



## การวิเคราะห์ปัญหาการแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซีในกระบวนการ RIM Study of Crack Problem of Epoxy Mould for RIM Process

มนัส เจริญญิกิจ<sup>1</sup> สถาพร ชาตาคม<sup>2</sup> และ สุธิตศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช<sup>1\*</sup>  
Manat Haerunyakij<sup>1</sup> Sathaporn Chatakorn<sup>2</sup> and Sutthisak Phongthanapanich<sup>1\*</sup>

### บทคัดย่อ

ชิ้นส่วนองค์ประกอบและชิ้นส่วนเพิ่มเติมของรถยนต์ เช่น กันชนหน้าและหลังของรถยนต์ ได้ถูกผลิตโดยวิธีการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยาหรือที่เรียกว่า Reaction Injection Moulding Process (RIM) ในปัจจุบันวัสดุที่ไม่ใช่เหล็กได้ถูกนำมาใช้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ เนื่องจากผลของการเกิดเทคโนโลยีใหม่ และความต้องการของผู้ใช้ที่ต้องการได้แม่พิมพ์ในระยะเวลาอันสั้นและราคาไม่แพงมากนัก อีพ็อกซีเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้แทนโลหะ แต่อย่างไรก็ตามแม่พิมพ์อีพ็อกซีก็มีจุดด้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์โลหะ โดยเฉพาะความสามารถในการทนทานต่ออุณหภูมิสูงและเกรเดียนของอุณหภูมิขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นทำการวิเคราะห์หรือร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของแม่พิมพ์อีพ็อกซีด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และเสนอแนะวิธีการยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์อีพ็อกซี

**คำสำคัญ:** กระบวนการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยา อีพ็อกซี ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### Abstract

Many of components and accessory parts of a car such as front and rear bumpers are produced by reaction injection molding (RIM) process. Recently, nonmetallic materials have been used significantly in mould construction. This is due to the available of new technologies and users' requirements in which to obtain molds as quickly and inexpensively as possible. The epoxies are popular nonmetallic materials for replacing the metals. But the main disadvantage of the epoxy mould comparing with the metal mould is a capability to resist high temperature and/or large temperature gradient. This research aims to analyze the cracks introduced on the surface of epoxy mould by means of the finite element method, and to advise the method for extending life cycle of epoxy mould.

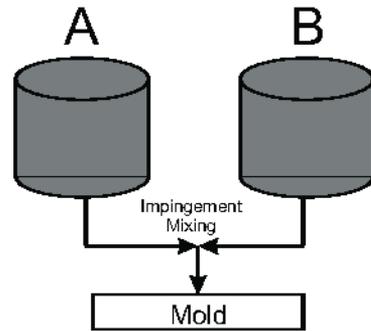
**Keywords:** Reaction Injection Molding Process (RIM), Epoxy, Finite Element Method

- <sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- <sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- \* Corresponding Author, Tel. 0-2913-2500 Ext. 6411, E-mail: sutthisakp@kmutnb.ac.th

## 1. บทนำ

กระบวนการผลิตการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยานั้นเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนพลาสติกที่มีขนาดใหญ่ และมีรูปร่างซับซ้อน [1] กระบวนการผลิตชิ้นงานพลาสติกในกระบวนการการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยานั้น ส่วนใหญ่นั้นเป็นกระบวนการที่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไอโซไซยาเนต (Isocyanate) และพอลิออล (Polyol) ในกระบวนการดังกล่าวนี้อาศัยความดันจากปั๊มไฮดรอลิกส์เพื่อทำการปล่อยสารเคมีเข้าสู่ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยถึง A เป็นที่เก็บสารเคมีไอโซไซยาเนต และถึง B เป็นที่เก็บสารเคมีพอลิออล ซึ่งเมื่อกระบวนการฉีดเริ่มต้นสารเคมีจะถูกปล่อยมาผสมกันบริเวณช่องทางเข้า (Orifice) โดยทั่วไปความดันที่ใช้จะมีอยู่ระหว่าง 1,500 ถึง 3,000 psi โดยความดันดังกล่าวนี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตพลาสติกแบบอื่นอาทิเช่นกระบวนการฉีดโดยทั่วไป (Conventional Injection Moulding) หรือกระบวนการอัดเข้าแบบด้วยความร้อน (Compression Molding) อัตราการปล่อยสารเคมีเข้าสู่แม่พิมพ์จะมีค่าประมาณ 0.1 ถึง 0.15 kg/s กระบวนการผลิตแบบการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยานั้น ใช้หลักการการไหลของของเหลวเพื่อเติมวัสดุให้เต็มแม่พิมพ์ ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องใช้ความดันที่สูงเพื่อไล่หรือกำจัดฟองอากาศเหมือนกับกระบวนการฉีดพลาสติกโดยทั่วไป ดังนั้นวัสดุที่ใช้สร้างแม่พิมพ์ของกระบวนการ การฉีดเข้าแบบปฏิกิริยานั้น จะแตกต่างจากกระบวนการอื่น วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ในกระบวนการการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยานั้น มักจะเป็นวัสดุที่ให้ผิวชั้นงานที่ดีและทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิออลและไอโซไซยาเนต ได้อย่างดี [2], [3]

นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงต้นทุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับจำนวนของชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งวัสดุที่พบทั่วไปในการใช้ผลิตแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิตแบบการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยาได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียมหรืออีพ็อกซี [3] ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปโดยเหล็กและอะลูมิเนียม จะให้ความแข็งแรง



