

การศึกษาปัญหาการแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซีในกระบวนการ RIM ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

(A Study of Crack Problem of Epoxy Mold in RIM Process by Finite Element Method)

สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช*, มนัส เหมบุญกิจ, สถาพร ชาทาคม

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

* E-mail: sutthisakp@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ชิ้นส่วนของประกอบและชิ้นส่วนเพิ่มเติมของรถยนต์ เช่น กันชนหน้าและหลังของรถยนต์ ได้ถูกผลิตโดยวิธี Reaction injection molding process (กระบวนการ RIM) ในปัจจุบันวัสดุที่ไม่ใช่เหล็กได้ถูกนำมาใช้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญในกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ เนื่องจากผลของการเกิดเทคโนโลยีใหม่และความต้องการของผู้ใช้ที่ต้องการได้แม่พิมพ์ในระยะเวลาอันสั้นและราคาไม่แพงมากนัก อีพ็อกซีเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้แทนโลหะ แต่อย่างไรก็ตามแม่พิมพ์อีพ็อกซีก็มีจุดด้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแม่พิมพ์โลหะ โดยเฉพาะความสามารถในการทนทานต่ออุณหภูมิสูงและเกรเดียนของอุณหภูมิขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นทำการวิเคราะห์รอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของแม่พิมพ์อีพ็อกซีด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ เสนอแนะวิธีการยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์อีพ็อกซี

คำสำคัญ: กระบวนการ Reaction Injection Molding (RIM),

อีพ็อกซี, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

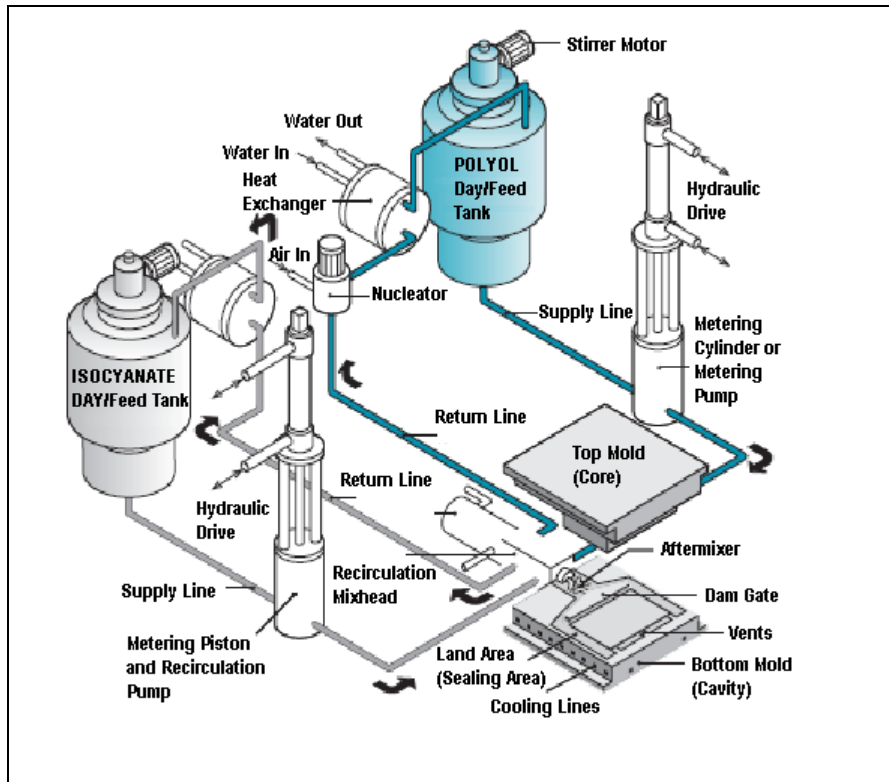
Many of component and accessory parts of car such as front and rear bumpers are produced by reaction injection molding (RIM process). Recently, nonmetallic materials have been growing significantly in mould construction. This is due to the available of new technologies and users' requirements in which 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 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

