



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการให้ความร้อนแบบ
ไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างโพลีเมอร์หลายชั้นในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติก
(Thermoforming processes)

The development and investigation of non-homogeneous heating model of
large multi-layer polymer structure in thermoforming processes

โดย บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ และคณะ

พฤษภาคม 2550

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ : การศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการให้ความร้อนแบบ
ไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างโพลีเมอร์หลายชั้นในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติก
(Thermoforming processes)

The development and investigation of non-homogeneous heating model of
large multi-layer polymer structure in thermoforming processes

คณะผู้วิจัย	สังกัด
บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูง ของการให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอในงานพลาสติกหลายชั้นขนาดใหญ่ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยใช้วิธีการให้ความร้อนที่เรียกว่า การให้ความร้อนเป็นพื้นที่ ในการศึกษาที่มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิของพลาสติกแต่ละชั้น มีการปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลองสองส่วนคือ เพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติกกับสิ่งแวดล้อม และการใช้ค่า view factor ที่ถูกต้องแทนการใช้ค่าประมาณ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความถูกต้องของแบบจำลองมากยิ่งขึ้น และจากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาใหม่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองเดิมที่ใช้การประมาณค่า view factor และการไม่คำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติกกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้แล้ว ได้มีการพัฒนาการหาค่าการตั้งค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่นจากการกระจายตัวของอุณหภูมิของแผ่นพลาสติกที่ต้องการ เพื่อให้สะดวกสำหรับนำไปใช้งานจริง โดยการกำหนดการกระจายตัวของอุณหภูมิของแผ่นพลาสติกที่ต้องการ จากนั้นกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นพลาสติกและแผงให้ความร้อน และเวลาในการให้ความร้อน แบบจำลองหาคำนวณหาค่าการตั้งอุณหภูมิที่เหมาะสมของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่น

Abstract

The current investigation focused on precision non-homogeneous heating model of large multi-layer polymer structure in thermoforming processes related to the zone-heating technique. During the study, the numerical model was developed to predict the heated polymer sheet temperature distribution of each layer. Two improvements of model accuracy from the previous works were made. First, the energy lost from a heated polymer sheet to the surrounding environment via radiation was taken in to account. Therefore, the net radiation method was applied to determine the incident radiant energy on the polymer sheet. Second, the new comprehensive view factor was applied in the new model. The view factor simplifications embedded in previously developed models are of limited applicability to the target precision thermoforming concept. The numerical results from the newly developed model showed the accuracy improvement in comparison to the previously developed model that neglected the energy lost to the surrounding environment. Moreover, the optimized radiative heating of opaque multi-layer thermoplastic sheet during thermoforming processes has been studied by using a newly developed modeling and

optimization approach. The resultant simulation model can accommodate full non-symmetric zone heating situations and multi-layered forming materials. A coupled optimization package was then developed to obtain optimized heater pattern solutions that will lead to desired material temperatures during thermoforming processes. This is done by specifying a desired thermoplastic sheet temperature distribution and iteratively solving for the heater setting needed to obtain the desired results

Executive Summary

กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง (Thermoforming Process) เป็นกระบวนการที่ง่ายไม่ซับซ้อน เวลาที่ใช้ในการผลิตต่อรอบ (Cycle time) ต่ำ และราคาของแม่พิมพ์มีราคาถูกกว่าแม่พิมพ์ของการฉีดพลาสติก (Injection Molding) มาก โดยเฉพาะงานที่มีโครงสร้างพลาสติกหลายชั้นและมีขนาดใหญ่ แต่ที่ผ่านมากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งยังไม่มีหรือนำความรู้ทางวิศวกรรมไปประยุกต์ใช้ โดยการทำงานทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ควบคุมเครื่องจักร ทำให้ไม่สามารถควบคุมความหนา และการกระจายของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกได้ดีพอ ทำให้การขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนทำได้ลำบาก

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการนำความรู้ทางวิศวกรรมเข้าใช้เพื่อแก้ปัญหของการกระจายตัวของความหนาตลอดทั้งชิ้นงาน โดยผ่านการควบคุมการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก ซึ่งต้องกระทำผ่านการตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่น ในเครื่องจักรขนาดใหญ่จะมีแผ่นให้ความร้อนประมาณ 100-200 แผ่น จากปัญหาที่กล่าวมา แนวทางในการวิจัยคือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิของแผ่นพลาสติกตลอดทั่วทั้งแผ่น โดยพิจารณาเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้น ในที่นี้ได้ทำการศึกษาในกรณีที่มี 3 ชั้น ชั้นนอกจะเป็นวัสดุต่างชนิดกับชั้นใน ซึ่งชั้นในอาจเป็นพลาสติกราคาถูกหรือเป็นพลาสติกใช้แล้วก็ได้ แล้วหลังจากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่น จากการกำหนดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกที่ต้องการ

จากผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก จากการกำหนดค่าการดำเนินการของกระบวนการ (Process Parameters) คือรูปแบบอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกและเวลาในการให้ความร้อน มีประโยชน์อย่างยิ่งในแง่ของการทำนายอุณหภูมิได้ผิวของแผ่นพลาสติกและอุณหภูมิของพลาสติกชั้นตรงกลางซึ่งเป็นคนละชนิดกับพลาสติกที่อยู่ด้านนอก ซึ่งไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดได้ นอกจากนี้เนื่องจากเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ทำให้คุณสมบัติในการนำความร้อนต่างกันและช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูปต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะคาดเดาอุณหภูมิของพลาสติกชั้นตรงกลาง แต่เป็นค่าที่จำเป็นต้องรู้ในกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากอุณหภูมิตลอดทั่วทั้งแผ่นพลาสติกทั้งชั้นนอกและชั้นตรงกลาง จะต้องอยู่ในช่วงของอุณหภูมิการขึ้นรูปของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้ยังทำให้สามารถทดลองการตั้งตัวแปรของกระบวนการเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก โดยไม่จำเป็นที่จะต้องทดลองกับเครื่องจักรและวัสดุจริง

นอกจากนี้ ในส่วนของการพัฒนากระบวนการหาค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนที่เหมาะสม จากการกำหนดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกที่ต้องการ ค่าระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกและเวลาในการให้ความร้อน ได้แสดงผลลัพธ์

ที่น่าพอใจ และแสดงถึงประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปใช้ในการ
ขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง อย่างไรก็ตาม การที่จะได้รูปแบบของการ
กระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกใกล้เคียงกับที่ต้องการ สมรรถนะของเครื่องจักรมีผล
สำคัญอย่างยิ่ง เช่นจำนวนของแผ่นให้ความร้อน ขนาดของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่น เช่นหากยัง
ต้องการการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ซับซ้อน ยังต้องการแผ่นให้ความร้อนขนาดเล็กและมีจำนวน
มากขึ้นเท่านั้น

ในการใช้กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่น เราจะพบว่าสามารถที่จะลดต้นทุนการผลิตลงไปได้มาก โดยที่ชิ้นงานไม่จำเป็นต้องผลิตในเชิงเป็นการผลิตจำนวนมากๆ (Mass Production) เพื่อให้คุ้มกับต้นทุนในการดำเนินการ เช่นค่าการออกแบบและสร้างโมลด์ (Mold) ในกระบวนการฉีดพลาสติก ยิ่งชิ้นงานมีขนาดใหญ่ราคาในการสร้างก็ยังมีราคาสูงเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ากระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งจะมีข้อดีในแง่ของการลดต้นทุนการผลิตเพียงใด แต่ยังคงขาดการนำความรู้ทางวิศวกรรมไปประยุกต์ใช้ ซึ่งส่วนใหญ่ยังใช้วิธีลองผิดลองถูก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นงานขนาดใหญ่และมีความหนา ทำให้ผลที่ได้รับยังไม่น่าพอใจเท่าที่ควรทั้งในแง่ของการลดต้นทุนการผลิตและคุณภาพของชิ้นงาน

ปัญหาสำคัญของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งคือ การไม่สามารถควบคุมการกระจายความหนาของชิ้นให้สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานได้ วิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาที่กล่าวมาแล้วนั้นคือ การใช้การให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ (Zone heating technique) แก่แผ่นพลาสติก กล่าวคือต้องการสร้างอุณหภูมิสูงบนพื้นที่ที่มีการยึดตัวต่ำตอนขึ้นรูป และสร้างอุณหภูมิที่ต่ำกว่าในพื้นที่ที่มีการยึดตัวสูง ดังนั้นการตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนจึงต้องไม่สม่ำเสมอด้วย อย่างไรก็ตามพบว่า ตัวแปรของกระบวนการ (Process parameters) มีมากมายหลายตัวเช่น จำนวนของแผ่นให้ความร้อนที่ต้องตั้งอุณหภูมิ ซึ่งอาจมีจำนวนถึง 100 – 200 แผ่นเลยทีเดียว นอกจากนี้ยังมีระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติก และเวลาในการให้ความร้อน ทำให้การใช้กระบวนการลองผิดลองถูกมักประสบปัญหาความยุ่งยากและไม่ประสบผลสำเร็จเท่าที่ควร นอกจากนี้ยังขาดความเข้าใจถึงผลกระทบของตัวแปรของกระบวนการต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งแต่บนแผ่นพลาสติก

ในขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก ได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งแต่บนแผ่นพลาสติก ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้ถูกออกแบบมาสำหรับชิ้นงานขนาดเล็กและบางเท่านั้น จึงไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก ทำให้มีการคำนวณการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนเฉพาะแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกเท่านั้น และการประมาณค่า View factor เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ ได้กำจัดจุดอ่อนที่กล่าวมาทั้งหมด คือ มีการคำนึงถึงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติกและสิ่งแวดล้อม และการคำนวณค่าที่แท้จริงของ View factor ทำให้ผลที่ได้รับมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้นมาใหม่มีประโยชน์อย่างยิ่งในแง่ของการทำนายอุณหภูมิได้ผิวของแผ่นพลาสติกและอุณหภูมิของพลาสติกชั้นตรงกลางซึ่งเป็นคนละชนิดกับพลาสติกที่อยู่ด้านนอก ซึ่งไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดได้ นอกจากนี้เนื่องจากเป็นวัสดุต่างชนิดกันทำให้คุณสมบัติในการนำความร้อนต่างกันและช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูปต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะคาดเดาอุณหภูมิของพลาสติกชั้นตรงกลาง แต่เป็นค่าที่จำเป็นต้องรู้ในกระบวนการขึ้นรูปเนื่องจากอุณหภูมิตลอดทั่วทั้งแผ่นพลาสติกทั้งชั้นนอกและชั้นตรงกลาง จะต้องอยู่ในช่วงของ

อุณหภูมิการขึ้นรูปของวัสดุนั้นๆ นอกจากนี้ยังทำให้สามารถทดลองการตั้งตัวแปรของกระบวนการเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก โดยไม่จำเป็นที่จะต้องทดลองกับเครื่องจักรและวัสดุจริง

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก ซึ่งหลักๆมีอยู่ด้วยกัน 3 ปัจจัยคือ ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนและแผ่นพลาสติก อุณหภูมิของแผงให้ความร้อน และเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งจากการศึกษาถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนและแผ่นพลาสติกพบว่า View Factor มีความสำคัญอย่างมากต่อการปริมาณการได้รับความร้อนจากแผงให้ความร้อนของแผ่นพลาสติก และการสูญเสียความร้อนของแผ่นพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อม โดยบริเวณกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกจะมีค่า View Factor ระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกสูงสุด แต่มีค่า View Factor ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับแผ่นพลาสติกต่ำสุด หมายความว่าบริเวณกึ่งกลางแผ่นพลาสติกจะรับการแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากแผงให้ความร้อนสูงสุด แต่จะถ่ายเทการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นพลาสติกไปสู่สิ่งแวดล้อมต่ำสุด ด้วยอัตราการแผ่รังสีความร้อนที่เท่ากันทุกแผ่นให้ความร้อน ทำให้บริเวณกึ่งกลางแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งจะกลับกันกับบริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติก คือ มี View Factor ระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกต่ำสุด แต่มีค่า View Factor ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับแผ่นพลาสติกสูงสุด ซึ่งหมายความว่าบริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติกจะรับการแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากแผงให้ความร้อนต่ำสุด แต่จะถ่ายเทการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นพลาสติกไปสู่สิ่งแวดล้อมสูงสุด ทำให้บริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณกึ่งกลางของแผ่นพลาสติก นอกจากนี้หากต้องการให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จำเป็นที่จะต้องตั้งให้ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกมีค่าต่ำ ยิ่งระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกมีค่ามากขึ้นเท่าใด การควบคุมการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกก็ยิ่งยากขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้มุ่งศึกษางานที่มีความหนา ดังนั้นหากระยะใกล้เกินไปอาจทำให้ผิวของแผ่นพลาสติกเกิดการไหม้ แต่อุณหภูมิของกึ่งกลางความหนาของแผ่นพลาสติกยังไม่อยู่ในช่วงของการขึ้นรูป

ในส่วนของผลกระทบของอุณหภูมิของแผงให้ความร้อน และเวลาในการให้ความร้อนนั้นพบว่า ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบทั้งในกรณีการตั้งค่าอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนสูงและต่ำ โดยสังเกตอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกทั้งที่ผิวและที่กึ่งกลางความหนาเปรียบเทียบกับเวลาในการให้ความร้อน จากการศึกษาพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกรณีที่ตั้งค่าอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนไว้สูงจะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ตั้งค่าไว้ต่ำ และที่สำคัญคือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและกึ่งกลางความหนาจะมีค่าสูงกว่ามากในกรณีที่ตั้งค่าอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนสูง ดังนั้นการขึ้นรูปที่ไม่สมบูรณ์อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของ

แผ่นพลาสติกต่ำกว่าอุณหภูมิปกติของการขึ้นรูปพลาสติกชนิดนั้น ในกรณีที่ต้องระวังเป็นพิเศษคือ เป็นชิ้นงานที่มีความหนาแน่น และช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปแคบ

นอกจากนี้ ในส่วนของการพัฒนากระบวนการการหาค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนที่เหมาะสม จากการกำหนดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกที่ต้องการ ค่าระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกและเวลาในการให้ความร้อน ได้แสดงผลลัพธ์ที่น่าพอใจ และแสดงถึงประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง อย่างไรก็ตาม การที่จะได้รูปแบบของการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกใกล้เคียงกับที่ต้องการ สมรรถนะของเครื่องจักรมีผลสำคัญอย่างยิ่ง เช่นจำนวนของแผ่นให้ความร้อน ขนาดของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่น เช่นหากยังต้องการการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ซับซ้อน ยังต้องการแผ่นให้ความร้อนขนาดเล็กและมีจำนวนมากขึ้นเท่านั้น

