

การศึกษาการจำลองกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ฉีด

An Investigation of Rubber Injection Moulding Simulation

รุ่งธรรม ปัญญวิภาต^{1*} ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ² พลกฤษณ์ ชื่อพิทยากุล³ ภานุดา ชยธวัช³ และ วรวุฒิ วงศ์พัทธยากร³

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์ 0-2942-7188 โทรสาร 0-2942-7189 *อีเมล rungtham.p@gmail.com

Rungtham Panyawipart^{1*}, Supasit Rodkwan², Pholkit Suepittayakul³, Bhanuda Jayathawat³ and Worawut Wongpattayakorn³

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University and

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

Center of Excellence in Rubber Mould, Research and Development Institute of Industrial Production Technology

³Electromechanic Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,

Jatujak, Bangkok, Thailand 10900 Tel. 0-2942-7188 Fax. 0-2972-7189 *E-mail. rungtham.p@gmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีความต้องการในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางที่มีความซับซ้อนของรูปร่างมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางยังขาดองค์ความรู้ในเทคโนโลยีการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง รวมถึงไม่มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและผลิต จึงทำให้แม่พิมพ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพค่อนข้างต่ำและทำให้เกิดปัญหาต่างๆของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะเป็นการนำคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรมมาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางโดยการใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอยเพื่อสร้างภาพสามมิติของชิ้นงานยางและการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ในการจำลองการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของเนื้อยางในขณะทำการขึ้นรูป โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบตัวอย่างคือยางพื้นรองเท้ากีฬาที่ทำด้วยวัสดุ NBR 70 โดยผลการวิจัยที่ได้นั้นสามารถจำลองทิศทางและลักษณะการไหลของเนื้อยางเข้าสู่โพรงของแม่พิมพ์ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับความเป็นจริง และในการหาตำแหน่งช่องทางไหลเข้าที่เหมาะสมให้ของชิ้นงานที่ออกแบบจะได้ตำแหน่งที่เนื้อยางสามารถไหลเข้าสู่โพรงของแม่พิมพ์ได้อย่างสมดุลที่สุดโดยการไหลเข้าทางด้านข้างเป็นแนวยาว และสามารถระบุตำแหน่งที่เกิดโพรงอากาศที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์จึงมีประโยชน์ในการพัฒนาองค์ความรู้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่สูงขึ้น

คำสำคัญ : แม่พิมพ์ฉีด คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมวิศวกรรมย้อนรอย

Abstract

Currently, there are needs for more complicated rubber products. However, the manufacturers are still lack of knowledge related to mould design and manufacturing including the use of computational tool. This results in the low quality of moulds and their, rubber product. In this research, the Computer Aided Engineering and the reverse Engineering are used to simulate flow simulation and temperature distribution in sport shoe rubber pattern (NR70) during the injection process. The numerical results are also correlated well with the empirical data using the rubber injection machine. This research provides rubber researchers the tools to seek the best of knowledge in rubber injection moulding process.

Keywords: Injection mould, Computer Aided Engineering (CAE), Reverse Engineering

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางที่มีความซับซ้อนของรูปร่างมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางยังขาดองค์ความรู้ในเทคโนโลยีการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง อีกทั้งยังขาดบุคลากรที่มีความรู้ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยการฉีดขึ้นรูป รวมถึงไม่มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและผลิต จึงทำให้แม่พิมพ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพค่อนข้างต่ำและทำให้เกิดปัญหาต่างๆของ

ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ และในปัจจุบันแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปที่ใช้ส่วนใหญ่ยังนำเข้าจากต่างประเทศทำให้ไม่มีการพัฒนาองค์ความรู้ดังกล่าวอย่างต่อเนื่องภายในประเทศ

กระบวนการผลิตและการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทยในปัจจุบันนั้นเป็นรูปแบบที่เรียกกันว่าวิศวกรรมตามรอย (Forward Engineering) กล่าวคือ เป็นกระบวนการที่ประกอบไปด้วยการออกแบบ การผลิตต้นแบบ การทดลองคุณสมบัติต่างๆของต้นแบบแล้วจึงทำการผลิตเพื่อใช้งานจริง โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) ตัวอย่างโปรแกรมคือ Solid Works®, Unigraphics, Pro/Engineer เป็นต้น หรือการใช้เทคโนโลยีอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งกำลังได้รับความนิยมอย่างสูง ได้แก่ วิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) ตัวอย่างโปรแกรมคือ Polygonia ซึ่งเป็นการสแกนพื้นผิวชิ้นงาน โดยจะใช้ร่วมกับ Geomagic ซึ่งเป็นการปรับแต่งผิวชิ้นงาน เพื่อแปลงกลับไปเป็นชิ้นงานสามมิติ เป็นต้น โดยเป็นการทำกระบวนการย้อนรอยของวิศวกรรมตามรอยทำให้ลดเวลาในการสร้างแบบสามมิติ

