



วิทยานิพนธ์

การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหล
ของการฉีดแบบทำปฏิกิริยา

Polyurethane Product Quality Improvements by Using Reaction-Injection-Molding Flow Analysis

นายชลิต อรรถคำภีวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
พ.ศ. 2549



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของการฉีดแบบทำปฏิกิริยา

Polyurethane Product Quality Improvements by Using Reaction-Injection-Molding Flow Analysis

นามผู้วิจัย นายชลิต อรรถคำภีวงศ์

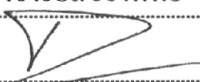
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ



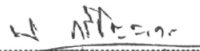
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สังจาทิพย์ ทศนียพันธุ์, M.S.)

กรรมการ



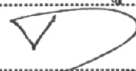
(รองศาสตราจารย์รัฐณะ เกียรติวัฒน์, Ph.D.)

กรรมการ



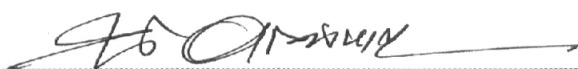
(อาจารย์พิพัฒน์ ภูมิปัญญาคุณ, วศ.ม)

หัวหน้าภาควิชา



(รองศาสตราจารย์รัฐณะ เกียรติวัฒน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 21 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2549

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหล
ของการฉีดแบบทำปฏิกิริยา

Polyurethane Product Quality Improvements by Using
Reaction-Injection-Molding Flow Analysis

โดย

นายชลิต อรรถคำภีวงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-1222-2

ชลิต อรรถคำภีวงศ์ 2549: การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของการฉีดแบบทำปฏิกิริยา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ประธานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัจจาทิพย์ ทศนียพันธุ์, M.S. 213 หน้า ISBN 974-16-1222-2

อุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทยมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ความสำคัญในการลดต้นทุนการผลิตและการเพิ่มผลผลิตจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณามากที่สุด ประเด็นนี้จะบรรลุผลให้เป็นความสำเร็จได้โดยการนำเทคโนโลยีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วย รวมถึงการใช้วัสดุและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท ณ ปัจจุบันพอลิเมอร์ได้นำมาใช้ทดแทนชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นโลหะเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามชิ้นส่วนขนาดใหญ่ เช่น กันชน มีต้นทุนการผลิต แม่พิมพ์ที่สูงมากเมื่อใช้กระบวนการฉีดแบบ Thermoplastic-Injection Molding (TIM) ทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นส่วนลักษณะดังกล่าว คือ กระบวนการผลิตแบบ Reaction-Injection Molding (RIM) เครื่องฉีดแบบ RIM มีขนาดเล็กกว่าเครื่องฉีดแบบ TIM อีกทั้งมีค่าอุปกรณ์และค่าดำเนินการต่ำกว่า งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการค้นคว้าหาวิธีการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ RIM ฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย (Decorative-Tail-Lamp Cover หรือ DTLC) ของรถกระบะ Isuzu รุ่น D-Max ได้ถูกใช้เป็นชิ้นงานในการศึกษา โดยในการออกแบบได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer-Aided Design หรือ CAD) เพื่อออกแบบฝาครอบประดับกรอบไฟท้ายและแม่พิมพ์ และได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering หรือ CAE) จำลองการกระแทกโดยใช้หลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite-Element Analysis หรือ FEA) การออกแบบแม่พิมพ์ได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของกระบวนการผลิตแบบ RIM กับ TIM และใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ และได้ผลิตเป็นชิ้นงานที่สามารถใช้งานได้จริง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้รวบรวมวิธีการใช้ CAD และ CAE สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และแม่พิมพ์รวมถึงวิธีการใช้งานและความปลอดภัยของเครื่อง RIM และคุณสมบัติของโพลียูรีเทน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อประธานกรรมการ

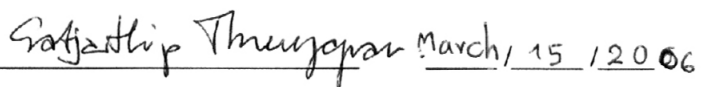
15 / 5 / 2549

Chalit Athacampeewong 2006: Polyurethane Product Quality Improvements by Using Reaction-Injection-Molding Flow Analysis. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Satjarthip Thusneyapan, M.S. 213 pages.
ISBN 974-16-1222-2

The Thai automotive industry has been growing rapidly in recent years. The importance in reducing the production cost and increasing the productivity is of the most concern. This issue is achieved by introducing the computer-aided technology as well as proper materials and process for each specific product. At the present, polymers increasingly replace metals for automotive components. However, the large components such as bumper have high mold cost when using thermoplastic-injection molding (TIM). Alternatively, the reaction-injection molding (RIM) technology provides a suitable solution for such parts. The RIM machine is smaller in size than TIM, with low tooling and operating cost. This research aimed at finding the proper product design method for RIM process. The decorative-tail-lamp cover (DTLC) for Isuzu D-Max truck was the sample for the study. A Computer-Aided Design (CAD) software was used for designing the DTLC and its mold. Computer-Aided Engineering (CAE) was applied for impact simulation by using Finite-Element Analysis (FEA). The mold design was done by an aid of plastic flow analysis. The flow analysis was also performed for comparing the difference between RIM and TIM. The analysis results were applied for the mold design, and the actual model was manufactured and was usable. The research included the CAD and CAE methods for design and developing the product and its mold, the operation and safety of the RIM machine and PU properties.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. สัจจาทิพย์ ทศนียพันธ์ุ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมการวิจัย ที่กรุณาอบรมสั่งสอน รวมทั้งให้แนวคิดและคำแนะนำในการดำเนินการวิจัยตลอดจนแก้ไขปัญหาดังกล่าว อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอกราบขอบพระคุณต่อคณะกรรมการที่ปรึกษา และผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วย รศ.ดร. ธีรวิวัฒน์ อาจารย์ พิพัฒน์ ภูมิปัญญาคุณ และ ผศ.ดร. อภิญา ดวงจันทร์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้กรุณาอบรมสั่งสอนแก่ข้าพเจ้า ไม่ว่าจะเป็นโดยตรง หรือ โดยอ้อม ตั้งแต่ในระดับชั้นประถมจนถึงระดับปริญญาโท

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณวิชากร จามิกร สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย และคุณเสถียร ชมภูศรี บริษัท เสถียรพลาสติก แอนด์ ไฟเบอร์ จำกัด ที่กรุณาสับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบพระคุณ บริษัท เมลเทล จำกัด และบริษัท สแกนเนอร์สามมิติ (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องสแกนสามมิติ ขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยยูเนี่ยน ฟิชชeries จำกัด ที่อนุเคราะห์ในการทดลองผลิตฝาคอบระดับกรอบไฟท้าย และขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ให้การอนุเคราะห์ สถานที่ และเครื่องมือที่ใช้ประกอบการวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณสุบิน รัชพงษ์ และพี่ๆ ที่บริษัท เสถียรพลาสติก แอนด์ ไฟเบอร์ จำกัด ที่ดูแลและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย คุณธนาพงษ์ คำพุ่ม ที่ช่วยเหลือในการสแกนสามมิติ คุณชาคริต สุวรรณจรัส และบุคลากรของห้อง MPDRL ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในด้านต่างๆ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน ที่อยู่ด้วยกันมาตลอด ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้อบรม เลี้ยงดู ให้การศึกษา คำแนะนำต่างๆ และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา จนกระทั่ง งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ชลิต อรรถคำภีวงศ์

มีนาคม 2549

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(4)
สารบัญภาพ	(7)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(24)
คำนำ	1
การตรวจเอกสาร	3
กรรมวิธีการผลิตแบบ RIM	3
ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของ RIM	6
ส่วนประกอบของโฟลียูรีเทน	9
Isocyanate	9
Polyol	13
สารปรับแต่งคุณสมบัติของโฟลียูรีเทน	13
คุณลักษณะทั่วไปของโฟลียูรีเทน	15
โฟลียูรีเทนโฟม	16
โฟมอ่อน	17
โฟมแข็ง	18
โฟลียูรีเทนแข็งและอีลาสโตเมอร์โฟลียูรีเทน	19
ความปลอดภัยของโฟลียูรีเทนและสิ่งแวดล้อม	20
อันตรายของสารเคมีต่อสุขภาพ	20
การเก็บรักษาสารเคมี	22
สถานที่ปฏิบัติการฉีด	23
ความปลอดภัยในการใช้เครื่อง RIM	23
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้ของชิ้นงานโฟลียูรีเทน	24
ผลกระทบของคาร์บอนมอนอกไซด์	24
ผลกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์	25
ผลกระทบของไฮโดรเจนไซยาไนด์	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลกระทบของควันไฟ	25
ผลกระทบของอะโครลีนอินท์	26
การออกแบบชิ้นงานสำหรับการผลิตแบบ RIM	26
แม่พิมพ์สำหรับการผลิตแบบ RIM	27
วัสดุและการผลิตแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการ RIM	30
วัสดุสำหรับใช้ผลิตแม่พิมพ์ RIM	30
อีพอกซี	30
โลหะ	30
อลูมิเนียมหล่อ	31
ซิลิโคนยาง	31
การผลิตแม่พิมพ์	31
การหล่อ	32
การแมชชีนขึ้นรูป	32
อุปกรณ์และวิธีการ	33
อุปกรณ์	33
อุปกรณ์สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์ข้อมูล	33
อุปกรณ์และวัสดุสำหรับการผลิตแบบ RIM	33
วิธีการ	36
การออกแบบชิ้นงานทดสอบโดยใช้ CAD	36
การออกแบบจากชิ้นฝาดรอประดับกรอบไฟท้าย	36
การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการกระแทก	37
การจำลองการไหลของโพลียูรีเทนโดยใช้ CAE	49
การออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้ CAD	60
การผลิตแม่พิมพ์	70
การผลิตฝาดรอประดับกรอบไฟท้ายด้วยโพลียูรีเทนแข็ง	72
การทดลองการเดินเครื่อง RIM	72
การเดินเครื่อง RIM เพื่อผลิตชิ้นงาน	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การฉีดโพลียูรีเทนแข็งด้วยเครื่อง RIM	74
ขั้นตอนการตบแต่งชิ้นงานเพื่อความสวยงาม	77
ผลการวิจัยและวิจารณ์	78
ผลการออกแบบฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย	78
การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการกระแทก	80
การกระแทกของฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายเมื่อเป็นเอลิเมนต์แบบแผ่นบาง	80
การกระแทกของฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายเมื่อเป็นเอลิเมนต์แบบตัน	92
การจำลองการไหลของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์เมื่อมีการเปลี่ยนความหนาของผนัง	131
การไหลของพลาสติกเหลวผ่านแกนกลางในแม่พิมพ์	143
ผลการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการ RIM	154
ผลการผลิตแม่พิมพ์	165
การผลิตชิ้นงานโพลียูรีเทนแข็งจากกระบวนการ RIM	168
สรุปผลวิจัย	174
เอกสาร และสิ่งอ้างอิง	177
ภาคผนวก	180
ภาคผนวก ก การเปรียบเทียบ Air Trap และทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีนที่แปรเปลี่ยนตามความหนา	181
ภาคผนวก ข การเปรียบเทียบการเกิด Air Trap และ Weld Line ของการไหลของโพลียูรีเทน และโพลีโพรพิลีนผ่านแกนกลางแบบต่างๆ	192
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีนผ่านแกนกลางแบบต่างๆ	203
ภาคผนวก ง การคำนวณอื่นๆ	209

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิค ระหว่างกระบวนการผลิตแบบ RIM และแบบ TIM	8
2 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ TDI และ MDI (http://msds.pcd.go.th , 2005)	10
3 ประเภทของโพลียูรีเทนที่ใช้ MDI (Woods, 2000)	11
4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลของโพลียูรีเทนแบบต่าง ๆ (www.matweb.com , 2004)	12
5 ลักษณะจำเพาะของ Polyol (Woods, 2000)	13
6 วัสดุที่ใช้เป็นสารปรับแต่งคุณสมบัติของโพลียูรีเทนหรือ Additive (Woods, 2000)	14
7 ความเข้มข้นของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ (Woods, 2000)	25
8 คุณสมบัติของโพลียูรีเทน	57
9 ค่าเงื่อนไขการฉีดโพลียูรีเทน	57
10 ตัวอย่างผลที่โปรแกรมคำนวณได้	59
11 ตัวอย่างผลวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนที่ Gate ตำแหน่ง A	60
12 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง A	85
13 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง B	90
14 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง C	100
15 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง D	109
16 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง E	118
17 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง F	126
18 สรุปผลของการจำลองการกระแทกของแบบจำลองการกระแทกทั้งหมด	129

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
19 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโพลีเอทีเทนและโพลีโพรพิลีน	131
20 เปรียบเทียบเงื่อนไขการฉีดโพลีเอทีเทนและโพลีโพรพิลีน	132
21 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทีเทนเหลวในแม่พิมพ์ เมื่อเวลาในการฉีด เท่ากับ 1 วินาที	135
22 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีโพรพิลีนเหลวในแม่พิมพ์ เมื่อเวลาในการฉีด เท่ากับ 1 วินาที	136
23 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพลีเอทีเทนเหลวของชิ้นงานขนาด 10x20x2 มิลลิเมตร	146
24 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพลีโพรพิลีนเหลวของชิ้นงานขนาด 10x20x2 มิลลิเมตร	147
25 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพลีเอทีเทนเหลวของชิ้นงานขนาด 10x40x2 มิลลิเมตร	148
26 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพลีโพรพิลีนเหลวของชิ้นงานขนาด 10x40x2 มิลลิเมตร	149
27 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิค ระหว่างกระบวนการผลิตแบบ RIM และ TIM ที่สรุปได้จากการจำลองการไหลของโพลีเอทีเทนและโพลีโพรพิลีน	153
28 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทีเทนโดยใช้ CAE	161
29 เปรียบเทียบน้ำหนักของแม่พิมพ์ที่คำนวณจาก CAD และน้ำหนักจริง	168

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง.1 ค่าที่ใช้คำนวณการเปิดแม่พิมพ์แบบเชิงเส้น	210
ง.2 ค่าที่ใช้คำนวณการเปิดแม่พิมพ์แบบเชิงมุม	211

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ส่วนประกอบของเครื่อง RIM (www.rimnetics.com , 2546)	4
2 เครื่อง RIM รุ่น RIM-STAR ECO II (www.krauss-maffei.de , 2004)	5
3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการผลิตแบบ RIM	6
4 แผนผังการทำปฏิกิริยาทางเคมีของโพลียูรีเทน (Woods, 2000)	9
5 การทำปฏิกิริยาของโพลียูรีเทน (www.bayer.co.th , 2548)	9
6 การผสมสารปรับแต่งคุณสมบัติของโพลียูรีเทนในกระบวนการ RIM (Woods, 2000)	15
7 ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ทำจากโพลียูรีเทน (www.PolyurethaneWeb.com , 2003)	17
8 ส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ที่ทำจากโพลียูรีเทน (บริษัท ไทยยูเนี่ยนฟิฟู จำกัด, 2004 และ www.worldtradeaa.com . 2005)	18
9 สายพานที่ทำจาก High Density Flexible Foam (www.goodyearindustrial-products.com , 2003)	18
10 ฉนวนกันความร้อนที่ทำจากโฟมโพลียูรีเทน (www.elliottfoam.com , 2003)	19
11 การประยุกต์ใช้โพลียูรีเทนของขึ้นส่วนประดับอาคาร (บริษัท ไทยยูเนี่ยนฟิฟู จำกัด, 2004)	19
12 พื้นรองเท้าที่ทำจาก อีลาสโตเมอร์โพลียูรีเทน (www.aerosoftshoe.com , 2003)	20
13 ส่วนประกอบและชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก Thermoplastic (ชาลี, 2542)	28
14 แม่พิมพ์อลูมิเนียมด้าน Core ของแม่พิมพ์แบบ 2-Cavity (ฉีด 2 ชิ้นพร้อมกัน)	29
15 แม่พิมพ์อลูมิเนียมด้าน Cavity ของแม่พิมพ์แบบ 2-Cavity	29
16 ตัวอย่างชิ้นงานจากแม่พิมพ์แบบ 2-Cavity	29
17 เครื่อง RIM (STAR ECO II) โดยภาพ ก) ด้านหน้า และ ข) ด้านหลัง	34
18 แม่พิมพ์อลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิตแบบ RIM	35
19 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่อง RIM	35
20 ชิ้นงานที่ออกแบบจากชิ้นงานสแกน ก) ด้านหน้า และ ข) ด้านหลัง	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21 รูปแบบที่ใช้จำลองการกระแทก โดยภาพ ก) การกระแทกแบบ A และ C ข) การกระแทกแบบ B และ D ค) การกระแทกแบบ E และ ง) การกระแทกแบบ F	38
22 แสดงคำสั่ง และหน้าจอที่ใช้ในการ Import ชิ้นงาน และกำหนดวัสดุ โดยภาพ ก) เมนูคำสั่ง Import ชิ้นงาน ข) การกำหนดค่า Geometry Scale Factor ค) เมนูคำสั่งการกำหนด Material และ Property และ ง) หน้าจอการ กำหนดค่าต่างๆ ของวัสดุ	40
23 หน้าจอการป้อนค่าเพื่อกำหนด Property	41
24 เมนูคำสั่งในการสร้าง Mesh	41
25 หน้าจอการป้อนค่าเพื่อกำหนดการ Mesh	41
26 ก่อนและหลังการสร้าง Mesh โดยภาพ ก) ก่อนการสร้าง Mesh และ ข) การสร้าง Mesh แล้วเสร็จ	42
27 เมนูคำสั่งในการกำหนด Constraint และ Load โดยภาพ ก) เมนูคำสั่งที่ ใช้กำหนดตำแหน่งของ Constraint และ ข) เมนูคำสั่งที่ใช้กำหนดขนาดและ ตำแหน่งของ Load	42
28 หน้าจอการกำหนดประเภทของ Constraint	43
29 การกำหนด Constraint (ภาพ ก) และ Load (ภาพ ข)	43
30 หน้าจอการ Analysis โดยภาพ ก) เมนูคำสั่งการ Analysis ข) การเลือก ประเภทของการ Analysis และ ค) หน้าจอข้อกำหนดของการ Analysis	44
31 เมนูคำสั่งที่ใช้ในการแสดงผลวิเคราะห์	45
32 หน้าจอการกำหนดรูปแบบการแสดงผล	46
33 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และหน้าจอการปรับขนาดสเกลของชิ้นงาน โดยภาพ ก) หน้าจอที่ใช้ในการกำหนดสเกล และ ข) การแสดงผลของระยะยูนิตที่สเกล 5:1	46
34 ตัวอย่างระดับชั้นสีของความเค้นที่บริเวณต่าง ๆ ของฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย	47
35 ตัวอย่างระดับชั้นสีของระยะยูนิตที่บริเวณต่าง ๆ ของฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย	48
36 ขั้นตอนการ Import ชิ้นงาน	49
37 การสร้าง Mesh แบบ Fusion Mesh	50
38 เมนูคำสั่งที่ใช้ในการตรวจสอบชิ้นงาน	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
39 การแก้ไขค่า Aspect Ratio (ก และ ข) และสรุปข้อมูลการ Mesh (ค)	52
40 ก) เมนูการตรวจสอบ Overlapping ข) ผลการตรวจสอบการวางตัวของเอลิเมนต์ ค) ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเอลิเมนต์ ง) เมนูการตรวจสอบ Free Edges	53
41 ภาพด้านหลังของชิ้นงาน แสดงตำแหน่งของทางเข้าของโพลียูรีเทนที่ผิวด้านหลัง	53
42 เมนูคำสั่งที่ใช้กำหนดค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์	54
43 แสดงหน้าจอการป้อนค่าของ Runner	55
44 ก) เมนูคำสั่งที่ใช้กำหนดกระบวนการฉีด ข) การกำหนดวัสดุที่ใช้ในการฉีด	56
45 การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการจำลองการฉีดโพลียูรีเทน	56
46 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทน แสดงผลเป็นระดับชั้นสี เมื่อเวลาฉีด เท่ากับ 1 วินาที	58
47 แสดงการวางชิ้นงานในแม่พิมพ์	61
48 แสดงการแยกแม่พิมพ์ด้าน Core และ Cavity ออกจากกันใน CAD	61
49 แผนผังขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ด้วย CAD (สัจจาทิพย์, 2002)	62
50 ภาพวาดรายละเอียดของแม่พิมพ์ด้าน Core และด้าน Cavity	63
51 แม่พิมพ์ที่ปรับปรุงให้มีน้ำหนักเบาลงแล้ว	64
52 ภาพวาดรายละเอียดของแม่พิมพ์ด้าน Core ที่ได้ปรับปรุงให้มีน้ำหนักเบาและ สะดวกต่อการใช้งาน	65
53 ภาพวาดรายละเอียดของแม่พิมพ์ด้าน Cavity ที่ได้ปรับปรุงให้มีน้ำหนักเบาและ สะดวกต่อการใช้งาน	66
54 การติดตั้งแม่พิมพ์บนฐานที่ปรับปรุงแล้ว เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM	67
55 ภาพวาดรายละเอียดของแม่พิมพ์บนฐานรุ่นใหม่	68
56 ภาพวาดแสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์บนฐานรุ่นใหม่	69
57 แม่พิมพ์บนฐานทดสอบใหม่ (ด้านหน้า)	70
58 แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM (ด้านหลัง)	70
59 แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM (ด้านบน)	71
60 แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM (ด้านใน)	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
61 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเครื่อง RIM	73
62 ขั้นตอนการปฏิบัติการของเครื่อง RIM ในการผลิตชิ้นงาน	74
63 สามขั้นตอนหลัก ของการผลิตชิ้นงานจากกระบวนการผลิตแบบ RIM	75
64 การติดตั้งท่อพลาสติกที่ Gate ของแม่พิมพ์ โดยภาพ ก) ก่อนทำการฉีด และ ข) หลังทำการฉีด	76
65 แบบ CAD ของฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายรุ่น ค (ภาพ ก และ ข) และการ ประกอบบนกรอบไฟท้าย (ภาพ ค)	78
66 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีสแกน 3 มิติ	78
67 ภาพวาดรายละเอียดของแบบ CAD ของฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย	79
68 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง A1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 530.20 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบ สูงสุด	82
69 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง A2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 411.78 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบ สูงสุด	83
70 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง A3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 137.00 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบ สูงสุด	84
71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง A1 ถึง A3	85
72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง A1 ถึง A3	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
73 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง B1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 1,191.50 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด	87
74 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง B2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 890.42 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด	88
75 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง B3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 435.80 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด	89
76 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง B1 ถึง B3	91
77 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง B1 ถึง B3	91
78 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง C1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 8,661.03 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด	94
79 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง C1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 8,661.03 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
80 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง C2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 7,052.15 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	96
81 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง C2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 7,052.15 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	97
82 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง C3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 9,397.78 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	98
83 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง C3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 9,397.78 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	99
84 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง C1 ถึง C3	101
85 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเยื้องสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง C1 ถึง C3	101
86 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง D1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 17,322.05 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	103
87 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง D1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 17,322.05 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
88 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง D2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 14,1104.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	105
89 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง D2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 14,1104.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	106
90 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง D3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 12,198.30 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	107
91 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง D3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 12,198.30 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	108
92 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง D1 ถึง D3	110
93 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเยื้องสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง D1 ถึง D3	110
94 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง E1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 9,213.66 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	112
95 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง D1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 9,213.66 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	113

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
96 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง E2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 7,131.50 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	114
97 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง E2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 7,131.50 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	115
98 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง E3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 11,206.69 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	116
99 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง E3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 11,206.69 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	117
100 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง E1 ถึง E3	119
101 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเยื้องสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง E1 ถึง E3	119
102 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง F1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 18,457.32 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด	120
103 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง F1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 18,457.32 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด	121

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
104 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง F2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 14,262.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด	122
105 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง F2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 14,262.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด	123
106 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง F3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 12,422.23 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด	124
107 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง F3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 12,422.23 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด	125
108 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง F1 ถึง F3	127
109 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง F1 ถึง F3	127
110 เปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกระแทกแบบต่างๆ โดยเรียงจาก ตำแหน่งที่สามารถรับแรงกระแทกได้มากที่สุดไปหาตำแหน่งที่รับแรงกระแทก น้อยที่สุด (จากซ้ายไปขวา) ของแต่ละแบบจำลอง	130
111 ชิ้นงานที่ใช้ในการจำลองการไหล	131
112 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 3 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถว บนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง 100 มิลลิเมตร	133

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
113 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 3 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถบ บนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และ ความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	134
114 ปริมาตรของชิ้นงานเทียบกับมุม θ ของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และ โพลีโพรพิลีน (ขวา)	137
115 ความเร็วการไหลสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับมุม θ ของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา)	137
116 อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับมุม θ ของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และ โพลีโพรพิลีน (ขวา)	137
117 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ ความชัน (θ) เท่ากับ 90° และ L_2/L_1 เท่ากับ 1, 0.67, 0.5, 0.33 และ 0.2 จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และ ความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	139
118 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ ความชัน (θ) เท่ากับ 90° และ L_2/L_1 เท่ากับ 1, 1.5, 2, 3 และ 5 จากแถบบน มาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	140
119 การไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ ความชัน (θ) เท่ากับ 90° และ L_2/L_1 เท่ากับ 1, 0.67, 0.5, 0.33 และ 0.2 จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	141
120 การไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ ความชัน (θ) เท่ากับ 90° และ L_2/L_1 เท่ากับ 1, 1.5, 2, 3 และ 5 จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	142

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
121 ชิ้นงานจำลองการไหลผ่านแกนกลาง (รู และ Notch ในชิ้นงาน)	143
122 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	145
123 อัตราการไหลของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x20x2 มิลลิเมตร	150
124 ความเร็วการไหลสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x20x2 มิลลิเมตร	150
125 อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x20x2 มิลลิเมตร	150
126 อัตราการไหลของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x40x2 มิลลิเมตร	151
127 ความเร็วการไหลสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x40x2 มิลลิเมตร	151
128 อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x40x2 มิลลิเมตร	151
129 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่านแกนกลางวงกลม ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 40% และ 60%	152
130 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์	154
131 แสดงภาพวาดรายละเอียดของตำแหน่งทางเข้าทั้ง 5 จุด	155
132 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนของ Gate ตำแหน่ง A เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที	156
133 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนของ Gate ตำแหน่ง B เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที	157

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
134 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนของ Gate ตำแหน่ง C เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที	158
135 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนของ Gate ตำแหน่ง D เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที	159
136 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนของ Gate ตำแหน่ง E เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที	160
137 อัตราการไหลของโพลียูรีเทนที่เวลาการไหลเต็มของทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง	162
138 ความเร็วการไหลสูงสุดของโพลียูรีเทนที่เวลาการไหลเต็มของทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง	162
139 อุณหภูมิสูงสุดของโพลียูรีเทนที่เวลาการไหลเต็มของทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง	163
140 แรงปิดแม่พิมพ์ที่มากที่สุดที่เวลาการไหลเต็มของทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง	163
141 แสดงบริเวณที่เกิด Air Trap ของตำแหน่งทางเข้าที่จุด D เมื่อเวลาการไหลเต็มเท่ากับ 1, 2, 4, 6 และ 8 วินาที	164
142 กรรมวิธีการผลิตแม่พิมพ์	165
143 กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ด้วยการหล่อ	166
144 แม่พิมพ์อลูมิเนียม แยกชิ้น Core และ Cavity	167
145 แม่พิมพ์อลูมิเนียม บนฐานทดสอบ	167
146 แม่พิมพ์อลูมิเนียม ที่นำไปใช้ในการผลิตในงานวิจัยนี้	168
147 ชิ้นงานเมื่ออยู่ในแม่พิมพ์	169
148 ด้านหน้า (ภาพ ก) และด้านหลัง (ภาพ ข) ของฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายวัสดุเป็นโพลียูรีเทนแบบแข็ง	169
149 ผิวของชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ	170
150 สภาพรอยย่นของผิวชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ	170
151 ชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการ RIM ภายหลังตกแต่งเรียบร้อยแล้วเป็นสีต่าง ๆ (ก. สีดำ ข. สีขาว และ ค. สีเงิน)	171
152 การประกอบฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายที่ทำจากโพลียูรีเทนแข็งบนกรอบไฟท้าย	171
153 ฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายที่ได้ผลิตจากงานวิจัย	172

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพีลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 2 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถว บนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง 100 มิลลิเมตร	182
ก.2 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพีลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 3 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถว บนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง 100 มิลลิเมตร	183
ก3 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพีลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 5 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถว บนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง 100 มิลลิเมตร	184
ก4 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพีลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 10 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถว บนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง 100 มิลลิเมตร	185
ก5 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพีลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 20 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถว บนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง 100 มิลลิเมตร	186
ก6 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพีลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 2 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถว บนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และ ความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	187

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก7 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 3 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และ ความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	188
ก8 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 5 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และ ความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	189
ก9 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 10 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และ ความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	190
ก10 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 20 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และ ความกว้าง = 100 มิลลิเมตร	191
ข1 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	193
ข2 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นสี่เหลี่ยม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	194

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข3 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นครึ่งวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	195
ข4 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นข้าวหลามตัด และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	196
ข5 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีการเจาะร่องด้านข้าง และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	197
ข6 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	198
ข7 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นสี่เหลี่ยม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	199
ข8 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นครึ่งวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	200

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ข9 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นข้าวหลามตัด และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	201
ข10 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีการเจาะร่องด้านข้าง และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	202
ค1 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน แกนกลางวงกลม ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	204
ค2 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน แกนกลางสี่เหลี่ยม ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	205
ค3 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน แกนกลางครึ่งวงกลม ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	206
ค4 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน แกนกลางข้าวหลามตัด ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	207

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค5 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลีเอธีลีนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน แกนกลางที่มีการเจาะรูทางด้านข้าง ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%	208
ง1 ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม Pro/ENGINEER	210

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	Isocyanate
ABS	=	Acrylonitrile Butadiene Styrene
ASCII	=	American Standard Code for Information Interchange
B	=	Polyol
BOM	=	Bill of Material
CAD	=	Computer-Aided Design
CAE	=	Computer-Aided Engineering
CAM	=	Computer-Aided Manufacturing
CFC	=	Chlorofluoromethanes
CNC	=	Computer-Numerical Control
CO	=	Carbon Monoxide
CO ₂	=	Carbon Dioxide
DTLC	=	Decorative-Tail-Lamp Cover
DXF	=	Drawing Interchange Format
FEA	=	Finite-Element Analysis
FEM	=	Finite-Element Model
HCN	=	Hydrogen Cyanide
IGES	=	Initial Graphics Exchange Specification
ISO	=	International Standards Organization
L	=	Air Trap ขนาดใหญ่
M	=	Air Trap ขนาดกลาง
MDI	=	Diisocyanate – Diphenyl Methane
N ₂	=	Nitrogen
NO	=	Nitrogen Oxide
O ₂	=	Oxygen
PE	=	Polyethylene
PU	=	Polyurethane

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

PUF	=	Flexible Polyurethane Form
PUR	=	Rigid Polyurethane Form
RIM	=	Reaction-Injection Molding
S	=	Air Trap ขนาดเล็ก
SCBA	=	Self-Contained Breathing Apparatus
SPF	=	Sathienplastic and Fiber Co.,Ltd (บริษัท เสถียรพลาสติก แอนด์ไฟเบอร์)
STEP	=	Standard for Exchange of Product Model
TDI	=	Tolylene-Diisocyanate
TIM	=	Thermoplastic-Injection Molding
TPU	=	Thermoplastic Polyurethane
VDA	=	Verband der deutschen Automobilindustrie
VDA-FS	=	Verband der deutschen Automobilindustrie Flä Chenschnittstelle
x	=	x-axis
y	=	y-axis
z	=	z-axis
.igs	=	ไฟล์มาตรฐาน Initial Graphics Exchange Specification
.prt	=	ไฟล์ชิ้นงานมาตรฐานของโปรแกรม Pro/ENGINEER
.stp	=	ไฟล์มาตรฐาน Standard for Exchange of Product Model

การเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของ การฉีดแบบทำปฏิกิริยา

Polyurethane Product Quality Improvements by Using Reaction-Injection-Molding Flow Analysis

คำนำ

การผลิตยานยนต์ในปัจจุบันและแนวโน้มสำหรับอนาคต วัสดุจำพวกพอลิเมอร์ต่าง ๆ ได้เข้ามาทดแทนการใช้โลหะที่เป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์จำนวนมาก การขึ้นรูปพอลิเมอร์หรือพลาสติกด้วยวิธีการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection Molding) ประสบปัญหาเกี่ยวกับชิ้นส่วนขนาดใหญ่ เช่น กันชน (Bumper) แผ่นกันโคลนเหนือล้อ (Under Cover) เนื่องจากต้องใช้แรงดันฉีดที่สูงมาก ขนาดเครื่องฉีดจึงมีขนาดใหญ่โต ราคาแพง และแม่พิมพ์ราคาสูงมาก (นับล้านบาท) กระบวนการผลิตแบบ Reaction-Injection Molding (RIM) เป็นการฉีดวัสดุเหลวสองประเภทเข้าแม่พิมพ์แล้วจึงแข็งตัวจากการทำปฏิกิริยาของวัสดุทั้งสอง กระบวนการนี้จึงมีแรงดันฉีดต่ำ และแม่พิมพ์ไม่ซับซ้อนเหมือนแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

เนื่องจากบริษัท เสถียรพลาสติก แอนด์ ไฟเบอร์ จำกัด มีเครื่องฉีดแบบ RIM และได้ทดสอบใช้งานในช่วงระยะเวลาหนึ่ง แต่เกิดวิกฤตเศรษฐกิจตกต่ำปี 2541 มีผลกระทบเป็นผลให้บริษัทผู้ว่าจ้างได้ปิดกิจการ ทำให้ขาดการพัฒนากระบวนการ RIM กระบวนการ RIM สามารถใช้ผลิตชิ้นงานที่ต้องการจำนวนการผลิตไม่มาก (500 ชิ้น ถึง 20,000 ชิ้น) ทางบริษัทจึงมีแผนการที่จะนำเครื่อง RIM มาใช้งานในการผลิตทั้งชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนประดับยนต์ แต่ทางบริษัทฯ ขาดบุคลากรที่มีความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรม เพื่อศึกษาอย่างลึกซึ้ง และพัฒนาการออกแบบชิ้นงาน การออกแบบและการเลือกวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ การกำหนดเงื่อนไขการฉีด และวิธีการลดการบิดตัวที่เกิดขึ้นหลังการฉีด เพื่อให้เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยคำนึงถึงการลดการสูญเสียวัตถุดิบ ชิ้นงาน และการลดระยะเวลาในการพัฒนา และการผลิตผลิตภัณฑ์ใด ๆ ที่ต้องการ

โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษากระบวนการผลิตแบบ RIM คุณสมบัติของโพลียูรีเทน และนำเทคโนโลยี Computer-Aided Design / Computer-Aided Engineering (CAD/CAE) และ

วิศวกรรมย้อนรอย หรือ Reverse Engineering มาประยุกต์ใช้ในการช่วยออกแบบฝาครอบ
 ระดับกรอบไฟฟ้าในเวลานั้น และประหยัดต้นทุนในการผลิต การสร้างชิ้นงานทดสอบ การ
 ออกแบบแม่พิมพ์ และการตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน เป็นต้น เพื่อเป็นแนวทางในการผลิต
 ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ของบริษัท เช่น ชิ้นส่วนสนับสนุนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนสั่งทำพิเศษ
 (Special Order) ที่มีจำนวนความต้องการไม่มากนัก และงานต้นแบบ (Prototype) เป็นต้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกแบบ Reaction-Injection Molding (RIM)
2. ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของโพลียูรีเทน
3. ศึกษาขั้นตอนการใช้เทคโนโลยี CAD ในการออกแบบชิ้นงานโดยใช้ซอฟต์แวร์

Pro/ENGINEER

4. ศึกษาขั้นตอนการใช้เทคโนโลยี CAE ในการวิเคราะห์การฉีดแบบทำปฏิกิริยาโดยการ
 ใช้ซอฟต์แวร์ Moldflow Plastic Insight
5. นำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาปรับปรุงเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสมบูรณ์

ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. แนวทางในการออกแบบและการผลิตที่เหมาะสม ทำให้สามารถลดต้นทุนและเวลาใน
 การผลิต เพื่อให้สามารถแข่งขันในตลาดอุตสาหกรรมรถยนต์ได้
2. ลดการสูญเสียวัตถุดิบสำหรับชิ้นงาน และแม่พิมพ์
3. สามารถถ่ายทอดเทคโนโลยีจากงานวิจัยให้กับผู้ประกอบการได้ ซึ่งในประเทศไทยมี
 การผลิตชิ้นงานด้วยเครื่อง RIM น้อย
4. สามารถนำแนวทางการผลิตที่เหมาะสมไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์รูปแบบอื่น เช่น
 ชิ้นงานต้นแบบ ผลิตภัณฑ์สนับสนุนอุตสาหกรรมไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์
5. ลดการพึ่งพา Know-How และ Know-Why จากต่างประเทศได้

การตรวจเอกสาร

1. กรรมวิธีการผลิตแบบ RIM

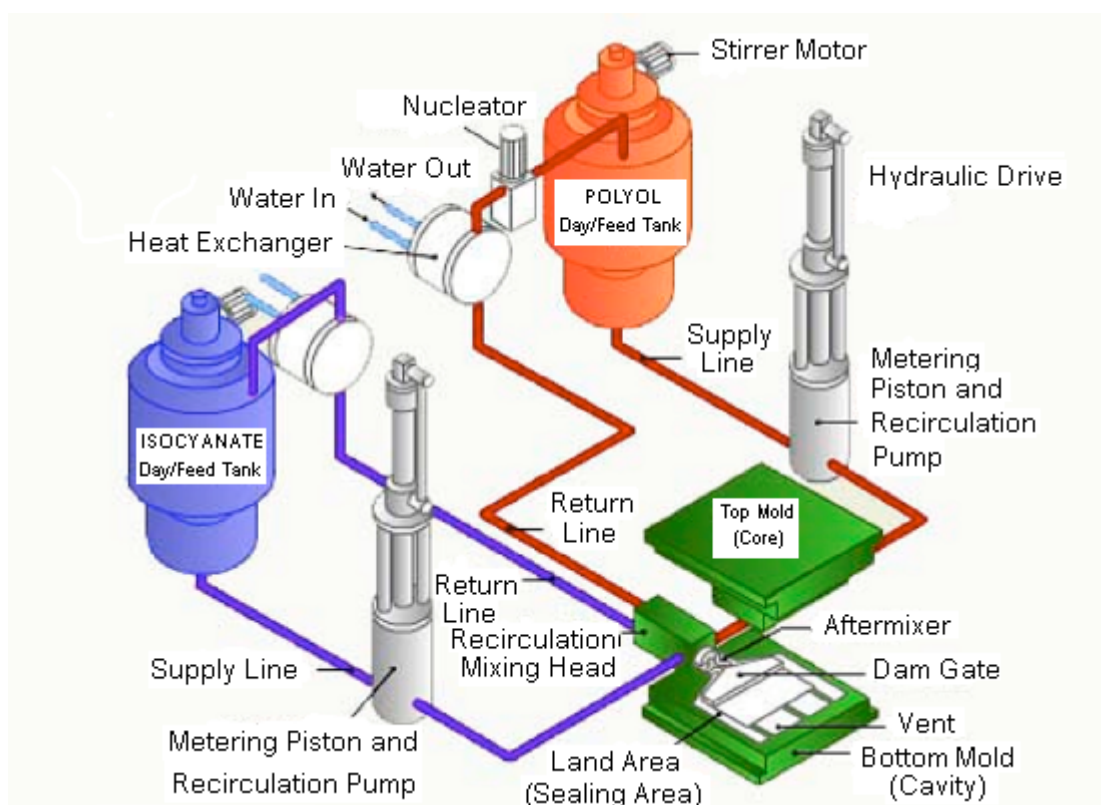
กระบวนการผลิตพลาสติกมีหลายวิธี เช่น กระบวนการฉีดแบบปฏิกิริยา (Reaction-Injection Molding, RIM) และกระบวนการฉีดพลาสติกด้วยความร้อน (Thermoplastic-Injection Molding, TIM) โดยมีความแตกต่างในเชิงผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นอยู่กับจำนวนที่ต้องการผลิต เช่น ปริมาณที่ผลิต ขนาดชิ้นงาน ความคงทนแข็งแรง และค่าใช้จ่ายในการผลิต เป็นต้น

กระบวนการฉีดแบบปฏิกิริยา หรือ RIM เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยใช้วัตถุดิบที่เป็นของเหลว 2 ชนิด ฉีดเข้าในโพรงแม่พิมพ์ เมื่อได้เวลาที่เหมาะสม ชิ้นงานจะแข็งตัว และได้รูปทรงตามต้องการ อัตราส่วนผสมของของเหลวและสารผสมอื่น ๆ สามารถกำหนดคุณสมบัติให้ได้ว่าวัสดุที่ต้องการ เช่น ความหนาแน่น ความอ่อนนุ่ม หรือ แข็งแกร่ง กระบวนการ RIM ยังเหมาะสำหรับงานขนาดใหญ่ (ขนาดมากกว่า 186 ตารางเซนติเมตรและน้ำหนักมากกว่า 1.5 กิโลกรัม) ชิ้นงานที่ต้องการความแข็งแรง และทนต่อแรงกระแทก สามารถสอดใส่ชิ้นส่วนโลหะ (เช่น ขดลวดและหมุดย้ำ) เพื่อเสริมความแข็งแรง และการประกอบได้

ความแตกต่างของกระบวนการ RIM เมื่อเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกประเภทอื่น คือ วัตถุดิบที่ใช้เป็นของเหลว ในขณะที่กระบวนการอื่นใช้วัตถุดิบที่เป็นของแข็งมีสภาพเป็นเม็ด หรือผงที่ต้องหลอมเหลวด้วยความร้อนก่อนฉีดเข้าแม่พิมพ์ นอกเหนือจากวัตถุดิบที่ใช้แล้ว กระบวนการ RIM มีลักษณะคล้ายกระบวนการ TIM แต่ต่างกัน คือ เป็นกระบวนการผลิตของวัตถุดิบที่ต่างเป็นของเหลวในขณะฉีดเข้าแม่พิมพ์แต่ความดันที่ใช้ในการฉีดของเครื่อง RIM มีระดับต่ำกว่า เมื่อเทียบกับความดันที่ใช้ในเครื่อง TIM เนื่องจากสารทำปฏิกิริยามีความหนืดต่ำ การแข็งตัวใน RIM เกิดเนื่องจากกระบวนการ Polymerization

ภาพที่ 1 แสดงแผนผังอุปกรณ์และการทำงานของเครื่อง RIM โดยมีถัง (Day Tank) สองถัง สำหรับบรรจุวัตถุดิบเหลว ถังแรกบรรจุ Isocyanate (นิยมเรียกเป็นสาร A) และถังที่สองบรรจุ Polyol (นิยมเรียกเป็นสาร B) ที่ผสมกับสารปรับปรุงคุณภาพ (Additive หรือ Compound เพื่อปรับแต่งให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ) โดยสารทั้งสอง (A และ B) ไปผสมกันภายใน Mixing

Head ในอัตราส่วนที่กำหนด ที่ความดันระหว่าง 100 ถึง 200 bar (Macosko, 1989) แล้วจึงฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ที่ความดันบรรยากาศ โดยมีอัตราการไหล ประมาณ 5 ถึง 1100 กรัมต่อนาที (เครื่อง RIM รุ่น STAR ECO II บริษัท Krauss-Maffei จำกัด) ความดันภายในแม่พิมพ์ขณะฉีด ประมาณ 3.5 ถึง 10.5 bar (บริษัท Rimnetics จำกัด, 2546)



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเครื่อง RIM (บริษัท Rimnetics จำกัด, 2546)

ร้อยละ 95 ของเครื่อง RIM ใช้สารเคมีสองตัวหลัก คือ Polyol กับ Isocyanate และสารอื่น ๆ เพื่อใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้ได้ตามต้องการ Polyol และ Isocyanate และสาร Additive ต่าง ๆ ทำปฏิกิริยากันกลายเป็นโพลียูรีเทน (Polyurethane หรือ PU) โดยสารทั้งสองผสมกันในห้องผสม (Mixing Chamber หรือ Mixing Head) ในการผสมนี้ อัตราการไหลของทั้งสองสารต้องควบคุมอย่างละเอียดในขณะผสม เช่น เครื่อง RIM ที่ผลิตโดยบริษัท Krauss Maffei รุ่น RIM-STAR ECO II (ภาพที่ 2) สามารถปรับอัตราการไหลที่ออกจาก Mixing Head ได้ละเอียดต่ำสุดที่ 5 กรัมต่อนาที โดยสามารถเลือกค่าอัตราการไหลของปั๊มได้ คือ 4, 16 และ 40 ลิตรต่อนาที (บริษัท Krauss Maffei จำกัด, 2004) ดังนั้นเครื่อง RIM จึงสามารถปรับค่าเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องของอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาได้

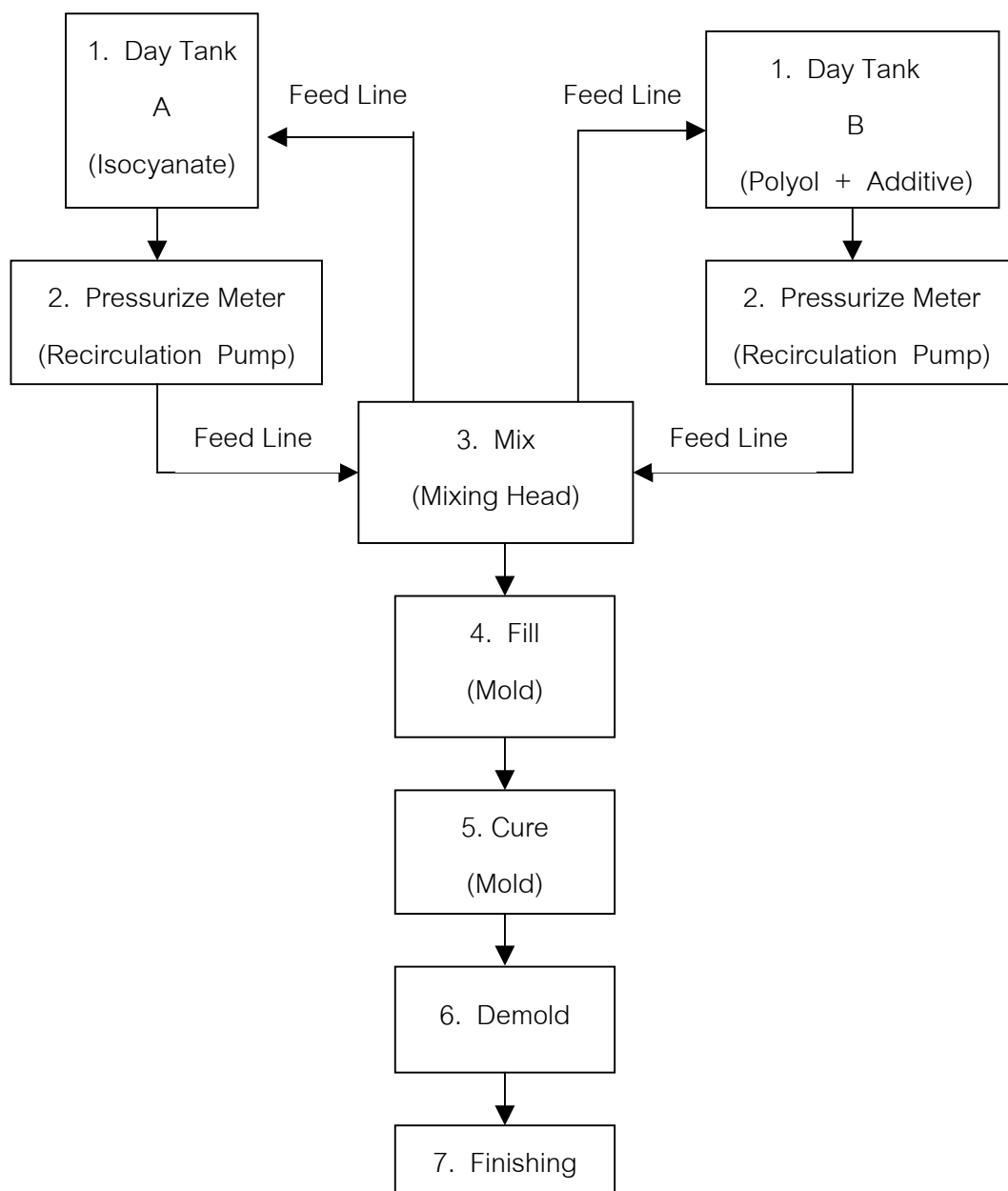


ภาพที่ 2 เครื่อง RIM รุ่น RIM-STAR ECO II (บริษัท Krauss Maffei จำกัด, 2004)

ลำดับกระบวนการผลิตแบบ RIM แบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนตามแสดงในภาพที่ 3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) บรรจุสาร A และ B ใน Day Tank ทำการควบคุมอุณหภูมิ และระดับการกระจายของสาร A และ B โดยการหมุนวนความดันต่ำ (Low - Pressure Recirculation) ในกระบวนการหมุนนี้ จะฉีดก๊าซเฉื่อย (หรือ Nucleation) เพื่อชดเชยการหดตัวในช่วงการแข็งตัว (หรือ Curing)
- 2) การควบคุมความดันของสาร A และ B ในหัวผสมเพื่อให้มีอัตราการไหลอย่างเพียงพอ โดยทำให้เกิดการผสมที่อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization)
- 3) ขั้นตอนการผสม (Mix)
- 4) ฉีดสาร A และ B ที่ผสมกันแล้วให้ไหลเต็ม (Fill) ในแม่พิมพ์
- 5) ขั้นตอนการแข็งตัว (Cure) เป็นช่วงเวลาที่สารทั้งสองเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็ง
- 6) การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (Demold)
- 7) การตัดแต่ง การทำความสะอาด การขัดแต่งผิวและการทาสี (Finishing)

ขั้นตอนที่ 1 ถึง 5 จัดเป็นกระบวนการหลัก (Primary Process) เกิดขึ้นในเครื่อง RIM ส่วนขั้นตอนที่ 6 และ 7 เป็นกระบวนการรอง (Secondary Process) ที่ต้องใช้แรงงานคนในการปฏิบัติ



ภาพที่ 3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการผลิตแบบ RIM

2. ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของ RIM

ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกโดยกระบวนการ RIM เมื่อเทียบกับกระบวนการ TIM สามารถสรุปได้ดังนี้

ก. ข้อได้เปรียบของกระบวนการ RIM

- 1) สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้รวดเร็ว สามารถใช้ได้กับชิ้นงานขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนสูง หรือ ชิ้นงานที่มีการสอดใส่โลหะ
- 2) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันในการฉีดตัว ดังนั้น แม่พิมพ์ที่ใช้จึงมีน้ำหนักเบา และราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ชนิดเดียวกันในกระบวนการฉีดแบบอื่น ๆ ราคาของแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับความต้องการความ ทนทาน หรือ จำนวนที่ต้องการการผลิต
- 3) การขยายตัวของก๊าซในแม่พิมพ์น้อย ค่าใช้จ่ายในการ Clamping จึงน้อยลงด้วย
- 4) การหดตัวของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดน้อย
- 5) ทนทานต่อการกัด ความร้อน และสภาวะอากาศ
- 6) ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ เมื่อผลิตในจำนวนที่ไม่มาก

ข. ข้อเสียเปรียบของกระบวนการ RIM

- 1) ความหนืดต่ำจึงให้เกิดปัญหาการเกิด Air Trap ในขณะที่ฉีดได้
- 2) การปลดชิ้นงานมีความยากลำบากเนื่องจากเป็นวัสดุเหลวที่มีความหนืดต่ำ จึงมีการแทรกซึมลงบนผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย โดยเฉพาะโพลียูรีเทนจะติดแน่นได้ดีกับผิวโลหะ
- 3) การแข็งตัวของชิ้นงานขนาดใหญ่ช้า ดังนั้นในกรณีที่ต้องการอัตราการผลิตสูงจึงต้องใช้แม่พิมพ์หลายชุด
- 4) สารเคมีที่ใช้ผลิตมีราคาค่อนข้างสูง
- 5) สารเคมีที่ใช้เป็นสารพิษ (Toxic) อาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ และสิ่งแวดล้อม
- 6) โพลียูรีเทนไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงสิ้นเปลืองวัสดุที่เสียในระหว่างการผลิต
- 7) ระยะเวลาในการผลิตชิ้นงานนานเนื่องจากต้องมีการตกแต่ง และทำสีหลังจากการฉีด
- 8) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง เนื่องจากมีหลายขั้นตอน และต้องใช้แรงงานคนจำนวนมากในการทำงานในขั้นตอนต่าง ๆ

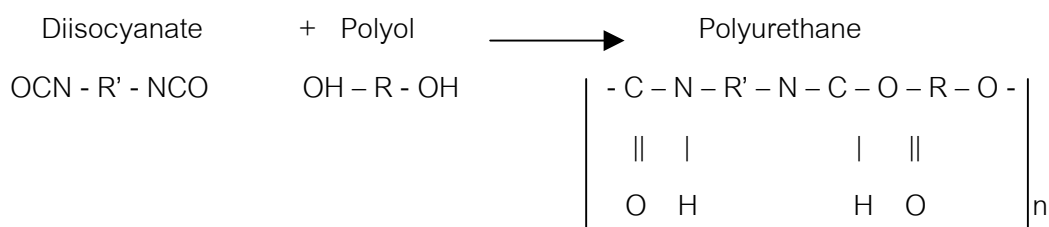
ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลทางเทคนิคเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการผลิตแบบ RIM และแบบ TIM (Rosato, 1990)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิค ระหว่างกระบวนการผลิตแบบ RIM และแบบ TIM
(Rosato, 1990)

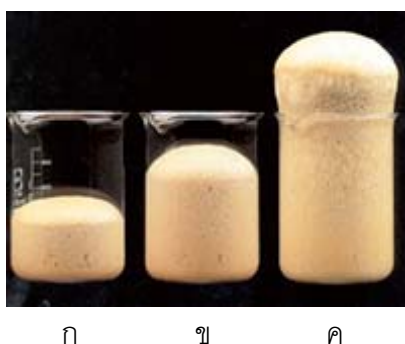
Details	RIM	TIM
Plastic temperature, °C	40 - 60	200 - 300
Plastic viscosity, Pa*s	0.5 - 1.5	100 -1,000
Injection Pressure, bar	100 - 200	700 - 800
Injection time, sec	0.5 - 1.5	5 - 8
Mold cavity pressure, bar	10 - 30	300 - 700
Gates	1	2 - 10
Clamping force, ton	80 - 400	2,500 - 10,000
Mold temperature, °C	50 - 70	50 - 80
Time in mold, sec	20 - 30	30 - 80
Annealing	30 min. @ 120 C	ไม่เกิด
Wall / thickness ratio	1/0.8	1/0.3
Part thickness, typical maximum, cm	10	1
Shrinkage Unreinforced, %	1.30 - 1.60	0.75 - 2.00
Shrinkage parallel to fiber, %	0.25	0.2
Shrinkage vertical to fiber, %	1.2	0.4
Inserts	ง่าย	แพง
Sink marks around metal inserts	ไม่เกิด	เกิดขึ้นชัดเจน
Mold prototype, months	1 - 3 (Epoxy)	3 - 5 (Steel)
Mold alterations	Cost - Effective	Costly

3. ส่วนประกอบของโพลียูรีเทน

โพลียูรีเทนเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง Isocyanate (สาร A) กับ Polyol (สาร B) โดยทั่วไปจะมีสารเร่งปฏิกิริยาผสมเพิ่มในส่วนของ Polyol เพื่อเพิ่มการทำปฏิกิริยาให้ดีขึ้นของทั้งสองสาร ได้เป็นพลาสติกโพลียูรีเทนที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ภาพที่ 4 แสดงแผนผังการทำปฏิกิริยาทางเคมี และภาพที่ 5 แสดงปฏิกิริยาทางเคมี ในภาชนะเปิดรูปทรงกระบอก โดยภาพที่ 5 ก เป็นปฏิกิริยาภายหลังเริ่มต้นการผสมเล็กน้อย ภาพที่ 5 ค เป็นสภาพภายหลังปฏิกิริยาลิ้นสุด (ภายในเวลา 12 วินาที)



ภาพที่ 4 แผนผังการทำปฏิกิริยาทางเคมีของโพลียูรีเทน (Woods, 2000)



ภาพที่ 5 การทำปฏิกิริยาของโพลียูรีเทน (บริษัท Bayer จำกัด, 2548)

3.1 Isocyanate

คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของโพลียูรีเทนสามารถกำหนดโดยชนิดของ Isocyanate ที่นำมาใช้ Isocyanate ที่นิยมใช้มี 2 สารหลัก คือ Toluene Diisocyanate (TDI) และ Diisocyanate – Diphenyl Methane (MDI) โดยประมาณ 90% ของ Isocyanate ที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือ TDI

Toluene Diisocyanate (TDI) ที่อุณหภูมิห้องมีสถานะเป็นของเหลว หรือ เป็นผลึกที่อุณหภูมิห้อง มีจุดหลอมเหลวที่ 22°C ทำปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 50°C และทำปฏิกิริยารุนแรงกับกรด เบส และแอลกอฮอล์ ซึ่งทำให้เสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้ และการระเบิด เมื่อเกิดการสลายตัวจากการเผาไหม้ จะเกิด 2,4 -Toluenediamine ซึ่งเป็นสารอันตรายต่อมนุษย์

Diisocyanate – Diphenyl Methane (MDI) ที่อุณหภูมิห้อง มีสถานะเป็นของแข็ง มีจุดหลอมเหลวที่ 38°C ทำปฏิกิริยารุนแรงกับกรด เบส และแอลกอฮอล์ ซึ่งทำให้เสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้ และการระเบิด เมื่อเกิดการสลายตัวจากการเผาไหม้จะเกิด ไฮโดรเจนไซยาไนด์ ไอร์อะเซของไนโตรส และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของ TDI และ MDI
 ตารางที่ 3 แสดงความหลากหลายของผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนที่ใช้ MDI โดยค่า Average Functionality คือจำนวนของ Isocyanate โดยเฉลี่ยที่ทำปฏิกิริยากับจำนวน Hydroxyl Group ต่อหนึ่งโมเลกุลของ Polyol ตารางที่ 4 แสดงค่าต่าง ๆ ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ และทางกลของโพลียูรีเทนแบบต่างๆ

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ TDI และ MDI (กรมควบคุมมลพิษ, 2005)

คุณสมบัติ	TDI	MDI
สถานะ	เหลว ผลึก	ของแข็ง แผ่น
สี	ขาวถึงเหลืองอ่อน	ขาว เหลืองอ่อน
กลิ่น	กลิ่นผลไม้	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	174.16	250.3
จุดเดือด $^{\circ}\text{C}$	251	314
จุดหลอมเหลว $^{\circ}\text{C}$	22	37
ความถ่วงจำเพาะ	1.22	1.2

ตารางที่ 3 ประเภทของโพลียูรีเทนที่ใช้ MDI (Woods, 2000)

Average Functionality	Product Description	Polyurethane Type	Main Applications
2.0	Pure MDI	Elastomer สมรรถภาพทน ทานต่อรอยขีดข่วนสูง	พื้นรองเท้า ผ้ารัดรูปเช่นชุดว่ายน้ำ ที่หุ้มอุปกรณ์แบบยืดหยุ่น ชิ้นงานเทอร์โมพลาสติก
2.01 - 2.1	Modified Liquid Pure MDI	Elastomer สมรรถภาพทน ทานต่อรอยขีดข่วนสูงและ Elastomer ที่มีค่าความหนา แน่น 0.3-1 g/cm ³	พื้นรองเท้า ผ้ารัดรูปเช่นชุดว่ายน้ำ RIM Reinforced RIM Elastomer หล่อ
2.1 - 2.3	Liquid Low Functionlity Polyisocyanates.	โฟมแบบอ่อน กึ่งแข็ง และแข็ง	ตู้อุปกรณ์ไฟฟ้า ฉนวนกันความร้อน อุปกรณ์กันรั่ว และ Elastomer หล่อ
2.5	Low Viscosity Liquid Polyisocyanate.	โฟมแบบยืดหยุ่นความหนา แน่นสูงและโฟมที่มีความแข็ง	พรมเช็ดเท้ายาง ตู้คอมพิวเตอรื
2.7	Low Viscosity Poly- meric MDI.	โฟมแข็งความหนาแน่นต่ำ โฟมกึ่งแข็ง Isocyanurate Foam และสารช่วยการยึดติด	ฉนวนกันความร้อน โฟมดูดซับพลังงาน Isocyanurate Foam. Building Panels. อุปกรณ์เสริมความแข็งแรง Chipboard and Foundry. สารยึดติดของทราย
2.8 - 3.1	High Functionality Polymeric MDI	โพลียูรีเทนแบบแข็ง และโฟม Isocyanurate	โฟมแบบแข็งและโฟมแบบ Slabstock.

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกลของโฟมรีเทนแบบต่าง ๆ (Automation Creations, Inc,2004)

Properties	Thermoset PU						Thermoplastic PU					
	Solid RIM			Elastomer			Foam			Elastomer		
				Unreinforced			Unreinforced			Glass Filled		
	ช่วง	เฉลี่ย	ช่วง	เฉลี่ย	ช่วง	เฉลี่ย	ช่วง	เฉลี่ย	ช่วง	เฉลี่ย	ช่วง	เฉลี่ย
Density (g/cc)	1.09-1.13	1.11	1.04-1.10	1.05	0.95-1.25	1.16	0.03-0.88	0.235	1.15-1.17	1.39	1.15-1.25	1.21
Linear Mold Shrinkage (cm/cm) *10 ³	8-11	9.5	8-17	12	4-8	6.1	1-10	6.3	1-20	3	8	-
Linear Mold Shrinkage, Transverse (cm/cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.008	-
Water Absorption (%)	-	-	3.3	-	-	-	2.4-38	16.3	0.34-0.8	0.46	0.96-1.22	1.1
Water Absorption at Saturation (%)	-	-	3.2	-	0.1-2.8	1.2	-	-	-	-	0.96-1.22	1.1
Moisture Absorption at Equilibrium (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15-0.2	0.18
Hardness, Rockwell M	-	-	-	-	-	-	-	-	29	-	-	-
Hardness, Shore A	-	-	-	-	-	-	-	-	90	-	80-97	89
Hardness, Shore D	75-76	75.5	51-69	59.3	60	-	28-81	58.3	65-95	70	34-73	52.7
Ultimate Tensile Strength (MPa)	39-48	43.5	11-29	21.8	16-38	27	0.115-33	6.2	14-103	46	34-41	37.9
Yield Tensile Strength (MPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	5-28	11.5
Elongation at Break (%)	9-10	9.5	230	230	15-200	86.5	3.2-176	42.5	3.5-300	32.4	50-540	2.4
Tensile Modulus (GPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6-5	2.1	-	-
Flexural Modulus (GPa)	1.4-2.03	1.7	0.4	0.4	0.4-2.07	1.2	0.22-1.68	0.88	0.3-3.7	1.6	0.03-0.72	0.16
Flexural Yield Strength (MPa)	60-76	68	-	-	-	-	6.6-62	28	14-124	45.5	-	-
Compressive Yield Strength (MPa)	35	-	-	-	-	-	0.034-41	8	8-140	38.8	-	-
Shear Strength (MPa)	0	-	-	-	-	-	0	0	0	0	38.5	-

TDI ส่วนใหญ่ถูกใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากจุดหลอมเหลวของ TDI มีสถานะเป็นของเหลวจึงสะดวกในการเก็บรักษา ส่วน MDI จะต้องเก็บในสถานะของแข็ง จึงเก็บรักษาได้ยากกว่าโดยเฉพาะในประเทศที่อยู่ในเขตร้อน

3.2 Polyol

Polyol ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากโพลียูรีเทน คือ Polyether ที่มีกลุ่มของ Hydroxyl รวมอยู่ด้วย (หรือที่เรียกว่า Hydroxyl – Terminated Polyether) Polyether ประเภทนี้มีสัดส่วนการใช้ในอุตสาหกรรมสูงถึง 90% ของ Polyether ทั้งหมด แต่มีราคาแพงกว่า Polyether ธรรมดา Polyol ถูกพัฒนาให้สามารถทำปฏิกิริยากับ Isocyanate ได้อย่างสมบูรณ์และทำให้ได้โพลียูรีเทนที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ตารางที่ 5 แสดงลักษณะจำเพาะของ Polyol

ตารางที่ 5 ลักษณะจำเพาะของ Polyol (Woods, 2000)

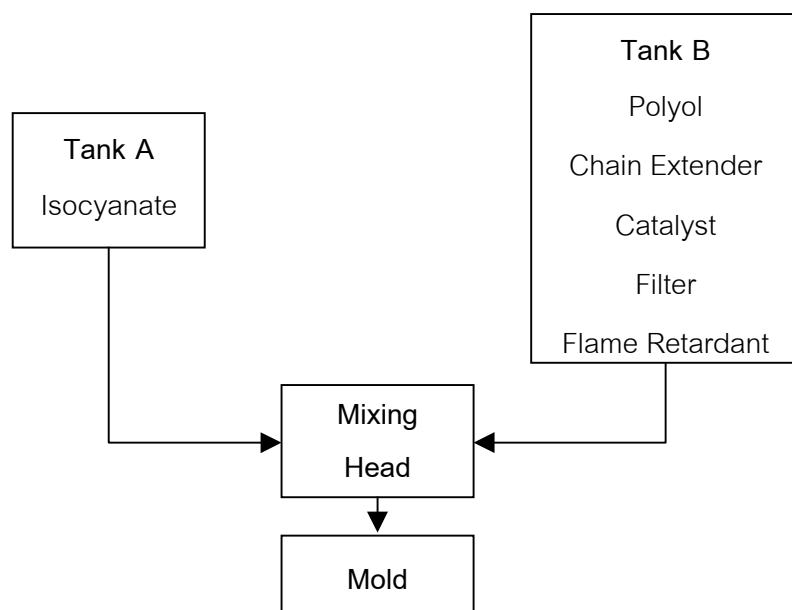
Characteristic	Elastomer Foam and Flexible Foam	Solid Foam and Rigid Foam
ช่วงของมวลโมเลกุล	1000 ถึง 6500	400 ถึง 1200
Functionality Range	2 ถึง 3	3 ถึง 8

3.3 สารปรับแต่งคุณสมบัติของโพลียูรีเทน

สารปรับแต่งคุณสมบัติของโพลียูรีเทน หรือ Additive ที่ผสมกับ Polyol เป็นองค์ประกอบที่สามที่เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับ Isocyanate และ Polyol. Additive มีหลายชนิดด้วยสัดส่วนที่เหมาะสมของแต่ละชนิด สามารถปรับคุณสมบัติของโพลียูรีเทนได้ เช่น การเร่งปฏิกิริยา ความแข็งแรง และการติดไฟ เป็นต้น ตารางที่ 6 สรุปวัสดุที่ใช้เป็น Additive ในโพลียูรีเทน และภาพที่ 6 แสดงแผนผังการผสมสารปรับแต่งคุณสมบัติของโพลียูรีเทนในกระบวนการ RIM

ตารางที่ 6 วัสดุที่ใช้เป็นสารปรับแต่งคุณสมบัติของโฟลียูรีเทนหรือ Additive (Woods, 2000)

ประเภทของ Additive	วัสดุ	จุดประสงค์	หมายเหตุ
Catalyst	Tertiary Amines Organometallic Compounds	เร่งปฏิกิริยาให้โฟลียูรีเทนแข็งเร็วขึ้น	-
Cross – Linking	Polyol		
Chain - Extending Agent	Polyamines	ให้การยึดเกาะของโฟลียูรีเทนดีขึ้น	-
Blowing Agents	Water, Chlorofluoromethanes (CFC, HCFC)	ผลิตโฟม	น้ำทำปฏิกิริยากับ Isocyanate จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
Surfactants	Silicone Fluids	ปรับโครงสร้างของโฟม ช่วยในการขึ้นรูป	-
Colors	Various Pigments, Carbon Black	ใส่สี	อาจใช้เพื่อระบุประเภทของโฟม
Fillers	Particulate Inorganic ไยแก้ว	ปรับปรุงสมบัติทางกล	-
Flame Retardants	Phosphorus or Halogen Containing Molecules.	ลดการติดไฟ	-
Smoke Suppressants	Polycarboxylates, Hydrated Oxides, Borates	ลดควันเมื่อเผาไหม้	-
Release Agent	Lubricants	แกะชิ้นงานออกได้ง่าย	-



ภาพที่ 6 การผสมสารปรับแต่งคุณสมบัติของโพลียูรีเทนในกระบวนการ RIM (Woods, 2000)

4. คุณสมบัติทั่วไปของโพลียูรีเทน

ลักษณะทั่วไปของโพลียูรีเทน (Polyurethane หรือ PU) เกิดจากกระบวนการ Polyaddition ซึ่งคล้ายคลึงกับกระบวนการ Polymerization โดยที่การสร้างโคโมเลกุล ไม่มีการสลายตัวของสารโมเลกุลต่ำ วัตถุประสงค์ของกระบวนการนี้จะเป็นโมโนเมอร์แตกต่างกันสองชนิด ซึ่งแต่ละชนิดเป็นสารประกอบ 2 ธาตุ หรือ หลายธาตุ ในการรวมกัน (Addition) โมโนเมอร์เหล่านี้ จะเกิดการสลับที่ของอะตอมต่างๆ ส่วนใหญ่จะเป็นอะตอมของไฮโดรเจนของกลุ่มหนึ่งไปยัง โมโนเมอร์อีกตัวหนึ่ง หลักการนี้เริ่มใช้ตั้งแต่ปี ค. ศ. 1954 พลาสติกที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Thermosetting ชื่อทางการค้าที่คุ้นเคยได้แก่ Durethan U และ Ultramid U.