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

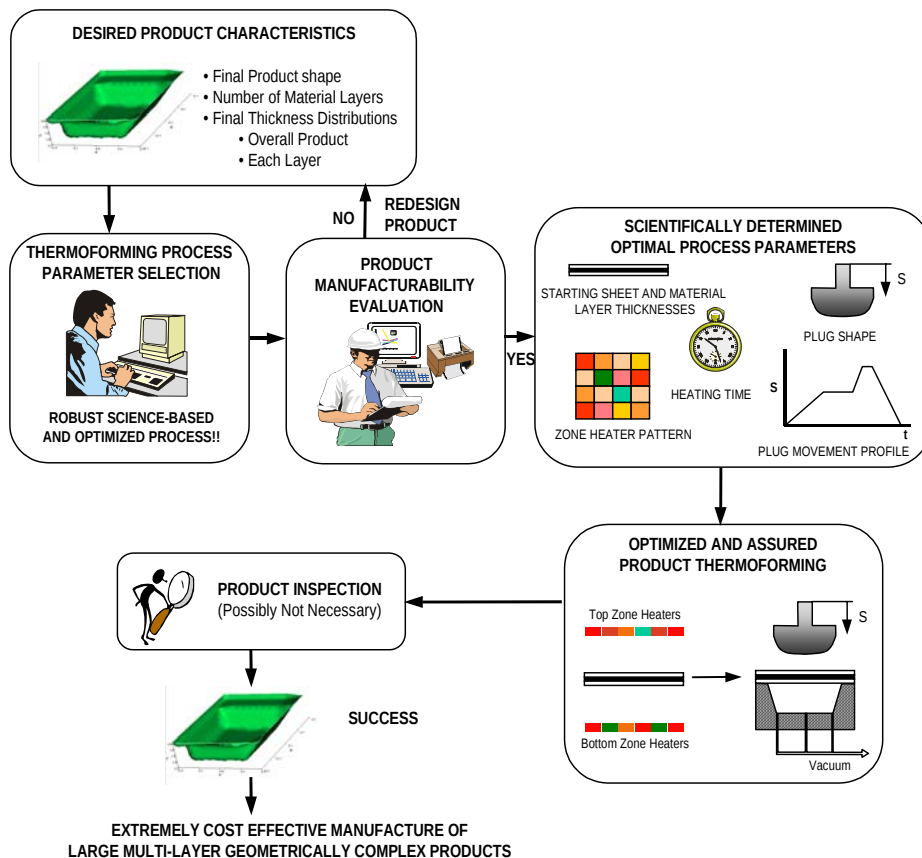
ในปัจจุบันได้มีการนำพลาสติกไปใช้งานอย่างแพร่หลาย พลาสติกมีหลายประเภทแต่ละประเภทก็เหมาะสมกับงานที่แตกต่างกันออกไป ในการขึ้นรูปพลาสติกให้มีรูปทรงต่าง ๆ สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การรีดขึ้นรูป การอัดขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูป การเป่าขึ้นรูป เป็นต้น การขึ้นรูปพลาสติกแผ่นที่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในปัจจุบันคือการขึ้นรูปโดยวิธีเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ในกระบวนการนี้จะนำพลาสติกแผ่นไปให้ความร้อน แล้วนำไปขึ้นรูปแบบสูญญากาศ การขึ้นรูปโดยวิธีนี้แม่แบบจะมีราคาต่ำจึงเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการผลิตโดยวิธีอื่น โดยเฉพาะสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ดังเช่นแสดงในรูปที่ 1.1 การฉีดขึ้นรูปจะมีข้อจำกัดมาก เนื่องจากแม่แบบมีราคาแพง ดังนั้นการผลิตโดยใช้กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งจึงเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกว่า ที่ผ่านมากกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งยังไม่มีมีการนำความรู้ทางวิศวกรรมไปประยุกต์ใช้ โดยการทำงานทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ควบคุมเครื่องจักร ทำให้ไม่สามารถควบคุมความหนา และการกระจายของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกได้ดีพอ ทำให้การขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนทำได้ลำบาก



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างของชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ขึ้นรูปโดยวิธีเทอร์โมฟอร์มมิ่ง
(ที่มา : TPI Corporation)

ต่อมา ได้มีการพัฒนาแนวคิดและวิธีการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่โดยวิธีเทอร์โมฟอร์มมิ่งให้มีคุณภาพและมีสมรรถนะดีขึ้น โดยการนำความรู้ทางวิศวกรรมไปประยุกต์ใช้ ซึ่งเราเรียกว่า Intelligent

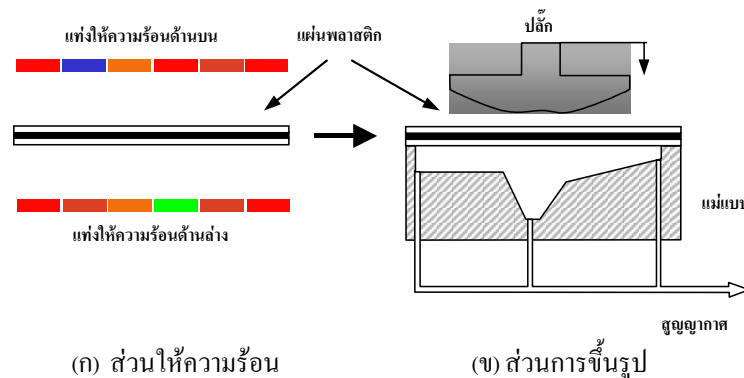
Thermoforming Processes ขั้นตอนทั้งหมดตั้งแต่การให้ความร้อนจนถึงขั้นตอนการขึ้นรูป จะต้องผ่านการวิเคราะห์และคำนวณบนคอมพิวเตอร์ ก่อนที่จะนำไปทดลองผลิตจริง ในกระบวนการดังกล่าวสามารถที่จะลดกระบวนการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งเป็นส่วนที่เพิ่มต้นทุนของการผลิต ทั้งในส่วนของเวลาและชิ้นงานที่เสียหายจากการลอง โดยขั้นตอนของ Intelligent Thermoforming Processes แสดงในรูปที่ 1.2



รูป 1.2 หลักการกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่ประยุกต์ใช้ความรู้ทางวิศวกรรม (Intelligent Thermoforming Processes)

อย่างไรก็ตามกระบวนการให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกก่อนการขึ้นรูปก็ยังคงใช้วิธีให้ความร้อนแบบเก่าคือ การให้ความร้อนแบบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ทำให้การขึ้นรูปชิ้นงานที่มีโครง สร้างซับซ้อนยังคงมีปัญหาเกิดขึ้น ในการศึกษาแนวทางการขึ้นรูปชิ้นงานโดยวิธีเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบใหม่ด้วยการให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ เรียกว่า Zone heating technique โดยในบริเวณที่มี

การยืดตัวของแผ่นพลาสติกมากก็จะทำให้ความร้อนต่ำ ส่วนบริเวณที่ต้องการยืดตัวน้อยก็จะให้ความร้อนสูง หลังจากการอัดขึ้นรูปแล้ว จะทำให้ ชิ้นงานมีคุณภาพดีและแข็งแรงกว่า ซึ่งแนวทางที่สองนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีแรกและเป็นแนวทางที่จะใช้ ในงานวิจัยครั้งนี้ หลักการขึ้นรูปโดยวิธีเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบใหม่แสดงได้ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การขึ้นรูปชิ้นงานแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยการให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ

หลักการขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่งแบบใหม่กำลังได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตาม การนำเอาหลักการนี้ไปใช้ให้มีประสิทธิภาพยังทำได้ยาก เริ่มตั้งแต่การให้ความร้อน ถ้าเป็นชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ดังรูป 1.2 อาจต้องใช้แท่งให้ความร้อนหลายร้อยแท่ง และต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่แท่ง ความร้อนแต่ละแท่งให้เหมาะสม นอกจากนี้ปลັกดที่ใช้เป็นตัวช่วยในการขึ้นรูปก็มีลักษณะจำเพาะ ทำให้การนำเอาหลักการนี้ไปใช้ยังต้องมีการพัฒนาเพิ่มขึ้น

ในปัจจุบันการขึ้นรูปโดยวิธีเทอร์โมฟอร์มมิ่งให้ได้สภาวะที่เหมาะสมก็ยังใช้การลองผิดลองถูกอยู่ ไม่ว่าจะเป็นการเลือกชนิดของแผ่นพลาสติก ความหนาของพลาสติก รูปแบบและเวลาการให้ความร้อน รวมถึงรูปร่างของปลັกด ในบางครั้งก็จะประสบความสำเร็จคือได้รูปทรงที่ซับซ้อนตามที่ต้องการ แต่บางครั้งก็ไม่ประสบผลสำเร็จ ทำให้สูญเสียเวลาและพลาสติกที่ใช้จำนวนมาก

เพื่อให้การขึ้นรูปโดยใช้เทคโนโลยีแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งมีประสิทธิภาพมากขึ้น จะนำหลักการทางวิทยาศาสตร์ดังรูปที่ 1.2 มาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ โดยจะเน้นการศึกษาและพัฒนาในส่วนของการให้ความร้อน เท่านั้นคือ เมื่อได้รูปทรง ขนาด ความหนาของชิ้นงานก็จะเลือกพารามิเตอร์ที่ใช้ทำการวิเคราะห์ คำนวณหา สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อน โดยใช้หลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ จากนั้นทำการทดลองเปรียบเทียบผลที่ได้กับแบบจำลองที่สว่างขึ้น เพื่อให้ได้ความรู้ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักในการศึกษาคือเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการขึ้นรูปพลาสติกแบบเทอร์โมฟอร์มมิ่งของแผ่นโพลีเมอร์หลายชั้นโดยใช้ความรู้ทางวิศวกรรมเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้คือ

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการการให้ความร้อนของแผ่นโพลีเมอร์หลายชั้น โดยใช้กระบวนการการให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ
2. เพื่อพัฒนาความรู้ความเข้าใจในการให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกแบบไม่สม่ำเสมอ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น
3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด(Process Parameter Optimization) ของกระบวนการการให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะใช้วิธีการของไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์
2. ใช้วิธีการแผ่รังสีความร้อนสุทธิ (Net radiation method) ในการคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผ่นให้ความร้อน แผ่นโพลีเมอร์และสิ่งแวดล้อม

1.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตกระบวนการขึ้นรูปทางเทอร์โมฟอร์มมิ่งจะมีข้อจำกัดทางด้านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ เวลา ความดัน จะใช้วิธีการลองผิดลองถูก หรืออาศัยประสบการณ์ของผู้ทำงานโดยตรง [1] เนื่องจากมีความต้องการชิ้นงานที่ซับซ้อนและโครงสร้างที่ แข็งแรงขึ้น จึงต้องมีการควบคุมความหนาและรูปร่างของชิ้นงาน จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการให้ความร้อนโดยวิธีแบ่งโซน deLorenzi, และคณะ [2] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกหลังจากการให้ความร้อน โดยพิจารณาการแผ่รังสีร่วมกับการพาความร้อนของวัสดุ James Throne [3] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ โดยพิจารณาปัญหาการนำความร้อนแบบ 1 มิติ ซึ่งขึ้นกับเวลา ร่วมกับการพาและการแผ่รังสีความร้อน Duarte and Covas [4] ใช้สมการการนำความร้อนแบบ 1 มิติ ซึ่งขึ้นกับเวลา ในการคำนวณหาความหนาของชิ้นงานด้วยวิธีการพาและแผ่รังสีความร้อน โดยพิจารณาถึงตัวประกอบรูปร่าง (view factor) ของผิวชิ้นงานกับแท่งความร้อนที่วางขนานกัน จากนั้นทำนายการกระจายของอุณหภูมิบนวัสดุ โดยการกำหนดขนาดของแท่งความร้อน พบว่า ขนาดของแท่งความร้อนมีผลอย่างยิ่งต่อการกระจายของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก

เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายโดยไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติกกับสิ่งแวดล้อม ต่อมาได้มีแนวความคิดในการสร้างแบบจำลองในการทำนายการกระจายของอุณหภูมิ โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนแบบแบ่งโซน บรรยงค์ รุ่งเรือง ด้วยบุญ [5], [6] ได้พัฒนาแบบจำลองการให้ความร้อนแบบใหม่ โดยใช้วิธีการแผ่รังสีความร้อนสุทธิในการคำนวณหาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติก แท่งความร้อน และสิ่งแวดล้อม โดยประยุกต์ใช้ตัวประกอบรูปร่างกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นพบว่า วิธีการแผ่รังสีความร้อนสุทธิ ให้ผลที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเดิม จากนั้นได้ทำการพัฒนาเพิ่มเติมถึงการจัดวางรูปแบบแท่งให้ความร้อนอย่างเหมาะสม ซึ่งจะช่วยในการหาการกระจายของอุณหภูมิต่อแผ่นพลาสติกได้ดียิ่งขึ้น

ต่อมาได้มีการศึกษาการขึ้นรูปพลาสติกหลายชั้น โดยใช้วัสดุประเภทโพรพอกซ์อยู่ภายใน และมีแผ่นพลาสติกประกบบนและล่าง [7] แบบโครงสร้างภายในคล้ายรังผึ้ง [8] และแบบใช้โฟมอยู่ภายใน [9] โดยการให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันบนแผ่นพลาสติก พบว่า ยังคงมีปัญหาในการให้ความร้อนกับชิ้นงาน จึงต้องมีการพัฒนาวิธีการให้ความร้อน และเวลาที่เหมาะสมกับพลาสติกหลายชั้นต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

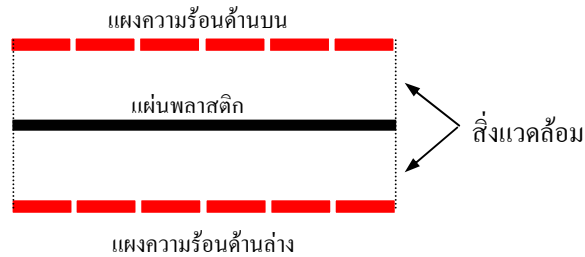
จากข้อจำกัดในการขึ้นรูปพลาสติกด้วยวิธีอื่น ๆ และความต้องการผลิตภัณฑ์พลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา อัตราการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมพลาสติกไทยเพิ่มขึ้นมากถึง 12 % ต่อปี โดยคาดว่า มีโรงงานผลิตพลาสติกในไทยมากกว่า 5,000 แห่ง เทอร์โมฟอร์มมิ่งเป็นวิธีการผลิตหลักวิธีหนึ่งในอุตสาหกรรมพลาสติกไทย เช่น อุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ในครัวเรือน อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ [10] อุตสาหกรรมการผลิตเรือ เมื่อมีความต้องการวัสดุชนิดใหม่ ที่มีน้ำหนักเบาหรือมีโครงสร้างแข็งแรง สามารถนำวัสดุอื่นมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตพลาสติกหลายชั้นได้ ซึ่งอาจช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีราคาถูกลง และยังเป็นทางเลือกการใช้ปริมาณพลาสติกลดลงได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้เวลาในการย่อยสลายนานยากที่จะทำลาย หรือถ้าเผาไหม้ก็จะทำให้เกิดก๊าซพิษ ทำให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง

การพัฒนาการให้ความร้อนแบบใหม่กับพลาสติกหลายชั้นโดยวิธีแบ่งโซน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมได้ ซึ่งถ้าทำได้จริงจะทำให้อุตสาหกรรมไทยมีความก้าวหน้าและเจริญอย่างรวดเร็ว ถ้าการวิจัยนี้ได้ผลจะได้ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับอุตสาหกรรมต่อไป โดยงานวิจัยนี้จะเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านเทอร์โมฟอร์มมิ่ง คือ จะศึกษาในช่วงการให้ความร้อน ส่วนช่วงการขึ้นรูปจะได้ศึกษาต่อไป เพื่อจะได้นำไปใช้ได้อย่างสมบูรณ์

บทที่ 2

ทฤษฎี และ การสร้างสมการเชิงตัวเลข

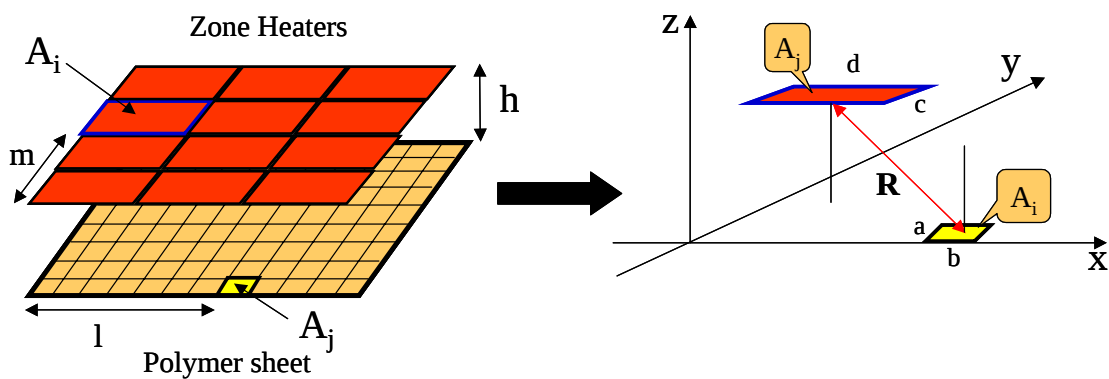
2.1 การพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า View Factor



รูปที่ 2.1 แสดงการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก

จากรูปที่ 2.1 ในขั้นตอนของการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก ถ้าเราพิจารณาเป็นระบบปิด อันประกอบไปด้วย แผงความร้อน แผ่นพลาสติก และ สิ่งแวดล้อม ค่า View factor (F_{ij}) ที่ต้องคำนวณหา มี 2 กลุ่มหลักๆ คือ