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) ตัวอย่างโปรแกรมคือ Cadmould, 3D SIGMA เป็นต้นซึ่งสามารถที่จะทำการจำลองการไหลของส่วนผสมของยางที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีด และสามารถดูผลต่างๆจากตัวโปรแกรมได้ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) รวมทั้งการใช้เครื่องจักรกลที่ควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control, CNC) เข้าไปช่วยในกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

ทางคณะผู้ทำโครงการได้เห็นถึงความสำคัญ ในการนำเอาเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยเข้ามาช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาของกระบวนการผลิต และการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยเทคโนโลยีที่ผู้จัดทำโครงการนำมาใช้ช่วยในการวิเคราะห์แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้แก่ คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) และวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering)

โดยโครงการนี้จะมุ่งเน้นการนำคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมมาช่วยในการวิเคราะห์แม่พิมพ์ฉีดและผลิตภัณฑ์ยาง โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมที่ใช้ในโครงการ ได้แก่ โปรแกรม Cadmould ซึ่งจะเข้ามามีส่วนช่วยในการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการออกแบบชิ้นงานที่จุดการทำงานที่กำหนด โดยโปรแกรมจะทำการจำลองรูปแบบของการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปของชิ้นงานและผลกระทบที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ ซึ่งในโครงการนี้ผู้จัดทำได้เลือกวิเคราะห์ชิ้นงานพื้นรองเท้ากีฬาที่มีรูปร่างเรขาคณิตที่ซับซ้อน โดยเลือกใช้ภายในไตรมาสเป็นวัสดุที่ใช้วิเคราะห์ ซึ่งแม่พิมพ์ เครื่องจักรและสิ่งอื่นๆที่เกี่ยวข้องได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง (CERM)

คณะผู้ทำโครงการคาดว่า โครงการนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางโดยการช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการออกแบบทดลองสร้างและแก้ไขแม่พิมพ์ โดยการวิเคราะห์ว่าชิ้นงานที่ออกแบบมีความเหมาะสมกับหรับการฉีดขึ้นรูปหรือไม่หาก ไม่เหมาะสมก็สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างที่ทำการออกแบบ ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าออกแบบแล้วต้องทดลองทำแม่พิมพ์ฉีดก่อนจึงจะทราบว่าเหมาะสมหรือไม่ นอกจากนี้ยังช่วยในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่ทำให้ชิ้นงานจากการฉีดเสียหาย เช่น ปัญหาการฉีดไม่เต็ม เป็นต้น

2. วัสดุและขั้นตอนการวิจัย

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จะเป็นการนำคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรมมาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางโดยการใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมย้อนรอย [1] เพื่อสร้างภาพสามมิติของชิ้นงาน และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Cadmould [2] ในการจำลองการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิของเนื้อยางในขณะที่ทำการขึ้นรูป โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาชิ้นงานตัวอย่างคือยางพื้นรองเท้ากีฬาที่ทำด้วยวัสดุ NBR 70 ดังแสดงในรูปที่ 1 และการขึ้นรูปยางด้วยเครื่องฉีดยางระบบขับเคลื่อนแนวตั้งขนาดแรงบิดแม่พิมพ์ 100 ตัน และมีปริมาตรกระบอกฉีด 254 ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 1 ชิ้นงานพื้นยางของรองเท้ากีฬา

โปรแกรมในการทำ Reverse Engineering ได้แก่ Polygonia, Geomagic Studio 6 และโปรแกรมในการวิเคราะห์การไหลของยาง ได้แก่ Cadmould อุปกรณ์เก็บค่าพิกัด 3 มิติในระบบเลเซอร์ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ หัวสแกน 3D Laser Scanner ที่ใช้ในการทำโครงการเป็นของ Kreon รุ่น KZ 50 และแขน (Portable Arm) ที่ใช้ในโครงการเป็นของ Cimcore 3000i



รูปที่ 2 อุปกรณ์เก็บค่าพิกัดสามมิติในระบบเลเซอร์

ยางผสม (Compound Rubber) สำหรับป้อนเข้าเครื่องฉีด โดยใช้
ยาง NBR ความแข็ง 70 ชอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ยางผสมสำหรับป้อนเข้าเครื่องฉีด
ชนิด NBR ความแข็ง 70 ชอร์

เครื่องฉีดยางระบบขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิกแนวตั้งขนาด 100 ตัน
ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องฉีดยางระบบขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก
แนวตั้งขนาด 100 ตัน