โพลียูรีเทนแตกต่างจากพลาสติกทั่วไป คือ สามารถกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเองได้จากอัตราส่วนของ Isocyanate ต่อ Polyol ซึ่งจะกำหนดได้ที่หัวผสม (Mixing Head) ของเครื่องฉีด ดังนั้น สภาพของชิ้นงานที่ผลิตจากโพลียูรีเทนจึงอยู่ในสถานะของแข็งที่แข็งเหมือนอิฐ และไม่ไปจนถึงสภาพที่อ่อนนุ่ม เช่น ฟองน้ำ และโฟมได้

โพลียูรีเทน เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM โพลียูรีเทนแบ่งเป็นสองประเภท คือ

1) แบบอ่อน หรือ Flexible หรือ โพลียูรีเทนอ่อน (หรือเรียกเป็นแบบยืดหยุ่น หรือ Flexible Polyurethane Form - PUF)

2) แบบแข็ง หรือ Rigid หรือ โพลียูรีเทนแข็ง (Rigid Polyurethane Form - PUR)

คุณสมบัติทั่วไปของโพลียูรีเทน ได้แก่ ค่าการนำความร้อนต่ำมาก ความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ติดไฟช้า และดับได้เอง โพลียูรีเทนอ่อน นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เพอร์นิเจอร์และอุปกรณ์รถยนต์ สำหรับโพลียูรีเทนแข็ง สามารถรับแรงได้ดี ทนต่อแรงดึงสูง จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรง การคงรูป และ เป็นฉนวนไฟฟ้า

โพลียูรีเทน ยังมีลักษณะเป็นพลาสติก ได้แก่ Thermoplastic – Polyurethane (TPU) โพลียูรีเทนประเภทนี้ สามารถนำไปใช้ในงานหลายลักษณะ เช่น อุปกรณ์รถยนต์ ท่อผ้าใบส่งน้ำ เครื่องมือในกระบวนการอาหาร สายพานขับ อุปกรณ์กีฬา เป็นวัสดุสำหรับเคลือบสายไฟ และสายเคเบิล เป็นต้น คุณสมบัติทั่วไปของ TPU คือ ทนต่อแรงกด แรงกระแทก การสึกกร่อน สภาพอากาศ และมีความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิต่ำ

4.1 โพลียูรีเทนโฟม

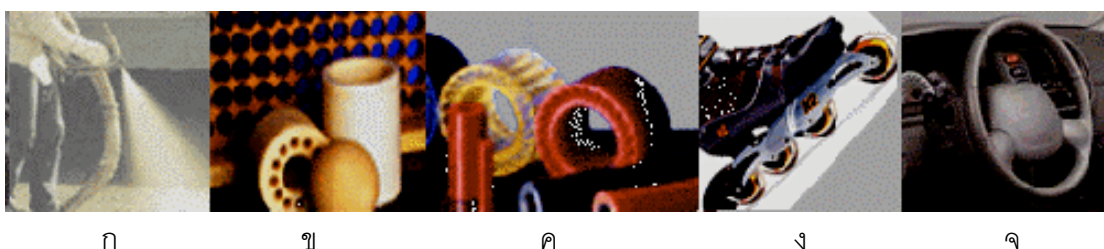
โพลียูรีเทนยังได้รับความนิยมในการผลิตโฟม (Foam) โดยอาศัยกระบวนการผลิตแบบ RIM เพราะไม่ต้องใช้สาร CFC หรือ HCFC คุณสมบัติของโฟมที่ได้เป็นแบบ Thermosetting

โพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane Foam) เกิดจาก Air Trap แทรกอยู่ภายในเนื้อของขึ้นงานภายหลังการทำปฏิกิริยาเคมีของ Isocyanate กับ Polyol โฟมโพลียูรีเทนแบ่งลักษณะตามโครงสร้างของขึ้นงานที่ผลิต ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1) แบบโครงสร้างเป็นโฟมทั้งชิ้น

2) แบบเป็นโฟมภายในแต่ผิวภายนอกเป็นวัสดุอื่น นิยมเรียกเป็น โฟมโครงสร้าง (Structural Foam) หรือ Integral Foam

กรรมวิธีการผลิตโฟมใช้ได้ทั้งแบบ Injection, Extrusion, Calendering และ Compression แต่ที่นิยมใช้ คือ แบบ Injection จากเครื่อง RIM โพลียูรีเทนโฟมเป็นการผลิตจากการผสมตัวทำปฏิกิริยา Diisocyanate (โดยทั่วไป คือ Tolylene-Diisocyanate, TDI) กับ Polyol (โดยทั่วไป คือ Polyether) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ภาพที่ 7 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยใช้โพลียูรีเทนโฟม โดยภาพที่ 7 ก คือ การพ่นโฟมฉนวนกันความร้อน ภาพที่ 7 ข คือ ฉนวนแบบอ่อนที่ใช้หุ้มอุปกรณ์ ภาพที่ 7 ค คือ พลาสติกเคลือบหุ้มอุปกรณ์ ภาพที่ 7 ง ล้อของสเก็ต และ ภาพที่ 7 จ พวงมาลัยรถยนต์ นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับบุได้พรม ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ พูกที่นอน และอุปกรณ์รถยนต์



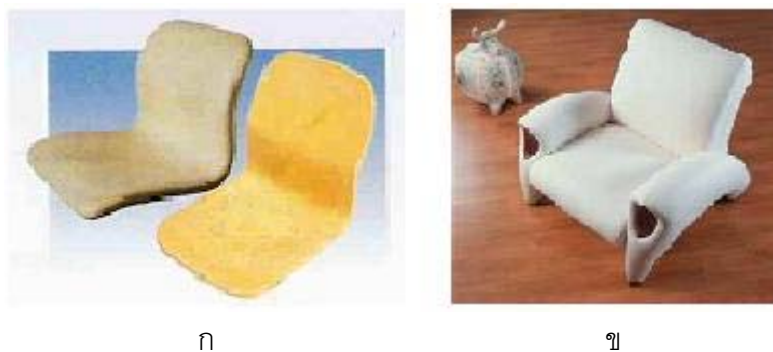
ภาพที่ 7 ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ทำจากโพลียูรีเทน (บริษัท Polyurethaneweb จำกัด, 2003)

โพลียูรีเทนโฟมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบโฟมอ่อน (Flexible Foam) และแบบโฟมแข็ง (Rigid Foam) รายละเอียดของโพลียูรีเทนโฟมของทั้งสองประเภท มีดังนี้

4.1.1 โฟมอ่อน

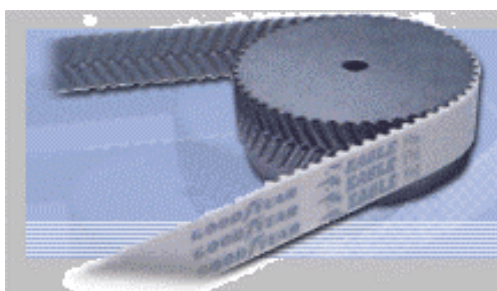
โฟมอ่อน (Flexible Foam) สามารถทำให้มีขนาด และรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย โดยการตัดแต่ง หรือ การใช้แม่พิมพ์ โฟมอ่อนนิยมใช้ในการผลิตเนื่องจากประหยัดต้นทุนการผลิตกว่าวัสดุอื่น และทำความสะอาดได้ง่าย โฟมอ่อนแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก. โฟมอ่อนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Flexible Foam) จะมีค่าความหนาแน่นประมาณ 10 ถึง 80 kg/m³ โครงสร้างมีพันธะเป็นแบบ Lightly Cross Linked โดยมีลักษณะเซลล์แบบเปิด (Open Cell) อากาศจึงสามารถผ่านได้ โฟมประเภทนี้นิยมใช้ผลิตเป็นเบาะเฟอร์นิเจอร์ เบาะรถยนต์ และที่รองแขนรถยนต์ (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของเฟอร์นิเจอร์ที่ทำจากโพลียูรีเทน (บริษัท ไทยยูเนี่ยนฟิฟู จำกัด, 2004 และบริษัท JS Internet จำกัด, 2005)

ข. โฟมอ่อนความหนาแน่นสูง (High Density Flexible Foam) มีความหนาแน่นมากกว่า 100 kg/m^3 ซึ่งรวมถึง Self – Skinning Foam และ Microcellular Elastomer นิยมใช้ในการผลิตอุปกรณ์ประดับยนต์ แผ่นรองรองเท้า และสายพาน (ภาพที่ 9) Self – Skinning Foam ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์จะเป็นแบบที่มีความหนาแน่นสูงและมวลโมเลกุลต่ำ เช่น พวงมาลัย และที่รองหัวของเบาะรถ ส่วน Microcellular Elastomer นำมาใช้ผลิตรองเท้า เนื่องจากมีความทนทานต่อรอยขีดข่วนสูง มีอายุการใช้งานนาน น้ำหนักเบา มีคุณสมบัติต้านทานความร้อนสูง สามารถทำได้ตั้งแต่รองเท้าเซฟตี้ รองเท้ากีฬา และรองเท้าแฟชั่น



ภาพที่ 9 สายพานที่ทำจาก High Density Flexible Foam (บริษัท Goodyear จำกัด, 2003)

4.1.2 โฟมแข็ง

โฟมแข็ง (Rigid Foam) มีความแข็งแรง แต่ความหนาแน่นต่ำกว่าโลหะ จึงเหมาะสำหรับการทำฉนวนกันความร้อน (ภาพที่ 10) เนื่องจากมีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ต่ำ นิยมใช้เป็นผนังกันความร้อนของอาคารสำนักงาน และที่พักอาศัย เป็นฉนวน

ในตู้เย็น ตู้แช่สินค้าที่ต้องการเก็บรักษาความเย็นหรือห้องแช่แข็ง โฟมแข็งที่นิยมใช้เป็นแบบความหนาแน่นต่ำ (Low Density Rigid Foam) โครงสร้างมีพันธะเป็นแบบ Highly Cross Linked และลักษณะเซลล์เป็นแบบปิด (Closed Cell) Air Trap ภายในจะถูกปิดสนิททำให้อากาศไม่สามารถผ่านไปได้ โดยทั่วไปเซลล์ปิดจะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าเซลล์เปิด การบรรจุภายในเซลล์ด้วยก๊าซ Chlorofluoromethane ทำให้ค่าการนำความร้อนน้อยกว่าเซลล์ที่มีอากาศบรรจุ ดังนั้น หนวนที่ดีจะเป็นโฟมแข็งแบบเซลล์ปิดไม่ต่ำกว่า 90% และมีความหนาแน่นมากกว่า 30 kg/m^3 ภาพที่ 11 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ประยุกต์ใช้โพลียูรีเทน เป็นชิ้นส่วนบัวประดับอาคาร



ภาพที่ 10 หนวนกันความร้อนที่ทำจากโฟมโพลียูรีเทน (บริษัท Elliott จำกัด, 2003)



ภาพที่ 11 การประยุกต์ใช้โพลียูรีเทนของชิ้นส่วนประดับอาคาร (บริษัท ไทยยูเนี่ยนฟิยู จำกัด, 2004)

4.2 โพลียูรีเทนแข็งและอีลาสโตเมอร์โพลียูรีเทน

ถึงแม้ว่า Polyurethane Foam มีความนิยมนมากถึง 90% ของตลาดโพลียูรีเทน แต่โพลียูรีเทนแข็ง (Solid Polyurethane) เป็นโพลียูรีเทนที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์นิยมผลิตเป็น กันชนรถ และอุปกรณ์ตกแต่งตัวถังรถ ส่วนอีลาสโตเมอร์โพลียูรีเทน (Elastomer Polyurethane) มีคุณสมบัติป้องกันรอยขีดข่วนได้ดี และสามารถกัน

การซึมของน้ำ และน้ำมัน มีค่าความแข็ง (Hardness) อยู่ระหว่าง 90° – 96° Shore A นิยมใช้ในการผลิตพื้นรองเท้า (ภาพที่ 12) รถยนต์ที่ผลิตในทวีปยุโรปรุ่นก่อน ๆ จะใช้อีลาสโตเมอร์โพลียูรีเทน ผลิตเป็นกันชนรถ



ภาพที่ 12 พื้นรองเท้าที่ทำจาก อีลาสโตเมอร์โพลียูรีเทน (บริษัท Aerosoft จำกัด, 2003)

5. ความปลอดภัยของโพลียูรีเทนและสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการ RIM ได้แก่ Isocyanate และ Polyol ซึ่งต่างเป็นสารเคมี ถ้าสารเคมีหรือโพลียูรีเทนที่ผลิตออกมาไม่ได้รับความดูแลอย่างถูกต้อง จะมีผลกระทบทั้งความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ประจำเครื่อง และต่อสิ่งแวดล้อม

สภาพของเครื่อง RIM ถ้าไม่ได้รับการบำรุงรักษาอย่างถูกต้อง อาจทำให้เครื่องจักรเสียหาย และเกิดอันตรายต่อผู้คนในโรงงานได้

5.1 อันตรายของสารเคมีต่อสุขภาพ

สาร Isocyanate ของโพลียูรีเทน เป็นสารพิษ (Toxic) หรือ สารพิษที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ Isocyanate สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ จากการหายใจ การสัมผัสผ่านผิวหนัง หรือบริเวณที่เป็นแผล และผ่านปาก อันตรายของ Isocyanate ต่อร่างกายและสุขภาพ (กรมควบคุมมลพิษ, 2005) ได้แก่

1) การหายใจหรือการสูดดม ทั้ง MDI และ TDI จะทำให้เกิดอาการ ระคายเคือง จมูก และระบบทางเดินหายใจ เจ็บคอ ไอ หายใจติดขัด เจ็บและแน่นหน้าอก และหืดหอบได้ สำหรับ TDI มีอาการเพิ่มเติม เช่น คอแห้ง น้ำมูกไหล วิงเวียน หลอดลมอักเสบ หอบหืด ปวด อักเสบ และน้ำท่วมปอด

2) การสัมผัสผ่านผิวหนัง MDI จะก่อให้เกิดผื่นแดง และปวด ถ้าเป็นสาร TDI จะ แสบไหม้เป็นผื่นแดง บวม ทำให้ผิวคล้ำและแข็ง เมื่อมีการสัมผัสบ่อย ๆ

3) การกลืนหรือกินเข้าไปสู่ร่างกาย ถ้าเป็นสาร MDI จะทำให้ปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน ส่วน TDI เป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อปาก คอ และท้อง

4) การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิด การระคายเคืองตา ทำให้น้ำตาไหล ตาแดง ตา บวม ปวดตา และการมองเห็นไม่ชัดเจน

ส่วน Polyether และ Polyester Polyols เป็นสารที่ไม่มีอันตรายร้ายแรงเท่า Isocyanate การป้องกันร่างกายจากอันตรายที่อาจเกิดจาก Isocyanate และ Polyol ขณะ ทำงานเกี่ยวกับ โฟลียูรีเทน ได้แก่ การใส่อุปกรณ์ป้องกัน จมูก ปาก ตา และผิวหนัง ควรใส่ หน้ากากที่มีวัสดุกรองอากาศ สวมแว่นตาแบบมีขอบปกป้องกันรอบดวงตา สวมถุงมือ และเสื้อผ้าที่ ปกป้องร่างกายอย่างมิดชิด ต้องทำความสะอาดถุงมือทุกครั้งหลังใช้งาน และถุงมือต้องตรวจ สอบการฉีกขาดเป็นประจำ จัดเตรียมอุปกรณ์ปฐมพยาบาลเบื้องต้น เช่น อากาศบริสุทธิ์ หน้ากาก ออกซิเจน น้ำยาล้างมือ น้ำยาล้างตา และ น้ำยาทำความสะอาดร่างกาย

การปฐมพยาบาลเบื้องต้นก่อนนำส่งแพทย์ เมื่อรับสารเคมีเข้าสู่ร่างกาย มีข้อควร ปฏิบัติดังต่อไปนี้

1) ถ้าสูดดม Isocyanate ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปบริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้า หายใจติดขัด ให้ใช้ออกซิเจนช่วย ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ให้ผู้ป่วยอยู่ในท่าสบาย อย่าให้ผู้ป่วยเคลื่อนไหวโดยไม่จำเป็น ถ้ามีอาการน้ำท่วมปอดเกิดขึ้นภายใน 48 ชั่วโมง ให้นำส่ง แพทย์

2) ถ้ากลืน หรือ กินเข้าไป ให้ผู้ป่วยบ้วนล้างปากด้วยน้ำ และดื่มน้ำ 250 ml. เพื่อ เจือจางสารในท้อง (ห้ามนำสิ่งใดเข้าปากผู้ป่วยที่หมดสติ) ไม่ต้องกระตุ้นให้อาเจียน ถ้าเกิด อาเจียนขึ้น ให้ดื่มน้ำชาแล้วส่งไปพบแพทย์ทันที

- 3) ถ้าสัมผัสผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที (ถ้าใช้น้ำอุ่น 20 นาที) โดยให้น้ำไหลผ่านจนสารเคมีออกหมด ให้ถอดเสื้อผ้า และรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำส่งแพทย์ทันที
- 4) ถ้าสัมผัสลูกตา ให้ล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที ถ้าสารเป็นของแข็งห้ามขยี้ตา ลืมตาและกลอกตาในน้ำ 2 ถึง 3 นาที จนสารออกแล้วใช้น้ำล้างแยก เปลือกตาออก นำไปส่งแพทย์

5.2 การเก็บรักษาสารเคมี

เนื่องจาก Isocyanate ทั้งแบบ MDI และ TDI ทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายได้ ดังนั้น การจัดเก็บก่อนนำมาใช้ควรได้รับการดูแลให้เหมาะสม โดยมีข้อควรปฏิบัติดังนี้

- 1) เมื่อไม่ได้ใช้งาน เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด มีป้าย หรือ ฉลากติดกำกับ โดยมีคำเตือน และข้อควรระวัง
- 2) เก็บในบริเวณที่สะอาด เย็น แห้ง และมีด
- 3) เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
- 4) แยกบริเวณจัดเก็บออกจาก กรด เบส เอมีน (Amines) และแอลกอฮอล์ ไม่ควรเก็บในพื้นที่ทำงาน
- 5) สถานที่จัดเก็บ ต้องห่างจาก ความร้อน และเปลวไฟ และกำหนดเป็นให้เขตห้ามสูบบุหรี่
- 6) เก็บภาชนะบรรจุให้สะดวกในการเคลื่อนย้าย
- 7) ภาชนะบรรจุของสารที่ใช้แล้ว จะมีสารเคมีตกค้างอยู่ ซึ่งเป็นไอระเหย หรือของเหลวที่อาจเป็นอันตรายได้
- 8) ภาชนะจัดเก็บควรทำจากวัสดุทนไฟ และไม่เป็นสารไวไฟ
- 9) มีอุปกรณ์ดับเพลิง และอุปกรณ์ทำความสะอาด ในสถานที่จัดเก็บ
- 10) ตรวจสอบอัตราการระบายอากาศของสถานที่เก็บ Isocyanate โดยใช้ Air Flow Meter วัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางออกของพัดลมดูดอากาศ

5.3 สถานที่ปฏิบัติการฉีด

เนื่องจาก Isocyanate ระเหยได้อย่างรวดเร็ว จึงไม่สามารถเก็บรักษาในภาชนะเปิดได้ ถึงที่เก็บควรประกอบด้วยปั๊มไหลเวียน (Transfer Pump) และไม่ควรใส่สารเติมถึง ควรมีช่องว่างเหลือไว้ สำหรับบรรจุอากาศแห้ง หรือ ไนโตรเจน ควรติดตั้งท่อระบาย (Vent Line) ออกจากภายนอกสถานที่ฉีด เพื่อลดปริมาณ Isocyanate ที่รั่วออกสู่สถานที่เก็บ และสถานที่ปฏิบัติการฉีด ควรระบายออกจากท่อที่สูงผ่าน Dryer ไปสู่ปล่องไอเสีย

ถังเก็บต้องติด Safety Valve ที่มีขนาดเหมาะสม และต้องเก็บห่างจากวัตถุติดไฟ หรือเก็บในห้องที่มีกำแพงทนไฟ โดยในห้องปฏิบัติการฉีด หรือ ห้องผลิตชิ้นส่วน RIM ต้องติดเครื่องวัดปริมาณไอของ Isocyanate ที่สามารถส่งสัญญาณเตือนการเกิดการรั่วไหล

เพื่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน สถานที่ หรือ ห้องติดตั้งเครื่อง RIM ควรทำให้ความดันภายในห้องเป็นลบ เพื่อให้มีการถ่ายเทอากาศจากภายนอกสู่ภายในสถานที่ติดตั้ง ดังนั้นสถานที่ปฏิบัติการฉีดโฟลียูรีเทน จำเป็นอย่างยิ่ง ที่ต้องมีการระบายอากาศที่ดี ความเร็วของอากาศอย่างน้อยประมาณ 33 m/min ถ้าไม่สามารถทำได้ อย่างน้อยจะต้องติดอุปกรณ์ดูดอากาศ หรือ ติดเครื่องป้อนอากาศบริสุทธิ์เข้าสู่ห้องปฏิบัติการแทน

5.4 ความปลอดภัยในการใช้เครื่อง RIM

การทำงานของผู้ใช้ ถ้าขาดความระมัดระวังอาจทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ใช้และคนรอบข้างได้ ควรมีการอบรมให้แก่ผู้ใช้เครื่องฉีดก่อนใช้จริง และเรียนรู้การป้องกันปัญหาที่อาจเกิดได้ อันตรายที่เกิดจากการใช้เครื่อง RIM สามารถป้องกันได้จาก

- 1) Isocyanate เป็นสารไวไฟ เผาไหม้เมื่อมีความร้อนสูง ทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 50°C ดังนั้น อย่าให้สัมผัสน้ำโดยตรง เพราะจะทำให้เกิดเพลิงไหม้ และการระเบิดได้
- 2) ภาชนะบรรจุ Isocyanate อาจเกิดระเบิดได้ ถ้าสัมผัสความร้อน

- 3) ตั้งค่าความดันสูงสุดที่ Pressure Relief Valve ให้เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการระเบิดของอุปกรณ์เนื่องจากความดัน
- 4) ตรวจสอบการรั่วของอุปกรณ์ของเครื่อง RIM เพื่อหลีกเลี่ยงน้ำยา Isocyanate สัมผัสกับน้ำโดยตรง
- 5) ควรอยู่เหนือลมเพื่อหลีกเลี่ยงไอระเหยของสาร
- 6) กรณีเกิดเพลิงไหม้ ให้สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA หรือ Self-Contained Breathing Apparatus) ถ้าสามารถทำได้ ให้แยกสารที่ยังไม่ติดไฟออกจากบริเวณเพลิงไหม้ และเคลื่อนย้ายภาชนะบรรจุ ใช้น้ำฉีดภายนอกถังเพื่อหล่อเย็นภาชนะบรรจุที่สัมผัสเพลิงไหม้ ในการดับเพลิง สารที่ใช้ฉีดเพื่อลดความร้อนของถัง ได้แก่ น้ำฉีดเป็นฝอย คาร์บอนไดออกไซด์ โฟม และผงเคมีแห้ง

5.5 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้ของขึ้นงานโพลียูรีเทน

เมื่อนำขึ้นงานโพลียูรีเทนไปเผาไหม้จะเกิดสารพิษในรูปของไอระเหย และควันขึ้นมา โดยเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซไนโตรเจน (N₂) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO) สารไวไฟ หรือ อะโครลีน (Acrolein) และไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจน (O₂) และอุณหภูมิเผาไหม้

5.5.1 ผลกระทบของคาร์บอนมอนนอกไซด์

ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นสารพิษอย่างแรง เป็นก๊าซไม่มีสี กลิ่น และรส ถ้าร่างกายได้รับมากกว่า 8,000 ppm ทำให้เสียชีวิตอย่างฉับพลันได้ เพราะคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในร่างกาย ทำให้ฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเลือดไม่สามารถรับออกซิเจนจากอากาศได้ เป็นผลให้ขาดออกซิเจน สาเหตุการเสียชีวิตในเหตุการณ์ไฟไหม้ ส่วนใหญ่เกิดจากการสูดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ การเผาไหม้ของ Polyurethane Foam, Flexible Foam และ Rigid Foam ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ขึ้นได้

5.5.2 ผลกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดจากการเผาไหม้ของโพลีเอทิลีน ตัวมันเองไม่เป็นสารพิษ แต่ถ้ามีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก จะทำให้ปริมาณออกซิเจนในอากาศลดลง เช่น ถ้ามีคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 18,000 ppm มนุษย์จะต้องเพิ่มจำนวนการหายใจอีก 50%

5.5.3 ผลกระทบของไฮโดรเจนไซยาไนด์

ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen Cyanide, HCN) เป็นสารพิษอย่างแรง จะไม่สำคัญมากเท่ากับคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่ถ้าความเข้มข้นมากกว่า 280 ppm สามารถทำให้เสียชีวิตได้อย่างฉับพลัน HCN เกิดจากการเผาไหม้ของไนโตรเจน HCN จะเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเผาไหม้สูงขึ้น (มากกว่า 600 °C) โดย HCN จะปะปนอยู่กับควันไฟ ตารางที่ 7 เปรียบเทียบปริมาณ HCN ที่เกิดจากการเผาไหม้วัสดุต่าง ๆ

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ (Woods, 2000)

Materials	Concentration of Gas (ppm)			
	CO	CO ₂	HCN	NO
พืช	6,516	127,300	29	75
ไม้อัด	19,090	52,090	875	5
ฮาร์ดบอร์ด	7,400	104,540	30	54
โฟมโพลีไอโซไซยาเนตแข็ง	3,145	4,990	380	0.6
โฟมโพลีเอทิลีนแข็ง	2,910	5,700	300	0.55

5.5.4 ผลกระทบของควันไฟ

ควันไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของโพลีเอทิลีนจะเป็นพิษ แต่ผลกระทบที่สำคัญของควัน คือ ทำให้สูญเสียการมองเห็นระหว่างการอพยพ หรือ ช่วยเหลือ โดยความ

หนาแน่นของควันจะไม่สามารถวัด และกำหนดได้ชัดเจนว่าเท่าไร จึงจะมีผลทำให้มองไม่เห็น (Woods, 2000)

5.5.5 ผลกระทบของอะโครลีน

อะโครลีน (Acrolein) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของโพลีเอทิลีนจะเป็นสารพิษอย่างแรง ถ้าได้รับในเวลาอันสั้นและมีความเข้มข้นมากกว่า 10 ppm ถ้าความเข้มข้นต่ำกว่า 1 ppm จะทำให้เกิดการระคายเคืองตา แต่สารนี้จะเกิดไม่มากจากการเผาไหม้ของโพลีเอทิลีน

6. การออกแบบชิ้นงานสำหรับการผลิตแบบ RIM

การผลิตแบบ RIM ซึ่งเป็นการผสมสาร A และ B แล้วฉีดเข้าแม่พิมพ์ ซึ่งการฉีดภายหลังการผสม A และ B แล้วมีลักษณะเหมือนกับการผลิตแบบ TIM ดังนั้นหลักการพื้นฐานของการออกแบบชิ้นงาน RIM จึงเหมือนกับการออกแบบในงาน TIM

หลักการสำคัญของการออกแบบชิ้นงานสำหรับการผลิตที่เป็น การฉีด (Injection) เข้าแม่พิมพ์ คือ ชิ้นงานต้องสามารถปลด หรือ ถอดออกจากแม่พิมพ์ได้โดยง่าย ซึ่งเป็นผลให้ต้นทุนการผลิตแม่พิมพ์ต่ำ และสะดวกรวดเร็วในสายการผลิต แนวทางเบื้องต้นของการออกแบบชิ้นงานเพื่อให้สามารถปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ ได้แก่

1. ชิ้นงานต้องไม่มีส่วนที่เป็น Undercut.
2. ผนังต้องมีมุมเอียง หรือ Draft Angle.

การออกแบบชิ้นงานเพื่อช่วยให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพจากกระบวนการฉีด มีหลักการดังนี้

1. ความหนาผนังที่กำหนด ต้องเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้
2. ต้องมีความหนาของผนังที่คงที่ หรือ เปลี่ยนอย่างช้า ๆ
3. ลบมุมหรือขอบให้เป็นผิวโค้ง

เทคโนโลยีที่ใช้ในการออกแบบชิ้นงานที่สำคัญคือ Computer-Aided Design (CAD) ที่เป็นแบบ Feature-Base Solid Model (สัจจาทิพย์, 2545) โดยซอฟต์แวร์ช่วยการออกแบบประเภทโซลิดโมเดล (Solid Model) นี้ สามารถใช้ออกแบบทางวิศวกรรมที่สามารถเขียนแบบชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนเป็นรูปทรง 3 มิติได้โดยตรง และสามารถใช้ออกแบบผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก และรวดเร็ว นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณปริมาตร และน้ำหนักของวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นงาน ได้อย่างแม่นยำ และยังสามารถนำรูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกแบบ แสดงให้ลูกค้าได้ก่อนดำเนินการผลิตโดยไม่ต้องสร้างชิ้นงานจริง ไฟล์ของแบบผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกแบบโดยใช้ CAD สามารถนำไปใช้เพื่อการผลิตโดยโปรแกรม Computer-Aided Manufacturing (CAM) ได้โดยตรง ทำให้การใช้ CAD/CAM เป็นที่นิยมจากความสะดวก และรวดเร็วดังกล่าว

เทคโนโลยีที่ใช้ในการจำลองการไหลของวัสดุเหลวในแม่พิมพ์ (Mold Flow Simulation) ซึ่งจัดเป็นโปรแกรมด้าน Computer-Aided Engineering (CAE) โปรแกรมประเภทนี้ สามารถประยุกต์ใช้วิเคราะห์การไหลของโพลีเมอร์ในแม่พิมพ์ โดยกำหนดสภาวะที่ใช้จำลองให้สอดคล้องกับสภาวะการฉีดจริง เพื่อคาดการณ์ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในชิ้นงานและแม่พิมพ์ จึงเป็นการช่วยการออกแบบแม่พิมพ์ให้ถูกต้อง ก่อนดำเนินการผลิตจริง

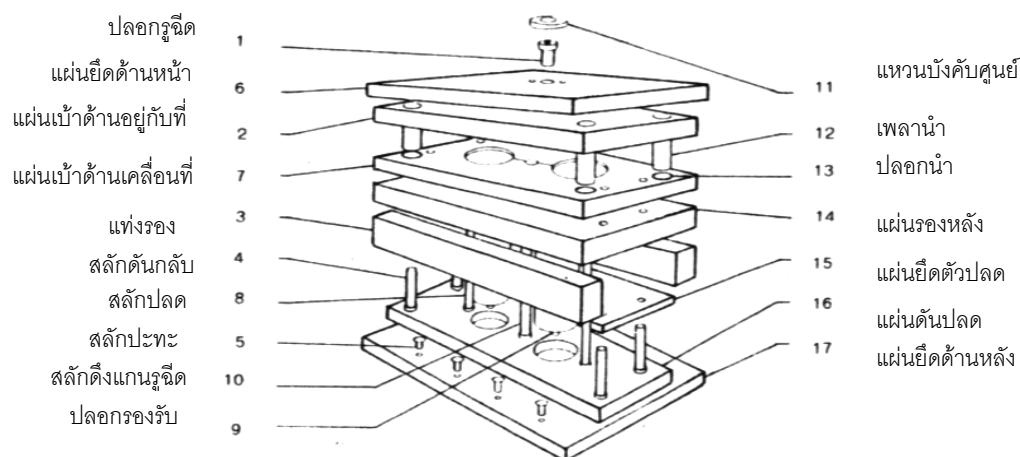
ดังนั้นเทคโนโลยี CAD/CAM/CAE จึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการออกแบบ และผลิตชิ้นส่วนได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

7. แม่พิมพ์สำหรับการผลิตแบบ RIM

แม่พิมพ์ฉีดสำหรับการผลิตแบบ RIM มีหลักการออกแบบคล้ายกับแม่พิมพ์ฉีดทั่วไป แต่แม่พิมพ์สำหรับ RIM ไม่ต้องการความแข็งแรง ดังเช่นแม่พิมพ์ของ TIM เนื่องจากความดันในการฉีดของเครื่อง RIM ใช้ความดันที่ต่ำกว่า และการเปิดปิดแม่พิมพ์ของ RIM ส่วนมากเป็นแบบใช้มือ (Manual) ดังนั้น วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ RIM จึงสามารถเลือกใช้ได้หลายชนิด เช่น เรซิน เบล็ก และอลูมิเนียม

ส่วนประกอบของแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการ RIM ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนเหมือนกับแม่พิมพ์ TIM (ภาพที่ 13) โดยทั่วไปแล้วแม่พิมพ์ RIM นิยมใช้สำหรับผลิตชิ้นงานเพียงชิ้นเดียว

จึงไม่มีส่วนของ Runner เหมือนกับแม่พิมพ์ TIM (เนื่องจากแม่พิมพ์ TIM นิยมผลิตชิ้นงานขนาดเล็กหลาย ๆ ชิ้นพร้อมกันในแม่พิมพ์เดียวกัน) ส่วนประกอบหลักของแม่พิมพ์ RIM ตามแสดงในภาพที่ 14 ถึง 16 ประกอบด้วย

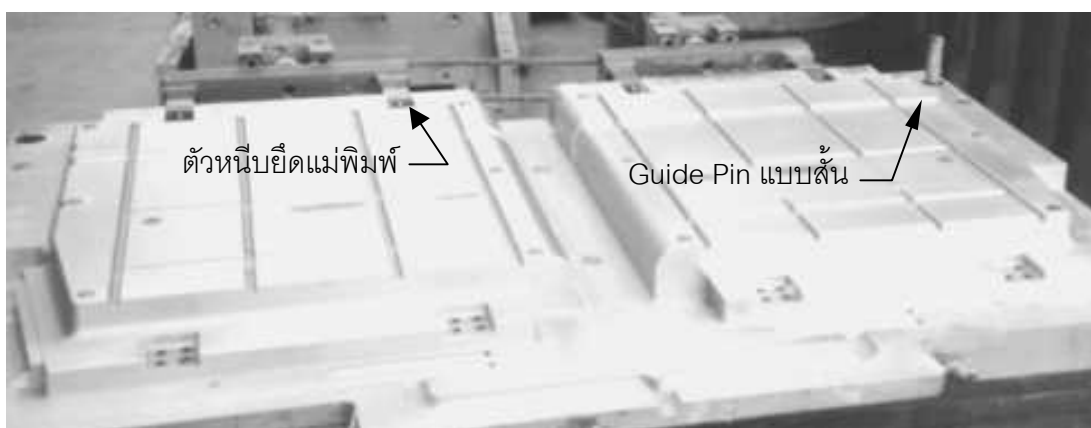


ภาพที่ 13 ส่วนประกอบและชิ้นส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก Thermoplastic (ชาลี, 2542)

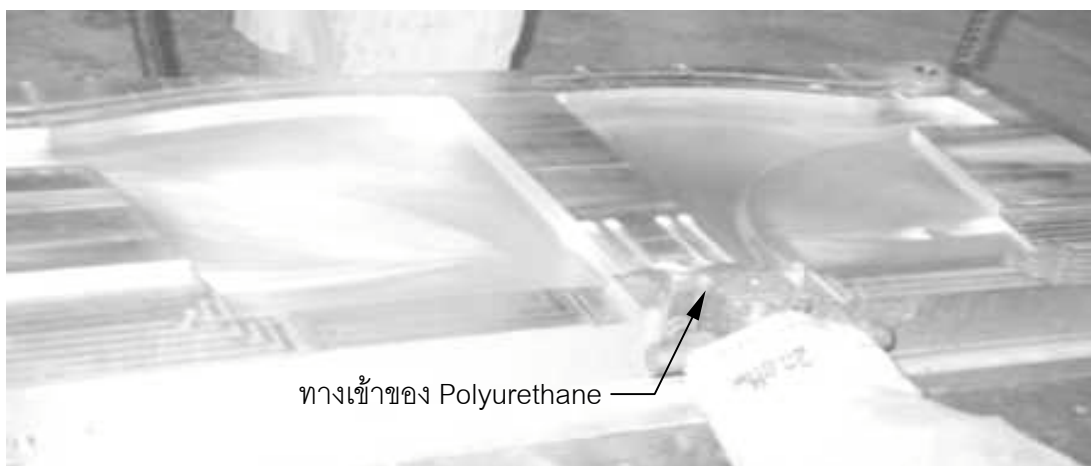
- 1) ชิ้นส่วนด้าน Core
- 2) ชิ้นส่วนด้าน Cavity
- 3) อุปกรณ์เปิดปิด และยึดประกบแม่พิมพ์
- 4) โครงสร้างรองรับแม่พิมพ์

การออกแบบแม่พิมพ์หนึ่งชุด จึงต้องออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ในรายการข้างต้นด้วย หลักการโดยรวมของการออกแบบแม่พิมพ์ RIM ได้แก่

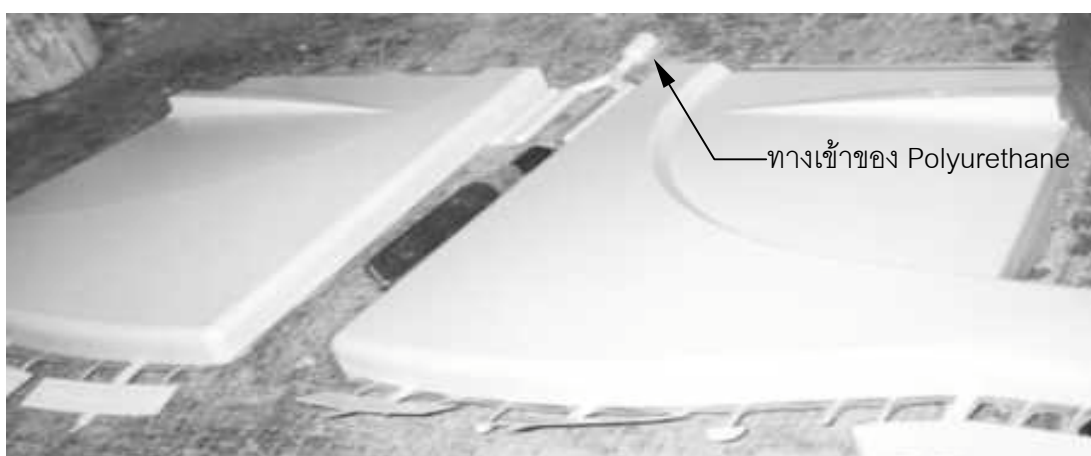
- 1) ต้องชดเชยขนาดจากการหดตัวของชิ้นงาน หรือ ค่า Shrinkage
- 2) กำหนดตำแหน่ง Gate เพื่อให้โฟลียูรีเทนไหลเต็มแม่พิมพ์ในเวลาอันน้อยที่สุด
- 3) แม่พิมพ์ต้องเปิดปิดและถอดชิ้นงานได้สะดวกรวดเร็ว
- 4) ระบบยึดประกบแม่พิมพ์ (Clamping) ชิ้นงานต้องแข็งแรง เพื่อลดการไหลซึมของโฟลียูรีเทนออกตามขอบ (หรือเกิด Flash ที่ชิ้นงาน)
- 5) มีช่องลม (Air Vent) ให้อากาศไหลออกจากแม่พิมพ์ และใช้ตรวจสอบการไหลเต็มของโฟลียูรีเทนในแม่พิมพ์
- 6) กำหนดความละเอียดผิว และค่าความผิดพลาด



ภาพที่ 14 แม่พิมพ์อลูมิเนียมด้าน Core ของแม่พิมพ์แบบ 2-Cavity (ฉีด 2 ชั้นพร้อมกัน)



ภาพที่ 15 แม่พิมพ์อลูมิเนียมด้าน Cavity ของแม่พิมพ์แบบ 2-Cavity



ภาพที่ 16 ตัวอย่างชิ้นงานจากแม่พิมพ์แบบ 2-Cavity

8. วัสดุและการผลิตแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการ RIM

8.1 วัสดุสำหรับใช้ผลิตแม่พิมพ์ RIM

วัสดุที่นิยมนำมาใช้ผลิตขึ้นส่วนแม่พิมพ์ด้าน Core และ Cavity ของแม่พิมพ์ RIM ได้แก่

8.1.1 อีพอกซี

อีพอกซี (Epoxy) หรือ Resin สามารถใช้เป็นแม่พิมพ์ในกระบวนการ RIM ได้ เนื่องจาก RIM ใช้ความดันในการฉีดต่ำ การใช้อีพอกซี จึงทำให้ง่ายในการปรับปรุง และแก้ไข ขนาดของแม่พิมพ์ได้สะดวก และรวดเร็วกว่าแม่พิมพ์อื่น มีน้ำหนักเบา ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย แม่พิมพ์อีพอกซีเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนน้อย ๆ หรือ ใช้ในการทดลองฉีดชิ้นงาน ต้นแบบ (Prototype Work) แม่พิมพ์อีพอกซีมีราคาต่ำสามารถผลิตโดยใช้ฝีมือแรงงานคน

ข้อเสียของแม่พิมพ์ที่เป็น Epoxy คือ ไม่ทนต่ออุณหภูมิและความดันสูง มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ การถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ลำบาก คุณภาพของชิ้นงานจะขึ้นกับคุณภาพผิวของแม่พิมพ์ และการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์จะอยู่ในช่วง 50°C ถึง 70°C

8.1.2 โลหะ

โลหะที่นิยมใช้ทำแม่พิมพ์ RIM ได้แก่ เหล็กกล้า (Steel) อลูมิเนียม และ Zinc Alloy แม่พิมพ์โลหะมีความแข็งแรงมาก และง่ายต่อการถอดชิ้นงานออก สามารถผลิตให้ได้ผิวของแม่พิมพ์ที่มีคุณภาพดีได้ โดยใช้เครื่องจักรขึ้นรูป (หรือการแมชชีน-Machine) ในบางกรณีไม่ต้องใช้ Mold Release Agent ก็ยังสามารถถอดชิ้นงานที่ฉีดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย

เมื่อต้องการผลิตขึ้นส่วน สำหรับกระบวนการ RIM จำนวนมาก หรือ ประมาณ 100,000 ถึง 200,000 ชิ้น จะเลือกใช้เหล็กในการทำแม่พิมพ์ (Woods, 2000) แม่พิมพ์เหล็กมี

น้ำหนักมาก ทำให้การเปิดปิดแม่พิมพ์ลำบาก และไม่สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย การขึ้นรูปผิวของ Core และผิวของ Cavity กระทำได้โดยการแมชชีน

อะลูมิเนียมมีความทนทานน้อยกว่า และน้ำหนักเบากว่าเหล็ก แม่พิมพ์อะลูมิเนียมมีคุณสมบัติในการถอดชิ้นงาน และการควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่าเหล็ก อะลูมิเนียมที่นิยมใช้เป็นแม่พิมพ์ RIM เป็นแบบที่มีความหนาแน่นต่ำ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิตแม่พิมพ์ขนาดใหญ่ การขึ้นรูปผิวของ Core และผิวของ Cavity กระทำได้โดยการแมชชีน

Zinc Alloy มีน้ำหนักเบา และมีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยปกติจะใช้หล่อจึงทำให้สามารถฝังท่อทำความร้อนในแม่พิมพ์ได้ การถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์กระทำได้ง่าย และง่ายต่อการซ่อมแซม สามารถฉีดได้ 50,000 ขึ้นขึ้นไป (Woods, 2000)

8.1.3 อลูมิเนียมหล่อ

อลูมิเนียมหล่อ (Cast Aluminum) เป็นแม่พิมพ์อะลูมิเนียมที่ผลิตโดยการหล่อขึ้นรูป จึงมีราคาถูก คุณภาพผิว Core และ Cavity ของแม่พิมพ์จะเกิดจากการหล่อไม่มีคุณภาพ คุณภาพผิวขึ้นอยู่กับชิ้นงานที่ใช้เป็นแม่แบบ (Master Model) ในการหล่อ เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่นต่ำ แม่พิมพ์ประเภทนี้จะฉีดได้ถึง 100,000 ขึ้น (Woods, 2000)

8.1.4 ซิลิโคนยาง

ซิลิโคนยาง (Silicone Rubber) เหมาะกับการฉีดโพลียูรีเทนแบบ Flexible Self – Skinning Foam ใช้ฉีดชิ้นงานได้ประมาณ 100 ถึง 200 ขึ้น (Woods, 2000) แต่ถ้าใช้สำหรับ Elastomer Polyurethane จะฉีดได้มากขึ้น สูงสุดอาจได้ถึง 1,000 ขึ้น (Woods, 2000)

8.2 การผลิตแม่พิมพ์

เนื่องจากคุณภาพผิวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับคุณภาพของผิวของ Core และ Cavity

ชิ้นส่วนที่เป็น Core และ Cavity ของแม่พิมพ์ RIM จึงเป็นชิ้นส่วนที่ต้องการการผลิตให้ได้ผิวที่มีคุณภาพสูง กระบวนการผลิต Core และ Cavity ของแม่พิมพ์ RIM ที่นิยมใช้มีอยู่ 2 กระบวนการดังต่อไปนี้

8.2.1 การหล่อ

การหล่อแม่พิมพ์ ต้องมีชิ้นงานแม่แบบ (Master Model) ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แม่แบบนี้ควรเป็นวัสดุที่แข็ง แม่แบบที่อ่อนจะทำให้เกิดการบิดงอได้ กรณีที่เป็นโลหะและชิ้นงานขนาดใหญ่ นิยมใช้ทรายเป็นแม่พิมพ์ (Sand Casting) เพื่อหล่อเป็นชิ้น Core และ Cavity

8.2.2 การแมชชีนขึ้นรูป

การขึ้นรูปชิ้นงานโลหะโดยกระบวนการกัด เจาะ กลึง ฯลฯ ด้วยเครื่องจักร หรือ การแมชชีน เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ การแมชชีนขึ้นรูปชิ้นส่วน Core และ Cavity ของแม่พิมพ์ RIM เป็นการขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เครื่องจักรกลการผลิต เช่น เครื่องกัด (Milling Machine) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ทั่วไปเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการแมชชีนขึ้นรูป ประกอบด้วย Computer-Aided Manufacturing หรือ CAM และเครื่องกัดซีเอ็นซี (Computer-Numerical Control Milling Machine หรือ CNC Milling Machine หรือ CNC Machining Center)

การแมชชีนด้วยเครื่องกัด CNC จะใช้โปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของดอกกัด (Cutting Tool) ที่กำหนดได้โดยการใช้โปรแกรม CAM จึงให้ความสะดวก แม่นยำ และรวดเร็วในการผลิตแม่พิมพ์เพราะ โปรแกรม CAM ใช้แบบที่ออกแบบจาก CAD มาใช้อ้างอิงโดยตรง (สัจจาทิพย์, 2544)

ผิวของแม่พิมพ์ที่แมชชีนโดยใช้เครื่อง CNC สามารถควบคุมคุณภาพผิว และความละเอียดได้ตามต้องการ จึงได้ผิวดีกว่าแม่พิมพ์ที่ผลิตจากการหล่อ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์ข้อมูล

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหน่วยประมวลผลกลาง Pentium IV 1.8 GHz หน่วยความจำ SDRAM PC 133 ขนาด 128 MB การ์ดแสดงผลหน่วยความจำวีดีโอ 64 MB จอภาพ ขนาด 17 นิ้ว
- 2) ซอฟต์แวร์ CAD ชื่อ Pro/ENGINEER ของ บริษัท Parametric Technology Corporation (PTC), USA.
- 3) ซอฟต์แวร์ CAE ชื่อ MSC.Nastran for Windows ของบริษัท MSC Software Corporation, USA.
- 4) ซอฟต์แวร์ CAE ชื่อ Moldflow Plastic Insight ของ บริษัท Moldflow Coporation จำกัด
- 5) ซอฟต์แวร์ MATLAB ของ บริษัท Mathworks สำหรับประมวลผลทางสถิติ และพล็อตกราฟเส้น
- 6) เวอร์เนียร์ขนาดชิ้นงาน ความละเอียด ± 0.05 มิลลิเมตร
- 7) เครื่องพิมพ์ชนิด Inkjet ยี่ห้อ Hewlett-Packard รุ่น HP Desk Jet 948
- 8) เครื่องสแกนเนอร์ Epson รุ่น 1270

การดำเนินการออกแบบและวิเคราะห์ข้อมูล ใช้สถานที่และอุปกรณ์ของหน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบทางกลและผลิตภัณฑ์ (Mechanical and Product Design Research Laboratory) อาคาร 6 ห้อง 6309 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

2. อุปกรณ์และวัสดุสำหรับการผลิตแบบ RIM

- 1) เครื่อง Reaction-Injection Molding รุ่น RIM-STAR ECO II (ภาพที่ 30) ชนิด High Pressure ของบริษัท Krauss- Maffei จำกัด ประเทศเยอรมัน

2) โพลียูรีเทนแข็ง (Solid Polyurethane) ซึ่งมีสารตั้งต้นได้แก่ Isocyanate, Polyol และ Additive.

3) แม่พิมพ์อลูมิเนียม (ภาพที่ 18-โดยรายละเอียดของแม่พิมพ์จะได้อธิบายใน **หัวข้อที่ 5 การผลิตแม่พิมพ์**)

4) Release Agent.

5) ท่อน้ำพลาสติกใส ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 13 มิลลิเมตร สำหรับต่อจาก หัวฉีดเข้าแม่พิมพ์ และช่อง Air Vent (ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง)

6) ห้องอบ

7) มีด หรือ Cutter สำหรับใช้ตัด Gate และตัดแต่งขอบของชิ้นงาน

อุปกรณ์ต่าง ๆ และการติดตั้งเครื่อง RIM ได้แสดงในภาพที่ 19 ซึ่งเป็นไดอะแกรม การติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่อง RIM

ก



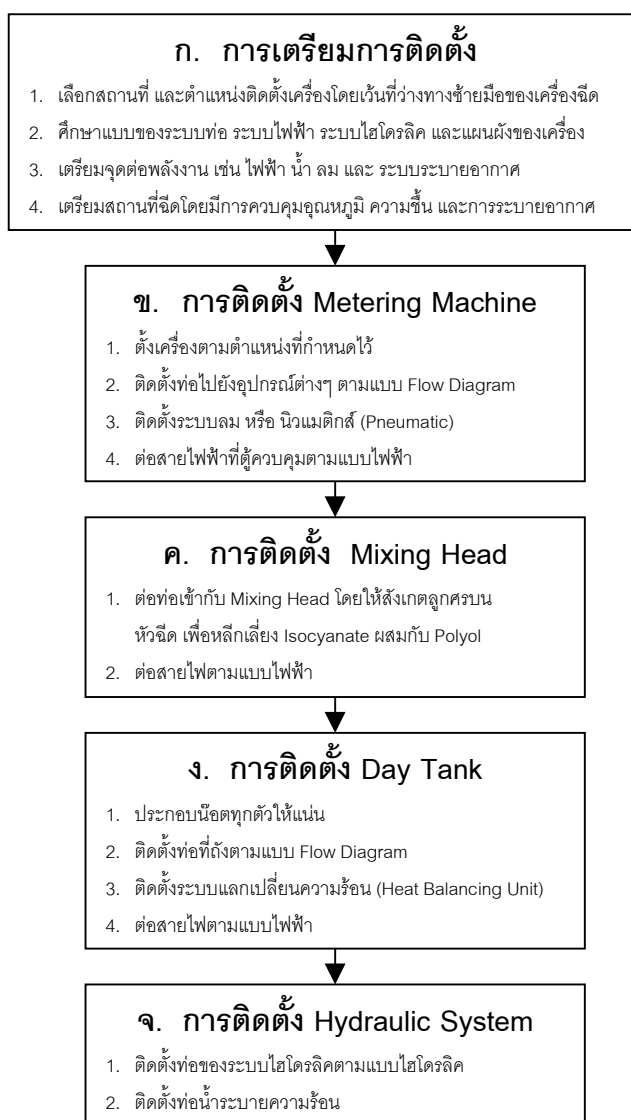
ข



ภาพที่ 17 เครื่อง RIM (STAR ECO II) โดยภาพ ก) ด้านหน้า และ ข) ด้านหลัง



ภาพที่ 18 แม่พิมพ์อลูมิเนียมที่ใช้ในการผลิตแบบ RIM



ภาพที่ 19 ขั้นตอนการติดตั้งเครื่อง RIM

การวิจัยโดยใช้อุปกรณ์ในหัวข้อที่ 3 ถึง 5 ได้ดำเนินการที่ บริษัท เสถียรพลาสติก แอนด์ ไฟเบอร์ จำกัด

วิธีการ

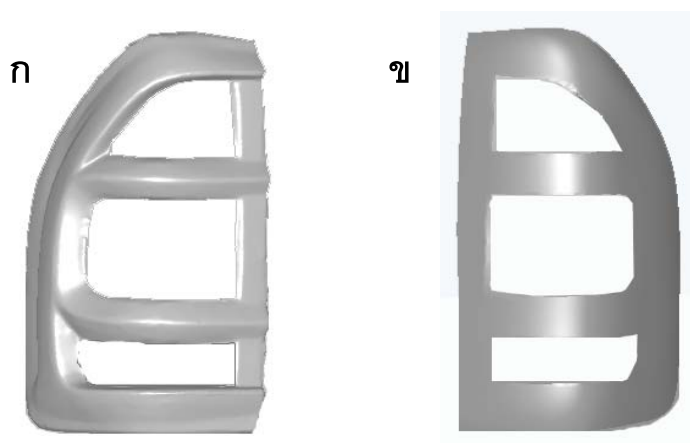
1. การออกแบบชิ้นงานทดสอบโดยใช้ CAD

ใช้โปรแกรม Pro/ENGINEER เพื่อสร้างแบบ CAD ของชิ้นงานทดสอบ โดยวิธีการออกแบบนี้ ใช้คำสั่ง Protrusion, Cut ฯลฯ ตบแต่งให้ได้รูปทรงตามต้องการ แล้วจัดเก็บโดยบันทึกเป็นไฟล์สกุล .prt.

2. การออกแบบจากชิ้นงานฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย

โซลิตโมเดลของรูปทรงของฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย มีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) วัดขนาดชิ้นงาน โดยใช้เครื่องสแกนสามมิติ และปรับแต่งข้อมูลของผิว (สัจจาทิพย์ และคณะ, 2549)
- 2) เข้าโปรแกรม Pro/ENGINEER แล้วทำการ Import ไฟล์เป็น .igs ซึ่งเป็นไฟล์ ของผิวของฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย และผิวของกรอบไฟท้าย ที่ได้รับการสแกนสามมิติ และการปรับแต่งข้อมูลของผิวแล้ว
- 3) ทำการ Mate ไฟล์ของผิวของกรอบไฟท้าย (ซึ่งใช้เป็นผิวด้านหลังของฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย) กับไฟล์ของผิวของฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย
- 4) ตัดผิว (ผิวของกรอบไฟท้าย) ให้เป็นช่องแสงไฟ โดยอ้างอิงจากขอบช่องแสงไฟของผิวของฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย
- 5) สร้างผิวปิดบริเวณขอบรอยต่อของผิวด้านหน้า และด้านหลัง
- 6) แปลงชิ้นงานที่เป็นแบบ Surface ให้เป็นแบบ Solid ดังแสดงในภาพที่ 20
- 7) สร้างร่องที่ด้านหลังของแบบจำลองฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย เพื่อใช้เป็นบริเวณสำหรับการติดเทปกาว
- 8) จัดเก็บโดยบันทึกเป็นไฟล์สกุล .prt.