สมการที่ใช้ในการหาค่า View factor สามารถแสดงได้ดังในสมการที่ 1. เป็นสมการที่สามารถหาค่า View factor ระหว่าง แผ่นสี่เหลี่ยมที่ขนานกันและไม่จำเป็นต้องอยู่ตรงข้ามกัน โดยที่จะมีขนาดเท่ากันหรือไม่ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงตัวแปรต่างๆในการคำนวณค่า View factor

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi} [T_1 + T_2 + T_3 + T_4 - T_5 - T_6 - T_7 - T_8 + T_9] \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\sqrt{1+(C+M)^2}}{2AB} \left\{ (L+B) \tan^{-1} \left(\frac{L+B}{\sqrt{(C+M)^2+1}} \right) + (L-D) \tan^{-1} \left(\frac{L-D}{\sqrt{(C+M)^2+1}} \right) \right. \\ &\quad \left. - L \tan^{-1} \left(\frac{L}{\sqrt{(C+M)^2+1}} \right) - (L-D+B) \tan^{-1} \left(\frac{L-D+B}{\sqrt{(C+M)^2+1}} \right) \right\} \\ T_2 &= \frac{\sqrt{(M-A)^2+1}}{2AB} \left\{ (L+B) \tan^{-1} \left(\frac{L+B}{\sqrt{(M-A)^2+1}} \right) + (L-D) \tan^{-1} \left(\frac{L-D}{\sqrt{(M-A)^2+1}} \right) \right. \\ &\quad \left. - L \tan^{-1} \left(\frac{L}{\sqrt{(M-A)^2+1}} \right) - (L-D+B) \tan^{-1} \left(\frac{L-D+B}{\sqrt{(M-A)^2+1}} \right) \right\} \\ T_3 &= \frac{\sqrt{(L+B)^2+1}}{2AB} \left\{ (M+C) \tan^{-1} \left(\frac{M+C}{\sqrt{(L+B)^2+1}} \right) + (M-A) \tan^{-1} \left(\frac{M-A}{\sqrt{(L+B)^2+1}} \right) \right. \\ &\quad \left. - M \tan^{-1} \left(\frac{M}{\sqrt{(L+B)^2+1}} \right) - (M+C-A) \tan^{-1} \left(\frac{M+C-A}{\sqrt{(L+B)^2+1}} \right) \right\} \\ T_4 &= \frac{\sqrt{(L-D)^2+1}}{2AB} \left\{ (M+C) \tan^{-1} \left(\frac{M+C}{\sqrt{(L-D)^2+1}} \right) + (M-A) \tan^{-1} \left(\frac{M-A}{\sqrt{(L-D)^2+1}} \right) \right. \\ &\quad \left. - M \tan^{-1} \left(\frac{M}{\sqrt{(L-D)^2+1}} \right) - (M+C-A) \tan^{-1} \left(\frac{M+C-A}{\sqrt{(L-D)^2+1}} \right) \right\} \\ T_5 &= \frac{\sqrt{(C+M-A)^2+1}}{2AB} \left\{ (L+B) \tan^{-1} \left(\frac{L+B}{\sqrt{(C+M-A)^2+1}} \right) + (L-D) \tan^{-1} \left(\frac{L-D}{\sqrt{(C+M-A)^2+1}} \right) \right. \\ &\quad \left. - L \tan^{-1} \left(\frac{L}{\sqrt{(C+M-A)^2+1}} \right) - (L-D+B) \tan^{-1} \left(\frac{L-D+B}{\sqrt{(C+M-A)^2+1}} \right) \right\} \\ T_6 &= \frac{\sqrt{1+L^2}}{2AB} \left\{ (M+C) \tan^{-1} \left(\frac{M+C}{\sqrt{L^2+1}} \right) + (M-A) \tan^{-1} \left(\frac{M-A}{\sqrt{L^2+1}} \right) \right. \\ &\quad \left. - M \tan^{-1} \left(\frac{M}{\sqrt{L^2+1}} \right) - (M+C-A) \tan^{-1} \left(\frac{M+C-A}{\sqrt{L^2+1}} \right) \right\} \\ T_7 &= \frac{\sqrt{1+M^2}}{2AB} \left\{ (L+B) \tan^{-1} \left(\frac{L+B}{\sqrt{M^2+1}} \right) + (L-D) \tan^{-1} \left(\frac{L-D}{\sqrt{M^2+1}} \right) \right. \\ &\quad \left. - L \tan^{-1} \left(\frac{L}{\sqrt{M^2+1}} \right) - (L-D+B) \tan^{-1} \left(\frac{L-D+B}{\sqrt{M^2+1}} \right) \right\} \end{aligned}$$

$$T_8 = \frac{\sqrt{(L-D+B)^2+1}}{2AB} \left\{ (M+C) \tan^{-1} \left(\frac{M+C}{\sqrt{(L-D+B)^2+1}} \right) + (M-A) \tan^{-1} \left(\frac{M-A}{\sqrt{(L-D+B)^2+1}} \right) \right. \\ \left. - M \tan^{-1} \left(\frac{M}{\sqrt{(L-D+B)^2+1}} \right) - (M+C-A) \tan^{-1} \left(\frac{M+C-A}{\sqrt{(L-D+B)^2+1}} \right) \right\} \\ T_9 = \frac{1}{4AB} \ln \left[\frac{\{(C+M)^2+1+L^2\}\{(C+M)^2+(L-D-B)^2+1\}\{M^2+(L+B)^2+1\}}{(L^2+M^2+1)\{(C+M)^2+(L+B)^2+1\}\{(C+M)^2+(L-D)^2+1\}} \right. \\ \frac{\{M^2+(L-D)^2+1\}\{(M-A)^2+L^2+1\}\{(M-A)^2+(L-D+B)^2+1\}}{\{(C+M-A)^2+L^2+1\}\{(C+M-A)^2+(L-D+B)^2+1\}\{(M-A)^2+(L+B)^2+1\}} \\ \left. \frac{\{(C+M-A)^2+(L+B)^2+1\}\{(C+M-A)^2+(L-D)^2+1\}}{\{(M-A)^2+(L-D)^2+1\}\{M^2+(L-D+B)^2+1\}} \right]$$

เมื่อ $L = \frac{1}{h}$, $A = \frac{a}{h}$, $B = \frac{b}{h}$, $M = \frac{m}{h}$, $C = \frac{c}{h}$, and $D = \frac{d}{h}$

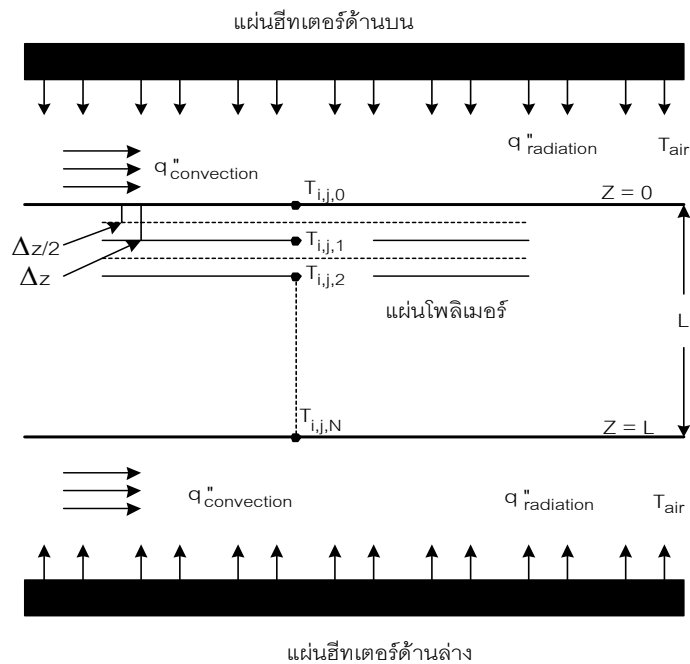
2.2 การพัฒนาสมการเชิงตัวเลข

การหาการกระจายของอุณหภูมิบนแผ่นโพลีเมอร์ จะพิจารณาแผ่นโพลีเมอร์ที่วางอยู่ระหว่างฮีตเตอร์ให้ความร้อนด้านบนและด้านล่างดังรูป 2.3

เนื่องจากการให้ความร้อนกับแผ่นโพลีเมอร์เป็นแบบสมมาตรกัน และถ้าแผ่น โพลีเมอร์มีขนาดใหญ่มาก โดยความกว้างและความยาวมีค่ามากกว่าความหนา และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นโพลีเมอร์มีค่าต่ำ ดังนั้นการนำความร้อนจึงสามารถพิจารณาเป็นแบบ 1 มิติตามความหนา ซึ่งขึ้นกับเวลา โดยพิจารณาว่าเมื่อเวลาผ่านไป $t = p\Delta t$ เมื่อ p เป็นจำนวนเต็มใด ๆ และให้แผ่นโพลีเมอร์ทั้งหมดมีความหนาเท่ากับ L แบ่งแผ่นโพลีเมอร์ออกเป็น N ส่วนเท่า ๆ กัน แต่ละส่วนมีความหนา ΔZ ให้อุณหภูมิที่จุดแบ่งเป็น $T_{i,j,1}, T_{i,j,2}, \dots, T_{i,j,N-1}$ และอุณหภูมิของด้านบนและด้านล่างของแผ่นโพลีเมอร์คือ $T_{i,j,0}$ และ $T_{i,j,N}$ ตามลำดับ

ในการหาการกระจายของอุณหภูมิของแผ่นโพลีเมอร์หลายชั้น ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาในกรณีที่เป็นโพลีเมอร์หลายชั้นในลักษณะแซนวิช โดยกำหนดให้โพลีเมอร์ตรงกลางเป็นโพลีเมอร์ต่างชนิดกับโพลีเมอร์ที่ประกบอยู่ด้านบนอก เมื่อพิจารณาตามแนวแกน Z จะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

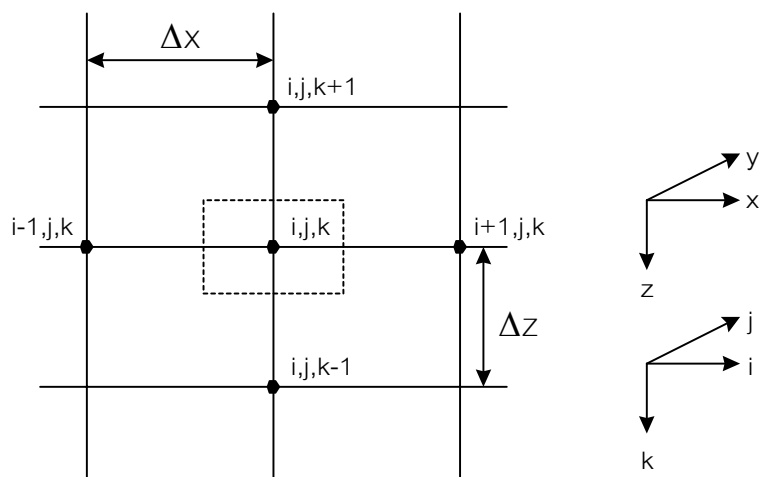
1. อุณหภูมิภายในแผ่นโพลีเมอร์
2. อุณหภูมิที่ขอบด้านบนของแผ่นโพลีเมอร์
3. อุณหภูมิที่ขอบด้านล่างของแผ่นโพลีเมอร์
4. อุณหภูมิของผิวสัมผัสระหว่างชั้นโพลีเมอร์



รูป 2.3 แสดงการถ่ายเทความร้อนระหว่างฮีตเตอร์และแผ่นโพลิเมอร์

2.2.1. อุณหภูมิภายในแผ่นโพลิเมอร์

เมื่อใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (วิธีเอ็กพลิชิต) ในการหาการกระจายของอุณหภูมิในแผ่นโพลิเมอร์จะพิจารณาพื้นที่เล็ก ๆ ในแผ่นโพลิเมอร์ดังรูป 2.4



รูป 2.4 จุดเชื่อมต่อภายในแผ่นโพลิเมอร์ กรณีการนำความร้อนแบบ 1 มิติที่ขึ้นกับเวลา

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{T_{i,j,k-1}^P + T_{i,j,k+1}^P - 2T_{i,j,k}^P}{\Delta z^2}$

และ $\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{i,j,k}^{P+1} - T_{i,j,k}^P}{\Delta t}$

แทนค่า $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ และ $\frac{\partial T}{\partial t}$ ในสมการ (2.2) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j,k-1}^P + T_{i,j,k+1}^P - 2T_{i,j,k}^P}{\Delta z^2} &= \frac{1}{\alpha} \left(\frac{T_{i,j,k}^{P+1} - T_{i,j,k}^P}{\Delta t} \right) \\ \frac{\alpha (\Delta t)}{(\Delta z)^2} (T_{i,j,k-1}^P + T_{i,j,k+1}^P - 2T_{i,j,k}^P) &= T_{i,j,k}^{P+1} - T_{i,j,k}^P \end{aligned} \quad (2.3)$$

กำหนดให้ $F_0 = \text{ฟูริเยร์นัมเบอร์} = \frac{\alpha (\Delta t)}{(\Delta z)^2}$ แทนในสมการ (2.3)

จะคำนวณหาอุณหภูมิเมื่อเวลาผ่านไป $t = P + \Delta t$ ได้ดังสมการ (2.4)

$$T_{i,j,k}^{P+1} = F_0 T_{i,j,k-1}^P + (1 - 2F_0) T_{i,j,k}^P + F_0 T_{i,j,k+1}^P \quad (2.4)$$

เมื่อ $P = 0, 1, 2, 3, \dots$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$

$j = 1, 2, 3, \dots, n$

$k = 1, 2, 3, \dots, N-1$

ในการคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิในแผ่นโพลีเมอร์โดยวิธีเอ็กพลิซิท จากสมการ (2.4) จะหาค่าได้ต้องมีเงื่อนไขดังนี้คือ

$$(1 - 2F_0) \geq 0$$

หรือ $F_0 \leq \frac{1}{2}$

2.2.2. อุณหภูมิที่ขอบด้านบนของแผ่นโพลิเมอร์

สมดุลพลังงานที่ขอบด้านบน ($Z = 0$) ของแผ่นโพลิเมอร์เขียนได้ดังสมการ (2.5)

$$q_{\text{convection}} + q_{\text{conduction}} + q_{\text{radiation}} = \dot{E}_{\text{storage}} \quad (2.5)$$

พิจารณาที่จุด $T_{i,j,o}$ จากรูป 4 จะได้

$$hA(T_{\text{air}} - T_{i,j,o}^P) + \frac{kA}{\Delta Z}(T_{i,j,l}^P - T_{i,j,o}^P) + q_{\text{radiation}} A = \rho C_p \cdot A \cdot \frac{\Delta Z}{2} \left(\frac{T_{i,j,o}^{P+1} - T_{i,j,o}^P}{\Delta t} \right) \quad (2.6)$$

นำ $\frac{\Delta Z}{k}$ คูณตลอดจะได้

$$\frac{h}{k} \Delta Z (T_{\text{air}} - T_{i,j,o}^P) + (T_{i,j,l}^P - T_{i,j,o}^P) + q_{\text{radiation}} \frac{\Delta Z}{k} = \frac{\rho C_p}{2k \Delta t} (\Delta Z)^2 (T_{i,j,o}^{P+1} - T_{i,j,o}^P) \quad (2.7)$$

$$\text{จาก } \alpha = \frac{k}{\rho C_p} \text{ และ } F_o = \frac{\alpha (\Delta t)}{(\Delta Z)^2}$$

$$\text{และกำหนดให้ } B_i = \text{ไบออตน์เบอร์} = \frac{h (\Delta Z)}{k}$$

สมการ (2.7) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$B_i (T_{\text{air}} - T_{i,j,o}^P) + (T_{i,j,l}^P - T_{i,j,o}^P) + q_{\text{radiation}} \frac{\Delta Z}{k} = \left(\frac{T_{i,j,o}^{P+1} - T_{i,j,o}^P}{2F_o} \right)$$

นำ $2F_o$ คูณตลอด และจัดรูปใหม่เพื่อหาอุณหภูมิที่ขอบด้านบนเมื่อเวลาผ่านไป $P + 1$ จะได้สมการ (2.8)

$$T_{i,j,o}^{P+1} = 2B_i F_o (T_{\text{air}} - T_{i,j,o}^P) + 2F_o (T_{i,j,l}^P - T_{i,j,o}^P) + 2F_o \frac{\Delta Z}{k} \cdot q_{\text{radiation}} + T_{i,j,o}^P \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ } T_{i,j,o}^{P+1} = (1 - 2F_o - 2B_i F_o) T_{i,j,o}^P + 2F_o T_{i,j,l}^P + 2F_o \left(B_i T_{\text{air}} + \frac{\Delta Z}{k} q_{\text{radiation}} \right) \quad (2.9)$$