เตรียมชิ้นงานพื้นรองเท้าโดยนำมาพ่นสเปรย์แข็งสีขาวเพื่อให้
เครื่องเก็บค่าพิทสามมิติ สามารถสแกนได้ ดังแสดงในรูปที่ 5

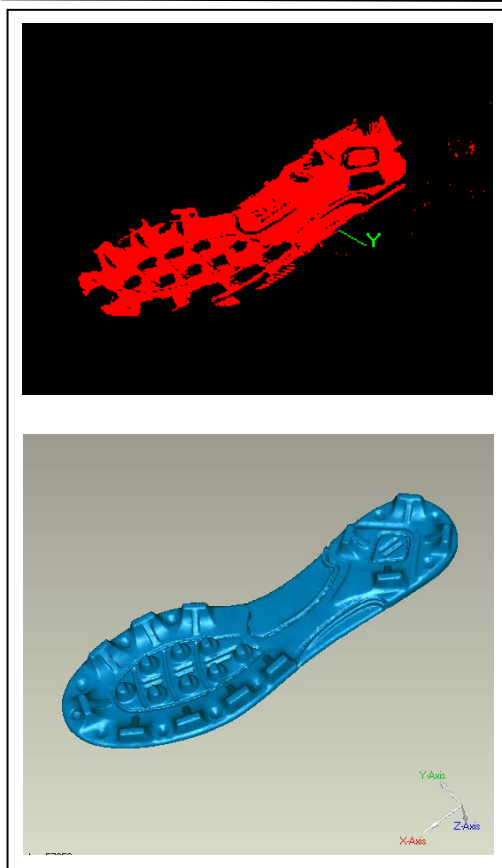


รูปที่ 5 ชิ้นงานพื้นยางของรองเท้าเมื่อทำการพ่นสเปรย์

เข้าโปรแกรมที่จะทำการสแกนโดยจะใช้โปรแกรม Polygonia
ทำการตั้งค่าต่างๆของเครื่องเก็บ ค่าพิทสามมิติและขั้นตอนการ
สแกนต่างๆโดยทำตามขั้นตอน รูปที่ 6 แสดงการสแกนชิ้นงานพื้นยาง
รองเท้ากีฬา



รูปที่ 6 การสแกนชิ้นงานพื้นยางของรองเท้า



รูปที่ 7 ตัวอย่าง Cloud Point ที่ได้จากเก็บพิกัดสามมิติ

3. ผลและการวิเคราะห์

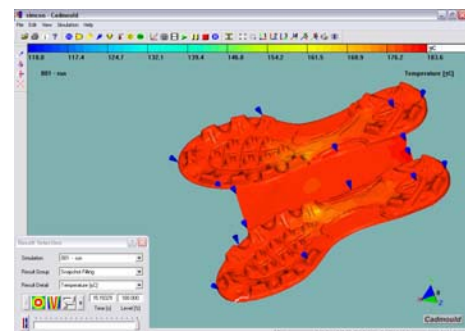
ในขั้นตอนการทำวิศวกรรมย้อนรอย ข้อมูลของชิ้นงานที่ได้จากการเก็บพิกัดสามมิตินั้นจะเกิดความผิดพลาด คือ ก่อนการเก็บพิกัดสามมิติต้องทำการพ่นสเปรย์แป้งขาวหรือสีสว่างอื่นๆ เนื่องจากคุณสมบัติของหัวตรวจจับสามมิติระบบเลเซอร์ Keron รุ่น KZ 50 ที่ไม่สามารถเก็บพิกัดชิ้นงานที่มีสีดำหรือสีทึบได้ เพราะชิ้นงานมีสีดำจะมีคุณสมบัติดูดแสงเลเซอร์ แสงเลเซอร์จึงไม่สามารถสะท้อนกลับมาสู่กล้อง CCD (Charged Couple Device) ได้ แต่บริเวณร่องพื้นรองเท้าที่พ่นสเปรย์ได้ไม่หนาเท่าที่ควร ผลการเก็บพิกัดและการแปลงเป็นพื้นผิวจึงมีบริเวณที่ไม่เชื่อมต่อกัน จึงต้องทำการแต่งให้เป็นพื้นผิวที่ปิดเชื่อมกัน และอีกประการคือผิวที่ทำการสแกนนั้นเมื่อแปลงเป็นพื้นผิวแล้วก็มีความขรุขระอยู่มากจึงต้องทำการขัดผิวให้เรียบขึ้น แต่ไม่สามารถขัดให้ผิวเรียบมากนัก เนื่องจากจะทำให้รูปร่างของชิ้นงานเปลี่ยนไปจากของจริงมากเกินไปซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานจริงได้ นอกจากนี้ยังพบว่ามีความผิดพลาดเนื่องจากการแปลงไฟล์จากรูปแบบหนึ่งไปอีกรูปแบบหนึ่ง เพื่อจะย้ายจากโปรแกรมหนึ่งไปยังอีกโปรแกรมหนึ่ง ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น กล่าวคือ รูปทรงของชิ้นงานบางส่วนจะเปลี่ยนแปลงไปจากชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งเมื่อนำไปจำลองการไหลโดยใช้โปรแกรม Cadmould ก็จะมีผลให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีความถูกต้องลดลง

