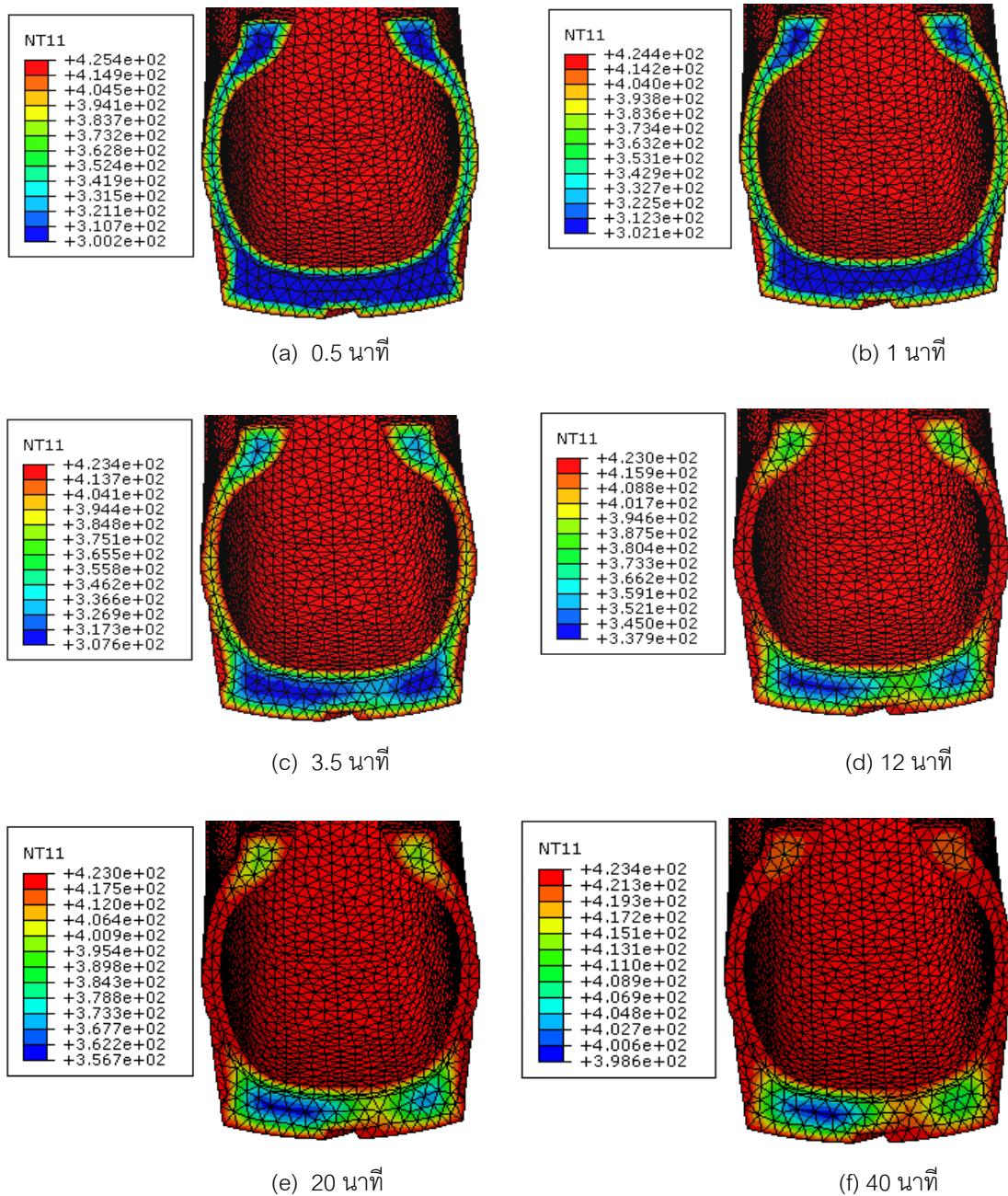
รูปที่ 4.20 แบบจำลองยางล้อโมเดล A ที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 4-7 คุณสมบัติของยางคอมปาวด์ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิตัวอยู่โปรแกรม ABAQUS[®]

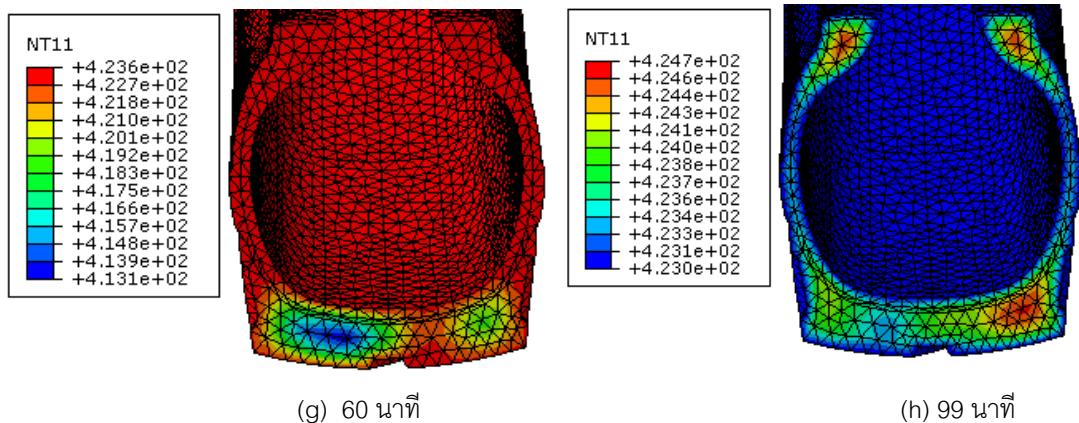
คุณสมบัติ	T301	T354	ผ้าใบ
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)	0.574 - 0.737	0.644 - 0.809	0.671
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ C_p ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)	1936.3 - 2424.1	1963.6-2267	2006.7
ค่าความหนาแน่น ρ (kg/m^3)	1120	1120	1115
ค่าความร้อนจากปฏิกิริยา \dot{Q} (W/m^3)		6160	
อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ด้านนอก ($^{\circ}\text{C}$)		150	
อุณหภูมิผิวแม่พิมพ์ด้านใน ($^{\circ}\text{C}$)		150	
เวลาในการครอบคงรูป (นาที)		99	
ขั้นตอนในการคำนวณ		Transient	

รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของภาคตัดยางล้อที่ได้จากการคำนวณที่เวลาต่าง ๆ จากรูปที่ 4.21 พบร่วมกันช่วงแรก ๆ ของกระบวนการถึงประมาณ 1 นาที อุณหภูมิที่ผิวจะเพิ่มมากขึ้นมากกว่าอุณหภูมิที่ให้ (150