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตแบบ RIM (www.polymer processing.com)



รูปที่ 2 การแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซี

ที่สูงกว่าวัสดุประเภทอีพ็อกซี แต่ราคาจะสูงกว่ามาก ในขณะที่เดียวกันการขึ้นรูปก็จะยากกว่าด้วย แต่ปัญหาที่พบจากการใช้วัสดุประเภทอีพ็อกซินั้นก็คือ ปัญหาการแตกร้าวของแม่พิมพ์ ซึ่งมักจะเกิดจากความเค้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้การผลิตต้องหยุดชะงักเนื่องจากต้องทำการซ่อมแซมแม่พิมพ์ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของแม่พิมพ์อีพ็อกซีในกระบวนการการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยา ได้แก่ แม่พิมพ์ด้านตัวผู้ (Core Side) แม่พิมพ์ด้านตัวเมีย (Cavity Side) เกต (Gate) ทางวิ่ง (Runner) ช่องระบายอากาศ (Air Vent) ในกระบวนการการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยา วัสดุอีพ็อกซีถูกนำมาใช้แทนที่โลหะเพื่อใช้ลดต้นทุนของการผลิตแม่พิมพ์ ซึ่งสมบัติโดยทั่วไป

ของอีพ็อกซีที่มีความแข็งแรงกว่าวัสดุจำพวกพอลิเอสเทอร์ (Polyester) และไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl Ester) อีกทั้งยังมีการต้านทานความร้อนที่ดีกว่า [3] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2] จะเห็นได้ว่านอกจากอีพ็อกซีจะถูกใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิตแบบการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยาแล้วนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการอื่นเช่น กระบวนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อน (Thermoforming) ได้อีกด้วย

## 2. การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัญหาการเสีรูปร่างและการเกิดความเค้นในโครงสร้างของแข็ง อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น เป็นปัญหาที่รวมกันระหว่างปัญหาการถ่ายเทความร้อนและปัญหาความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งปัญหาดังที่กล่าวมานี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์อีพ็อกซีที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบการฉีดเข้าแบบปฏิกิริยาเพราะความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลและไอโซไซยาเนต นั้นรวมกับความดันที่มาจากการฉีดสารเคมีเข้าสู่เบ้าของแม่พิมพ์ด้วยปั๊มไฮดรอลิกส์ ในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์แบบกึ่งสถิตย์ (Quasi-static Analysis) [5], [8] โดยเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนในแม่พิมพ์ จากนั้นจึงนำผลลัพธ์การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้ร่วมกับผลจากความดันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเกิดปฏิกิริยา ไปทำการวิเคราะห์การแตกร้าวของแม่พิมพ์ต่อไป และเนื่องจากข้อจำกัดด้านขีดความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ การวิจัยนี้จะทำการจำลองปัญหาให้อยู่ในรูปแบบสองมิติ และทำการวิเคราะห์ปัญหาในสองมิติเท่านั้น

ปัญหาการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ดังนี้

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = Q \quad (1)$$

โดย  $U$  หมายถึงตัวแปรเชิงอนุพันธ์ ส่วนปริมาณฟลักซ์ความร้อน  $E$  และ  $F$  มีค่าเท่ากับ

$$U = \rho c_p T \quad (2)$$

$$E = q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

$$F = q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4)$$

และ  $Q$  หมายถึงปริมาณแหล่งความร้อน (Heat Source) ปริมาณฟลักซ์ความร้อน  $q_x$  และ  $q_y$  สามารถเขียนในรูปของอุณหภูมิโดยอาศัยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) สมการที่ (1) ข้างต้นสามารถถูกแก้ไขได้โดยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขต ดังต่อไปนี้

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y) \quad (5)$$

$$T_s = T_1(x, y, t) \quad (6)$$

$$q_s = -q \quad (7)$$

การวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอาศัยอัลกอริทึมเทย์เลอร์-กาลเลอร์กิน (Taylor-Galerkin Algorithm) [5]-[7] บนเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม และกำหนดให้การกระจายตัวของอุณหภูมิบนเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเป็นแบบเชิงเส้นมีดังนี้

$$T(x, y, t) = [N(x, y)]\{T(t)\} \quad (8)$$

โดย  $[N(x, y)]$  หมายถึงฟังก์ชันการประมาณภายในแบบเส้นตรง จากนั้นจึงทำการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals) เข้ากับสมการที่ (1) ดังนี้

$$\int_{\Omega} N_i \left( \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} - Q \right) d\Omega = 0 \quad (9)$$

และประยุกต์ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's Theorem) เข้ากับพจน์ที่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ความร้อน เช่น

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\partial E}{\partial x} d\Omega = \int_s N_i E_n d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial x} E d\Omega \quad (10)$$



$$\int_{\Omega} N_i \frac{\partial F}{\partial y} d\Omega = \int_s N_i F n_y d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial y} F d\Omega \quad (11)$$

และประยุกต์การประมาณพจน์เกี่ยวกับเวลาแบบผลต่าง  
สี่เหลี่ยมไปข้างหน้า [6] ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{\partial U^n}{\partial t} = \frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} \quad (12)$$

และเมื่อทำการแทนที่สมการที่ (10) ถึง (12) ลงใน  
สมการที่ (9) จะได้

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\Delta U}{\Delta t} d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial x} E d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial y} F d\Omega \quad (13)$$

$$- \int_s N_i E n_x d\Gamma - \int_s N_i F n_y d\Gamma + \int_{\Omega} N_i Q d\Omega$$