1. บทนำ

กระบวนการผลิต Reaction Injection Molding (RIM) นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับผลิตชิ้นส่วนพลาสติกที่มีขนาดใหญ่และมีรูปร่างซับซ้อน [1] กระบวนการผลิตชิ้นงานพลาสติกในกระบวนการ RIM นั้นเป็นกระบวนการที่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง Isocyanate และ Polyol ในกระบวนการดังกล่าวนี้ อาศัยแรงดันจากปั๊มไฮดรอลิคเพื่อทำการปล่อยสารเคมีเข้าสู่ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดย Tank A เป็นที่เก็บสารเคมี Isocyanate และ Tank B เป็นที่เก็บสารเคมี Polyol ซึ่งเมื่อกระบวนการฉีดเริ่มต้นสารเคมีจะถูกปล่อยมาผสมกันบริเวณทางเข้า (Orifice) โดยทั่วไปแรงดันที่ใช้จะมีอยู่ระหว่าง 1,500 ถึง 3,000 psi โดยแรงดันดังกล่าวนี้ถือว่าน้อย

มากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตพลาสติกแบบอื่น อาทิเช่น Injection process หรือ Compression molding อัตราการปล่อยสารเคมีเข้าสู่แม่พิมพ์จะมีค่าประมาณ 0.1 ถึง 0.15 kg/s กระบวนการผลิตแบบ RIM นั้นใช้หลักการการไหลของของเหลวเพื่อเติมวัสดุให้เต็มแม่พิมพ์ ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องใช้แรงดันที่สูงเพื่อไล่หรือกำจัดฟองอากาศ เหมือนกับกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection process) ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ของกระบวนการ RIM นั้นจะแตกต่างจากการผลิตชิ้นงานพลาสติกในกระบวนการอื่น เช่น กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding) วัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ในกระบวนการ RIM นั้นมักจะเป็นวัสดุที่ให้ฉนวนกันความร้อนและทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Polyol และ Isocyanate ได้อย่างดี [2,3]



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตแบบ RIM

นอกจากนั้นยังต้องคำนึงถึงต้นทุนของแม่พิมพ์เปรียบเทียบกับจำนวนของชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งวัสดุที่พบทั่วไปในการใช้ผลิตแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิตแบบ RIM ได้แก่ เหล็ก, อลูมิเนียมหรือ อีพ็อกซี ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไปโดยเหล็กและอลูมิเนียม จะให้ความแข็งแรงที่สูงกว่าวัสดุประเภทอีพ็อกซี แต่ราคาจะสูงกว่ามาก ในขณะที่ขบวนการขึ้นรูปก็จะมียากกว่าด้วย แต่ปัญหาที่พบจากการใช้วัสดุ ประเภทอีพ็อกซี นั้นก็คือ ปัญหาการแตกร้าวของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้การผลิตต้องหยุดชะงักเนื่องจากต้องทำการซ่อมแซมแม่พิมพ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาการเสียรูปและการเกิดความเค้นในแม่พิมพ์อีพ็อกซี อันเนื่องมาจากความดันและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

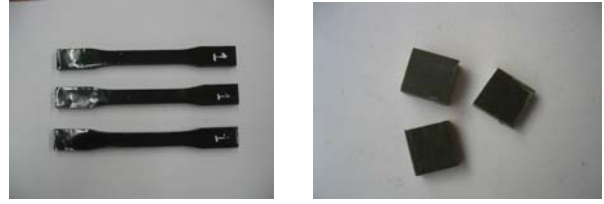
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการวิเคราะห์ปัญหาแบบกึ่งสถิตย์ (quasi-static analysis) [4] ในสองมิติ โดยเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ จากนั้นจึงนำผลลัพธ์การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้ร่วมกับผลของความดันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแข็งตัว ไปทำการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นและการเสียรูปของแม่พิมพ์ต่อไป