องศาเซลเซียส) คือประมาณ 152.4 องศาเซลเซียสและหลังจากนั้นอุณหภูมิจะค่อยลดลงจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ให้ (150 องศาเซลเซียส) ที่นาทีที่ 12 และเมื่อผ่านเวลาที่ปีกอุณหภูมิที่ผิวนี้มีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิที่ให้คือ 150 องศาเซลเซียส สำหรับในตำแหน่งตัดจากผิวเข้าไปข้างในอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสิ้นสุดกระบวนการจะมีอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งตัวกลางส่วนที่หนาสุดซึ่งมีอุณหภูมิ 151.7 องศาเซลเซียส

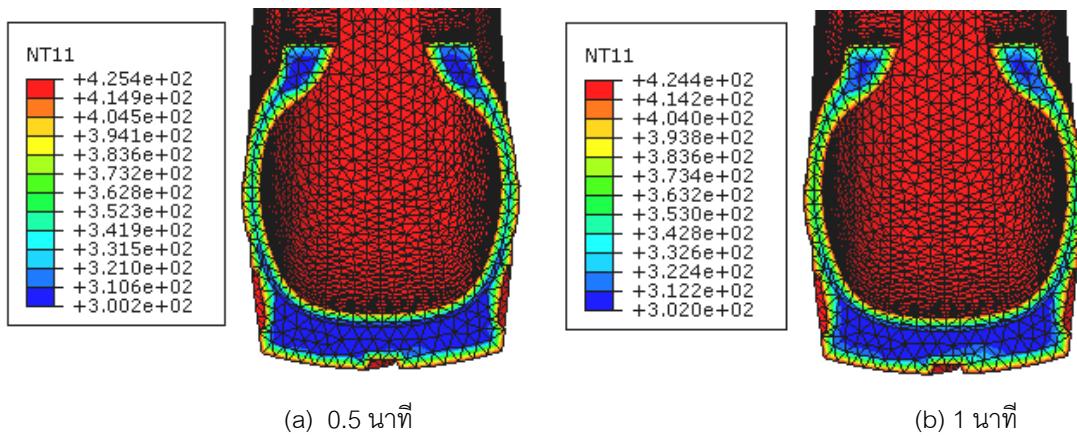


รูปที่ 4.21 แสดงผลจากการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยใช้เวลาทั้งหมดในกระบวนการอบคงรูป 99 นาทีและกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์เท่ากับ 150 องศาเซลเซียส และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา $\dot{Q} = 6160 \text{ W/m}^2$

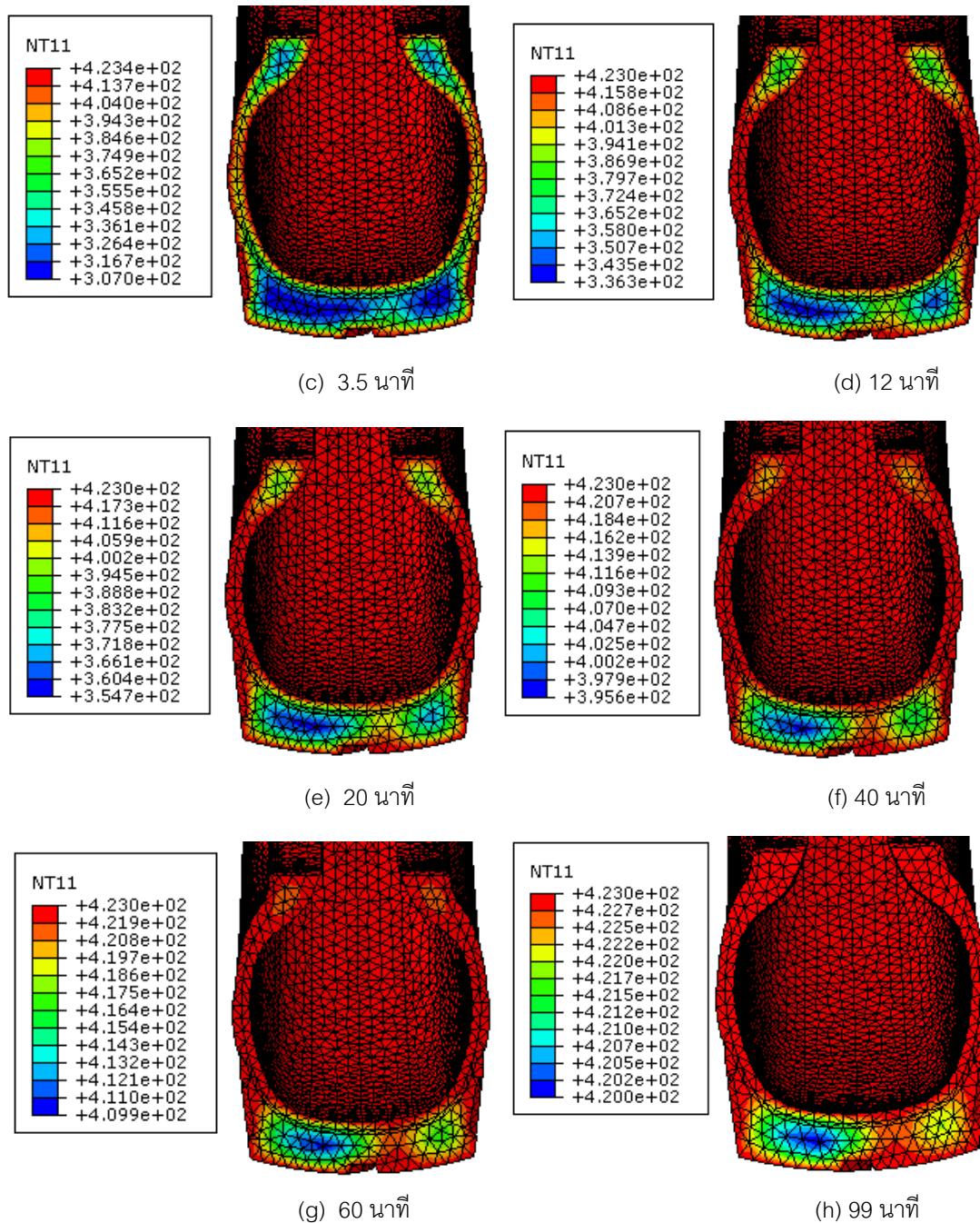


รูปที่ 4.21 (ต่อ) แสดงผลจากการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้เวลาทั้งหมดในกระบวนการอบคงรูป 99 นาทีและกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์เท่ากับ 150 องศาเซลเซียส และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา $\dot{Q} = 6160 \text{ W/m}^2$

เมื่อพิจารณากระบวนการนำความร้อนโดยไม่พิจารณาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา (Heat Generation) วัสดุในชิ้น ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.22 จากการคำนวณพบว่าในกรณีที่ไม่คำนึงถึงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาวัสดุในชิ้น อุณหภูมิของยางล็อกที่ผิวจะมีค่าเท่ากับแม่พิมพ์คือ 150°C แต่มีอุณหภูมิต่ำที่สุด 147°C ตรงกลางบิวเต้นที่หนาสุดของดอกยาง ซึ่งต่างจากกรณีที่คำนึงถึงปฏิกิริยาความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาซึ่งในกรณีดังกล่าว อุณหภูมิตรงกลางบิวเต้นที่หนาสุดของดอกยางมีค่าเท่ากับ 151.7°C โดยมีอุณหภูมิที่ผิวเท่ากับ 150°C