ในขั้นตอนการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ ในส่วนของการกำหนดชนิดวัสดุนั้นจำเป็น ต้องมีการป้อนค่าต่างๆให้กับโปรแกรม

Cadmould นั้น ค่าสมบัติวัสดุต่างๆของยางชนิด NBR ความแข็ง 70 ชอร์ (Shore A 70) ที่ป้อนให้กับโปรแกรม Cadmould ส่วนหนึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมอีกโปรแกรมหนึ่ง คือ 3D Sigma และอีกส่วนหนึ่งจากโปรแกรม Cadmould เองแต่เป็นค่าโดยทั่วไปของยาง NBR ซึ่งมีผลให้ความถูกต้องของการจำลองการไหลของโปรแกรมลดลง

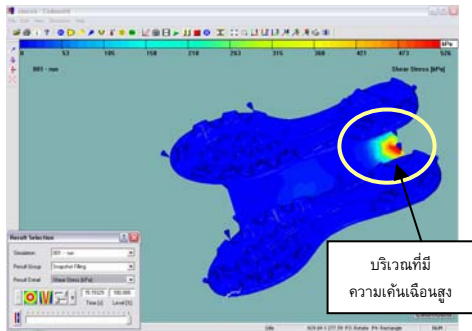
นอกจากนี้การกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของกระบวนการฉีด เช่น เวลาในการไหล (Filling Time) จำเป็นต้องเผื่อเวลาการไหลและการฉีดด้วย ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้เวลาในการไหล (Fill Time) 5 วินาที และเวลาในการฉีด (Injection Time) อีก 10 วินาที จึงต้องกำหนดให้ค่า Filling time ที่ป้อนให้โปรแกรมมีค่าเป็น 15 วินาที ซึ่งแตกต่างจากที่กำหนดในการฉีดจริง คือ 10 วินาที ส่วนอุณหภูมิของแม่พิมพ์และของยางให้กำหนดเป็น 180 และ 110 องศาเซลเซียสตามลำดับ อุณหภูมิกระบอกฉีดเป็น 70, 70, 75 และ 75 องศาเซลเซียสตามลำดับ แรงดันฉีดกำหนดให้เป็น 99% ของแรงดันฉีดสูงสุด ซึ่งตรงกับที่กำหนดในการทดลองฉีดขึ้นรูปจริง

เมื่อการจำลองการไหลสิ้นสุดลง จะแสดงลักษณะการไหลของยางที่เวลาต่างๆ ณ จุดใดจุดบนชิ้นงานพื้นรองเท้า โดยจะเห็นว่า ยางจะไหลผ่านช่องทางเข้าและ Ingate (บริเวณระหว่างพื้นรองเท้าทั้ง 2 ข้างของชิ้นงาน) ก่อนแล้วจึงไหลไปถึงขอบของรองเท้าทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งจากการจำลองการไหลจะพบว่า ตำแหน่งของ Gate มีผลต่อลักษณะการไหล ซึ่งควรจะต้องมีความสมดุลโดยเฉพาะในกรณีที่มีรูปร่างสมมาตร เมื่อโปรแกรม Cadmould รันเสร็จสมบูรณ์แล้วสามารถดูผลการวิเคราะห์ได้หลายลักษณะ การพิจารณาผลแบบ Snapshot จะเป็นการแสดงค่าต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความเค้นเฉือน ความเร็ว ค่าความหนาของชั้นที่เริ่มแข็งตัว (Frozen Layer Thickness) และ ค่าหน้าตัดใดๆ (Free Cross Section) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีด ซึ่งแสดงในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 13



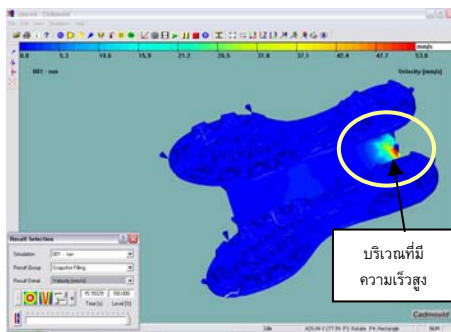
รูปที่ 8 Snapshot Filling เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิ

จากรูปที่ 8 แสดงค่าอุณหภูมิของชิ้นงาน ณ เวลาใดๆของกระบวนการที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งค่าที่แสดงนั้นจะเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ความหนา (จากผนังด้านหนึ่งถึงผนังอีกด้านหนึ่ง) ใดๆ ซึ่งพบว่า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการแล้วชิ้นงานจะมีอุณหภูมิสูงเกือบทั้งชิ้นงาน คือประมาณ 178 ถึง 183 องศาเซลเซียส ซึ่งการที่ชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงเมื่อฉีดเสร็จอาจเป็นสาเหตุของการไหม้บนชิ้นงานได้



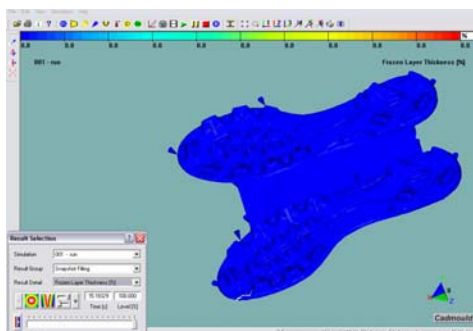
รูปที่ 9 Snapshot Filling เมื่อพิจารณาค่าความเค้นเฉือน

จากรูปที่ 9 แสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นของชิ้นงาน จะเห็นว่า ช่วงกลางของขอบบริเวณ Ingate ด้านหลังของชิ้นงาน มีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งชิ้นงาน ซึ่งการที่มีค่าความดันและค่าความเค้นเฉือนสูงบ่งบอกว่า อาจเกิดตำหนิ เช่น การบิดเบี้ยว หรือ การโก่งตัวผิดรูปของชิ้นงานที่บริเวณดังกล่าว

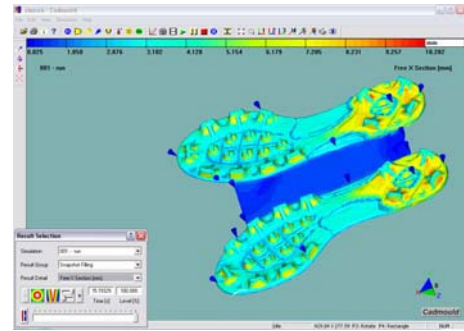


รูปที่ 10 Snapshot Filling เมื่อพิจารณาค่าความเร็ว

จากรูปที่ 10 แสดงค่าความเร็วที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานซึ่งพบว่าเป็นบริเวณเดียวกับที่มีค่าความดันและความเค้นเฉือนสูง จึงอาจกำหนดให้บริเวณช่วงกลางของขอบด้านหลังของ Ingate เป็นบริเวณที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษ (Critical Area) จากรูปที่ 11 และ 4-8 จะเป็นการค่า Frozen Layer Thickness และ Free Cross Section ที่จุดต่างๆ บนชิ้นงานพื้นรองเท้า เมื่อเวลาผ่านไปจนเสร็จสิ้นกระบวนการ

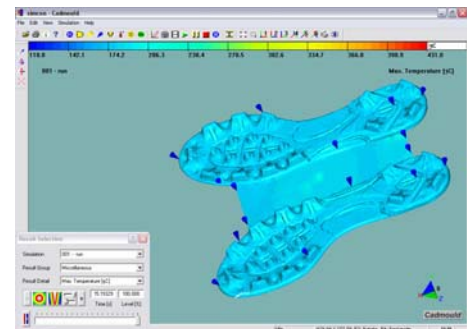


รูปที่ 11 Snapshot Filling เมื่อพิจารณาค่า Frozen Layer Thickness

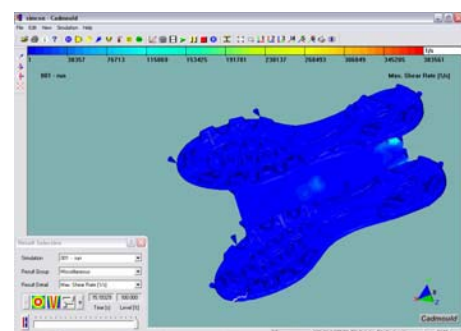


รูปที่ 12 Snapshot Filling เมื่อพิจารณาค่า Free Cross Section

รูปที่ 13 และรูปที่ 14 เป็นการแสดงผลแบบ Miscellaneous ซึ่งแสดง ค่าอุณหภูมิสูงสุดและอัตราเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนแต่ละจุดของชิ้นงาน ณ เวลาใด ๆ ตลอดกระบวนการฉีด ซึ่งบริเวณที่มีค่าอุณหภูมิและอัตราเฉือนสูงจะเกิดตำหนิ เช่น การไหม้ หรือ รูปร่างบิดเบี้ยว เนื่องจากความร้อนและเค้นเฉือน ซึ่งมักจะพบในบริเวณที่ชิ้นงานค่อนข้างบางเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดโดยรวมของชิ้นงาน