ในการทำงานเกี่ยวกับสมการ (2.4) สมการ (2.9) จะหาค่าได้ต้องมีเงื่อนไขคือ

$$(1 - 2F_o - 2B_i F_o) \geq 0$$

หรือ

$$F_o (1 + B_i) \geq \frac{1}{2}$$

2.2.3. อุณหภูมิที่ขอบด้านล่างของแผ่นโพลีเมอร์

สมดุลพลังงานที่ขอบด้านล่าง ($Z = L$) ของแผ่นโพลีเมอร์ เขียนได้ดังสมการ (2.10)

$$q_{\text{convection}} + q_{\text{conduction}} + q_{\text{radiation}} = \dot{E}_{\text{storage}} \quad (2.10)$$

$$hA(T_{\text{air}} - T_{i,j,N}^P) + \frac{kA}{\Delta Z}(T_{i,j,N-1}^P - T_{i,j,N}^P) + q_{\text{radiation}}'' A = \rho C_p \cdot A \frac{\Delta Z}{2} \left(\frac{T_{i,j,N}^{P+1} - T_{i,j,N}^P}{\Delta t} \right) \quad (2.11)$$

นำ $\frac{\Delta Z}{kA}$ คูณตลอดจะได้

$$h \frac{\Delta Z}{k} (T_{\text{air}} - T_{i,j,N}^P) + (T_{i,j,N-1}^P - T_{i,j,N}^P) + \frac{\Delta Z}{k} \cdot q_{\text{radiation}}'' = \frac{\rho C_p}{2k \Delta t} (\Delta Z)^2 (T_{i,j,N}^{P+1} - T_{i,j,N}^P) \quad (2.12)$$

จาก $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$; $F_o = \frac{\alpha(\Delta t)}{(\Delta Z)^2}$; $B_i = \frac{h(\Delta Z)}{k}$ แทนในสมการ (2.12) จะได้

$$B_i (T_{\text{air}} - T_{i,j,N}^P) + (T_{i,j,N-1}^P - T_{i,j,N}^P) + \frac{\Delta Z}{k} q_{\text{radiation}}'' = \frac{T_{i,j,N}^{P+1} - T_{i,j,N}^P}{2F_o}$$

นำ $2F_o$ คูณตลอด และจัดรูปใหม่เพื่อหาอุณหภูมิที่ขอบด้านล่างเมื่อเวลาผ่านไป $t = P + 1$ จะได้สมการ (2.13)

$$T_{i,j,N}^{P+1} = 2F_o T_{i,j,N-1}^P + (1 - 2F_o - 2B_i F_o) T_{i,j,N}^P + 2F_o \left(B_i T_{\text{air}} + \frac{\Delta Z}{k} q_{\text{radiation}}'' \right) \quad (2.13)$$

ในการทำนองเดียวกันสมการ (2.13) จะหาค่าได้ต้องมีเงื่อนไขเช่นเดียวกันกับสมการ (2.9)

2.2.4 อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นโพลีเมอร์

เนื่องจากชั้นของวัสดุประสานระหว่างแผ่นโพลีเมอร์มีความบางมากๆ ดังนั้นจึงสามารถที่จะไม่นำชั้นวัสดุประสานมาพิจารณา ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นโพลีเมอร์นั้นเท่ากัน

เมื่อสมดุลพลังงานที่ผิวสัมผัสของแผ่นโพลีเมอร์ เขียนได้ดังสมการ (2.14)

$$q_{\text{convection}} + q_{\text{conduction}} + q_{\text{radiation}} = \dot{E}_{\text{storage}} \quad (2.14)$$

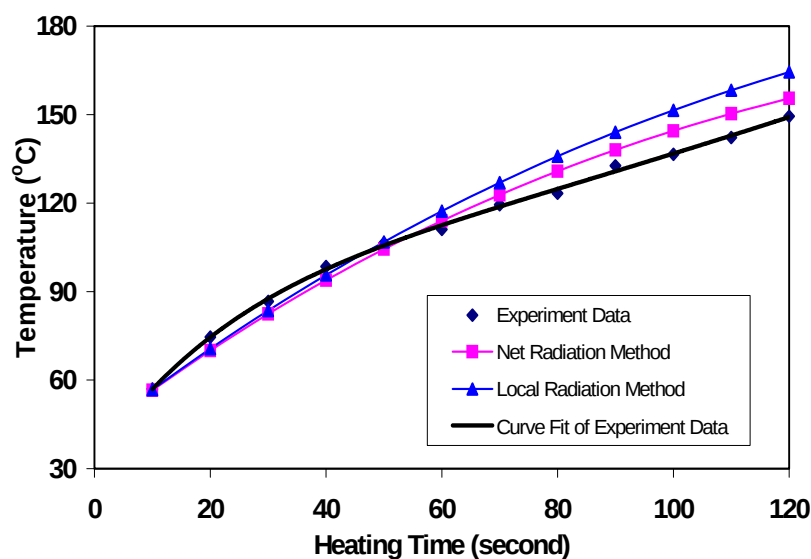
โดยที่พิจารณาการนำความร้อนจากวัสดุสองชนิด

บทที่ 3

ผลการวิจัย

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการเปรียบเทียบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้น ได้มีการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีการพัฒนาไว้ก่อนหน้านี้ ผลการทดลองได้นำมาจากการทดลองที่ผู้วิจัยได้ทำไว้ช่วงที่ศึกษาระดับปริญญาเอก โดยได้วัดอุณหภูมิตรงกลางของแผ่นพลาสติก ด้วย Infrared Thermocouple จากการตั้งอุณหภูมิคงที่ของแผ่นให้ความร้อน และแปรผันเวลาในการให้ความร้อน จากรูป 3.1 มีการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลอง ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่ด้วยวิธี Net Radiation Method และผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีการพัฒนาไว้ก่อนหน้านี้ ในที่นี้เรียกว่า Local Radiation Method ซึ่งไม่พิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติกกับสภาพแวดล้อม



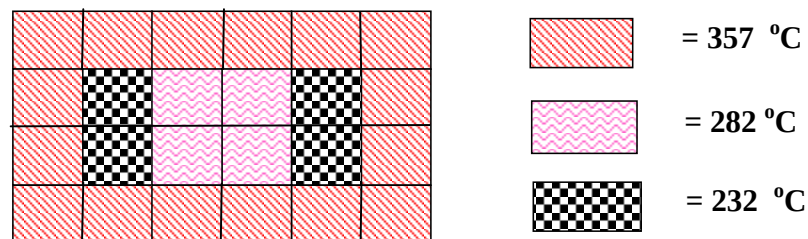
รูปที่ 3.1 การตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูป 3.1 พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธี Net Radiation Method สามารถทำนายผลของอุณหภูมิของแผ่นพลาสติกขณะให้ความร้อนได้ถูกต้องแม่นยำกว่าแบบวิธี Local Radiation Method ทั้งนี้เนื่องจากการคำนึงถึงการสูญเสียความร้อนของแผ่นพลาสติกให้แก่สิ่งแวดล้อม โดยค่าผิดพลาดของ Net Radiation Method อยู่ที่ประมาณ 4 % แต่ของ Local Radiation Method อยู่ที่ประมาณ 10 %

3.2 การใช้ประโยชน์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

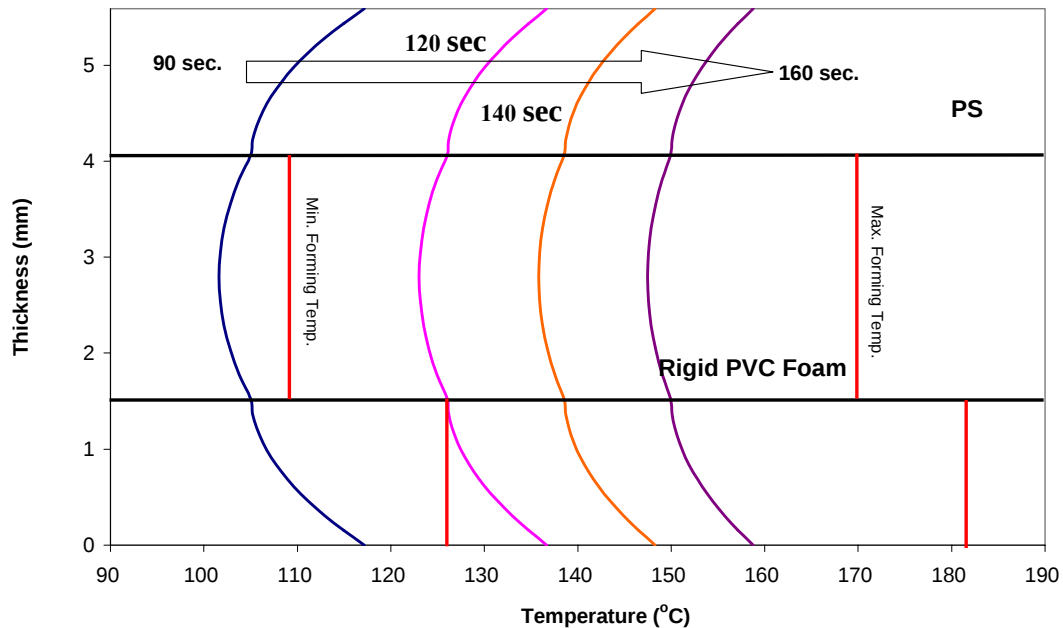
3.2.1 ในแง่การทำนายอุณหภูมิของแผ่นพลาสติกก่อนขึ้นรูปให้อยู่ในช่วงของการขึ้นรูปโดยการปรับเปลี่ยนเวลาในการให้ความร้อน

ในชนิดของพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบคือ Polystyrene หนา 1.6 มม. ขนาด 60 x 90 ซม. และมีช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูปคือ 126 – 182 °C โดยใช้เป็นแผ่นพลาสติกประกบกับแผ่นพลาสติกตรงกลาง โดยที่แผ่นพลาสติกตรงกลางเป็น Rigid PVC Foam หนา 2.6 มม. มีช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูปคือ 110 – 171 °C ดังนั้นในการขึ้นรูป อุณหภูมิตลอดทั้งแผ่นและความหนาของแผ่นพลาสติกทั้งสองชนิดจะต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป แต่ด้วยข้อจำกัดของการวัดอุณหภูมิ ซึ่งสามารถวัดเฉพาะอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นพลาสติกเท่านั้น ทำให้ต้องอาศัยความชำนาญและการลองผิดลองถูกเพื่อทำนายอุณหภูมิภายในแผ่นพลาสติก หากให้รูปที่ 3.2 แสดงการลองตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแผ่นต่างๆ เพื่อสร้างอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งแผ่นพลาสติก และรูปที่ 3.3 แสดงอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกตลอดความหนาตลอดแผ่นพลาสติก โดยการเปลี่ยนเวลาในการให้ความร้อนตั้งแต่ 90 วินาที จนถึง 160 วินาที และตั้งค่าระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกคงที่ที่ 12.7 cm.



รูปที่ 3.2 แสดงค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน

จากรูป 3.1 ในการจำลองการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก หากสมมุติให้มีแผงให้ความร้อนทั้งด้านบนและด้านล่าง และแต่ละแผงให้ความร้อนมีจำนวนแผ่นให้ความร้อนทั้งหมด 24 แผ่น หากต้องการที่จะสร้างอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งแผ่นพลาสติก อุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนจะต้องมีอุณหภูมิสูงบริเวณรอบนอกและมีอุณหภูมิต่ำบริเวณแผ่นให้ความร้อนด้านใน เพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียจากค่า View factor และต้องอุณหภูมิต้องสมมาตรทั้งในแนวแกนอนและแกนตั้ง



รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามความหนาที่จุดกึ่งกลางแผ่นพลาสติกเมื่อเปลี่ยนเวลาในการให้ความร้อน

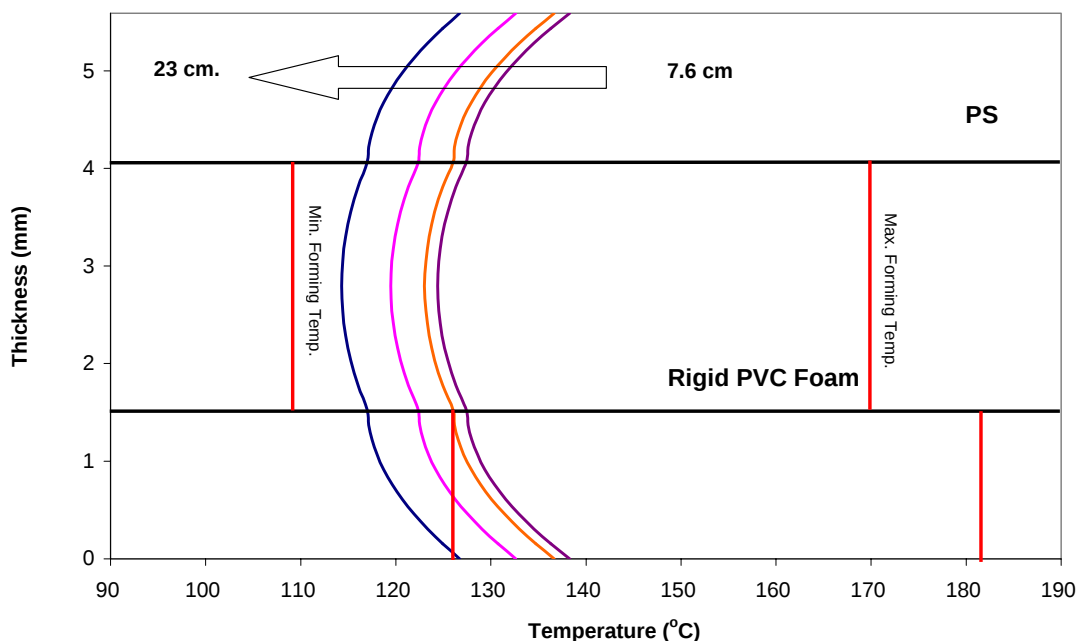
ในการขึ้นรูปพลาสติก อุณหภูมิทุกจุดของแผ่นพลาสติกต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูปไม่เหมือนกัน ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่ผิวจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป แต่อุณหภูมิภายในความหนายังต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป หากนำแผ่นพลาสติกนี้ไปขึ้นรูป จะทำให้งานที่ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นที่มาของการสูญเสียเวลาและวัสดุ

จากรูป 3.2 พบว่า ที่เวลาในการให้ความร้อน 90 วินาที อุณหภูมิทุกจุดของแผ่นพลาสติกอยู่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิน้อยที่สุดของการขึ้นรูป ส่วนที่เวลาในการให้ความร้อน 140 วินาที ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของ Rigid PVC Foam จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป แต่อุณหภูมิที่ด้านในของ PS ก็ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิน้อยที่สุดของการขึ้นรูปเกินไป จึงยังไม่เหมาะต่อการขึ้นรูป ดังนั้นหากดูจากผลการจำลองการให้ความร้อน ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปควรอยู่ระหว่าง 140 ถึง 160 วินาที

3.2.2 ในแง่การทำนายอุณหภูมิของแผ่นพลาสติกก่อนขึ้นรูปให้อยู่ในช่วงของการขึ้นรูปโดยการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติก

ในการจำลองการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกโดยมีการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติก และคงค่าเวลาในการให้ความร้อนไว้ที่ 120 วินาที ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 3.4 ในการจำลองการให้ความร้อน มีการปรับค่าระยะห่างตั้งแต่ 7.6 จนถึง 23 cm. จากรูปพบว่า ยังมีระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกมากเท่าใด แผ่นพลาสติกก็จะได้รับความร้อนน้อยเท่านั้น โดยที่ลักษณะของกราฟที่ได้จะมีลักษณะเดียวกัน แตกต่างกันที่ระดับของอุณหภูมิเท่านั้น ทำให้จากผลลัพธ์ที่ได้มีเพียงระยะห่าง 7.6 cm เท่านั้นที่อุณหภูมิทุกจุดของแผ่นพลาสติกอยู่ในช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป จึงเป็นระยะห่างที่เมื่อให้ความร้อน 120 วินาที แล้วอุณหภูมิที่ได้สามารถนำไปขึ้นรูปได้