รูปที่ 4.22 แสดงผลจากการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้เวลาทั้งหมดในกระบวนการอบคงรูป 99 นาทีและกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์เท่ากับ 150 องศาเซลเซียส และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา $\dot{Q} = 0 \text{ W/m}^2$

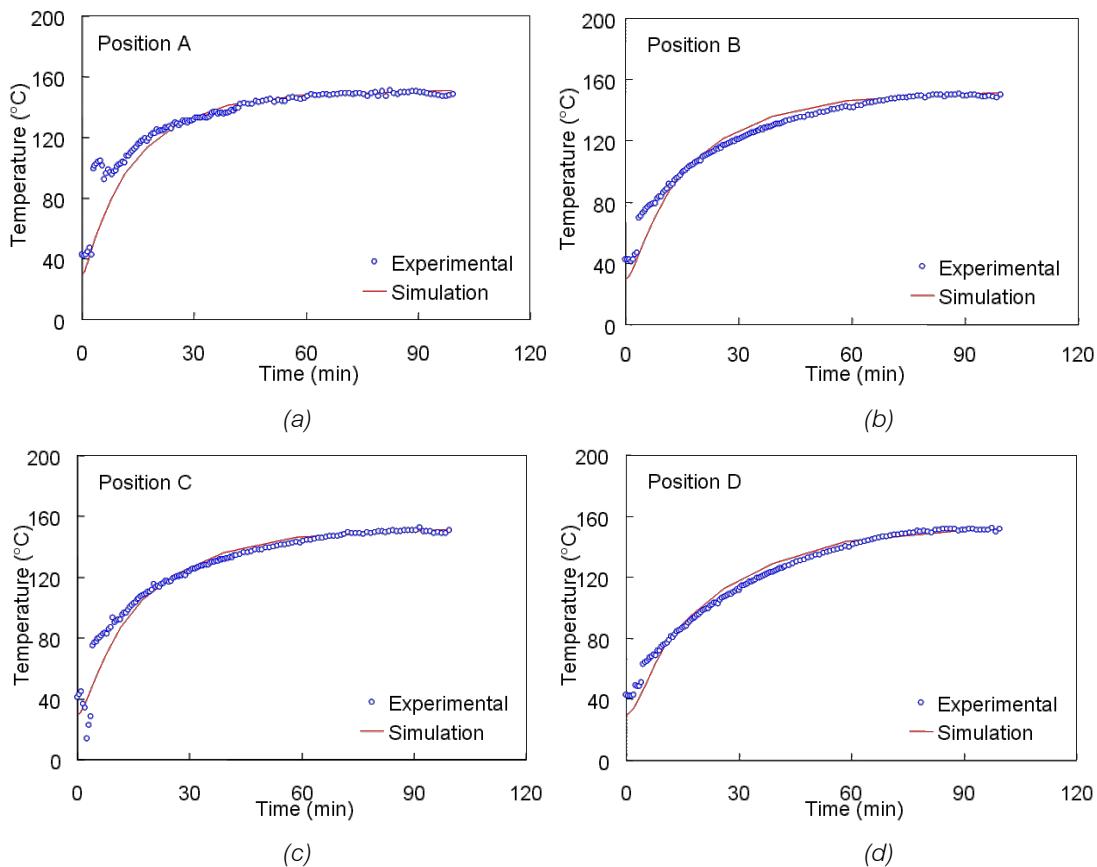


รูปที่ 4.22(ต่อ) แสดงผลจากการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้เวลาทั้งหมดในการกระบวนการอบคงรูป 99 นาทีและกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวแม่พิมพ์เท่ากับ 150 องศาเซลเซียส และค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา $\dot{Q} = 0 \text{ W/m}^2$

จากการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยการพิจารณาทั้งสองกรณีดังรูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22 ข้างต้น ที่ใช้สภาวะในการคำนวณเหมือนกัน ต่างกันที่การพิจารณาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา พบว่า เมื่อไม่มีค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาอุณหภูมิที่ผิวจะมีค่าสูงสุด แต่เมื่อมีค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา อุณหภูมิตรงกลางส่วนที่หนาสุดของยางจะมีค่าสูงสุด ทั้งนี้เกิดจากยางเมื่อได้รับความร้อนแล้วเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อทำการเชื่อมโยงไม่เลกูล ซึ่งในยางลักษณะเป็นการให้ความร้อนที่ผิวทั้งภายนอกและภายในที่อุณหภูมิคงที่ทำให้ผิวด้านนอกของยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีก่อนและขณะที่มีการเกิดปฏิกิริยาจะมีการขยายความร้อนออกมาก รวมกับความร้อนจากที่ผิวให้กับขั้นที่อยู่ด้านในถัดไป เนื่องจากในขั้นยางที่เกิดปฏิกิริยาคงรูปแล้ว (ผิวนอก) ยาง

จะมีคุณสมบัติเป็นจำนวนมากขึ้นทำให้ไม่เกิดการสะสมของความร้อนในส่วนนี้ สำหรับในส่วนที่ลึกเข้าไปก็จะเกิดความร้อนสะสมเรื่อยๆ จนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว (150°C)

จากการผังเทอร์โมคัปเบลลงบนยางล้อโดยตรงในระหว่างกระบวนการอบ ทำให้เราสามารถตรวจสอบผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการอบที่ได้จากการคำนวณ รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ จากที่ได้จากการคำนวณและการวัดจริง



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบคงรูปยางระหว่างการคำนวณด้วยเทคนิคเวร์ชันที่สาม (กำหนดให้ $\dot{Q} = 6160 \text{ W/m}^2$) และการวัดจากกระบวนการการโดยตรง

จากการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการวัดในกระบวนการการจัดพับว่า แบบจำลองที่ใช้สามารถดำเนินการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาได้อย่างน่าพอใจ ทั้งนี้การคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเมื่อความสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบในระดับหนึ่ง

ผลลัพธ์การคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับเวลาที่สามารถนำไปใช้เคราะห์เปอร์เซ็นต์การอบคงรูปและเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการการอบคงรูป จากหัวข้อที่ 4.1 และหัวข้อ 4.2 พบว่ายางคอมปาวด์ T301 และ T354 ที่ใช้ในยางล้อไมเดล A นั้นมีอัตราการอบคงรูปอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน เราสามารถประมาณความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะอุณหภูมิคงที่และสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ด้วยสมการ Polynomial order three

$$y = aT^3 + bT^2 + cT + d \quad 4-4$$

เมื่อ y คือค่าที่ได้จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยางล้อ (%), T คืออุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) สำหรับ a, b, c และ d เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการ Curve Fitting จากเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปของยาง (จากค่าเฉลี่ยของยางทั้งสองชนิด) เพื่อใช้ในการประมาณค่าในช่วงและนอกช่วงเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปของยางล้อที่ต่ำลงต่ำๆ ในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ (Non Isothermal conditions) ซึ่งค่าคงที่ที่ใช้แสดงได้ในตารางที่ 4-8 และ 4-9