รูปที่ 2 การแตกตัวของแม่พิมพ์โฟมที่

2. การทดสอบสมบัติต่างๆ ของอีพ็อกซี

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของอีพ็อกซีที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ในกระบวนการ RIM ในกระบวนการผลิตแบบ RIM นั้นหลังจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง Polyol และ Isocyanate นั้น สิ่งที่เกิดขึ้นคือความร้อนประมาณ 120-150 °C นอกจากนั้นแรงดันที่เกิดจากกระบวนการฉีดสารเคมีเข้าสู่แม่พิมพ์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการแตกตัวของแม่พิมพ์ ซึ่งชิ้นงานที่ถูกยกมาทำการวิจัยในครั้งนี้ได้แก่ ชิ้นงานกันชนของรถยนต์นั้น ใช้แรงดันประมาณ 200 bar (3,000 psi) เพื่อปล่อยสารเคมีจนกระทั่งเต็มแม่พิมพ์เนื่องจากลักษณะของการขึ้นรูปแม่พิมพ์ในกระบวนการ RIM นั้นจะมีการประกอบไปด้วยอีพ็อกซีจำนวนหลายชั้นและในแต่ละชั้นจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันออกไป การทดสอบสมบัติต่างๆ จึงต้องทำการหล่อแบบสำหรับการทดลอง (Specimen) แยกตามแต่ละชั้นไป โดยใช้อัตราส่วนที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตัวอย่าง Specimen

Epoxy layer	Thermal capacity, C_p (J/g·°C)
1	1.49
2	1.48
3	1.55
4	1.37
5	1.00
6	1.07
7	0.80

ตารางที่ 1 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอีพ็อกซีชั้นที่ 1 ถึง 7

Epoxy layer	Thermal expansion ($10^{-6}/K$)
1	166.48
2	96.39
3	103.65
4	175.89
5	144.43
6	201.11
7	40.65

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของอีพ็อกซีชั้นที่ 1 ถึง 7

Epoxy layer	Thermal conductivity (W/m•K)
1	1.20
2	1.28
3	1.27
4	0.98
5	0.96
6	1.35
7	1.86

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอีพ็อกซี
ชั้นที่ 1 ถึง 7

จากผลการทดลองคุณสมบัติต่าง ๆ ของอีพ็อกซีที่ใช้ในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ ดังแสดงในตารางที่ 1 ถึง 3 นั้น จะเห็นได้ว่าค่าต่าง ๆ ที่วัดได้ทั้งในส่วนของสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) และค่าความเค้นของวัสดุ (Tensile stress) ดังแสดงในตารางที่ 4 นั้น อีพ็อกซีในชั้นที่ 1-3 ซึ่งเป็นชั้นที่เกิดการแตกร้าวมากที่สุด จะมีค่าคุณสมบัติที่แตกต่างกันมากทั้งในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) ความเค้นดึง (Tensile stress) โดยเมื่อพิจารณาถึงสมบัติของค่าความเค้นดึง เมื่อแม่พิมพ์ได้รับความร้อนและแรงดันจากการฉีดแล้ว ชั้นที่มีโอกาสที่จะแตกร้าวเป็นอันดับแรกจะเป็นชั้นที่ 3 เนื่องจากค่า Extension at break และ ค่า Elongation ที่ต่ำกว่า Epoxy ในชั้นที่ 1 และ 2

Epoxy layer	Yield stress (MPa)	Extension at break (mm)	Elongation (%)
1	22.89	1.60	2.61
2	11.51	1.55	2.59
3	10.69	1.34	2.15
4	11.23	1.90	3.12
5-7	-	-	-

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอีพ็อกซี
ชั้นที่ 1 ถึง 4

3. สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

ปัญหาการเสียรูปและการเกิดความเค้นในโครงสร้างของของแข็ง อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น เป็นปัญหาที่รวมกันระหว่างปัญหาการถ่ายเทความร้อนและปัญหาความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งปัญหาดังที่กล่าวมานี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์อีพ็อกซีที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM เพราะความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Polyol และ Isocyanate นั้นรวมกับแรงดันที่มาจากการฉีดสารเคมีเข้าสู่เบ้าของแม่พิมพ์ด้วยปั๊มไฮดรอลิกส้นนั้น ทำให้เกิดการเสียรูปเนื่องจากปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้น ในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษารูปแบบของปัญหาที่สถิตย์ (quasi-static analysis) [4] โดยเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ จากนั้นจึงนำผลลัพธ์การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้ร่วมกับผลของความดันที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแข็งตัว ไปทำการวิเคราะห์การเสียรูปของแม่พิมพ์ต่อไป และเนื่องจากข้อจำกัดด้านขีดความสามารถของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ การวิจัยนี้จะทำการจำลองปัญหาให้อยู่ใน