รูปที่ 13 Miscellaneous เมื่อพิจารณาค่า Max. Temperature

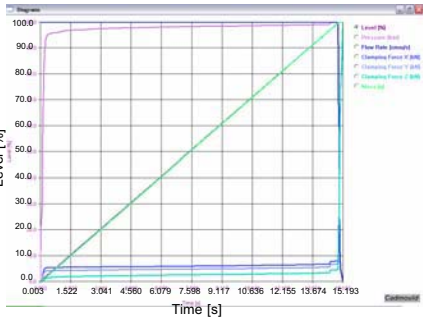


รูปที่ 14 Miscellaneous เมื่อพิจารณาค่า Max. Shear Rate

นอกเหนือจากการดูผลในลักษณะที่กล่าวไปแล้วยังสามารถดูผลในลักษณะของกราฟแสดงค่าสูงสุดของตัวแปรต่างๆ เช่น ความดัน อัตราการไหล แรงกดในแนวแกน (Clamping Force) ทั้งสามแกน (x, y, z) และมวลของเนื้อยางที่ไหลเข้าแม่พิมพ์ ณ เวลาใดๆตลอดกระบวนการ

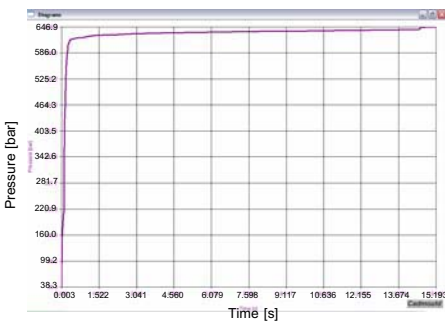
AMM083

ดังแสดงในรูปที่ 15 และสามารถดูผลแยกทีละตัวแปรได้ดังแสดงในรูปที่ 16 ถึงรูปที่ 17



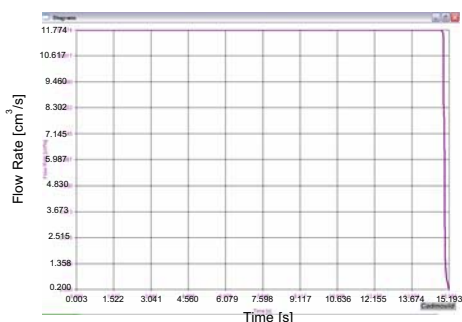
รูปที่ 15 กราฟรวมเมื่อเทียบกับเวลา

รูปที่ 16 เป็นกราฟแสดงความดันเทียบกับเวลา สามารถอธิบายได้ว่า แรงดันที่ใช้ฉีดเนื้อยางเข้าสู่แม่พิมพ์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะคงที่จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ



รูปที่ 16 กราฟแสดงความดันเมื่อเทียบกับเวลา

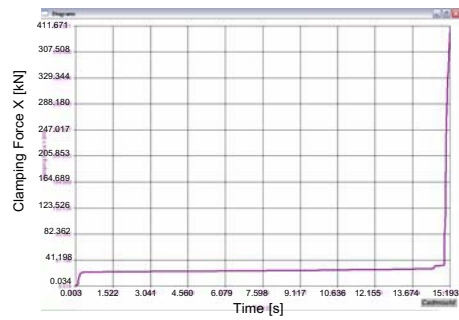
รูปที่ 17 เป็นกราฟแสดงอัตราการไหลเมื่อเทียบกับเวลา แสดงให้เห็นว่าการฉีดยางนั้น จะมีอัตราการไหลของเนื้อยางเข้าสู่แม่พิมพ์คงที่จนเนื้อยางถูกฉีดเต็มแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถอธิบายคู่กับ รูปที่ 17 ซึ่งเป็นกราฟแสดงมวลของยางที่ไหลเข้าแม่พิมพ์เมื่อเทียบกับเวลา จากกราฟจะเห็นว่ามวลของยางที่ถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์จะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่เนื่องมาจากอัตราการไหลของการฉีดมีค่าคงที่



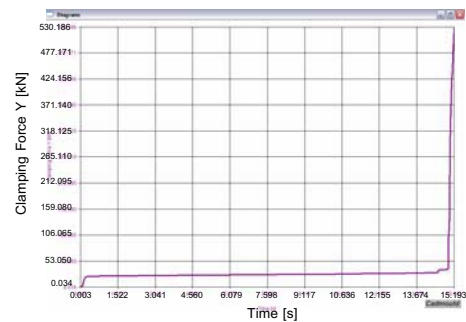
รูปที่ 17 กราฟแสดงอัตราการไหลเมื่อเทียบกับเวลา