ตารางที่ 4-8 ค่าตัวแปรจากการ Curve Fitting ในสภาวะที่อุณหภูมิไม่คงที่ (รูปที่ 4.10b)

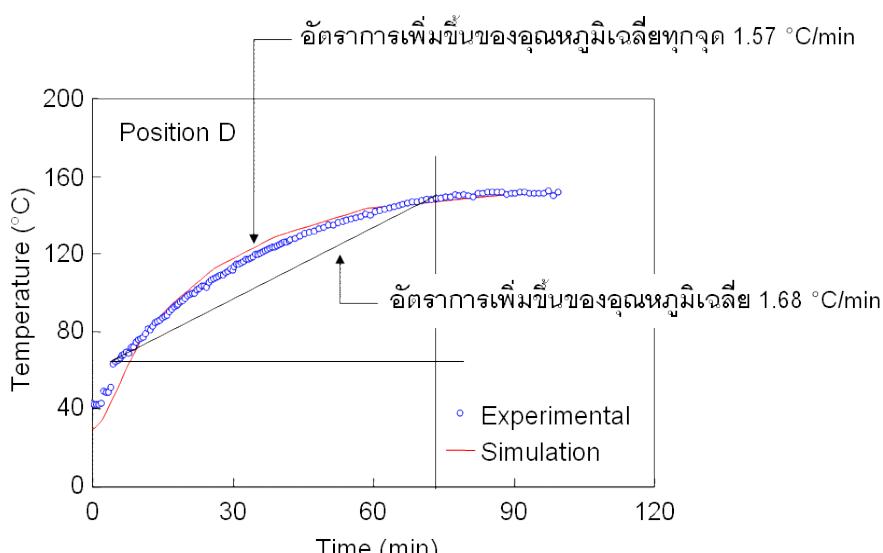
อัตราเพิ่มอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
2	2.686E-05	-0.024365	8.5968102	-1485.157
5	1.17E-05	-0.01091	3.994961	-717.672
10	0.000167	-0.15207	55.4385	-10095.6

ตารางที่ 4-9 ค่าตัวแปรจากการ Curve Fitting ในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่ (รูปที่ 4.2)

อุณหภูมิคงที่ ($^{\circ}\text{C}$)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
135	-6.64E-03	0.510242	-7.4094	9.633774
150	-6.02E-02	2.098311	-13.657	20.3164
165	-1.46601723	23.99741265	-99.9481979	121.1177781

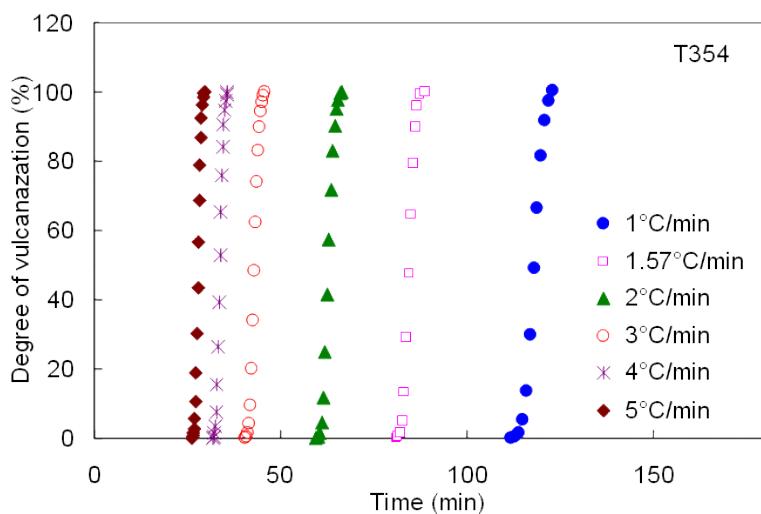
จากผลลัพธ์การกระจายตัวของอุณหภูมิกับเวลาพบว่าที่ตำแหน่ง D เป็นตำแหน่งที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิข้ามที่สุด ดังนั้นเราจึงสามารถสมมติได้ว่าถ้าในกรณีที่กระบวนการครอบยางล็อกให้เวลาไม่เพียงพอ ยางส่วนที่เกิดปฏิกิริยาแล้วจะไม่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นที่จุด D ดังนั้นความสามารถพิจารณาจุด D ให้เป็นจุดอ้างอิงกล่าวคือถ้าจุด D เกิดปฏิกิริยาแล้วจะไม่สมบูรณ์ ตำแหน่งนี้ก็สามารถพิจารณาได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาแล้วจะไม่เข้าข่ายสมบูรณ์ เช่นเดียวกัน

รูปที่ 4.24 แสดงการคำนวนหาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ย ณ. ตำแหน่ง D การคำนวนหาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยสามารถทำได้สองวิธีคือ วิธีที่หนึ่งคำนวนจากการเปลี่ยนแปลงของความชันของอุณหภูมิกับเวลา ณ. เวลาเริ่มต้น (คิดที่นาทีที่ 5) และเวลาสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยาแล้ว (คิดที่นาทีที่ 75) ค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยที่คำนวนได้จากวิธีดังกล่าวมีค่าเท่ากับ $1.68 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ อีกวิธีหนึ่งคือการคำนวนหาค่าความชันของภาพทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงและหาค่าเฉลี่ย ค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคำนวนจากวิธีที่สองมีค่าเท่ากับ $1.57 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ จะเห็นได้ว่าผลต่างของสองวิธีนั้นมีค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยในการวิเคราะห์ต่อไปจะใช้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ $1.57 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$