ดังนั้นจากทั้งสองกรณีพบว่า หากมีการจำลองการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกเสียก่อนบนคอมพิวเตอร์ เพื่อทำนายอุณหภูมิตลอดทั้งแผ่นพลาสติกก่อนที่จะนำไปลองทำกับเครื่องจักรจริง โดยสามารถลองปรับค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบกับการกระจายตัวของอุณหภูมิ เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูป จะสามารถประหยัดเวลาและการสูญเสียวัสดุจากการทดสอบจริงกับเครื่องจักร



รูปที่ 3.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามความหนาที่จุดกึ่งกลางแผ่นพลาสติกเมื่อปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติก

3.3 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปัจจัยที่กระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก

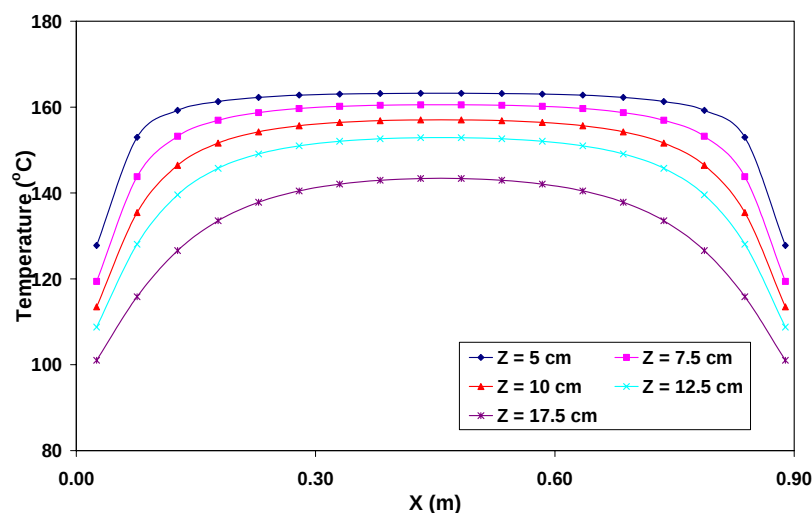
หากกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก ซึ่งหลักๆมีอยู่ด้วยกัน 3 ปัจจัยคือ ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนและแผ่นพลาสติก อุณหภูมิของแผงให้ความร้อน และเวลาในการให้ความร้อน การศึกษาผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นวิธีการที่สามารถประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย ทำให้สามารถที่จะทำความเข้าใจกับผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ทุกแง่มุมที่ต้องการจะศึกษา

3.3.1 ศึกษาผลกระทบจากระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนและแผ่นพลาสติก

ในการศึกษาผลกระทบของระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนและแผ่นพลาสติกต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ได้ทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในสองกรณี คือ การตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนให้เท่ากันทุกแผ่น (Uniform Heater Temperature Setting) และการตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนให้ไม่เท่ากัน (Non-Uniform Heater Temperature Setting) ซึ่งผลที่ได้คือ

1. การตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนเท่ากันทุกแผ่น

จากการทดลองเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนและแผ่นพลาสติก จาก 5 ซม. จนถึง 17.5 ซม. ผลที่ได้รับแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นพลาสติก (PS) ตลอดตามความกว้าง 0.3 ม. ของแผ่นพลาสติก



รูปที่ 3.5: การกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดแนวความกว้าง 0.3 ม. โดยเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างแผ่นพลาสติกกับแผงให้ความร้อน

จากรูปพบว่า อุณหภูมิของแผ่นพลาสติกมีค่าสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางแผ่น และอุณหภูมิจะลดลงเมื่อใกล้ขอบมากขึ้น และเมื่อลดระยะห่างระหว่างแผ่นพลาสติกกับแผงให้ความร้อนลง อุณหภูมิยังมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

จากผลที่ได้รับ ทำให้ทราบถึงความสำคัญของ View Factor ซึ่งเป็นตัวแสดงถึงปริมาณพลังงานความร้อนที่พื้นที่แต่ละพื้นที่ได้รับจากแผงให้ความร้อน โดยบริเวณกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกจะมีค่า View Factor ระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกสูงสุด แต่มีค่า View Factor ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับแผ่นพลาสติกต่ำสุด หมายความว่าบริเวณกึ่งกลางแผ่นพลาสติกจะรับการแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากแผงให้ความร้อนสูงสุด แต่จะถ่ายเทการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นพลาสติกไปสู่สิ่งแวดล้อมต่ำสุด ด้วยอัตราการแผ่รังสีความร้อนที่เท่ากันทุกแผ่น ให้ความร้อน ทำให้บริเวณกึ่งกลางแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งจะกลับกันกับบริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติก คือ มี View Factor ระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกต่ำสุด แต่มีค่า View Factor ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับแผ่นพลาสติกสูงสุด ซึ่งหมายความว่าบริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติกจะรับการแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากแผงให้ความร้อนต่ำสุด แต่จะถ่ายเทการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นพลาสติกไปสู่สิ่งแวดล้อมสูงสุด ทำให้บริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณกึ่งกลางของแผ่นพลาสติก

2. การตั้งอุณหภูมิแผงให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ (Non Uniform Temperature Setting)

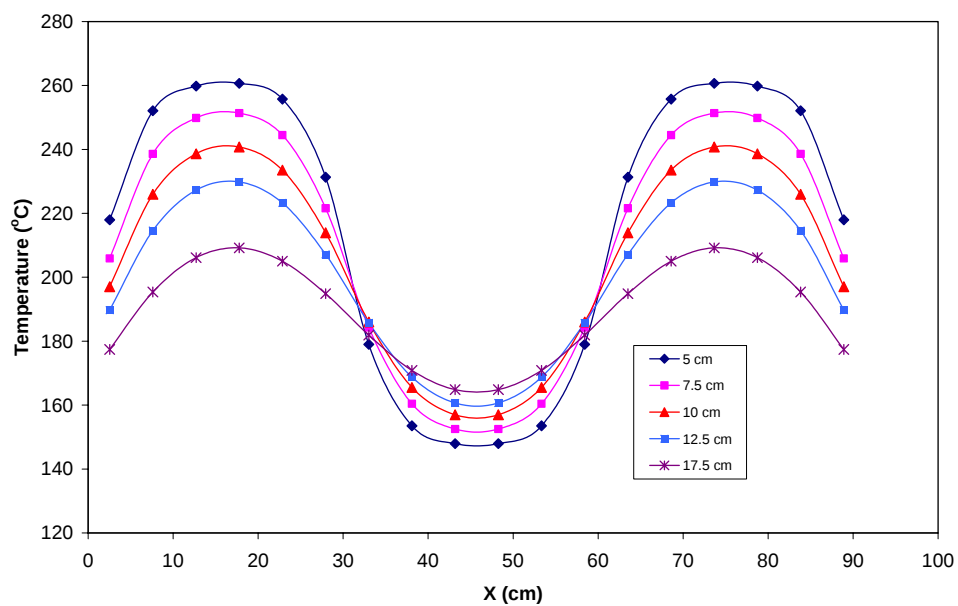
ในการสร้างการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอบนแผ่นพลาสติก จำเป็นที่จะต้องกำหนดอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอบนแผงให้ความร้อนด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทดลองเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติก เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ในที่นี้การตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนจะเป็นไปตามรูปที่ 3.6 คือตั้งอุณหภูมิสูงโดยมีอุณหภูมิต่ำกึ่งกลาง

ในการทดลองเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกจาก 5 ซม. จนถึง 17.5 ซม. ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.7 คือ ยิ่งระยะห่างแคบเท่าใด อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับระยะทางก็ยิ่งสูงเท่านั้น (High temperature gradient) ดังนั้นหากต้องการให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จำเป็นที่จะต้องตั้งให้ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกมีค่าต่ำ ยิ่งระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกมีค่ามากขึ้นเท่าใด การควบคุมการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติกก็ยิ่งยากขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้มุ่งศึกษางานที่มีความหนา ดังนั้นหากระยะใกล้เกินไปอาจ

ทำให้ผิวของแผ่นพลาสติกเกิดการไหม้ แต่อุณหภูมิของกึ่งกลางความหนาของแผ่นพลาสติกยังไม่อยู่ในช่วงของการขึ้นรูป

357 °C	357 °C	250 °C	250 °C	357 °C	357 °C
357 °C	357 °C	250 °C	250 °C	357 °C	357 °C
357 °C	357 °C	250 °C	250 °C	357 °C	357 °C
357 °C	357 °C	250 °C	250 °C	357 °C	357 °C

รูปที่ 3.6: การตั้งค่าอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ



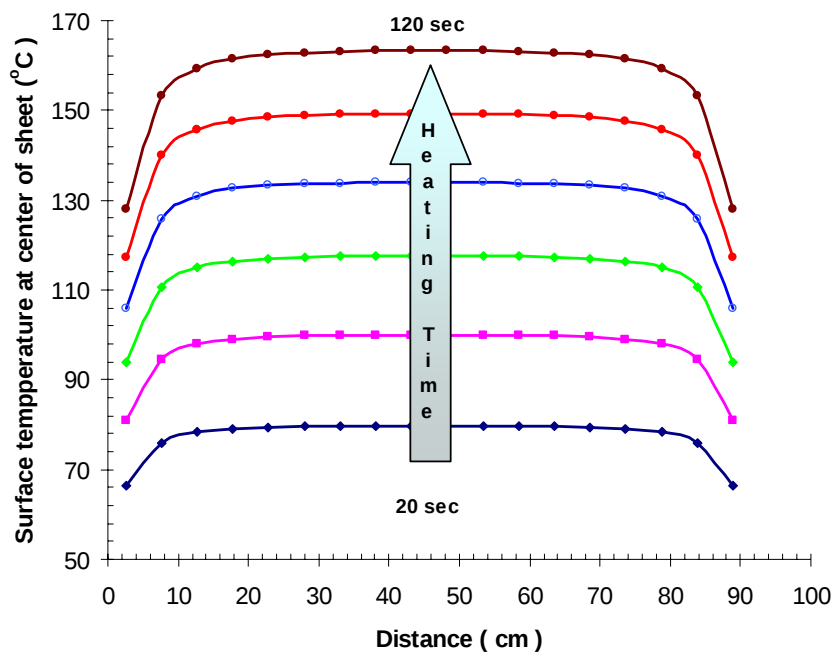
รูปที่ 3.7: การกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดแนวความกว้าง 0.3 ม. โดยเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างแผ่นพลาสติกกับแผงให้ความร้อน ในกรณีอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอ

3.3.2 ศึกษาผลกระทบจากการตั้งค่าอุณหภูมิของแผงให้ความร้อน

1. การตั้งอุณหภูมิสูง

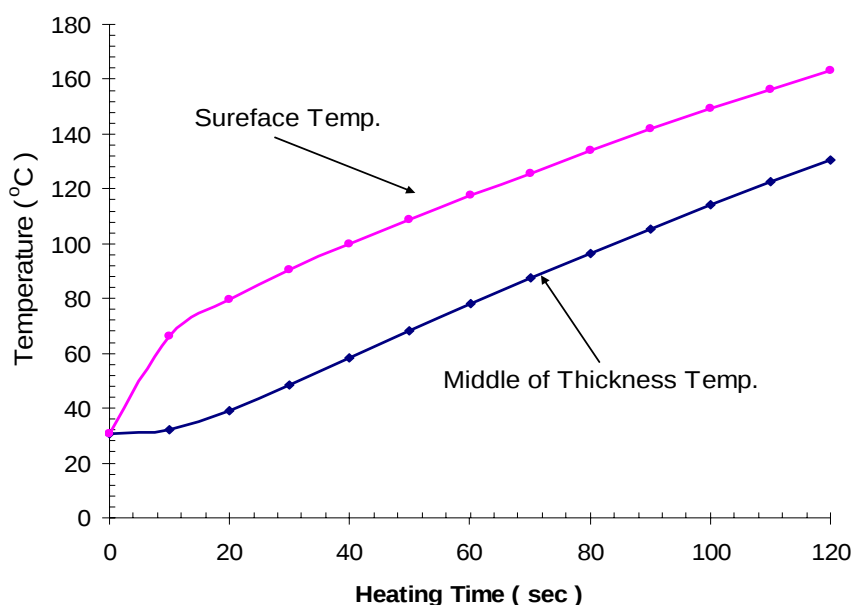
ในกรณีนี้ทดลองตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนแบบสม่ำเสมอที่ $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกเท่ากับ 5 ซม. และเวลาที่ให้ความร้อนจาก 0 – 120 วินาที เพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนจนถึงเวลา 120 วินาที

ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 โดยที่รูปที่ 3.8 แสดงอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นพลาสติกจากรูปพบว่า อุณหภูมิของแผ่นพลาสติกเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการกระจายตัวจะคล้ายกันทุกช่วงเวลาในการให้ความร้อน



รูปที่ 3.8 การกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดแนวความกว้าง 0.3 ม. โดยอุณหภูมิแผงให้ความร้อนคือ $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกคือ 5 ซม. และเวลาในการให้ความร้อนคือ 0-120 วินาที

นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความหนาของแผ่นพลาสติกต่อเวลาในการให้ความร้อนถูกแสดงในรูปที่ 3.9 โดยแสดงอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกทั้งที่ผิวและที่กึ่งกลางความหนาของ PS จากรูปพบว่า ในช่วงแรกของการให้ความร้อน อุณหภูมิที่ผิวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะความร้อนต้องใช้เวลาในการเดินทางจากผิวเข้าสู่ในเนื้อพลาสติก และความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับที่กึ่งกลางความหนาจะเกิดขึ้นตลอดกระบวนการให้ความร้อน จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นพลาสติกและการตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อน

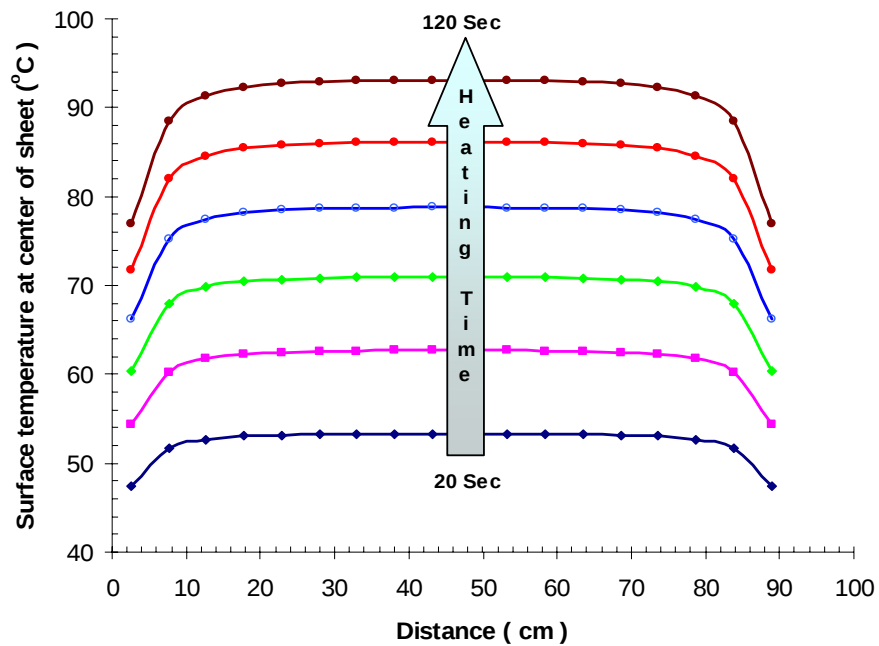


รูปที่ 3.9 อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกเปรียบเทียบกับเวลาในการให้ความร้อน กรณีตั้งอุณหภูมิสูง