รูปแบบสองมิติ และทำการวิเคราะห์ปัญหาในสองมิติ
เท่านั้นปัญหาการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในรูปแบบของ
สมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

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

โดย U หมายถึง ตัวแปรเชิงอนุพันธ์ และปริมาณพ
ลักซ์ความร้อน E และ F

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

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

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

และ Q หมายถึงปริมาณแหล่งความร้อน (heat
source), ρ หมายถึง ความหนาแน่น, c_p หมายถึง ค่า
ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่, T หมายถึง
อุณหภูมิ, k หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
โดยปริมาณพลักซ์ความร้อน q_x และ q_y สามารถ
เขียนในรูปของอุณหภูมิโดยอาศัยกฎของฟูริเยร์
(Fourier's law) สมการที่ (1) ข้างต้นสามารถถูกแก้ไข
ได้โดยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition)
และเงื่อนไขขอบเขต ดังต่อไปนี้

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

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

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

การวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนด้วยระเบียบ
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอาศัยอัลกอริทึมเทย์เลอร์-กา
เลอร์กิน (Taylor-Galerkin algorithm) [5-6] บนเอลิ
เมนต์แบบสามเหลี่ยม และกำหนดให้การกระจายตัว
ของอุณหภูมิบนเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมเป็นแบบเชิง
เส้นตรง ดังนี้

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

โดย $[N(x, y)]$ หมายถึง ฟังก์ชันการประมาณภายใน
แบบเส้นตรง จากนั้นจึงทำการประยุกต์วิธีการถ่วง
น้ำหนักเศษตกค้าง (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)
เข้ากับพจน์ที่เกี่ยวข้องกับพลักซ์ความร้อน เช่น

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

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

และประยุกต์การประมาณพจน์เกี่ยวกับเวลาแบบ
ผลต่างสืบเนื่องไปข้างหน้า [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

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\Delta U}{\Delta t} d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial x} E d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial y} F d\Omega - \int_s N_i E n_x d\Gamma - \int_s N_i F n_y d\Gamma + \int_{\Omega} N_i Q d\Omega \quad (13)$$

จากนั้นจึงทำการแปลงสมการที่ (13) ให้อยู่ในรูปแบบ
ของระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมมติให้การ
กระจายตัวของ ΔU ปริมาณพลักซ์ความร้อน E และ
 F อยู่ในรูปเชิงเส้นตรง ดังนี้

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

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

โดยที่

$$\{E^n\} = \begin{Bmatrix} -k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \{T^n\}_1 \\ -k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \{T^n\}_2 \\ -k \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \{T^n\}_3 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

$$\{F^n\} = \begin{Bmatrix} -k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \{T^n\}_1 \\ -k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \{T^n\}_2 \\ -k \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \{T^n\}_3 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

สุดท้ายก็จะได้ระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ [7] ดังนี้

$$[M]\{\Delta U\}^{n+1} = \Delta t \begin{pmatrix} [D_x]\{E\}^n + [D_y]\{F\}^n \\ + \{R\}^n + \{B\}^n \end{pmatrix} \quad (18)$$

โดยที่

$$[M] = \int_A \{N\} [N] dA \quad (19)$$

$$[D_x] = \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} [N] dA \quad (20)$$

$$[D_y] = \int_A \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} [N] dA \quad (21)$$

$$\{R\} = \int_A \{N\} Q dA \quad (22)$$

$$\{B\} = \int_s \{N\} [N] dA \{q\} \quad (23)$$

สำหรับปัญหาการเสถียรรูปและการเกิดความเค้นในโครงสร้างของของแข็งอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จะถูกควบคุมด้วยสมการสมดุล (Equilibrium equation) [4,8] ดังนี้

$$\frac{\partial E_s}{\partial x} + \frac{\partial F_s}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

โดยพจน์ที่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ของแรงทั้งสอง หมายถึง

$$E_s = [\sigma_x \quad \tau_{xy}]^T \quad \text{และ} \quad F_s = [\tau_{xy} \quad \sigma_y]^T \quad (25)$$

และองค์ประกอบของความเค้นสามารถเขียนในรูปแบบดังนี้

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}] = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (26)$$