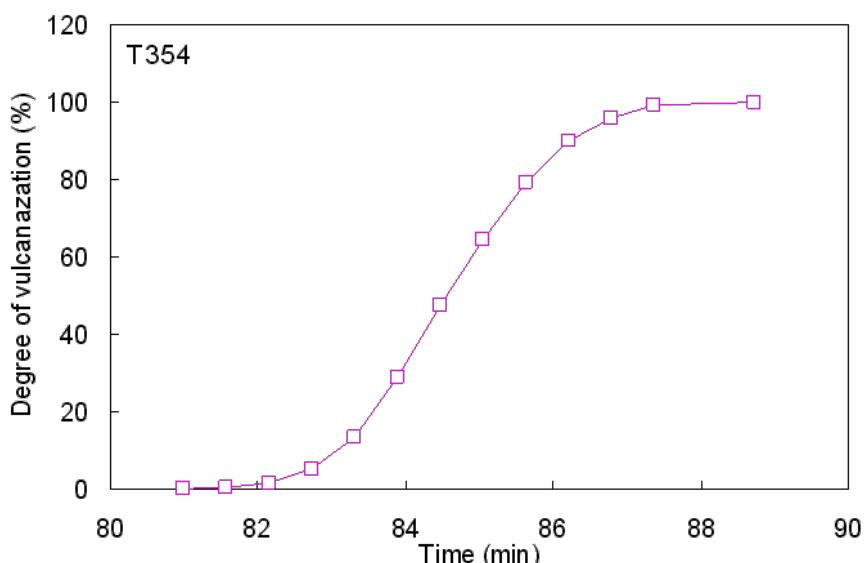


รูปที่ 4.24 การหาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งการวัดได้

จากการศึกษาการอบคงรูปภายใต้สภาพอุณหภูมิไม่คงที่ในหัวข้อ 4.2 ซึ่งอัตราการให้ความร้อนที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปและเวลาที่จำเป็นเพื่อให้การเกิดปฏิกิริยา vulcanization ดำเนินสมบูรณ์ ดังนั้นเราสามารถทำการ Interpolate เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปและระยะเวลาที่ใช้สำหรับอัตราการให้ความร้อนที่คำนวณได้จากตำแหน่งที่ D ($1.57^{\circ}\text{C}/\text{min}$) จากอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่คำนวณได้ ณ. ตำแหน่ง D ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ รูปที่ 4.26 การคำนวณพบว่าที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ $1.57^{\circ}\text{C}/\text{min}$ การเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นที่นาทีที่ 80 และเสร็จสิ้นประมาณนาทีที่ 88.73 ซึ่งใช้เวลาอยู่กว่าเวลาในการอบจริง (100 นาที) ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบยางไม่เดล A โดยกำหนดให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 150°C เป็นเวลา 100 นาที ไม่ควรส่งผลให้เกิดปัญหาอย่างไม่สุก จากการทดสอบโดยการตัดยางจริงและพิจารณาเนื้อยางที่ตำแหน่ง D ก็ไม่พบว่าเกิดปัญหาอย่างไม่สุกที่ตำแหน่งดังกล่าว



รูปที่ 4.25 เปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยางคอมปาวด์ T354 ด้วยอัตราการให้ความร้อน $1.57^{\circ}\text{C}/\text{min}$ คำนวณจาก การวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาในระหว่างกระบวนการอบคงรูปที่ตำแหน่ง D



รูปที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยางคอมปาวด์ T354 ด้วยอัตราการให้ความร้อน $1.57^{\circ}\text{C}/\text{min}$ คำนวณจาก การวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาในระหว่างกระบวนการอบคงรูปที่ตำแหน่ง D

5/ สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างกระบวนการอบคงรูปของยางล้อ โดยเริ่มศึกษาสมบัติของยางไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางจนผลศาสตร์ คุณสมบัติต้านการนำความร้อน และพฤติกรรมการอบคงรูป ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อนำไปทำการคำนวนหาการกระจายตัวของอุณหภูมิกายในยางล้อโดยใช้เทคนิควิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ABAQUS ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวนถูกนำไปเบรี่ยบเทียบกับผลการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในระหว่างกระบวนการ

การศึกษาพฤติกรรมของยางคอมปาวด์ในระหว่างกระบวนการอบคงรูปแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งศึกษาภายในสภาวะอุณหภูมิคงที่และส่วนที่สองภายในสภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ ในส่วนแรกนั้นได้ทำการศึกษาด้วยเทคนิค Oscillating Disc Rheometer ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด (Torque) กับเวลาที่อุณหภูมิการอบคงที่ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เวลาเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาลดคลาインซ์เช่นก็จะเร็วขึ้นและเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจนกระทั่งสมบูรณ์จะสั้นลงด้วย สำหรับยางคอมปาวด์ต่างชนิดกันที่ใช้เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของยางล้อ (ดอกยางและแก้มยาง) นั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากต้องการให้การเกิดปฏิกิริยาลดคลาインซ์เช่นกันมีค่าใกล้เคียงกันทุกส่วน

สำหรับการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่นั้น ใช้สำหรับหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาลดคลาインซ์เช่น ซึ่งค่าความร้อนดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ในการคำนวนการกระจายตัวของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบคงรูป นอกจากนั้นยังสามารถใช้เพื่อศึกษาเบอร์เท็นต์การอบคงรูปที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ จากผลการทดลองสามารถทำได้ว่า เมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (Heating rate) เพิ่มขึ้น การเกิดปฏิกิริยาลดคลาインซ์เช่นก็จะเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งมาจากการที่เมื่อเข้าอัตราการให้ความร้อนต่าจะเกิดการขยายความร้อนรวม (Heat Total) น้อยกว่าที่อัตราการให้ความร้อนสูง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในปริมาณน้อยจะใช้เวลาในการอบคงรูปนานทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดแบบค่อยเป็นค่อยไปและทำให้การเกิดปฏิกิริยาสภาวะทราบซึ่งกันและกัน

จากการทดลองใช้แบบจำลองทางจนพลศาสตร์ของ Kamal-Sourour ซึ่งเป็น Empirical model พบว่า แบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายพฤติกรรมการอบคงรูปภายใช้สภาวะอุณหภูมิไม่คงที่ของยางคอมปาวด์ได้ดีในระดับหนึ่ง จากแบบจำลองดังกล่าวสามารถคำนวณหาค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5600 – 6720 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6160 วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการทดสอบ

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในระหว่างกระบวนการการอบที่ทำการวัดจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยเทคนิคเควิริไฟในต่ออิเล็กทรอนิกส์นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ณ. จุดที่มีการเพิ่มขึ้นซึ้งที่สุดมีค่าเท่ากับ $1.57^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ซึ่งสามารถนำกลับไปคำนวณเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปที่อัตราการให้ความร้อนดังกล่าว ผลการคำนวณพบว่าที่ตำแหน่งที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิซึ้งที่สุด ภาครีดปฏิกิริยาวัสดุค้านี้เข้ากับสมบูรณ์ที่นาทีที่ 88.73 ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการการอบจริง (เวลาที่ใช้ในการอบจริงเท่ากับ 100 นาที) จากการทดสอบโดยการตัดยางล้อจริงที่ผ่านการอบที่สภาวะดังกล่าวและพิจารณาเนื้อยางที่ตำแหน่ง D ก็ไม่พบว่าเกิดปัญหายางไม่สุกที่ตำแหน่งดังกล่าวซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณ

6/ ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ในการทดสอบหาค่าความร้อนจากปฏิกิริยา (Heat of Reaction) ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดยการวัดค่าความร้อนของสารที่ถ่ายออกมามีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งใช้สารตัวอย่างในปริมาณน้อยมาก 10-15 มิลลิกรัม ซึ่งผลที่ได้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้โดยในที่นี้วิจัยได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมจากที่กล่าวมาโดยใช้ยางชนิดเดียวกันและสภาวะเดียวกันในการทดสอบแต่ใช้ปริมาณยางน้อยกว่าเดิม 5 มิลลิกรัม พบร่วมกันว่าผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน และจากการคำนวณหาอัตราและเปอร์เซ็นต์การอบคงรูปยางจากผลของความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา เป็นการคำนวณโดยพิจารณาในช่วงทวนซิชั่นหรือช่วงที่มีต้องการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้นซึ่งเป็นช่วงที่สามารถมองเห็นการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