รูปที่ 18 ถึง 20 เป็นกราฟแสดง Clamping Force ของทั้ง 3 แกนเมื่อเทียบกับเวลา

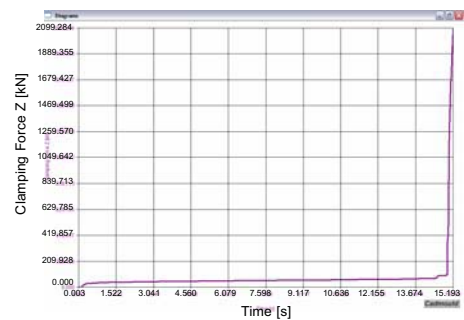
จากกราฟจะเห็นว่าแรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์นั้นจะมีค่าคงที่ตลอดจนกระทั่งฉีดเนื้อยางเต็มแม่พิมพ์แต่แรงดันที่ฉีดเนื้อยางยังมีค่าคงที่ จึงเกิดแรงดันหลักแม่พิมพ์ออก ดังนั้นแรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์จึงมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 18 กราฟแสดง Clamping Force ในแกน X เมื่อเทียบกับเวลา



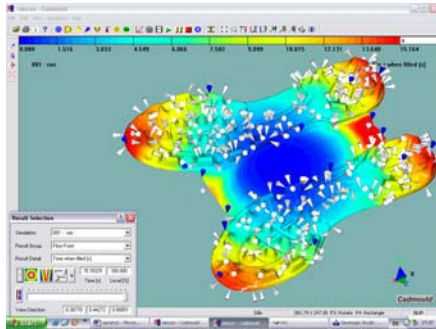
รูปที่ 19 กราฟแสดง Clamping Force ในแกน Y เมื่อเทียบกับเวลา



รูปที่ 20 กราฟแสดง Clamping Force ในแกน Z เมื่อเทียบกับเวลา

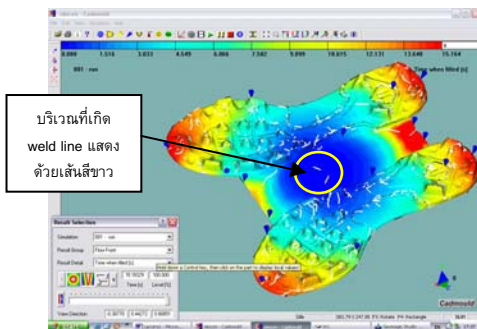
รูปที่ 21 จะแสดงให้เห็น Air Traps ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยจะบ่งบอกในรูปของกรวยสีขาว ซึ่งที่กึ่งขึ้นจะกระจายอยู่ทั่วชิ้นงานแต่ไม่มีผลต่อความแข็งแรงและความสวยงามของชิ้นงาน เพราะมีขนาดเล็กและประกอบด้วยชิ้นงานถูกออกแบบให้มีผิวมีลวดลายและมีสีดำจึงทำให้เห็นตำแหน่งไม่ชัดเจน

รูปที่ 23 Flow Direction เพื่อป้องกันทิศทางการไหลของยางเมื่อเข้าไปในแม่พิมพ์



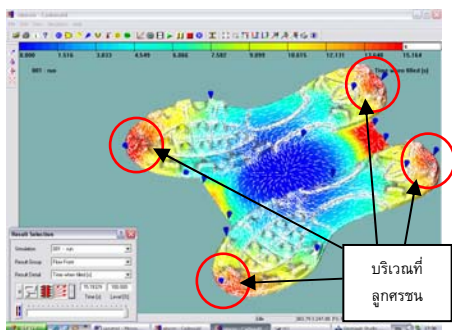
รูปที่ 21 Air Traps ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

และรูปที่ 22 จะแสดง Weld lines ที่เกิดขึ้นด้วยเส้นสีขาว ซึ่ง Weld lines ที่พบนั้นเกิดขึ้นจากทิศทางการไหลของเนื้อยางไหลมาบรรจบกัน โดยทิศทางการไหลของเนื้อยางในโพรงของแม่พิมพ์นั้นจะแสดงให้เห็น