โดยที่

$$\sigma_1 = C\varepsilon \quad \text{และ} \quad \sigma_2 = C\bar{\alpha}(T(x,y) - T_0) \quad (27)$$

และ C หมายถึง เมตริกซ์ของความยืดหยุ่นของวัสดุ ε หมายถึง เวกเตอร์ของความเครียด (Strain vectors) $\bar{\alpha}$ หมายถึง เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficients) และเช่นเดียวกับการวิเคราะห์อุณหภูมิข้างต้น กำหนดให้การกระจายตัวของระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกน x และ y บนเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมเป็นแบบเชิงเส้นตรง ดังนี้

$$u(x,y) = [N]\{u\} \quad \text{และ} \quad v(x,y) = [N]\{v\} \quad (28)$$

จากนั้นจึงทำการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) เข้ากับสมการที่ (24) ดังนี้

$$\int_{\Omega} N_i \left(\frac{\partial E_s}{\partial x} + \frac{\partial F_s}{\partial y} \right) d\Omega = 0 \quad (29)$$

และประยุกต์ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) เข้ากับพจน์ที่เกี่ยวข้องกับฟลักซ์ของแรง เช่น

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\partial E_s}{\partial x} d\Omega = \int_s N_i E_s n_x d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial x} E_s d\Omega \quad (30)$$

$$\int_{\Omega} N_i \frac{\partial F_s}{\partial y} d\Omega = \int_s N_i F_s n_y d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{\partial N_i}{\partial y} F_s d\Omega \quad (31)$$

และเมื่อทำการแทนที่สมการที่ (30) และ (31) ลงในสมการที่ (29) ซึ่งจะได้ว่า

$$\int_{\Omega} B_s^T (\sigma_1 - \sigma_2) d\Omega = \int_s N^T T_s d\Gamma \quad (32)$$

จากนั้นจึงทำการแปลงสมการที่ (32) ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสมมติให้การกระจายตัวของความเค้นและแรงกระทำที่ขอบของโดเมนอยู่ในรูปเชิงเส้นตรง ดังนี้

$$\sigma_1 = [N_1] \{\bar{\sigma}_1\} \quad (33)$$

$$\sigma_2 = [N_2] \{\bar{\sigma}_2\} \quad (34)$$

$$T_s = [N] \{\bar{T}_s\} \quad (35)$$

โดยที่

$$N_1 = \begin{bmatrix} \bar{N}^T & \bar{\theta}^T & \bar{\theta}^T \\ \bar{\theta}^T & \bar{N}^T & \bar{\theta}^T \\ \bar{\theta}^T & \bar{\theta}^T & \bar{N}^T \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} \bar{N}^T & \theta^T \\ \theta^T & \bar{N}^T \\ \bar{\theta}^T & \bar{\theta}^T \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\bar{N}^T = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \quad (38)$$

ส่วนค่าความเค้นที่จุดต่อสามารถเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\bar{\sigma}_1 = \begin{Bmatrix} \{\bar{\sigma}_{1x}\}_{i=1,2,3} \\ \{\bar{\sigma}_{1y}\}_{i=1,2,3} \\ \{\bar{\sigma}_{1xy}\}_{i=1,2,3} \end{Bmatrix} \quad \text{และ} \quad \bar{\sigma}_2 = \begin{Bmatrix} \{\bar{\sigma}_{2x}\}_{i=1,2,3} \\ \{\bar{\sigma}_{2y}\}_{i=1,2,3} \end{Bmatrix} \quad (39)$$

สุดท้ายก็จะได้ระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำไปเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ ดังนี้