ในส่วนของการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิในยางล้อโดยใช้ระเบียบวิธีไฟนิตี้เอลิเม้นต์ (Finite Element) ในงานวิจัยนี้ คำนวณโดยพิจารณาจากคุณสมบัติการนำความร้อน โดยให้พิวชั่นแม่พิมพ์ที่สมดังกับยางล้อนั้นเป็นค่าคงที่ ซึ่งในกระบวนการการอบยางจริง ผิวต้านในอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเป็นการให้ความร้อนด้วยระบบไอน้ำและก๊าซในโทรศัพท์ อีกทั้งการคำนวณในงานวิจัยนี้ไม่ได้คำนึงถึงความดันที่อาจจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อเวลาของยางล้อในระหว่างกระบวนการการอบคงรูป อีกประการหนึ่งงานวิจัยนี้ไม่คิดผลกระทบของยางคอมปาวด์ส่วนอื่นๆ ที่มีปริมาณน้อย เช่น Apex, ลวดรัดขอบล้อ (Bead) ฯลฯ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อการคำนวณเช่นเดียวกัน

สุดท้ายความมีการนำเทคนิคเควิริไฟวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ไปใช้กับยางล้อไม่เคลื่อนที่ เพื่อให้เกิดความหลากหลายและพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อให้สามารถใช้สอดคล้องกับยางล้อในหลายรูปแบบ การทดสอบวัดอุณหภูมิในงานวิจัยนี้ทำโดยตรงในระหว่างกระบวนการผลิต ทำให้การปรับเปลี่ยนเวลาในการทดสอบการอบทำได้ยาก และไม่สามารถควบคุมสภาวะการอบยางได้อย่างแม่นยำและ เช่น หลังจากกระบวนการการอบยางเสร็จสิ้น (ใช้เวลา 100 นาที) และนำยางล้อออกจากแม่พิมพ์ ยางล้อยังมีอุณหภูมิที่สูงและสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้อีกระยะหนึ่ง การทดสอบโดยใช้เวลาตามที่คำนวณได้ (89 นาที) และทำการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วหลังจากการนำยางล้อออกจากแม่พิมพ์ซึ่งเป็นสิ่งที่นำเสนอไว้เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ

7/ เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยวุฒิ เก้าพัฒนา. วิศวกรรมยานยนต์. ม. วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน กรุงเทพฯ , สำนักพิมพ์พิทักษ์อักษร, 2531.
- [2] <http://www.motorera.com> (23/02/2009)
- [3] <http://www.gumitra.lt> (23/02/2009)
- [4] <http://www.eng-forum.com> (23/02/2009)
- [5] Hill D.A. Heat Transfer and Vulcanization of Rubber, Elsevier Publishing Co.Ltd. New York, 1971.
- [6] Camacho Enrique, Juan Hernandez-ortiz P. and Osswald Tim A. Characterization and Modeling of the Curing Process of Silicone rubber. University of Wisconsin. USA.
- [7] ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. หลักเคมี สำนักพิมพ์โอดีเยนส์เตอร์, 2541.
- [8] A.I. Isayev, S. Brijesh, Nonisothermal Vulcanization of Devulcanized GRT with Reversion Type Behavior, Journal of Elastomers and Plastics, Vol. 38, No. 4, p. 291-318, (2006)
- [9] M.H.R. Ghoreishy, G. Naderi, Three-dimensional Finite element Modeling of Rubber Curing Process. Iran Polymer and Petrochemical Institute, Iran , 2005.
- [10] L.M. Lopez, A.B. Cosgrove, J.P. Hernandez-Ortiz, T.A. Osswald Modeling the vulcanization reaction of silicone rubber , Polymer Engineering and Science, Vol. 47, n°5, p. 675 – 683, (2007)
- [11] L. Lopez, Modeling the Vulcanization of Liquid Silicone Rubbers, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison“University of Wisconsin” Madison (2004)
- [12] M.R. Kamal and S. Sourour, Kinetics and thermal characterization of thermoset cure, Polym. Eng. Sci., Vol.13, n°1, p.59-64, (1973)
- [13] M.R. Kamal, Thermoset characterization for moldability analysis, Polym. Eng. Sci., Vol.14, n°1, p.231-239, (1979)
- [14] รัชดา ไสภาคะยัง และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว. การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอุณหภูมิกายในเนื้อยางระหว่างกระบวนการกรองคงรูป. วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, (2546).
- [15] A. El Labban, P. Mousseau, J.L. Bailleul, Numerical natural rubber curing simulation, obtaining a controlled gradient of the state of cure in a thick-section part. AIP CONFERENCE PROCEEDINGS, Vol. 907, PART B, pages 921-926, (2007)
- [16] T. Jian, Y. Xiangqiao, Finite Element Analysis of Tire Curing Process. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 22, n°11, p. 983-1002, (2003)
- [17] Saxena N.S, Pradeep P and Mathew G. Thermal Conductivity of Styrene Butadiene Rubber Compound with Natural Rubber Prophylactics Waste a Filler, European Polymer Journal, Vol.35, n°9, p.1687-1693, (1999).
- [18] Iwasa M., Ando K. and Hasumura S. Measurement of epoxy resin thermal curing by the environment controllable SPM. STM'5/ICSPM13 Sapporo : Japan, 2005.

- [19] Bhadeshia.H.K.D.H . Differential Scanning Calorimetry Introduction. Material Science and Metallurgy University of Cambridge.
- [20] P.V.O'Neil, Advanced Engineering Mathematics, 4th ed. International Thomas Publishing (ITPTM), (1995)
- [21] ทัศนัย บุญเกิดรัตนกุล. การวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุด้วยหัววัดแบบขดลวดร้อน. คณะพลังงาน และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี : กรุงเทพ, 2548.
- [22] รชดา ใสภาคยัง และ อุตมเกียรติ นนทแก้ว. การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอุณหภูมิกายในเนื้อยางระหว่างกระบวนการอบคงรูป. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.