ภาพที่ 20 ชิ้นงานที่ออกแบบจากชิ้นงานสแกน ก) ด้านหน้า และ ข) ด้านหลัง

3. การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการกระแทก

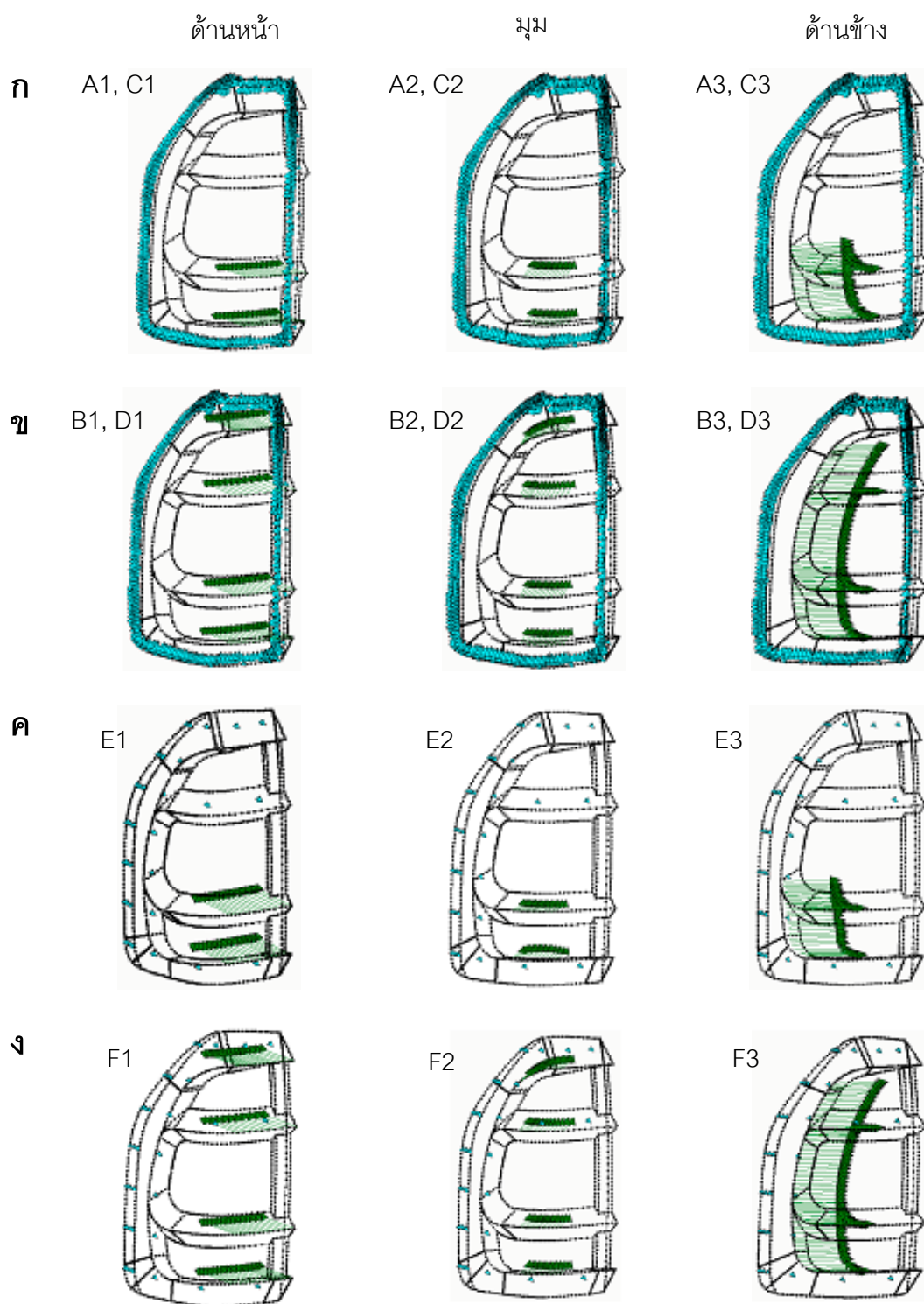
การจำลองการกระแทกที่ฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย สามารถใช้ซอฟต์แวร์ (MSC.Nastran for Windows) กำหนดคุณสมบัติของโพลีเอทิลีน และเงื่อนไขการกระแทก หรือ ถูกชนที่ฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย การวิเคราะห์นี้ เป็นการคาดการณ์ความเสียหายของชิ้นงาน เมื่อเกิดการกระแทก และความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับกรอบไฟท้าย โดยจำแนกการกระแทก เป็น 2 แบบ คือ

แบบ A เป็นการกระแทก หรือ ชนเฉพาะ 2 ซีกล่างของฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย (ภาพที่ 21 ข)

แบบ B เป็นการกระแทก หรือ ชนทั้ง 4 ซีก (ภาพที่ 21 ค)

โดยมุมของการกระแทกมี 3 ตำแหน่ง คือ ด้านหน้า มุม และด้านข้างของชิ้นงาน ดังแสดง ในภาพที่ 21 (ภาพซ้าย กลาง และขวา ตามลำดับ)

ผลที่ได้จากการจำลองที่นำมาใช้ได้แก่ ความเค้น (Stress) ระยะเวลา (Deformation) ความเค้นจะเป็นค่าที่สามารถระบุความเสียหายที่เกิดกับฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย โดยความเค้นที่ทำให้เกิดการแตก หรือ หักมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 (จากค่าเฉลี่ยของโพลีเอทิลีนแข็ง – Solid RIM ตามตารางที่ 4)



ภาพที่ 21 รูปแบบที่ใช้จำลองการกระแทก โดยภาพ ก) การกระแทกแบบ A และ C ข) การกระแทกแบบ B และ D ค) การกระแทกแบบ E และ ง) การกระแทกแบบ F

วิธีการจำลอง การกระแทก มีลำดับดังต่อไปนี้

- 1) เข้าสู่โปรแกรม MSC.Nastran for Window
- 2) นำแบบ CAD ที่เป็น Surface หลังจากออกแบบโดยใช้ Pro/ENGINEER และแปลงเป็นไฟล์สกุล .stp เข้าสู่โปรแกรม โดยใช้คำสั่ง Import → Geometry (ภาพที่ 22 ก) และกำหนด Geometry Scale Factor เท่ากับ 1000 (ภาพที่ 22 ข) เพื่อกำหนดให้หน่วยเป็นมิลลิเมตร
- 3) กำหนด Material เป็นโพลีเอทิลีน โดยใช้คำสั่ง Material ในโหมด Model (ภาพที่ 22 ค) กำหนดให้ค่า E เท่ากับ 457.90 N/mm^2 และค่า Poisson's Ratio เท่ากับ 0.33 (ภาพที่ 22 ง)
- 4) กำหนด Property ของเอลิเมนต์ โดยใช้คำสั่ง Property ในโหมด Model (ภาพที่ 22 ค) กำหนด Property เป็นโพลีเอทิลีน และ Element Property เป็นแบบ Solid และตั้งชื่อ Property เป็น Prop_1 (ภาพที่ 23)
- 5) สร้าง Mesh สามเหลี่ยมที่เป็นแบบ Solid โดยใช้คำสั่ง Mesh → Geometry → Solids from Surfaces (ภาพที่ 24)

กำหนด Element Size เท่ากับ 5 (ภาพที่ 25 ก)

เลือกที่ Midside Nodes ออก และ

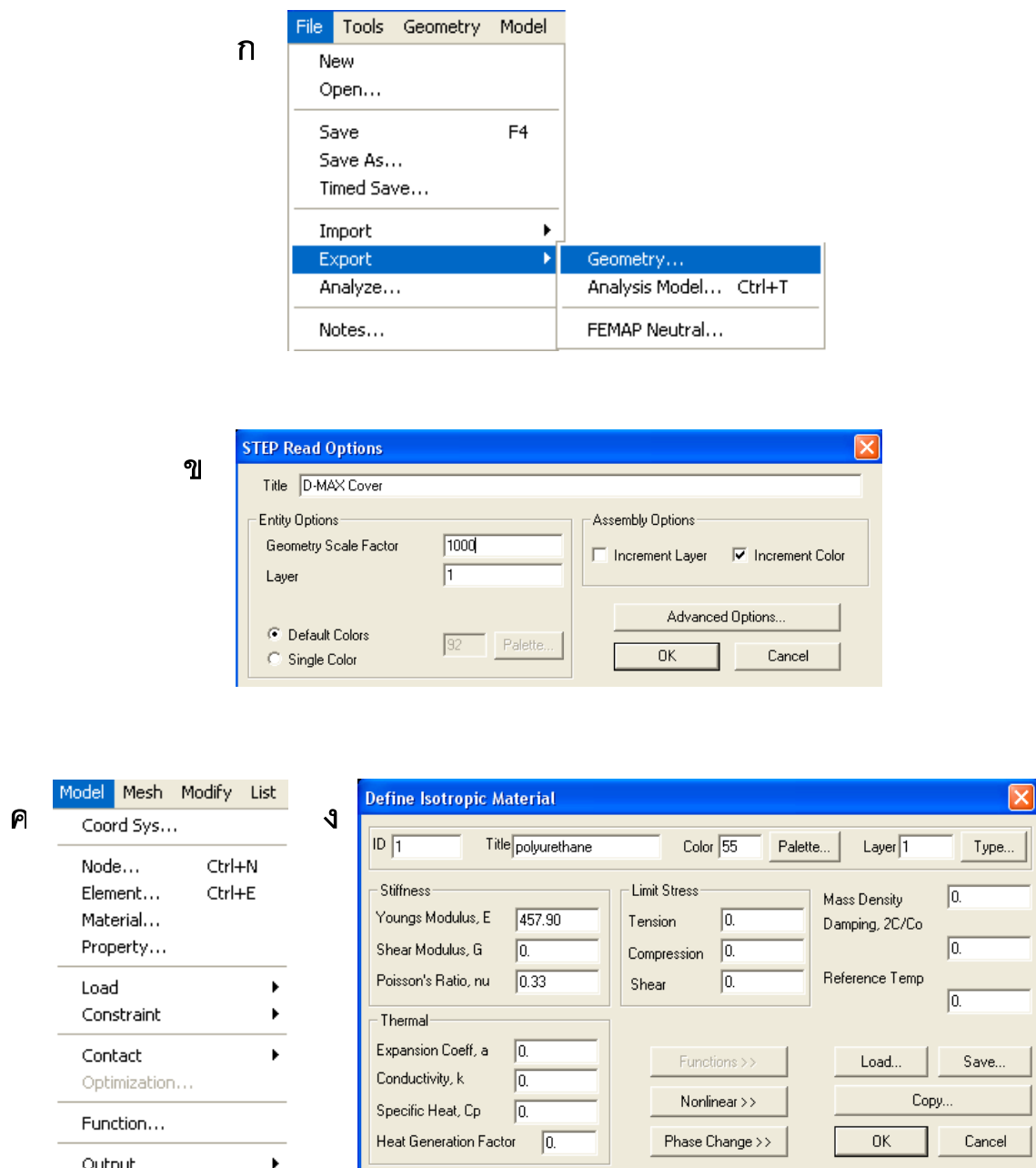
เลือก Property เป็น Prop_1 (ภาพที่ 25 ข)

โดยภาพที่ 26 ก แสดงชิ้นงานก่อนทำการ Mesh และภาพที่ 26 ข แสดงชิ้นงานเมื่อ Mesh แล้วเสร็จ

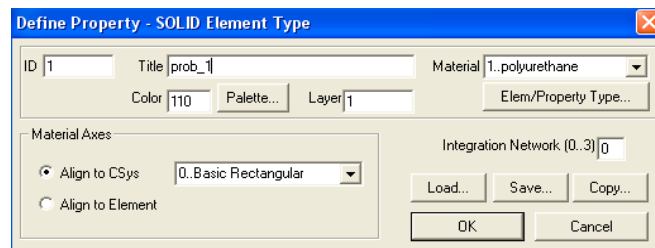
6) กำหนด Constraint เป็นแบบ On Node ที่ตามขอบด้านหลังของชิ้นงาน เสมือนเป็นเทปกาว โดยใช้คำสั่ง Model → Constraint → Nodal (ภาพที่ 27 ก) ตั้งชื่อเป็น Constraint 1 จากนั้นเลือกโหนดที่อยู่ตามขอบของชิ้นงานทั้งหมด และเลือกประเภทของ Constraint เป็นแบบ Fixed (ภาพที่ 28 ก) ภาพที่ 29 ก แสดงผลการกำหนด Constraint ตามขอบของชิ้นงาน

7) สร้าง Load เป็นแบบ On Node โดยใช้คำสั่ง Model → Load → Nodal (ภาพที่ 27 ข) ตั้งชื่อเป็น Load 1 จากนั้นกำหนด Load ตามที่แสดงในภาพที่ 21 ก โมเดล A ภาพที่ 29 ข แสดงผลการกำหนด Load ของโมเดล A

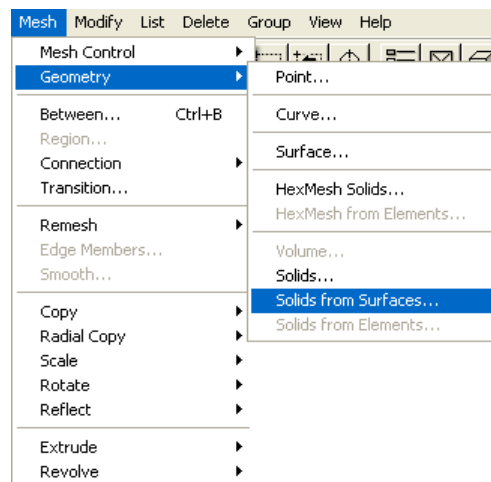
8) เริ่มต้นการ Analyze โดยใช้คำสั่ง Export → Analysis Model (ภาพที่ 30 ก) กำหนด Type เป็นแบบ Static (ภาพที่ 30 ข) และเลือกที่ Run Analysis (ภาพที่ 30 ค)



ภาพที่ 22 แสดงคำสั่ง และหน้าจอที่ใช้ในการ Import ชิ้นงาน และกำหนดวัสดุ โดยภาพ ก) เมนูคำสั่ง Import ชิ้นงาน ข) การกำหนดค่า Geometry Scale Factor ค) เมนูคำสั่ง การกำหนด Material และ Property และ ง) หน้าจอการกำหนดค่าต่างๆ ของวัสดุ

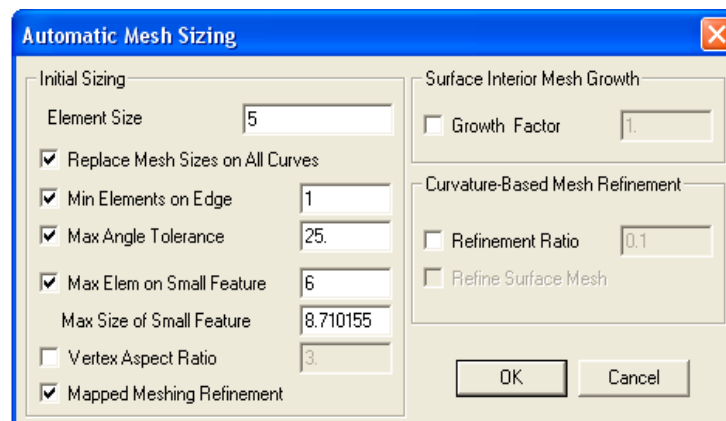


ภาพที่ 23 หน้าจอการป้อนค่าเพื่อกำหนด Property

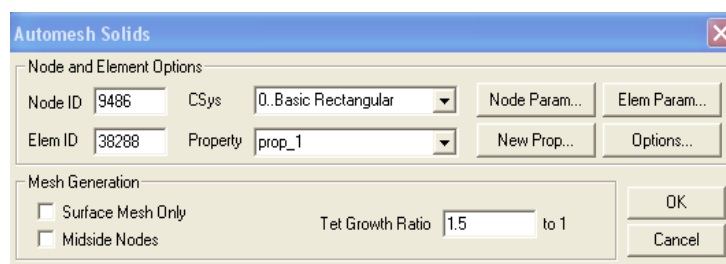


ภาพที่ 24 เมนูคำสั่งในการสร้าง Mesh

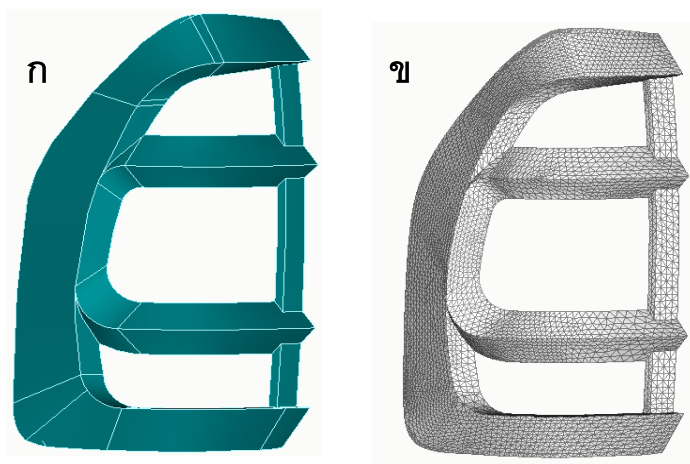
ก



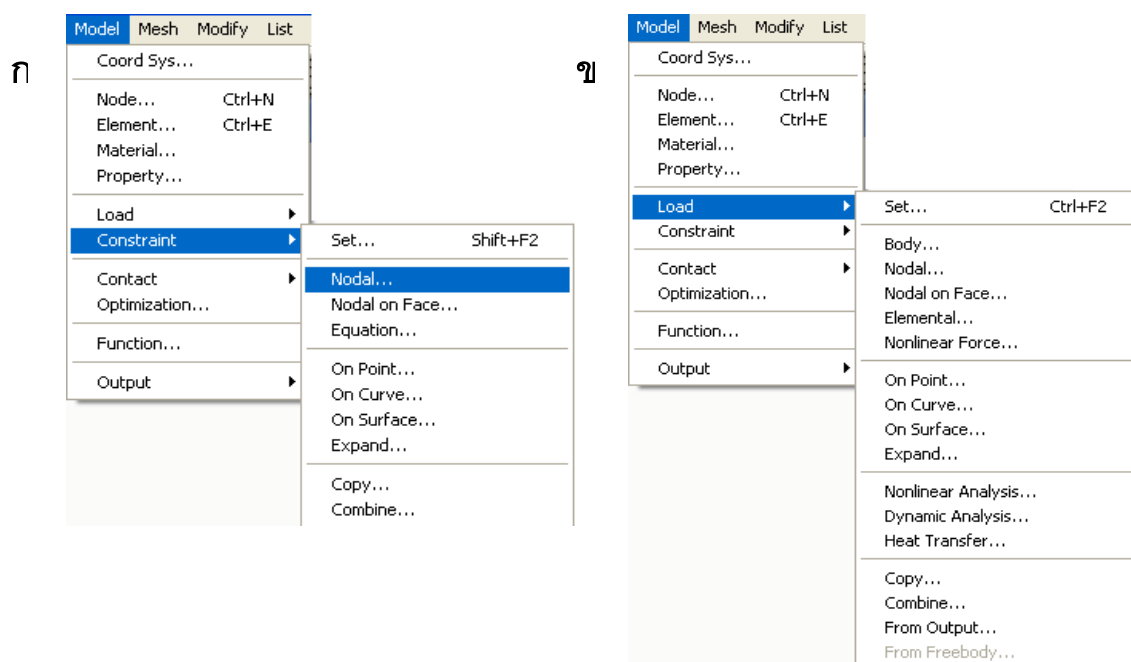
ข



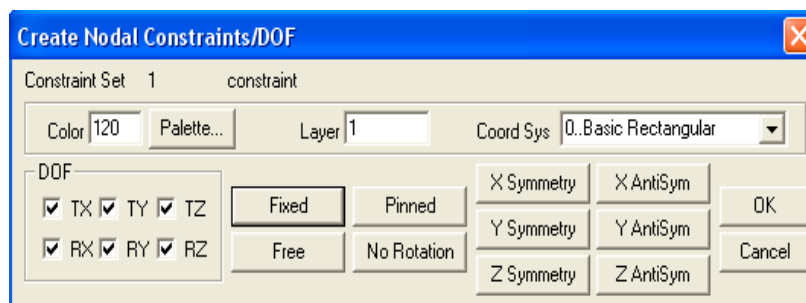
ภาพที่ 25 หน้าจอการป้อนค่าเพื่อกำหนดการ Mesh



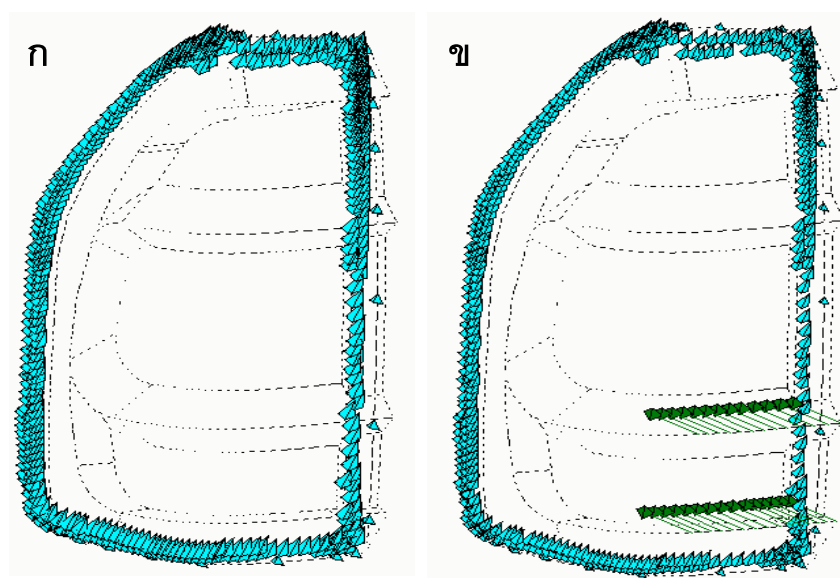
ภาพที่ 26 ก่อนและหลังการสร้าง Mesh โดยภาพ ก) ก่อนการสร้าง Mesh และ ข) การสร้าง Mesh แล้วเสร็จ



ภาพที่ 27 เมนูคำสั่งในการกำหนด Constraint และ Load โดยภาพ ก) เมนูคำสั่งที่ใช้กำหนดตำแหน่งของ Constraint และ ข) เมนูคำสั่งที่ใช้กำหนดขนาดและตำแหน่งของ Load

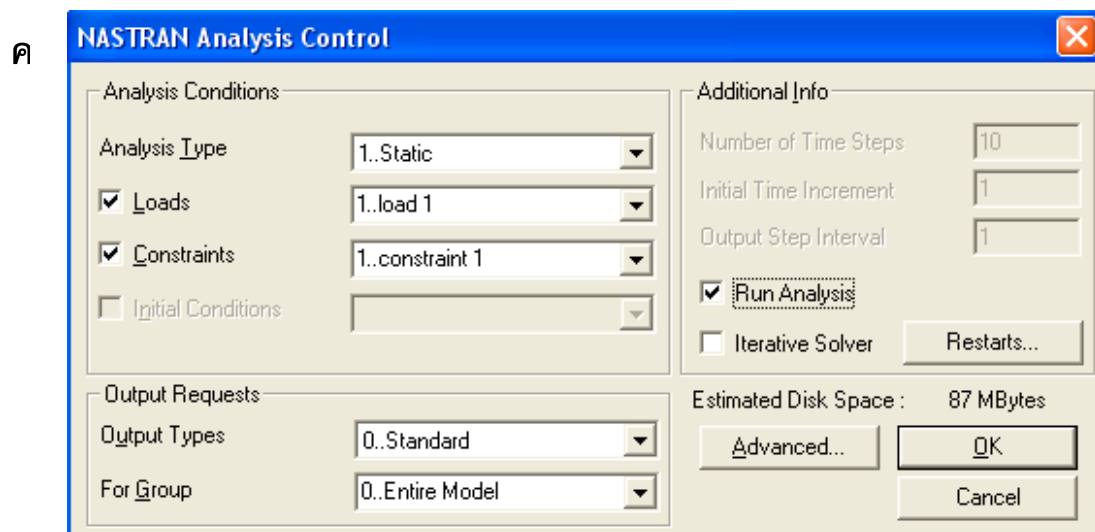
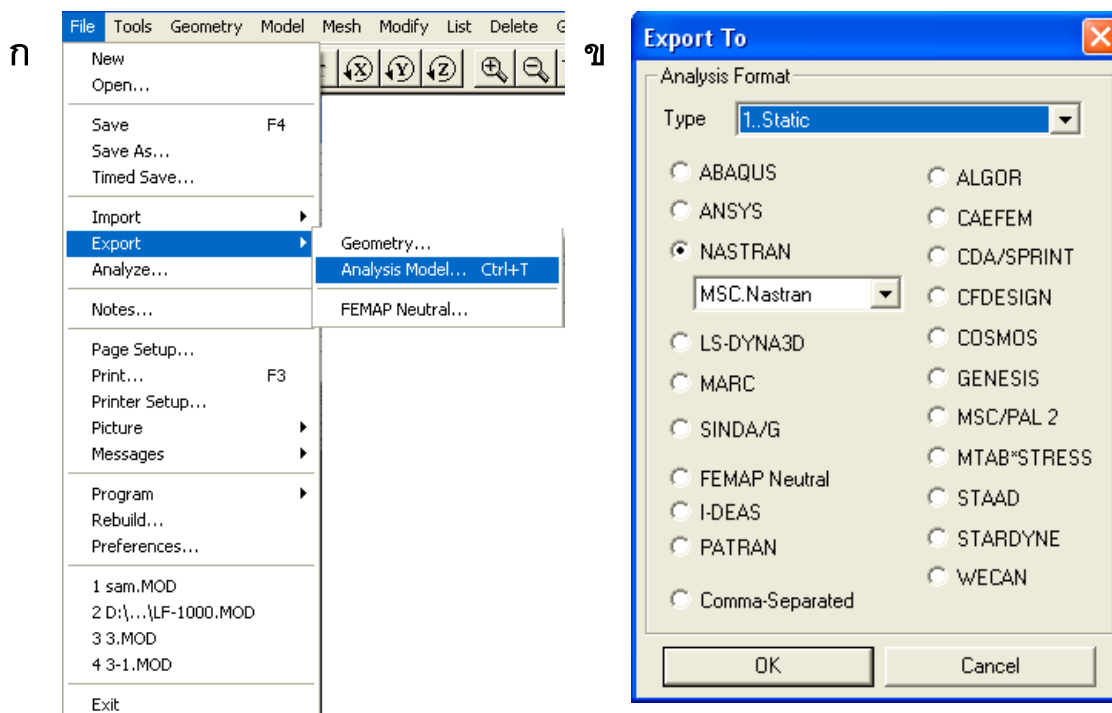


ภาพที่ 28 หน้าจอการกำหนดประเภทของ Constraint

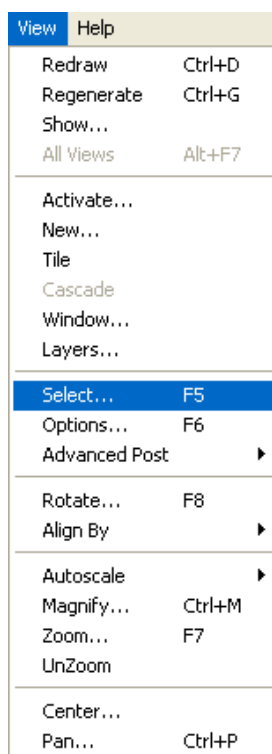


ภาพที่ 29 การกำหนด Constraint (ภาพ ก) และ Load (ภาพ ข)

9) การแสดงผลวิเคราะห์ ใช้คำสั่ง View → Select (ภาพที่ 31) เลือก Deformed Style เป็นแบบ Deform Contour Style เป็นแบบ Contour และเลือกที่ Deformed and Contour Data (ภาพที่ 32 ก) ที่ตำแหน่ง Deformation (ภาพที่ 32 ข) เลือก Total Translation และที่ตำแหน่ง Contour เลือก Solid Von Mises Stress และเลือก OK จากนั้นคอมพิวเตอร์จะแสดงผลในภาพที่ 33 ก พบว่าชิ้นงานมีการยุบมาก เนื่องจากค่า Deformed Scale ที่ตั้งไว้เป็น 5 : 1 เพื่อให้เห็นลักษณะการยุบอย่างชัดเจน แต่สามารถเลือกค่า Deformed Scale เป็น 1 : 1 ได้ เพื่อดูลักษณะการยุบตัวที่เกิดขึ้นจริง โดยใช้คำสั่ง View → Option ที่ Category เลือก Post Processing เลือก Deformed Style และเลือกลูกศรที่ % of Model (Actual) ออก และตั้งค่า



ภาพที่ 30 หน้าจอการ Analysis โดยภาพ ก) เมนูคำสั่งการ Analysis ข) การเลือกประเภทของการ Analysis และ ค) หน้าจอข้อกำหนดของการ Analysis

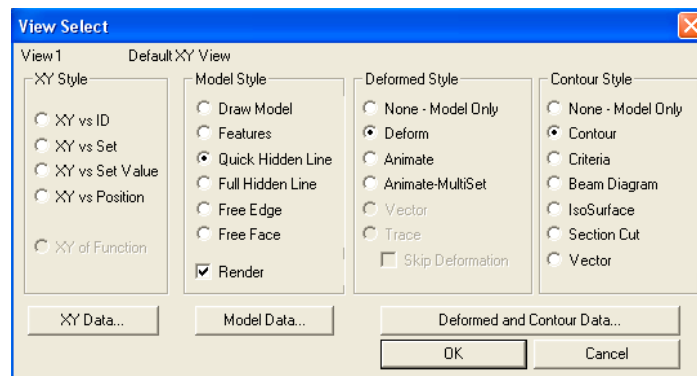


ภาพที่ 31 เมนูคำสั่งที่ใช้ในการแสดงผลวิเคราะห์

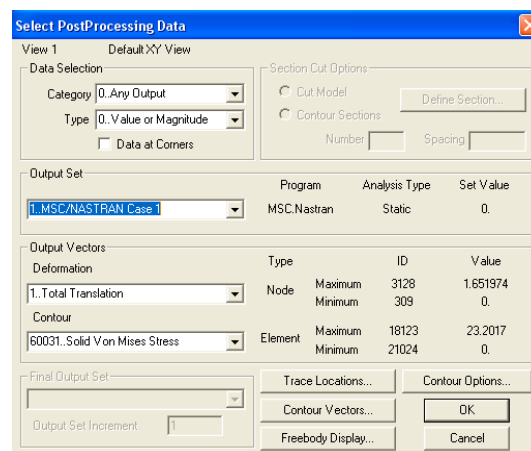
Scale ใหม่เป็น 1 : 1 (ภาพที่ 33 ข) ภาพที่ 35 แสดงลักษณะการยุบตัวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจริง หลังแก้ไข Scale แล้ว ภาพที่ 34 แสดงตัวอย่างผลของการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ตำแหน่ง A โดยแสดงระดับชั้นสีของความเค้นของฝาคออบระดับกรอบไฟฟ้าที่บริเวณต่าง ๆ เป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2) ภาพที่ 35 แสดงระดับชั้นสีของระยะยุบของฝาคออบระดับกรอบไฟฟ้า เป็น มิลลิเมตร (mm)

- 10) บันทึกค่าความเค้น และระยะยุบที่ได้จากการวิเคราะห์
- 11) ปฏิบัติซ้ำในหัวข้อที่ 7 ถึง 10 โดยเปลี่ยนขนาดของ Load ที่กระทำ จนกว่าจะได้ค่าความเค้นเท่ากับ 43.5 N/mm^2 แล้วจึงหยุดการวิเคราะห์
- 12) ปฏิบัติซ้ำในหัวข้อที่ 7 ถึง 11 โดยกำหนดตำแหน่งของ Load ตามแสดงในภาพที่ 21 (โมเดล B, C, D, E และ F ตามลำดับ)
- 13) พล็อตกราฟจากข้อมูลที่ได้ ระหว่างแรงกับความเค้น และแรงกับระยะยุบ ของโมเดล A, B และ C และโมเดล D, E และ F

ก

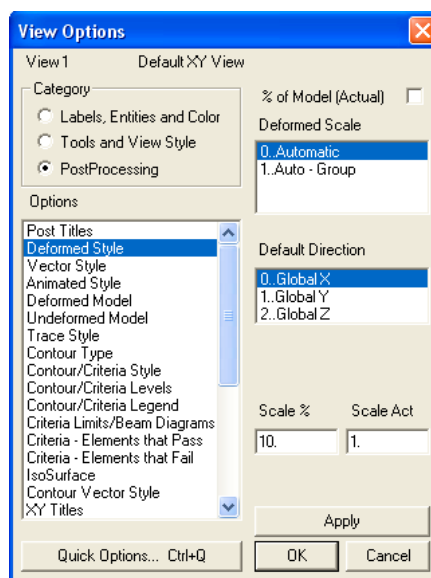


ข

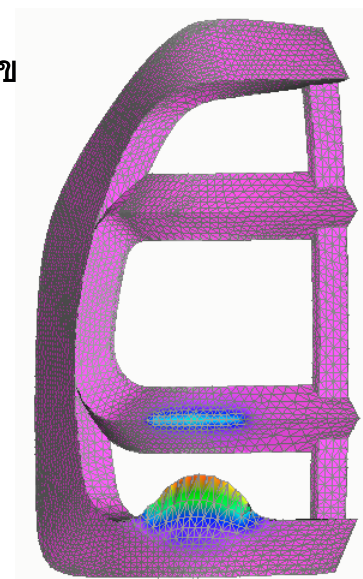


ภาพที่ 32 หน้าจอการกำหนดรูปแบบการแสดงผล

ก

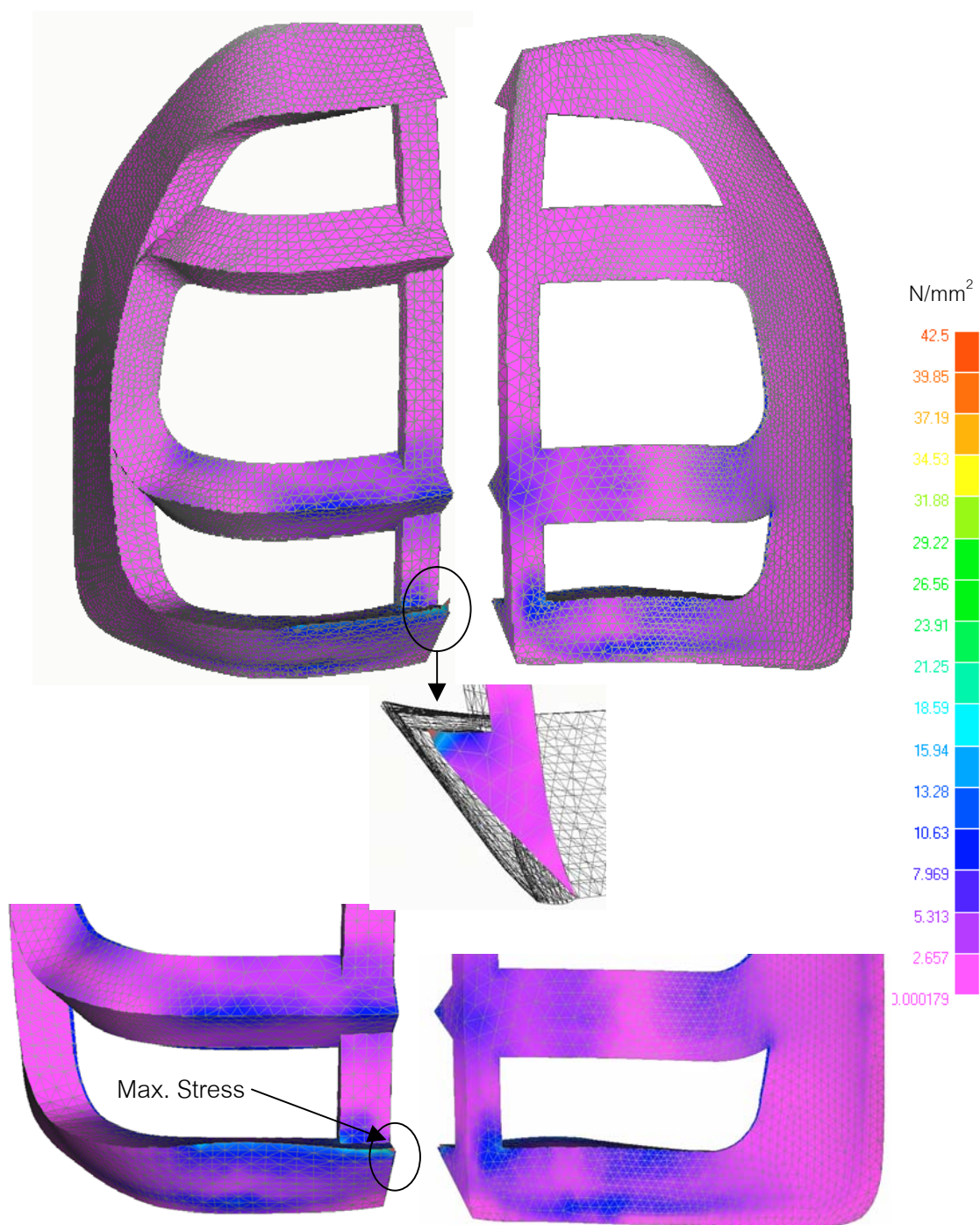


ข

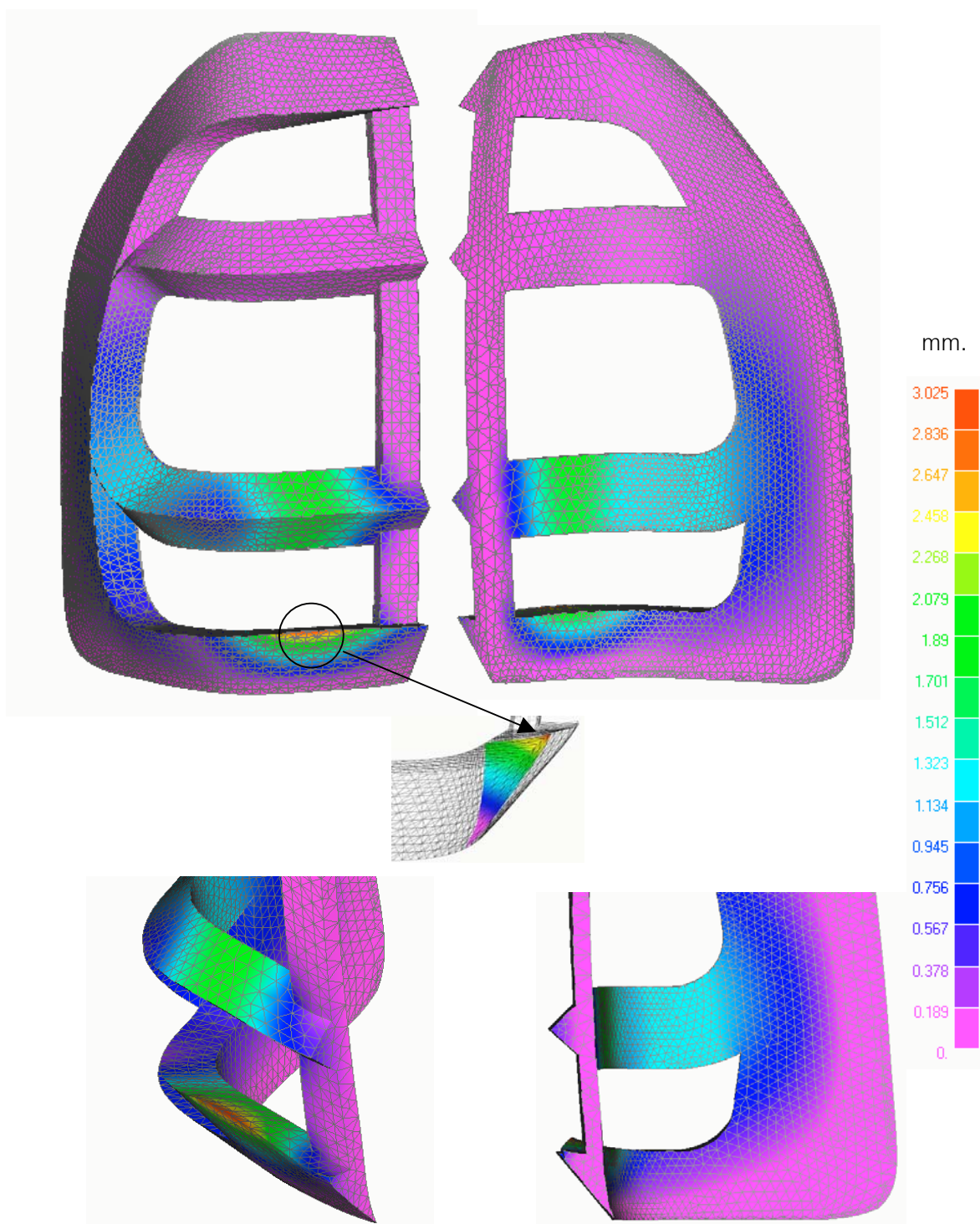


ภาพที่ 33 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ และหน้าจอการปรับขนาดสเกลของชิ้นงาน โดยภาพ

ก) หน้าจอที่ใช้ในการกำหนดสเกล และ ข) การแสดงผลของระยะยูนที่สเกล 5:1



ภาพที่ 34 ตัวอย่างระดับชั้นสีของความเค้นที่บริเวณต่าง ๆ ของฝาดรอประดับกรอบไฟฟ้า



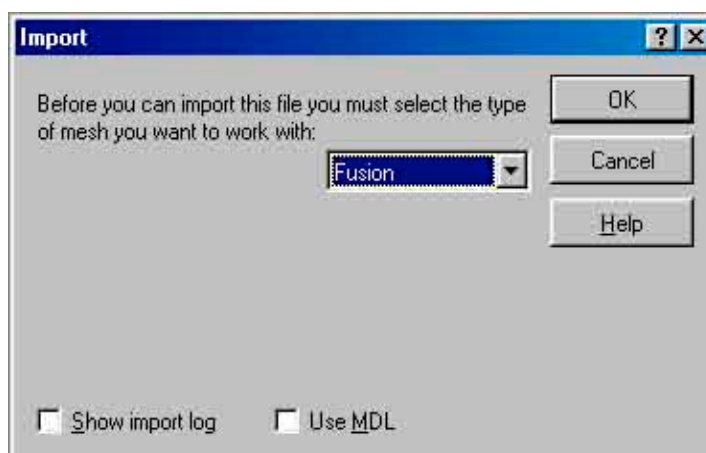
ภาพที่ 35 ตัวอย่างระดับชั้นสีของระยะยวบที่บริเวณต่างๆ ของฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย

4. การจำลองการไหลของโพลีเอทิลีนโดยใช้ CAE

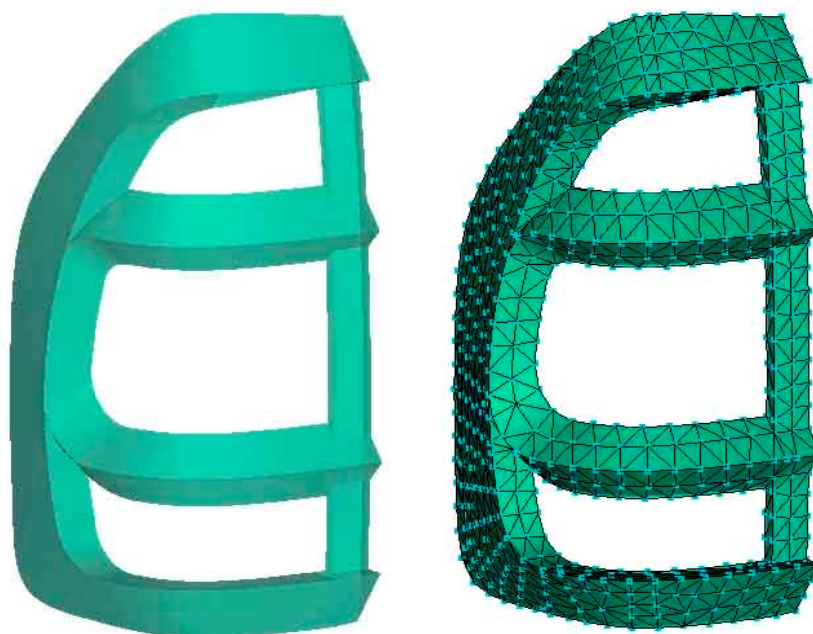
การจำลองการไหลของโพลีเอทิลีน ในขณะที่ฉีดด้วยกระบวนการ RIM สามารถใช้เทคโนโลยี CAE (โดยซอฟต์แวร์ที่ใช้ คือ Moldflow Plastic Insight) กำหนดคุณสมบัติของโพลีเอทิลีน และกำหนดเงื่อนไขการฉีด เช่น ทางเข้าแม่พิมพ์ (หรือ Gate) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของโพลีเอทิลีนขณะไหลเข้าแม่พิมพ์ ตัวอย่างผลที่สามารถวิเคราะห์ได้ คือ เวลาในการไหลเต็ม (Fill Time) ตำแหน่งการเกิด Air Trap และตำแหน่งและขนาดของแนวการเกิด Weld Line เป็นต้น

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการจำลอง สามารถนำมาใช้กำหนดเวลาในการไหลเต็ม ตำแหน่งของ Gate และตำแหน่งรูระบายอากาศ (หรือ Air Vent) วิธีการจำลองมีลำดับดังต่อไปนี้

- 1) นำแบบ CAD ที่เป็น Surface ที่ออกแบบโดยใช้ Pro/ENGINEER และแปลงเป็นไฟล์สกุล .igs เข้าสู่โปรแกรม Moldflow Plastic Insight ในโหมด Fusion (ภาพที่ 36)
- 2) สร้าง Mesh สามเหลี่ยมแบบ Fusion Mesh โดยภาพที่ 37 ก แสดงขึ้นงานก่อนทำการ Mesh และภาพที่ 37 ข แสดงขึ้นงานเมื่อ Mesh แล้วเสร็จ
- 3) ตรวจสอบค่า Average Aspect Ratio โดยเลือกคำสั่ง Aspect Ratio ในโหมด Mesh (ภาพที่ 38) ถ้าค่าที่ได้มีค่ามากกว่า 6 ต้องแก้ไขการ Mesh โดยปรับการวางตัวของเอลิเมนต์ใหม่ เพื่อให้ค่า Average Aspect Ratio มีค่าต่ำกว่า 6 โดยภาพที่ 39 ก และ ข แสดงการ Mesh ขึ้นงานก่อน และหลังแก้ไขค่า Average Aspect Ratio ภาพที่ 39 ค แสดงตัวอย่างผลสรุปหลังการปรับ Average Aspect Ratio แล้วโดยใช้คำสั่ง Mesh Statistics



ภาพที่ 36 ขั้นตอนการ Import ขึ้นงาน



ก ชิ้นงานก่อน Mesh

ข ชิ้นงานหลัง Mesh

ภาพที่ 37 การสร้าง Mesh แบบ Fusion Mesh

4) ตรวจสอบการเกิดการตัดกัน (Intersection) และการซ้อนทับกัน (Overlapping) ของเอลิเมนต์ (ภาพที่ 40 ก) โดยเลือกคำสั่ง Overlapping Elements (ภาพที่ 38)

5) ตรวจสอบทิศทางการวางตัวของเอลิเมนต์ (Mesh Orientation ภาพที่ 40 ข) โดยใช้คำสั่ง Orientation (ภาพที่ 38)

6) ตรวจสอบการเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ (Mesh Connectivity ภาพที่ 40 ค) โดยใช้คำสั่ง Connectivity (ภาพที่ 38)

7) ตรวจสอบตำแหน่งที่เกิด Free Edges (ภาพที่ 40 ง) โดยใช้คำสั่ง Free Edges (ภาพที่ 38)

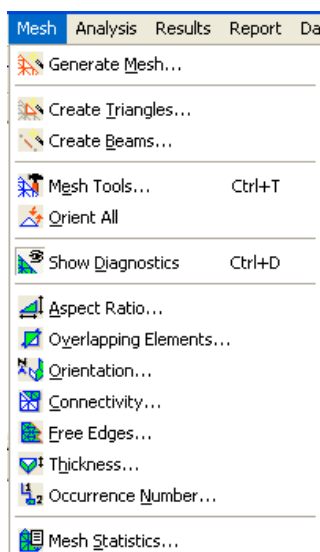
8) ตรวจสอบคุณภาพของ Mesh ขั้นสุดท้าย โดยใช้คำสั่ง Mesh Statistics (ภาพที่ 38) คุณภาพของการ Mesh มีข้อมูลตามแสดงเช่นเดียวกับภาพที่ 39 ค จากข้อมูลนี้ ต้องตรวจสอบว่า

ก) ไม่เกิด Free Edges

ข) การวางตัวของเอลิเมนต์ในทิศทางเดียวกัน

ค) ไม่เกิดการ Intersection

ง) ไม่เกิดการ Overlapping

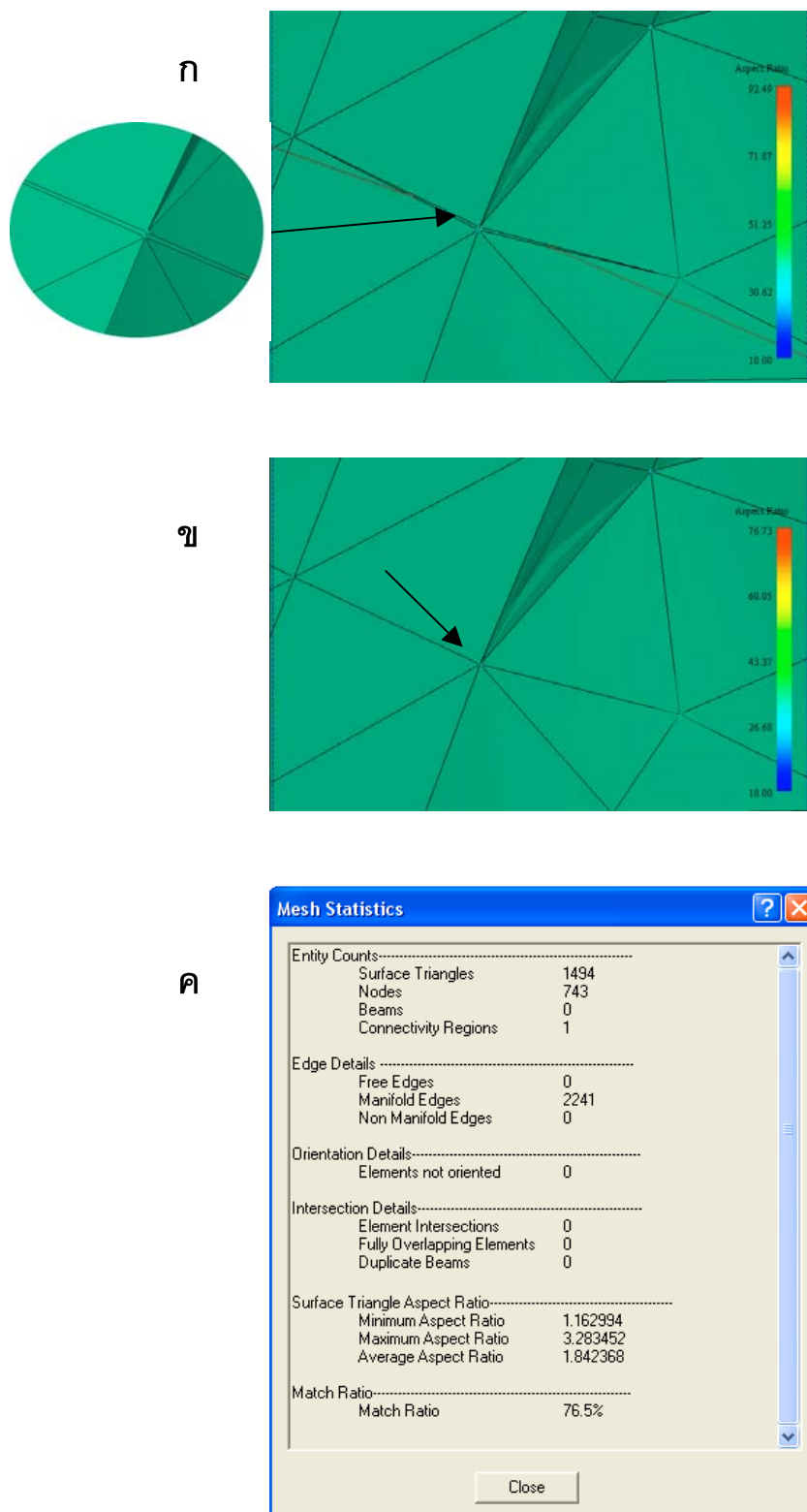


ภาพที่ 38 เมนูคำสั่งที่ใช้ในการตรวจสอบชิ้นงาน

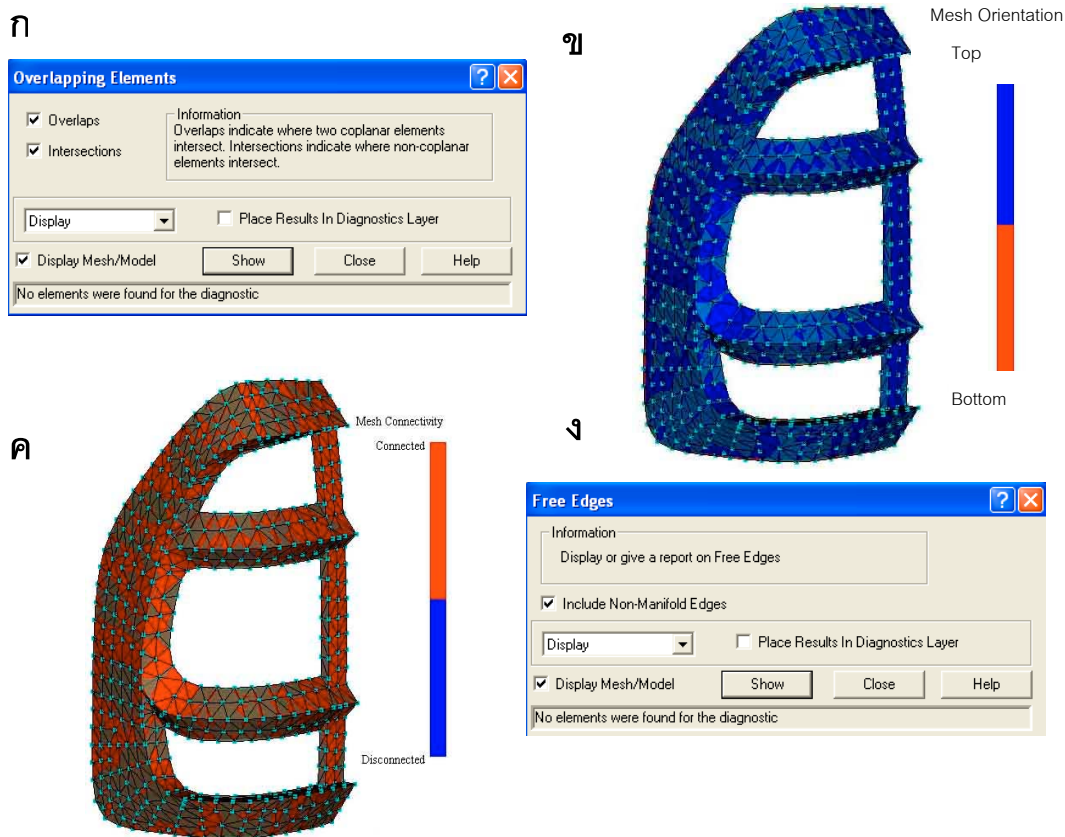
- 9) ค่า Average Aspect Ratio ไม่ควรเกิน 6
- 10) ตรวจสอบตำแหน่งที่เกิด Free Edges (ภาพที่ 40 ง) โดยใช้คำสั่ง Free Edges (ภาพที่ 38)
- 11) ตรวจสอบคุณภาพของ Mesh ขั้นสุดท้าย โดยใช้คำสั่ง Mesh Statistics (ภาพที่ 38)

คุณภาพของการ Mesh มีข้อมูลตามแสดงเช่นเดียวกับภาพที่ 39 ค จากข้อมูลนี้ ต้องตรวจสอบว่า

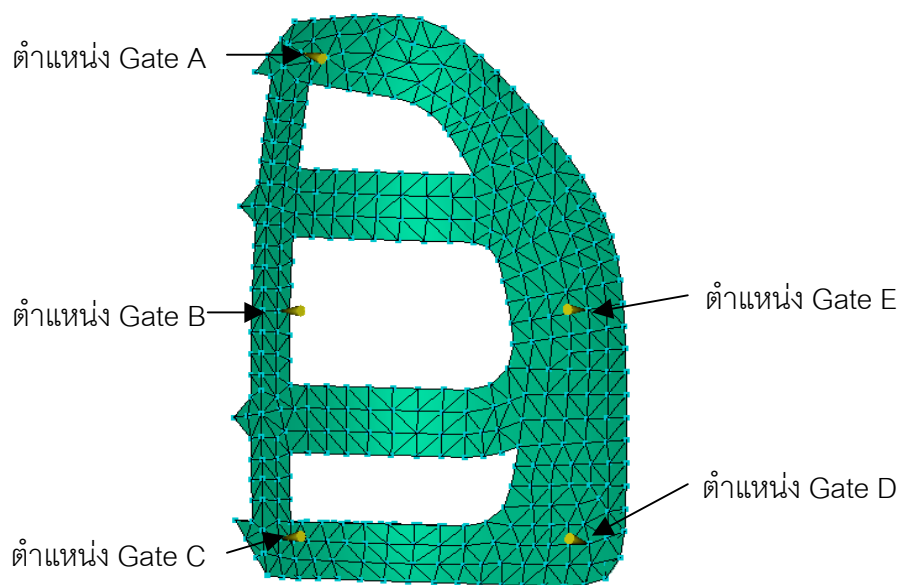
 - ก) ไม่เกิด Free Edges
 - ข) การวางตัวของเอลิเมนต์ในทิศทางเดียวกัน
 - ค) ไม่เกิดการ Intersection
 - ง) ไม่เกิดการ Overlapping
 - จ) ค่า Average Aspect Ratio ไม่ควรเกิน 6
- 12) กำหนดให้แม่พิมพ์เป็นแบบ 1 Cavity
- 13) กำหนดตำแหน่งทางเข้าของโพลีเอธิลีน (Gate) บริเวณต่าง ๆ ที่คาดว่าจะเป็
ตำแหน่งที่ให้เวลาการไหลจนเต็มแม่พิมพ์น้อย เกิด Air Trap และ Weld Line น้อย ตำแหน่ง
ทางเข้าที่ใช้จำลองการไหลของโพลีเอธิลีน กำหนดไว้ 5 ตำแหน่ง (A ถึง E) ที่ผิวด้านหลังของฝา
ครอบระดับกรอบไฟท้าย ซึ่งได้แสดงในภาพที่ 41 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้าเท่ากับ
13 มิลลิเมตร คำสั่งที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งของ Gate คือ Set Injection Location
(ภาพที่ 42)



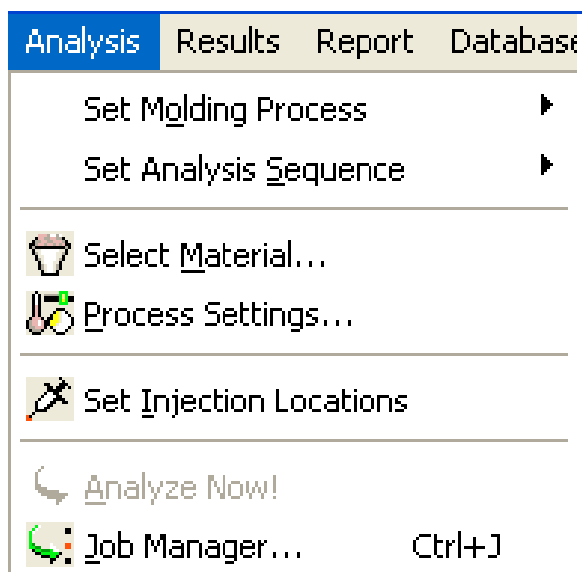
ภาพที่ 39 การแก้ไขค่า Aspect Ratio (ก และ ข) และสรุปข้อมูลการ Mesh (ค)



ภาพที่ 40 ก) เมนูการตรวจสอบ Overlapping ข) ผลการตรวจสอบการวางตัวของเอลิเมนต์
ค) ผลการตรวจสอบการเชื่อมติดกันของเอลิเมนต์ ง) เมนูการตรวจสอบ Free Edges



ภาพที่ 41 ภาพด้านหลังของชิ้นงาน แสดงตำแหน่งของทางเข้าของโพสิยูรีเทนที่ผิวด้านหลัง



ภาพที่ 42 เมนูคำสั่งที่ใช้กำหนดค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์

14) กำหนดขนาดของ Gate ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 13 มิลลิเมตร ความยาวของ Sprue หรือ ท่อยางจากหัวฉีดของเครื่อง RIM ถึง Gate เท่ากับ 100 มิลลิเมตร โดยใช้คำสั่ง Runner System Wizard ภาพที่ 43 แสดงหน้าจอการป้อนค่าต่าง ๆ ของ Runner

15) เลือกการวิเคราะห์แบบ Reaction Injection Molding (RIM) (ภาพที่ 44 ก)

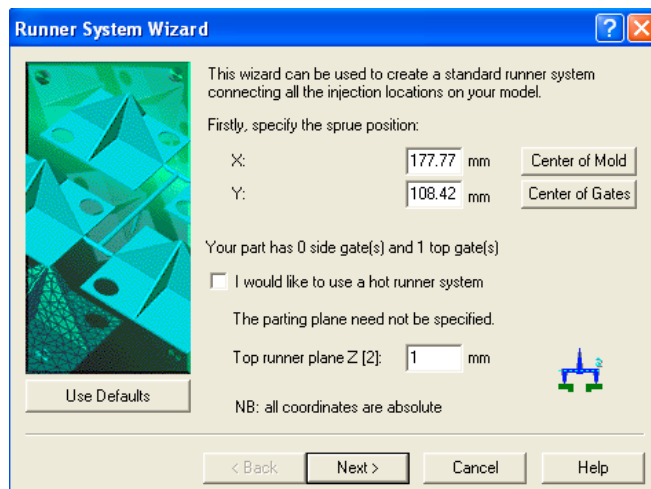
16) กำหนดคุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้ โดยใช้คำสั่ง Material Setting (ภาพที่ 44 ข) และตารางที่ 8 แสดงค่าต่าง ๆ ที่ใช้ป้อน

17) กำหนดเงื่อนไขการฉีด ได้แก่ ค่า Mold Temperature, Melt Temperature, Injection Time และ Curing Time เป็นต้น โดยใช้คำสั่ง Process Setting (ภาพที่ 42) ค่าต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการกำหนดเงื่อนไขเหล่านี้ได้แสดงในตารางที่ 9 ภาพที่ 45 แสดงหน้าจอซอฟต์แวร์สำหรับการป้อนค่า

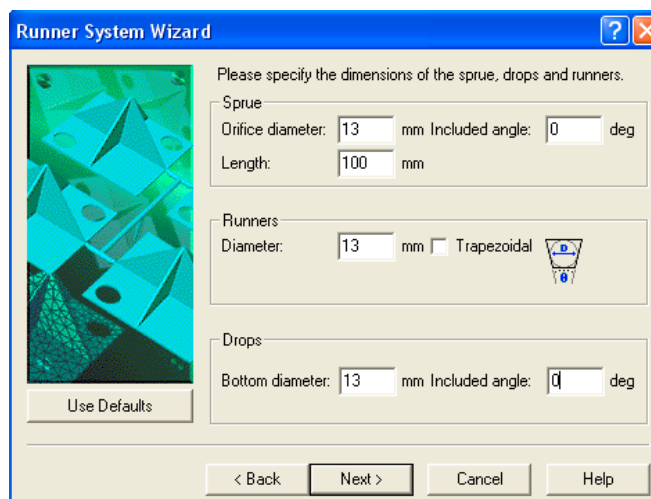
18) แต่ละตำแหน่งของ Gate กำหนดเวลาที่ใช้ฉีด (Fill Time) หรือ เวลาที่โพลียูรีเทนไหลเต็มแม่พิมพ์เท่ากับ 1, 2, 4, 6 และ 8 วินาที เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ต่าง ๆ และสำหรับนำไปใช้กำหนดเวลาการฉีด และอัตราการไหลที่เหมาะสมให้แก่เครื่อง RIM เมื่อทำการฉีดชิ้นงานจริง

19) ใช้คำสั่ง Analysis ให้ซอฟต์แวร์ทำการวิเคราะห์

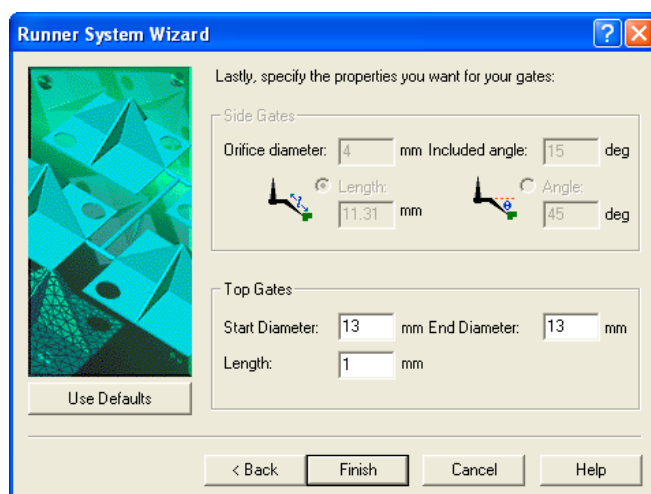
ก



ข

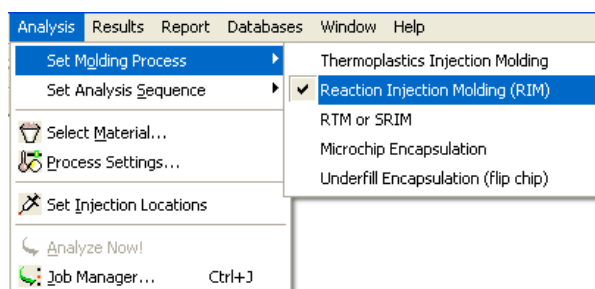


ค

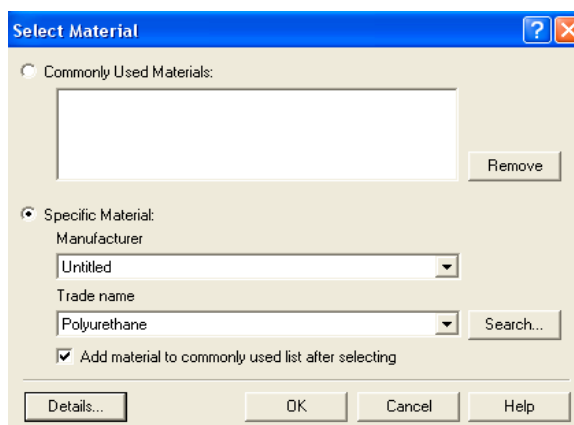


ภาพที่ 43 แสดงหน้าจอการป้อนค่าของ Runner

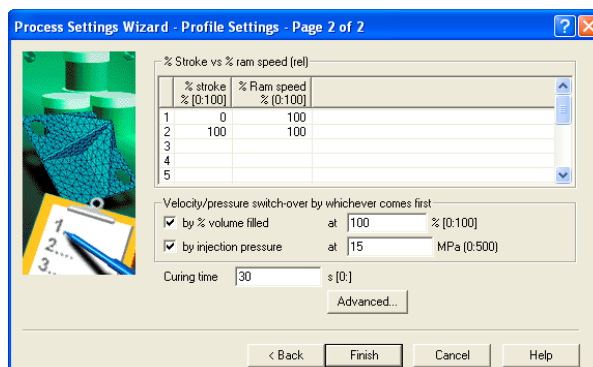
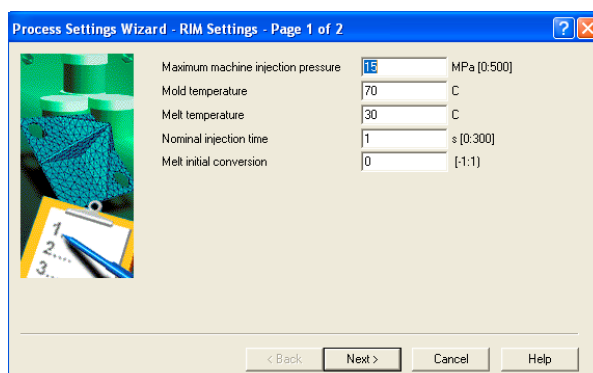
ก



ข



ภาพที่ 44 ก) เมนูคำสั่งที่ใช้กำหนดกระบวนการฉีด ข) การกำหนดวัสดุที่ใช้ในการฉีด



ภาพที่ 45 การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการจำลองการฉีดโพลียูรีเทน

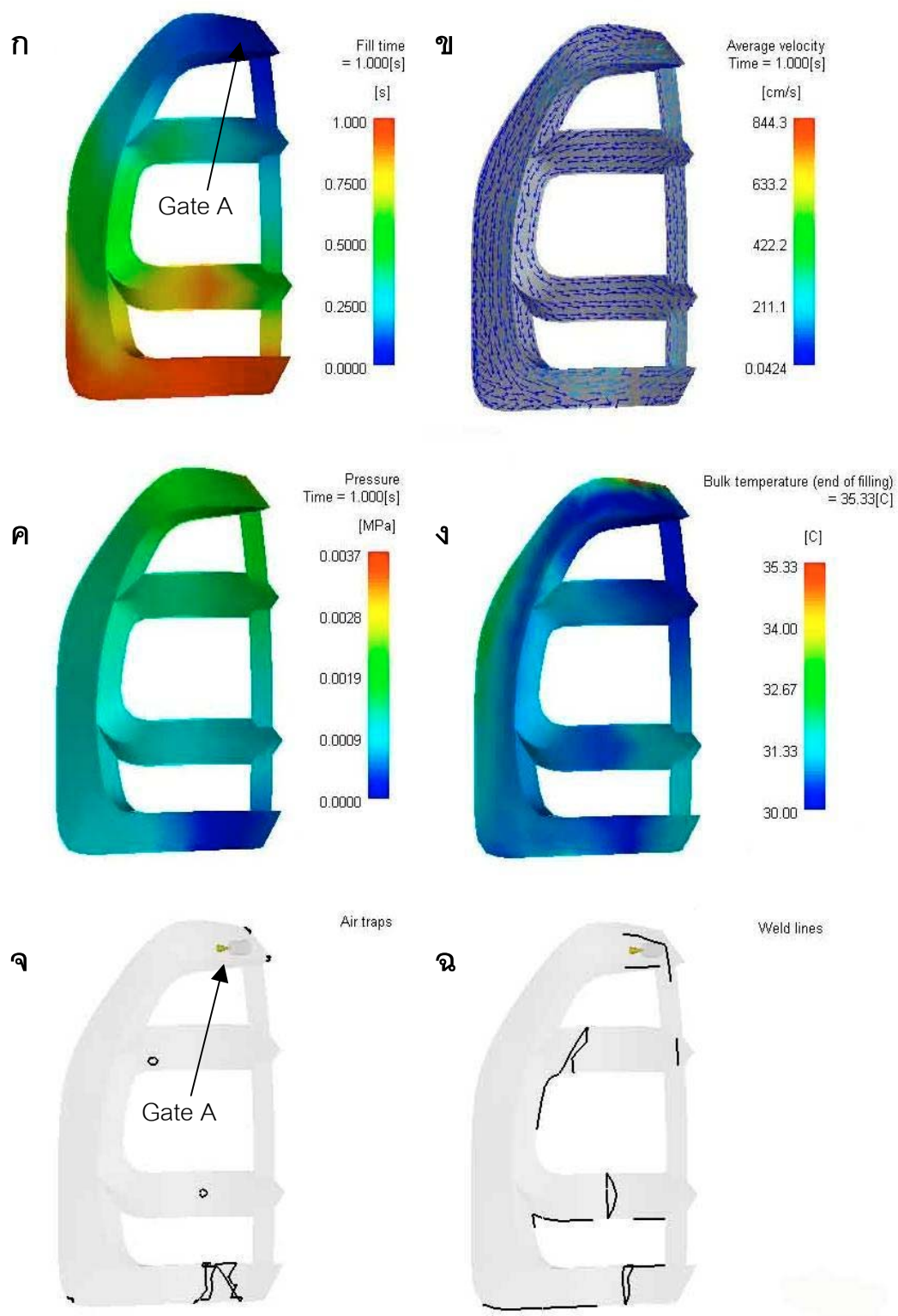
ตารางที่ 8 คุณสมบัติของโพลียูรีเทน

Material Data: Polyurethane		
Specific Gravity	1.1	g/ cm ³
Density	1.1	g/ cm ³
Viscosity at 25 °C	875	MPa.s
Hardness	58	Shore D
Process Temperature	30-120	°C

ตารางที่ 9 ค่าเงื่อนไขการฉีดโพลียูรีเทน

Process parameters:		
Fill time	1	s
Curing time	30	s
Velocity/pressure switch-over by % volume	100	%
Velocity/pressure switch-over by injection pressure	15	MPa.
Mold temperature	70	°C
Ambient temperature	25	°C
Gate Diameter	13	mm
Sprue Diameter	13	mm
Sprue Length	100	mm