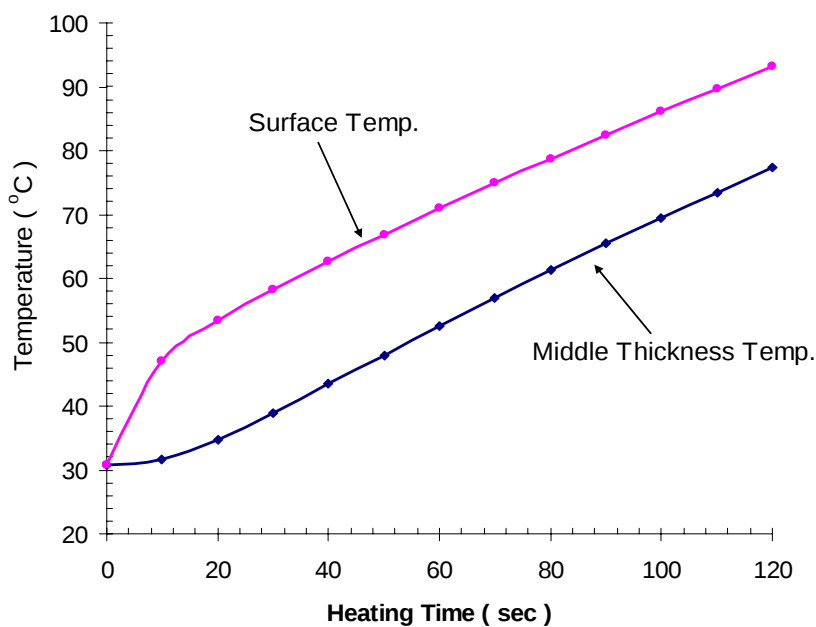
2 การตั้งอุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้ทดลองตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนแบบสม่ำเสมอที่ 250 °C ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกและเวลาในการให้ความร้อนเหมือนกับในกรณีที่หนึ่ง คือ 5 ซม. และเวลาที่ให้ความร้อนจาก 0 – 120 วินาที

ผลที่ได้จากการตั้งค่าทางกระบวนการที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ซึ่งลักษณะของกราฟจะคล้ายกับการตั้งค่าอุณหภูมิสูงของแผงให้ความร้อน แต่ต่างกันที่ค่าของอุณหภูมิที่พลาสติกจะต่ำกว่า



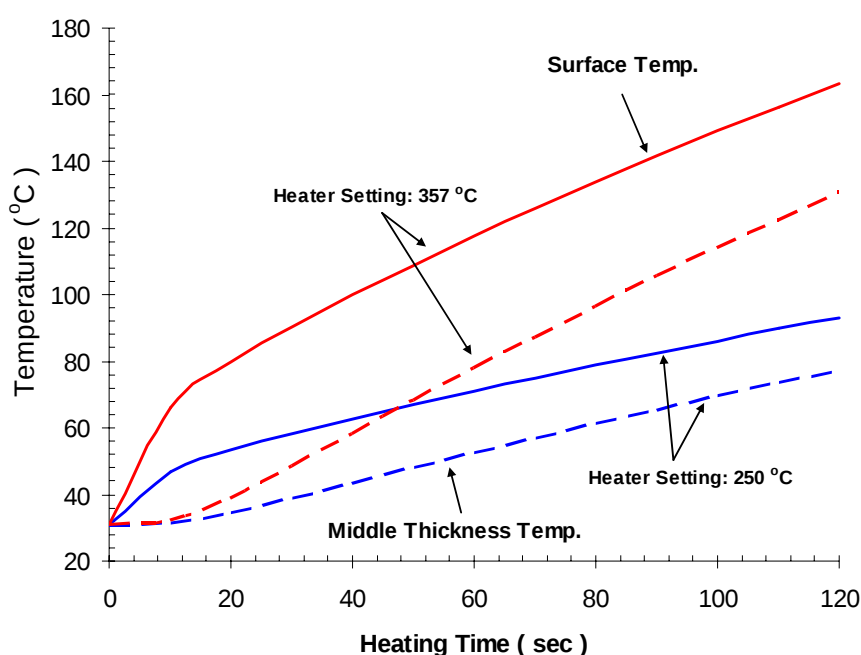
รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดแนวความกว้าง 0.3 ม. โดยอุณหภูมิแผงให้ความร้อนคือ 250 °C ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกคือ 5 ซม. และเวลาในการให้ความร้อนคือ 0-120 วินาที



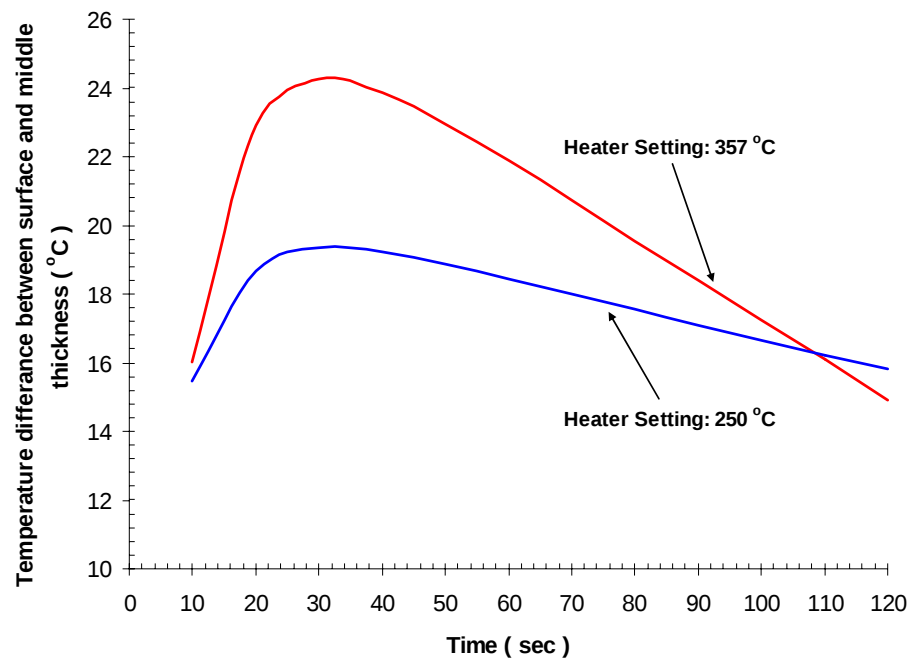
รูปที่ 3.11 อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกเปรียบเทียบกับเวลาในการให้ความร้อน กรณีตั้งอุณหภูมิต่ำ

ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีการตั้งค่าอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนสูงและต่ำ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกเปรียบเทียบกับเวลาในการให้ความร้อนทั้งสองกรณีถูกนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 3.12 นอกจากนี้เพื่อให้ภาพการเปรียบเทียบชัดเจนมากยิ่งขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและกึ่งกลางความหนาถูกแสดงในรูปที่ 3.13

จากทั้งสองรูปพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกรณีที่ตั้งค่าอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนไว้สูงจะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ตั้งค่าไว้ต่ำ และที่สำคัญคือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและกึ่งกลางความหนาจะมีค่าสูงกว่ามากในกรณีที่ตั้งค่าอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนสูง ดังนั้นการขึ้นรูปที่ไม่สมบูรณ์อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่อุณหภูมิกึ่งกลางความหนาของแผ่นพลาสติกต่ำกว่าอุณหภูมิปกติของการขึ้นรูปพลาสติกชนิดนั้น ในกรณีที่ต้องระวังเป็นพิเศษคือ เป็นชิ้นงานที่มีความหนามาก และช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปแคบ



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกระหว่างกรณีตั้งอุณหภูมิแผงให้ความร้อนสูงและต่ำ



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกระหว่างกรณีตั้งอุณหภูมิแพงให้ความร้อนสูงและต่ำ

3.2.2 ในแง่ของการสร้างการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอบนแผ่นพลาสติก (Uniform Temperature Distribution)

ในกรณีการใช้พลังงานทั่วไปของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งคือ การที่ผลิตงานขนาดเล็กหลายๆชิ้นบนแผ่นพลาสติกขนาดใหญ่ โดยปกติถึงแม้เครื่องจักรจะมีจำนวนของแผ่นให้ความร้อน (Heater Element) มากมายหลายสิบแผ่น ถึงแม้ว่าการตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนเพื่อสร้างการกระจายตัวของอุณหภูมิให้สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นจะ ไม่ยากนัก แต่ก็ต้องเสียเวลาและวัสดุจำนวนหนึ่งในการทดลองเบื้องต้น เพื่อให้ได้ค่าการตั้งเครื่องจักรที่ต้องการ

หลักการในการตั้งค่าความร้อนเพื่อสร้างการกระจายตัวของอุณหภูมิให้สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น มีดังนี้คือ รูปแบบของการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนจะต้องสมมาตรทั้งในแนวแกน X และแนวแกน Y (Quarter Symmetric) และอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนรอบนอกจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนที่อยู่ด้านใน เพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียไปจากค่า View Factor

รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่น ระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกคือ 17 ซม. โดยแทนที่จะทดลองกับเครื่องจักรและชิ้นงานจริง แต่สามารถประหยัดเวลาและวัสดุโดยทำการทดลองบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนเป็นไปตามหลักการที่กล่าวไว้

410 °C (337)		354 °C (325)		410 °C (337)	
362 °C (295)	139 °C (180)	247 °C (230)	247 °C (230)	139 °C (180)	362 °C (295)
410 °C (337)		354 °C (325)		410 °C (337)	

รูปที่ 3.4: ตัวอย่างการตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนเพื่อสร้างการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก

บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าตัวแปรของกระบวนการที่เหมาะสม

The Development of a Science-Based Processing Parameter Optimization Capability to Thermoforming Incorporating Zone Heating.

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการให้ได้ชิ้นงานคุณภาพสูง คือการหาช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์มมิ่ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง สามารถช่วยในการศึกษาคุณภาพของงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้นต่างๆ หลายครั้งในการศึกษากระบวนการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด มีการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเช่น Y-SIM [11] และ POLYFLOW [12] ซึ่งผลที่ได้รับก่อให้เกิดงานที่มีคุณภาพมากขึ้น ผู้วิจัยบางท่านได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นมาเอง เช่น Wang และ Nied [13] ได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของความหนาของชิ้นงานโดยการควบคุมอุณหภูมิก่อนการขึ้นรูปของแผ่นพลาสติก โดยสามารถกำหนดความหนาที่ต้องการแล้วคำนวณย้อนกลับไปหาอุณหภูมิของแผ่นพลาสติกก่อนขึ้นรูป

ในการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นที่ขั้นตอนการให้ความร้อนในกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง โดยเริ่มจากกำหนดการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) บนแผ่นพลาสติกที่ต้องการ จากนั้นกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติก เวลาในการให้ความร้อน จากนั้นกระบวนการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม จะคำนวณหาการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่นที่เหมาะสมที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

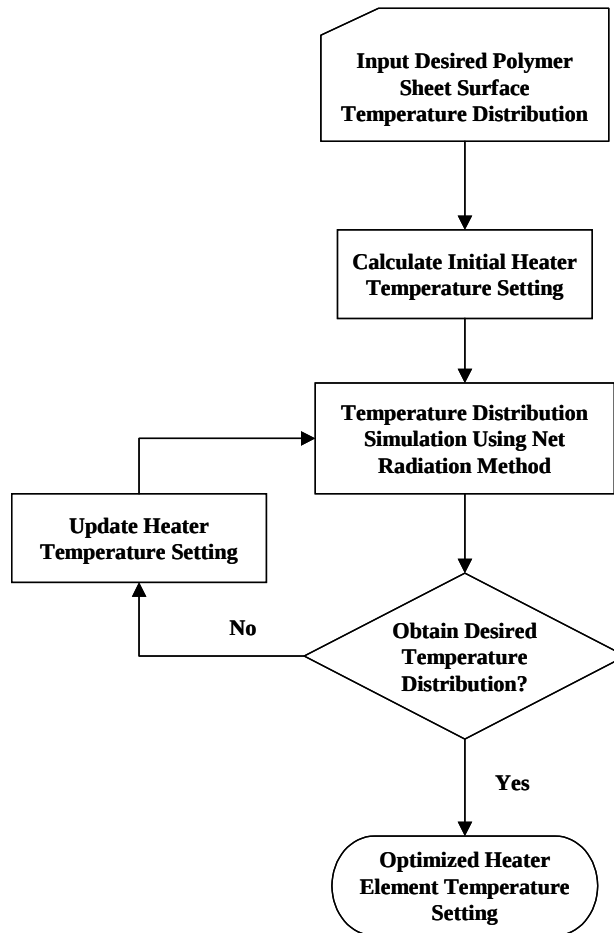
5.1 ขั้นตอนของกระบวนการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสม (Optimization Procedures)

วัตถุประสงค์ของกระบวนการนี้คือ การหาค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน (Heater) แต่ละแผ่น เพื่อให้ได้ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) บนแผ่นพลาสติกที่ต้องการ โดยขั้นตอนของกระบวนการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งเริ่มจากการกำหนดค่าการกระจายการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ต้องการบนแผ่นพลาสติก จากนั้นจึงทำการประมาณค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่น ต่อจากนั้นด้วยอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนที่กำหนดขึ้นมา จะทำการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดทั่วทั้งแผ่นพลาสติก แล้วนำค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นพลาสติกจากการคำนวณ มาเปรียบเทียบกับค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิบนผิวของแผ่นพลาสติกที่ต้องการ หากยังไม่ได้ค่าที่ต้องการ ก็ทำการปรับค่า

อุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ต้องการ โดยสมการที่ใช้ในการปรับค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่นแสดงในสมการที่ 5.1

$$T_{\text{heater},i,j}^{t+1} = T_{\text{heater},i,j}^t + (T_{\text{desired},i,j}^t - T_{\text{sim},i,j}^t)W \quad (5.1)$$

เมื่อ T_{desired} คืออุณหภูมิที่ผิวของแผ่นพลาสติกที่ต้องการ T_{sim} คืออุณหภูมิที่ผิวของแผ่นพลาสติกที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขของค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนที่เวลา t ส่วน W คือค่าคงที่ที่ช่วยให้ค่าการคำนวณลู่เข้าหาเป้าหมายได้เร็วขึ้น



รูปที่ 5.1 แสดงหลักการและขั้นตอนการหาค่าการตั้งอุณหภูมิแผ่นให้ความร้อนที่เหมาะสมของกระบวนการการให้ความร้อน

5.2 ตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้กระบวนการการหาค่าที่เหมาะสม ในการหาอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน

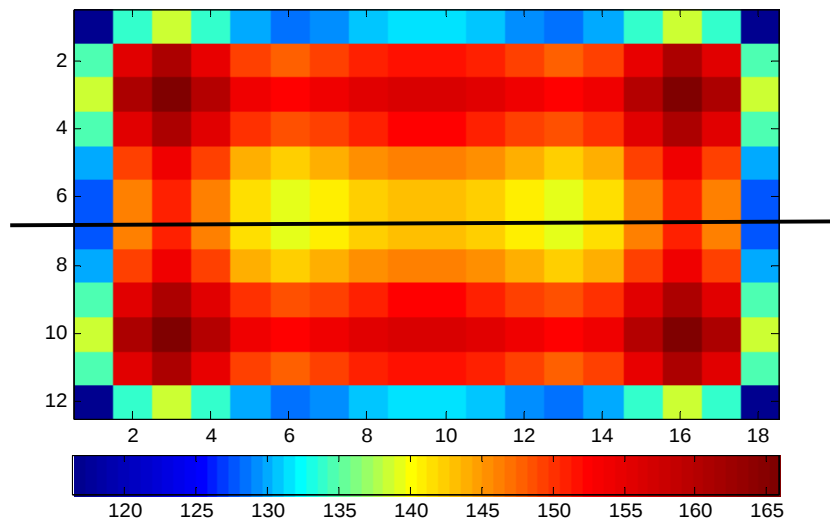
5.2.1 การหาค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนเพื่อสร้างอุณหภูมิที่สม่ำเสมอตลอดทั้งผิวพลาสติก

ชนิดของพลาสติกที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองแบบจำลองคณิตศาสตร์จะเหมือนกับการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 4 ในการหาค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน เริ่มจากการกำหนดอุณหภูมิของผิวแผ่นพลาสติกที่ต้องการคือ 149°C และระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนและแผ่นพลาสติกคือ 12.7 ซม. เวลาในการให้ความร้อนคือ 120 วินาที และจำนวนแผ่นให้ความร้อนคือ 4×6 แผ่น