8/ ภาคผนวก ก

ในการคำนวนหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนสามารถคำนวนได้จากสมการที่ 3-6 ถึงสมการที่ 3-8

$$T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{n\pi x}{L} e^{-D\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t} \quad 3-6$$

โดยที่ $A_0 = \frac{1}{L} \int_0^L T(x) dx \quad 3-7$

แล้ว $A_n = \frac{2}{L} \int_0^L T(x) \cos \frac{n\pi x}{L} dx \quad 3-8$

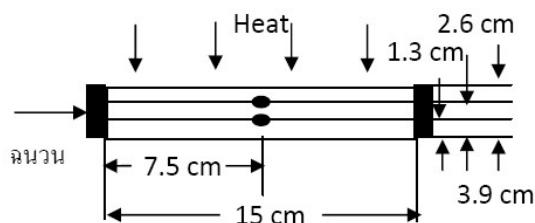
เมื่อ $T(t)$ คืออุณหภูมิที่เวลา t ใดๆ และ $T(x)$ คืออุณหภูมิที่ระยะ x ณ.เวลา t ใดๆ, x และ L คือความหนาโดยในการคำนวนต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิกับเวลา $T(t)$ ที่ต่ำแห่ง x ต่างๆ (รูปที่ 4.13 – รูปที่ 4.15)

การคำนวนหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k สามารถคำนวนได้จากสมการที่ 3-9

$$k = D \times \rho \times C_p \quad 3-9$$

เมื่อ D คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity), ρ คือค่าความหนาแน่น (Density) และ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T

ในการคำนวนหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนจะใช้โปรแกรมคำนวน (MATLAB) โดยมีตัวอย่างการคำนวนสำหรับยางชนิด T354 หนา 3.9 เมตร ที่ต่ำแห่ง 1.3 cm อุณหภูมิ 130°C ดังนี้



ตัวอย่างการคำนวนโดยใช้โปรแกรมคำนวน (MATLAB)

ปัจจอนค่า %Input Parameters ประกอบด้วยค่า h คืออุณหภูมิที่ต่ำแห่งต่าง ๆ ที่เวลาเริ่มต้น, i คือ อุณหภูมิที่ต่ำแห่งต่าง ๆ ที่ 60 นาที, j คือที่ความหนาต่าง ๆ, x คือต่ำแห่งที่วัดอุณหภูมิ, L คือความหนาของยาง

ตัวอย่างโปรแกรม

```

h = [303 303 303 303]; %temperature (kelvin)
i = [423 352.5 335.4 330.3]; %temperature (kelvin)
j = [0 0.013 0.026 0.039]; %position (metre)
x = 0.013; %considered position (metre)
L = 0.039; %specimen length (metre)
w = 0:0.001:10; %w = alfa*(pi/L)^2*time [Omega of the flash method]

```

```
%Curve fitting_____
coef = polyfit(j,h,5);
a = coef(1,1); % ax^5 + bx^4 + cx^3 +dx^2 + ex + f
b = coef(1,2);
c = coef(1,3);
d = coef(1,4);
e = coef(1,5);
f = coef(1,6);

%Initial temperature distribution_____
o = 0:0.0001:L; % x-coordinate
Th = (a*(o.^5))+(b*(o.^4))+(c*(o.^3))+(d*(o.^2))+(e*o)+f;
figure(1);
plot(o,Th,'-j,h,'x');

%Temperature distribution_____
l = 0:0.0001:L; % x-coordinate
Ti = (a*(l.^5))+(b*(l.^4))+(c*(l.^3))+(d*(l.^2))+(e*l)+f;
figure(2);
plot(l,Ti,'-j,i,'x');

% สร้างสมการ (สมการ 2-2) ในโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน
%Determination_____
% IC : T(x,o) = ax^5 + bx^4 + cx^3 +dx^2 + ex + f
temp = 0; %temporary variable
for n = 1:1:1000
    tem1 = exp(-(w*(n^2)));
    tem2 = cos(n*pi*x/L);
    p5 = ((a*(120-(60*((n*pi)^2)))+(5*((n*pi)^4)))*cos(n*pi)-(120*a))/(((n*pi)/L)^6);
    p4 = (b*((4*((n*pi)^3))-(24*((n*pi)^1)))*cos(n*pi))/(((n*pi)/L)^5);
    p3 = ((c*((3*((n*pi)^2))-6)*cos(n*pi)+(6*c))/(((n*pi)/L)^4);
    p2 = (2*d*n*pi*cos(n*pi))/(((n*pi)/L)^3);
    p1 = ((e*cos(n*pi))-e)/(((n*pi)/L)^2);
    p = p5+p4+p3+p2+p1;
    An = 2*p/L;
    tem = tem1*tem2*An;
    temp = temp + tem;
end
A0 = ((a/6)*(L^5))+((b/5)*(L^4))+((c/4)*(L^3))+((d/3)*(L^2))+((e/2)*L)+f;
T = A0 + temp;
figure(2);
plot(w,T,'-');

%wi = interp1(T,w,303,'nearest')
wi = 0.0006;
t = 1, L=0.039, pi=8.314
thdf = wi*((L/pi)^2)/t


ปั๊มน้ำค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบที่ตำแหน่ง 0.013 เมตร ที่เวลาต่าง ๆ


%T(0.013 m, 0 s) = 303.8 K
%T(0.013 m, 120 s) = 304.1 K
%T(0.013 m, 240 s) = 305 K
%T(0.013 m, 360 s) = 306.9 K
%T(0.013 m, 480 s) = 309.1 K
%T(0.013 m, 600 s) = 311.7 K
```

%T(0.013 m m, 720 s) = 314.3 K

%T(0.013 m m, 840 s) = 316.9 K

%T(0.017 m, 960 s) = 319.5 K

%T(0.013 m, 1080 s) = 322 K

%T(0.013 m, 1200 s) = 324.5 K

%T(0.013 m, 1320 s) = 326.8 K

%T(0.013 m, 1440 s) = 329 K

%T(0.013 m, 1560 s) = 331 K

%T(0.013 m, 1680 s) = 333 K

%T(0.013 m, 1800 s) = 334.8 K

%T(0.013 m, 1920 s) = 336.6 K

%T(0.013 m, 2040 s) = 338.2 K

%T(0.013 m, 2160 s) = 339.8 K

%T(0.013 m, 2280 s) = 341.2 K

%T(0.013 m, 2400 s) = 342.6 K

%T(0.013 m, 2520 s) = 343.9 K

%T(0.013 m, 2640 s) = 345.1 K

%T(0.013 m, 2760 s) = 346.1 K

%T(0.013 m, 2880 s) = 347.2 K

%T(0.013 m, 3000 s) = 348.2 K

%T(0.013 m, 3120 s) = 349.2 K

%T(0.013 m, 3240 s) = 350 K

%T(0.013 m, 3360 s) = 350.9 K

%T(0.013 m, 3480 s) = 351.7 K

%T(0.013 m, 3600 s) = 352.5 K

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (alfa) ได้คือ

>> alfa

thdf =

2.7602e-007

จากการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เวลาและตำแหน่งต่าง ๆ ของยางแต่ละชนิดและการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนได้ผลตั้งนี้คือ

ยางคอมปาวด์	อุณหภูมิ (°C)	Thermal Diffusivity (m^2/s), D	
T301		1.5 cm	3.0 cm
	130°C	3.07×10^{-7}	-
	150°C	3.16×10^{-7}	2.81×10^{-7}
T354		1.3 cm	2.6 cm
	130°C	2.76×10^{-7}	-
	150°C	2.81×10^{-7}	2.57×10^{-7}
Ply		0.44 cm	0.88 cm
	150°C	3.06×10^{-7}	2.97×10^{-7}