จากนั้นจึงทำการแปลงสมการที่ (13) ให้อยู่ในรูปแบบ  
ของระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมมติให้การ  
กระจายตัวของ  $\Delta U$  ปริมาณฟลักซ์ความร้อน  $E$  และ  $F$   
อยู่ในรูปเชิงเส้นดังนี้

$$\Delta U = [N] \{ \Delta U \} \quad (14)$$

$$E = [\bar{N}] \{ E^n \} \quad (15)$$

$$F = [\bar{N}] \{ F^n \} \quad (16)$$

โดยที่

$$\{ E^n \} = \left\{ \begin{array}{l} -k \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right] \{ T^n \}_1 \\ -k \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right] \{ T^n \}_2 \\ -k \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right] \{ T^n \}_3 \end{array} \right\} \quad (17)$$

$$\{ F^n \} = \left\{ \begin{array}{l} -k \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right] \{ T^n \}_1 \\ -k \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right] \{ T^n \}_2 \\ -k \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right] \{ T^n \}_3 \end{array} \right\} \quad (18)$$

สุดท้ายก็จะได้ระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถ  
นำไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ ดังนี้

$$[M] \{ \Delta U \}^{n+1} = \Delta t \left( [D_x] \{ E \}^n + [D_y] \{ F \}^n \right) \quad (19)$$

$$+ \{ R \}^n + \{ B \}^n$$

โดยที่

$$[M] = \int_A \{ N \} [N] dA \quad (20)$$

$$[D_x] = \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} [\bar{N}] dA \quad (21)$$

$$[D_y] = \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} [\bar{N}] dA \quad (22)$$

$$\{ R \} = \int_A \{ N \} Q dA \quad (23)$$

$$\{ B \} = \int_s \{ N \} [\bar{N}] dA \{ q \} \quad (24)$$

สำหรับปัญหาการเกิดความเค้นในโครงสร้างของแข็งอัน  
เนื่องมาจากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จะถูกควบคุม  
ด้วยสมการสมดุล (Equilibrium Equation) [4], [8] ดังนี้

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = 0 \quad (25)$$

โดยพจน์ที่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ของแรงทั้งสอง หมายถึง

$$E_s = [\sigma_x \quad \tau_{xy}]^T \quad (26)$$

$$F_s = [\tau_{xy} \quad \sigma_y]^T \quad (27)$$

และองค์ประกอบของความเค้นสามารถเขียนในรูปแบบ  
ดังนี้

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}] = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (28)$$

โดยที่

$$\sigma_1 = C \varepsilon \quad (29)$$

$$\sigma_2 = C\bar{\alpha}(T(x,y) - T_0) \quad (30)$$

และ  $C$  หมายถึงเมตริกซ์ของความยืดหยุ่นของวัสดุ  $\epsilon$  หมายถึงเวกเตอร์ของความเครียด (Strain Vectors)  $\bar{\alpha}$  หมายถึงเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion Coefficients) และเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ห่อหุ้มมีข้างต้น กำหนดให้การกระจายตัวของระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกน  $x$  และ  $y$  บนเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมเป็นแบบเชิงเส้นดังนี้

$$u(x,y) = [N] \{u\} \quad (31)$$

$$v(x,y) = [N] \{v\} \quad (32)$$

จากนั้นจึงทำการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างเข้ากับสมการที่ (25) ดังนี้

$$\int_{\Omega} N_i \left( \frac{\partial E_s}{\partial x} + \frac{\partial F_s}{\partial y} \right) d\Omega = 0 \quad (33)$$

และประยุกต์ทฤษฎีบทของเกาส์เข้ากับพจน์ที่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ของแรง เช่น

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\partial E_s}{\partial x} d\Omega = \int_s N_i E_s n_x d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial x} E_s d\Omega \quad (34)$$

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\partial F_s}{\partial y} d\Omega = \int_s N_i F_s n_y d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial y} F_s d\Omega \quad (35)$$

และเมื่อทำการแทนที่สมการที่ (34) และ (35) ลงในสมการที่ (33) ซึ่งจะได้ว่า

$$\int_{\Omega} B_s^T (\sigma_1 - \sigma_2) d\Omega = \int_s N^T T_s d\Gamma \quad (36)$$

จากนั้นจึงทำการแปลงสมการที่ (36) ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมมติให้การกระจายตัวของความเค้นและแรงกระทำที่ขอบของโดเมนอยู่ในรูปเชิงเส้นดังนี้

$$\sigma_1 = [N_1] \{\bar{\sigma}_1\} \quad (37)$$

$$\sigma_2 = [N_2] \{\bar{\sigma}_2\} \quad (38)$$

$$T_s = [N] \{\bar{T}_s\} \quad (39)$$

โดยที่

$$N_1 = \begin{bmatrix} \bar{N}^T & \bar{\theta}^T & \bar{\theta}^T \\ \bar{\theta}^T & \bar{N}^T & \bar{\theta}^T \\ \bar{\theta}^T & \bar{\theta}^T & \bar{N}^T \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} \bar{N}^T & \theta^T \\ \theta^T & \bar{N}^T \\ \bar{\theta}^T & \bar{\theta}^T \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\bar{N}^T = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \quad (42)$$

ส่วนค่าความเค้นที่จุดต่อสามารถเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\bar{\sigma}_1 = \begin{Bmatrix} \{\bar{\sigma}_{1x}\}_{i=1,2,3} \\ \{\bar{\sigma}_{1y}\}_{i=1,2,3} \\ \{\bar{\sigma}_{1xy}\}_{i=1,2,3} \end{Bmatrix} \quad (43)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \begin{Bmatrix} \{\bar{\sigma}_{2x}\}_{i=1,2,3} \\ \{\bar{\sigma}_{2y}\}_{i=1,2,3} \end{Bmatrix} \quad (44)$$