20) แสดงผลการจำลองการไหล โดยภาพที่ 46 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ Gate ที่ตำแหน่ง A และเวลาฉีดเท่ากับ 1 วินาที โดยภาพที่ 46 ก แสดงระดับชั้นสีของเวลาการไหลของโพลียูรีเทนเข้าแม่พิมพ์ถึงบริเวณต่าง ๆ ในแม่พิมพ์ เป็นวินาที (sec) ภาพที่ 46 ข แสดงความเร็วเฉลี่ยของโพลียูรีเทนที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นเซนติเมตรต่อวินาที (cm/sec) ภาพที่ 46 ค แสดงค่าของแรงดันเป็นระดับชั้นสีตามบริเวณต่าง ๆ ในแม่พิมพ์ ภาพที่ 46 ง แสดงอุณหภูมิเป็นระดับชั้นสีของโพลียูรีเทนเมื่อสิ้นสุดการฉีด ภาพที่ 46 จ แสดงตำแหน่งของ Air Trap ที่เกิดใน



ภาพที่ 46 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทน แสดงผลเป็นระดับชั้นสี เมื่อเวลาฉีดเท่ากับ 1 วินาที

ชิ้นงาน และภาพที่ 46 จ แสดงตำแหน่ง และขนาดของ Weld Line ที่เกิดในชิ้นงาน ตารางที่ 10 แสดงตัวอย่างของผลสรุปที่ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ให้

21) บันทึกผลการทดสอบ ตามตัวอย่างในตารางที่ 11 และตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงาน (จากการเกิด Air Trap และ Weld Line) โดยขนาดของ Air Trap ได้จัดกลุ่มเป็น 3 ขนาด คือ

ขนาดเล็ก (S) พื้นที่ตั้งแต่ 0 ถึง 4 ตารางมิลลิเมตร

ขนาดกลาง (M) พื้นที่ตั้งแต่ 4 ถึง 10 ตารางมิลลิเมตร และ

ขนาดใหญ่ (L) พื้นที่มากกว่า 10 ตารางมิลลิเมตร ขึ้นไป

ตัวอย่างในตารางที่ 11 แสดงผลวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทิลีนที่ Gate ตำแหน่ง A ที่เวลาที่ใช้ฉีดทั้ง 5 เวลา (1, 2, 4, 6 และ 8 วินาที)

ตารางที่ 10 ตัวอย่างผลที่โปรแกรมคำนวณได้

Process parameters :		
Volume :		
Total volume	599.01	cm ³
Volume filled initially	0	cm ³
Volume to be filled	599.01	cm ³
Part volume to be filled	545.90	cm ³
Sprue/runner/gate volume to be filled	53.11	cm ³
Model details :		
Total number of nodes	744	nodes
Number of part elements	1495	elements
Average aspect ratio of triangle elements	1.842	
Maximum aspect ratio of triangle elements	3.828	
Minimum aspect ratio of triangle elements	1.163	

22) ทำการทดสอบซ้ำ โดยกำหนดเงื่อนไขของเวลาฉีด (Fill Time) ให้ครบจำนวนตามข้อ 15 แล้วเปลี่ยนตำแหน่ง Gate ให้ครบ 5 ตำแหน่ง (ตามแสดงในภาพที่ 41) ตำแหน่งของ Gate ที่ให้ผลการวิเคราะห์ของการเกิด Air Vent ฯลฯ ที่ดีที่สุด จะนำไปใช้กำหนดเป็นตำแหน่งที่จะเจาะเป็นรูเพื่อใช้เป็น Gate ของแม่พิมพ์

ตารางที่ 11 ตัวอย่างผลวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนที่ Gate ตำแหน่ง A

Model	Gate	Fill	Flow	Velocity	Bulk	Max.Clamp	Air Trap		
	No.	Time	Rate		Temperature	Force	ขนาด Air Trap		
		(sec)	(cm ³ /sec)	(cm/sec)	(°C)	(Tons)	S	M	L
A1	A	1	548.36	0.04-844.3	30-35.33	0.0035	5	0	2
A2	A	2	274.18	0.02-422.65	30-43.83	0.0015	5	0	2
A4	A	4	137.09	0.009-210.5	30-42.69	0.0010	5	0	2
A6	A	6	91.39	0.008-140.3	30-45.82	0.0005	5	0	2
A8	A	8	68.54	0.005-105.2	30-48.17	0.0003	5	0	2

5. การออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้ CAD

แม่พิมพ์ที่จะใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM ได้ออกแบบโดยใช้ CAD (ซอฟต์แวร์ Pro/ENGINEER) โดยใช้แบบ CAD (ที่ออกแบบจาก **วิธีการ หัวข้อ 1 การออกแบบชิ้นงานทดสอบโดยใช้ CAD**) มาอ้างอิง วิธีการของการออกแบบแม่พิมพ์มีลำดับดังต่อไปนี้

- 1) สร้าง Part ในคอมพิวเตอร์ ด้วยซอฟต์แวร์ Pro/ENGINEER เป็นกล่องสี่เหลี่ยม สำหรับใช้สร้างเป็นแม่พิมพ์ด้าน Core และ Cavity ให้ไฟล์นี้ชื่อ rawmaterial
- 2) ออกแบบแม่พิมพ์ โดยเลือกโหมด Mold
- 3) นำผาครอบประดับกรอบไฟทำไปประกอบกับ Part ชื่อ rawmaterial และออกแบบโดยวางในตำแหน่งที่ทำให้แม่พิมพ์เปิดปิดได้ง่าย สะดวก และไม่เกิด Undercut (ภาพที่ 47)
- 4) กำหนดค่าหดเซยการหดตัว (Shrinkage) ของโพลียูรีเทนเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ (บริษัท Huntsman Polyurethane จำกัด)

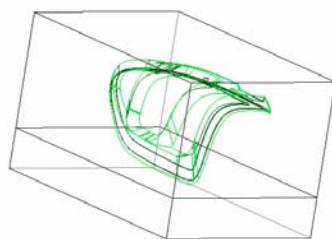
5) กำหนดเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line)

6) สร้าง Gate โดยใช้ตำแหน่งที่ได้จากการวิเคราะห์ตาม **วิธีการ หัวข้อที่ 4 การ**

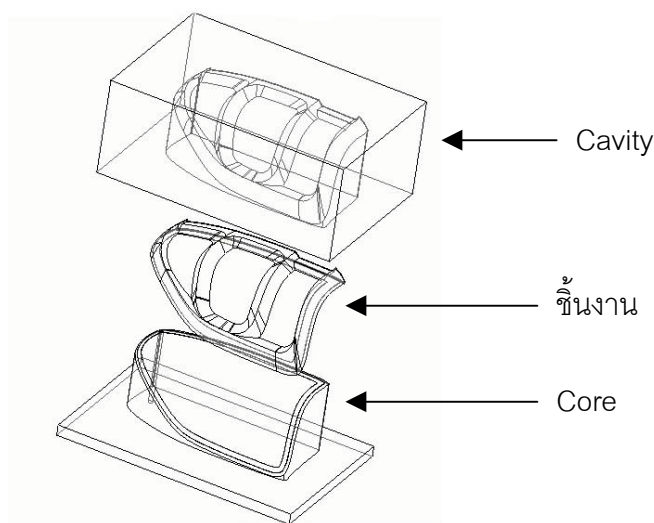
จำลองการไหลของโพลีเอทิลีนโดยใช้ CAE

7) ใช้คำสั่ง Split ในคำสั่ง Mold Comp เพื่อแยก Core และ Cavity ออกจากกันตามแนว Parting Line แบบ CAD ของแม่พิมพ์ ส่วนที่เป็น Core และ Cavity ได้แสดงในภาพที่ 48 แผนผังสรุปขั้นตอนในการใช้ CAD ในการออกแบบแม่พิมพ์ ซึ่งมีวิธีการตามข้อ 1 ถึง 7 นี้ ได้แสดงในภาพที่ 49

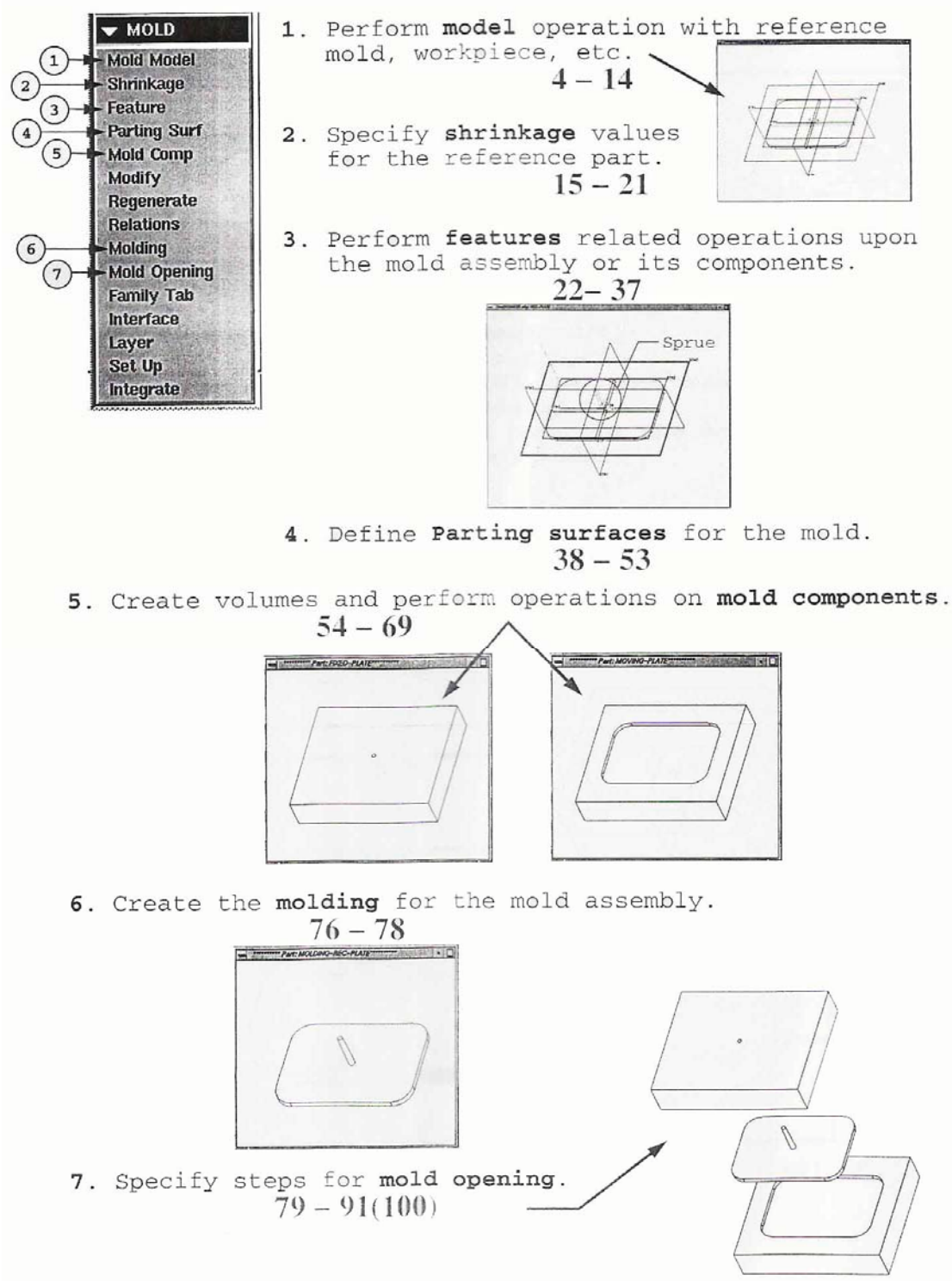
8) ใช้คำสั่ง Drawing เพื่อสรุปเป็นภาพวาด 2 มิติ แสดงส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ด้าน Core และ Cavity เพื่อใช้เป็นเอกสารประกอบการปรับปรุง และพัฒนาแม่พิมพ์ให้สมบูรณ์โดยภาพวาดรายละเอียดนี้ ได้แสดงในภาพที่ 50



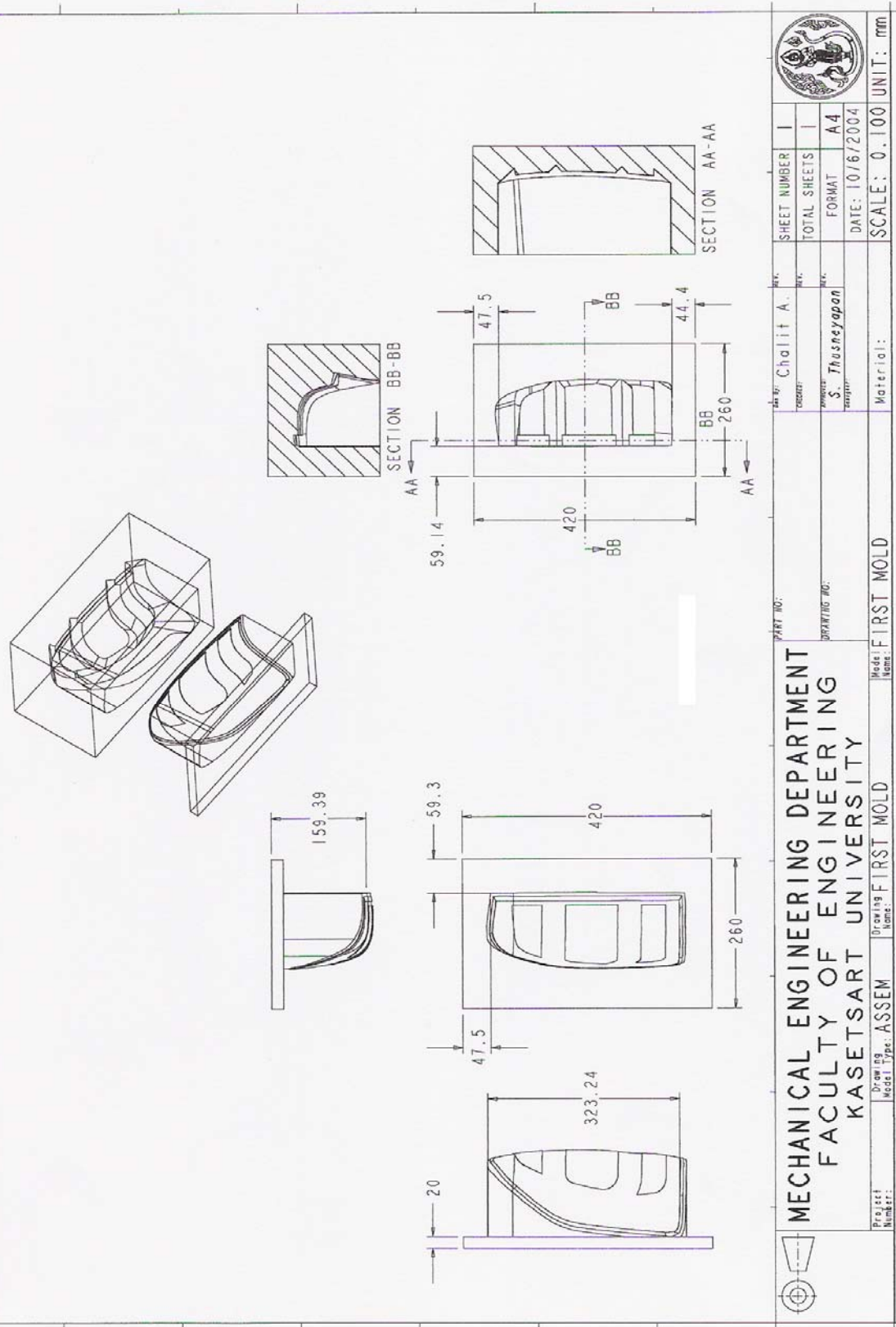
ภาพที่ 47 แสดงการวางชิ้นงานในแม่พิมพ์



ภาพที่ 48 แสดงการแยกแม่พิมพ์ด้าน Core และ Cavity ออกจากกันใน CAD



ภาพที่ 49 แผนผังขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์ด้วย CAD (สัจจาทิพย์, 2002)



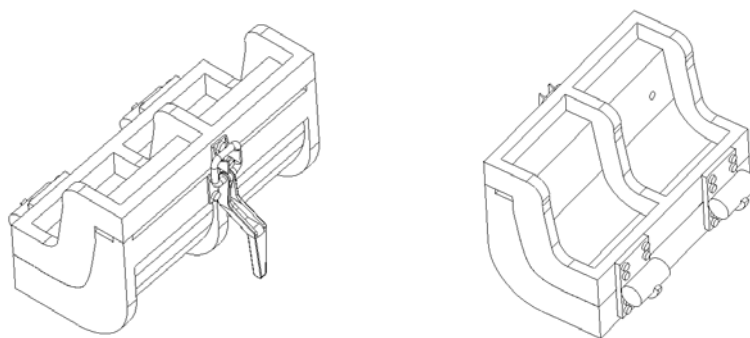
ภาพที่ 50 ภาพวาดรายละเอียดของแม่พิมพ์ด้าน Core และด้าน Cavity

9) เนื่องด้วยชิ้นส่วน Core และ Cavity ในภาพที่ 48 มีการเปิดปิดแม่พิมพ์เป็นแบบเชิงเส้น (หรือ ขึ้นลง) โดยต้องมีระยะเปิดแม่พิมพ์มากกว่า 202.5 มิลลิเมตร อีกทั้ง แม่พิมพ์ทั้งสองชิ้นมีน้ำหนักมาก 60.19 กิโลกรัมสำหรับ Core และ 133.40 กิโลกรัมสำหรับ Cavity (จากผลการคำนวณใน Pro/ENGINEER ที่ค่าความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ $7,870 \text{ kg/m}^3$ (บริษัท Tytlab จำกัด, 2005)) เพื่อเป็นการลดต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ทำแม่พิมพ์ และคำนึงถึงความสะดวกในการทำงาน และเคลื่อนย้ายแม่พิมพ์ ในขั้นตอนนี้จึงเป็นการปรับปรุงรูปทรงภายนอกของแม่พิมพ์ ให้มีน้ำหนักเบาลง และใช้บานพับในการหมุนเปิดปิดแม่พิมพ์แทนการเลื่อนขึ้นลง แม่พิมพ์ที่ปรับปรุงแล้วได้แสดงในภาพที่ 51 โดยน้ำหนักของ Core และ Cavity เท่ากับ 35.34 กิโลกรัมและ 54.96 กิโลกรัม ตามลำดับ (หรือลดลง 41.3% และ 58.8% ตามลำดับ) เนื่องจากแม่พิมพ์เหล็กมีน้ำหนักมาก (90.3 กิโลกรัม) ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการลดน้ำหนักของแม่พิมพ์ให้เบาลงด้วยการเลือกวัสดุอลูมิเนียมมาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แทน น้ำหนักของ Core และ Cavity เท่ากับ 11.80 กิโลกรัม และ 18.36 กิโลกรัม ตามลำดับ (หรือลดลง 66.67% จากผลการคำนวณใน Pro/ENGINEER ที่ค่าความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ $2,630 \text{ kg/m}^3$ (บริษัท Tytlab จำกัด, 2005)) ภาพวาดรายละเอียดของแม่พิมพ์ด้าน Core ได้แสดงในภาพที่ 52 และด้าน Cavity ในภาพที่ 53

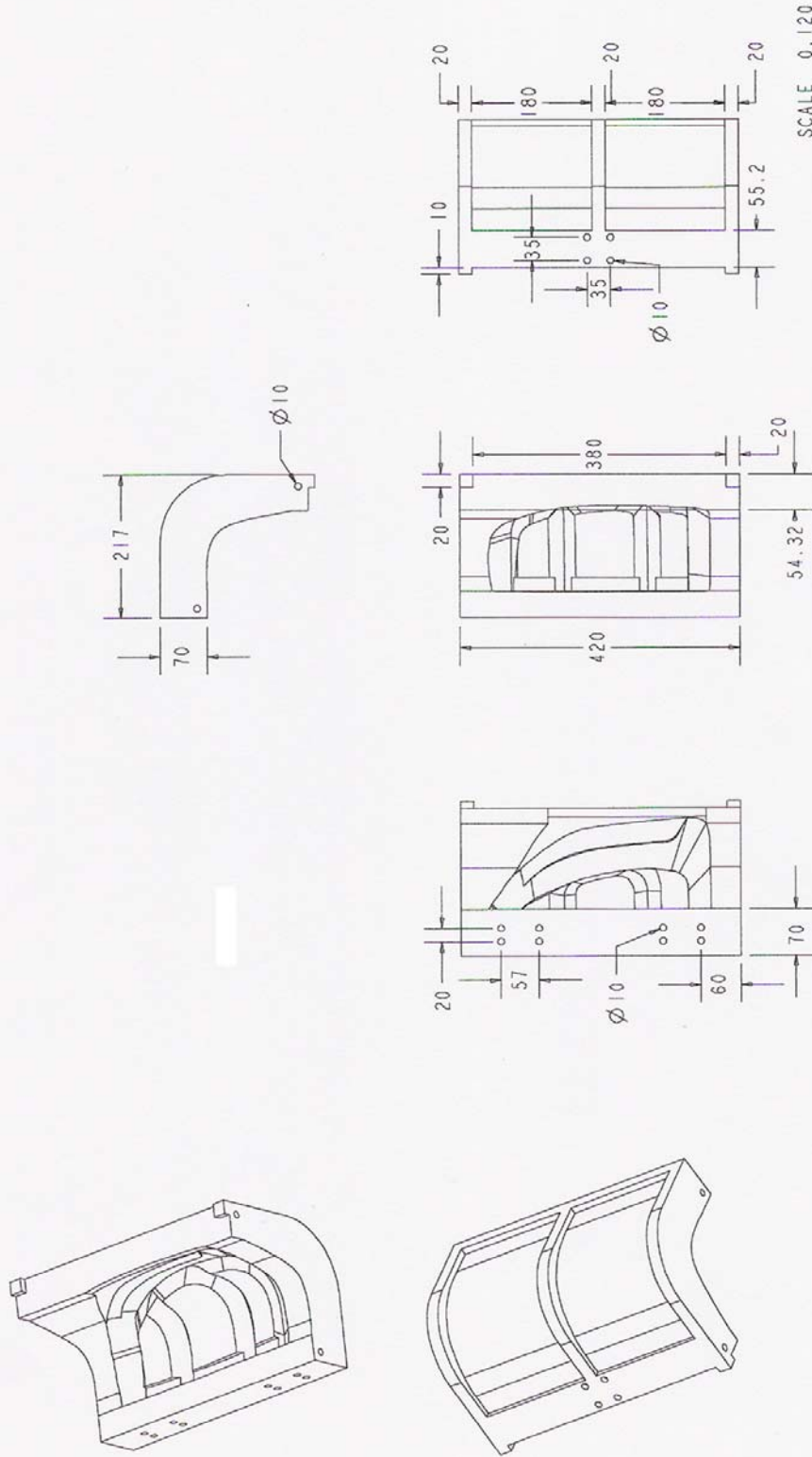
10) กำหนดตำแหน่งบานพับ และประกอบบานพับเข้ากับแม่พิมพ์

11) กำหนดตำแหน่งการติดตั้ง และทำการประกอบอุปกรณ์ยึดประกบแม่พิมพ์ (Clamp) เข้ากับแม่พิมพ์

12) ออกแบบโครงสร้างของฐานสำหรับติดตั้งแม่พิมพ์ให้สะดวกต่อการฉีด เปิดปิด และเคลื่อนย้ายแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ที่ออกแบบเสร็จสมบูรณ์แล้วได้แสดงในภาพที่ 54 ภาพวาดรายละเอียดได้แสดงในภาพที่ 55 และภาพแสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์พร้อมตารางวัสดุ (Bill of Material หรือ BOM) ได้แสดงในภาพที่ 56

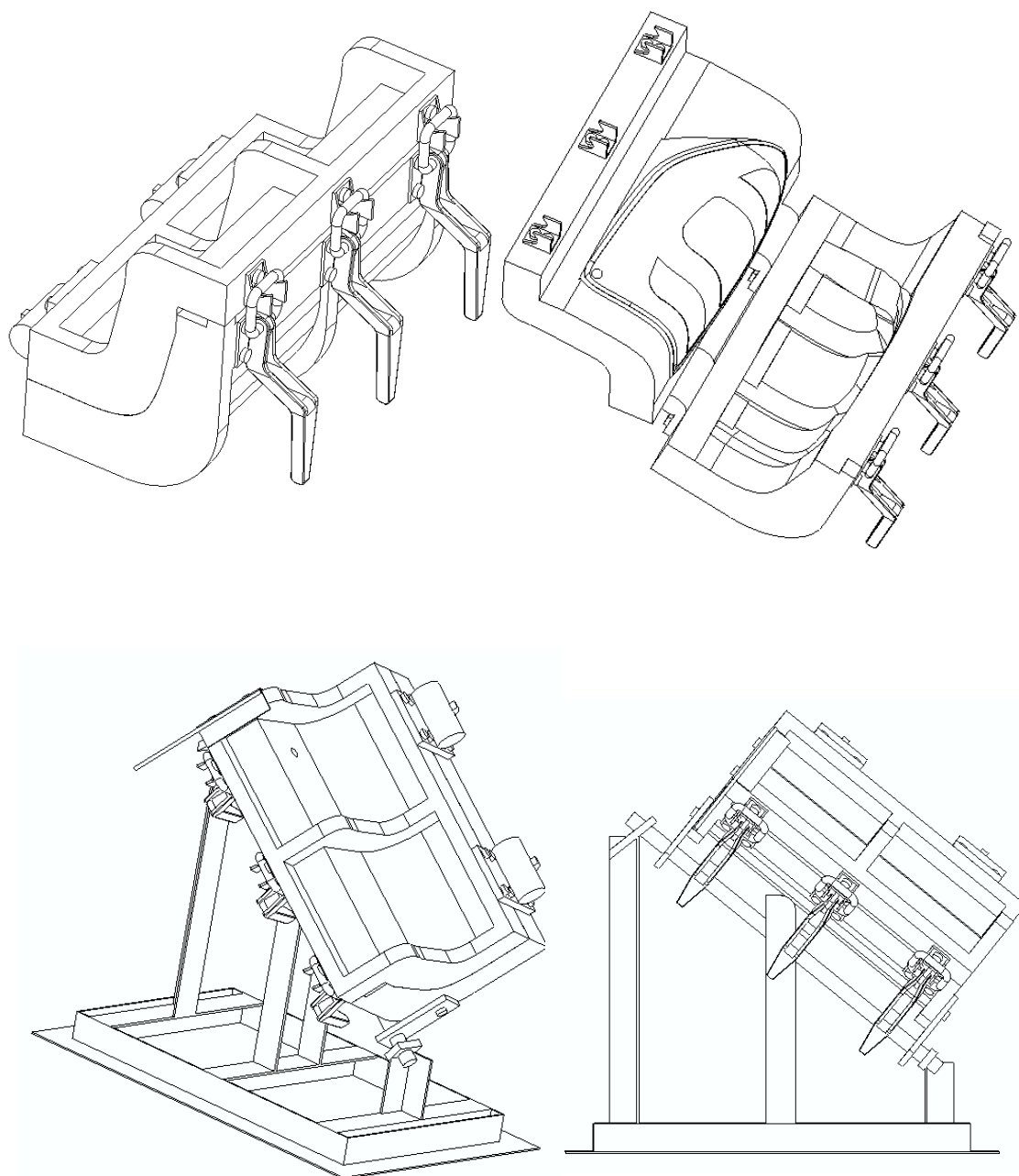


ภาพที่ 51 แม่พิมพ์ที่ปรับปรุงให้มีน้ำหนักเบาแล้ว

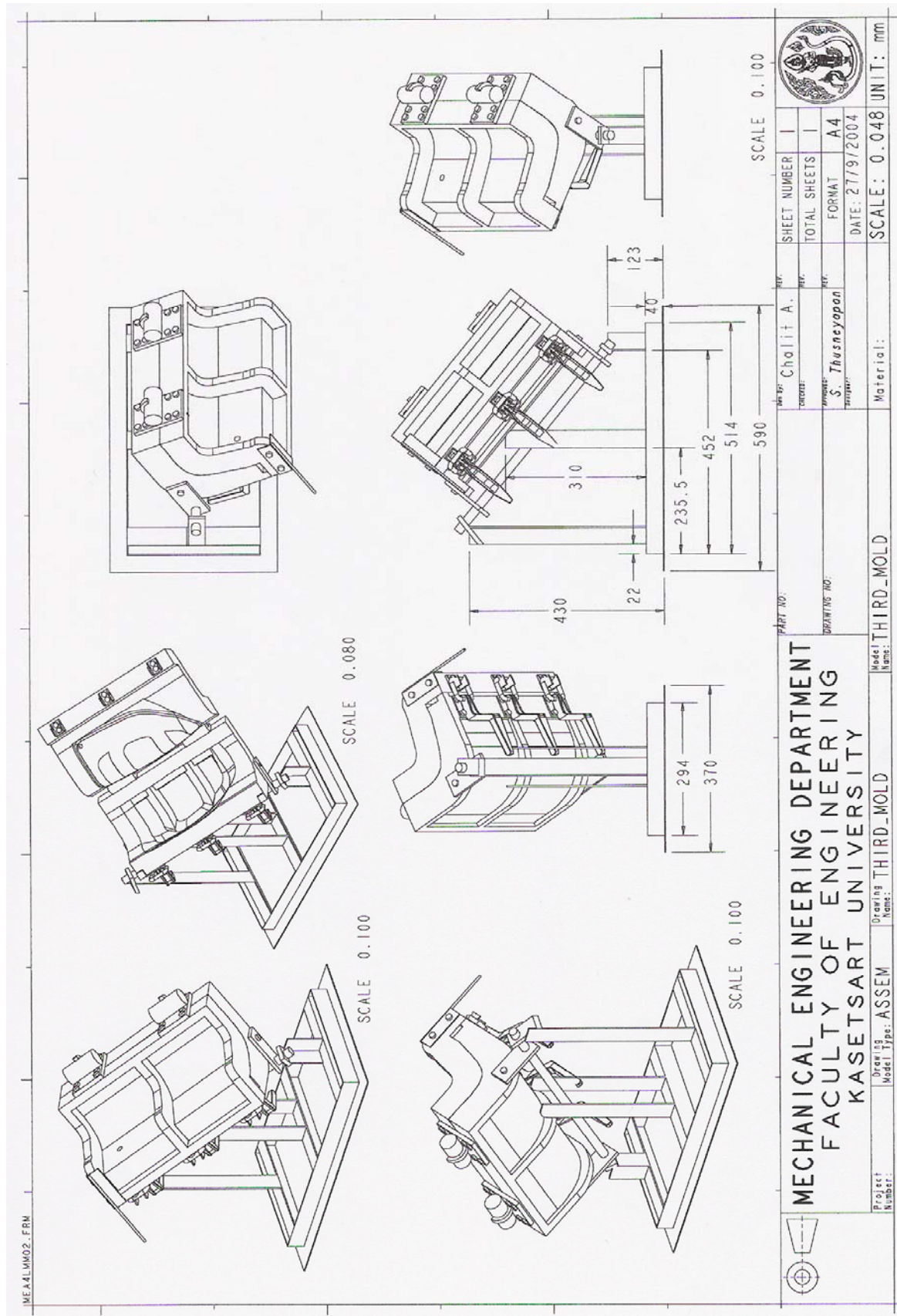


	MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT FACULTY OF ENGINEERING KASETSART UNIVERSITY	PART NO:		DESIGNED BY:	CHECKED BY:	DRAWN BY:	DATE: 20/2/2004	SCALE: 0.125	UNIT: mm
		Project Number:	Drawing Name:	Model Name:	Material:	Material:	Material:	Material:	Material:
Project Name:	Drawing Type:	Part Name:	Part Name:	Part Name:	Part Name:	Part Name:	Part Name:	Part Name:	Part Name:

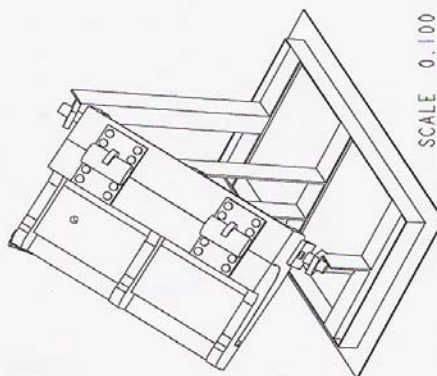
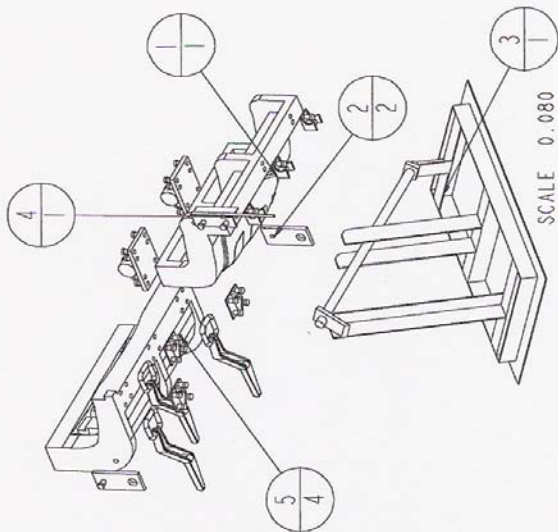
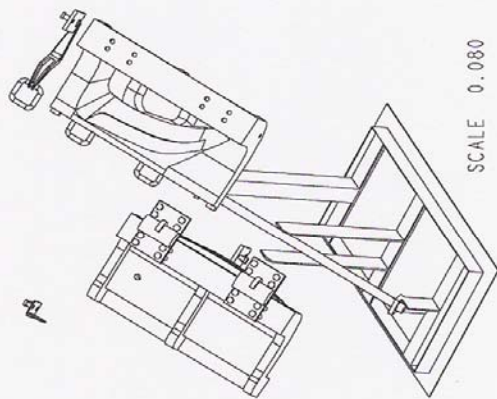
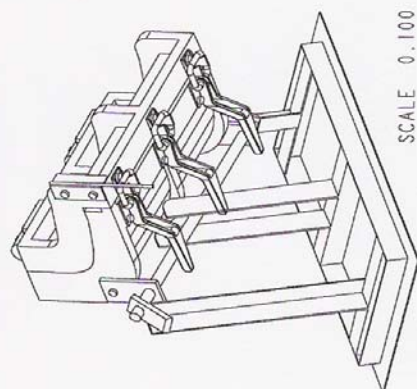
ภาพที่ 53 ภาพวาดรายละเอียดของแม่พิมพ์ด้าน Cavity ที่ได้ปรับปรุงให้มีความหนาแน่นและสะดวกต่อการใช้งาน



ภาพที่ 54 การติดตั้งแม่พิมพ์บนฐานที่ปรับปรุงแล้ว เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM



ภาพที่ 55 ภาพวาดรายละเอียดของแม่พิมพ์ฐานรูปใหม่



5	BOLT	4	PART
4	HINGE	1	PART
3	BASE3	1	PART
2	PLATE	2	PART
1	MOLD3	1	ASSEMBLY
No	Name	QTY	Type



MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF ENGINEERING
KASETSART UNIVERSITY

PART NO:

Des. by: Chalit A.

SHEET NUMBER



TOTAL SHEETS

FORMAT

DATE: 27/9/2004

DRAWING NO:

REV.

SCALE: 0.048 UNIT: mm

Project Number:

Drawing Name:

Model Name:

ASSEM

THIRD_MOLD

Material:

ภาพที่ 56 ภาพวาดแสดงส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฐานใหม่

6. การผลิตแม่พิมพ์

แม่พิมพ์ RIM ที่ใช้เป็นการว่าจ้างโรงงานผลิตแม่พิมพ์เป็นผู้ทำการผลิตแม่พิมพ์ตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยส่งมอบแบบแม่พิมพ์เป็นภาพวาดรายละเอียดตามแสดงในภาพที่ 52 และ 53 หรือเป็นไฟล์ CAD ให้แก่โรงงานรับทำแม่พิมพ์เพื่อใช้เสนอเงื่อนไขการผลิต

ภาพที่ 57 ถึง 60 แสดงแม่พิมพ์อลูมิเนียมหล่อสำหรับกระบวนการผลิตแบบ RIM บนฐานทดสอบ ที่ได้ผลิตเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ (ตามแบบในภาพ 54 และ 55) และภาพที่ 60 แสดงแม่พิมพ์ขณะเปิดเห็นผิวด้านในของ Core และ Cavity



ภาพที่ 57 แม่พิมพ์บนฐานทดสอบใหม่ (ด้านหน้า)



ภาพที่ 58 แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM (ด้านหลัง)



ภาพที่ 59 แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM (ด้านนอก)



ภาพที่ 60 แม่พิมพ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM (ด้านใน)

7. การผลิตฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายด้วยโพลียูรีเทนแข็ง

กรรมวิธีการผลิตฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย โดยใช้โพลียูรีเทนแข็ง หรือ PUR เพื่อจุดประสงค์ในการนำไปใช้เชิงธุรกิจ สำหรับวิธีการนี้ เป็นการผลิตโดยใช้เครื่อง RIM ฉีดส่วนผสมของ Isocyanate และ Polyol แล้วทำปฏิกิริยากลายเป็นโพลียูรีเทนแข็งภายในแม่พิมพ์

7.1 การทดลองการเดินเครื่อง RIM

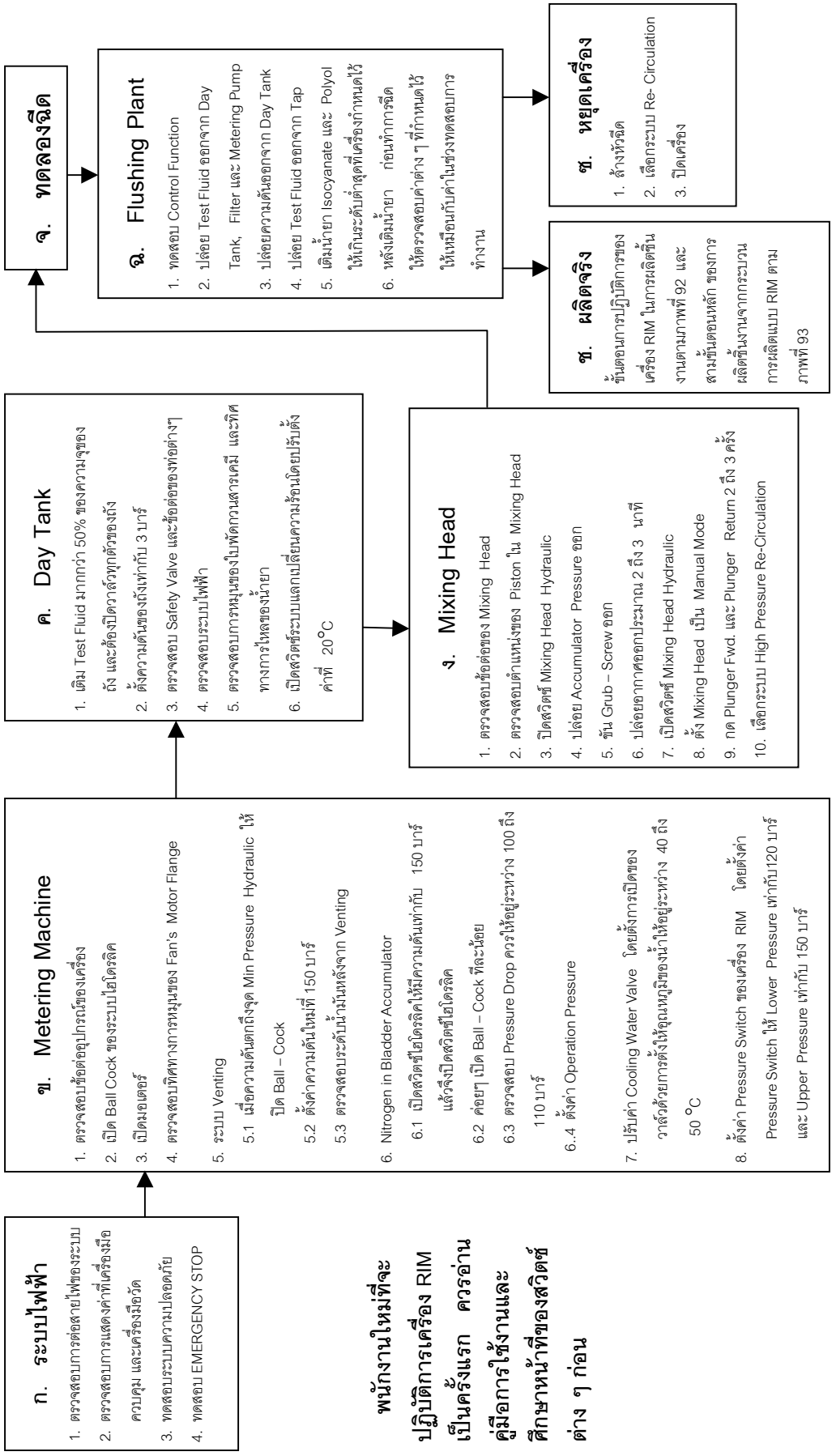
การทดลองการเดินเครื่องสำหรับเครื่องที่ติดตั้งใหม่ หรือ เครื่องจักรที่หยุดการทำงานเป็นเวลานาน

- 1) ตรวจสอบความถูกต้องของการติดตั้งระบบต่าง ๆ ก่อนทำการเปิดเครื่อง (ตามเนื้อหาใน **อุปกรณ์ หัวข้อที่ 2 อุปกรณ์และวัสดุสำหรับการผลิตแบบ RIM**) โดยมีลำดับการปฏิบัติจาก บล็อก ข ถึง จ ตามแสดงในภาพที่ 19
- 2) ที่ ระบบไฟฟ้า ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนตามแสดงใน บล็อก ก ของภาพที่ 61
- 3) ดำเนินการเปิดระบบต่าง ๆ ของ Metering Machine ของเครื่อง RIM ซึ่งได้แก่ Venting, Nitrogen Accumulator, Cooling Water และ Pressure ตามรายละเอียดของแต่ละระบบดังแสดงใน บล็อก ข ของภาพที่ 61
- 4) ที่ Day Tank ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนตามแสดงใน บล็อก ค ของภาพที่ 61
- 5) ที่ Mixing Head ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนตามแสดงใน บล็อก ง ของภาพที่ 61
- 6) การล้างระบบ (หรือ Flushing Plant) ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนตามแสดงใน บล็อก ฉ ของภาพที่ 61

7.2 การเดินเครื่อง RIM เพื่อผลิตชิ้นงาน

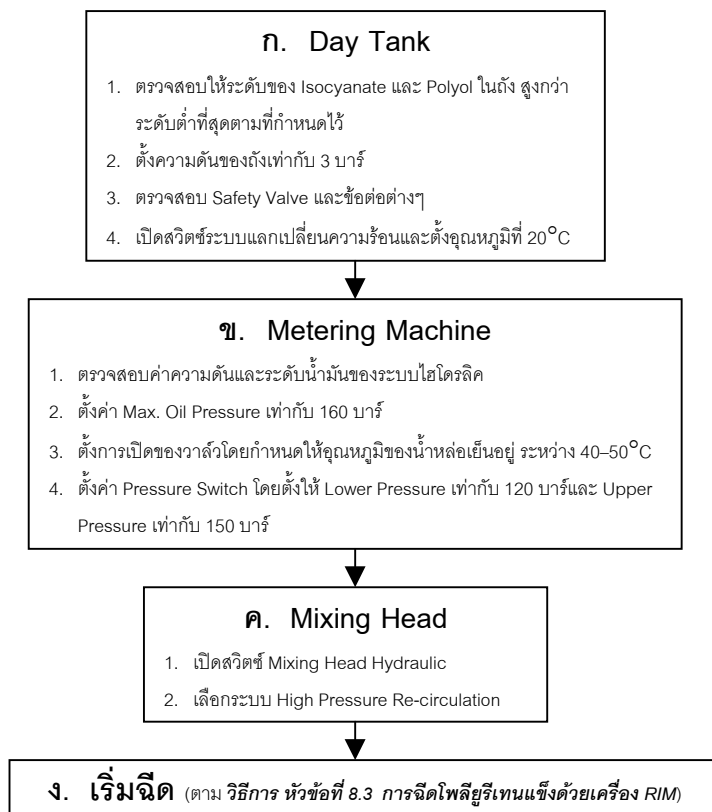
การเดินเครื่อง RIM เพื่อใช้ผลิตชิ้นงานในสายการผลิต มีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) ที่ Day Tank ดำเนินการตามขั้นตอนใน บล็อก ก ของภาพที่ 62
- 2) ที่ Metering Machine ดำเนินการตามขั้นตอนใน บล็อก ข ของภาพที่ 62
- 3) ที่ Mixing Head ดำเนินการตามขั้นตอนใน บล็อก ค ของภาพที่ 62



ภาพที่ 61 ขั้นตอนการทดสอบการทำงานของเครื่อง RIM

พนักงานใหม่ที่จะ
ปฏิบัติการเครื่อง RIM
เป็นครั้งแรก ควรอ่าน
คู่มือการใช้งานและ
ศึกษาหน้าที่ของสวิตช์
ต่าง ๆ ก่อน

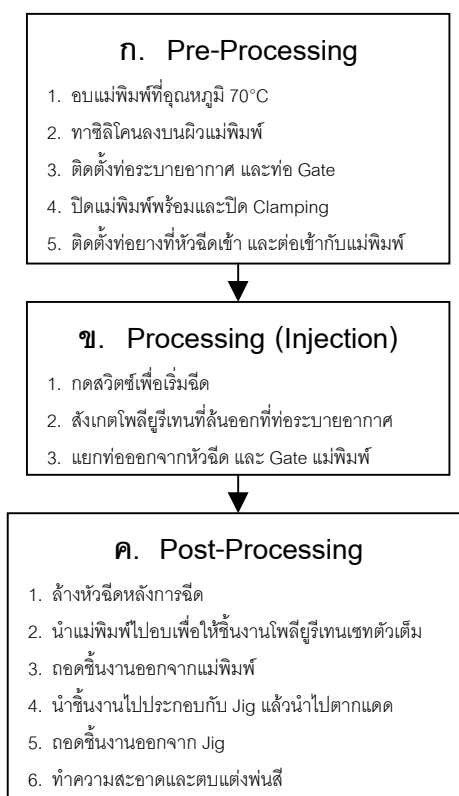


ภาพที่ 62 ขั้นตอนการปฏิบัติการของเครื่อง RIM ในการผลิตชิ้นงาน

7.3 การฉีดโพลียูรีเทนแข็งด้วยเครื่อง RIM

วิธีการฉีดโพลียูรีเทนแข็งด้วยเครื่อง RIM มีขั้นตอนดำเนินการ ในช่วง Pre-Processing และช่วง Processing ตามไดอะแกรม ก และ ข ของภาพที่ 63 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนปฏิบัติ ดังต่อไปนี้

- 1) อบแม่พิมพ์ ให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์เท่ากับ 70 °C แล้วนำแม่พิมพ์ออกจากห้องอบ
- 2) ใช้แปรงทาซิลิโคนบนแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันโพลียูรีเทนติดแม่พิมพ์ และทำให้สะดวกในการถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
- 3) ติดตั้งท่อระบายอากาศ โดยสอดท่อพลาสติกใส่เข้าจากด้านในของแม่พิมพ์ทะลุออกด้านนอก โดยปลายท่อพลาสติกใส่ด้านในให้เสมอกับผิวแม่พิมพ์ หรือ ลึกเข้าไปในแม่พิมพ์เล็กน้อย



ภาพที่ 63 สามขั้นตอนหลัก ของการผลิตชิ้นงานจากกระบวนการผลิตแบบ RIM

4) ต่อท่อพลาสติกใส (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 13 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร) ที่ Gate ของแม่พิมพ์ (ตามแสดงในภาพที่ 64) โดยมีวิธีการเช่นเดียวกับท่อระบายอากาศของข้อ 3

5) นำแม่พิมพ์มาประกบกันแล้วยึดให้แน่น ควรให้ความระวังในขณะทำการปิดแม่พิมพ์ ควรปิดด้วยความนิ่มนวล เพราะถ้าปิดแม่พิมพ์อย่างแรง จะทำให้เกิดการกระแทกกันของแม่พิมพ์อย่างแรงเป็นผลให้แม่พิมพ์เสียหายได้

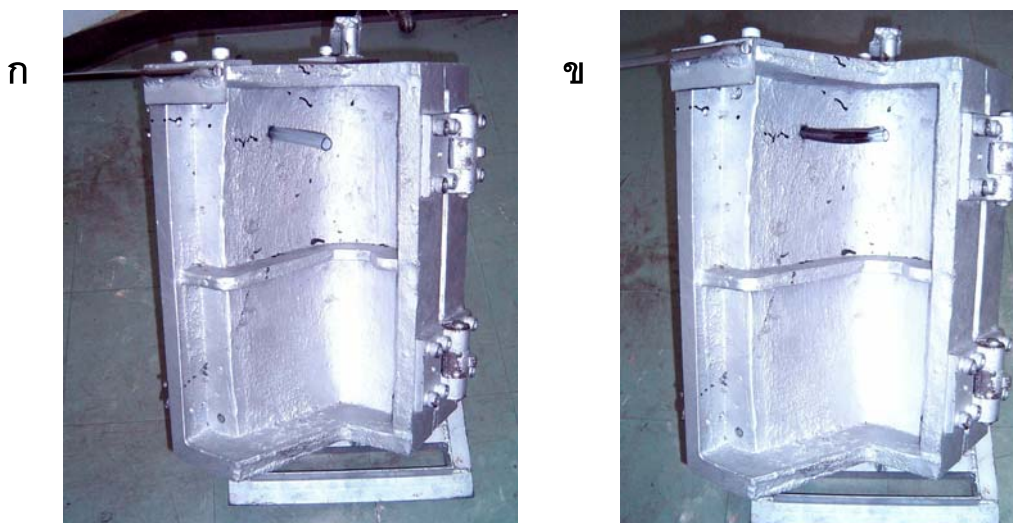
6) นำหัวฉีด หรือ หัวผสม (Mixing Head) มาต่อที่ปลายท่อ แล้วเริ่มการฉีด

7) เมื่อฉีดโฟลียูรีเทนไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ (จากเวลาที่ตั้งไว้ หรือสังเกตจากโฟลียูรีเทนที่ล้นออกมาที่ท่อระบายอากาศ) ใช้คีมบีบท่อพลาสติกใสที่ Gate ทันที เพื่อปิดทางเข้าของโฟลียูรีเทน แล้วนำท่อพลาสติกใสออกได้ทันที

8) หลังการฉีดแต่ละครั้ง เครื่องจะล้างโฟลียูรีเทนอย่างอัตโนมัติที่ Mixing Head (หัวผสม) ด้วย Methylene Chloride ควรตรวจสอบว่าเครื่องได้ล้างโฟลียูรีเทน ออกหมดจาก Mixing Head โดยเฉพาะเมื่อจะหยุดเครื่อง หรือ ปิดเครื่อง เพราะถ้าไม่ทำการล้าง โฟลียูรีเทนที่

ตกค้างจะแข็งตัวทำให้ Mixing Head เสียทันที ซึ่งต้องเปลี่ยนหัวใหม่เท่านั้น การเปลี่ยนหัว Mixing Head ใหม่ มีราคาสูงมาก (ประมาณ 70,000 บาท)

9) นำแม่พิมพ์ที่ฉีดแล้ว ไปทำการอบ ในห้องอบที่อุณหภูมิ 90°C นานประมาณ 30 นาที เพื่อให้โพลียูรีเทนแข็งตัวเต็มที่



ภาพที่ 64 การติดตั้งท่อพลาสติกที่ Gate ของแม่พิมพ์ โดยภาพ ก) ก่อนทำการฉีด และ ข) หลังทำการฉีด

10) เคลื่อนย้ายแม่พิมพ์ออกจากห้องอบ แล้วถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แม่พิมพ์สามารถนำไปฉีดโพลียูรีเทนต่อได้โดยไม่ต้องอบ โดยปฏิบัติซ้ำตามข้อ 2 ถึง 8

11) ถ้าชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยว ให้นำชิ้นงานไปประกอบกับ Jig เพื่อให้โพลียูรีเทนแข็งตัวเต็มที่ Jig ดังกล่าวต้องออกแบบให้สอดคล้องกับรูปทรงของชิ้นงานที่ฉีดเท่านั้น Jig นี้ไม่สามารถใช้กับชิ้นงานรูปทรงอื่นได้ ในการผลิตจำนวนไม่มาก การลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานสามารถหาได้โดยไม่ต้องอาศัย Jig โดยการให้ชิ้นงานอยู่ในแม่พิมพ์เป็นเวลานานขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการผลิตต่ำ และเครื่อง RIM ไม่ได้ทำงานเต็มที่ เพราะขาดความต่อเนื่อง สำหรับงานวิจัยนี้ ไม่ได้นำ Jig มาใช้ เพราะเป็นการทดสอบการผลิต

12) ในกรณีที่ใช้ Jig ให้นำ Jig ไปตากแดดนานประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงถอดชิ้นงานออกจาก Jig

13) หลังการผลิตสิ้นสุดในแต่ละวัน ก่อนทำการปิดเครื่อง ควรเลือกการไหลเวียนของสาร A และ B ในโหมด Recirculation เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของน้ำยาที่เหลือในถัง

7.4 ขั้นตอนการตกแต่งชิ้นงานเพื่อความสวยงาม

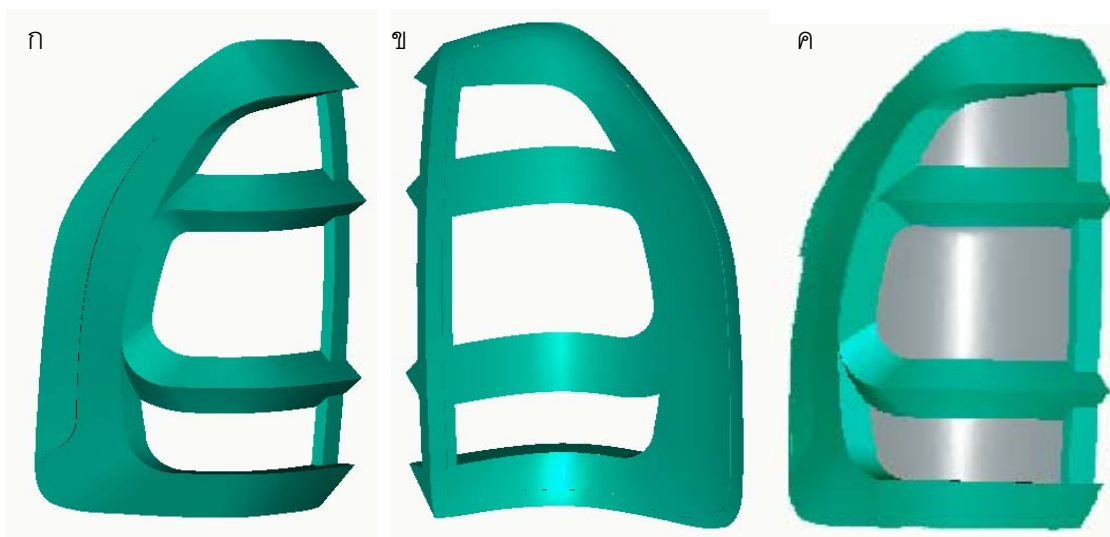
ชิ้นงานที่ฉีดได้จากกระบวนการ RIM จำเป็นต้องทำการการตกแต่งเพิ่มเติม เพื่อให้ได้คุณภาพของผิวและสีตามต้องการ โดยขั้นตอนหลังการดำเนินการ (Post-Processing) ได้สรุปใน บล็อกไดอะแกรม ค ของภาพที่ 63 ซึ่งมีรายละเอียดตามลำดับดังนี้

- 1) ตัดครีปที่เกิดขึ้นตามขอบของชิ้นงาน ตัดส่วนที่เป็น Gate และท่อดันออก
- 2) ใช้สีโป้ว หรือ ใช้การอุดรูของ Air Trap ที่ผิวหน้าของชิ้นงาน
- 3) ล้างทำความสะอาดเพื่อขจัดคราบมันของ Release Agent
- 4) ใช้กระดาษทรายตกแต่ง และขัดผิวของชิ้นงานให้เรียบ
- 5) ทำความสะอาดโดยล้างฝุ่นผงที่เกิดจากการขัดด้วยกระดาษทราย
- 6) ทาสีโป้วบริเวณที่เป็นตำหนิบนชิ้นงาน
- 7) ขัดสีโป้วให้เรียบเป็นเนื้อเดียวกัน
- 8) ล้างทำความสะอาดผิว และเป่าลมร้อนให้ผิวแห้ง
- 9) พ่นสีตามสีที่ต้องการ
- 10) นำชิ้นงานไปอบสี

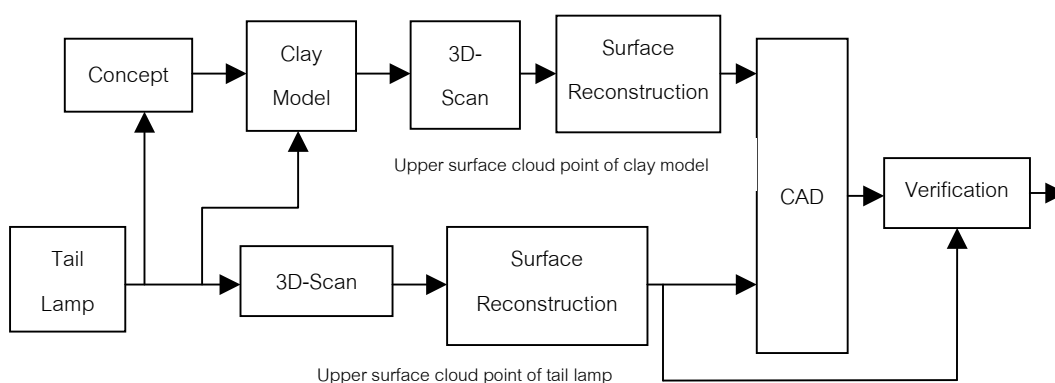
ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. ผลการออกแบบฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย

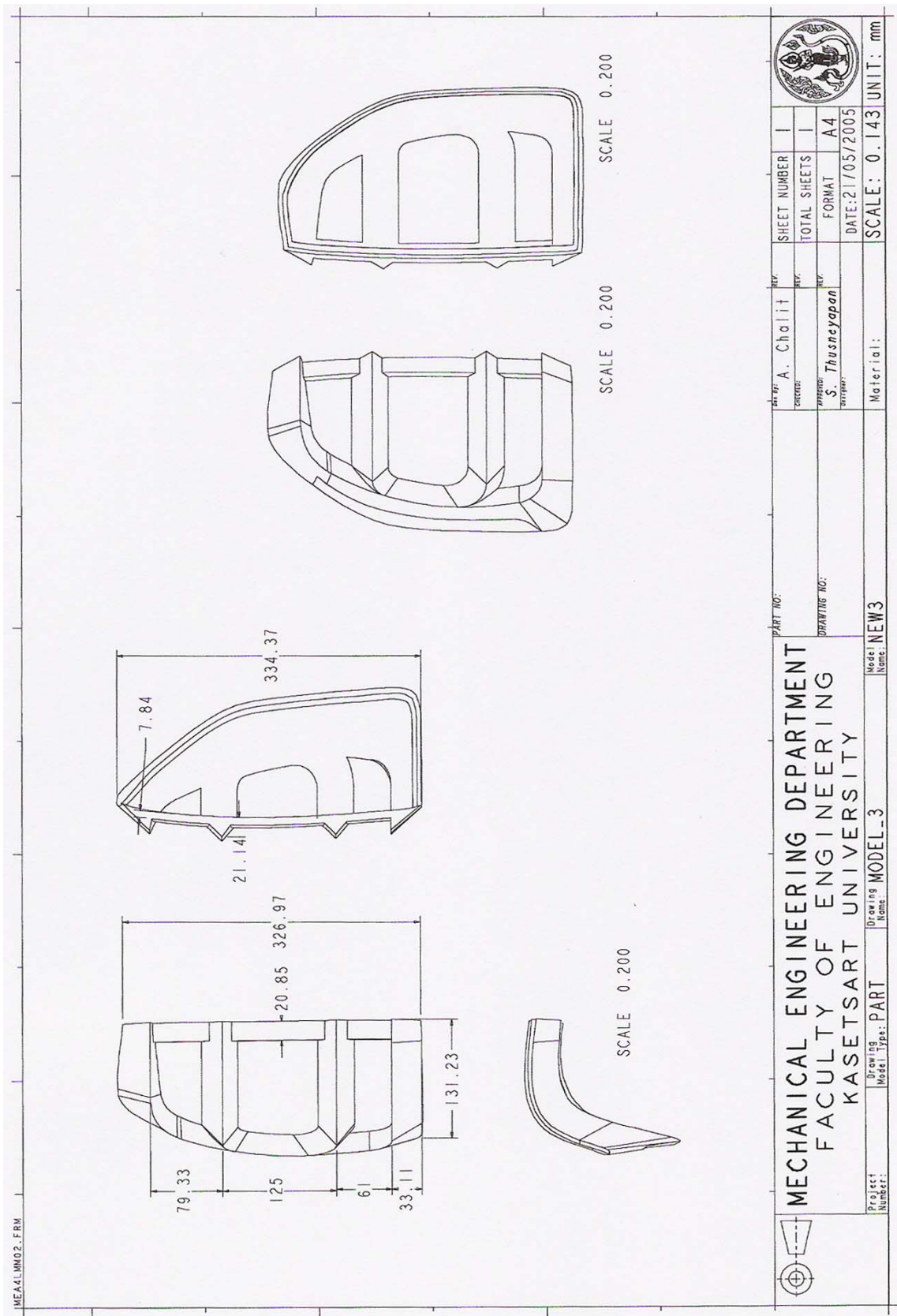
ฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย (ภาพที่ 65) มีลำดับขั้นตอนการพัฒนาตามภาพที่ 66 ฝาครอบประดับกรอบไฟท้ายนี้ มีปริมาตรของชิ้นงานเท่ากับ 474 cm^3 และน้ำหนักเท่ากับ 526.14 กรัม (ใช้ค่าความหนาแน่น = 1.11 gm/cm^3) ภาพวาดรายละเอียดของฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย ได้แสดงในภาพที่ 67



ภาพที่ 65 แบบ CAD ของฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย (ภาพ ก และ ข) และการประกอบบนกรอบไฟท้าย (ภาพ ค)



ภาพที่ 66 ไตอะแกรมแสดงขั้นตอนการออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีสแกน 3 มิติ



ภาพที่ 6Z ภาพวาดรายละเอียดของแบบ CAD ของฝาครอบประตูปกรอบไฟท้าย

2. ผลการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการกระแทก

2.1 การกระแทกของฝาครอบระดับกรอบไฟฟ้ายเมื่อเป็นเอลิเมนต์แบบแผ่นบาง

การจำลองการกระแทกของฝาครอบระดับกรอบไฟฟ้าย ABS นี้ มีวิธีการตาม **วิธี การ หัวข้อที่ 3 การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการกระแทก**

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite-Element Method หรือ FEM) ใช้เอลิเมนต์แบบ Surface โดยให้ขนาดเอลิเมนต์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิเมตร และมีความหนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ให้วัสดุเป็น ABS โดยกำหนดค่า E เท่ากับ $1,519.231 \text{ N/mm}^2$ และค่า Poisson's Ratio เท่ากับ 0.33 วัสดุ ABS มีค่า Yield Stress เท่ากับ 39.5 N/mm^2 และ Ultimate Stress เท่ากับ 31.4 N/mm^2

Constraint กำหนดให้เป็นแบบ Fixed (ไม่มีการเคลื่อนที่) ตาม Node บนขอบชิ้นงานเสมือนเป็นเทปขาว และกำหนด Load ที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยเสมือนมีการกระแทกทั้งหมด 6 ตำแหน่ง (แบบจำลอง A และ B) ตามแสดงในภาพที่ 21 โดยเพิ่มขนาดของ Load จนกว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้น เท่ากับ 39.5 N/mm^2 ซึ่งเป็นจุดที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย

ภาพแสดงระดับชั้นสีของความเค้น (Stress, N/mm^2) และระยะยุบ (Deformed, mm) ของชิ้นงานของแบบจำลอง A1, A2 และ A3 ได้แสดงในภาพที่ 68 ถึง 70 และภาพที่ 73 ถึง 75 แสดงผลการวิเคราะห์ดังกล่าวของแบบจำลอง B1, B2 และ B3 ตามลำดับ

ระดับชั้นสีที่เป็นสีแดงเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงที่สุด จึงเป็นบริเวณที่จะเกิดความเสียหายมากที่สุด และสีชมพูเข้มแทนตำแหน่งที่มีค่าความเค้นที่น้อยที่สุด เช่นเดียวกับระยะยุบตัว โดยสีแดงแสดงบริเวณที่มีการยุบตัว หรือ เปลี่ยนรูปทรงมากที่สุด และสีชมพูเข้มเป็นบริเวณที่เกิดการยุบตัวน้อยที่สุด

ภาพที่ 68 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 68 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 68 ข) ของแบบจำลอง A1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 530.20 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 39.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาด

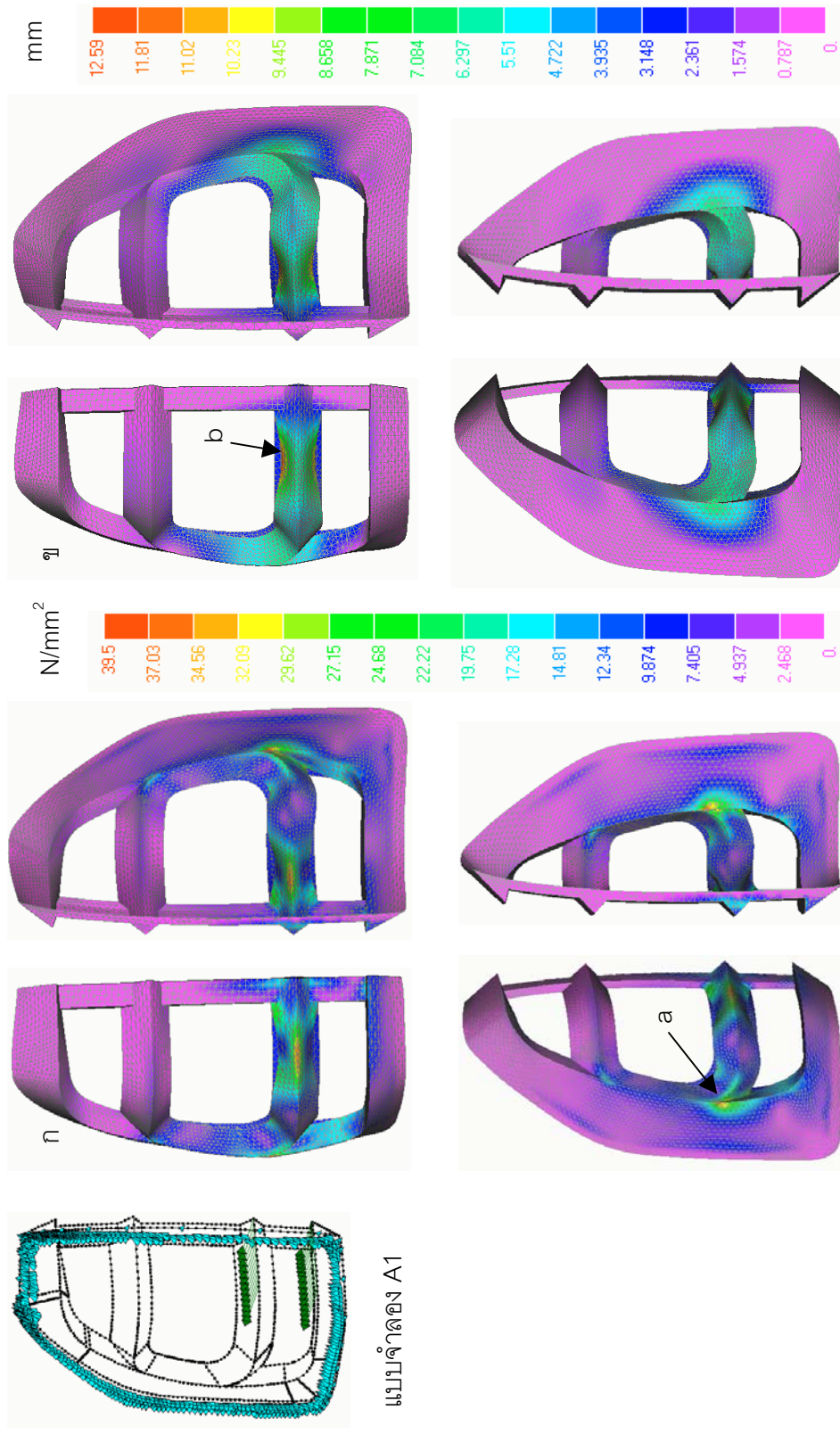
ว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 68 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยวบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 68 ข) มีค่าเท่ากับ 16.578 มิลลิเมตร การยวบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนหน้าของชิ้นงานที่แรงมากระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย

ภาพที่ 69 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 69 ก) และระยะยวบ (ภาพที่ 69 ข) ของแบบจำลอง A2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 411.78 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 39.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 69 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยวบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 69 ข) มีค่าเท่ากับ 11.110 มิลลิเมตร การยวบตัวนี้เป็นบริเวณมุมของชิ้นงานที่แรงมากระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย

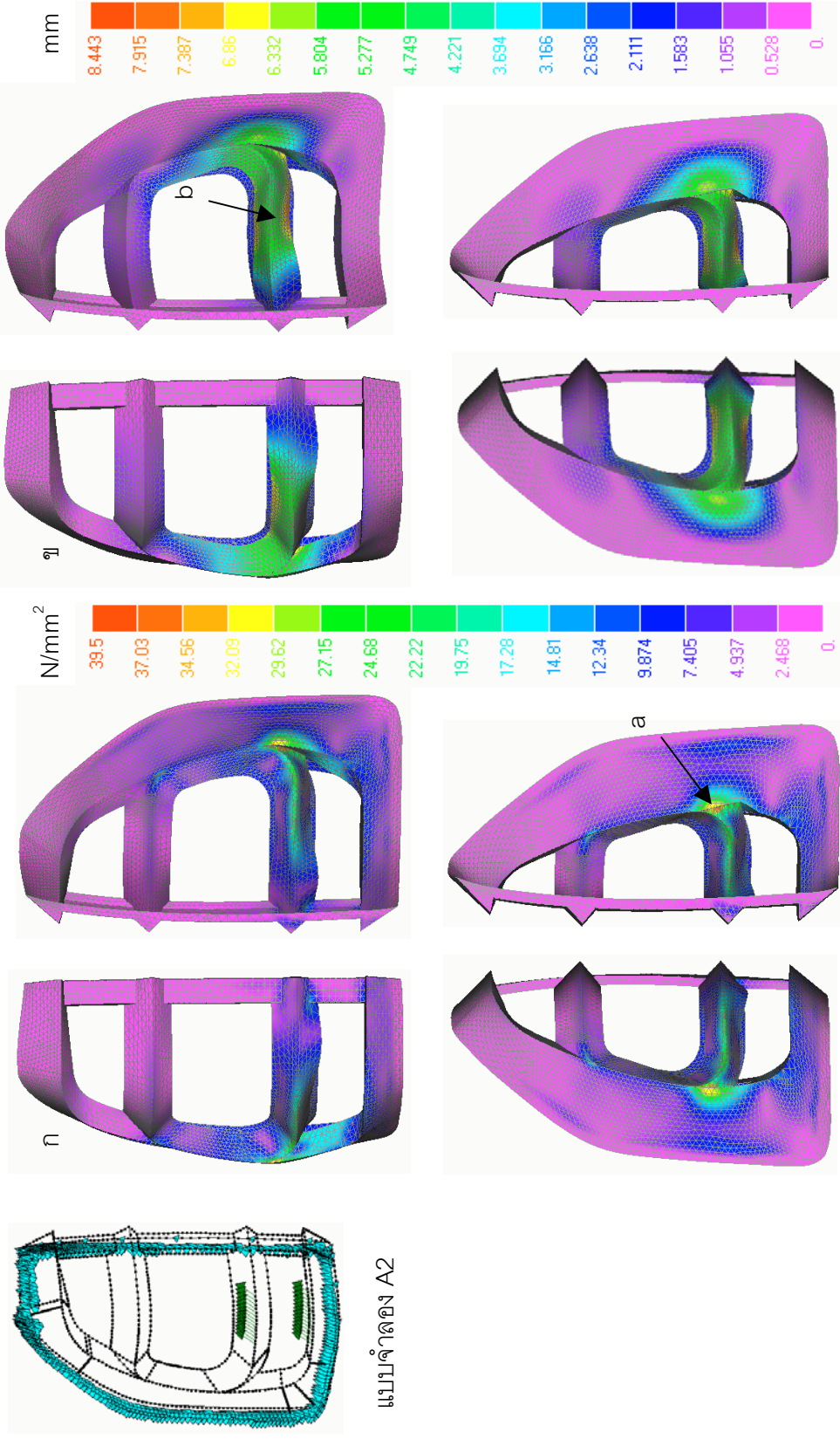
ภาพที่ 70 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 70 ก) และระยะยวบ (ภาพที่ 70 ข) ของแบบจำลอง A3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 137.00 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 39.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 70 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยวบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 70 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 9.025 มิลลิเมตร การยวบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนข้างของชิ้นงานที่แรงมากระทำ

ตารางที่ 12 สรุปผลของการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง A1, A2 และ A3 ภาพที่ 71 และ 72 แสดงกราฟของความเค้น และระยะยวบของชิ้นงาน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแรงกระทำตามตารางที่ 12 กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยจุดปลายของกราฟ คือ จุดที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย (Yield Stress ของวัสดุ เท่ากับ 39.5 N/mm^2)

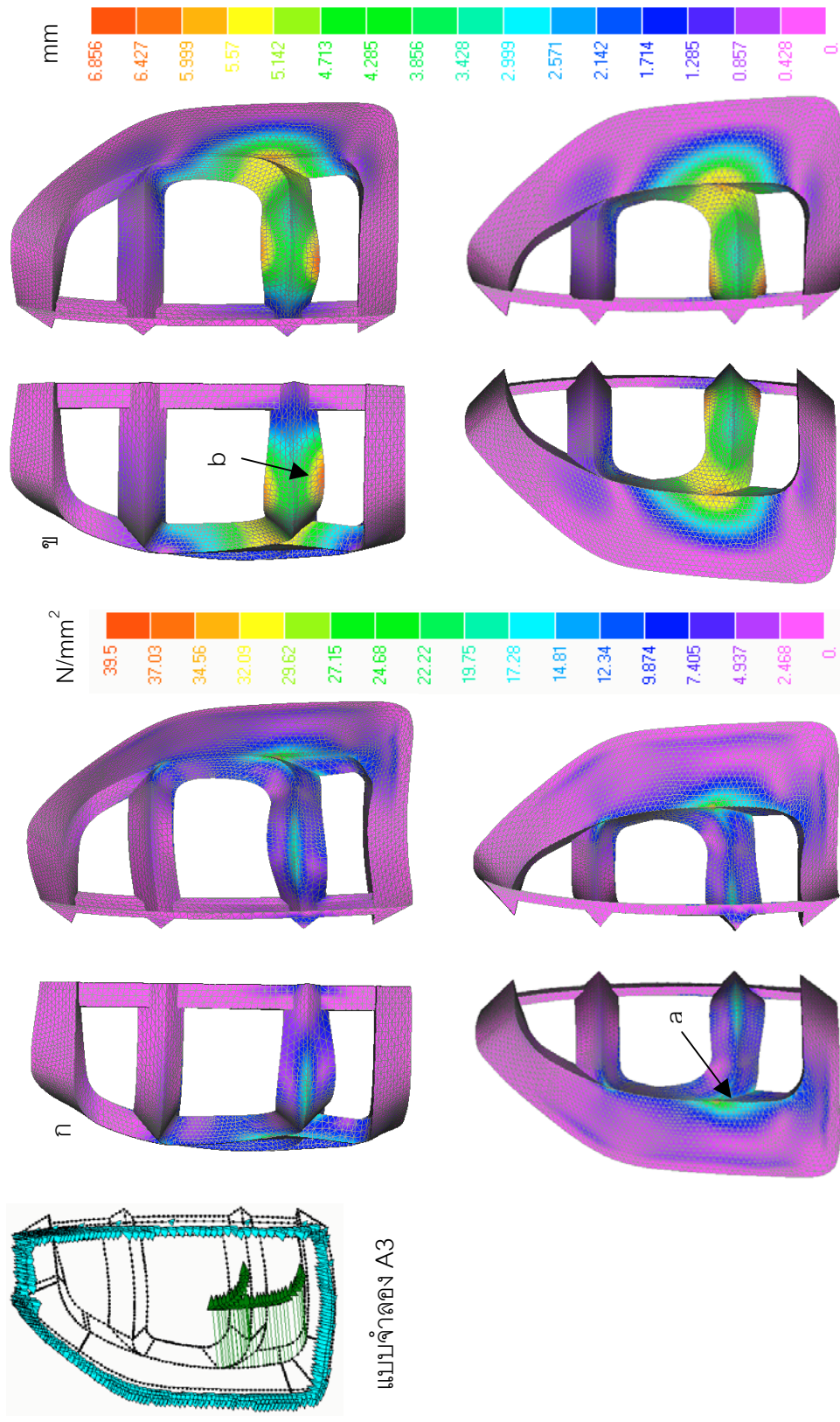
ภาพที่ 73 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 73 ก) และระยะยวบ (ภาพที่ 73 ข) ของแบบจำลอง B1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 1,191.55 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 39.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 73 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายใน



ภาพที่ 68 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง A1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 530.20 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a และจุด b แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด



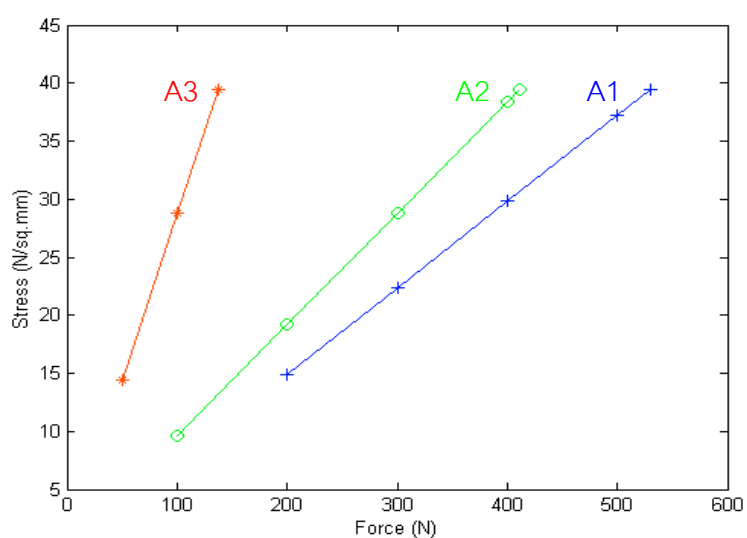
ภาพที่ 69 แสดงระดับขั้นสีของแบบจำลอง A2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 411.78 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด



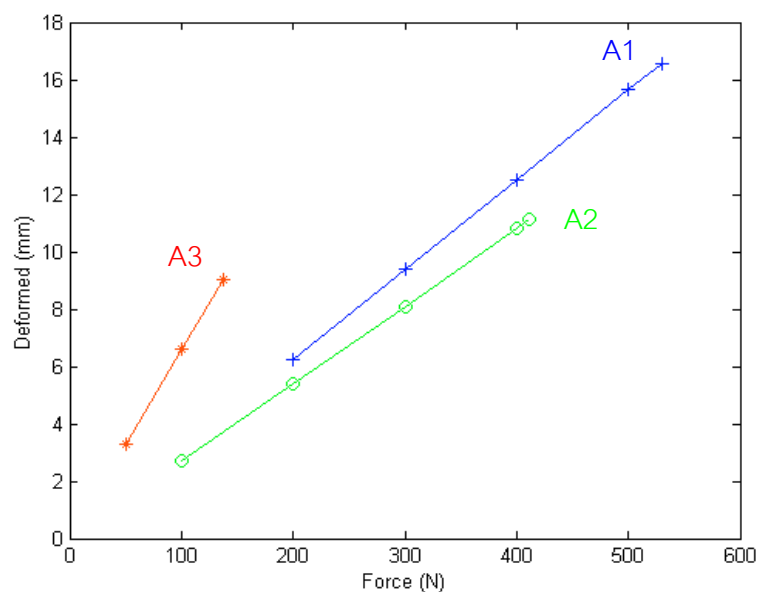
ภาพที่ 70 แสดงระดับชั้นของแบบจำลอง A3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 137.00 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่ระยะเยื้องสูงสุด

ตารางที่ 12 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง A

Model	Force (N)	Stress (N/mm ²)	Deformed (mm)
A1	200.00	14.90	6.256
A1	300.00	22.36	9.385
A1	400.00	29.81	12.510
A1	500.00	37.26	15.640
A1	530.20	39.50	16.578
A2	100.00	9.591	2.699
A2	200.00	19.18	5.398
A2	300.00	28.78	8.097
A2	400.00	38.37	10.800
A2	411.78	39.50	11.110
A3	50.00	14.42	3.294
A3	100.00	28.84	6.588
A3	137.00	39.50	9.025



ภาพที่ 71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง A1 ถึง A3

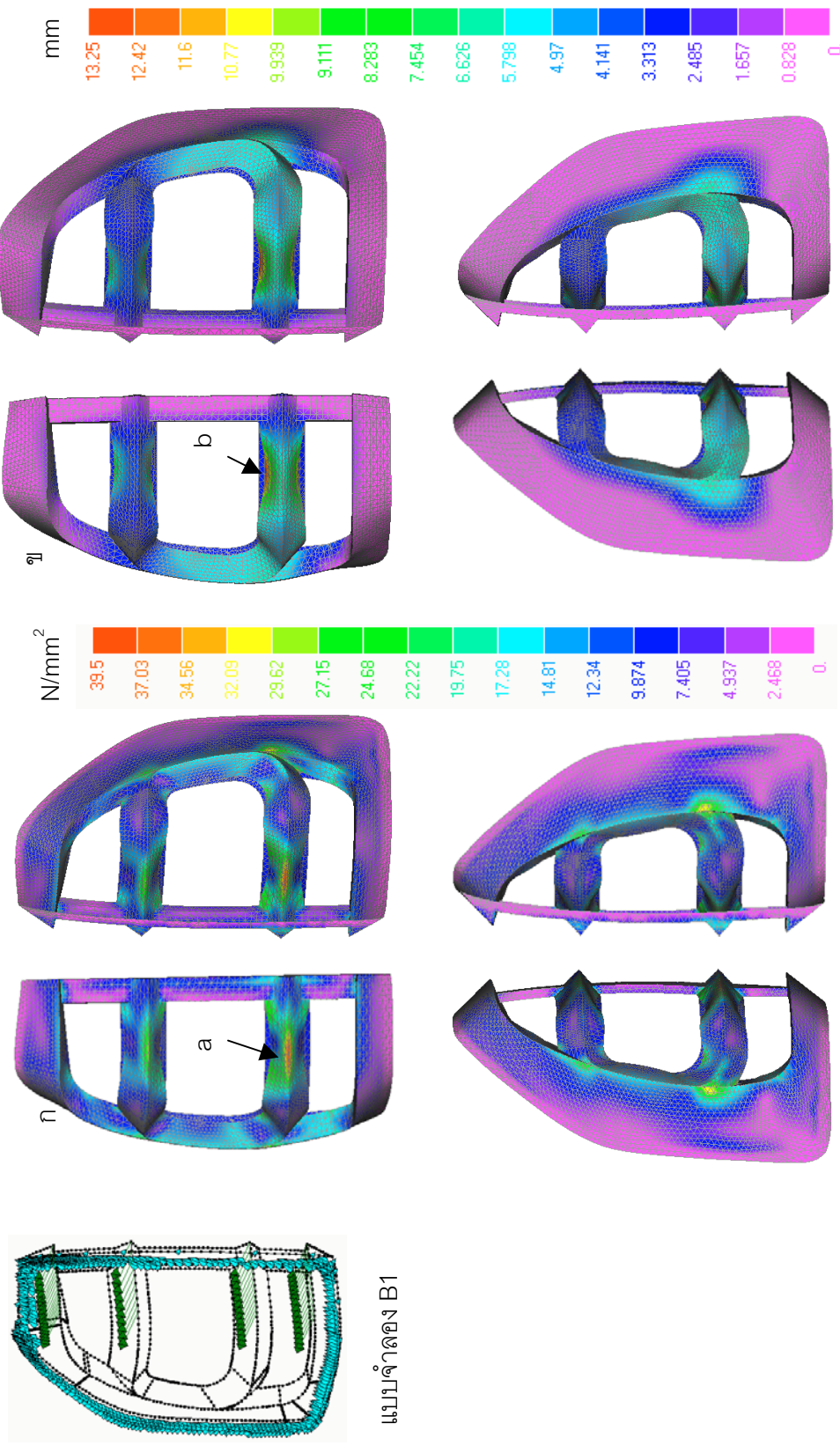


ภาพที่ 72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง A1 ถึง A3

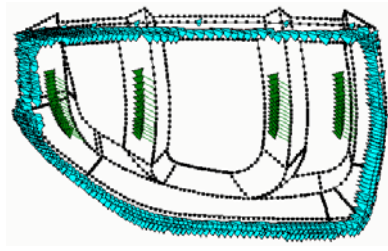
ตำแหน่งที่แรงมากกระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 73 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 17.45 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนหน้าของชิ้นงานที่แรงมากกระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย

ภาพที่ 74 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 74 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 74 ข) ของแบบจำลอง B2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 890.42 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 39.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 74 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากกระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 74 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 11.340 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณมุมของชิ้นงานที่แรงมากกระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย

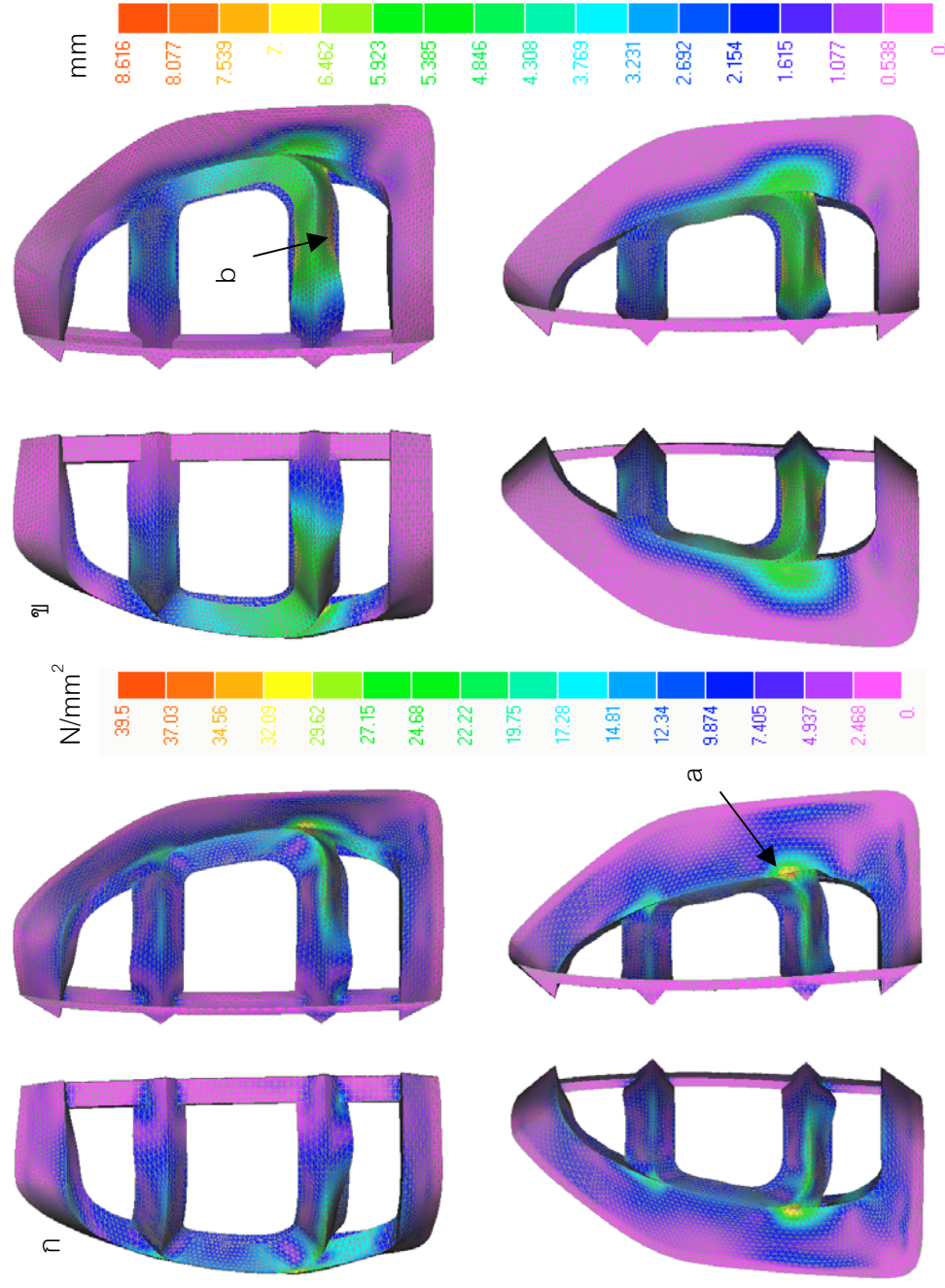
ภาพที่ 75 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 75 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 75 ข) ของแบบจำลอง B3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 435.80 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 39.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 70 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายใน



ภาพที่ 73 แสดงระดับขั้นสีของแบบจำลอง B1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 1,191.50 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด

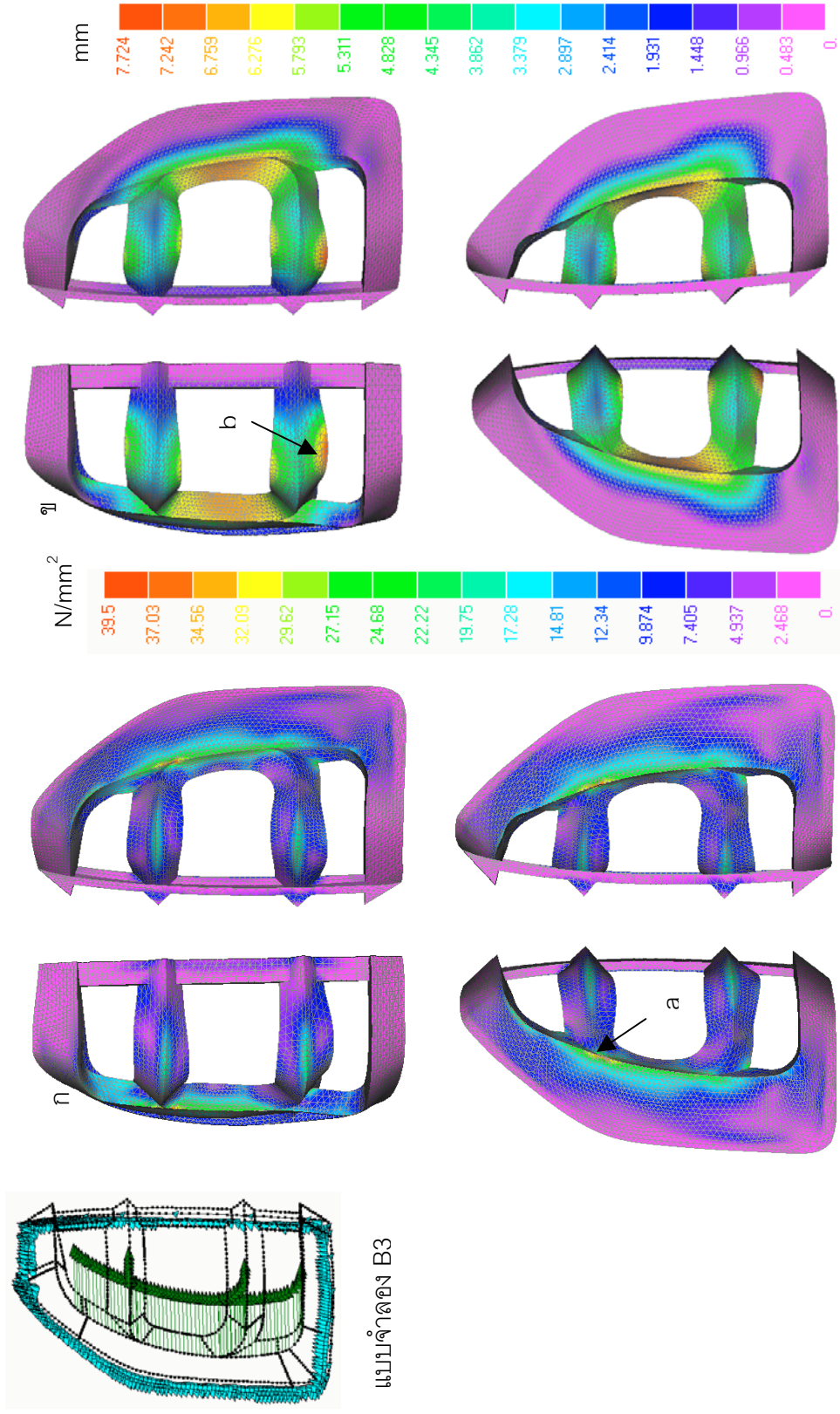


แบบจำลอง B2



ภาพที่ 74 แสดงระดับชั้นของแบบจำลอง B2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 890.42 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น

และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด



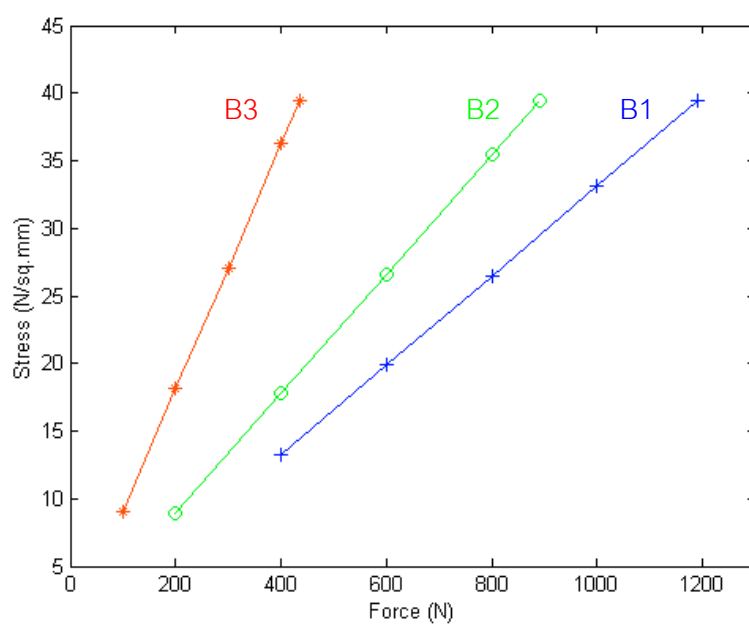
ภาพที่ 75 แสดงระดับชั้นสี่ของแบบจำลอง B3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 435.80 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด

ตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 70 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 10.170 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนข้างของชิ้นงานที่แรงมากระทำ

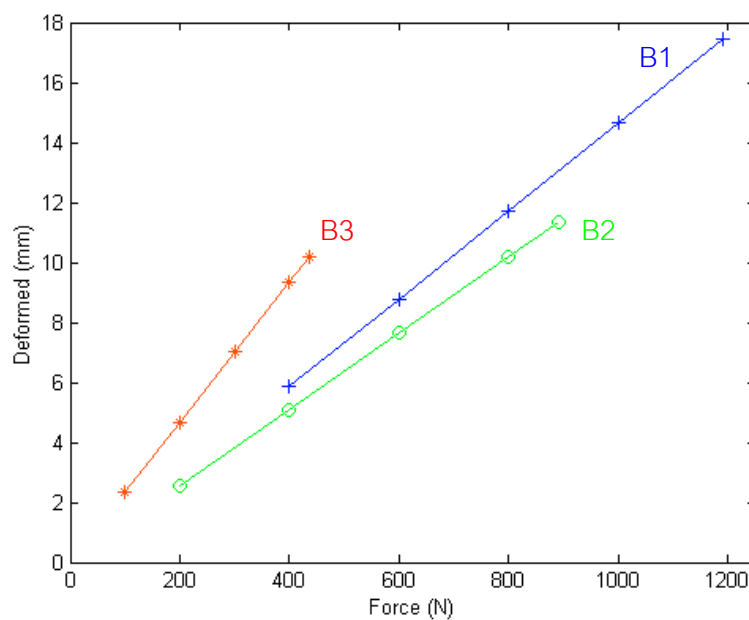
ตารางที่ 13 สรุปผลของการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง B1, B2 และ B3 ภาพที่ 76 และ 77 แสดงกราฟของความเค้น และระยะยุบของชิ้นงาน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแรงกระทำตามตารางที่ 13 กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยจุดปลายของกราฟ คือ จุดที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย (Yield Stress ของวัสดุ เท่ากับ 39.5 N/mm^2)

ตารางที่ 13 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง B

Model	Force (N)	Stress (N/mm^2)	Deformed (mm)
B1	400.00	13.26	5.857
B1	600.00	19.89	8.785
B1	800.00	26.52	11.710
B1	1000.00	33.15	14.640
B1	1191.55	39.50	17.450
B2	200.00	8.876	2.548
B2	400.00	17.75	5.095
B2	600.00	26.62	7.643
B2	800.00	35.49	10.19
B2	890.42	39.50	11.34
B3	100.00	9.067	2.334
B3	200.00	18.13	4.668
B3	300.00	27.05	7.012
B3	400.00	36.27	9.336
B3	435.80	39.50	10.170



ภาพที่ 76 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง B1 ถึง B3



ภาพที่ 77 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง B1 ถึง B3

2.2 การกระแทกของฝาครอบระดับกรอบไฟฟ้าเมื่อเป็นเอลิเมนต์แบบตัน

การจำลองการกระแทกของฝาครอบระดับกรอบไฟฟ้าเมื่อใช้วัสดุเป็นโพลีเอทิลีน มีวิธีการตาม **วิธีการ หัวข้อที่ 3 การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการกระแทก**

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ของฝาครอบระดับกรอบไฟฟ้า ใช้เอลิเมนต์แบบ Solid โดยให้ขนาดเอลิเมนต์น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ให้วัสดุเป็นโพลีเอทิลีน โดยกำหนดค่า E เท่ากับ 457.90 N/mm^2 และค่า Poisson's Ratio เท่ากับ 0.33 วัสดุโพลีเอทิลีนมีค่า Ultimate Stress เท่ากับ 43.5 N/mm^2

การกำหนด Constraint ใช้เป็นแบบ Fixed (ไม่มีการเคลื่อนที่) ของ Node บนขอบรอบชิ้นงาน (แบบจำลอง C และ D) และที่ผิวด้านหลังของชิ้นงาน (แบบจำลอง E และ F) โดยกำหนด Load ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เสมือนมีการกระแทกพร้อมกัน 6 ตำแหน่ง ตามแสดงในภาพที่ 21 โดยเพิ่มขนาดของ Load จนกว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้น เท่ากับ 43.5 N/mm^2 ซึ่งเป็นจุดที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย

ภาพที่ 78 ถึง 101 แสดงผลการกระแทกของฝาครอบระดับกรอบไฟฟ้าของแบบจำลอง C และ D ที่กำหนด Node เป็นแบบ Fixed บนขอบชิ้นงานเสมือนกับการใช้เทปการในการติดฝาครอบระดับกรอบไฟฟ้าไปบนกรอบไฟฟ้า

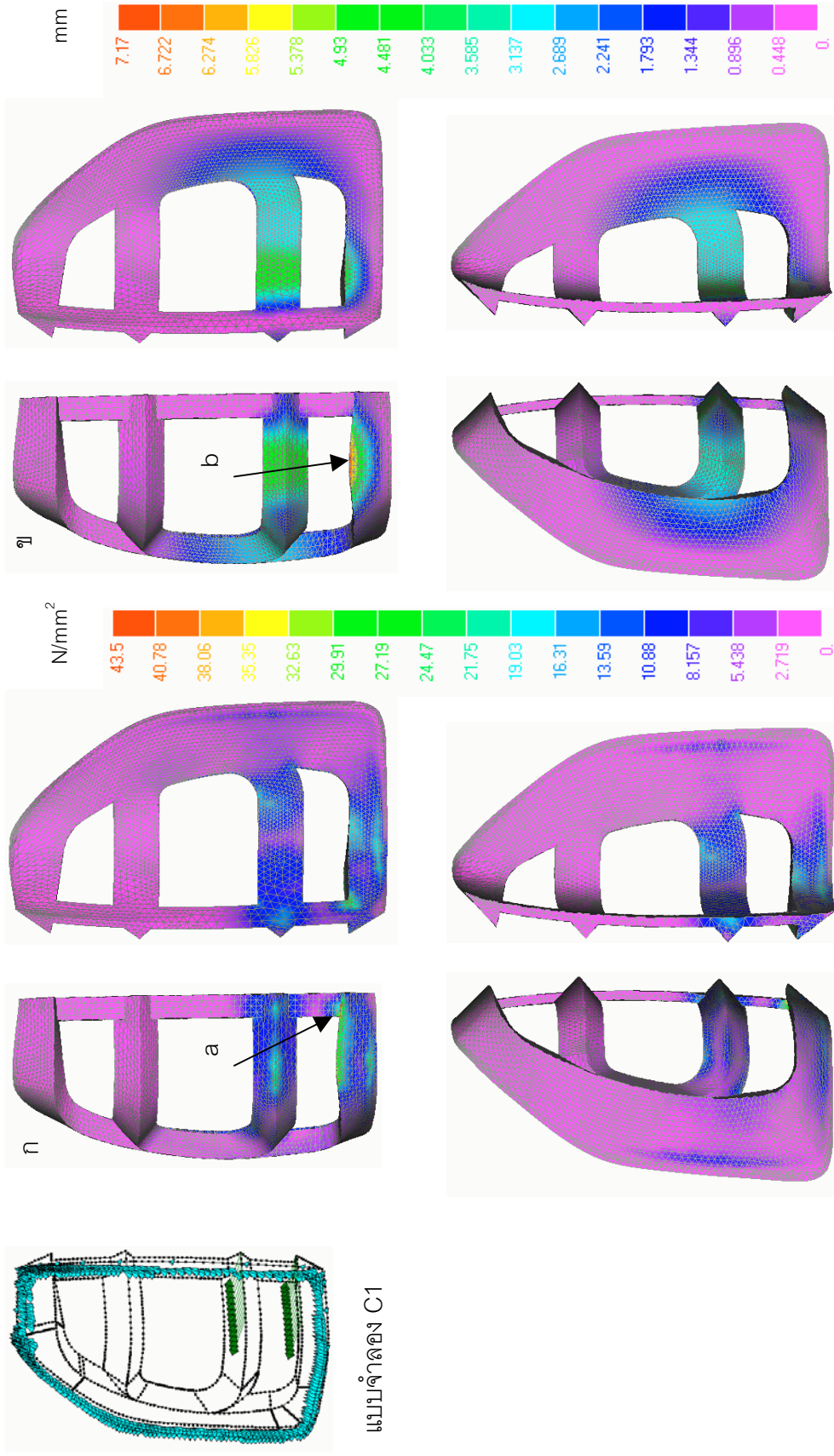
ภาพที่ 78 แสดงระดับขั้นของความเค้น (ภาพที่ 78 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 78 ข) ของแบบจำลอง C1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 8,661.03 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 78 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงกระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 78 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 7.17 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนหน้าของชิ้นงานที่แรงกระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง C1 ได้แสดงในภาพที่ 79 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

ภาพที่ 80 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 80 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 80 ข) ของแบบจำลอง C2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 7,052.15 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 80 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 80 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 8.678 มิลลิเมตร การยุบตัวที่เป็นบริเวณมุมของชิ้นงานที่แรงมากระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง C2 ได้แสดงในภาพที่ 81 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

ภาพที่ 82 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 82 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 82 ข) ของแบบจำลอง C3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 9,397.78 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 82 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 82 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 13.38 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนข้างของชิ้นงานที่แรงมากระทำ ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง C3 ได้แสดงในภาพที่ 83 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

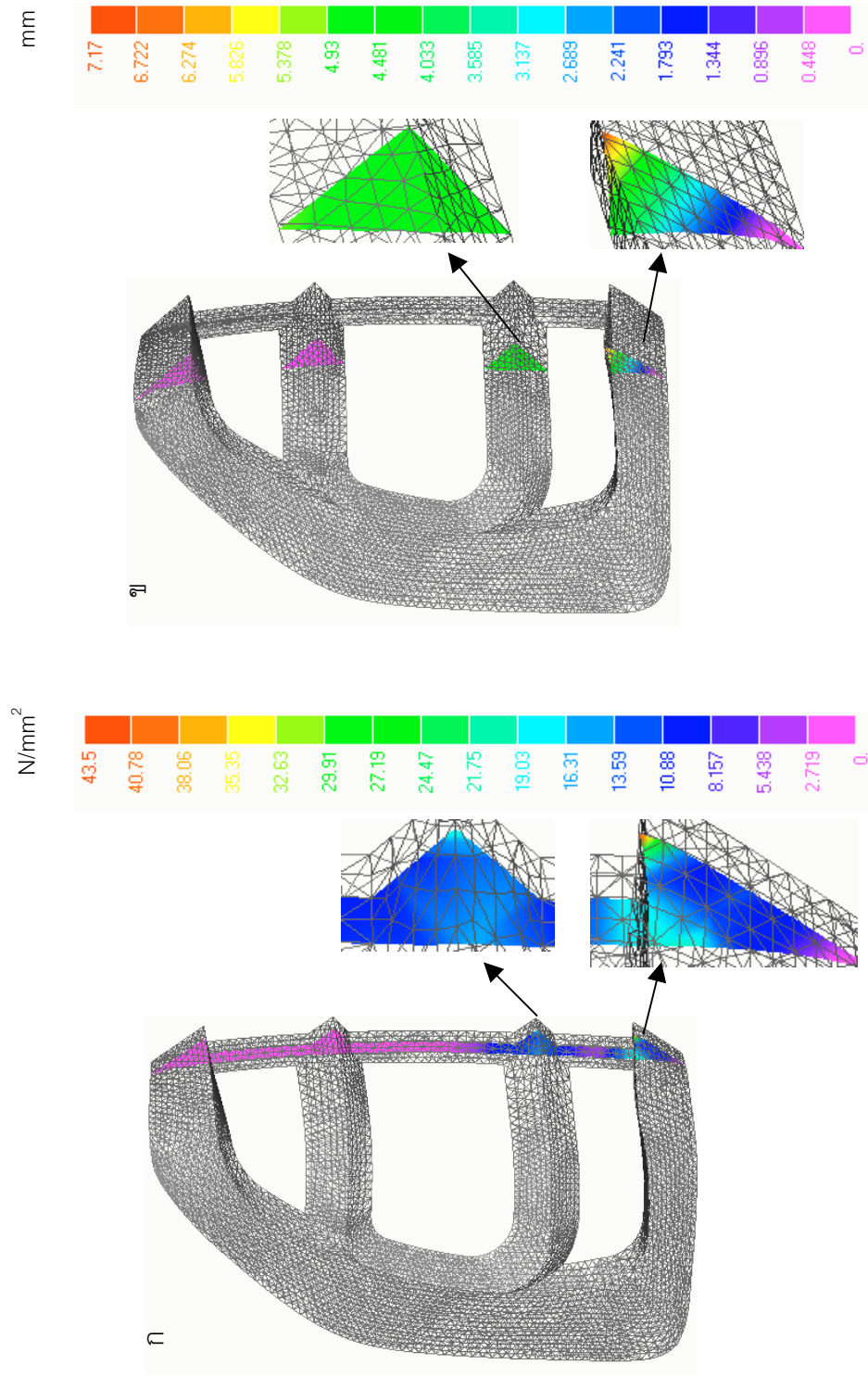
ตารางที่ 14 สรุปผลของการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง C1, C2 และ C3 ภาพที่ 84 และ 85 แสดงกราฟของความเค้น และระยะยุบของชิ้นงาน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแรงกระทำตามตารางที่ 14 โดยกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง จุดปลายของกราฟ คือ จุดที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย (Yield Stress ของวัสดุ เท่ากับ 43.5 N/mm^2)

ภาพที่ 86 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 86 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 86 ข) ของแบบจำลอง D1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 17,322.05 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 86 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 86 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 7.169 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนหน้าของชิ้นงานที่แรงมากระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการ

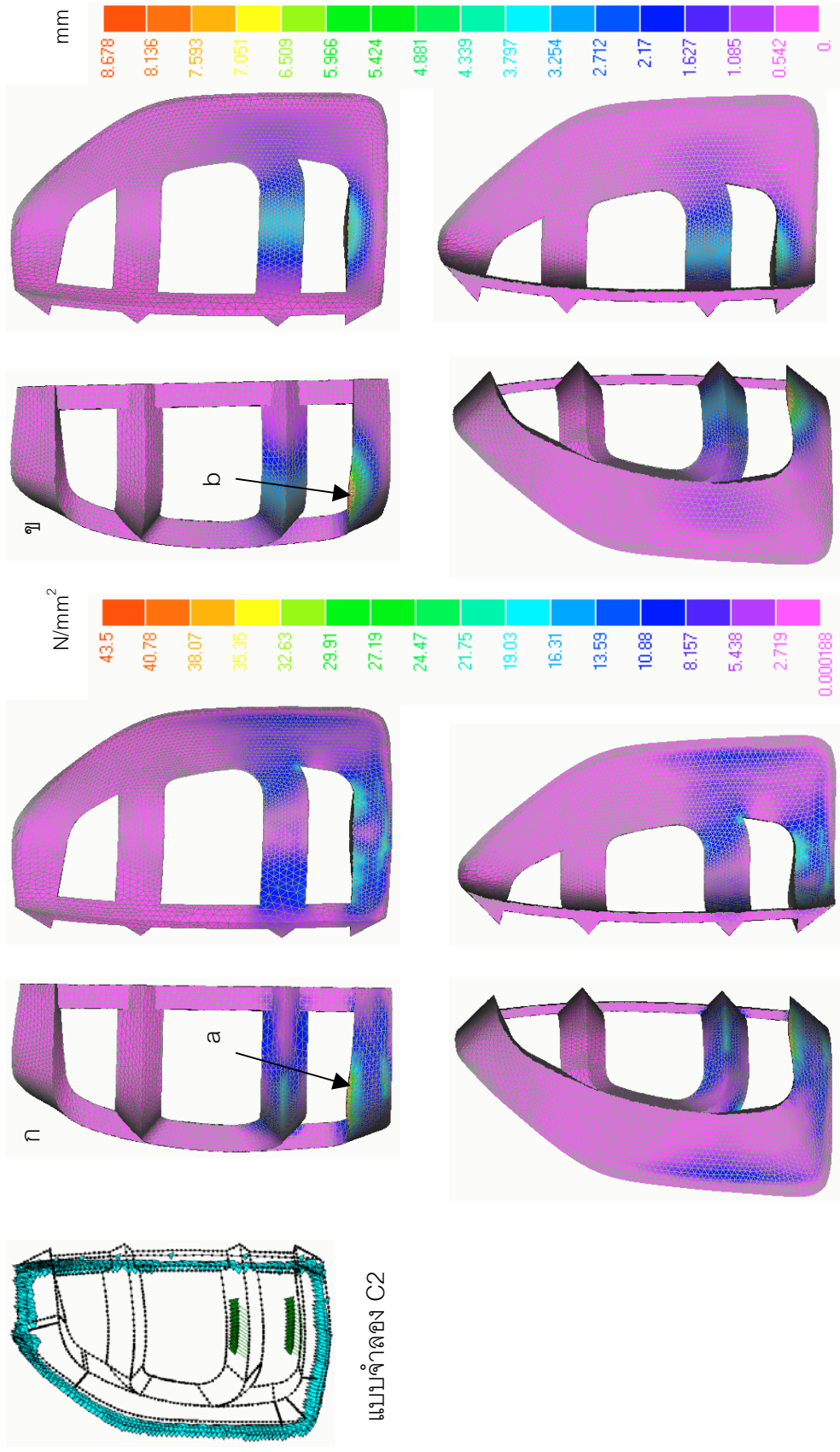


แบบจำลอง C1

ภาพที่ 78 แสดงระดับ تنشของแบบจำลอง C1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 8,661.03 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด

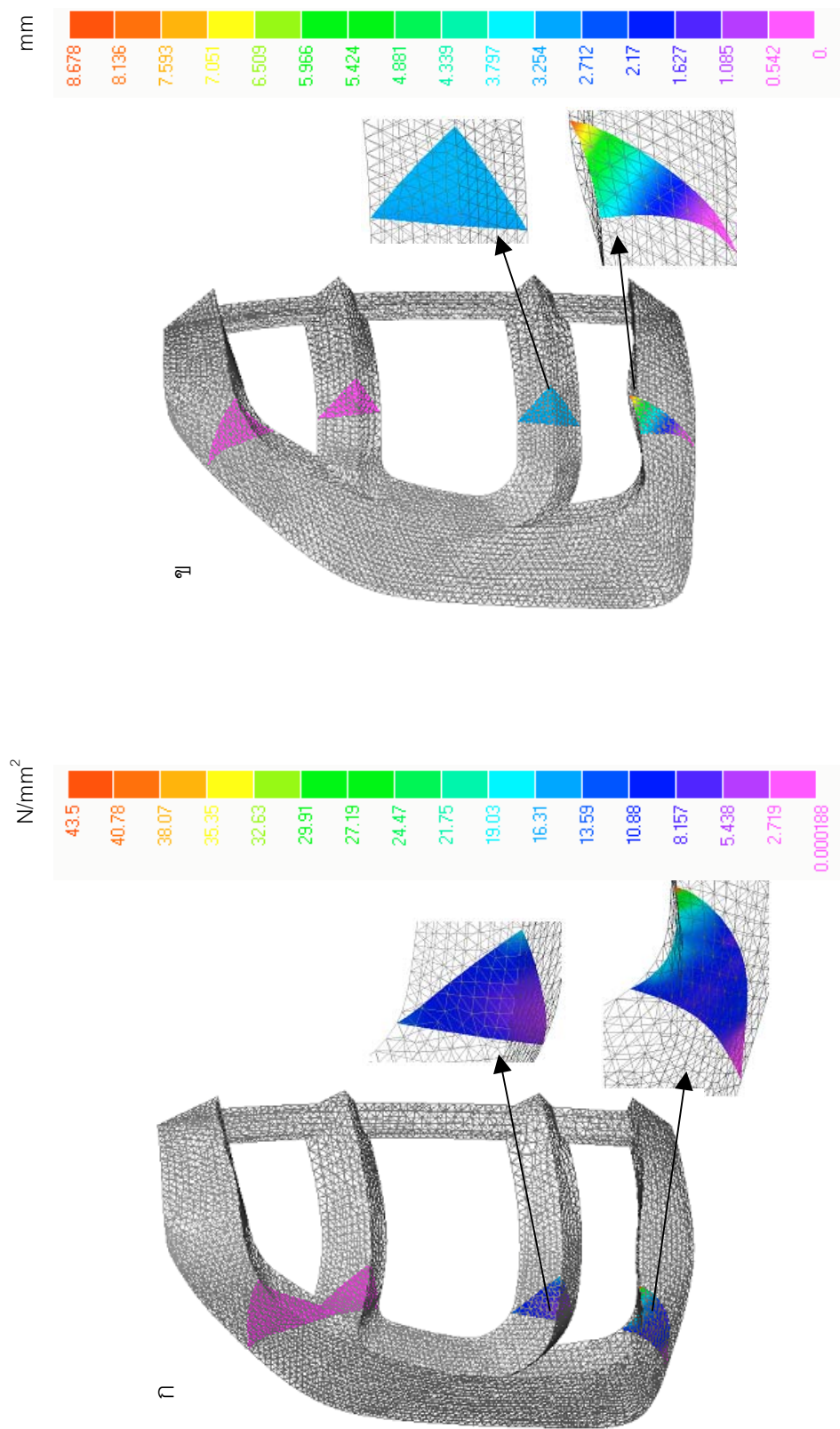


ภาพที่ 79 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง C-1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 8,661.03 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด

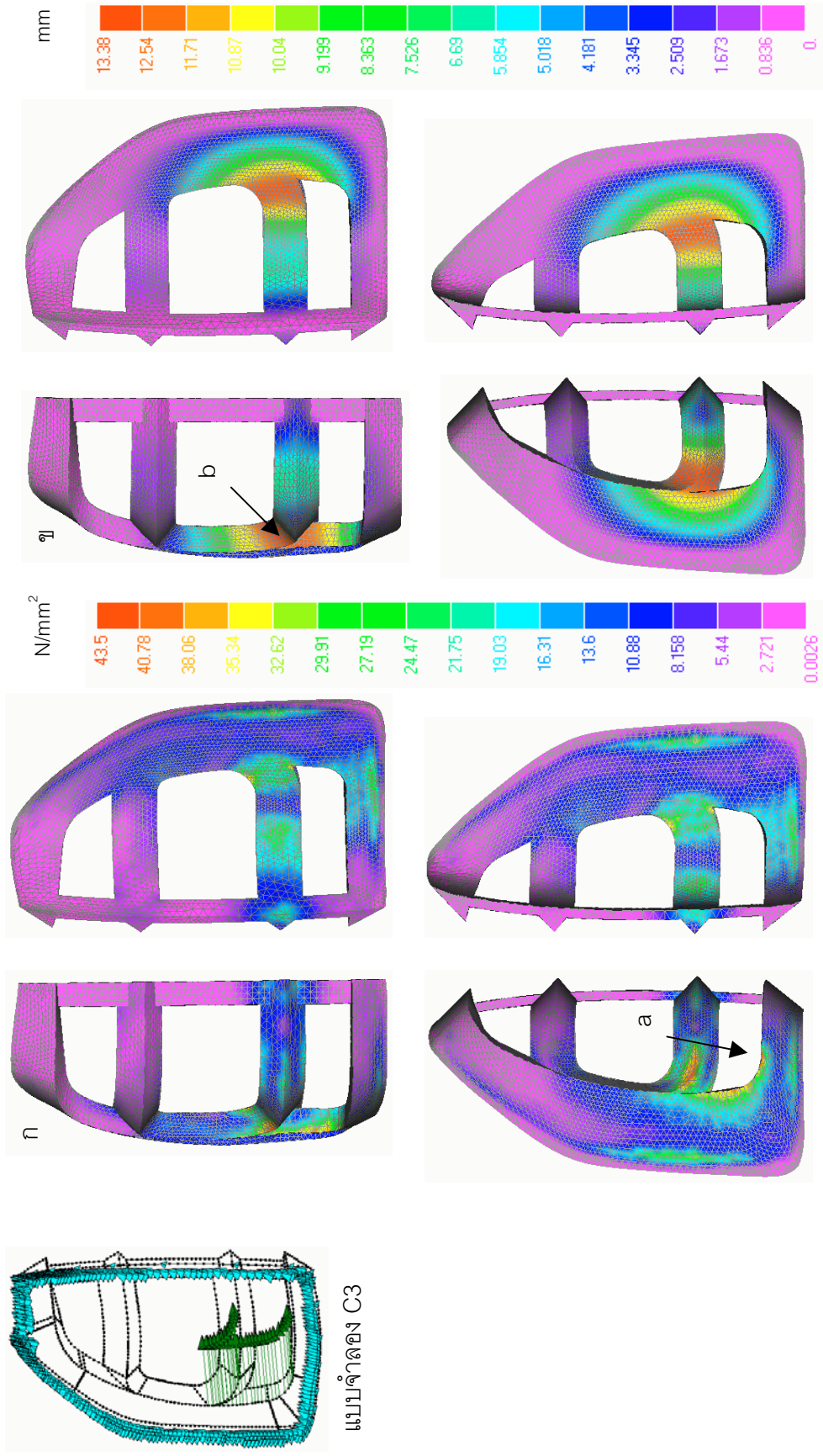


ภาพที่ 80 แสดงระดับชั้นสี่ของแบบจำลอง C2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 7,052.15 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น

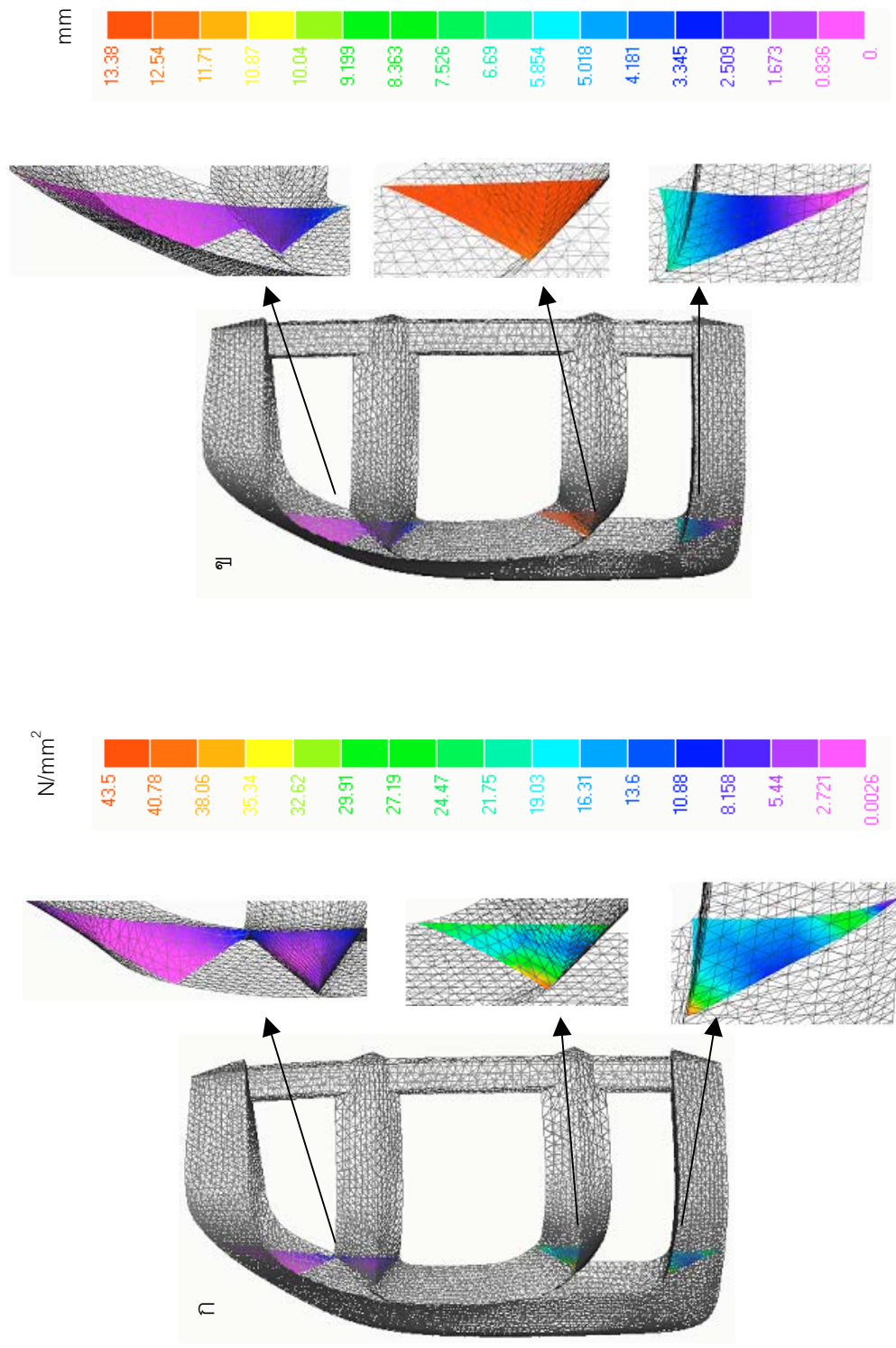
และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด



ภาพที่ 81 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง C2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 7,052.15 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น ที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด



ภาพที่ 82 แสดงระดับขั้นสี่ของแบบจำลอง C3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 9,397.78 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด



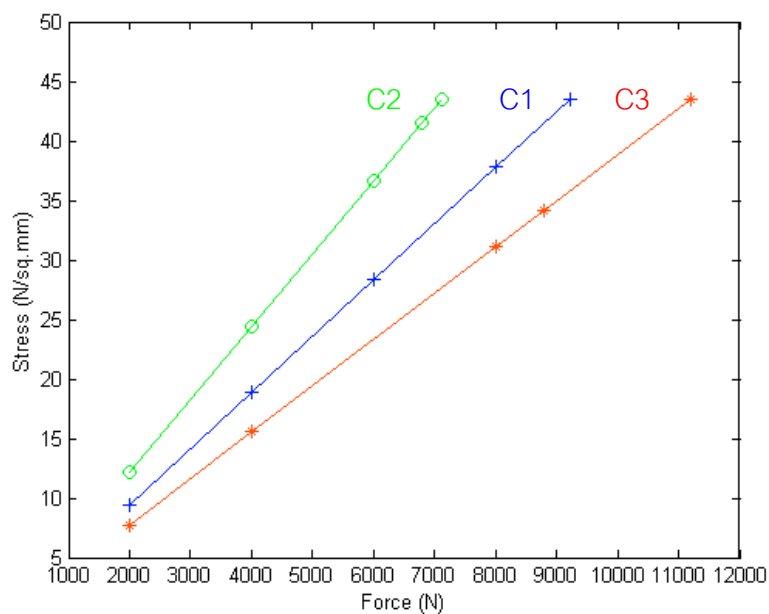
ภาพที่ 83 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง C3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 9,397.78 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด

ตารางที่ 14 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการแตกของแบบจำลอง C

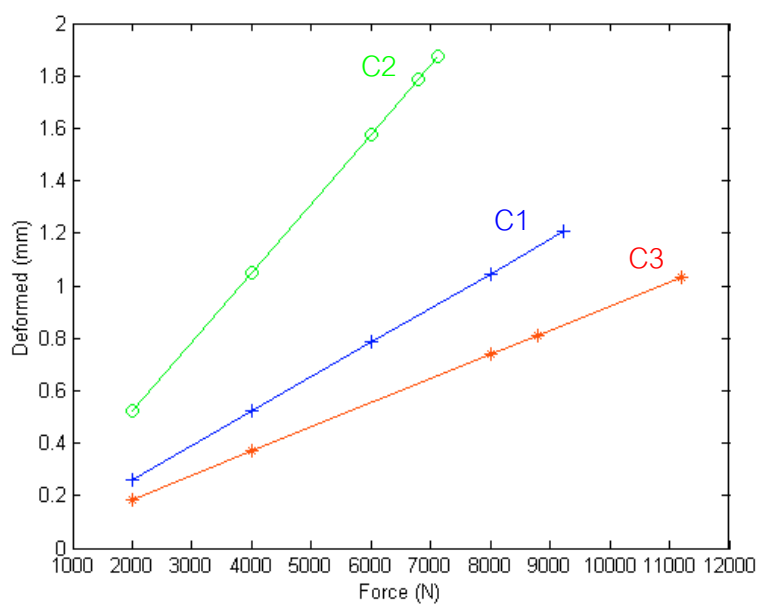
Model	Force (N)	Stress (N/mm ²)	Deformed (mm)
C1	2,000.00	10.04	1.654
C1	4,000.00	20.09	3.312
C1	6,000.00	30.14	4.967
C1	8,000.00	40.18	6.623
C1	8,661.03	43.50	7.170
C2	2,000.00	12.31	2.453
C2	4,000.00	24.66	4.918
C2	6,000.00	37.01	7.383
C2	6,800.00	41.95	8.368
C2	7,052.15	43.50	8.678
C3	2,000.00	9.28	2.840
C3	4,000.00	18.53	5.690
C3	8,000.00	37.03	11.390
C3	8,800.00	40.73	12.530
C3	9,397.78	43.50	13.380

โค้งออกทางด้านข้างด้วย ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง D1 ได้แสดงในภาพที่ 87 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

ภาพที่ 88 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 88 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 88 ข) ของแบบจำลอง D2 เมื่อเกิดการแตกด้วยแรง เท่ากับ 14,104.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm² ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 88 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 88 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 8.678



ภาพที่ 84 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง C1 ถึง C3



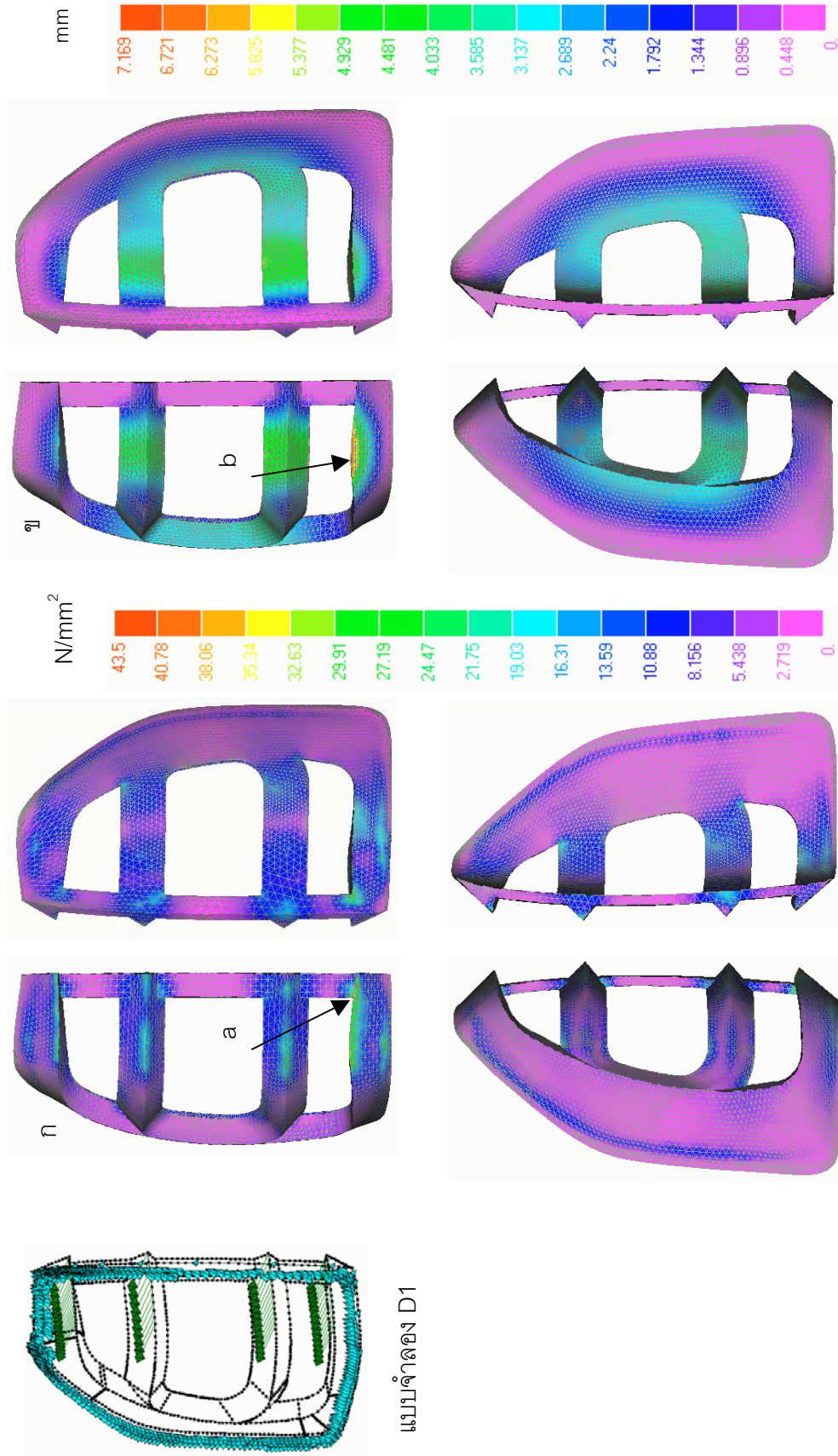
ภาพที่ 85 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง C1 ถึง C3

มิลลิเมตร โดยการยุบตัวนี้เป็นบริเวณมุมของชิ้นงานที่แรงมากกระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง D2 ได้แสดงในภาพที่ 89 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

ภาพที่ 90 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 90 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 90 ข) ของแบบจำลอง D3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 12,198.30 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 90 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากกระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 90 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 13.75 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนข้างของชิ้นงานที่แรงมากกระทำ ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง C3 ได้แสดงในภาพที่ 91 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

ตารางที่ 15 สรุปผลของการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง D1, D2 และ D3 ภาพที่ 92 และ 93 แสดงกราฟของความเค้น และระยะยุบของชิ้นงาน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแรงกระทำตามตารางที่ 15 กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยจุดปลายของกราฟ คือ จุดที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย (Yield Stress ของวัสดุ เท่ากับ 43.5 N/mm^2)