ภาคผนวก

บทความสำหรับการเผยแพร่

จิรุ๊ช เอ็ม อารีย์วงศ์, วินูลย์ เลิศกิมลันนันท์, ชาญญาณ โกลิตวงศ์, “การศึกษากระบวนการครอบครัวป่ายางโดยการทดสอบ
ของเชิงเดิมด้วยเครื่องมือมิเตอร์และติดไฟฟ้าเรนเที่ยลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, สงขลา, ประเทศไทย, (2553)

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาแล้วผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบแผนงานของโครงการตามข้อเสนอโครงการและระยะเวลาการดำเนินงานจริง

กิจกรรมที่วางแผนไว้	เดือนที่มีกิจกรรมและภาระงาน																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1. สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัย	■																	
2. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านการ Curing		■	■	■														
3. ศึกษาการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในเนื้อยาง		■	■	■														
4. ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของยาง เช่น c_p, ρ, k, Q เป็นต้น			■	■	■	■	■	■										
5. ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางจลนพลาстиซ์ของการอบยาง เช่น α, n, E เป็นต้น			■	■	■	■	■	■										
6. เปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่						■	■	■										
7. คำนวณหาอัตราการคงรูปและการกระจายตัวของ ความร้อน ด้วยระเบียบวิธีทาง Finite Element กับ ยางแผ่นตัวอย่าง						■	■	■	■	■								
8. จัดทำรายงานความก้าวหน้า 9 เดือน								■	■	■								

ตารางที่ 1(ต่อ) ตารางเปรียบเทียบแผนงานของโครงการตามข้อเสนอโครงการและกิจกรรมที่ได้ดำเนินการแล้ว

กิจกรรมที่วางแผนไว้	เดือนที่มีกิจกรรมและภาระงาน																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

9. สร้างแบบจำลองยางล้อตัวอย่างด้วย CAD													
10. คำนวณหากรากระเจียด้วของความร้อนด้วยระเบียบวิธีทาง Finite Element กับยางล้อตัวอย่าง													
11. เปรียบเทียบผลการคำนวณและการวัดจากยางจริงในโรงงานคุตสาหกรรม													
12. วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง													
13. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์/ปิดโครงการ													

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบแผนงานของโครงการตามข้อเสนอโครงการและการดำเนินงานจริง

กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ	ผลสำเร็จ %
1. สืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัย	100 %
2. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านการ Curing	100 %
3. ศึกษาการคำนวณการกระเจียด้วของคุณภาพในเนื้อยาง	100 %

4. ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของยาง เช่น c_p, ρ, k, \dot{Q} เป็นต้น	100%
5. ทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางจนผลศาสตร์ของการอบยาง เช่น α, n, E เป็นต้น	100%
6. เปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่	100%
7. คำนวนหาอัตราการคงรูปและการกระจายตัวของ ความร้อนด้วยระเบียบวิธีทาง Finite Element กับ ยางแผ่นตัวอย่าง	กิจกรรมนี้คือผู้วิจัยมีความเห็นว่าควรยกเลิกเนื่องจากสามารถทดสอบโดยตรงกับยางล็อกในกระบวนการจริง
จัดทำรายงานความก้าวหน้า 6 เดือน	ส่ง สกว. 30 มีนาคม 2553
8. ทดสอบวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในยางตัวอย่าง (ยางแผ่นหนา 20 mm) กับผลที่คำนวนด้วยวิธี Finite Element เพื่อทำการเปรียบเทียบ	เป็นการวัดอุณหภูมิเพื่อหาค่าสมประสิทธิ์การนำความร้อน แทนการเปรียบเทียบกับผลที่คำนวนได้ด้วยวิธี Finite Element มีผลสำเร็จ 100%
9. สร้างแบบจำลองยางล็อกตัวอย่างด้วย CAD	100%
10. คำนวนหาอัตราการกระจายตัวของความร้อนด้วยระเบียบวิธีทาง Finite Element กับยางล็อกตัวอย่าง	100%
11. เปรียบเทียบกับผลการคำนวนและการวัดจากยางจริงในโรงงานอุตสาหกรรม	100%
12. วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง	100%
จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์/ปิดโครงการ	ส่ง สกว. เดือน กรกฎาคม

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบเพื่อวัดคุณภาพของโครงสร้างที่ตั้งไว้และผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการที่ตั้งไว้	การบรรลุตามวัตถุประสงค์
1. เพื่อศึกษาพัฒนาระบบการอบยางเพื่อให้ยางคงรูป และคุณสมบัติการนำความร้อนของ ยาง เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อสามารถทำนายการกระจายตัวของ อุณหภูมิ ภายในยางได้	งานวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์ 100% เมื่อสามารถคำนวนการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ และมีการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลองจริง
2. เพื่อกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการอบยางล็อกให้เหมาะสมสำหรับขนาดและรูปร่างที่ต่างกัน	งานวิจัยบรรลุตามวัตถุประสงค์ในขั้นนี้ 70% เนื่องจากมีการทำหนดตัวแปรที่เหมาะสมใน การอบยางล็อกเพียงไม่เดลเดียว ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการการอบยางล็อกและการวัดผลต่างๆ ทำ ในกระบวนการผลิตจริงในโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้การปรับเปลี่ยนตัวแปรทำได้ค่อนข้าง ลำบาก และการทดสอบกับโมเดลใหม่ๆ มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง อีกทั้งเนื่องจากการพื้นทัว

	<p>ทางเศรษฐกิจทำให้โรงงานที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบอุณหภูมิในกระบวนการนั้น จำเป็นต้องผลิตให้ทันตาม Order ของลูกค้า ทำให้มีส่วนในการให้ความอนุเคราะห์สำหรับการวัดจริงในกระบวนการผลิตได้</p>
3. เพื่อลดต้นทุนในการทดสอบตัวแปรในการอบยางไมเดลใหม่ๆ ให้ได้ไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์	<p>การวัดและเปรียบเทียบต้นทุนในกระบวนการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบยางล้อนั้น จำเป็นต้องใช้เวลาและความร่วมมือจากทางภาคอุตสาหกรรม ในการเก็บข้อมูลและทดลองใช้สภาวะการอบที่คำนวนได้จากการในงานวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลเดิม วัตถุประสงค์ในข้อนี้จึงไม่สามารถบรรลุได้เนื่องจากเหตุผลข้างต้น ดีความจำเป็นต้องเร่งกระบวนการผลิตให้กับกับ Order ของลูกค้า ทำให้มีส่วนในการทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากงานวิจัย อีกทั้งสำหรับไมเดลเก่าที่ได้ทำการทดสอบหาสภาวะในกระบวนการอบเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น ทางภาคอุตสาหกรรมไม่สามารถที่จะทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวน ในขณะที่ไมเดลใหม่ๆ นั้น จำเป็นต้องรอจังหวะและโอกาสจากลูกค้าที่มีความต้องการไมเดลใหม่ๆ</p>