$$D_1 \bar{\sigma}_1 - D_2 \bar{\sigma}_2 = D_s \bar{T}_s \quad (40)$$

โดยที่

$$D_1 = \int_A B_s^T N_1 dA \quad (41)$$

$$D_2 = \int_A B_s^T N_2 dA \quad (42)$$

$$D_s = \int_S N^T \bar{N} d\Gamma \quad (43)$$

4. การวิเคราะห์การแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซี

จากลักษณะการแตกร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซีที่นำมาทดสอบ จะเห็นได้ว่าการแตกร้าวเกิดในลักษณะกระจายทั่วทั้งหน้าของแม่พิมพ์ทั้งในส่วนผิวราบและผิวโค้งดังแสดงในรูปที่ 4 และ 6 ซึ่งการจะวิเคราะห์รอยแตกในด้านแนวลึกของแม่พิมพ์นั้น จะต้องทำการผ่าพิสูจน์แม่พิมพ์เพื่อดูว่ารอยแตกนั้นลึกไปถึงที่อีพ็อกซีชั้นไหนเมื่อทำการผ่าแม่พิมพ์อีพ็อกซีด้วยเครื่องเลื่อยแบบสายพาน (Band saw) แล้ว จะเห็นได้ว่าลักษณะรอยแตกของแม่พิมพ์นั้น จะแตกลึกลงไปถึงชั้นที่ 3 ถึง 4 เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งอีพ็อกซีในชั้นที่ 1 ถึง 4 นั้นจะเป็นอีพ็อกซีที่ไม่มีส่วนผสมของไฟเบอร์ตัด (Chopped fiber) หรือ ไฟเบอร์แผ่น ซึ่งจำนวนชั้นทั้งหมดของแม่พิมพ์อีพ็อกซี ที่ทำการวิเคราะห์นั้นจะมีทั้งหมด 7 ชั้นจากการศึกษาลักษณะการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากการผ่าพิสูจน์แม่พิมพ์ จึงได้ทำการตั้งสมมติฐานถึงสาเหตุของปัญหาการแตกร้าวดังกล่าวเอาไว้ 3 สาเหตุด้วยกัน ดังนี้

1. การเลือกใช้วัสดุอีพ็อกซีในแต่ละชั้นไม่เหมาะสม โดยพิจารณาถึงค่าคุณสมบัติต่างๆ ทั้งในส่วนของคุณสมบัติทางความร้อน และ ค่าความแข็งแรงของวัสดุ
2. การออกแบบระบบให้ความร้อนที่ไม่ดีพอ โดยจากแม่พิมพ์ที่ทำการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าขนาดของท่อทองแดงที่ใช้ และ ตำแหน่งของการวางท่อไม่เหมาะสม
3. ปัญหาการเสีรูประหว่างชั้นของแม่พิมพ์อีพ็อกซี อันเนื่องมาจากปัญหาการเสีรูปของแข็งจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 4 ตัวอย่างแม่พิมพ์ที่จะใช้ในการตัดทดสอบ



รูปที่ 5 ตัวอย่างการแตกร้าวของของแม่พิมพ์ที่พอกขึ้นในส่วนต่าง ๆ

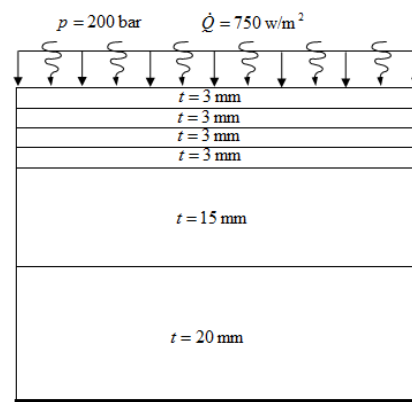


รูปที่ 6 ลักษณะการแตกร้าวของอิพ็อกซีชั้นที่ 1 ถึง 3

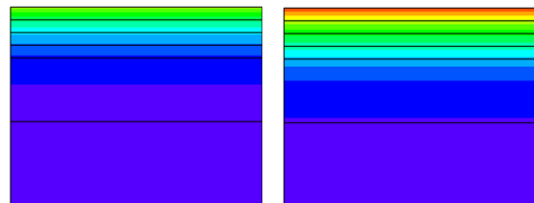
การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในหัวข้อนี้ เป็นการวิเคราะห์ในสองมิติเท่านั้น เนื่องจากการสร้างแบบจำลองในสามมิติของแม่พิมพ์ซึ่งประกอบด้วยวัสดุหลาย ๆ ชั้นที่มีอัตราส่วนของความหนาต่อความยาวในมิติอื่น ๆ น้อยมาก (ประมาณ 1/1500) จึงมีความจำเป็นต้องสร้างเอลิเมนต์ขนาดเล็กจำนวนมากสำหรับในแต่ละชั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นที่ 1 ถึง 5 ซึ่งส่งผลให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่อยู่ไม่สามารถคำนวณแบบจำลองในสามมิติ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ปัญหาในสองมิติโดยผลลัพธ์ที่ได้ก็มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริงและผลการทดลอง

แบบจำลองที่ 1

แบบจำลองที่ 1 เป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วย 6 ชั้น โดยได้ทำการตัดชั้นที่ 7 ซึ่งเป็นชั้นของทรายอัดออกไป ซึ่งรูปแบบของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ได้ถูกแสดงดังในรูปที่ 7 และกำหนดให้ขนาดของแรงกดสูงสุดเท่ากับ 200 bar (ประมาณ 3,000 psi) และปริมาณฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 750 W/m^2 กระทำลงบนผิวด้านบนของชั้นที่ 1 ของแม่พิมพ์



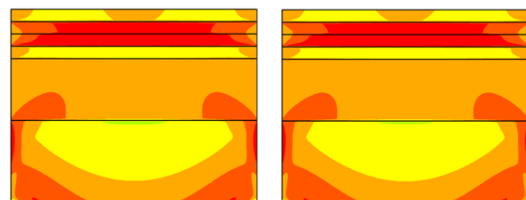
รูปที่ 7 รูปแบบการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่ 1



ที่เวลา 1 นาที

ที่เวลา 2 นาที

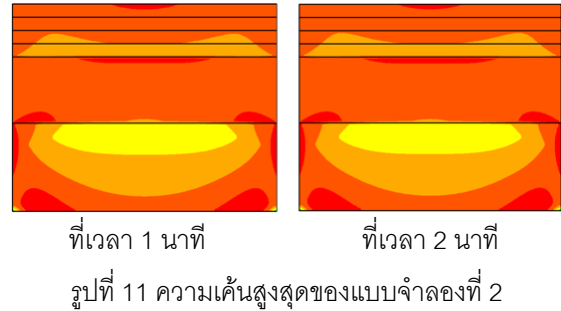
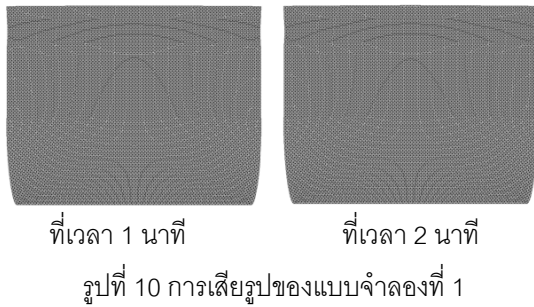
รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิของแบบจำลองที่ 1



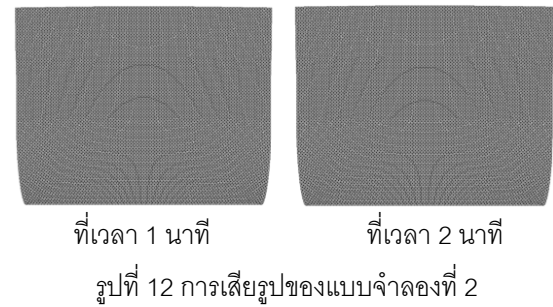
ที่เวลา 1 นาที

ที่เวลา 2 นาที

รูปที่ 9 ความเค้นสูงสุดของแบบจำลองที่ 1



ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่เวลาเท่ากับ 1 และ 2 นาที สำหรับอุณหภูมิ ความเค้นสูงสุด และการเสียรูปของแม่พิมพ์ได้ถูกแสดงในรูปที่ 8 ถึง 10 ตามลำดับ จากรูปทั้งสองสามารถอธิบายพฤติกรรมการแตกร้าวของอีพ็อกซีได้ว่า น่าจะเกิดจากความต่างของระยะเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่ 2 และ 3 เมื่อเทียบกับชั้นที่ 1 และ 4 ตามลำดับ