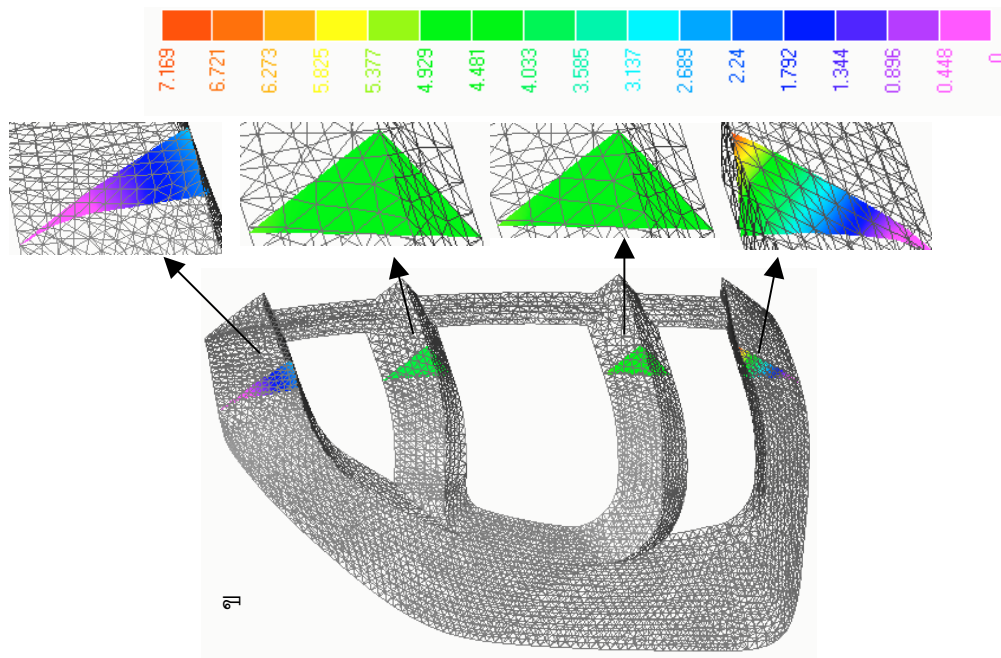
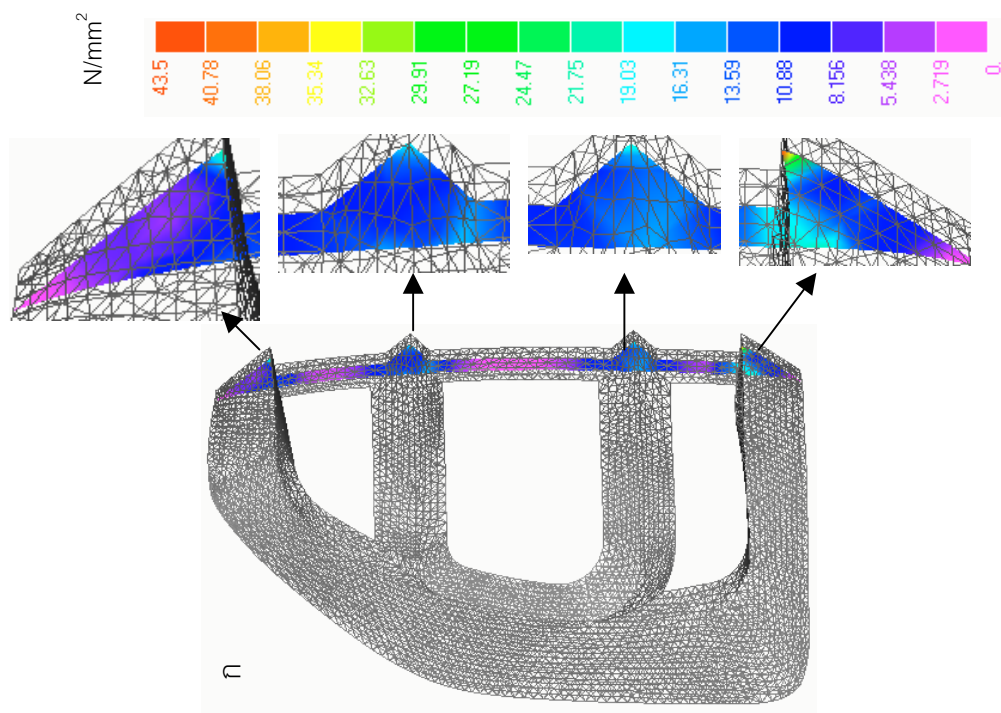
ภาพที่ 94 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 94 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 94 ข) ของแบบจำลอง E1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 9,213.66 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 94 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากกระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 94 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 1.205 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนหน้าของชิ้นงานที่แรงมากกระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง E1 ได้แสดงในภาพที่ 95 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด



แบบจำลอง D1

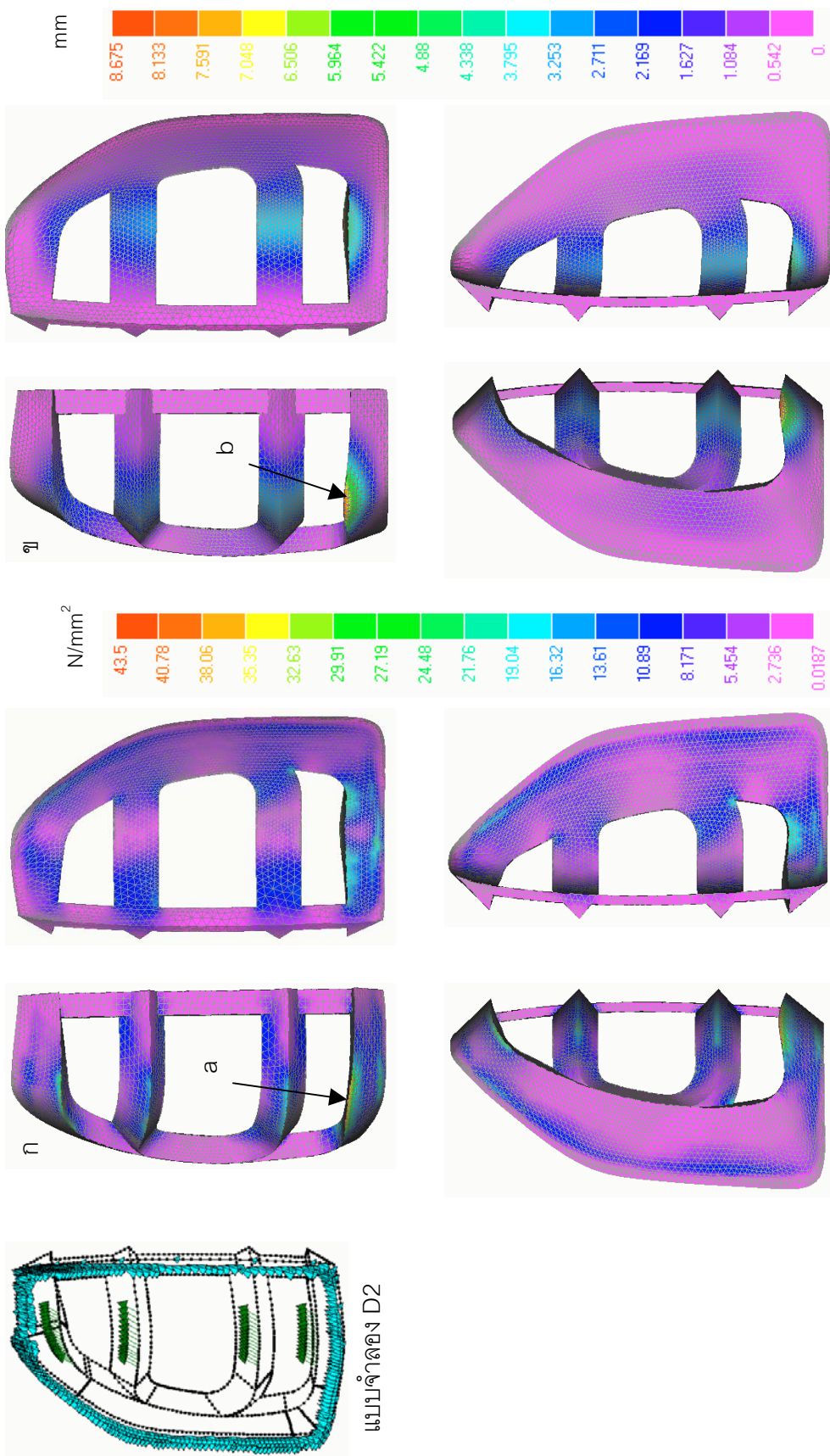
ภาพที่ 86 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง D1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 17,322.05 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่า

ความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด



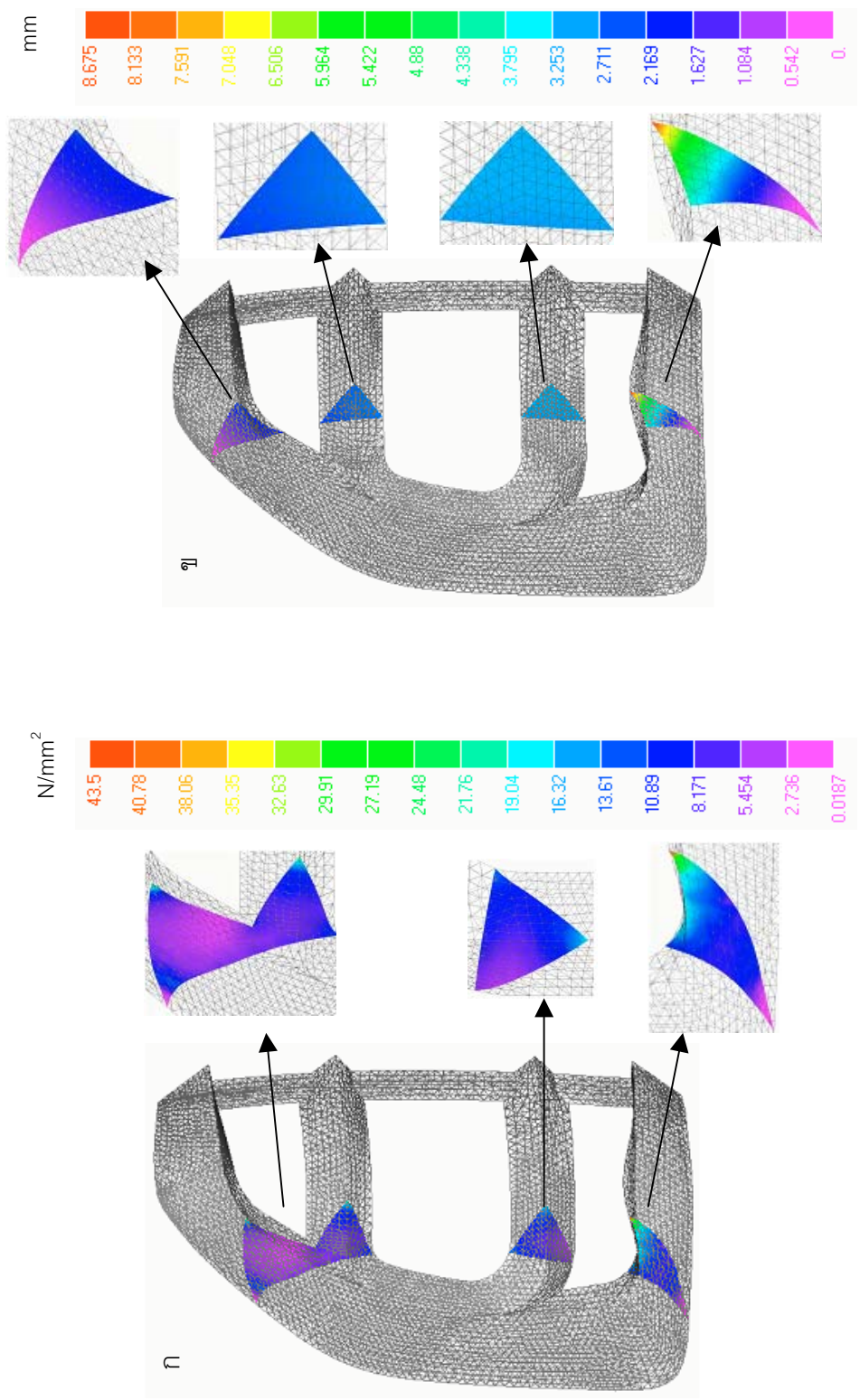
ภาพที่ 8Z แสดงภาพตัดของแบบจำลอง D1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 17,322.05 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่า

ความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด

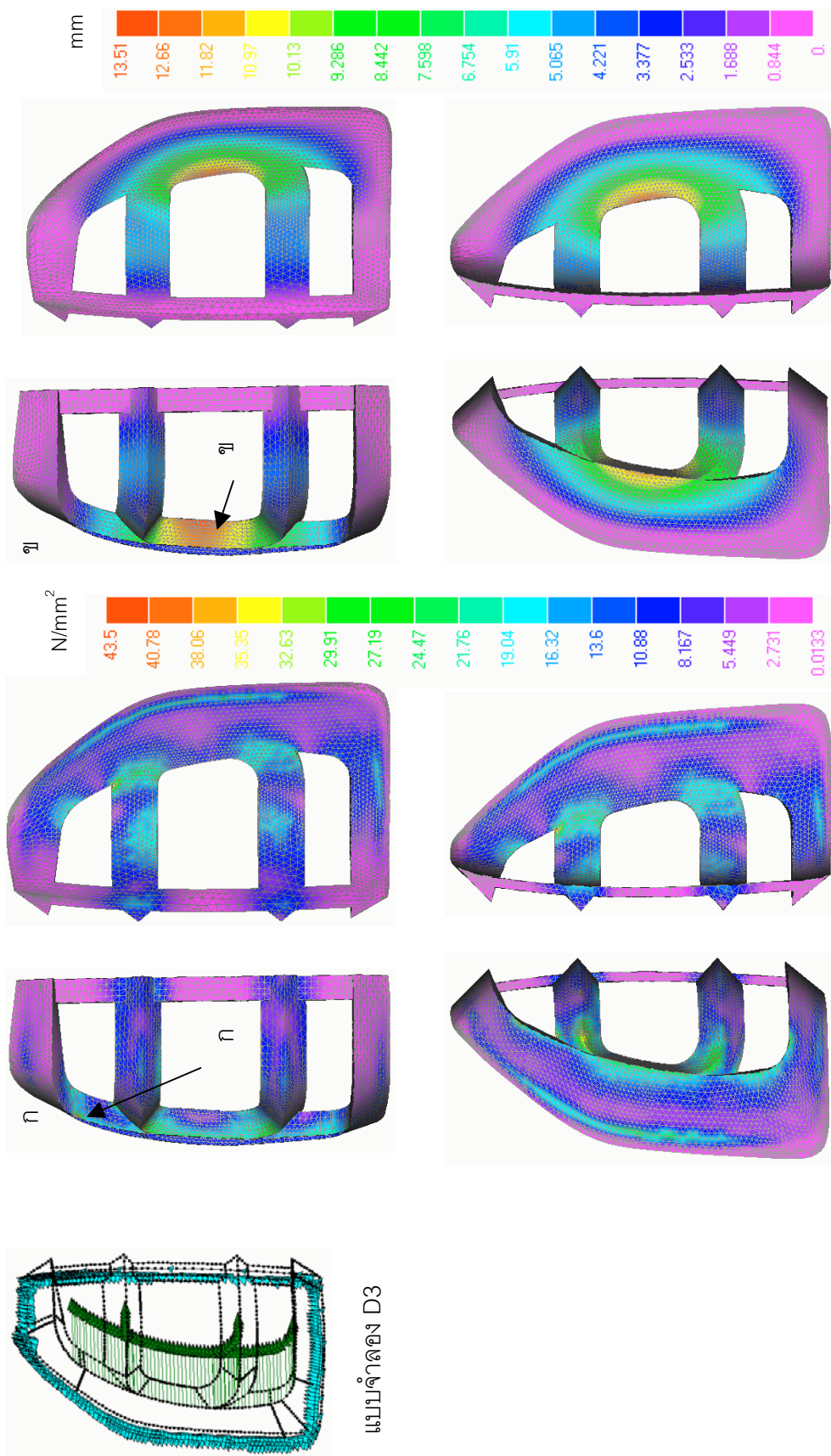


ภาพที่ 88 แสดงระดับชั้นของแบบจำลอง D2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 14,104.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น

และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด



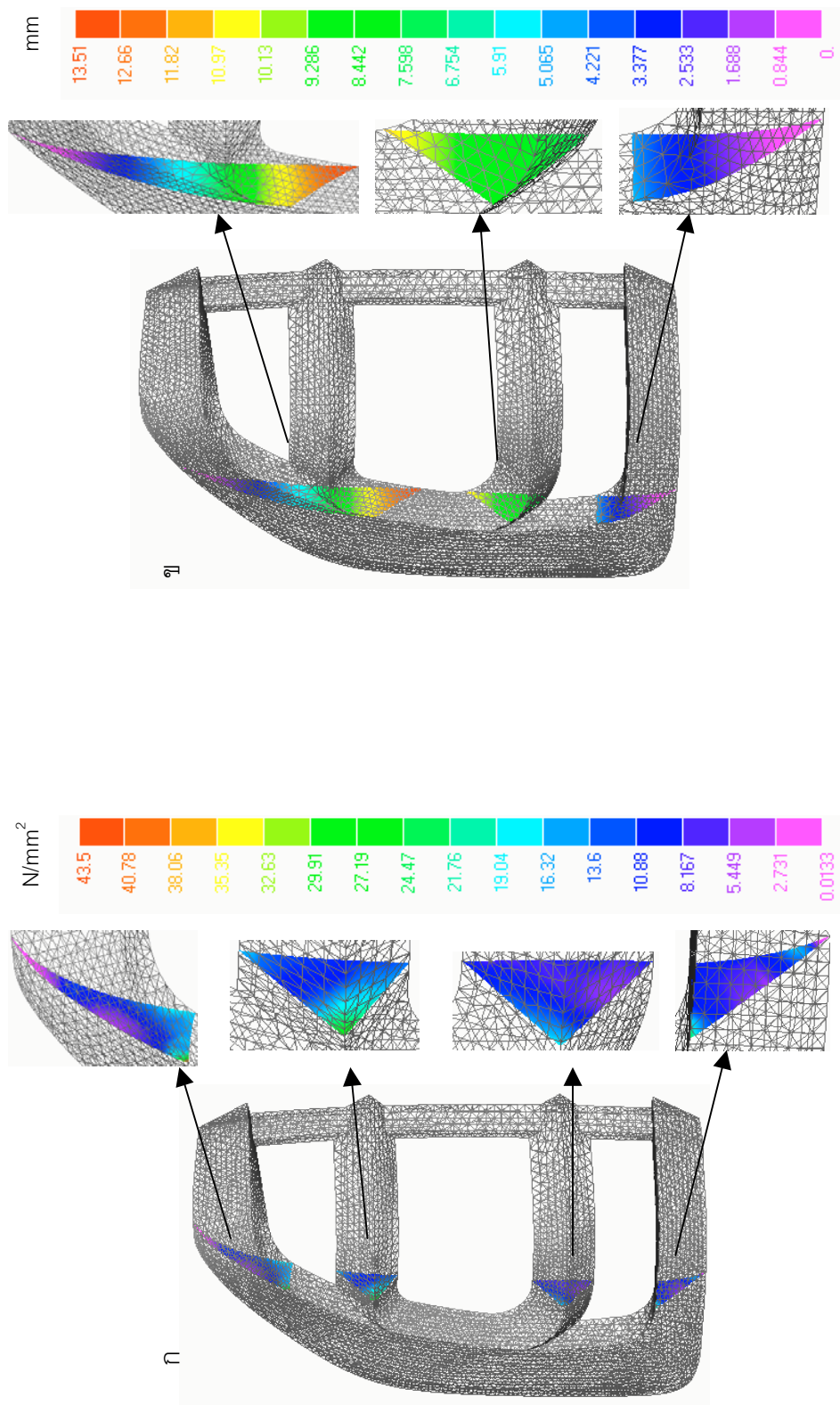
ภาพที่ 89 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง D2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 14,104.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น ที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะเยื้องที่ตำแหน่งระยะเยื้องสูงสุด



แบบจำลอง D3

ภาพที่ 90 แสดงระดับพื้นผิวของแบบจำลอง D3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 12,198.30 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่า

ความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด



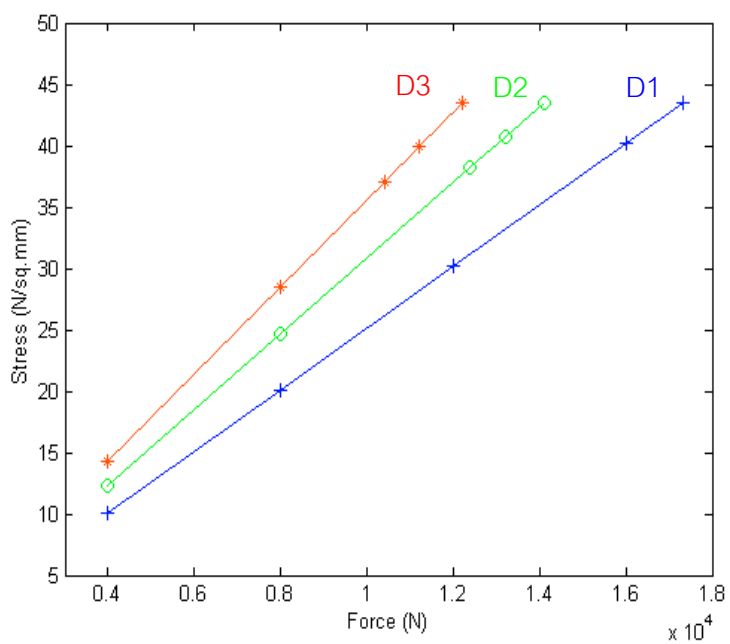
ภาพที่ 91 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง D3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 12,198.30 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่า

ความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด

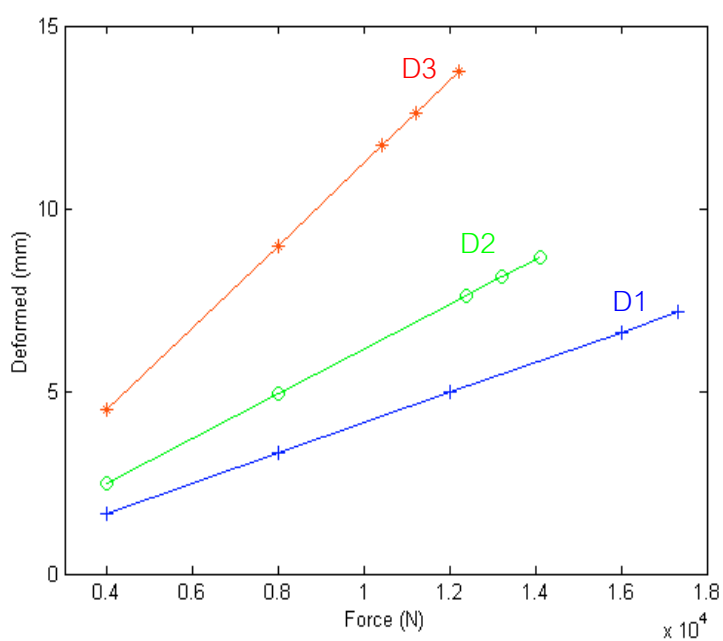
ตารางที่ 15 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง D

Model	Force (N)	Stress (N/mm ²)	Deformed (mm)
D1	4,000.00	10.04	1.654
D1	8,000.00	20.09	3.311
D1	12,000.00	30.14	4.967
D1	16,000.00	40.18	6.622
D1	17,322.05	43.50	7.169
D2	4,000.00	12.34	2.458
D2	8,000.00	24.68	4.917
D2	12,400.00	38.26	7.629
D2	13,200.00	40.73	8.122
D2	14,104.30	43.50	8.678
D3	4,000.00	14.27	4.495
D3	8,000.00	28.54	8.990
D3	10,400.00	37.09	11.720
D3	11,200.00	39.94	12.630
D3	12,198.30	43.50	13.750

ภาพที่ 96 แสดงระดับขั้นสี่ของความเค้น (ภาพที่ 96 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 96 ข) ของแบบจำลอง E2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 7,131.15 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm² ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 96 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงกระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 96 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 1.874 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณมุมของชิ้นงานที่แรงกระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง E2 ได้แสดงในภาพที่ 97 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด



ภาพที่ 92 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง D1 ถึง D3



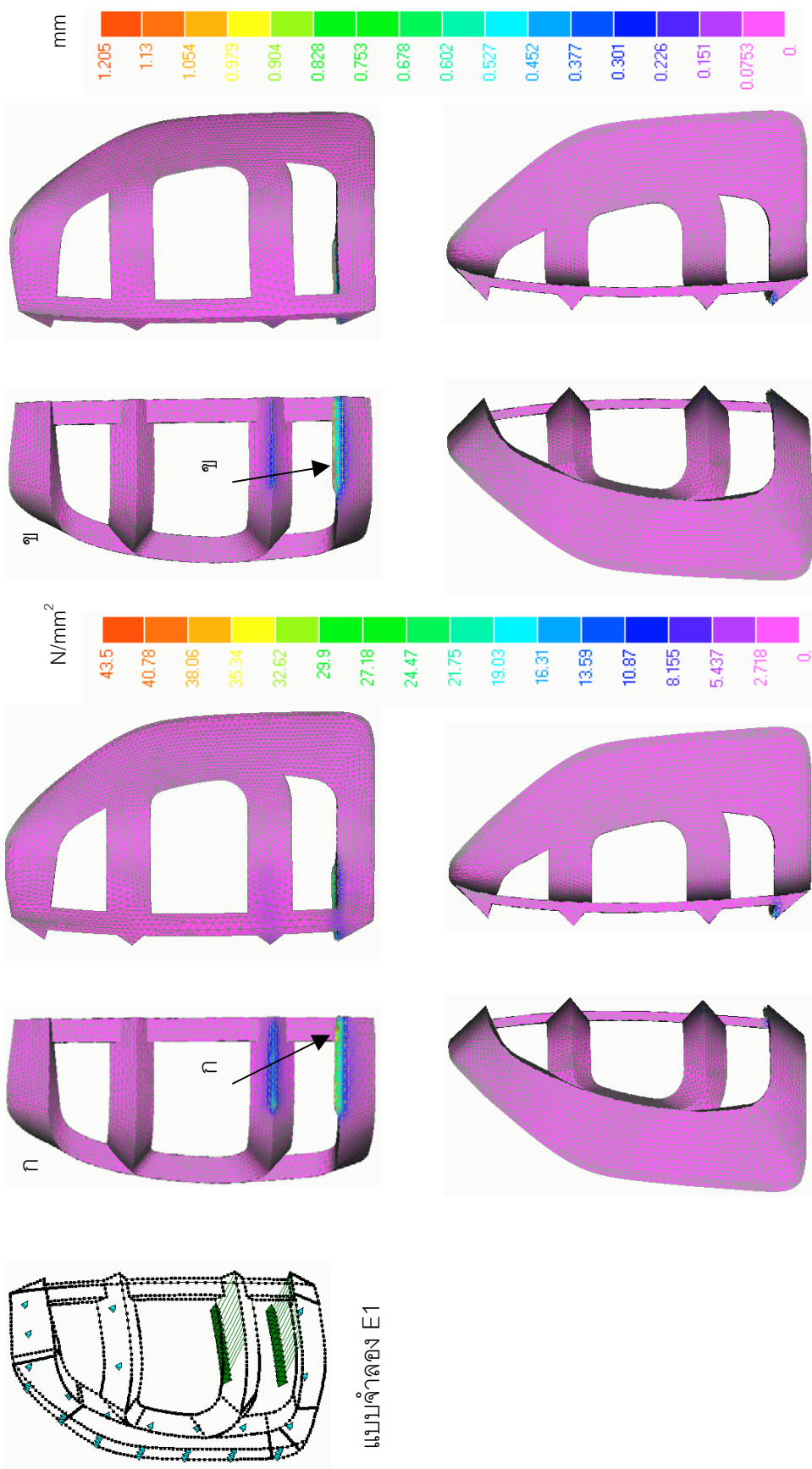
ภาพที่ 93 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง D1 ถึง D3

ภาพที่ 98 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 98 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 98 ข) ของแบบจำลอง E3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 11,206.69 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 98 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 98 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 1.032 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนข้างของชิ้นงานที่แรงมากระทำ ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง E3 ได้แสดงในภาพที่ 99 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

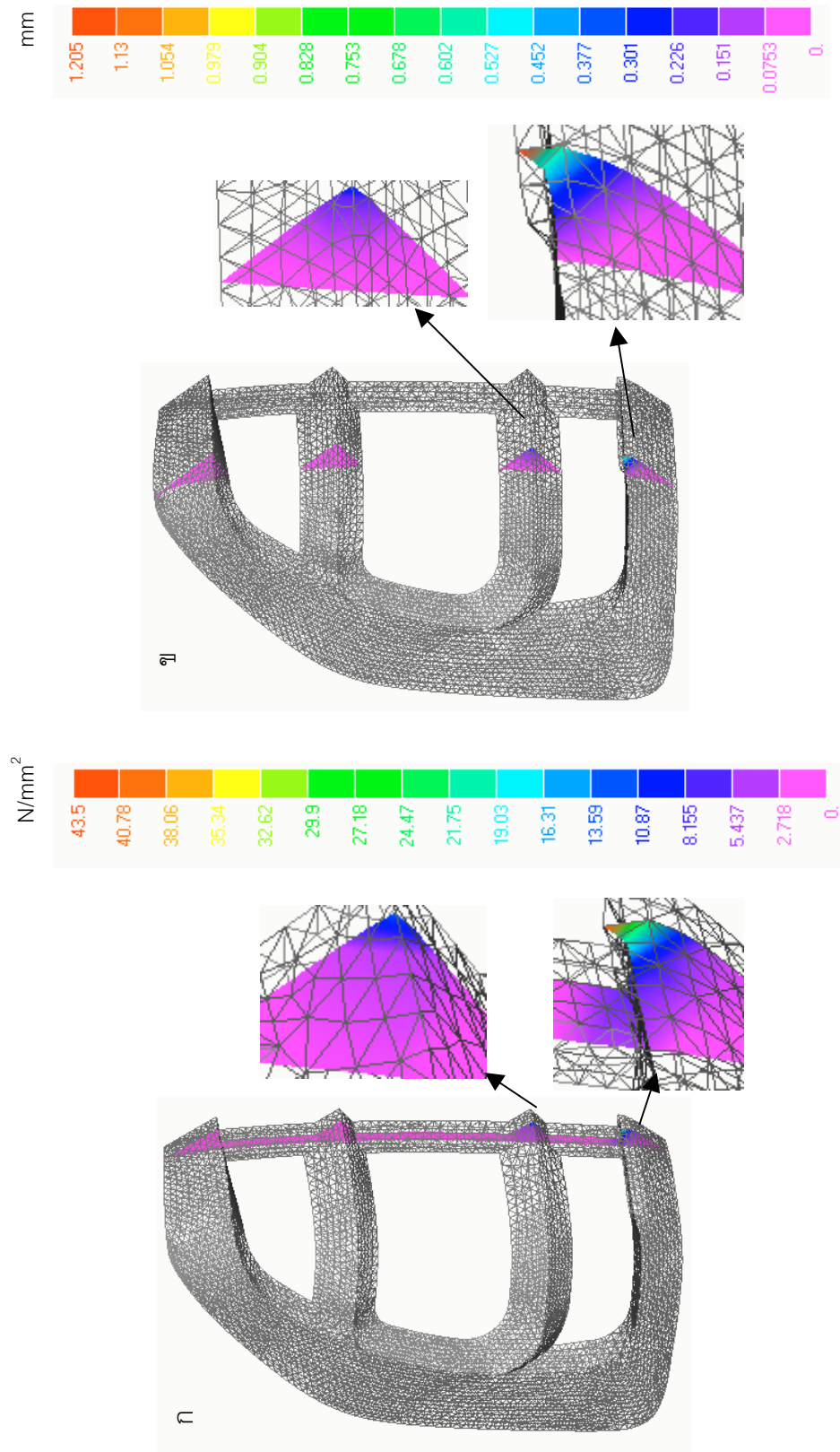
ตารางที่ 16 สรุปผลของการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง E1, E2 และ E3 ภาพที่ 100 และ 101 แสดงกราฟของความเค้น และระยะยุบของชิ้นงาน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแรงกระทำตามตารางที่ 16 กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยจุดปลายของกราฟ คือ จุดที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย (Yield Stress ของวัสดุ เท่ากับ 43.5 N/mm^2)

ภาพที่ 102 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 102 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 102 ข) ของแบบจำลอง F1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 18,427.32 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 102 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 102 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 1.205 มิลลิเมตร การยุบตัวนี้เป็นบริเวณส่วนหน้าของชิ้นงานที่แรงมากระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง F1 ได้แสดงในภาพที่ 103 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

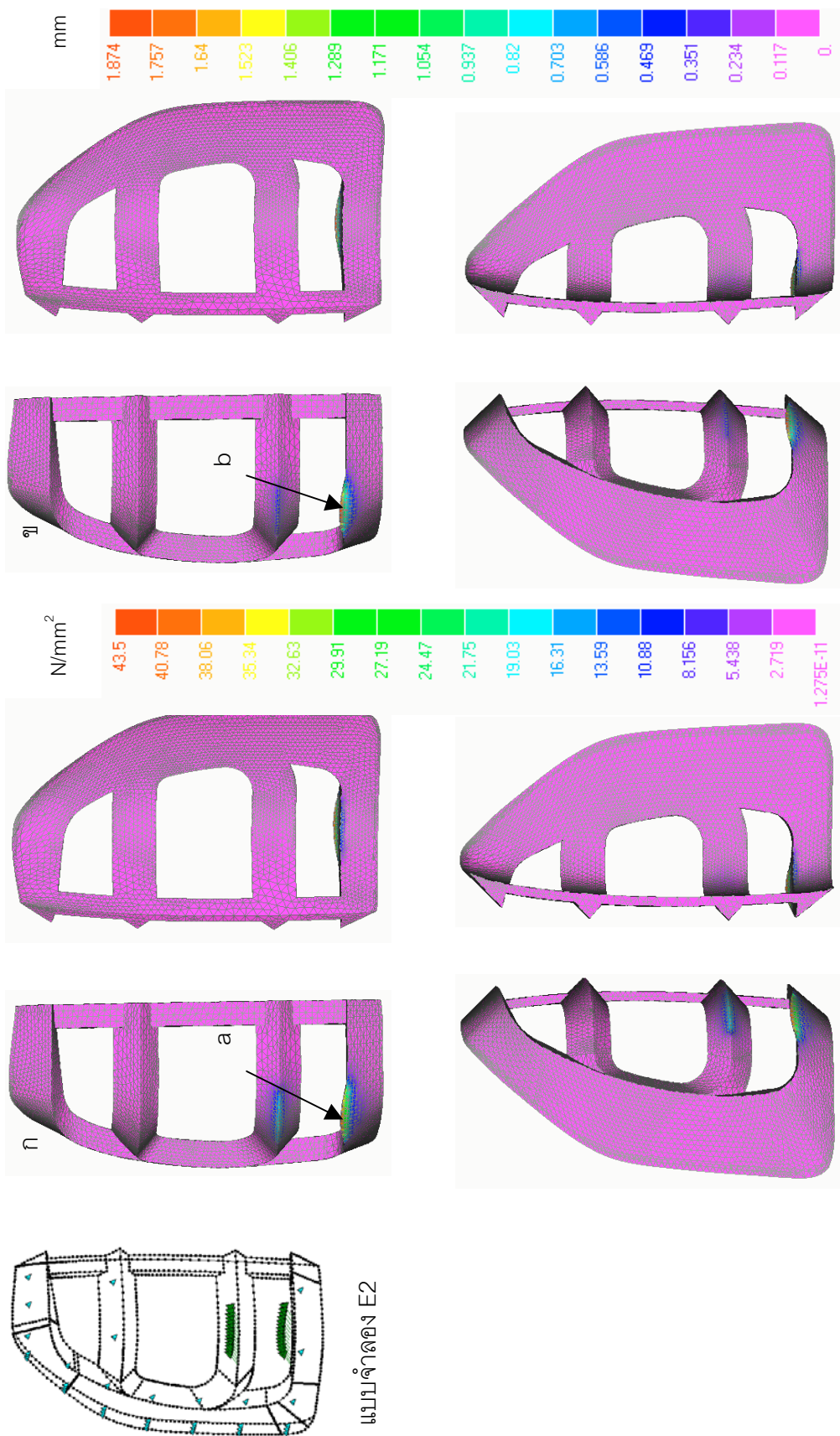
ภาพที่ 104 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 104 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 104 ข) ของแบบจำลอง F2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 14,262.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีค่าความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm^2 ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 104 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจายในตำแหน่งที่แรงมากระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 104 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 1.874



ภาพที่ 94 แสดงระดับขั้นสีของแบบจำลอง E1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 9,213.66 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด

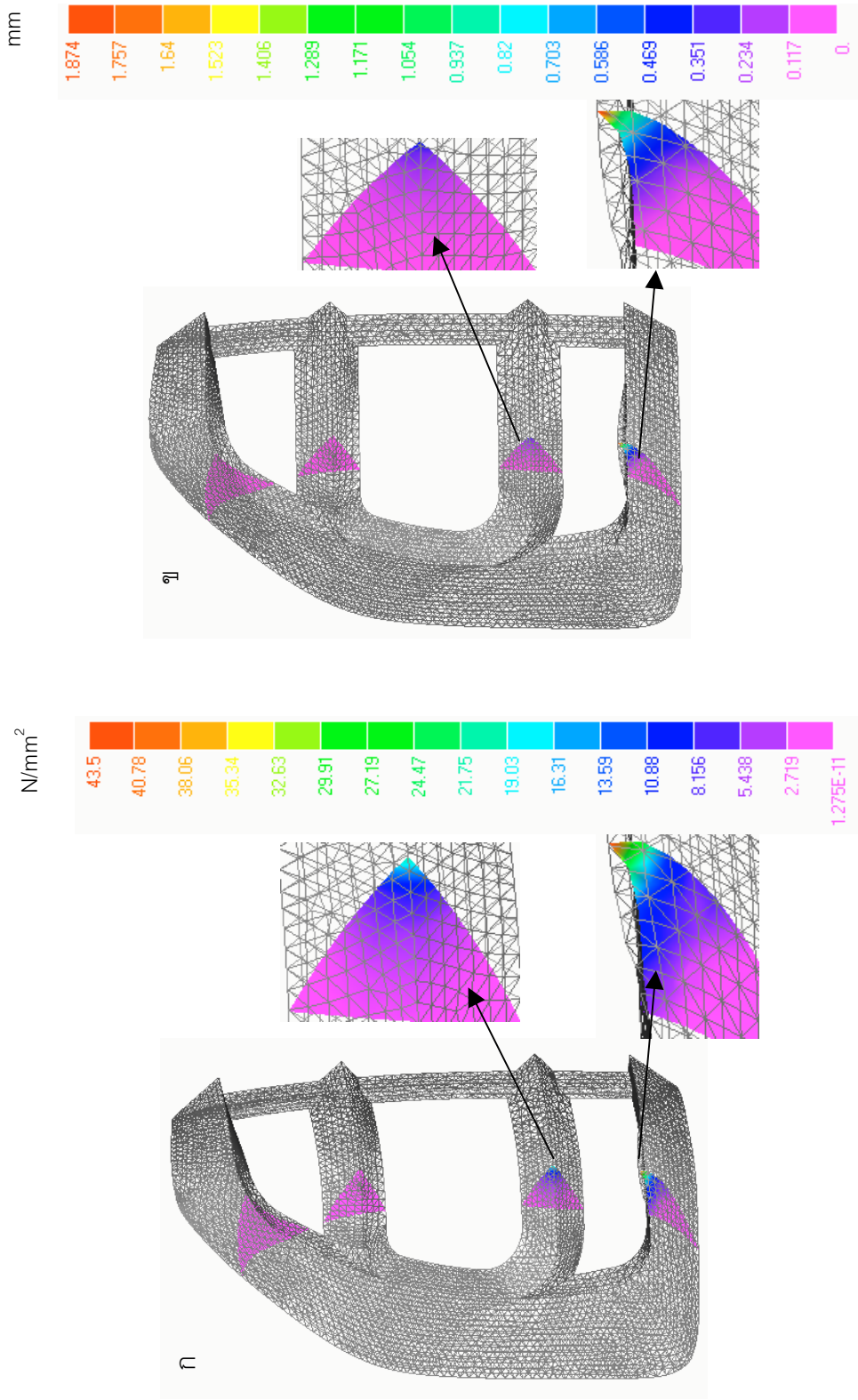


ภาพที่ 95 แสดงภาพตัดขวางแบบจำลอง E1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 9,213.66 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด

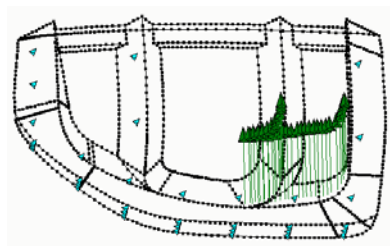


ภาพที่ 96 แสดงระดับชั้นสีของแบบจำลอง E2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 7,131.50 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น

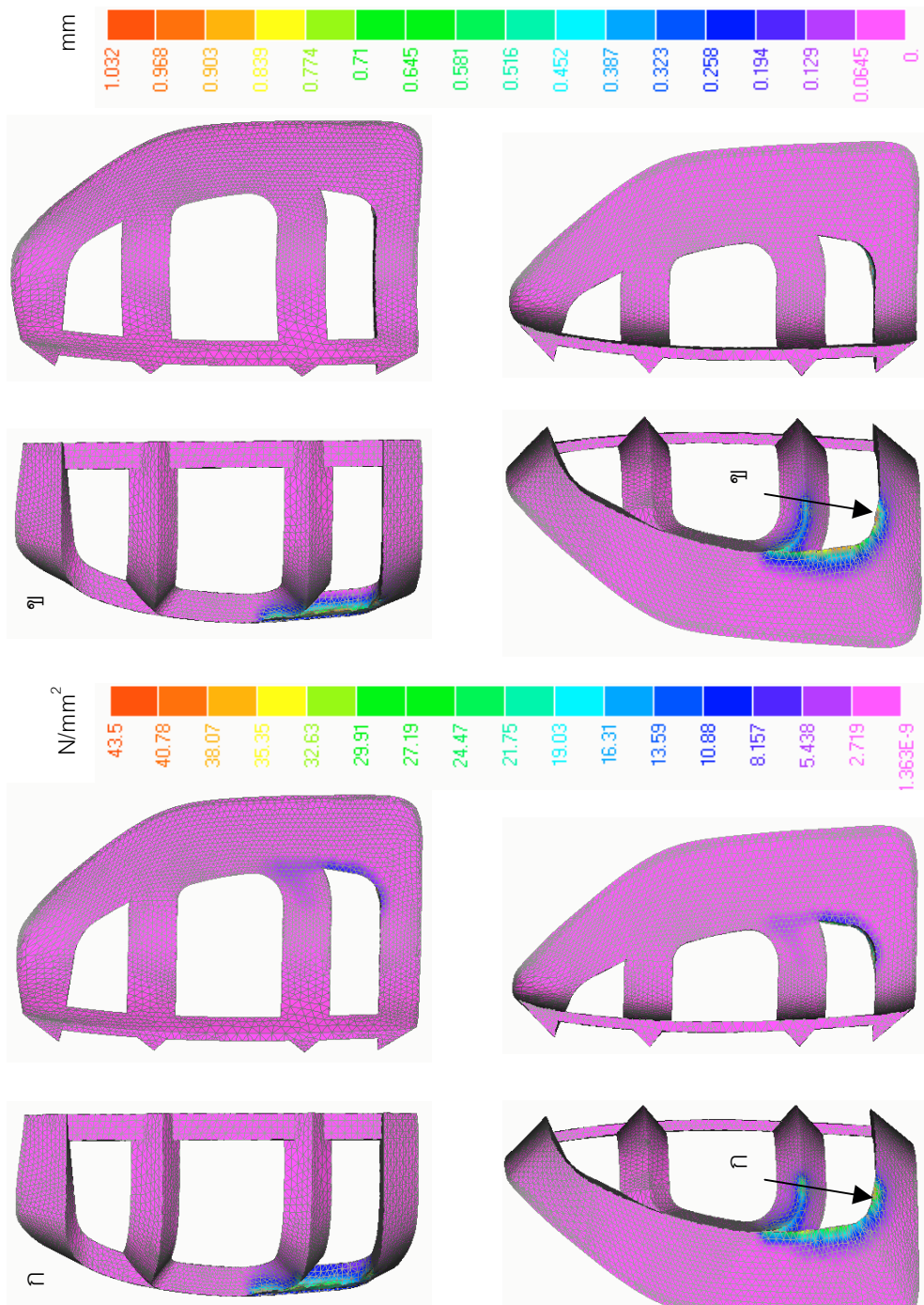
และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด



ภาพที่ 97 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง E2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 7,131.15 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น
ที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด

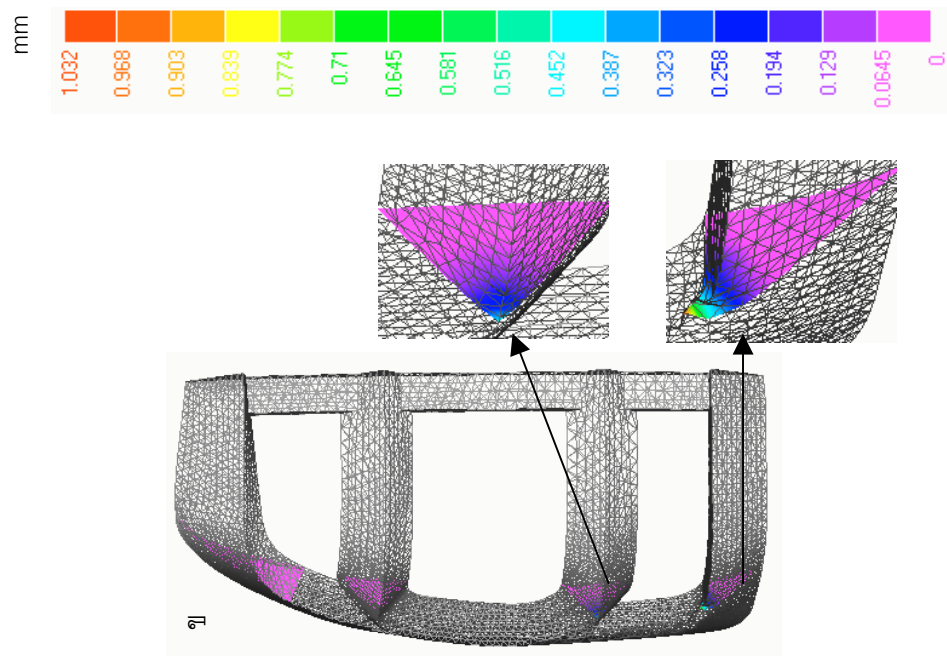
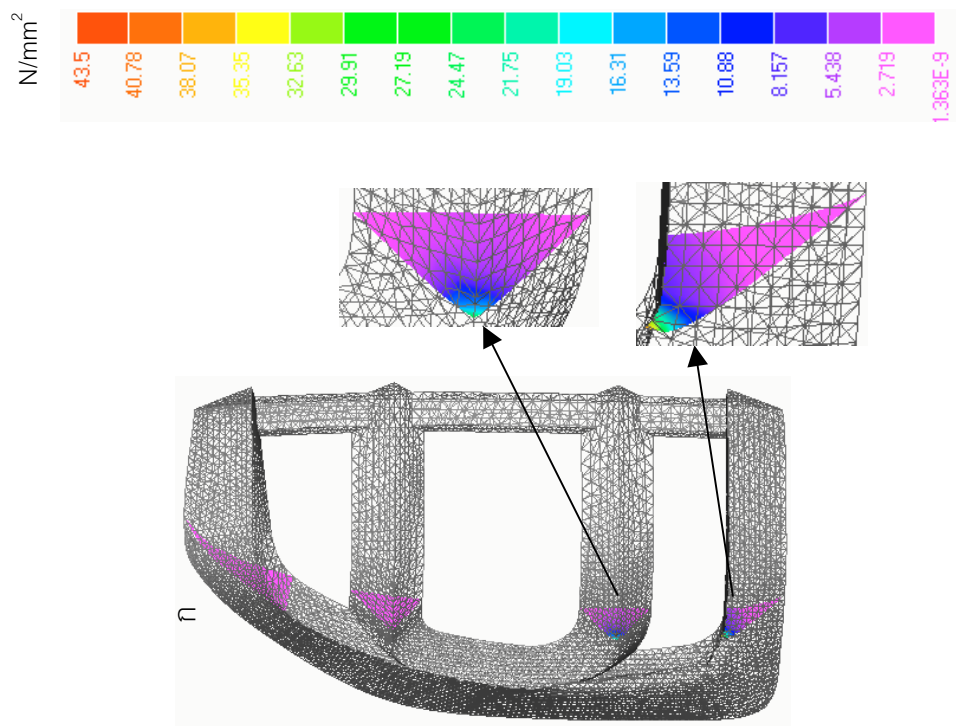


แบบจำลอง E3



ภาพที่ 98 แสดงระดับขั้นสีของแบบจำลอง E3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 11,206.69 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่า

ความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะยุบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะยุบสูงสุด



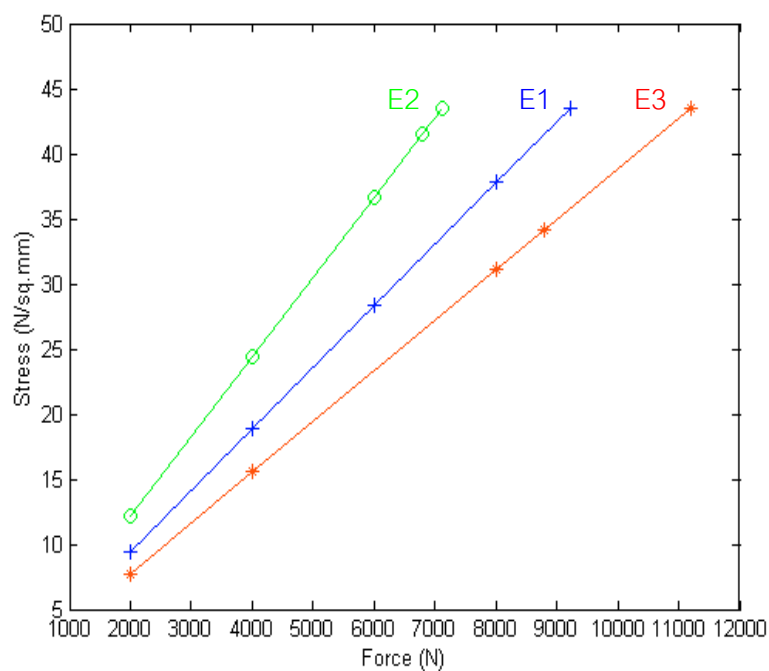
ภาพที่ ๑๑ แสดงภาพตัดของแบบจำลอง E3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 11,206.69 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด

ตารางที่ 16 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง E

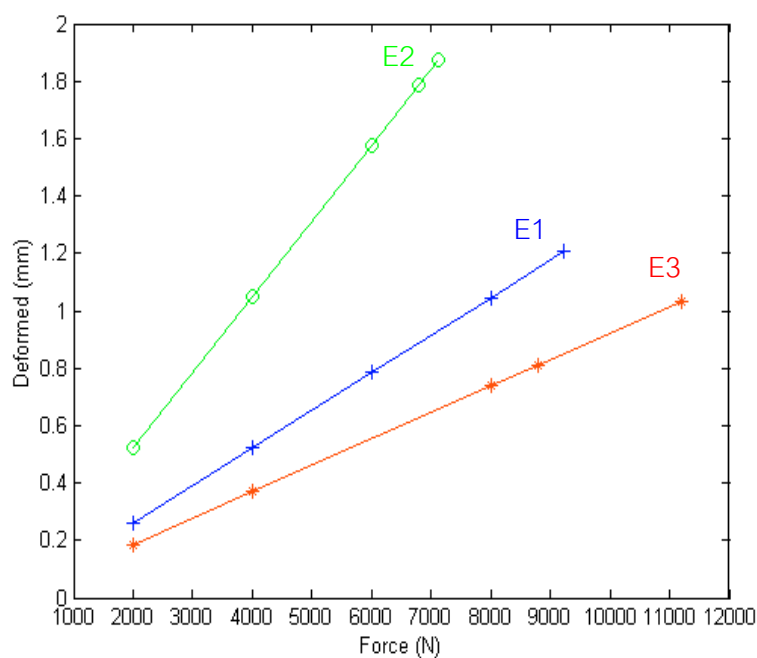
Model	Force (N)	Stress (N/mm ²)	Deformed (mm)
E1	2,000.00	9.443	0.262
E1	4,000.00	18.89	0.523
E1	6,000.00	28.33	0.785
E1	8,000.00	37.77	1.046
E1	9,213.66	43.50	1.205
E2	2,000.00	12.20	0.526
E2	4,000.00	24.40	1.051
E2	6,000.00	36.60	1.577
E2	6,800.00	41.48	1.787
E2	7,131.15	43.50	1.874
E3	2,000.00	7.76	0.184
E3	4,000.00	15.53	0.369
E3	8,000.00	31.06	0.737
E3	8,800.00	34.16	0.811
E3	11,206.69	43.50	1.032

มิลลิเมตร โดยการยุบตัวนี้เป็นบริเวณมุมของชิ้นงานที่แรงมากกระทำ นอกจากนี้ ปรากฏการโก่งออกทางด้านข้างด้วย ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง F2 ได้แสดงในภาพที่ 105 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

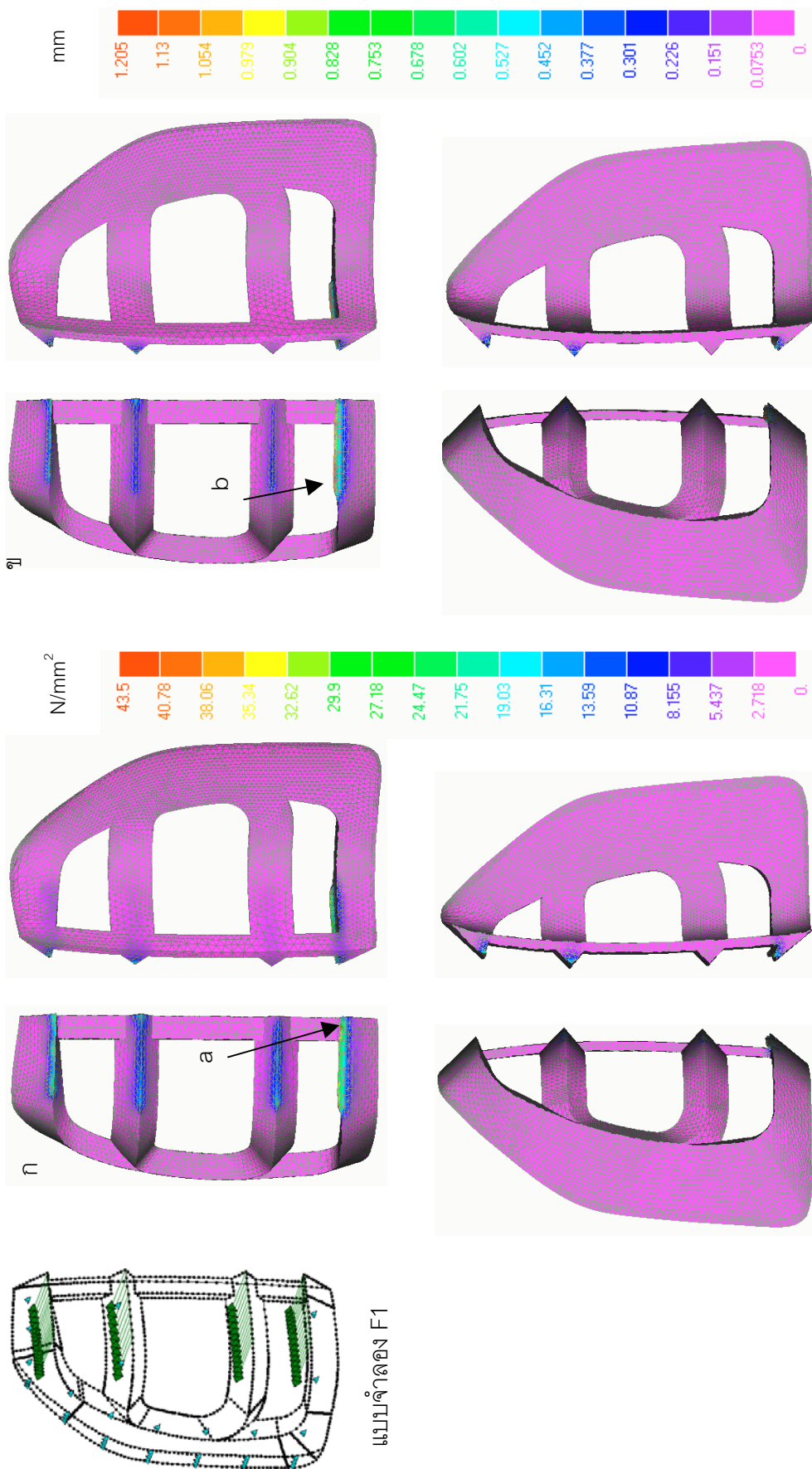
ภาพที่ 106 แสดงระดับชั้นสีของความเค้น (ภาพที่ 106 ก) และระยะยุบ (ภาพที่ 106 ข) ของแบบจำลอง F3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง เท่ากับ 22,413.38 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน ผลปรากฏว่าบริเวณจุด a มีความเค้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 43.5 N/mm² ดังนั้น บริเวณที่คาดว่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุด คือ จุด a (ภาพที่ 106 ก) ความเค้นสูงที่เกิดมีการกระจาย



ภาพที่ 100 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง E1 ถึง E3



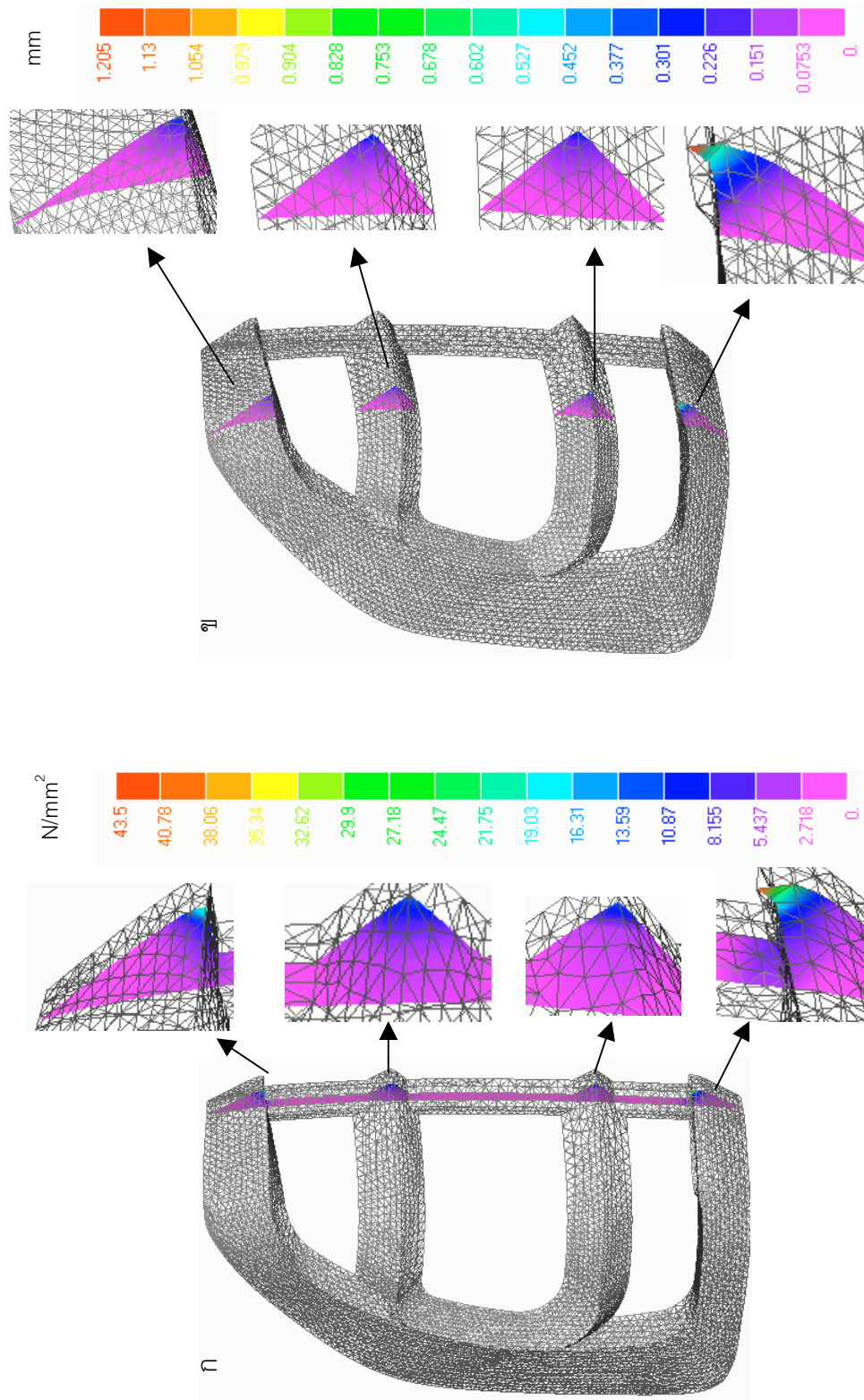
ภาพที่ 101 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง E1 ถึง E3



แบบจำลอง F1

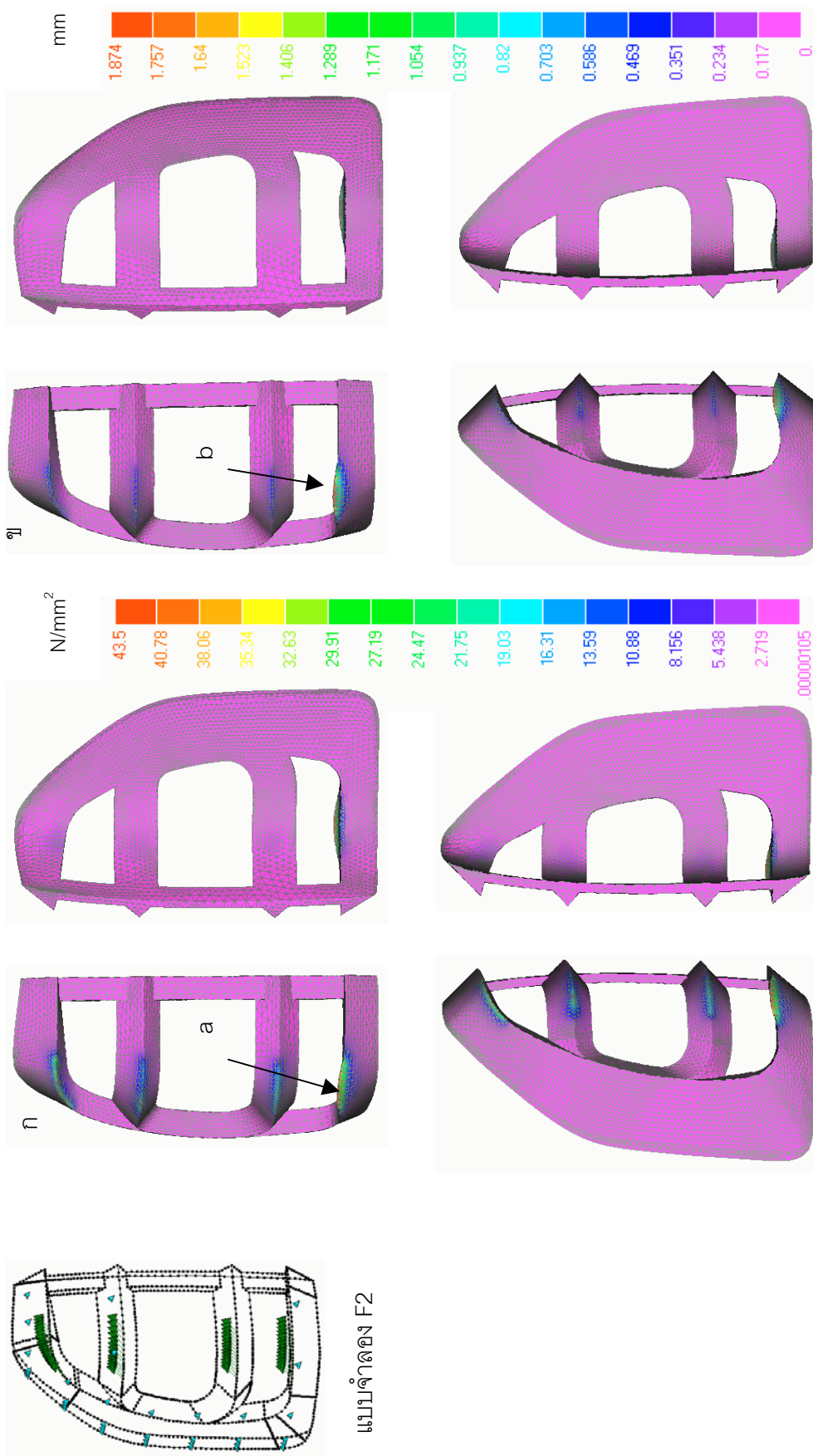
ภาพที่ 102 แสดงระดับชั้นผิวของแบบจำลอง F1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 18,427.32 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่า

ความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะขอบ โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะขอบสูงสุด



ภาพที่ 103 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง F1 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 18,427.32 นิวตัน ที่ด้านหน้าของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่า