รูปที่ 22 Weld Line ที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

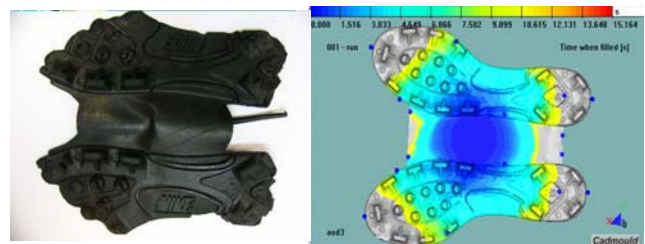
ในรูปที่ 23 ซึ่งจะแสดงทิศทางไหลโดยแสดงเป็นเวกเตอร์มีทิศทางตั้งฉาก โดยจุดที่ลูกศรชนกันนั้นจะเกิดตำหนิขึ้น ได้แก่ Air Traps และ Weld Lines ที่ตำแหน่งดังปรากฏในรูปที่ 21 และรูปที่ 22 จากรูปที่ 23 แสดงค่า Clamping Force ที่กระทำต่อชิ้นงานทั้งแกน X, Y, Z โดยสามารถสรุปค่าต่างๆได้ดังแสดงในตารางที่ 23



ตารางที่ 1 แสดงค่า Clamping Force ที่กระทำต่อชิ้นงานในแนวแกนต่างๆ

Open. Direction	Clamping Force (kN)	Projected Area (mm ²)
X Axis	397.274	7266
Y Axis	515.028	38630
Z Axis	2097.359	32617

จากตารางที่ 1 พบว่าค่า Clamping Force ในแนวแกน Z มีค่าสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าในแนวแกน X และแกน Y พบว่ามีค่าแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะแกน Z เป็นทิศทางที่มีการฉีดเนื้อยางเข้าสู่โพรงของแม่พิมพ์ และเป็นทิศทางที่มีการเปิดและปิดแม่พิมพ์ โดยค่า Projected Area จะเป็นพื้นที่ฉายที่แรงกดกระทำ ซึ่งจะมีค่าขึ้นกับทิศทางของ Clamping Force ซึ่งค่าต่างๆที่คำนวณโดยโปรแกรม Cadmould นั้นจะไม่ได้คิดในส่วนที่ชิ้นงานมีลักษณะเป็น Undercut ชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 24 ซึ่งเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์ที่เวลาการฉีด 10 วินาที



รูปที่ 24 การเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ฉีดและการวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์

4. สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์และการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพื้นรองเท่านั้นพบว่า เมื่อปรับค่าเวลาของการวิเคราะห์โดยคอมพิวเตอร์ให้อยู่ที่เวลา 10 วินาที จะมีลักษณะการไหลใกล้เคียงกับที่ปรากฏบนชิ้นงานที่ทดลองฉีด ซึ่งจะเห็นว่า โปรแกรม Cadmould สามารถจำลองลักษณะและทิศทางไหลของเนื้อยางเข้าสู่โพรงของแม่พิมพ์ได้ค่อนข้างถูกต้องตรงกับความเป็นจริง แต่จะไม่สามารถตอบคำถามที่ว่าเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วหากฉีดจริงจะฉีดได้เต็มหรือไม่ และไม่สามารถระบุลักษณะและค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องการเย็นตัวของชิ้นงาน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะไม่สามารถกำหนดค่าต่างๆในกระบวนการได้อย่างแม่นยำ เช่น ค่าความดัน ซึ่งต้องกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยเทียบจาก

ค่าความดันสูงสุดของเครื่อง และอาจกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ในแต่ละชั้นของกระบวนการฉีดได้ แต่ก็ต้องกำหนดเป็นช่วงเวลาที่แน่นอนซึ่งอาจจะคาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ นอกจากนี้โปรแกรม Cadmould ยังไม่ได้พิจารณาในส่วนของคุณสมบัติวัสดุของวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ และในส่วนของคุณสมบัติตำแหน่งและขนาดของระบบให้ความร้อนและระบบหล่อเย็น (Heating and Cooling System)

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชพล ชังชู และอาจารย์ ดร.คุณยุต เอี่ยมสะอาด สำหรับการดูแลและให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ คุณแสงสวรรค์ วินยางค์กุล และคุณสุชาดา เจริญโมรา ที่ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง (CERM) สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความรู้ ความช่วยเหลือเรื่องโปรแกรม Cadmould และเรื่องเกี่ยวกับคุณสมบัติทั่วไปของยาง

- คุณกัมปนาท อ่วมกุล และพี่ๆทุกคนในแผนกเครื่องมือวัด สำหรับการเอื้อเฟื้อต่างๆ และการใช้อุปกรณ์ในการทำวิศวกรรมย้อนรอย (Reverse Engineering) สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPT)

- คุณบัญชา วันทอง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIPT) สำหรับความรู้และความช่วยเหลือในเรื่องเครื่องฉีดยาง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Simoni A., Gonzo L. and Gottardi M., 2002, "Integrated Optical Sensors for 3-D Vision", Integrated Optical Sensors Group, ITC-IRST, Povo, Trento, Italy.
- [2] Simcon kunststofftechnische Software GmbH, 2002 "Cadmould Rubber User's Manual", Simcon, Herzogenrath, Germany.