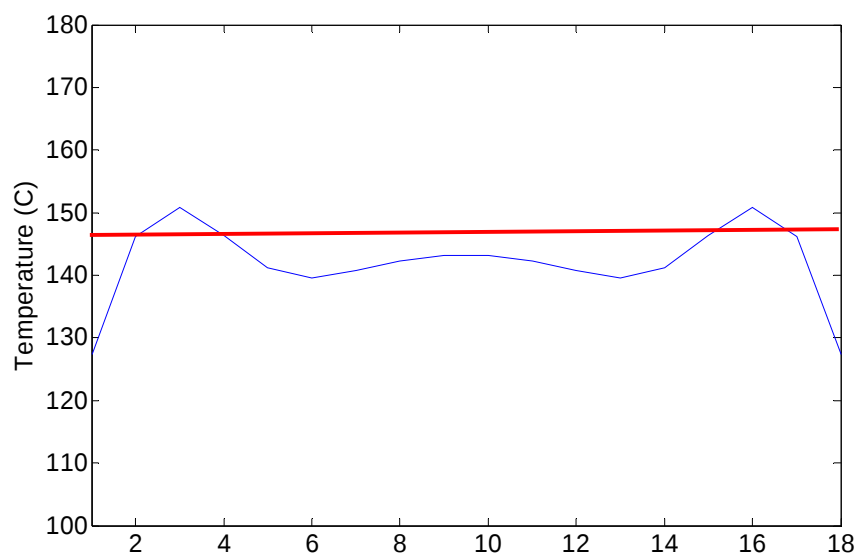
ค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่นที่ได้จากการใช้กระบวนการการหาค่าที่เหมาะสม แสดงในรูปที่ 5.2 จากรูปแสดงผลซึ่งสอดคล้องกับหลักการทั่วไปของการตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน กล่าวคือรูปแบบของการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนจะต้องสมมาตรทั้งในแนวแกน X และแนวแกน Y (Quarter Symmetric) และอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนรอบนอกจะต้องสูงกว่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนที่อยู่ด้านใน เพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียไปจากค่า View Factor รูปที่ 5.3 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิตามแผ่นพลาสติกซึ่งเกิดจากการใช้ค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่นที่ได้จากการใช้กระบวนการการหาค่าที่เหมาะสม และรูปที่ 5.4 แสดงอุณหภูมิที่กึ่งกลางแผ่นพลาสติก(ตามแนวเส้นจากรูป 5.3) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งพบว่ากระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอและใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ

426 °C	342 °C	366 °C	366 °C	342 °C	426 °C
349 °C	264 °C	288 °C	288 °C	264 °C	349 °C
349 °C	264 °C	288 °C	288 °C	264 °C	349 °C
426 °C	342 °C	366 °C	366 °C	342 °C	426 °C

รูปที่ 5.2 แสดงค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่นเพื่อสร้างให้ผิวของแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ



รูปที่ 5.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก



รูปที่ 5.4 แสดงอุณหภูมิที่กึ่งกลางแผ่นพลาสติกเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต้องการ

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัย

4.1 สรุปผลการวิจัย

ในการใช้กระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่น เราจะพบว่าสามารถที่จะลดต้นทุนการผลิตลงไปได้มาก โดยที่ชิ้นงานไม่จำเป็นต้องผลิตในเชิงเป็นการผลิตจำนวนมากๆ (Mass Production) เพื่อให้คุ้มกับต้นทุนในการดำเนินการ เช่นค่าการออกแบบและสร้างโมลด์ (Mold) ในกระบวนการฉีดพลาสติก ยิ่งชิ้นงานมีขนาดใหญ่ราคาในการสร้างก็ยิ่งมีราคาสูงเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ากระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งจะมีข้อดีในแง่ของการลดต้นทุนการผลิตเพียงใด แต่ยังคงขาดการนำความรู้ทางวิศวกรรมไปประยุกต์ใช้ ซึ่งส่วนใหญ่ยังใช้วิธีลองผิดลองถูก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นงานขนาดใหญ่และมีความหนา ทำให้ผลที่ได้รับยังไม่น่าพอใจเท่าที่ควรทั้งในแง่ของการลดต้นทุนการผลิตและคุณภาพของชิ้นงาน

ปัญหาสำคัญของกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่งคือ การไม่สามารถควบคุมการกระจายความหนาของชิ้นให้สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานได้ วิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาที่กล่าวมาแล้วนั้นคือ การใช้การให้ความร้อนแบบไม่สม่ำเสมอ (Zone heating technique) แก่แผ่นพลาสติก กล่าวคือต้องการสร้างอุณหภูมิสูงบนพื้นที่ที่มีการยึดตัวค้ำตอนขึ้นรูป และสร้างอุณหภูมิที่ต่ำกว่าในพื้นที่ที่มีการยึดตัวสูง ดังนั้นการตั้งอุณหภูมิของแผงให้ความร้อนจึงต้องไม่สม่ำเสมอด้วย อย่างไรก็ตามพบว่า ตัวแปรของกระบวนการ (Process parameters) มีมากมายหลายตัวเช่น จำนวนของแผ่นให้ความร้อนที่ต้องตั้งอุณหภูมิ ซึ่งอาจมีจำนวนถึง 100 – 200 แผ่นเลยทีเดียว นอกจากนี้ยังมีระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติก และเวลาในการให้ความร้อน ทำให้การใช้กระบวนการลองผิดลองถูกมักประสบปัญหาความยุ่งยากและไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร นอกจากนี้ยังขาดความเข้าใจถึงผลกระทบของตัวแปรของกระบวนการต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก

ในขั้นตอนการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติก ได้มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยเพื่อทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้ถูกออกแบบมาสำหรับชิ้นงานขนาดเล็กและบางเท่านั้น จึงไม่ต้องการความแม่นยำมากนัก ทำให้มีการคำนวณการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนเฉพาะแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกเท่านั้น และการประมาณค่า View factor เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ ได้กำจัดจุดอ่อนที่กล่าวมาทั้งหมด คือ มีการคำนึงถึงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างแผ่นพลาสติกและสิ่งแวดล้อม และการคำนวณค่าที่แท้จริงของ View factor ทำให้ผลที่ได้รับมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงขึ้นมาใหม่มีประโยชน์อย่างยิ่งในแง่ของการทำนาย อุณหภูมิผิวของแผ่นพลาสติกและอุณหภูมิของพลาสติกชั้นตรงกลางซึ่งเป็นคนละชนิดกับพลาสติกที่อยู่ด้านนอก ซึ่งไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดได้ นอกจากนี้เนื่องจากเป็นวัสดุต่างชนิดกัน ทำให้คุณสมบัติในการนำความร้อนต่างกันและช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูปต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะคาดเดา อุณหภูมิของพลาสติกชั้นตรงกลาง แต่เป็นค่าที่จำเป็นต้องรู้ในกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากอุณหภูมิตลอดทั่วทั้งแผ่นพลาสติกทั้งชั้นนอกและชั้นตรงกลาง จะต้องอยู่ในช่วงของอุณหภูมิการขึ้นรูปของวัสดุ นั้นๆ นอกจากนี้ยังทำให้สามารถทดลองการตั้งตัวแปรของกระบวนการเพื่อทำนายการกระจายตัวของ อุณหภูมิบนแผ่นพลาสติก โดยไม่จำเป็นต้องทดลองกับเครื่องจักรและวัสดุจริง

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิต่อแผ่นพลาสติก ซึ่งหลักๆมีอยู่ด้วยกัน 3 ปัจจัยคือ ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนและแผ่นพลาสติก อุณหภูมิของแผงให้ความร้อน และเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งจากการศึกษาถึงผลกระทบของระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนและแผ่นพลาสติกพบว่า View Factor มีความสำคัญอย่างมากต่อการประมาณการได้รับความร้อนจากแผงให้ความร้อนของแผ่นพลาสติก และการสูญเสียความร้อนของแผ่นพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อม โดยบริเวณกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกจะมีค่า View Factor ระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกสูงสุด แต่มีค่า View Factor ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับแผ่นพลาสติกต่ำสุด หมายความว่าบริเวณกึ่งกลางแผ่นพลาสติกจะรับการแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากแผงให้ความร้อนสูงสุด แต่จะถ่ายเทการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นพลาสติกไปสู่สิ่งแวดล้อมต่ำสุด ด้วยอัตราการแผ่รังสีความร้อนที่เท่ากันทุกแผ่นให้ความร้อน ทำให้บริเวณกึ่งกลางแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งจะกลับกันกับบริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติก คือ มี View Factor ระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกต่ำสุด แต่มีค่า View Factor ระหว่างสิ่งแวดล้อมกับแผ่นพลาสติกสูงสุด ซึ่งหมายความว่าบริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติกจะรับการแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากแผงให้ความร้อนต่ำสุด แต่จะถ่ายเทการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นพลาสติกไปสู่สิ่งแวดล้อมสูงสุด ทำให้บริเวณรอบนอกของแผ่นพลาสติกมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณกึ่งกลางของแผ่นพลาสติก นอกจากนี้หากต้องการให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงในพื้นที่ใกล้เคียงกัน จำเป็นที่จะต้องตั้งให้ระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกมีค่าต่ำ ยิ่งระยะห่างระหว่างแผงให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกมีค่ามากขึ้นเท่าใด การควบคุมการกระจายตัวของอุณหภูมิต่อแผ่นพลาสติกก็ยิ่งยากขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการวิจัยขั้นนี้มุ่งศึกษางานที่มีความหนา ดังนั้นหากระยะใกล้เคียงเกินไปอาจทำให้ผิวของแผ่นพลาสติกเกิดการไหม้ แต่อุณหภูมิของกึ่งกลางความหนาของแผ่นพลาสติกยังไม่อยู่ในช่วงของการขึ้นรูป

ในส่วนของผลกระทบของอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน และเวลาในการให้ความร้อนนั้นพบว่า ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบทั้งในกรณีการตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนสูงและต่ำ โดยสังเกตอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแผ่นพลาสติกทั้งที่ผิวและที่กึ่งกลางความหนาเปรียบเทียบกับเวลาในการให้ความร้อน จากการศึกษาพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในกรณีที่ตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนไว้สูงจะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ตั้งค่าไว้ต่ำ และที่สำคัญคือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวและกึ่งกลางความหนาจะมีค่าสูงกว่ามากในกรณีที่ตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนสูง ดังนั้นการขึ้นรูปที่ไม่สมบูรณ์อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่อุณหภูมิที่กึ่งกลางความหนาของแผ่นพลาสติกต่ำกว่าอุณหภูมิปกติของการขึ้นรูปพลาสติกชนิดนั้น ในกรณีที่ต้องระวังเป็นพิเศษคือ เป็นชิ้นงานที่มีความหนามาก และช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปแคบ

นอกจากนี้ ในส่วนของการพัฒนากระบวนการการหาค่าการตั้งอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนที่เหมาะสม จากการกำหนดค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งแต่บนแผ่นพลาสติกที่ต้องการ ค่าระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนกับแผ่นพลาสติกและเวลาในการให้ความร้อน ได้แสดงผลลัพธ์ที่น่าพอใจ และแสดงถึงประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการเทอร์โมฟอร์มมิ่ง อย่างไรก็ตาม การที่จะได้รูปแบบของการกระจายตัวของอุณหภูมิตั้งแต่บนแผ่นพลาสติกใกล้เคียงกับที่ต้องการ สมรรถนะของเครื่องจักรมีผลสำคัญอย่างยิ่ง เช่นจำนวนของแผ่นให้ความร้อน ขนาดของแผ่นให้ความร้อนแต่ละแผ่น เช่นหากยังต้องการการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ซับซ้อน ยังต้องการแผ่นให้ความร้อนขนาดเล็กและมีจำนวนมากขึ้นเท่านั้น

บรรณานุกรม

1. Throne, J.L., *Understanding thermoforming*. Hanser understanding books. 1999, Munich Cincinnati, Ohio: Hanser ; Hanser Gardner Publications. xi, 163.
2. Delorenzi, H.G., H.F. Nied, and C.A. Taylor, *A Numerical Experimental Approach to Software-Development for Thermoforming Simulations*. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme, 1991. **113**(1): p. 102-114.
3. Throne, J.L. *Radiant heat transfer in thermoforming*, in *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*. 1995.
4. Duarte, F.M. and J.A. Covas, *Heating thermoplastic sheets for thermoforming solution to direct and inverse problems*. Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, 1997. **26**(5): p. 213-221.
5. Rungroungdouyboon, B. and J.P. Coulter, *The development and validation of a numerical model for non-homogenous sheet heating during thermoforming processes*. American Society of Mechanical Engineers, Materials Division (Publication) MD, 2002. **97**: p. 75-82.
6. Rungroungdouyboon, B. and J.P. Coulter, *The Science Based Optimization of Material Heating during Thermoforming Processes*. Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings, 2003. **1**: p. 780-784.
7. Philips, D., I. Verpoest, and J. Van Raemdonck, *3D-knitted fabrics for sandwich panels*. SAMPE Journal, 1996. **32**(6): p. 23-31.
8. Akermo, M. and B.T. Astrom, *Modelling of compression moulding of all-thermoplastic honeycomb core sandwich components*. International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), 1996. **41**(2): p. 1372-1381.
9. Rozant, O., P.E. Bourban, and J.A.E. Manson, *Manufacturing of three dimensional sandwich parts by direct thermoforming*. Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, 2001. **32**(11): p. 1593-1601.
10. Panichapat, C., *Future of Thailand's plastics and plastic processing industries*. 8th Asia Plastic Forum, 1998.

11. Novotny, P., et. al. *Optimization of thermoforming*. in *ANTEC '99*. 1999. New York City, NY: Society of Plastics Engineers. V.1, p. 841-844.
12. Marchal, T.M.C., Nicolas P. Agarwal, Amit K. *Optimization of the thermoforming process: A few industrial examples*. in *ANTEC*. 1998. Soc Plast Eng, Brookfield, CT, USA. p. 701-705.
13. Wang, C.H., Nied, H.F., *Temperaure Optimization for Improved Thickness Control in Thermoforming*. Journal of Material Processing & Manufacturing Science, Vol. 8, October 1999, p. 113-126.

ภาคผนวก ก
เอกสารร่างสำหรับส่งตีพิมพ์เผยแพร่

The Investigation of Non-Homogeneous Heating using Net Radiation Method for Large Thermoforming Product

Bunyong Rungrongdouyboon, Phadungsak Ratanadecho

Department of mechanical Engineering, Thammasat University, Rangsit Campus
Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand

Abstract

The most common method of heating polymer sheet for thermoforming is radiative heating. In this paper, the numerical model for the large thermoforming product has been developed. The radiative heating of opaque thermoplastic sheet has been studied by using the newly developed numerical modeling. The net-radiation method with the comprehensive view factor has been used to compute the total radiative heat on thermoplastic sheet. Also, for a sample non-homogeneous heating pattern, numerically predicted polymer sheet temperatures are presented and compared with corresponding experimental results. The model is utilized to analyze numerically the effect of process parameters to temperature distribution through out the polymer sheet

Key words: Thermoforming, Net Radiation Method

1. Introduction

Thermoforming, or vacuum forming, is a manufacturing process that has been traditionally employed for the production of thin-walled polymer products of relatively simple geometry. During traditional thermoforming, a constant thickness polymer sheet made from a single material is softened by heating and then formed into or over a tool through the application of a vacuum on the tool side of the sheet. Because of the relatively low energy and tooling costs associated with thermoforming, the process offers significant economic advantages when it can be employed. For large products where the costs associated with other processes such as injection molding become prohibitive, thermoforming can be the perfect answer.

The operator-oriented art of thermoforming has been recognized as an inefficient approach to this process, especially with the utilization of zone-heaters. Current efforts to enhance the utilization of thermoforming are motivated by the versatility and cost effectiveness of the process.

An attempt to better control the sheet temperature prior to forming gave rise to zone-heating through individually controlled heaters. This promising technique, designed to obtain desired heating patterns, remains an insufficiently studied, trial-dependent routine that is inefficient and often times unsuccessful. The trial and error-laden thermoforming practice in industry has provoked a new concept for a more science-based approach. "Intelligent Thermoforming", which is based on the successful characterization of the heated sheet, will enhance the understanding of this process by linking forming temperature and material stiffness patterns directly to final product thickness distributions. This technique will improve the capabilities with applications involving large products, multi-layered products, deep drawing and/or complex mold geometry. The resulting advanced class of thermoforming would in many cases become a formidable, economical alternative to injection molding

2. Related Previous Developments

Recognizing the inadequate characterization of the heating stage, in other words the lack of sheet temperature information, Taylor, et al. and DiRaddo, et al. combined numerical computation and temperature sensing tools to achieve desired quality parts [1, 2]. In Taylor's group, infrared thermography and finite element modeling were employed to investigate the influence of process variables such as evacuation rate (vacuum), sheet surface temperature, mold temperature, and material slip over the mold surface. DiRaddo, et al. simulated the process with a combination of heating, sagging, and forming numerical models.