สุดท้ายก็จะได้ระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ ดังนี้

$$D_1 \bar{\sigma}_1 - D_2 \bar{\sigma}_2 = D_s \bar{T}_s \quad (45)$$

โดยที่

$$D_1 = \int_A B_s^T N_1 dA \quad (46)$$

$$D_2 = \int_A B_s^T N_2 dA \quad (47)$$

$$D_s = \int_s N^T \bar{N} d\Gamma \quad (48)$$

### 3. การวิเคราะห์การแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซี

จากลักษณะการแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซีที่นำมาทดสอบ จะเห็นได้ว่าฟิงเกอร์รอยแตกบนผิว (Crazing)

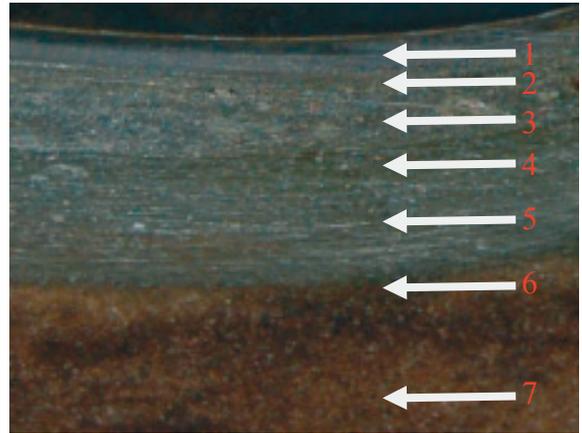


รูปที่ 3 ตัวอย่างการแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซีในบริเวณต่างๆ

กระจายทั่วทั้งหน้าของแม่พิมพ์ทั้งในส่วนผิวราบและผิวโค้งดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งรอยแตกบนผิวนี้เกิดจากความเค้นเนื่องจากความร้อนและความดัน โดยสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างนั้นใช้ความดันประมาณ 3000 psi (200 bar) อุณหภูมิของวัสดุเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วนั้นประมาณ 130-140 °C อัตราการปล่อยสารเคมีเข้าสู่เป่าพิมพ์ประมาณ 1.2 kg/s ซึ่งการจะวิเคราะห์รอยแตกในด้านแนวลึกของแม่พิมพ์นั้น จะต้องทำการผ่าพิสูจน์แม่พิมพ์เพื่อดูว่ารอยแตกนั้นลึกไปถึงที่อีพ็อกซีชั้นไหนเมื่อทำการผ่าแม่พิมพ์อีพ็อกซีด้วยเครื่องเลื่อยแบบสายพาน (Band saw) แล้ว จะเห็นได้ว่าลักษณะรอยแตกของแม่พิมพ์นั้นจะแตกลึกลงไปถึงชั้นที่ 3 และ 4 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งอีพ็อกซีในชั้นที่ 1 ถึง 4 นั้นจะเป็นอีพ็อกซีที่ไม่มีส่วนผสมของไฟเบอร์ตัด (Chopped Fiber) หรือไฟเบอร์แผ่น ซึ่งจำนวนชั้นทั้งหมดของแม่พิมพ์อีพ็อกซีที่ทำการวิเคราะห์นั้นจะมีทั้งหมด 7 ชั้น

จากการศึกษาลักษณะการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากการผ่าพิสูจน์แม่พิมพ์นั้นจะเห็นได้ว่าความเสียหายจากการแตกหักนั้นเป็นประเภทความเสียหายจากการแตกหักแบบเปราะ (Brittle) จึงได้ทำการตั้งสมมติฐานถึงสาเหตุของปัญหาการแตกร้าวดังกล่าวเอาไว้ 3 สาเหตุด้วยกัน ดังนี้

1. การเลือกใช้วัสดุอีพ็อกซีในแต่ละชั้นไม่เหมาะสม โดยพิจารณาถึงค่าสมบัติต่างๆ ทั้งในส่วนของสมบัติทาง



รูปที่ 4 อีพ็อกซีชั้นที่ 1 ถึง 7

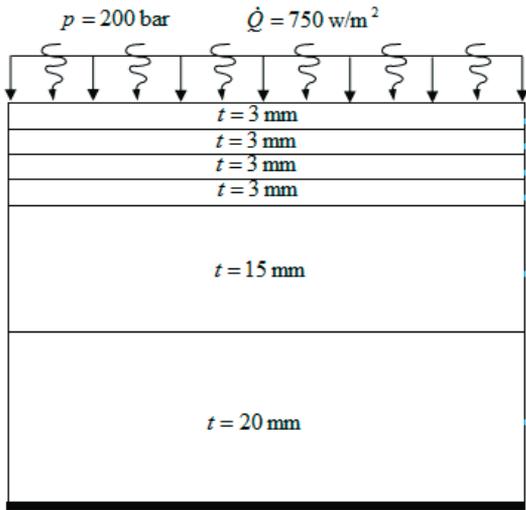


รูปที่ 5 ลักษณะการแตกร้าวของอีพ็อกซีชั้นที่ 1 ถึง 4

ความร้อน และค่าความแข็งแรงของวัสดุ

2. การออกแบบระบบให้ความร้อนที่ไม่ดีพอ ขนาดของท่อทองแดงที่ใช้ และตำแหน่งของการวางท่อไม่เหมาะสม