แบบจำลองที่ 2

แบบจำลองที่ 2 เป็นแบบจำลองสุดท้ายที่ทำการวิเคราะห์ โดยมีความเหมือนกับแบบจำลองที่ 1 แต่อีพ็อกซีในชั้นที่ 2 จะถูกแทนที่ด้วยอีพ็อกซีชนิดที่ใช้ในชั้นที่ 1 (ชั้นที่ 1 และ 2 ใช้อีพ็อกซีชนิดเดียวกับชั้นที่ 1) และอีพ็อกซีในชั้นที่ 3 จะถูกแทนที่ด้วยอีพ็อกซีชนิดที่ใช้ในชั้นที่ 4 (ชั้นที่ 3 และ 4 ใช้อีพ็อกซีชนิดเดียวกับชั้นที่ 4) ผลลัพธ์ที่ได้จากรูปที่ 11 และ 12 พบว่าแบบจำลองที่ 2 น่าจะเป็นแบบจำลองสำหรับการแก้ปัญหาการแตกร้าวที่ดีที่สุดจากการศึกษานี้ เพราะสามารถทำให้ความเค้นสูงสุดที่มีค่ามากที่สุดจากที่เคยเกิดขึ้นในชั้นที่ 2 และ 3 หายไป และเสียรูปของแม่พิมพ์ ที่มีลักษณะการเสียรูปค่อนข้างเป็นเส้นตรงซึ่งทำให้เห็นว่าความต่างของการเคลื่อนตัวในแนวแกน x ระหว่างชั้นที่ 1 ถึง 4 มีค่าน้อยมาก และทำให้แม่พิมพ์สามารถทนทานต่อการใช้งานได้ดีที่สุด

5. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัญหาการรอยร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซีอันเนื่องจากผลของอุณหภูมิสูงและเกรเดียนของอุณหภูมิขนาดใหญ่ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ผลของการเสียรูปของของแข็งอันเนื่องจากผลของอุณหภูมิ (Thermal stress analysis) ในรูปแบบของปัญหาที่กึ่งสถิต (quasi-static analysis) และระบบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 3 จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถสรุปได้ว่าการแตกรอยร้าวของแม่พิมพ์อีพ็อกซี เกิดขึ้นเนื่องจากผลของอุณหภูมิ ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวในแต่ละชั้นของแม่พิมพ์อีพ็อกซีที่ไม่เท่ากัน จึงก่อให้เกิดการฉีกขาดระหว่างรอยต่อของแต่ละชั้น และโดยจำลองด้วยเงื่อนไขของการเปลี่ยนชนิดของวัสดุในแต่ละชั้นของแม่พิมพ์อีพ็อกซี พบว่าแบบจำลองที่ 2 สามารถช่วยลดปัญหาการแตกร้าวดังกล่าวได้ และ

สามารถช่วยให้แม่พิมพ์ที่พอกซึ่งมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Snyder, C.D. (2001), Materials for Reaction Injection Molding (RIM) Processing, Technical Marketing Specialist, Specialty RIM Business, Bayer, Pittsburg.
- [2] Becker, W.E. (1979), Reaction Injection Molding, van Nostrand-Reinhold, New York.
- [3] Haagh, G.A.A.V., Peters, G.W.M. and Meijer, E.H.E. (2006), "Reaction Injection Molding: Analyzing the Filling Stage of a Complex Product with a Highly Viscous Thermoset", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, 2579-2588.
- [4] Phongthanapanich, S. and Dechaumphai, P. (2008), "Adaptive Nodeless Variable Finite Elements with Flux-based Formulation for Thermal-Structural Analysis", *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 24, 181-188.
- [5] Phongthanapanich, S. and Dechaumphai, P. (2006), "Heat Transfer Analyses by Means of Flux-based Formulation and Mesh Adaptation", *Engineering Journal of Siam University*, Vol. 12, 1-8.
- [6] Phongthanapanich, S. and Dechaumphai P. (2009), "Adaptive Finite Element Method for Heat Transfer Analysis by Means of Linear Flux-based Formulation", *The Journal of KMUTNB*, Vol. 19, 306-314.
- [7] Phongthanapanich, S. (2009), "Nodeless Variable Adaptive Finite Element Methods for Steady-state Heat Transfer Problems", *Engineering Journal of Siam University*, Vol. 19, 1-9.
- [8] Phongthanapanich, S. and Dechaumphai, P. (2008), "Nodeless Variable Finite Element Method for Stress Analysis using Flux-based Formulation", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, 639-646.