Duarte and Covas [3] solved the one-dimensional non-steady (transient) heat conduction problem through the sheet thickness while accounting for radiative and convective boundary conditions. The fully implicit finite difference method, with central difference approximations, was employed to solve for the transient temperature as a function of heating time. As has been observed by others [4], the sheet temperature decreases from the center to the edges when a uniform heater setting is imposed. They suggested an amalgamation of their inverse heating algorithm with a sheet deformation counterpart that will conceptually provide a robust numerical model for the entire thermoforming process. Throne produced an explicit finite difference program in the QBasic computer language, TF505 [4], that outputs the heating time for creating a more uniform sheet temperature distribution. Similar to Duarte and Covas, the one-dimensional transient heat conduction model was used. With the code developed by Throne the radiative and convective boundary conditions can be applied to both the upper and lower sheet surfaces [5]. With both of these two models, however, heat radiation exchange between only the heater elements and polymer sheet elements is considered. The exchange of heat radiation between the polymer sheet and the environment, which can be significant when the temperature of polymer sheet is higher than that of the surroundings, has not typically been included.

In the experimental arena, much attention has recently been given to the determination of polymer sheet temperature at the onset of forming. Along this line, industrial and academic scientists have explored numerous non-contacting temperature sensing systems [6,7]. Geiss [8] integrated an infrared scanning pyrometer system into their commercial thermoformers. Similar temperature line-scanning technology has been implemented elsewhere [7, 10]. Single and multi-point pyrometer systems have also been deployed and tested [8, 9]. The infrared thermal imager is an accurate temperature sensing tool that affords very high resolution (320 X 240 pixels). Taylor's group situated an IR imager with a perpendicular view of the forming area to create a time-dependent sheet thermograph [1]. DiRaddo, et al. mentioned the use of an infrared camera for temperature measurements after the heating stage [2]. Michaeli and Marwick designed a closed-loop control system that automated the thermoforming process to achieve the required temperature profile for quality parts [10]. The measured sheet temperatures were used jointly with the desired profile to calculate a new set of heater values for the next cycle.

3. Numerical Analysis

Radiant heating during thermoforming can be modeled by applying traditional conduction heat transfer governing equation with appropriate radiation and convection boundary conditions. Since the thermoplastic sheets of interest possess an "infinitely larger" width and length compared to their thickness and has a low conductivity, a one-dimensional heat conduction analysis is sufficient. Through the conservation of energy on a differential control volume, the heat conduction (or diffusion) equation becomes:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

where:

ρ = density (kg/m³)

C_p = specific heat (J/kg.K)

K = thermal conductivity (W/m.K)

To calculate net heat radiation exchange between the heater, the polymer sheet and the environment, in equations (3) and (4) the net radiation method has been applied. In the model configuration assumed, there are three types of surfaces that together make up what can be thought of as a radiative heat exchange enclosure. These are the heater surfaces, the polymer sheet surfaces and surfaces representing side openings. The side openings can be considered as planes of zero reflection, which can also act as a sources of radiation when such energy is entering the enclosure from the environment. If the heaters, the polymer sheet and the side openings are divided into N sub-surfaces, the heat radiation exchange equation for the i_{th} surface is as follows [11].

$$\begin{aligned} & -\frac{q_i}{A_i} F_{i1} \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} - \frac{q_i}{A_i} F_{i2} \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} - \dots + \frac{q_i}{A_i} \left(\frac{1}{\varepsilon_i} - F_{ii} \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) - \dots - \frac{q_N}{A_N} F_{iN} \frac{1-\varepsilon_N}{\varepsilon_N} = \\ & -F_{i1} \sigma T_1^4 - F_{i2} \sigma T_2^4 - \dots + (1-F_{ii}) \sigma T_i^4 - \dots - F_{iN} \sigma T_N^4 \end{aligned} \quad (5)$$

A summation notation can be used to write equation (5) as.

$$\sum_{j=1}^N \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - F_{ij} \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right) \frac{q_j}{A_j} = \sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - F_{ij}) \sigma T_j^4 \quad (6)$$

Where i takes on one of the values 1, 2, ..., N corresponding to each surface. In equation (6), F_{ij} is the radiative view factor from surface i to surface j , δ_{ij} is the kronecker delta function defined as

$$\delta_{ij} = 1 \quad \text{when } i = j \quad (7)$$

$$\delta_{ij} = 0 \quad \text{when } i \neq j \quad (8)$$

and q_i is the net radiation exchange at the i_{th} surface. When the surface temperatures are specified, the right side of equation (6) is known and there are N simultaneous equations for the N unknown q 's. Therefore, equation (6) becomes a linear system equations:

$$[A][q] = [B] \quad (9)$$

$$[q] = [A]^{-1}[B] \quad (10)$$

Considering the view factor, F_{ij} , in equation (6), Hsu [12] illustrated a method of integration which can be used to calculate the view factor between two arbitrary size rectangles which are placed on mutually parallel planes. By using this formula, heater and polymer sheet elements do not necessary have to be the same size or be lined up directly across from one another.

Equation (1) with the associated boundary conditions can be solved numerically using a number of different approaches. During the present investigation, the solution approach applied was the explicit finite difference approach.

4. Model Validation

To validate the newly developed model, experimental results were required to compare with the numerical results. In the experimentation, the distances “z” from the polymer sheet surface to the top and bottom of the heater were set to be 17.8 cm (7 inches). The materials selected for this research investigation were 1.6 mm. white and opaque Polystyrene (PS) sheets of dimensions 0.6 by 0.9 m. A mesh layer made from chicken wire was used to support the softened polymer sheet during heating in order to eliminate the effect of polymer sheet sag from the present study. Only top heater elements were used in the experiments.

The temperatures on the middle of polymer sheet were measured using an calibrated infrared thermocouple, a Raytek Thermollert MI, and compared to the numerical results for various heating times. Since each point of experimental data was produced from the different experiments, the repeatability of experimental data was concerned. However after some experiments were tested to measure sheet temperature at the same position and heating time, the results showed the repeatability

The two numerical models that were developed (i.e. those based on the net radiation and local radiation methods, respectively) were evaluated with corresponding experimentation. Note that the local radiation method does not concern about the heat radiation exchange between polymer sheet and environment. In the numerical models, the emissivity of the white Polystyrene sheet was initially set to be 0.9, while that for the ceramic heaters was set to a value of 0.9. The convection heat transfer coefficient for quiescent air was set to be 1.5 Btu/(ft² h °F) [5]. The polymer sheet temperature at center of sheet was measured as a function of heating time. These were then compared to the numerical simulation results as shown in Figure 1. From Figures, it can be seen that both sets of numerical simulation results were close to the experimental results for shorter heating times. At longer heating times, however, the numerically predicted sheet temperatures rose above those observed experimentally. In these cases, the net radiation method was shown to yield a better temperature prediction.

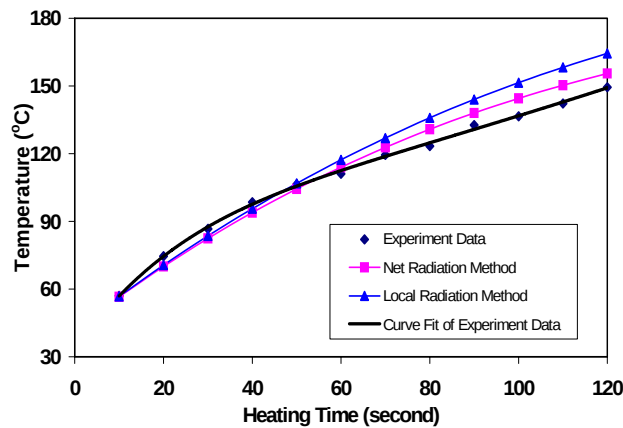


Figure 1: Results associated with numerical model validation

5. Model Utilizations

There are three main variables in thermoforming processes that effect to the temperature distribution. They are the space between heater and polymer sheet, heating time and heater temperature pattern. For

example, to express the effect of space between heater and polymer sheet to the temperature distribution, the net radiation model was utilized. All both top and bottom heater elements were set to 357 °C, and heating time was 120 sec. Figure 6 presents the slice plots of surface temperatures along the middle lines of width ($y = 0.3$ m.) on the sheet. The spaces between heater and polymer sheet were varied from 5 cm. to 17.5 cm. From Figure 2, it can be seen that for a smallest space, 5 cm., the temperature distribution illustrated more uniform than those of larger spaces. This can be understood that for small distance between two planes, the effect of view factor to the heat radiation exchange between elements is decreased. On inside area (from 0.1 to 0.8 m) almost heat energy from heater was transferred to the polymer sheet

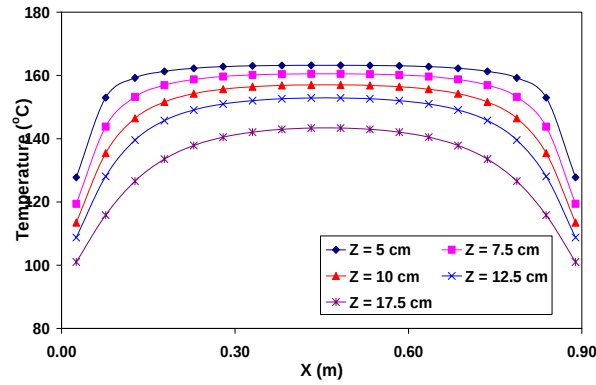


Figure 2: Surface temperature distribution of the different spaces between heater and polymer sheet at width = 0.3 m.

For the heating time, Figure 3 shows the temperature plot at the surface and middle thickness of heated polymer sheet varying the heating time. Also the temperature gap between surface and middle thickness has been shown on Figure 4. From Figure 4, it can be seen that the temperature gap is very high at the beginning of heating and then decreasing with longer heating time. However, increasing the heating time will increase the process cycle time.

When doing the thermoforming of a thick polymer sheet, a window of forming temperature must be considered. Temperatures of polymer sheet over an forming area from top surface through bottom surface have to fall inside the window of forming temperature. The simulation can be helped to save time and material from trial and error processes.

For example, considering Polystyrene, the forming temperature window is 127 – 182 °C and the normal forming temperature is 149 °C. [5]. If the heater temperature and heating time were fixed, only the space between heater and polymer sheet can be changed to determine suitable distance which make the temperatures through out the polymer sheet fall inside the forming temperature window. Although Figure 5 shows that the top surface temperatures of polymer sheet are in forming temperature range, the temperatures of middle of thickness are still below the lower forming temperature. The infrared thermocouple only can measure surface temperature. Therefore, the simulation model will help to predict the temperatures inside the polymer sheet. As can be seen in Figure 6, the distance between heater and polymer sheet set to 5 cm. seems to be suitable for forming.

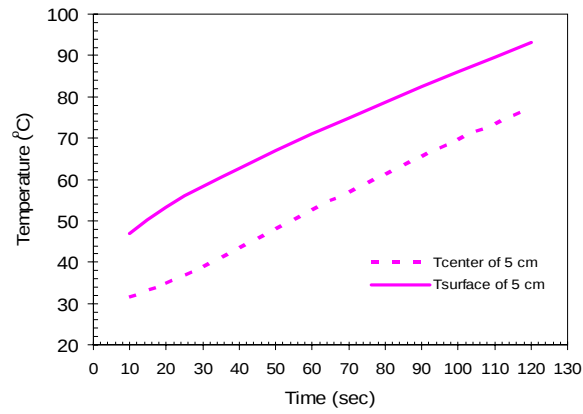


Figure 3 The effect of heating time to Temperature at sheet center 0. using $Z = 5$ cm

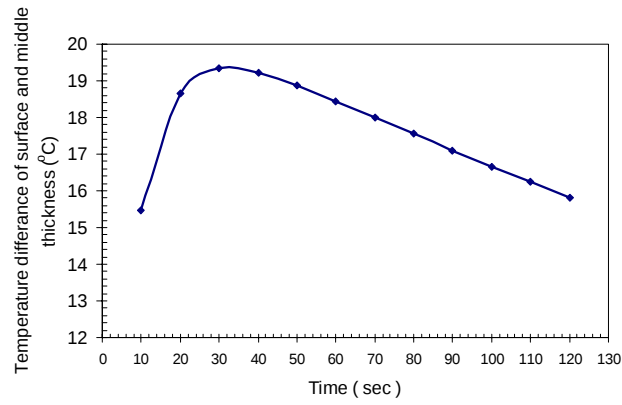


Figure 4 The temperature difference between surface and middle thickness at sheet center

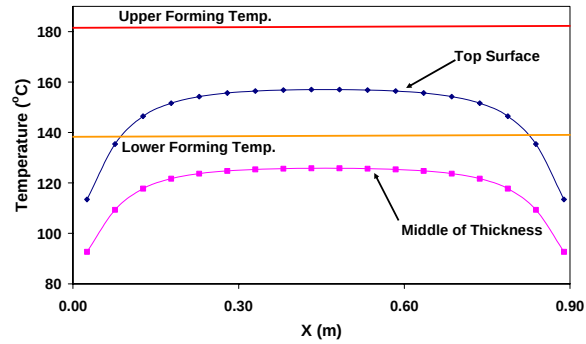


Figure 5: Temperature distribution at width 0.3 m. using $Z = 10$ cm.

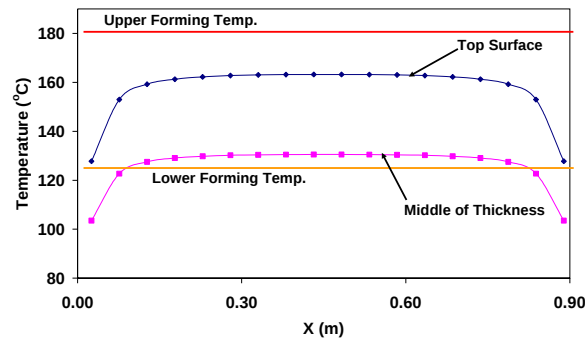


Figure 6 Temperature distribution at width 0.3 m. using $Z = 5$ cm.

6. Discuss and Conclusions

As result of a comparison between net radiation and localized radiation methods of heating simulation during thermoforming processes, it has been shown that the net radiation method is preferable. A simulation tool has been developed based on this method, and an additional advantage is the ability to fully accommodate non-uniform zone heating patterns with arbitrary sized and distributed rectangular heater and polymer sheet elements. Numerical results obtained with this advanced tool showed good agreement with those obtained through experimental infrared imaging. From model utilization, it was shown that the use of model provided time and material saving.

7. Acknowledgements

The author acknowledge financial supports from the National Research Council of Thailand

8. References

- [1] Taylor, C.A.D., H G. Kazmer, D O., "Experimental and Numerical Investigations of the Vacuum-Forming Process". *Polymer Engineering & Science*, 1992. 32(16): p. 1163-1173.
- [2] DiRaddo, R.e.a., "Optimization of Thermoforming with Process Modeling", ANTEC '99. 1999. NYC, NY.
- [3] Duarte, F.M.C., J A., "Heating Thermoplastic Sheets for Thermoforming Solution to Direct and Inverse Problems", *Plastics Rubber & Composites Processing & Applications*, 1997. 26(5): p. 213-221.
- [4] Throne, J.L. Radiant Heat Transfer in Thermoforming. in ANTEC '95. 1995. p. 810-821.
- [5] Throne, J.L., *Technology of Thermoforming*. 1996.
- [6] Wilson, J. Thermal analysis of the bottle forming process. in *Thermosense XIII*. 1991. Orlando, FL: The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA. p. 219-228.
- [7] Welch, T., "Scanning IR Sensors", *Plastics Thermoforming*, in *Sensors*. 1993. p. 28-31.
- [8] Myers, J., "Closed-loop temperature scanners increase quality", *Modern Plastics International*. 1993. p. 20-22..
- [9] Lappin, J.F., Martin, P J., "Sheet Temperature Measurement in Thermoforming", ANTEC '96. 1996. p. 878-882.
- [10] Michaeli, W., et. al., "Automation of the Thermoforming Process by a Wall Thickness Closed-Loop Control", ANTEC '96. 1996. Indianapolis, IN. p. 863-868. Hammer", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, Vol. 11, No. 2, p. 269-285