3. ปัญหาการเปลี่ยนรูประหว่างชั้นของแม่พิมพ์อีพ็อกซี อันเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในหัวข้อนี้ เป็นการวิเคราะห์ในสองมิติเท่านั้น เนื่องจากการสร้างแบบจำลองในสามมิติของแม่พิมพ์ซึ่งประกอบด้วยวัสดุหลายๆ ชั้นที่มีอัตราส่วนของความหนาต่อความยาวในมิติอื่นๆ น้อยมาก (ประมาณ 1/1500) จึงมีความจำเป็นต้องสร้างเอลิเมนต์ขนาดเล็กจำนวนมากสำหรับใน



รูปที่ 6 รูปแบบการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่ 1

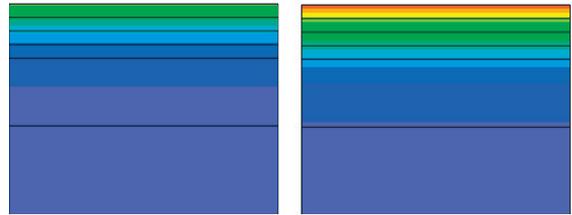
แต่ละชั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นที่ 1 ถึง 5 ซึ่งส่งผลให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ในศูนย์วิจัยไม่สามารถคำนวณแบบจำลอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ปัญหาในสองมิติโดยผลลัพธ์ที่ได้ก็มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริง

#### 4. ผลการทดลอง

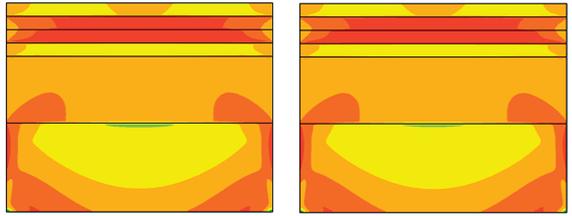
##### แบบจำลองที่ 1

แบบจำลองที่ 1 เป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วย 6 ชั้น โดยได้ทำการตัดชั้นที่ 7 ซึ่งเป็นชั้นของทรายอัดออกไป ซึ่งรูปแบบของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ได้ถูกแสดงดังในรูปที่ 6 และกำหนดให้ขนาดของความดันสูงสุดเท่ากับ 200 bar (ประมาณ 3,000 psi) และปริมาณฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ  $750 \text{ W/m}^2$  กระทำลงบนผิวด้านบนของชั้นที่ 1 ของแม่พิมพ์ ขอบซ้ายและขอบขวาของโดเมนเพื่อการคำนวณกำหนดให้มีเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์ (Neumann Boundary Condition)

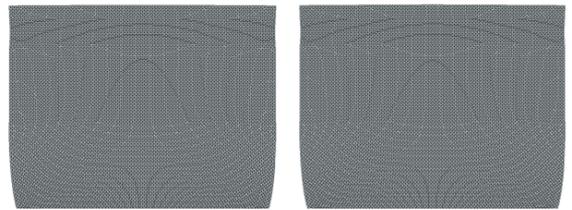
ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่เวลาเท่ากับ 1 และ 2 นาที สำหรับอุณหภูมิ ความเค้นสูงสุด และการเสียรูปของแม่พิมพ์ได้ถูกแสดงในรูปที่ 7 ถึง 9 ตามลำดับ โดยค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30 ถึง  $46^\circ\text{C}$  และค่า



รูปที่ 7 การกระจายตัวของอุณหภูมิของแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 8 ความเค้นสูงสุดของแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 9 การเสียรูปของแบบจำลองที่ 1

ความเค้นสูงสุดอยู่ในช่วงตั้งแต่ -190 ถึง  $41 \text{ MPa}$  จากรูปทั้งสองสามารถอธิบายพฤติกรรมการแตกร้าวของอีพ็อกซีได้ว่า น่าจะเกิดการความต่างของระยะเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 เมื่อเทียบกับชั้นที่ 1 และ 4 ตามลำดับ เนื่องจากค่าความเค้นสูงสุด (ดึง) เกิดขึ้นในสองชั้นดังกล่าว ซึ่งสอดคล้องกับค่าสมบัติของอีพ็อกซีโดยเมื่อพิจารณาถึงค่าสมบัติของอีพ็อกซี (ไม่ได้แสดงค่าสมบัติของอีพ็อกซีในบทความนี้) เช่น ค่าการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermal Expansion) และค่าความเค้นดึง (Tensile Stress) พบว่าอีพ็อกซีชั้นที่ 1 มีค่าการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและค่าความเค้นดึงสูงกว่าอีพ็อกซีชั้นที่ 2 ประมาณ 2 เท่า ส่วนอีพ็อกซีชั้นที่ 2 และ 3 จะมีค่าทั้งสองที่ใกล้เคียงกัน และอีพ็อกซีชั้นที่ 4 จะมีค่าการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนใกล้เคียงกับชั้นที่ 2 แต่ค่าความเค้นดึงใกล้เคียงกับชั้นที่ 1

จึงส่งผลให้อัตราการขยายตัวของอีพ็อกซีระหว่างชั้นที่ 1 ถึง 4 มีความแตกต่างกัน ประกอบกับความดันสูงที่เกิดขึ้นในขณะใช้งาน จึงส่งผลให้เกิดรอยแตกระหว่างชั้นได้รอยแตกกว้างกระจายตัวไปยังชั้นใกล้เคียง

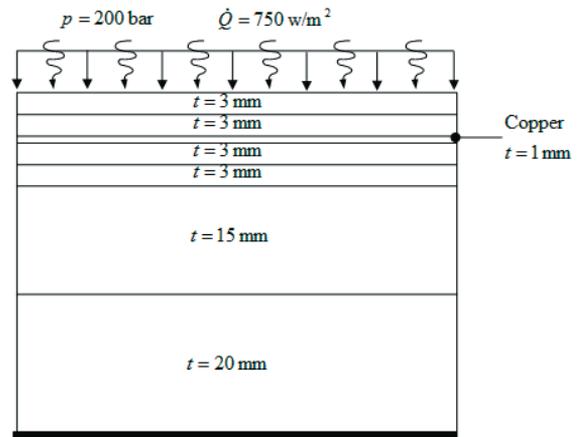
### แบบจำลองที่ 2

แบบจำลองที่ 2 เป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วย 6 ชั้น เช่นเดียวกับแบบจำลองที่ 1 แต่จะใส่แผ่นทองแดงซึ่งมีขนาดความหนา 1 มม. ระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยแผ่นทองแดงจะถูกต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าเพื่อทำหน้าที่ให้ความร้อนระหว่างชั้นทั้งสอง

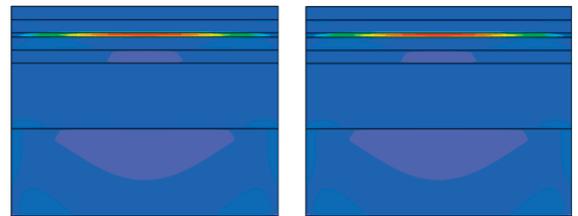
กำหนดให้ปริมาณความร้อนเท่ากับ  $25,000 \text{ W/m}^2$  ทั้งนี้เพื่อเพิ่มระยะเวลาการเคลื่อนตัวของชั้นทั้งสองโดยหวังว่าวิธีดังกล่าวจะสามารถลดความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในชั้นทั้งสองได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองที่ 2 ในรูปที่ 11 และ 12 พบว่าการใส่แผ่นทองแดงและให้ความร้อนจะช่วยให้ชั้นที่ 2 และ 3 สามารถเคลื่อนตัวได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ความเค้นสูงสุดไม่เกิดในชั้นดังกล่าว โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความเค้นสูงสุดในกรณีในช่วงตั้งแต่  $-90$  ถึง  $432 \text{ MPa}$  ซึ่งจะเห็นว่าการให้ความร้อนระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 สามารถลดความเค้นสูงสุด (กด) ลงมาถึง 52% แต่กลับทำให้ความเค้นสูงสุด (ดึง) เพิ่มขึ้นสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 1 จึงทำให้เห็นว่าแบบจำลองที่ 2 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ เพราะอีพ็อกซีเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับแรงกด

### แบบจำลองที่ 3

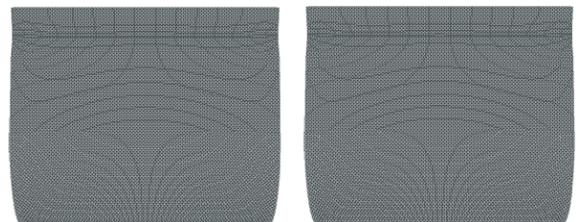
แบบจำลองที่ 3 เป็นแบบจำลองที่เหมือนกับแบบจำลองที่ 1 แต่อีพ็อกซีในชั้นที่ 2 จะถูกแทนที่ด้วยอีพ็อกซีชนิดที่ใช้ในชั้นที่ 1 (ชั้นที่ 1 และ 2 ใช้อีพ็อกซีชนิดเดียวกับชั้นที่ 1) ผลลัพธ์ที่ได้จากรูปที่ 13 และ 14 สามารถยืนยันสมมติฐานที่ว่า การที่ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอีพ็อกซีชั้นที่ 2 และ 3 มีค่าน้อยกว่าของชั้นที่ 1 ผลต่างของการเคลื่อนตัวในแนวแกน x ที่เกิดขึ้นอาจจะส่งผลให้รอยแตกกว้างจะขยายตัวไปตาม



รูปที่ 10 รูปแบบการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่ 2



รูปที่ 11 ความเค้นสูงสุดของแบบจำลองที่ 2

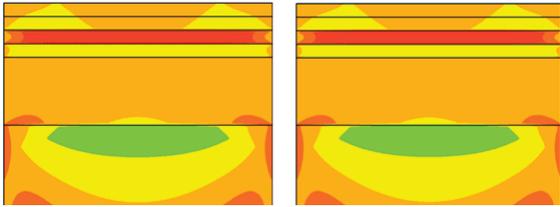


รูปที่ 12 การเสียรูปของแบบจำลองที่ 2

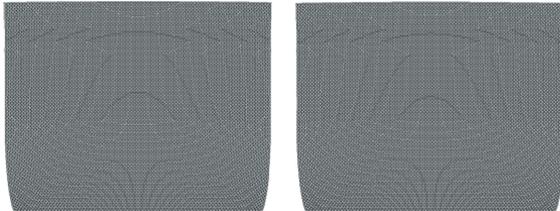
แนวระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความเค้นสูงสุดในกรณีนี้อยู่ในช่วงตั้งแต่  $-220$  ถึง  $49 \text{ MPa}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 1 ดังนั้น แนวคิดของแบบจำลองที่ 3 จึงไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาการแตกกว้างได้

### แบบจำลองที่ 4

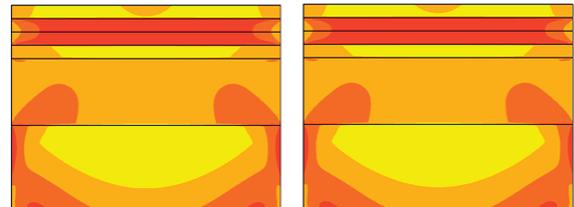
แบบจำลองที่ 4 เป็นแบบจำลองที่เหมือนกับแบบจำลองที่ 1 แต่อีพ็อกซีในชั้นที่ 2 จะถูกแทนที่ด้วยอีพ็อกซี



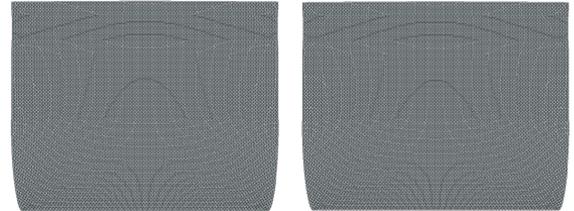
รูปที่ 13 ความเค้นสูงสุดของแบบจำลองที่ 3



รูปที่ 14 การเสียรูปของแบบจำลองที่ 3

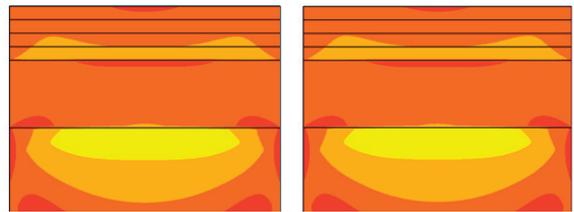


รูปที่ 15 ความเค้นสูงสุดของแบบจำลองที่ 4

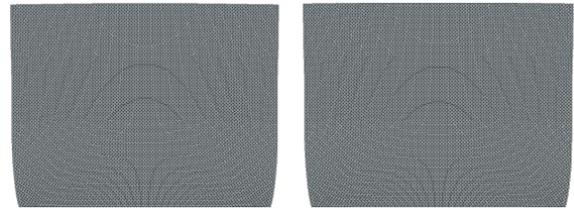


รูปที่ 16 การเสียรูปของแบบจำลองที่ 4

ชนิดที่ใช้ในชั้นที่ 3 (ชั้นที่ 2 และ 3 ใช้อิพ็อกซีชนิดเดียวกับชั้นที่ 3) จากรูปที่ 15 และ 16 จะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่ 3 ข้างต้น โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความเค้นสูงสุดในกรณีนี้อยู่ในช่วงตั้งแต่ -220 ถึง 39 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 1 และ 3 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้น แนวคิดของแบบจำลองที่ 4 จึงไม่สามารถที่จะแก้ปัญหาการแตกร้าวได้เช่นเดียวกับแบบจำลองที่ 3



รูปที่ 17 ความเค้นสูงสุดของแบบจำลองที่ 5



รูปที่ 18 การเสียรูปของแบบจำลองที่ 5

#### แบบจำลองที่ 5

แบบจำลองที่ 5 เป็นแบบจำลองสุดท้ายที่ทำการวิเคราะห์ โดยมีความเหมือนกับแบบจำลองที่ 1 แต่อิพ็อกซีในชั้นที่ 2 จะถูกแทนที่ด้วยอิพ็อกซีชนิดที่ใช้ในชั้นที่ 1 (ชั้นที่ 1 และ 2 ใช้อิพ็อกซีชนิดเดียวกับชั้นที่ 1) และอิพ็อกซีในชั้นที่ 3 จะถูกแทนที่ด้วยอิพ็อกซีชนิดที่ใช้ในชั้นที่ 4 (ชั้นที่ 3 และ 4 ใช้อิพ็อกซีชนิดเดียวกับชั้นที่ 4) ผลลัพธ์ที่ได้จากรูปที่ 13 และ 14 พบว่าแบบจำลองที่ 5 น่าจะเป็นแบบจำลองสำหรับการแก้ปัญหาการแตกร้าวที่ดีที่สุดจากการศึกษานี้ เพราะสามารถทำให้ความเค้นสูงสุด (ดึง) ที่มีค่ามากที่สุดจาก

ที่เคยเกิดขึ้นในชั้นที่ 2 และ 3 ลดลงอย่างมาก และการเสียรูปของแม่พิมพ์ที่มีลักษณะการเสียรูปค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งทำให้เห็นว่าความต่างของการเคลื่อนตัวในแนวแกน x ระหว่างชั้นที่ 1 ถึง 4 มีค่าน้อยมาก และทำให้แม่พิมพ์สามารถทนทานต่อการใช้งานได้ดีที่สุด โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณพบว่าค่าความเค้นสูงสุดในกรณีนี้ช่วงตั้งแต่ -170 ถึง 29 MPa ซึ่งมีน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทุกแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 1 พบว่าแบบจำลองที่ 5



รูปที่ 19 การสร้างแม่พิมพ์อีพ็อกซีตามแบบจำลองที่ 5



รูปที่ 20 ชิ้นงานกันชนรถยนต์

สามารถลดค่าความเค้นสูงสุด (กต) ได้ประมาณ 10% และลดค่าความเค้นสูงสุด (ตึง) ได้ประมาณ 30% ซึ่งการที่สามารถลดค่าความเค้นสูงสุด (ตึง) จะมีส่วนทำให้ความแข็งแรงของแม่พิมพ์สูงขึ้น เนื่องจากอีพ็อกซีมีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับแรงกด ดังนั้นแนวคิดของแบบจำลองที่ 5 จึงควรที่จะใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของแม่พิมพ์ เพื่อช่วยลดปัญหาการแตกร้าวดังที่ปรากฏในปัจจุบัน

จากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ข้างต้น จึงได้นำหลักการของแบบจำลองที่ 5 ไปใช้ในการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์อีพ็อกซีสำหรับผลิตชิ้นงานกันชนของรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ โดยหวังว่าแม่พิมพ์อีพ็อกซีที่ได้จะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นจากเดิม และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการผลิตชิ้นงานในโรงงาน พบว่าก่อนการปรับปรุงสามารถผลิตชิ้นงานได้ประมาณ 50 ชิ้น หลังจากนั้นแม่พิมพ์ก็เริ่มที่จะแตกร้าว ส่วนภายหลังการปรับปรุงตามแบบจำลองที่ 5 พบว่าสามารถผลิตชิ้นงานได้

ประมาณ 150 ชิ้น แม่พิมพ์จึงเริ่มเกิดการแตกร้าวขึ้นมา ซึ่งจะเห็นว่าอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแนวทางการออกแบบตามแบบจำลองที่ 5 และผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องผลการทดลองที่ได้จากการนำไปใช้งานจริงในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนกันชนของรถยนต์ และสามารถที่จะบรรเทาปัญหาเกิดการแตกร้าวของแม่พิมพ์ได้จริง

#### 4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัญหาการแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซีอันเนื่องจากผลของความต่างของอุณหภูมิและแรงกดขนาดสูง โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ผลของการเสียรูปของของแข็งอันเนื่องจากผลของอุณหภูมิและแรงกระทำ (Thermal Stress Analysis) พบว่าการเกิดความเค้นสูงสุดในชั้นที่ 2 และ 3 อันเนื่องมาจากแรงกระทำและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่แม่พิมพ์ในขณะที่ทำงาน ส่งผลให้เกิดการขยายและเคลื่อนตัวของวัสดุและเกิดการแตกร้าวตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึง 4 ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ใช้วิธีจำลองด้วยเงื่อนไขของการเปลี่ยนชนิดของวัสดุในแต่ละชั้นของแม่พิมพ์อีพ็อกซี พบว่าแบบจำลองที่ 5 สามารถช่วยลดปัญหาการแตกร้าวดังกล่าวได้เนื่องจากการแทนที่อีพ็อกซีในชั้นที่ 2 ด้วยอีพ็อกซีชนิดเดียวกับชั้นที่ 1 และแทนที่อีพ็อกซีในชั้นที่ 3 ด้วยอีพ็อกซีชนิดเดียวกับชั้นที่ 4 ทำให้ลดค่าความแตกต่างของค่าสมบัติต่างๆ ของอีพ็อกซีในแต่ละชั้นได้และสามารถช่วยให้แม่พิมพ์อีพ็อกซีมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ 1 พบว่า แบบจำลองที่ 5 สามารถลดค่าความเค้นสูงสุด (กต) ได้ประมาณ 10% และลดค่าความเค้นสูงสุด (ตึง) ได้ประมาณ 30% ซึ่งการที่สามารถลดค่าความเค้นสูงสุด (ตึง) จะมีส่วนทำให้ความแข็งแรงของแม่พิมพ์สูงขึ้น เนื่องจากอีพ็อกซีมีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับแรงกด และจากการนำไปใช้ในการสร้างแม่พิมพ์เพื่อใช้งานจริง พบว่าอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า



## เอกสารอ้างอิง

- [1] C.D. Snyder, *Materials for Reaction Injection Molding (RIM) Processing*, Technical Marketing Specialist, Specialty RIM Business, Bayer, Pittsburg, 2001.
- [2] W.E. Becker, *Reaction Injection Molding*, van Nostrand-Reinhold, New York, 1979.
- [3] A. Mateus, P.J. Bartolo and G. Mitchell, *The Effect of Thermal Conductivity of RIM Mould in Kinetic Cure*, Polytechnic Institute of Leiria, Portugal, 2003.
- [4] G.A.A.V. Haagh, G.W.M. Peters and E.H.E. Meijer, "Reaction Injection Molding: Analyzing the Filling Stage of a Complex Product with a Highly Viscous Thermoset," *Polymer Engineering and Science*, vol. 36, no. 20, pp. 2579-2588, 2006.
- [5] S. Phongthanapanich and P. Dechaumphai, "Adaptive Nodeless Variable Finite Elements with Flux-based Formulation for Thermal-Structural Analysis," *Acta Mechanica Sinica*, vol. 24, pp. 181-188, 2008.
- [6] S. Phongthanapanich and P. Dechaumphai, "Heat Transfer Analyses by Means of Flux-based Formulation and Mesh Adaptation," *Engineering Journal of Siam University*, vol. 12, pp. 1-8, 2006.
- [7] S. Phongthanapanich, S. Traivivatana, P. Boonmaruth and P. Dechaumphai, "Nodeless Variable Finite Element Method for Heat Transfer Analysis by Means of Flux-based Formulation and Mesh Adaptation," *Acta Mechanica Sinica*, vol. 22, pp. 138-147, 2006.
- [8] S. Phongthanapanich and P. Dechaumphai, "Adaptive Finite Element Method for Heat Transfer Analysis by Means of Linear Flux-based Formulation," *The Journal of KMUTNB*, vol. 19, no. 3, pp. 306-314, 2009.
- [9] S. Phongthanapanich and P. Dechaumphai, "Nodeless Variable Finite Element Method for Stress Analysis using Flux-based Formulation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 22, no. 4, pp. 639-646, 2008.