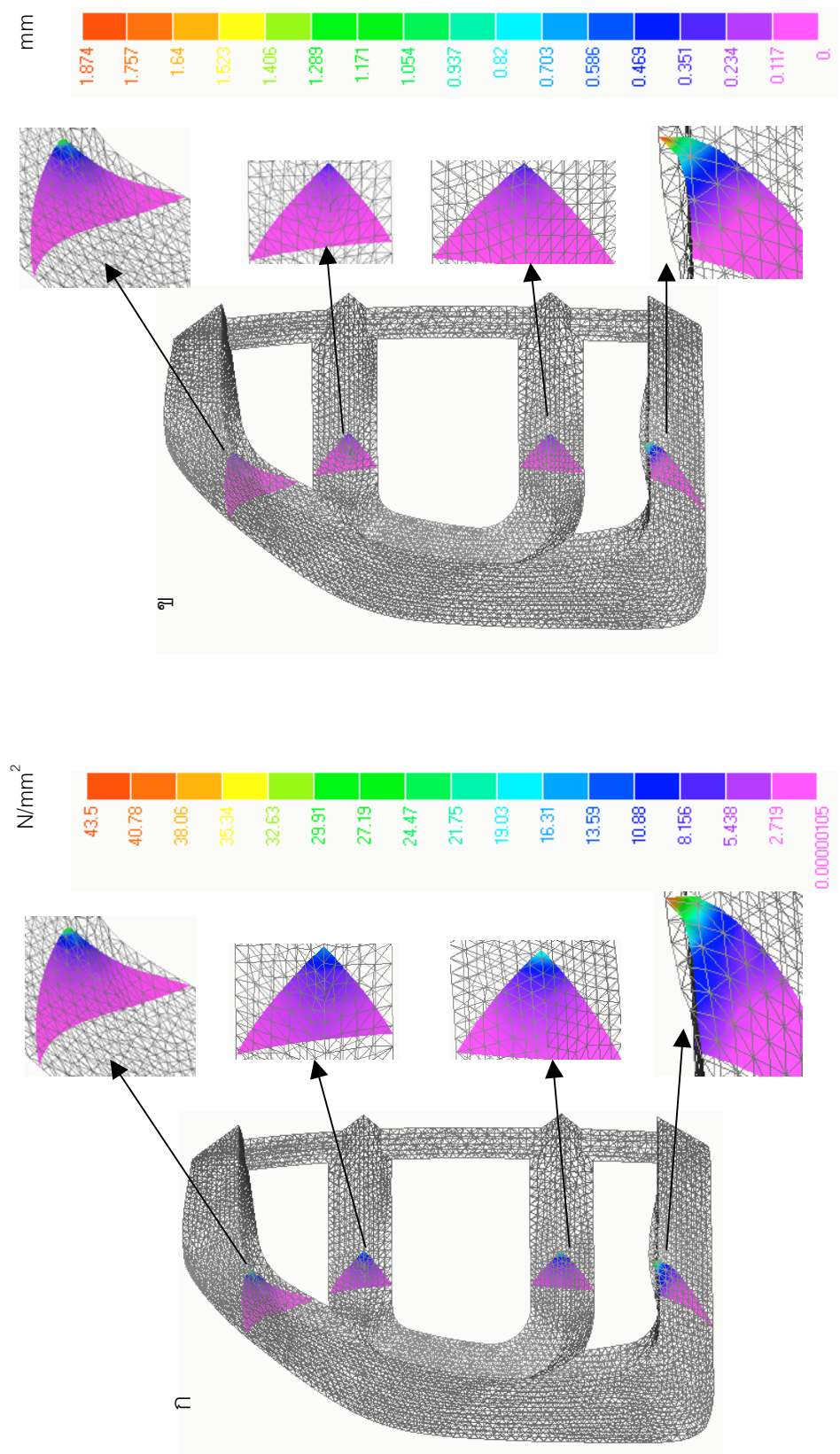
ความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด



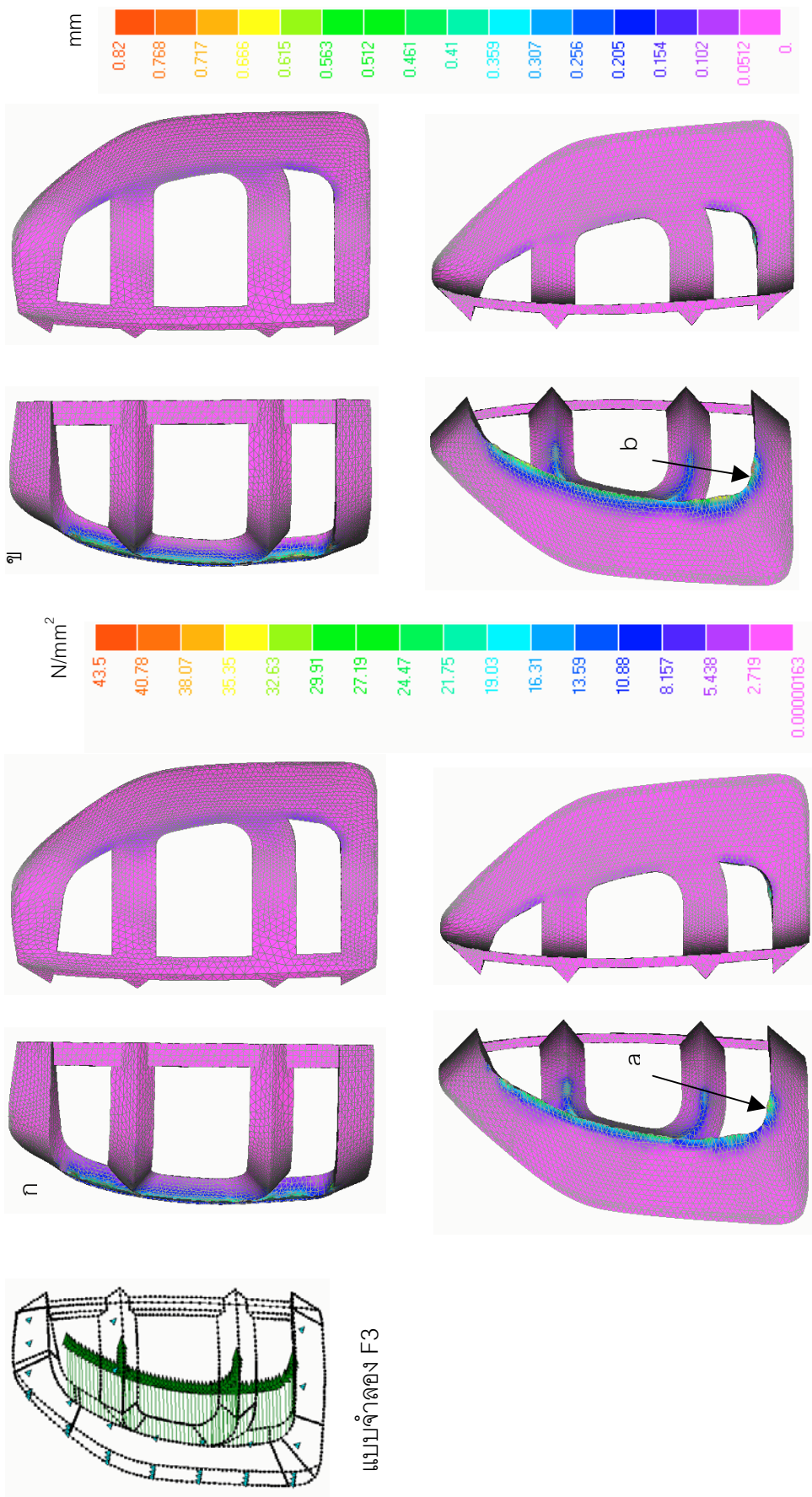
แบบจำลอง F2

ภาพที่ 104 แสดงระดับขั้นสี่ของแบบจำลอง F2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 14,262.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น

และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด

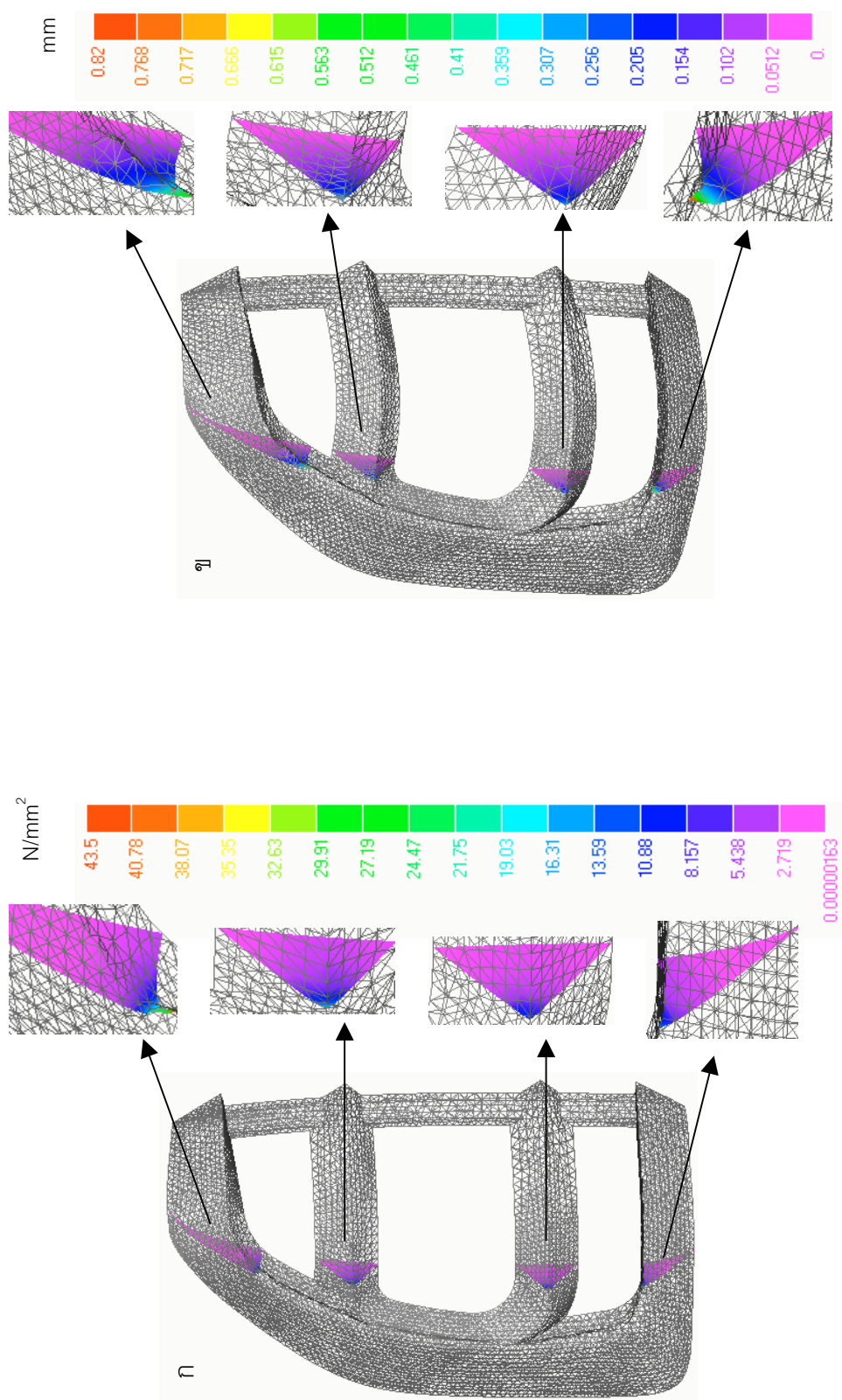


ภาพที่ 105 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง F2 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 14,262.30 นิวตัน ที่มุมของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด



แบบจำลอง F3

ภาพที่ 106 แสดงระดับขั้นสี่ของแบบจำลอง F3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 12,422.23 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่าความเค้น และ ข) แสดงค่าระยะเยื้อง โดยจุด a แสดงบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุด และจุด b แสดงบริเวณที่มีระยะเยื้องสูงสุด



ภาพที่ 107 แสดงภาพตัดของแบบจำลอง F3 เมื่อเกิดการกระแทกด้วยแรง 12,422.23 นิวตัน ที่ด้านข้างของชิ้นงาน โดยภาพ ก) แสดงค่า

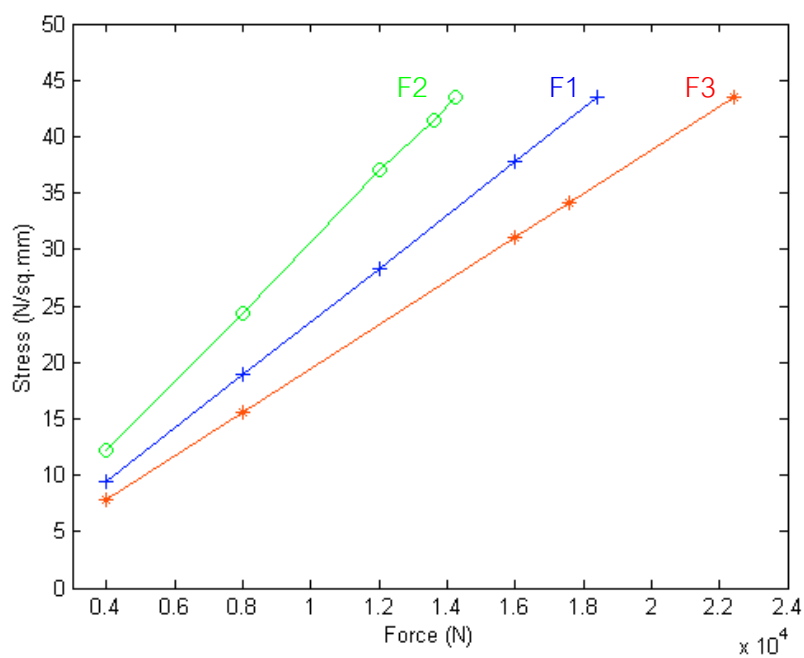
ความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และ ข) แสดงค่าระยะยุบที่ตำแหน่งระยะยุบสูงสุด

ในตำแหน่งที่แรงมากกระทำ ระยะยุบตัวเกิดมากที่สุดที่ จุด b (ภาพที่ 106 ข) โดยมีค่าเท่ากับ 1.032 มิลลิเมตร การยุบตัวที่เป็นบริเวณส่วนข้างของชิ้นงานที่แรงมากกระทำ ภาพตัด (Section) ที่บริเวณต่างๆ ในแบบจำลอง F3 ได้แสดงในภาพที่ 107 โดยภาพ ก) แสดงภาพตัดของความเค้นที่ตำแหน่งความเค้นสูงสุด และภาพ ข) แสดงระยะยุบสูงสุด

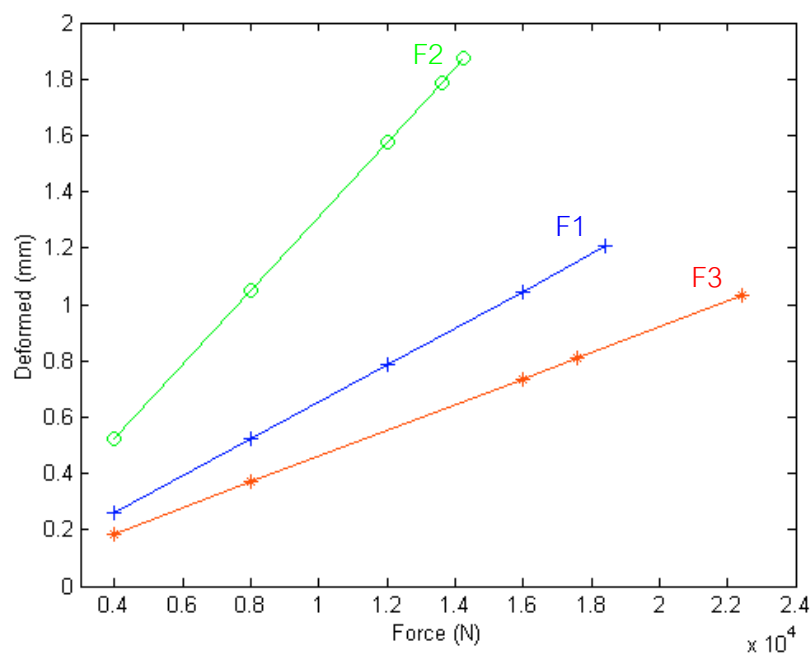
ตารางที่ 17 สรุปผลของการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง F1, F2 และ F3 ภาพที่ 108 และ 109 แสดงกราฟของความเค้น และระยะยุบของชิ้นงาน ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแรงกระทำตามตารางที่ 17 กราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยจุดปลายของกราฟ คือ จุดที่ชิ้นงานเริ่มเสียหาย (Yield Stress ของวัสดุ เท่ากับ 43.5 N/mm^2)

ตารางที่ 17 แสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยุบสูงสุดจากการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง F

Model	Force (N)	Stress (N/mm^2)	Deformed (mm)
F1	4,000.00	9.443	0.262
F1	8,000.00	18.89	0.523
F1	12,000.00	28.33	0.785
F1	16,000.00	37.77	1.046
F1	18,427.32	43.50	1.205
F2	4,000.00	12.20	0.526
F2	8,000.00	24.40	1.051
F2	12,000.00	37.02	1.577
F2	13,600.00	41.48	1.787
F2	14,262.30	43.50	1.874
F3	4,000.00	7.76	0.184
F3	8,000.00	15.53	0.369
F3	16,000.00	31.06	0.736
F3	17,600.00	34.16	0.811
F3	22,413.38	43.50	1.032



ภาพที่ 108 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง F1 ถึง F3



ภาพที่ 109 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบสูงสุดกับแรงกระทำของแบบจำลอง F1 ถึง F3

ตารางที่ 18 สรุปผลการจำลองการกระแทกของแบบจำลอง A, B, C, D, E และ F เมื่อชิ้นงานเริ่มเกิดความเสียหาย โดยแบบจำลอง A และ B ที่ทำจากวัสดุ ABS สามารถรับแรงได้น้อยกว่าหลายเท่าตัว และมีระยะยุบมากกว่าแบบจำลอง C, D, E และ F ที่ทำจากวัสดุโพลีเอทิลีน เนื่องจากชิ้นงาน ABS มีความหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งชิ้นงานโพลีเอทิลีนเป็นชิ้นงานตัน เป็นผลทำให้ชิ้นงานโพลีเอทิลีนสามารถทนต่อการกระแทกได้มากกว่าชิ้นงานที่ทำจากวัสดุ ABS

การจำลองการกระแทกของชิ้นงานโพลีเอทิลีน โดยแบบจำลอง C และ D สามารถรับแรงได้น้อย แต่มีระยะยุบที่มากกว่าแบบจำลอง E และ F มาก เนื่องจากการกำหนดรูปแบบของ Constraint โดยผลที่ได้จากการจำลองการกระแทก Constraint แบบ Fixed ของ Node บนขอบรอบชิ้นงาน (แบบจำลอง C และ D) มีระยะยุบมากกว่า Constraint แบบ Fixed ที่ผิวด้านหลังของฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย (แบบจำลอง E และ F)

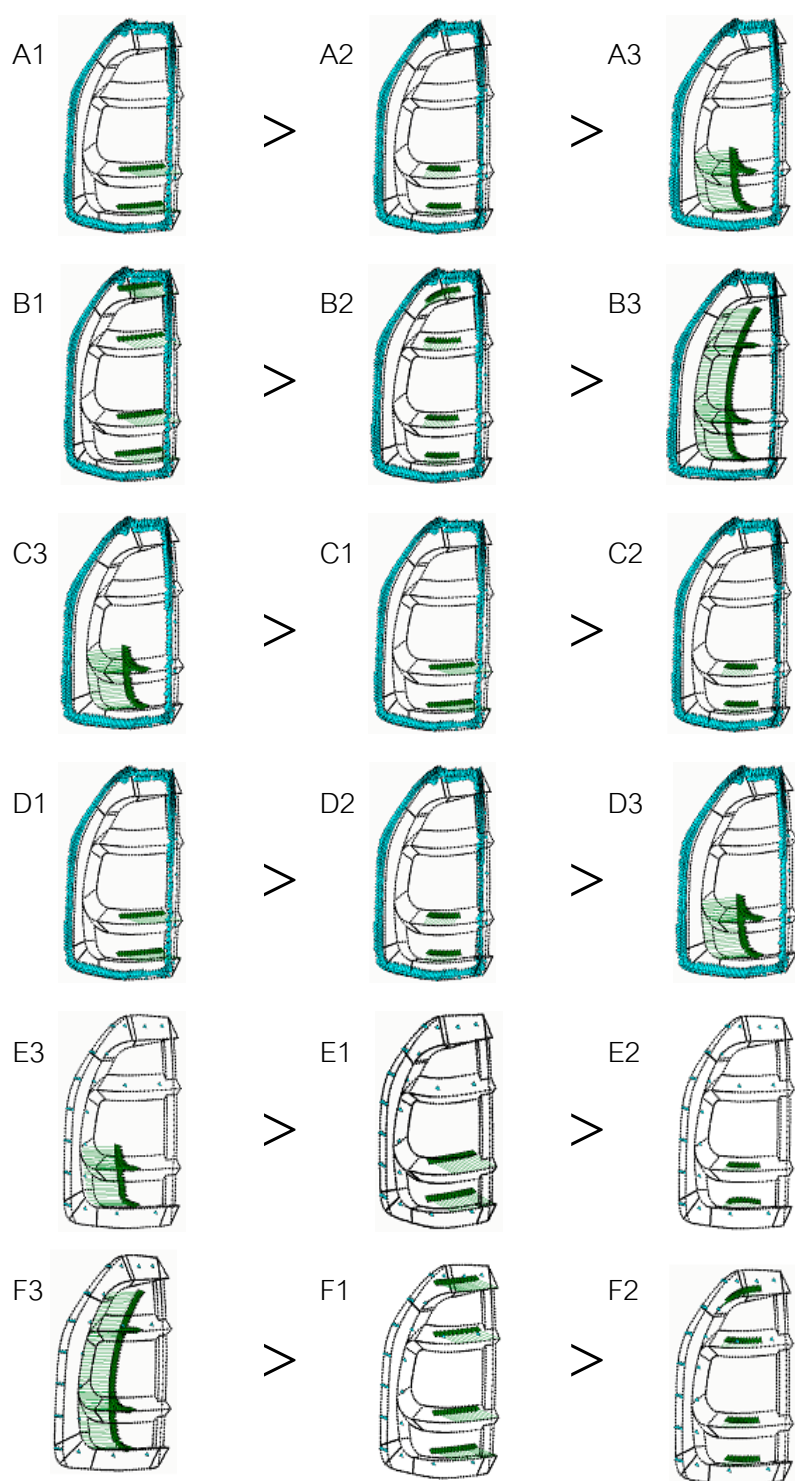
การกระแทกที่ด้านหน้าของฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายที่ทำจากวัสดุ ABS (แบบจำลอง A1 และ B1) จะเป็นตำแหน่งที่รับแรงกระแทกได้มากที่สุด และการกระแทกที่ด้านข้างของชิ้นงาน (แบบจำลอง A3 และ B3) จะเป็นตำแหน่งที่รับแรงกระแทกได้น้อยที่สุด

การกระแทกที่ด้านข้างของฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายที่ทำจากวัสดุโพลีเอทิลีน (แบบจำลอง C3, E3 และ F3) จะเป็นตำแหน่งที่รับแรงกระแทกได้มากที่สุด และการกระแทกที่มุมของชิ้นงาน (แบบจำลอง C2, E2 และ F2) จะเป็นตำแหน่งที่รับแรงกระแทกได้น้อยที่สุด ยกเว้นแบบจำลอง D โดยการกระแทกที่ด้านหน้าของชิ้นงาน (แบบจำลอง D1) จะเป็นตำแหน่งที่รับแรงกระแทกได้มากที่สุด และการกระแทกที่ด้านข้างของชิ้นงาน (แบบจำลอง D3) จะเป็นตำแหน่งที่รับแรงกระแทกได้น้อยที่สุด

ภาพที่ 110 เปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกระแทกแบบต่างๆ โดยเรียงจากตำแหน่งที่สามารถรับแรงกระแทกได้มากที่สุดไปหาตำแหน่งที่รับแรงกระแทกน้อยที่สุด (จากซ้ายไปขวา) ของแต่ละแบบจำลอง

ตารางที่ 18 สรุปผลของการจำลองการกระแทกของแบบจำลองการกระแทกทั้งหมด

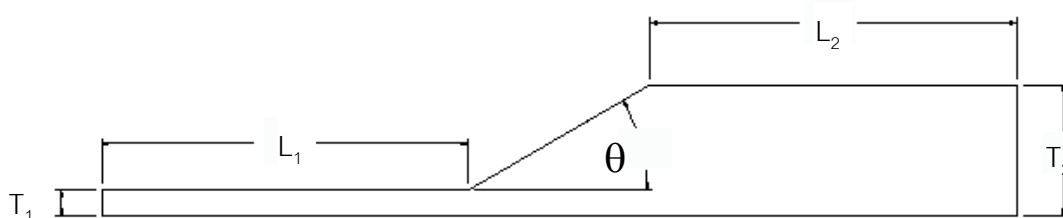
แบบจำลอง	วัสดุ	ตำแหน่ง Constraint	แบบจำลอง	แรง (N)	ระยะ ยุบ (mm)	แบบจำลอง	แรง (N)	ระยะ ยุบ (mm)
A	ABS	ขอบ ที่นั่ง	A1	530.20	15.78	A2	411.78	11.11
			A3	137.00	9.025			
B	ABS	ขอบ ที่นั่ง	B1	1,191.55	17.45	B2	890.42	11.34
			B3	435.80	10.17			
C	PU	ขอบ ที่นั่ง	C1	8,661.03	7.17	C2	7,052.15	8.678
			C3	9,397.78	13.38			
D	PU	ขอบ ที่นั่ง	D1	17,322.05	7.169	D2	14,144.30	8.678
			D3	12,198.30	13.75			
E	PU	ผิวหลัง ที่นั่ง	E1	9,213.66	1.205	E2	7,131.15	1.874
			E3	11,206.67	1.032			
F	PU	ผิวหลัง ที่นั่ง	F1	18,427.32	1.205	F2	14,262.30	1.874
			F3	22,413.38	1.032			



ภาพที่ 110 เปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกระแทกแบบต่างๆ โดยเรียงจากตำแหน่งที่สามารถรับแรงกระแทกได้มากที่สุดไปหาตำแหน่งที่รับแรงกระแทกน้อยที่สุด (จากซ้ายไปขวา) ของแต่ละแบบจำลอง

3. การจำลองการไหลของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์เมื่อมีการเปลี่ยนความหนาของผนัง

ชิ้นงานที่มีความหนาผนังไม่เท่ากัน มีผลต่อประสิทธิภาพของการไหลของพลาสติกในแม่พิมพ์ ดังนั้น ผลกระทบดังกล่าวที่เกิดขึ้นในกระบวนการ TIM ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับการผลิตด้วยกระบวนการ RIM (ใช้วัสดุเป็นโพลียูรีเทน) โดยภาพที่ 111 แสดงตัวแปรของผนัง โดยมีมุมของการเปลี่ยนความหนา หรือ ความชัน (θ) อัตราส่วนความหนา (T_2/T_1) ระยะของช่วงก่อนเปลี่ยนความหนา (L_1) และระยะหลังช่วงเปลี่ยนความหนา (L_2) พลาสติกที่ใช้เปรียบเทียบในกระบวนการ TIM ใช้เป็นโพลีโพรพิลีน ตารางที่ 19 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีนที่ใช้



ภาพที่ 111 ชิ้นงานที่ใช้ในการจำลองการไหล

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน

Material Data:	โพลียูรีเทน	โพลีโพรพิลีน	
Specific Gravity	1.1	0.92888	g/ cm ³
Density	1.1	0.92888	g/ cm ³
Viscosity at 25 °C	875	-	MPa.s
Hardness	75.5	76.4	Shore D
Process Temperature	30 - 120	120 - 291	°C

เงื่อนไขการจำลองการไหลของพลาสติกได้ให้เวลาในการฉีด เท่ากับ 1 วินาที $L_1 = L_2 = 70$ มิลลิเมตร กว้าง 100 มิลลิเมตร และหนา (T_1) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และเปลี่ยนอัตราส่วนของความหนา (T_2/T_1) เป็น 2, 3, 5, 10 และ 20 เท่า และให้มุม θ เท่ากับ 30°, 45°, 60° และ 90° ในทุกเงื่อนไขของ T_2/T_1 ตารางที่ 20 เปรียบเทียบเงื่อนไขการฉีดโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน

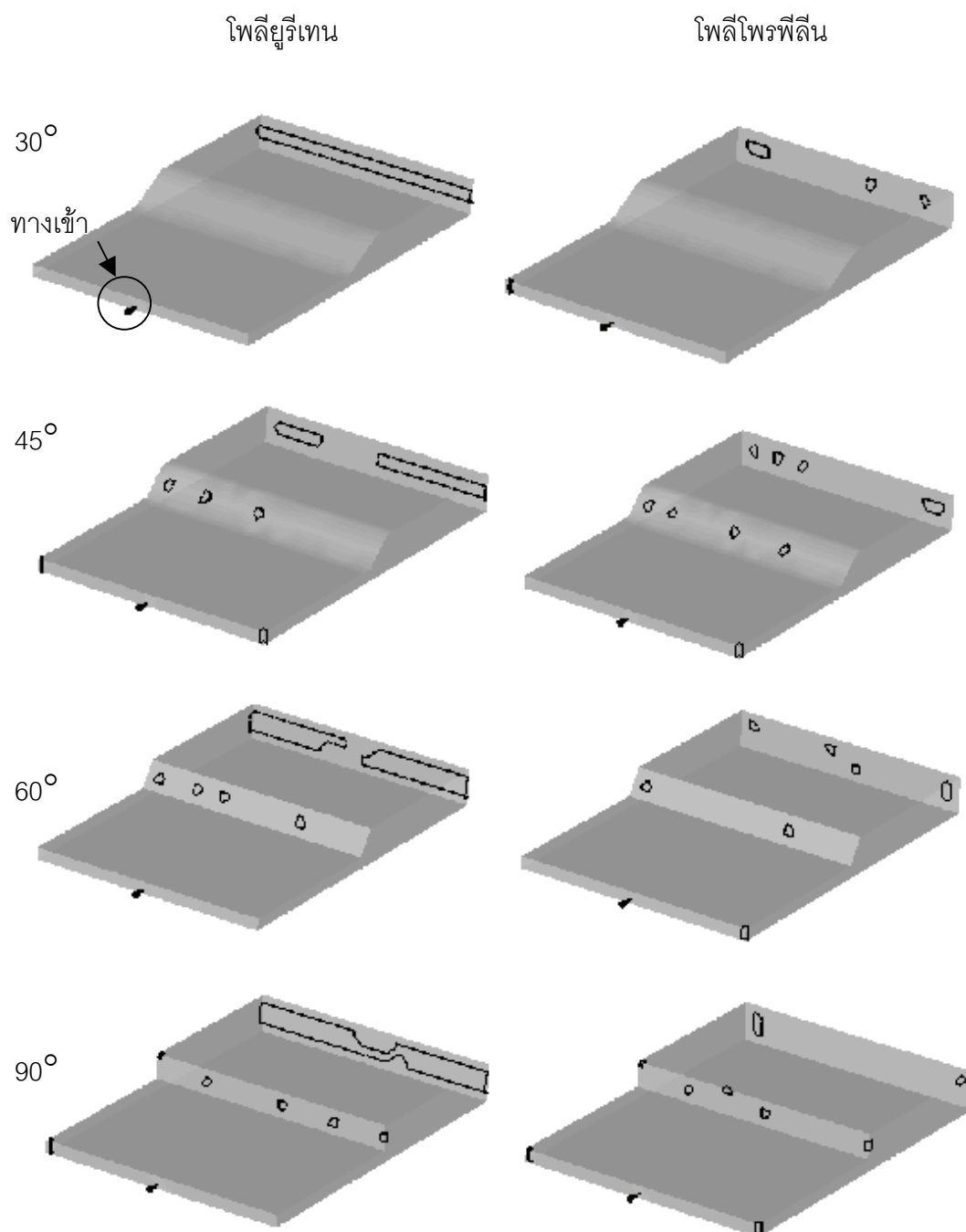
ตารางที่ 20 เปรียบเทียบเงื่อนไขการฉีดโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน

Process parameters:	โพลียูรีเทน	โพลีโพรพิลีน	
Process of Plastic Injection	RIM	TIM	
Fill time	1	1	s
Curing time	30	-	s
Velocity/pressure switch-over by % volume	100	100	%
Velocity/pressure switch-over by injection pressure	15	100	MPa.
Mold temperature	70	40	°C
Ambient temperature	25	25	°C

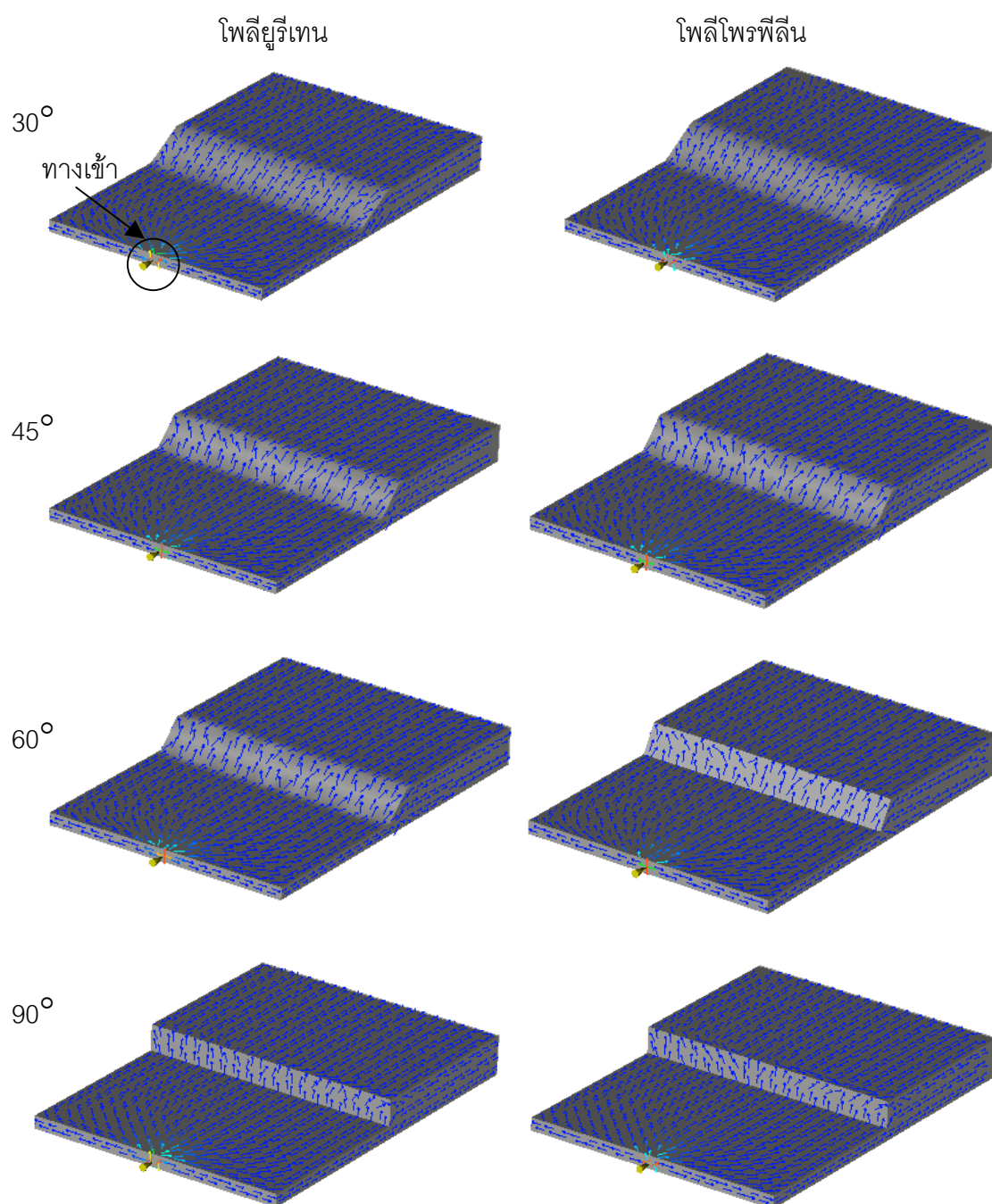
ผลการวิเคราะห์การไหลของพลาสติกได้แก่ อัตราการไหล (Flow Rate, cm^3/sec) ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (Average Velocity, cm/sec) อุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการฉีด (Bulk Temperature, $^{\circ}\text{C}$) ทิศทางการไหล และตำแหน่งการเกิด Air Trap โดยภาพที่ 112 แสดงตัวอย่างของผลจำลอง และเปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap ในชิ้นงาน ของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เมื่อ $T_2/T_1 = 3$ และมีมุม θ เท่ากับ 30° , 45° , 60° และ 90° ภาพที่ 113 แสดงตัวอย่างของผลการจำลอง และเปรียบเทียบของทิศทางการไหลของ โพลียูรีเทน และโพลีโพรพิลีน โดยภาคผนวกที่ 1 แสดงภาพของผลการจำลองทั้งสองกรณีนี้ทั้งหมด

ตารางที่ 21 และ 22 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของอัตราส่วนความหนา ได้แก่ อัตราการไหล (cm^3/sec) ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (cm/sec) อุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการฉีด ($^{\circ}\text{C}$) ขนาดของ Air Trap ที่เกิด ได้จำแนกขนาดเป็น 3 กลุ่ม คือ S, M และ L ซึ่งได้กำหนดไว้ในวิธีการ หัวข้อที่ 4 การจำลองการไหลของโพลียูรีเทน โดยใช้ CAE

ภาพที่ 114 ถึง 116 แสดงกราฟจากตารางที่ 21 และ 22 ซึ่งได้แก่ ปริมาตร ความเร็วการไหลสูงสุด และอุณหภูมิสูงสุด ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่า T_2/T_1 และมุม θ ของโพลี-ยูรีเทนและโพลีโพรพิลีน



ภาพที่ 112 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 3 และความชัน (θ) เท่ากับ 30° , 45° , 60° และ 90° จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



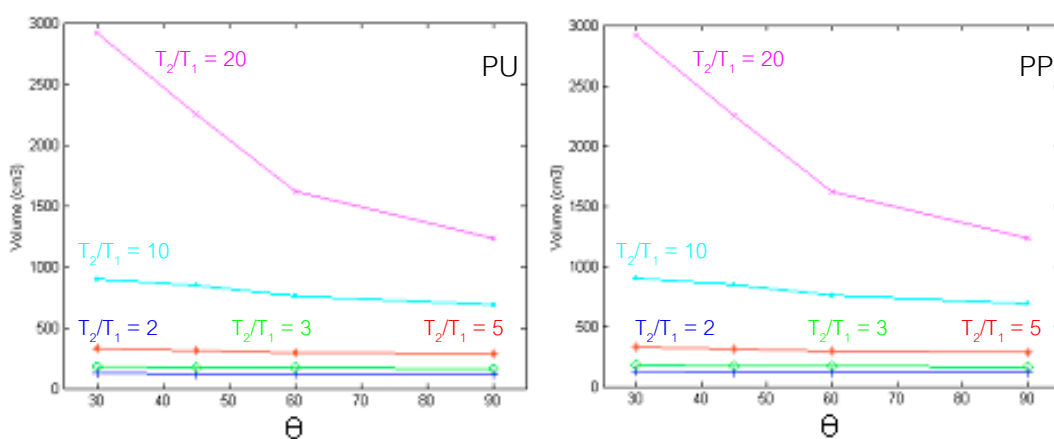
ภาพที่ 113 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา)
 เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 3 และความชัน (θ) เท่ากับ 30° , 45° , 60° และ 90°
 จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และ
 ความกว้าง = 100 มิลลิเมตร

ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีเอธีลีนเหลวในแม่พิมพ์ เมื่อเวลาในการฉีด เท่ากับ 1 วินาที

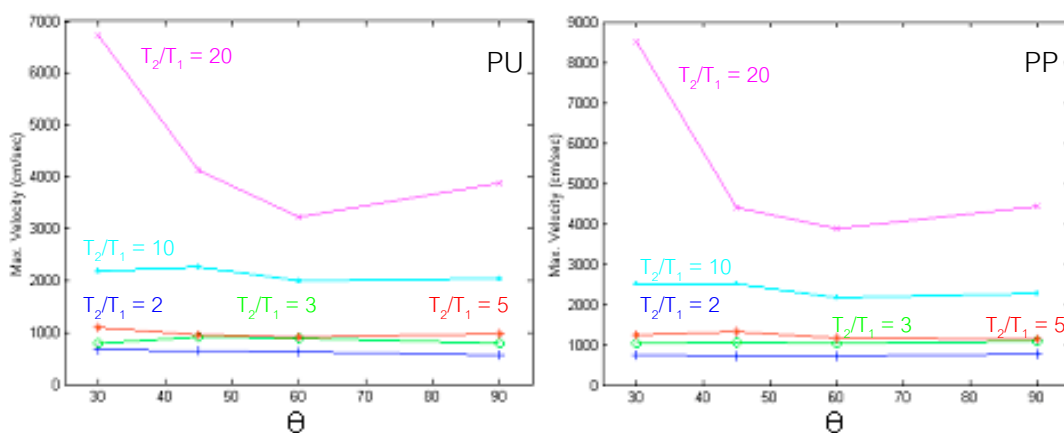
T_2/T_1	θ	Volume	Flow	Velocity	Bulk	จำนวน Air Trap		
			Rate		Temperature	ขนาด Air Trap		
		(cm ³)	(cm ³ /sec)	(cm/sec)	(°C)	S	M	L
2	30°	124.02	124.02	1.62-655.6	30-33.54	0	0	2
2	45°	120.15	120.15	1.56-635.2	30-33.54	1	0	2
2	60°	119.02	119.02	1.53-629.2	30-33.48	3	0	2
2	90°	117.65	117.65	1.035-559.8	30-33.56	9	0	2
3	30°	182.16	182.16	2.413-780.4	30-33.07	0	0	1
3	45°	173.42	173.42	0.1742-916.8	30-33.09	5	1	1
3	60°	170.11	170.11	0.192-899.3	30-33.34	4	0	2
3	90°	166.35	166.35	0.1818-791.3	30-33.24	6	0	1
5	30°	329.26	329.26	2.179-1099.3	30-32.13	2	0	1
5	45°	311.90	311.90	0.821-945.1	30-32.12	5	0	2
5	60°	297.37	297.37	0.508-908.2	30-32.40	4	0	2
5	90°	282.09	282.09	0.042-981.3	30.32.45	4	0	1
10	30°	898.08	898.08	2.712-2188.7	30-30.93	1	0	1
10	45°	845.75	845.75	0.1068-2264.5	30-30.93	3	0	1
10	60°	762.50	762.50	1.008-2003.2	30-31.02	3	0	1
10	90°	686.52	686.52	0.088-2028.6	30-31.26	7	0	1
20	30°	2913.35	2913.35	0.679-6722.5	30-30.29	2	0	1
20	45°	2246.78	2246.78	0.198-4125.1	30-31.56	1	1	0
20	60°	1622.21	1622.21	0.001-3233.9	30-32.10	9	0	1
20	90°	1230.71	1230.71	0.006-3880.4	30-32.66	9	0	1

ตารางที่ 22 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีโพรพีลีนเหลวในแม่พิมพ์ เมื่อเวลาในการฉีด เท่ากับ 1 วินาที

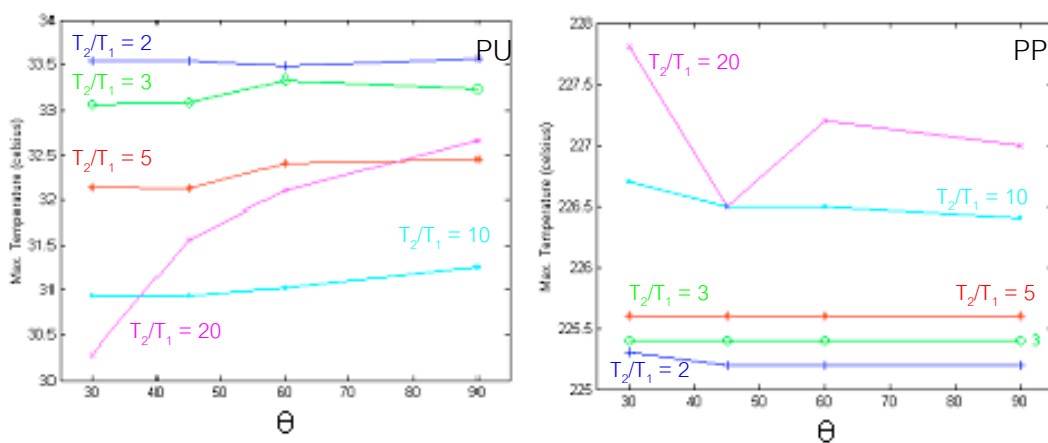
T_2/T_1	θ	Volume (cm ³)	Flow Rate (cm ³ /sec)	Velocity (cm/sec)	Bulk Temperature (°C)	จำนวน Air Trap		
						ขนาด Air Trap		
						S	M	L
2	30°	124.02	124.02	0.283-747.1	223.6-225.3	9	1	0
2	45°	120.15	120.15	0.281-730.1	223.6-225.2	6	1	0
2	60°	119.02	119.02	0.281-723.2	223.6-225.2	6	1	0
2	90°	117.65	117.65	0.249-777.7	223.6-225.2	12	1	0
3	30°	182.16	182.16	0.360-1047.9	223.7-225.4	3	1	0
3	45°	173.42	173.42	0.061-1054.7	223.5-225.4	8	1	0
3	60°	170.11	170.11	0.056-1034.6	223.5-225.4	7	0	0
3	90°	166.35	166.35	0.066-1100.4	223.6-225.4	8	1	0
5	30°	329.26	329.26	0.555-1260.2	223.6-225.6	3	0	0
5	45°	311.90	311.90	0.466-1328.8	223.6-225.6	6	1	0
5	60°	297.37	297.37	0.152-1173.8	223.6-225.6	8	0	0
5	90°	282.09	282.09	0.017-1132.4	223.6-225.6	7	1	0
10	30°	898.08	898.08	0.321-2510.8	224.4-226.7	5	0	0
10	45°	845.75	845.75	0.310-2516.9	224.3-226.5	5	0	0
10	60°	762.50	762.50	0.208-2162.6	223.8-226.5	5	0	0
10	90°	686.52	686.52	0.03-2273.3	223.9-226.4	6	0	0
20	30°	2913.35	2913.35	1.335-8504.4	225.1-227.8	3	1	0
20	45°	2246.78	2246.78	0.344-4412.9	224.3-226.5	6	0	0
20	60°	1622.21	1622.21	0.013-3881.8	224.4-227.2	12	0	0
20	90°	1230.71	1230.71	0.001-4442.9	224.2-227.0	12	0	0



ภาพที่ 114 ปริมาตรของชิ้นงานเทียบกับมุม θ ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา)



ภาพที่ 115 ความเร็วการไหลสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับมุม θ ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา)



ภาพที่ 116 อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับมุม θ ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา)

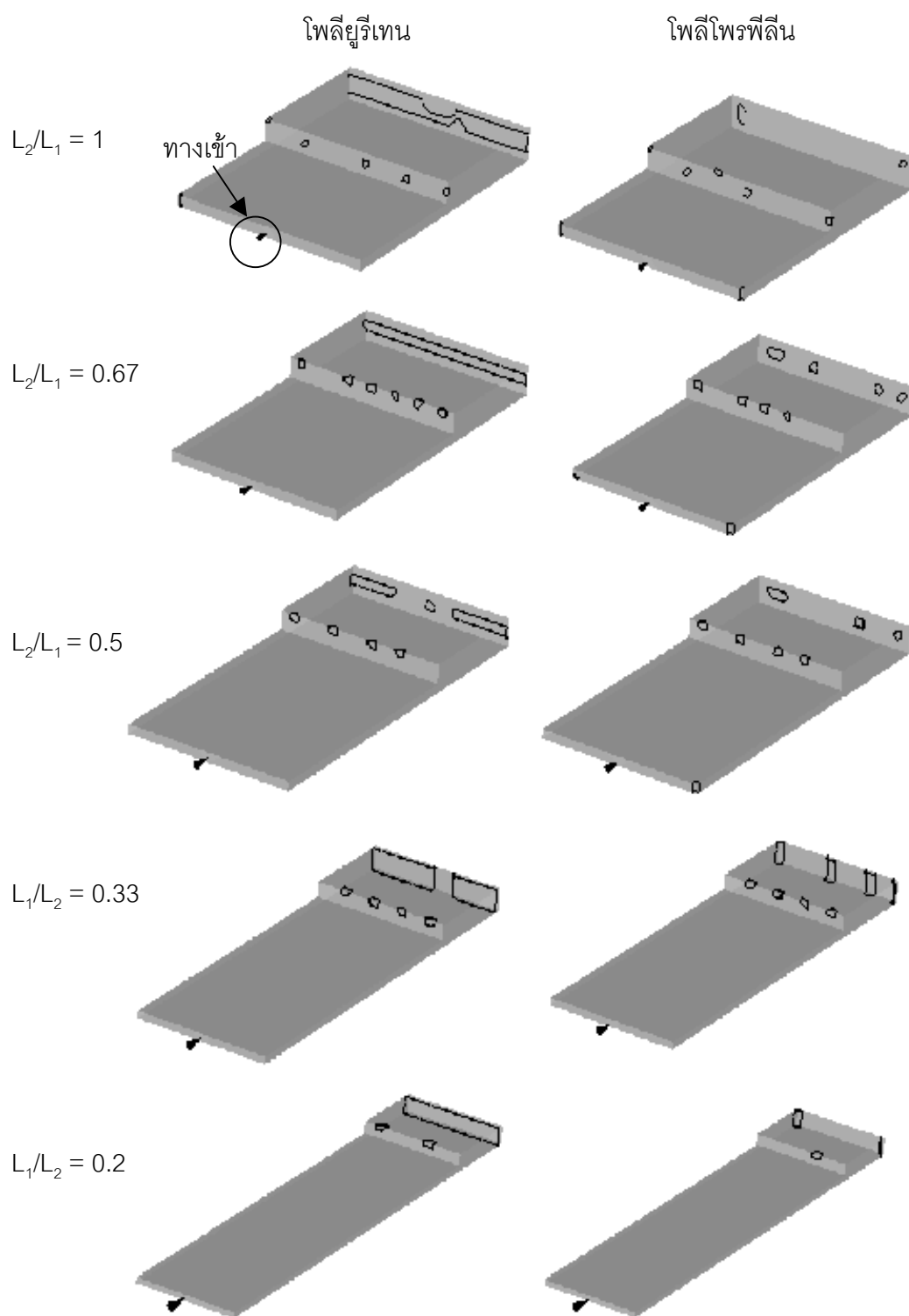
กระบวนการ RIM (โฟลียูรีเทน) จะมีการเกิด Air Trap ขนาดใหญ่อยู่บริเวณปลายสุด และเกิด Air Trap ขนาดเล็กบริเวณขอบของจุดเปลี่ยนความหนาของชิ้นงาน แต่กระบวนการ TIM (โพลีโพรพีลีน) มี Air Trap ขนาดเล็กเท่านั้น แต่มีจำนวนมากกว่ากระบวนการ RIM

จากตารางที่ 21 และ 22 เมื่อเพิ่มมุม θ ปริมาตรของชิ้นงาน และอัตราการไหลจะลดลง อุณหภูมิของชิ้นงานไม่แตกต่างกันมาก และแนวโน้มการเกิด Air Trap จะเพิ่มมากขึ้น โดยความเร็วและอุณหภูมิของชิ้นงานโพลีโพรพีลีนจะมีค่าสูงกว่าโฟลียูรีเทน

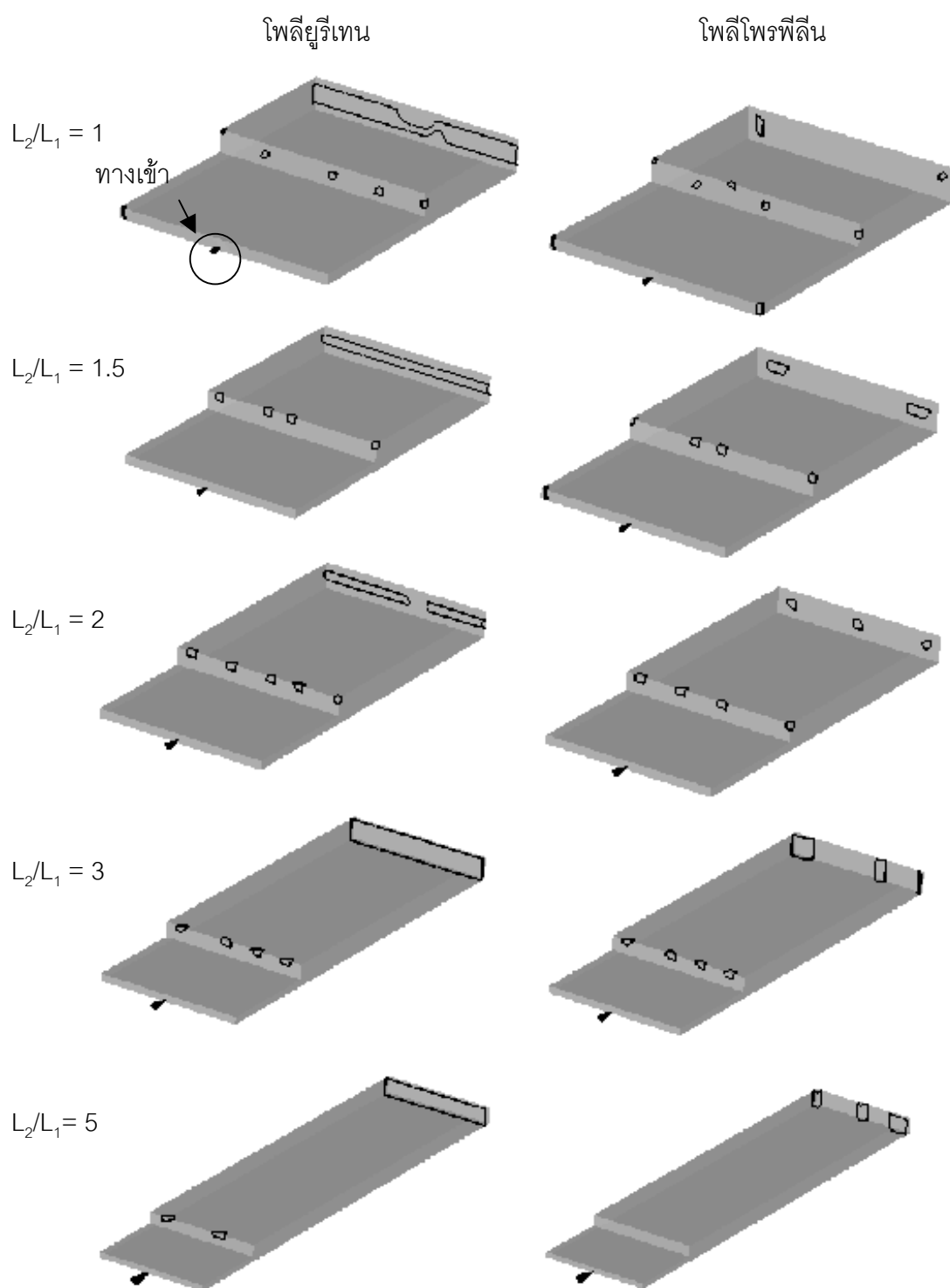
ทิศทางการไหลของโฟลียูรีเทนและโพลีโพรพีลีนมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยมุมของการเปลี่ยนความหนาและอัตราส่วนความหนาจะมีผลต่อความเป็นระเบียบของการไหลของพลาสติก โดยอัตราส่วนความหนา (T_2/T_1) และ มุม (θ) เพิ่มขึ้นการไหลของพลาสติกจะมีความเป็นระเบียบน้อยลง

ภาพที่ 117 ถึง 120 เปรียบเทียบการไหลของโฟลียูรีเทนและโพลีโพรพีลีนของชิ้นงานที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ความกว้าง 100 มิลลิเมตร มุม θ 90° ความยาว L_1 ที่ขนาด เท่ากับ 70, 105, 140, 210 และ 350 มิลลิเมตร (หรือ อัตราส่วน L_2/L_1 เท่ากับ 1, 0.67, 0.5, 0.33 และ 0.2 ตามลำดับ) ภาพที่ 117 ถึง 118 แสดงผลเปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap ภาพที่ 119 และ 120 แสดงผลเปรียบเทียบทิศทางการไหลของโฟลียูรีเทนและโพลีโพรพีลีน

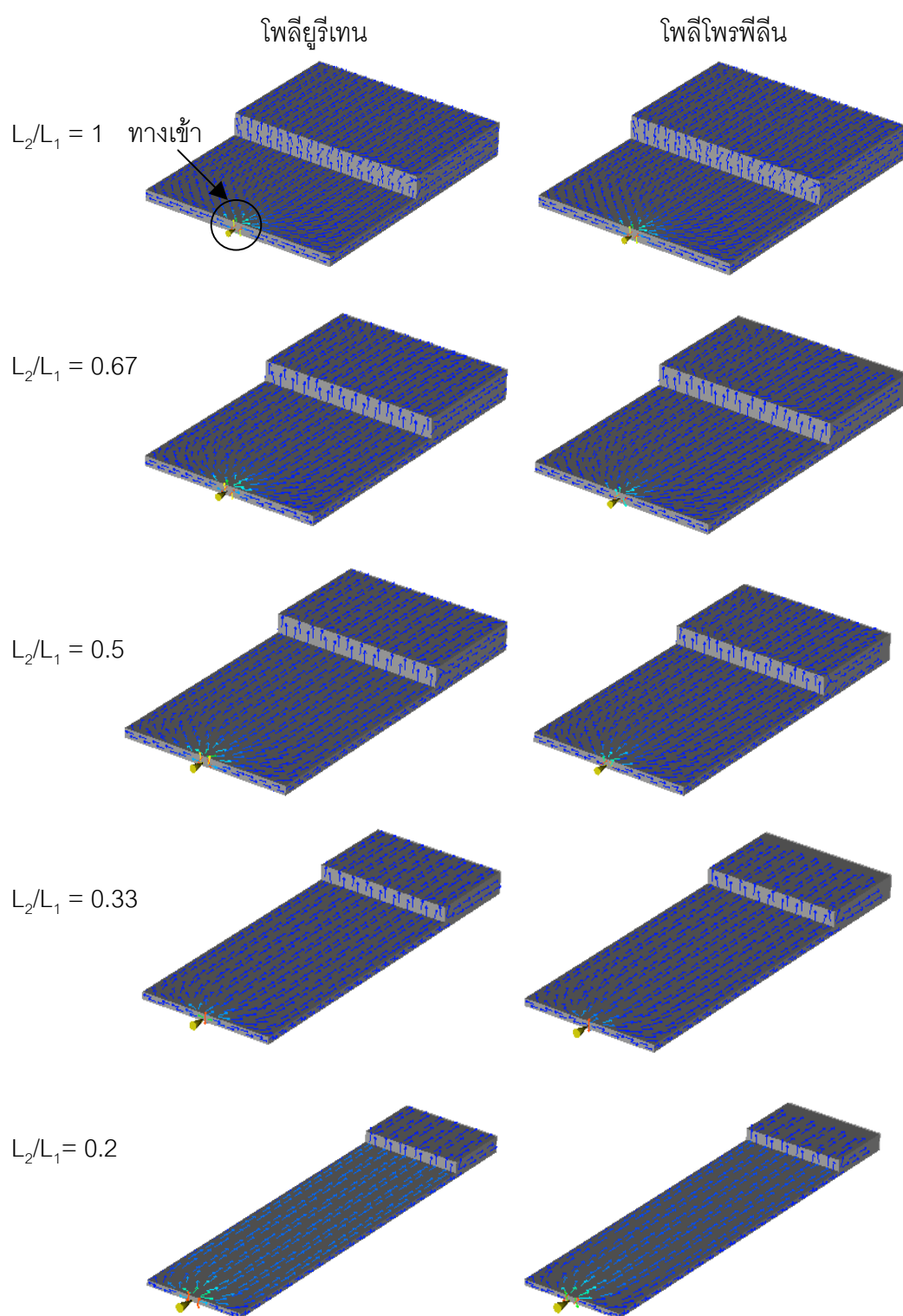
จากผลที่แสดงในภาพที่ 117 ถึง 120 เพิ่ม L_1 มีผลให้จำนวน Air Trap บริเวณขอบของจุดเปลี่ยนความหนาลดน้อยลง แต่ขนาดของ Air Trap ที่ตำแหน่งปลายสุดมีขนาดใหญ่ขึ้น โดย Air Trap ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ RIM มีขนาดใหญ่กว่า Air Trap ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ TIM ทิศทางการไหลของโฟลียูรีเทนและโพลีโพรพีลีน ที่ระยะของช่วงก่อน (L_1) และหลังการเปลี่ยนความหนา (L_2) แสดงลักษณะการไหลที่เป็นระเบียบ โดยชิ้นงานที่มีสัดส่วน L_1/L_2 มากจะทำให้ทิศทางการไหลของพลาสติกเป็นระเบียบมากขึ้นกว่าชิ้นงานที่มี L_1/L_2 น้อย



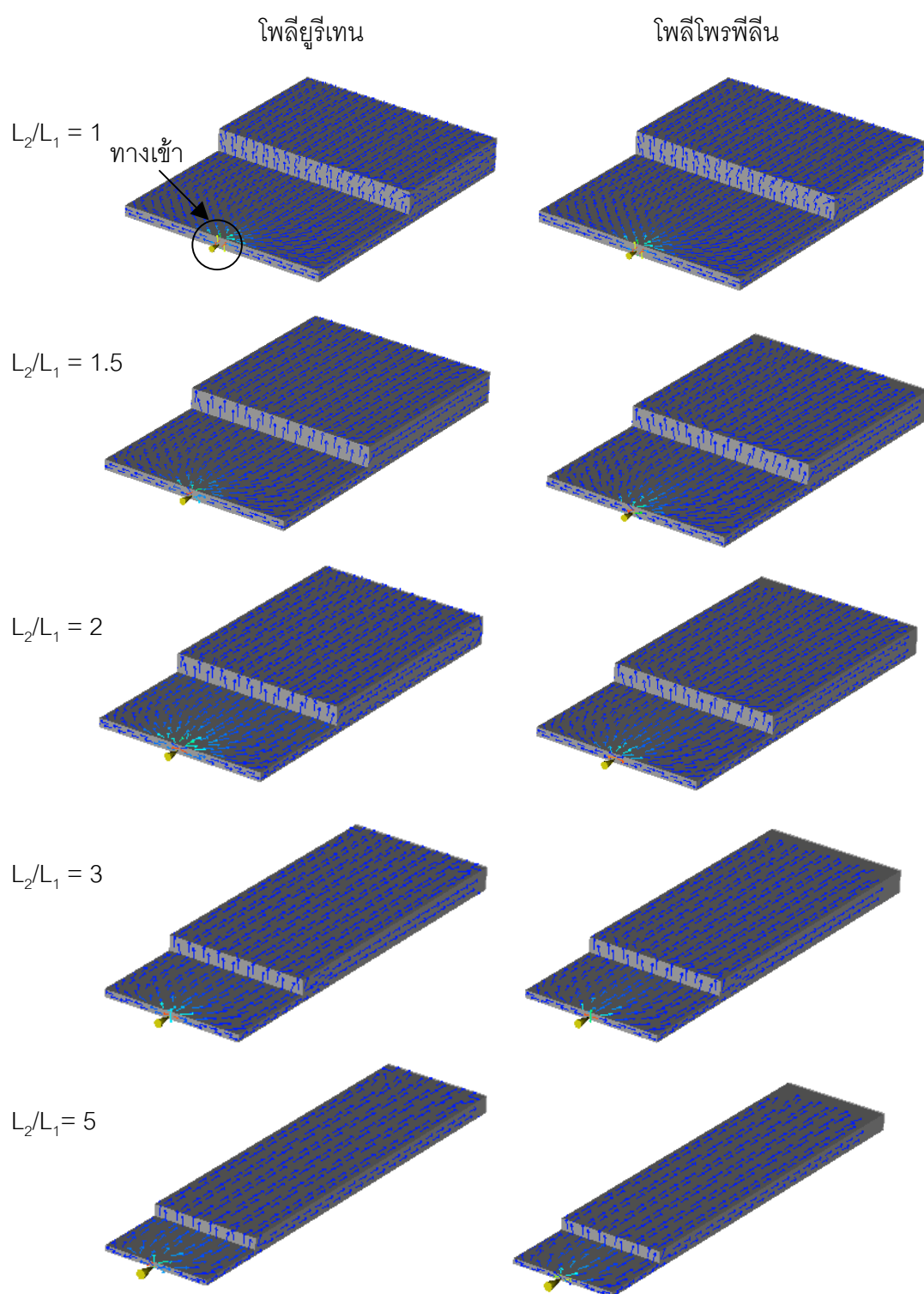
ภาพที่ 117 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพสิยูรีเทน (ซ้าย) และโพสิพรพีสัน (ขวา) เมื่อความชัน (θ) เท่ากับ 90° และ L_2/L_1 เท่ากับ 1, 0.67, 0.5, 0.33 และ 0.2 จากแถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



ภาพที่ 118 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อความชัน (θ) เท่ากับ 90° และ L_2/L_1 เท่ากับ 1, 1.5, 2, 3 และ 5 จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



ภาพที่ 119 การไหลของคลื่นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีพรพีลีน (ขวา) เมื่อความชัน (θ) เท่ากับ 90° และ L_2/L_1 เท่ากับ 1, 0.67, 0.5, 0.33 และ 0.2 จากแถบบนมาล่างตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร

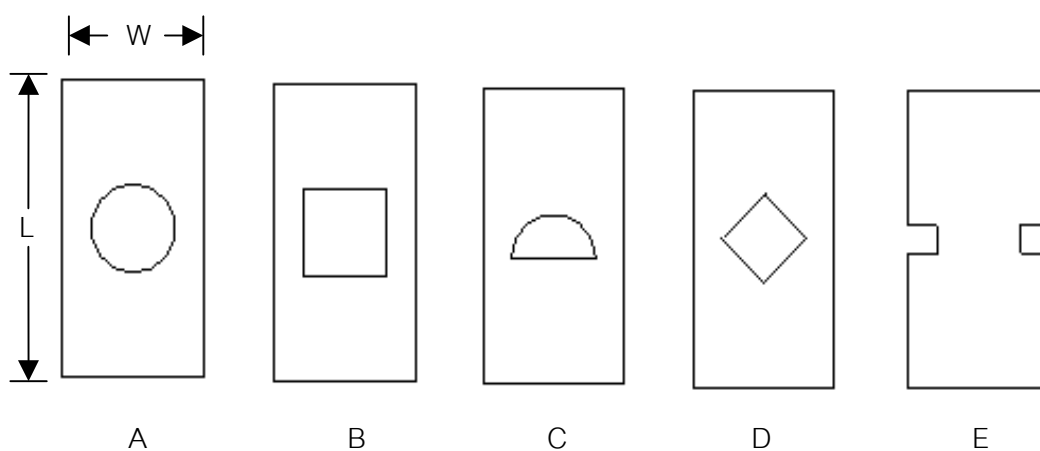


ภาพที่ 120 การไหลของคลื่นงานโพลีเอทรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อความชัน (θ) เท่ากับ 90° และ L_2/L_1 เท่ากับ 1, 1.5, 2, 3 และ 5 จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร

4. การไหลของพลาสติกเหลวผ่านแกนกลางในแม่พิมพ์

การไหลของพลาสติกเหลวผ่านแกนกลาง หรือ สิ่งกีดขวาง มีผลต่อประสิทธิภาพการไหลของพลาสติกเหลว เช่นการเกิด Air Trap และ Weld Line โดยแกนกลาง หรือ สิ่งกีดขวางดังกล่าว คือ รูของชิ้นงานที่ผลิต

การเปรียบเทียบความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการไหลดังกล่าวในวัสดุโพลีเอทิลีนและโพลิโพรพิลีน ได้ดำเนินการโดยกำหนดเงื่อนไขการจำลองการไหลของพลาสติกในชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามแสดงในภาพที่ 121 โดยมีแกนเป็นรูแบบวงกลม รูแบบสี่เหลี่ยม รูแบบครึ่งวงกลม รูข้าวหลามตัด และการเจาะร่องด้านข้าง ขนาดของรูที่วิเคราะห์มี 4 ขนาด คือ 20%, 40%, 60% และ 80% ของพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ความยาว W เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และ L ของชิ้นงานที่ศึกษา ได้แก่ 20 และ 40 มิลลิเมตร โดยความหนาเท่ากับ 2 มิลลิเมตร เงื่อนไขการวิเคราะห์ กำหนดให้เวลาในการฉีด เท่ากับ 1 วินาที



ภาพที่ 121 ชิ้นงานจำลองการไหลผ่านแกนกลาง (รู และ Notch ในชิ้นงาน)

การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทิลีนและโพลิโพรพิลีน ประกอบด้วย อัตราการไหล (cm^3/sec) ค่าเฉลี่ยความเร็วการไหล (Average Velocity, cm/sec) อุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการฉีด (Bulk Temperature, $^{\circ}\text{C}$) ทิศทางการไหลของโพลีเอทิลีนและโพลิโพรพิลีน และตำแหน่งการเกิด Air Trap และ Weld Line คุณสมบัติของโพลีเอทิลีนและโพลิโพรพิลีนได้แสดงในตารางที่ 19 เงื่อนไขการฉีดได้สรุปในตารางที่ 20

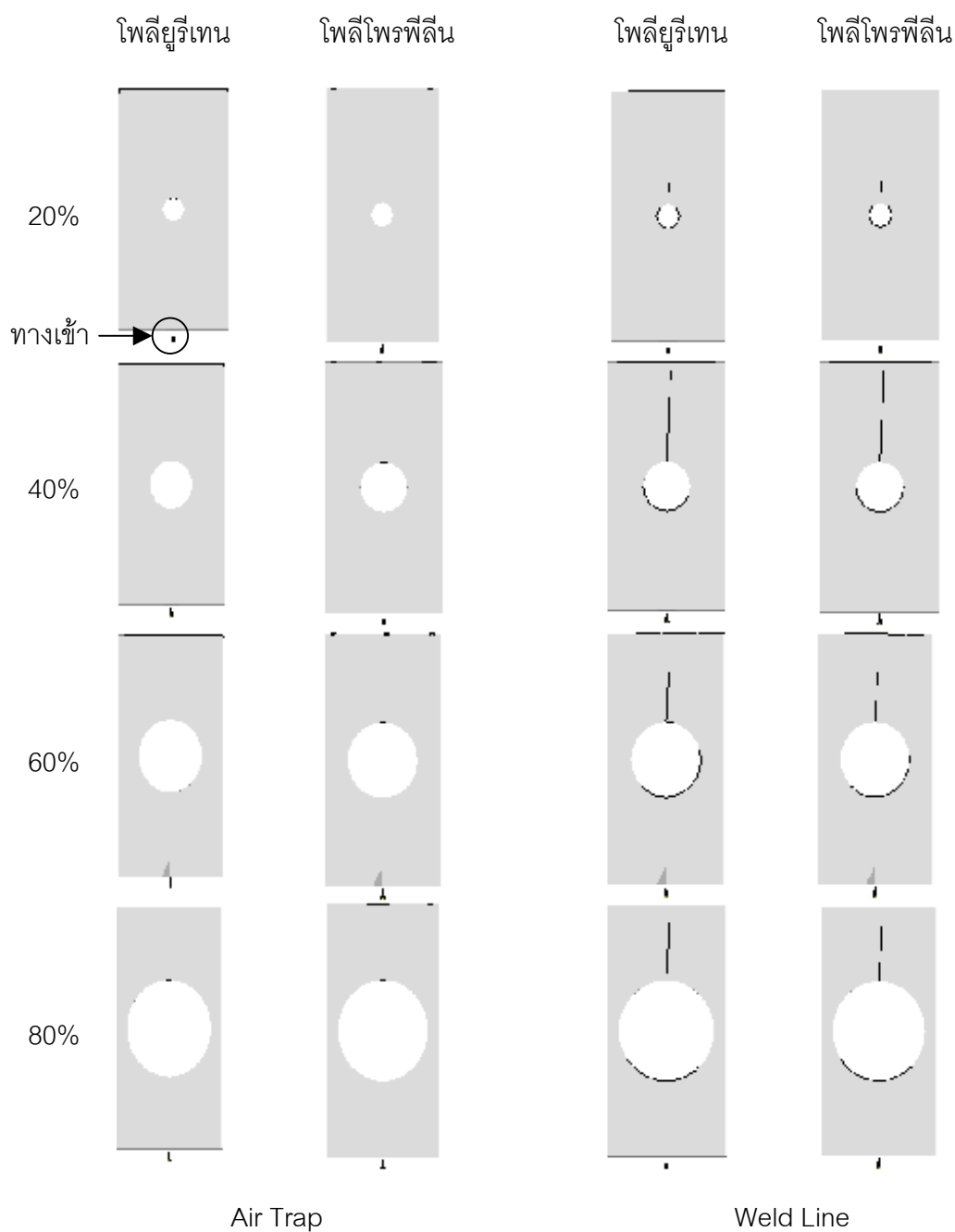
ภาพที่ 122 แสดงตัวอย่างผลการเปรียบเทียบการไหลของโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่านแกนกลางของชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap และ Weld Line ชิ้นงานในภาพนี้มีความ กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 10×20×2 มิลลิเมตร มีแกนกลางเป็น วงกลม (วิวด้านบน) และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80% ภาค ผนวก ข แสดงภาพของผลการเปรียบเทียบนี้ที่เงื่อนไขของแกนกลางแบบต่างๆ ทั้งหมด

ตารางที่ 23 ถึง 26 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีนเหลว ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ของทั้งสองตารางประกอบด้วย อัตราการไหล (cm^3/sec) ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (cm/sec) อุณหภูมิของชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการฉีด ($^{\circ}\text{C}$) และ จำนวน Air Trap โดยตารางที่ 23 และ 24 สำหรับชิ้นงานมีความยาว L เท่ากับ 20 มิลลิเมตร และตารางที่ 25 และ 26 เมื่อ L เท่ากับ 40 มิลลิเมตร (ความกว้างและความหนาของชิ้นงาน เท่า กับ 10 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ)

ภาพที่ 123 ถึง 128 แสดงกราฟของอัตราการไหล ความเร็วการไหลสูงสุด และอุณหภูมิ สูงสุด ของชิ้นงานขนาด 10×20×2 มิลลิเมตร (ภาพที่ 123 ถึง 125) และ 10×40×2 มิลลิเมตร (ภาพที่ 126 ถึง 128) ผ่านพื้นที่หน้าตัดขนาดต่างๆ ของโพลีเอทิลีนและ โพลีโพรพิลีน

ภาพที่ 129 แสดงตัวอย่างผลการเปรียบเทียบการไหลของโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่านแกนกลางวงกลม (วิวด้านบน) โดยชิ้นงานมีขนาด 10×20×2 มิลลิเมตร และพื้นที่ หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 40% และ 60% ภาคผนวก ค แสดงภาพของผลการเปรียบเทียบ นี้ที่เงื่อนไขของแกนกลางแบบต่างๆ ทั้งหมด

จากผลวิเคราะห์ในตารางที่ 23 ถึง 26 เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางเพิ่ม และเมื่อเพิ่ม ความยาวของชิ้นงานขึ้นเป็น 2 เท่า มีผลให้อัตราการไหล และความเร็วสูงสุดของโพลีเอทิลีนและ โพลีโพรพิลีนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง โดยโพลีโพรพิลีนจะมีอัตราการ ไหลใกล้เคียงกับโพลีเอทิลีน แต่ความเร็วสูงสุด และอุณหภูมิจะมีค่ามากกว่า



ภาพที่ 122 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%

ตารางที่ 23 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพลีเอทธิลีนเหลวของชิ้นงานขนาด
10x20x2 มิลลิเมตร

Model	Cross	Flow	Velocity	Bulk	จำนวน Air Trap		
	Sectional	Rate		Temperature	ขนาด Air Trap		
	Area (%)	(cm ³ /sec)	(cm/sec)	(°C)	S	M	L
A	20	0.49	0.314-46.92	30-43.29	1	0	1
A	40	0.48	0.303-44.82	30-43.32	0	0	1
A	60	0.46	0.231-42.77	30-43.30	0	0	1
A	80	0.43	0.167-39.62	30-43.16	1	0	1
B	20	0.49	0.001-46.77	30-43.28	1	0	1
B	40	0.48	0.131-44.61	30-43.13	1	0	1
B	60	0.45	0-42.12	30-43.10	1	0	1
B	80	0.43	0.167-39.62	30-43.16	1	0	1
C	20	0.49	0-46.85	30-43.33	1	0	1
C	40	0.49	0.007-46.73	30-43.20	0	0	1
C	60	0.49	0.002-45.97	30-43.32	1	0	1
C	80	0.47	0.001-44.62	30-43.21	1	0	1
D	20	0.49	0.304-45.79	30-43.17	1	0	1
D	40	0.49	0.311-46.51	30-43.27	1	0	1
D	60	0.48	0.309-45.40	30-43.13	1	0	1
D	80	0.46	0.288-43.54	30-43.54	1	0	1
E	20	0.49	0.291-45.57	30-43.07	0	0	1
E	40	0.49	0.298-44.84	30-43.62	2	0	1
E	60	0.47	0.2891-43.62	30-43.32	3	0	2
E	80	0.45	0.2171-41.53	30-43.60	3	0	2

ตารางที่ 24 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพลีโพรพิลีนเหลวของชิ้นงานขนาด
10x20x2 มิลลิเมตร

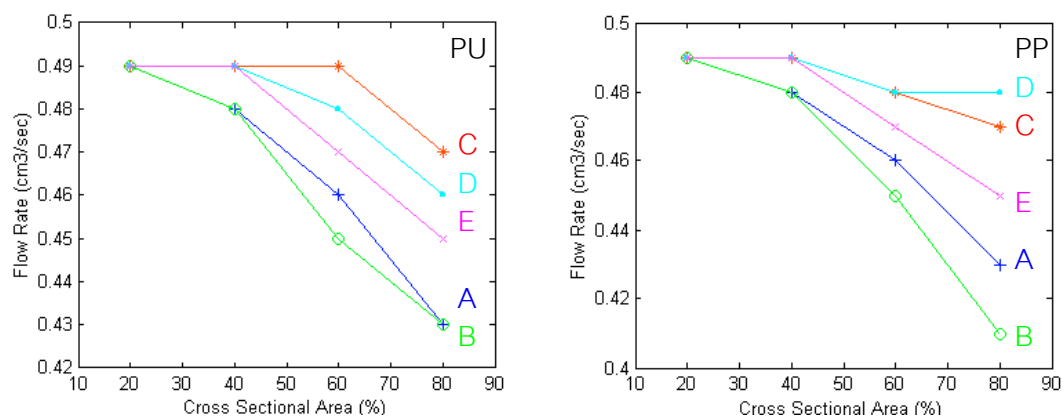
Model	Cross	Flow	Velocity	Bulk	จำนวน Air Trap		
	Sectional	Rate		Temperature	ขนาด Air Trap		
	Area (%)	(cm ³ /sec)	(cm/sec)	(°C)	S	M	L
A	20	0.49	0.007-65.31	203.5-224.8	2	1	0
A	40	0.48	0.008-53.71	203.5-224.8	4	1	0
A	60	0.46	0.032-50.41	203.3-224.8	3	2	0
A	80	0.43	0.010-47.27	203.8-224.8	2	2	0
B	20	0.49	0-62.33	203.6-224.8	3	1	0
B	40	0.48	0.009-53.24	203.3-224.8	2	2	0
B	60	0.45	0-49.83	203.7-224.8	4	0	1
B	80	0.41	0-45.17	204.1-224.8	1	1	0
C	20	0.49	0-63.48	203.7-224.8	2	2	0
C	40	0.49	0-63.14	203.7-224.8	4	1	0
C	60	0.48	0-62.17	203.8-224.8	5	1	0
C	80	0.47	0-60.52	203.9-224.8	2	3	0
D	20	0.49	0.009-55.78	203.7-224.8	1	2	0
D	40	0.49	0.008-62.92	203.7-224.8	2	2	0
D	60	0.48	0.009-61.79	203.6-224.8	3	2	0
D	80	0.48	0.009-59.19	204.0-224.8	5	0	0
E	20	0.49	0.008-51.93	203.6-224.8	4	1	0
E	40	0.49	0.007-50.52	203.7-224.8	4	1	0
E	60	0.47	0.007-52.03	203.7-224.8	4	1	0
E	80	0.45	0.005-47.90	203.8-224.8	6	1	0

ตารางที่ 25 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพสิตรอนเหลวของชิ้นงานขนาด
10x40x2 มิลลิเมตร

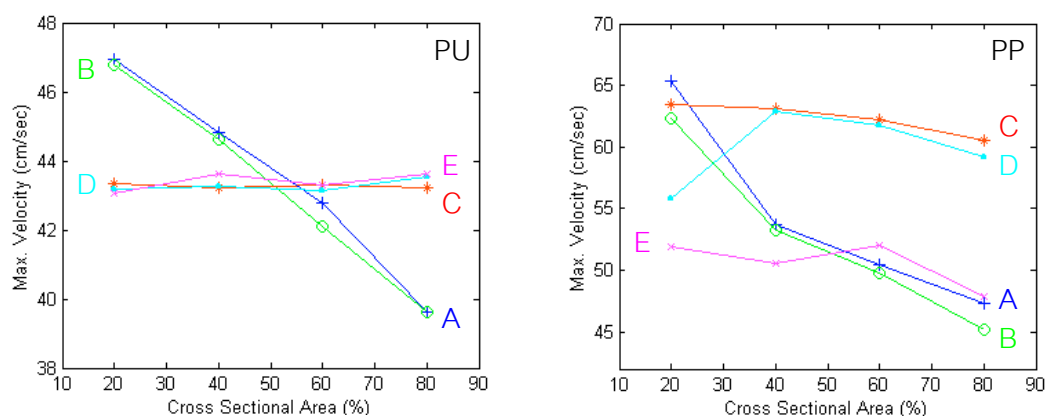
Model	Cross	Flow	Velocity	Bulk	Air Trap		
	Sectional	Rate		Temperature	ขนาด Air Trap		
	Area (%)	(cm ³ /sec)	(cm/sec)	(°C)	S	M	L
A	20	0.95	0.734-45.59	30-43.56	1	0	1
A	40	0.95	0.948-35.42	30-42.73	0	0	1
A	60	0.92	0.909-34.80	30-43.11	0	0	1
A	80	0.89	0.812-33.41	30-42.89	0	0	1
B	20	0.95	0.003-36.05	30-43.01	0	0	1
B	40	0.94	0.001-35.53	30-43.01	0	0	1
B	60	0.91	0.537-34.55	30-42.72	0	0	1
B	80	0.87	0-32.84	30-42.97	0	0	1
C	20	0.95	0.741-40.26	30-43.10	3	0	0
C	40	0.95	0.001-36.06	30-42.86	2	0	0
C	60	0.95	0.4782-35.76	30-43.12	0	0	1
C	80	0.93	0.003-35.21	30-42.88	0	0	1
D	20	0.95	0.942-35.91	30-43.05	0	0	1
D	40	0.95	0.956-35.77	30-43.09	0	0	1
D	60	0.94	0.908-35.26	30-42.92	0	0	1
D	80	0.92	0.780-34.76	30-43.06	0	0	1
E	20	0.95	0.970-35.97	30-42.93	2	0	1
E	40	0.95	0.952-35.48	30-42.74	1	0	1
E	60	0.93	0.915-35.18	30-42.88	2	0	1
E	80	0.91	0.696-34.43	30-42.66	2	0	1

ตารางที่ 26 สรุปผลการวิเคราะห์ของการไหลของโพลีโพรพีลีนเหลวของชิ้นงานขนาด
10 x40x2 มิลลิเมตร

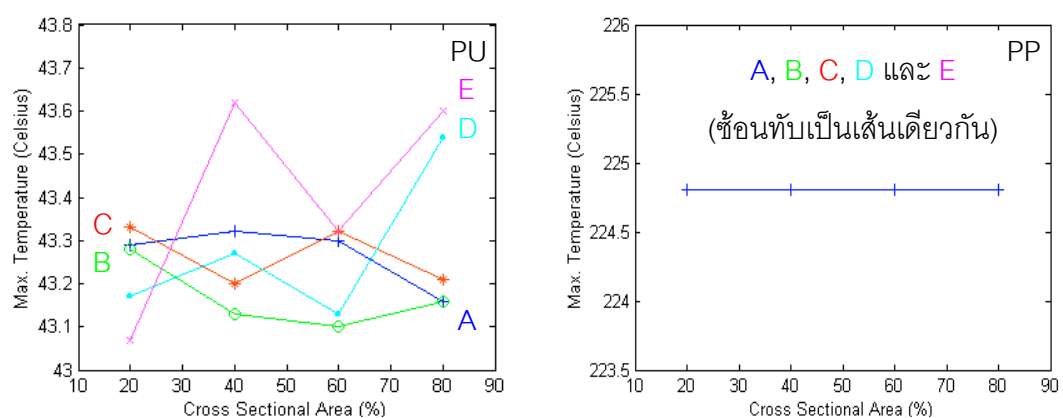
Model	Cross Sectional Area (%)	Flow Rate (cm ³ /sec)	Velocity (cm/sec)	Bulk Temperature (°C)	จำนวน Air Trap		
					ขนาด Air Trap		
					S	M	L
A	20	0.95	0.016-53.69	207.0-224.8	3	0	0
A	40	0.94	0.006-44.58	215.9-224.8	2	0	0
A	60	0.92	0.041-43.52	211.9-224.4	2	1	0
A	80	0.89	0.039-43.31	211.9-224.4	2	1	0
B	20	0.95	0-47.66	211.5-224.5	2	0	0
B	40	0.94	0-45.09	211.9-224.5	2	0	0
B	60	0.91	0.035-45.86	212.4-224.4	2	0	0
B	80	0.87	0-43.57	215.3-224.4	2	1	0
C	20	0.95	0.032-53.49	206.6-224.7	3	0	0
C	40	0.95	0-47.66	211.9-224.5	2	0	0
C	60	0.95	0.003-45.58	212.4—224.5	2	0	0
C	80	0.95	0-45.46	211.5-224.5	3	0	0
D	20	0.95	0.05-45.36	216.0-224.5	2	0	0
D	40	0.95	0.037-47.15	212.5-224.4	2	0	0
D	60	0.94	0.050-44.06	215.8-224.5	2	0	0
D	80	0.92	0.040-45.52	213.7-224.5	2	0	0
E	20	0.95	0.035-48.05	212.5-224.5	4	0	0
E	40	0.95	0.039-44.51	211.6-224.4	4	1	0
E	60	0.93	0.038-44.06	211.0-224.4	4	0	0
E	80	0.91	0.040-43.75	211.5-224.4	4	0	0



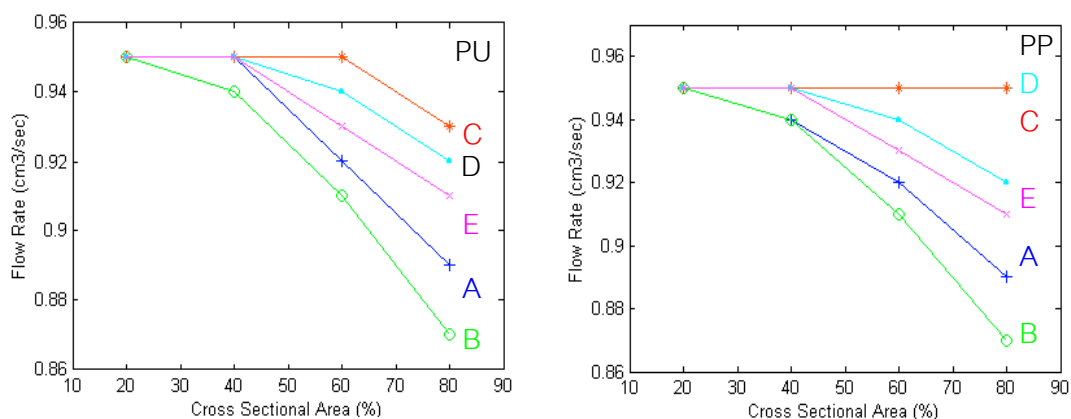
ภาพที่ 123 อัตราการไหลของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x20x2 มิลลิเมตร



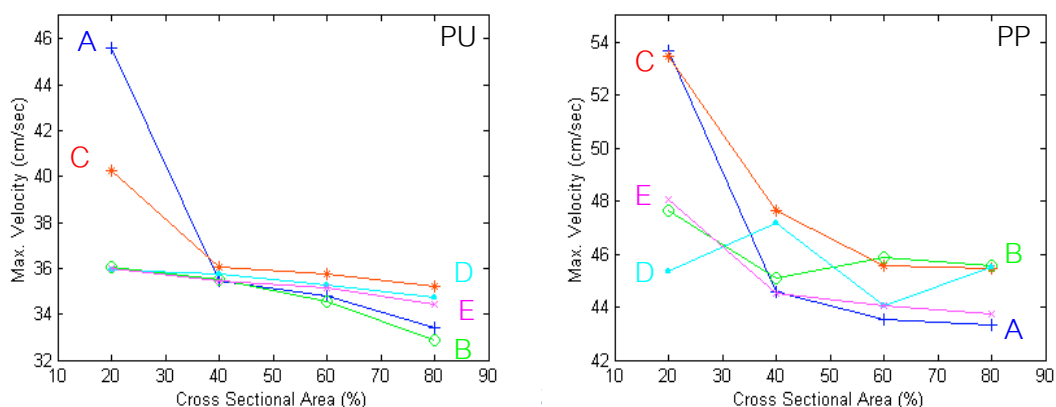
ภาพที่ 124 ความเร็วการไหลสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x20x2 มิลลิเมตร



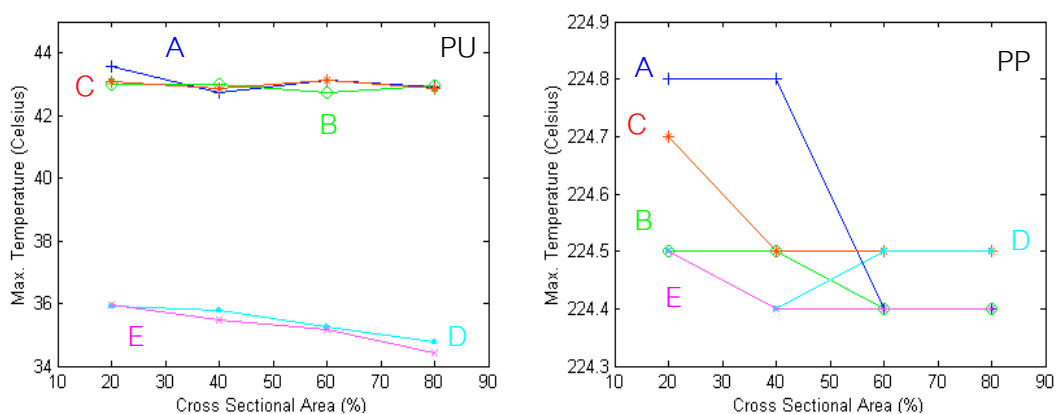
ภาพที่ 125 อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x20x2 มิลลิเมตร



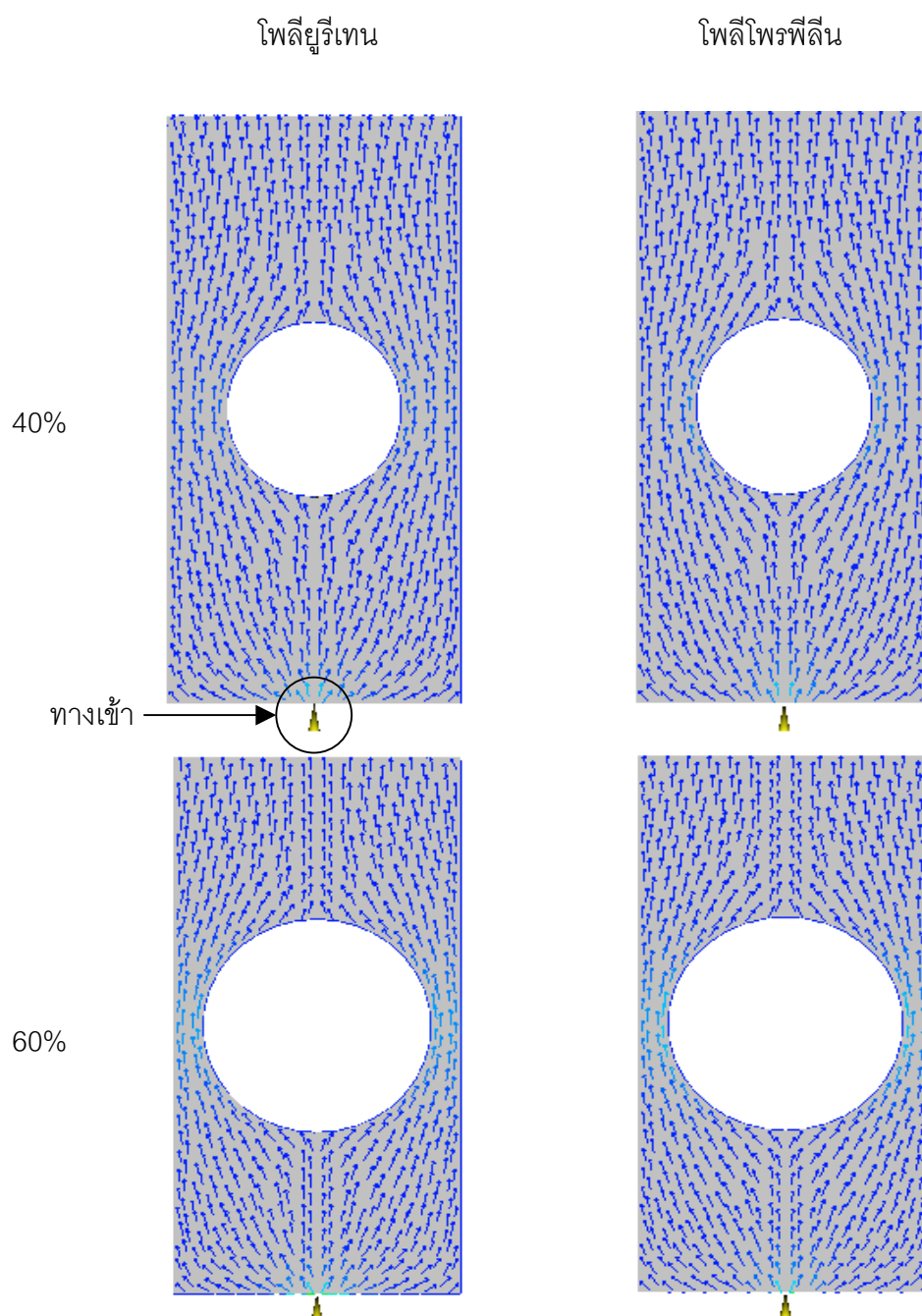
ภาพที่ 126 อัตราการไหลของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x40x2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 127 ความเร็วการไหลสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x40x2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 128 อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของแกนกลางของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) ขนาด 10x40x2 มิลลิเมตร



ภาพที่ 129 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่านแกนกลางวงกลม ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 40% และ 60%

ตารางที่ 27 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิค ระหว่างกระบวนการผลิตแบบ RIM และ TIM ที่สรุปได้จากการจำลองการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 27 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิค ระหว่างกระบวนการผลิตแบบ RIM และ TIM ที่สรุปได้จากการจำลองการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน

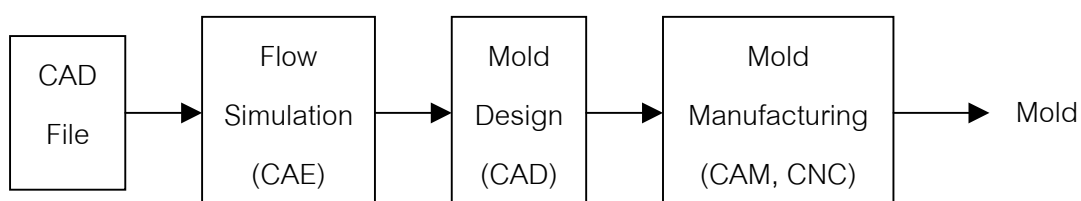
ข้อมูลทางเทคนิค	RIM	TIM
วัสดุที่ใช้ในการฉีด	โพลียูรีเทน	โพลีโพรพิลีน
แรงดันฉีด	น้อยกว่า	มากกว่า
อัตราการไหล	เท่ากัน	เท่ากัน
ความเร็วสูงสุด	น้อยกว่า	มากกว่า
อุณหภูมิ	น้อยกว่า	มากกว่า
ขนาด Air Trap	ใหญ่กว่า	เล็กกว่า
จำนวน Air Trap	น้อยกว่า	มากกว่า
ตำแหน่ง Weld Line	ไม่ต่างกัน	ไม่ต่างกัน
ทิศทางการไหลของพลาสติก	ใกล้เคียงกัน	ใกล้เคียงกัน
แรงประกบแม่พิมพ์	น้อยกว่า	มากกว่า
ความหนืด	น้อยกว่า	มากกว่า

5. ผลการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการ RIM

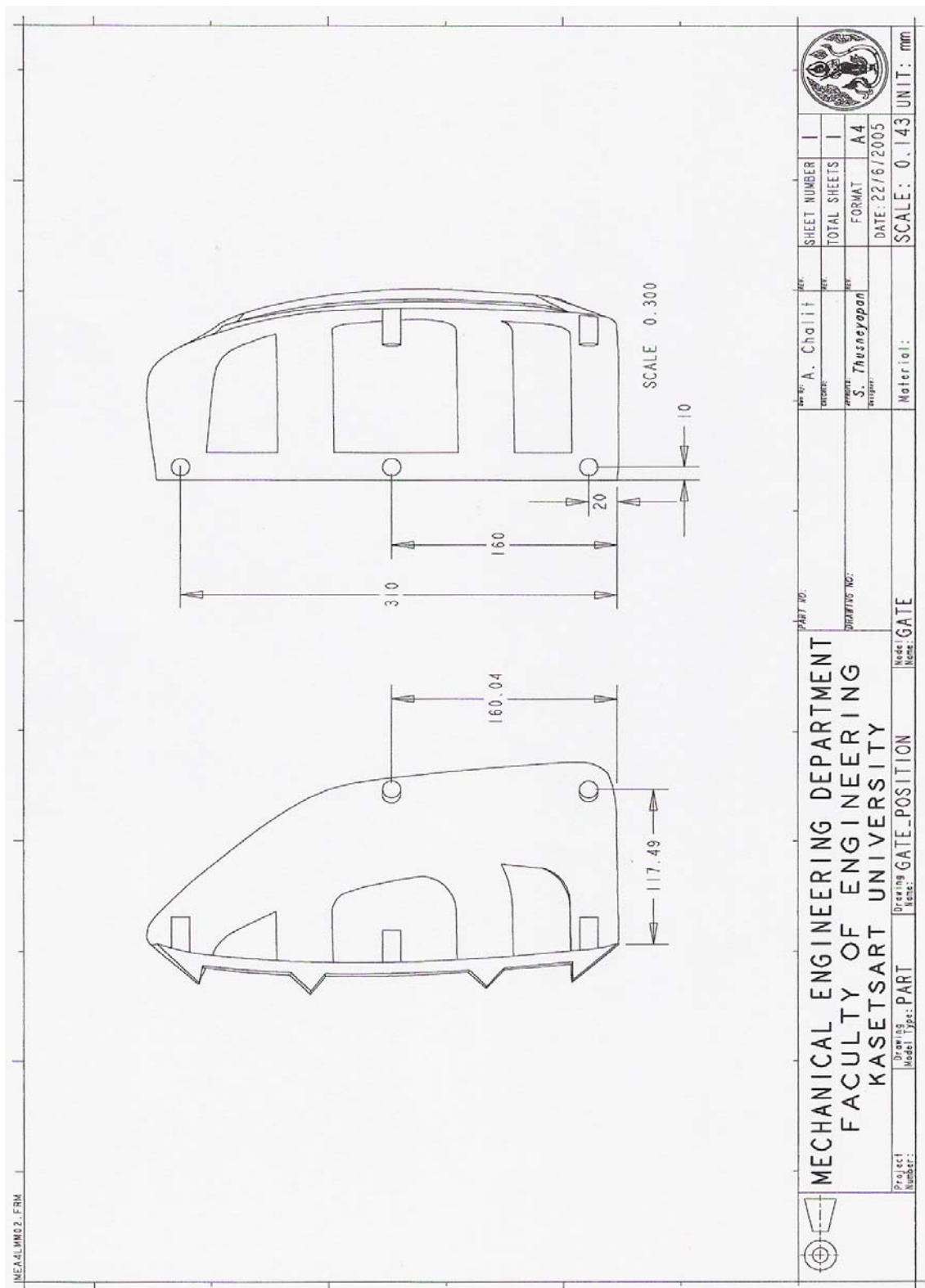
แม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตชิ้นงานฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย โดยใช้กระบวนการ RIM มีขั้นตอนแสดงกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ตามแสดงในภาพที่ 130 ในงานวิจัยนี้ได้นำ CAE มาช่วยในการออกแบบตำแหน่งทางเข้า (Gate) ที่แม่พิมพ์ โดยการจำลองการไหล (Flow Simulation) ของโพลียูรีเทนในแม่พิมพ์ เพื่อลดปัญหาจากการเกิด Air Trap และ Weld Line การวิเคราะห์นี้ได้ดำเนินการตาม **วิธีการ หัวข้อที่ 4 การจำลองการไหลของโพลียูรีเทนโดยใช้ CAE** เจือ้นไขการจำลอง ให้แม่พิมพ์เป็นแบบหนึ่ง Cavity และเปรียบเทียบความแตกต่างของ ตำแหน่งทางเข้าที่บริเวณต่าง ๆ จำนวน 5 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่ง A ถึง E ตามแสดงในภาพที่ 65 และภาพวาดรายละเอียดของตำแหน่งทางเข้าทั้ง 5 จุด ได้แสดงในภาพที่ 131

ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนประกอบด้วย เวลาฉีดหรือเวลาการไหลเต็ม (Fill Time, วินาที) ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (Average Velocity, cm/sec) ค่าแรงดันที่เกิดขณะฉีด (Pressure, MPa) อุณหภูมิชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดการฉีด (Bulk Temperature, °C) ตำแหน่งการเกิด Air Trap และ Weld Lines ภาพที่ 132 ถึง 136 แสดงผลการวิเคราะห์ดังกล่าวที่ตำแหน่งทาง เข้าที่จุด A ถึง E ตามลำดับ ตารางที่ 28 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของตำแหน่งทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง ขนาดของ Air Trap ที่เกิด ได้จำแนกขนาดเป็น 3 กลุ่ม คือ S, M และ L โดยได้กำหนด ไว้ในข้อที่ 18 ของ **วิธีการ หัวข้อที่ 4 การจำลองการไหลของโพลียูรีเทนโดยใช้ CAE**

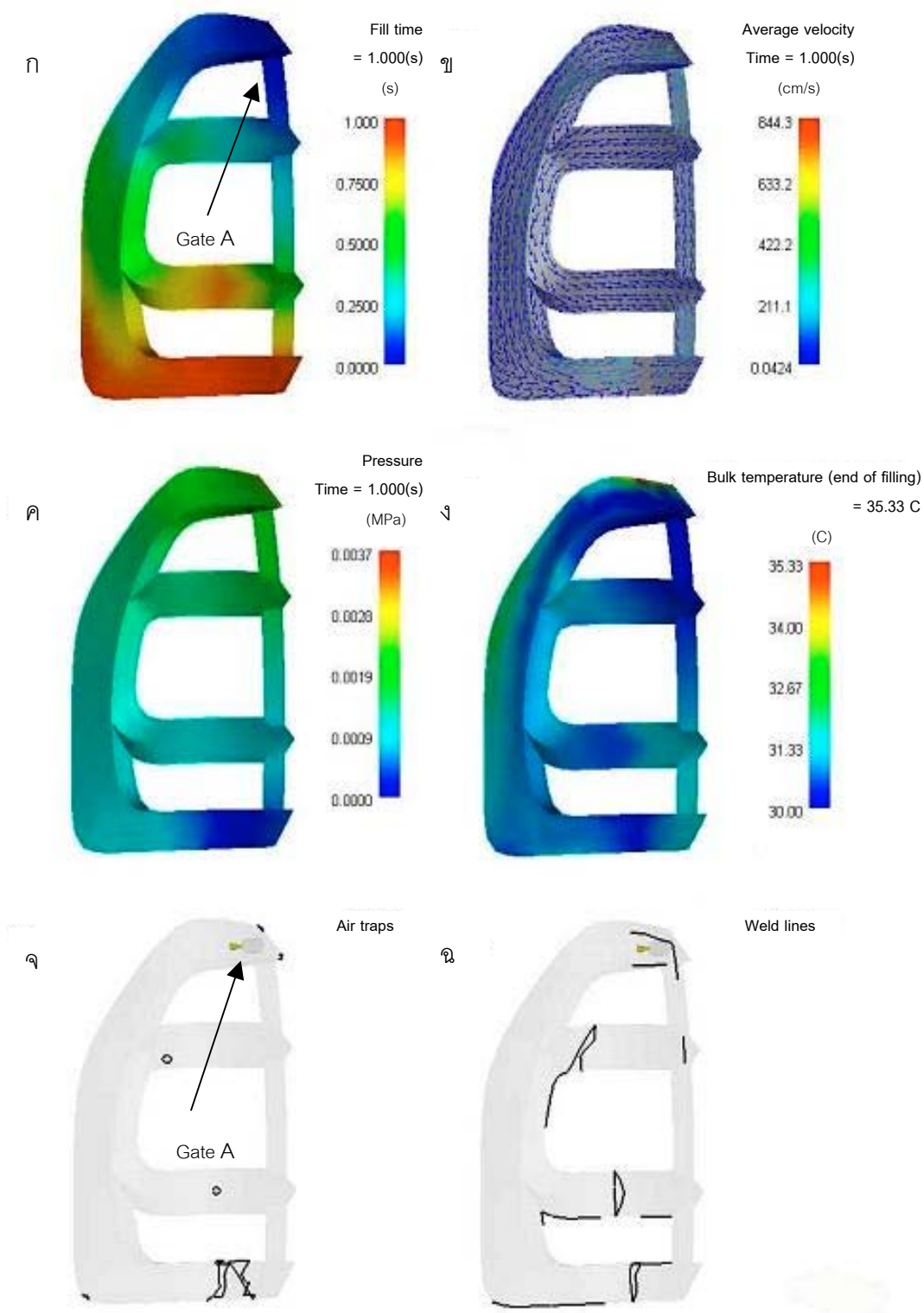
ผลสรุปในตารางที่ 28 ได้นำมาแสดงเป็นกราฟของอัตราการไหล ความเร็วเฉลี่ย อุณหภูมิ และแรงบิดแม่พิมพ์ของตำแหน่งทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง ที่เวลาการไหลเต็ม (Fill Time) ที่ 1, 2, 4, 6 และ 8 วินาที ตามแสดงในภาพที่ 137 ถึง 140 ตามลำดับ



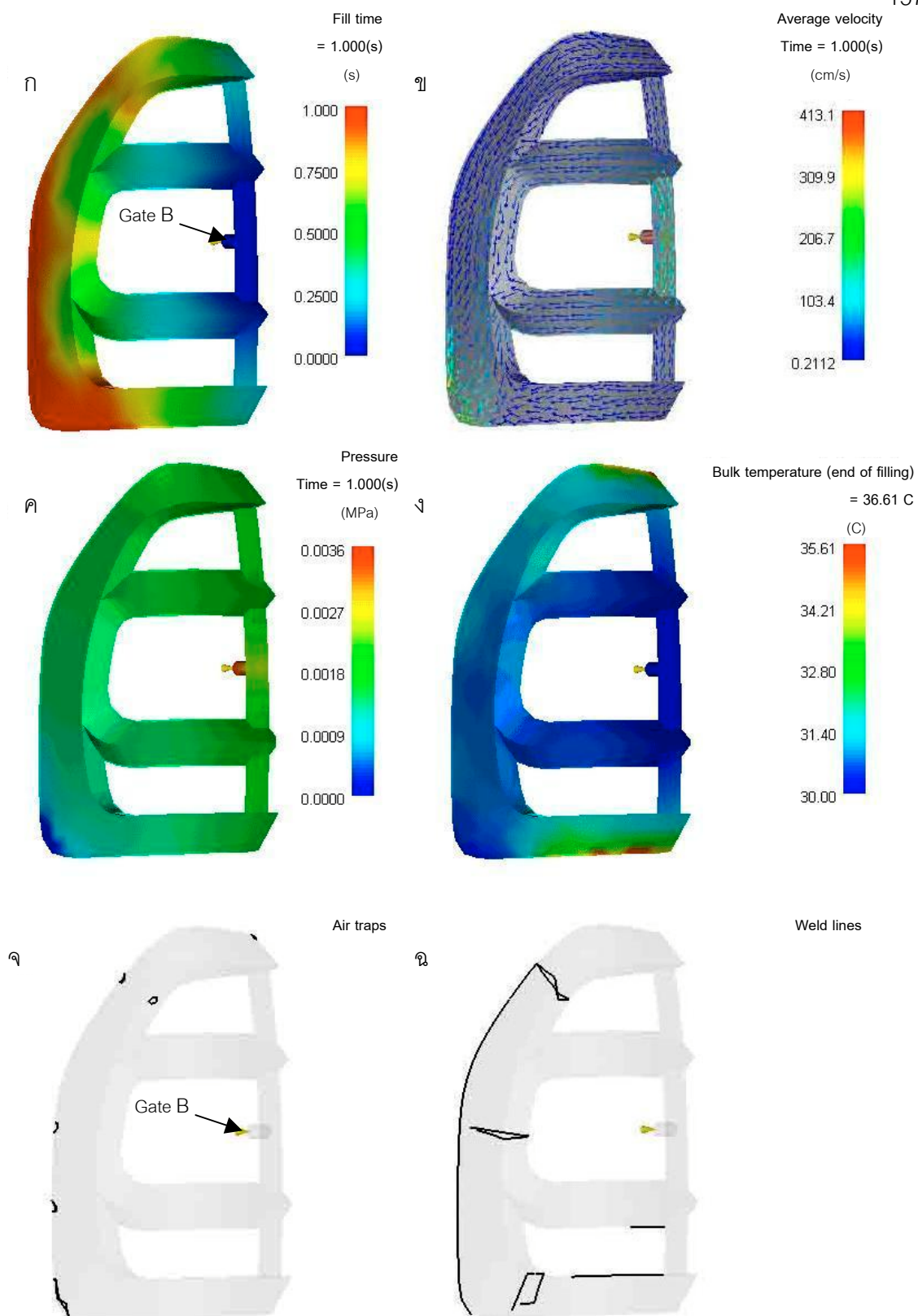
ภาพที่ 130 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์



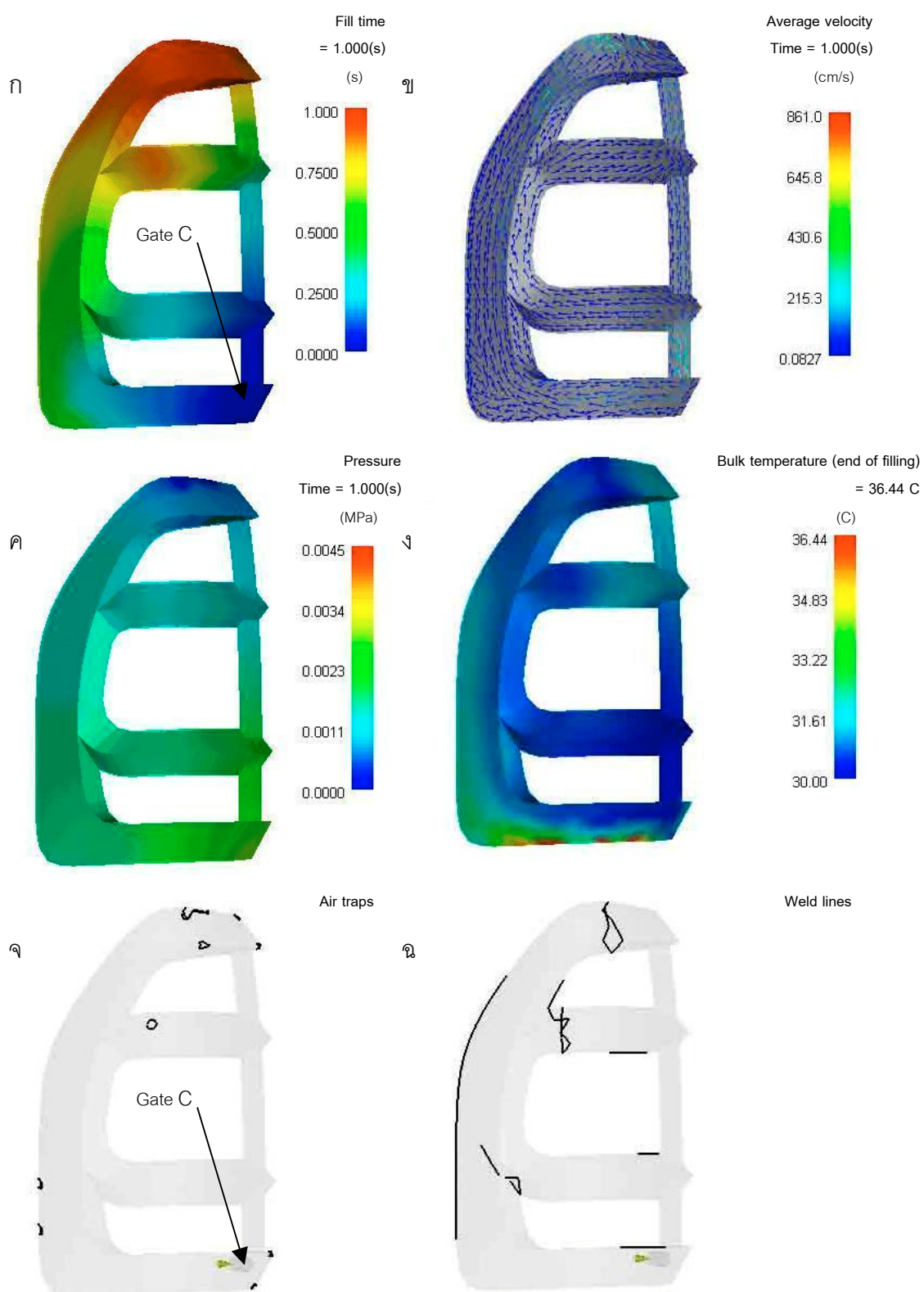
ภาพที่ 131 แสดงภาพวาดรายละเอียดของตำแหน่งทางเข้าทั้ง 5 จุด



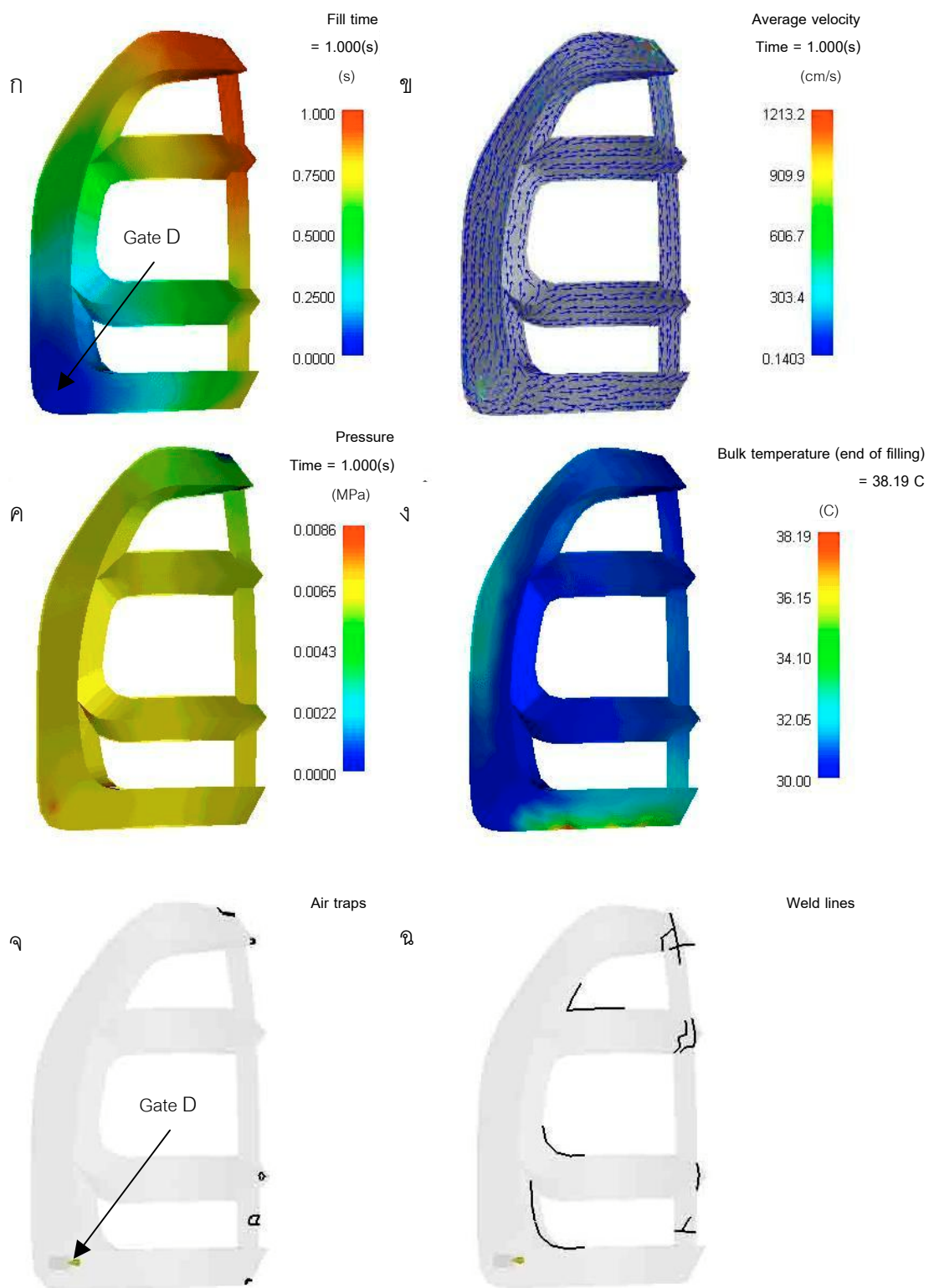
ภาพที่ 132 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนของ Gate ตำแหน่ง A เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที



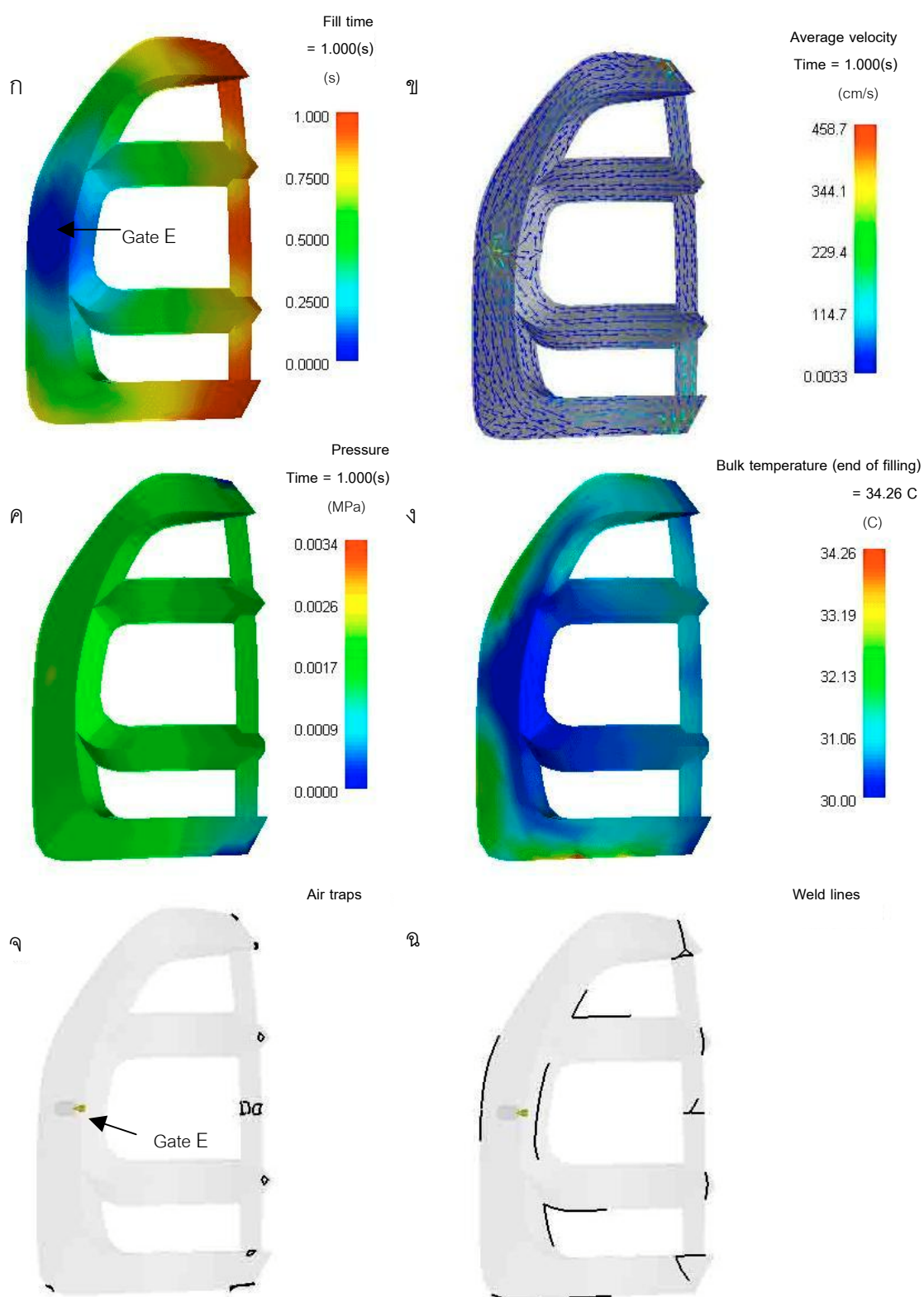
ภาพที่ 133 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทิลีนของ Gate ตำแหน่ง B เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที



ภาพที่ 134 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทิลีนของ Gate ตำแหน่ง C เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที



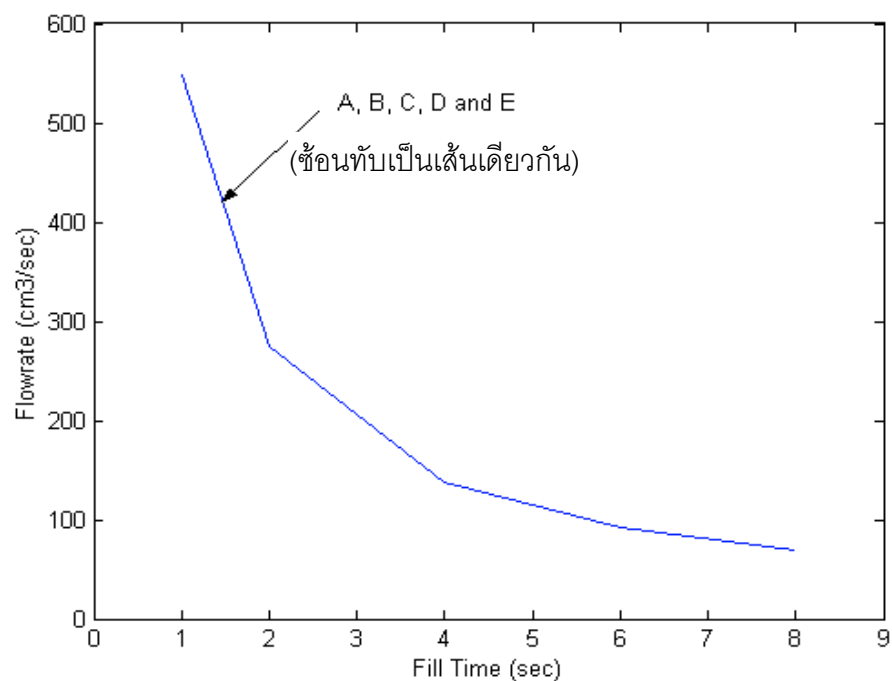
ภาพที่ 135 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลียูรีเทนของ Gate ตำแหน่ง D เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที



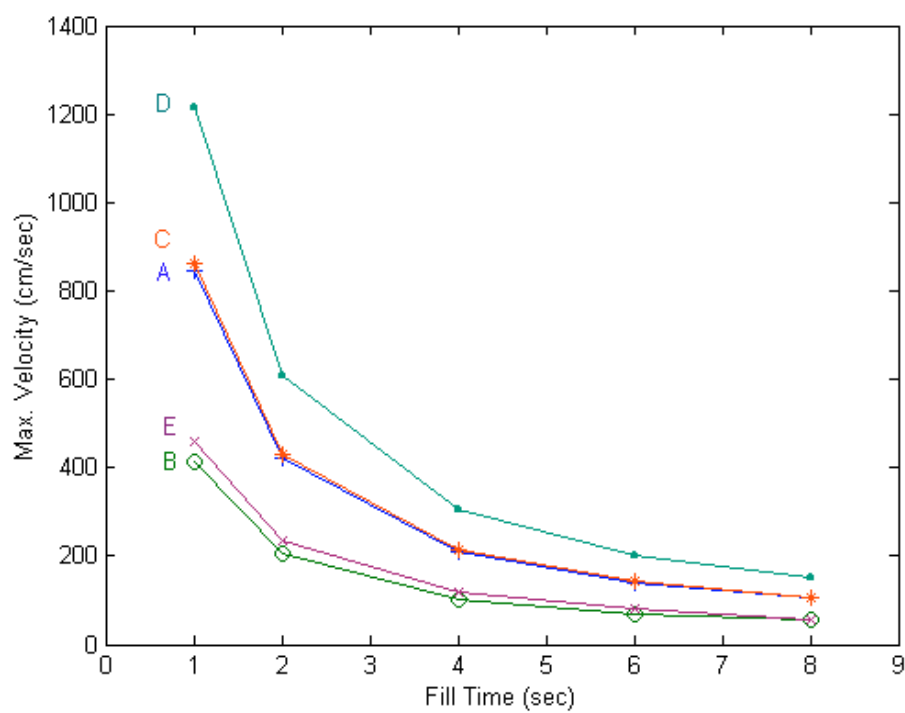
ภาพที่ 136 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทิลีนของ Gate ตำแหน่ง E เมื่อให้เวลาไหลเต็มเท่ากับ 1 วินาที

ตารางที่ 28 ผลการวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทิลีนโดยใช้ CAE

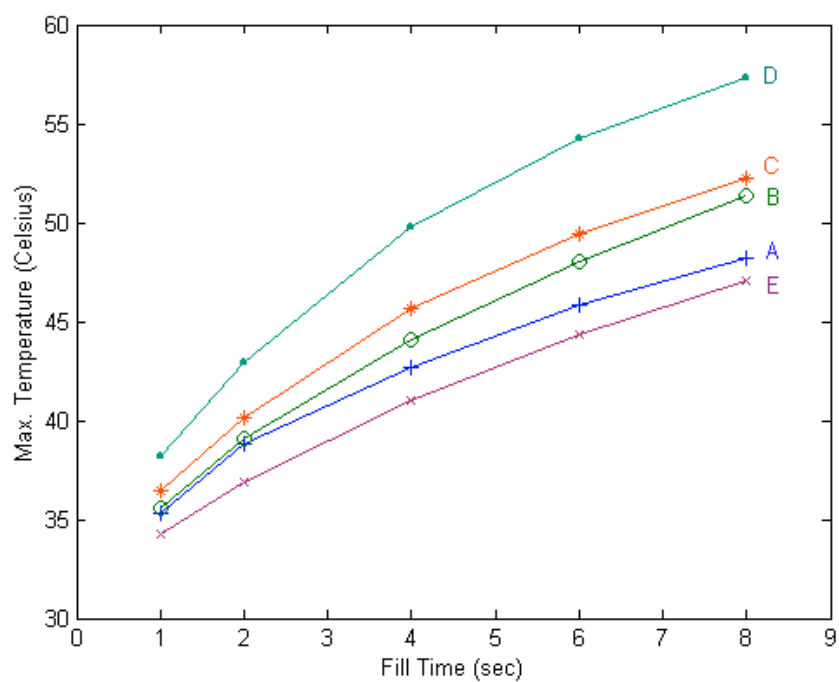
Model	Gate No.	Fill Time (sec)	Flow Rate (cm ³ /sec)	Velocity (cm/sec)	Bulk Temperature (°C)	Max.Clamp Force (Tons)	จำนวน Air Trap		
							ขนาด Air Trap		
							S	M	L
A1	A	1	548.36	0.04-844.3	30-35.33	0.0035	5	0	2
A2	A	2	274.18	0.02-422.65	30-38.83	0.0015	5	0	2
A4	A	4	137.09	0.009-210.5	30-42.69	0.0010	5	0	2
A6	A	6	91.39	0.008-140.3	30-45.82	0.0005	5	0	2
A8	A	8	68.54	0.005-105.2	30-48.17	0.0003	5	0	2
B1	B	1	548.36	0.211-413.1	30-35.61	0.0045	5	1	0
B2	B	2	274.18	0.122-206.6	30-39.07	0.0020	4	1	0
B4	B	4	137.09	0.066-103.3	30-44.12	0.0010	6	0	1
B6	B	6	91.39	0.046-68.86	30-48.01	0.0005	6	0	1
B8	B	8	68.54	0.035-51.64	30-51.32	0.0004	5	0	1
C1	C	1	548.36	0.083-861.0	30-36.44	0.0050	8	0	1
C2	C	2	274.18	0.049-430.4	30-40.13	0.0020	8	1	0
C4	C	4	137.09	0.039-214.5	30-45.65	0.0010	7	1	0
C6	C	6	91.39	0.015-142.8	30-49.40	0.0006	7	0	1
C8	C	8	68.54	0.013-106.9	30-52.24	0.0005	7	0	1
D1	D	1	548.36	0.14-1213.2	30-38.19	0.0250	5	0	0
D2	D	2	274.18	0.11-606.6	30-42.97	0.0070	5	0	0
D4	D	4	137.09	0.062-303.3	30-49.74	0.0030	5	0	0
D6	D	6	91.39	0.044-202.2	30-54.29	0.0020	5	0	0
D8	D	8	68.54	0.035-121.1	30-57.35	0.0015	5	0	0
E1	E	1	548.36	0.003-458.7	30-34.26	0.0070	7	2	0
E2	E	2	274.18	0.014-236.2	30-36.91	0.0035	6	2	0
E4	E	4	137.09	0.007-117.7	30-41.03	0.0018	6	2	0
E6	E	6	91.39	0.007-78.99	30-44.32	0.0010	6	2	0
E8	E	8	68.54	0.005-56.14	30-47.04	0.0007	4	3	0



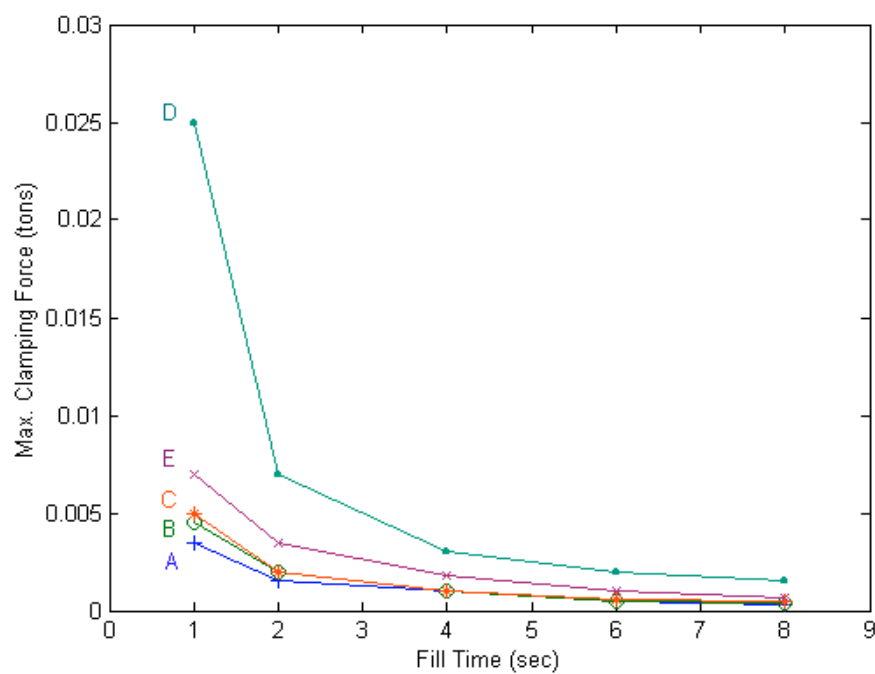
ภาพที่ 137 อัตราการไหลของโพลียูรีเทนที่เวลาการไหลเต็มของทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง



ภาพที่ 138 ความเร็วการไหลสูงสุดของโพลียูรีเทนที่เวลาการไหลเต็มของทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง



ภาพที่ 139 อุณหภูมิสูงสุดของโพลียูรีเทนที่เวลาการไหลเต็มของทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง



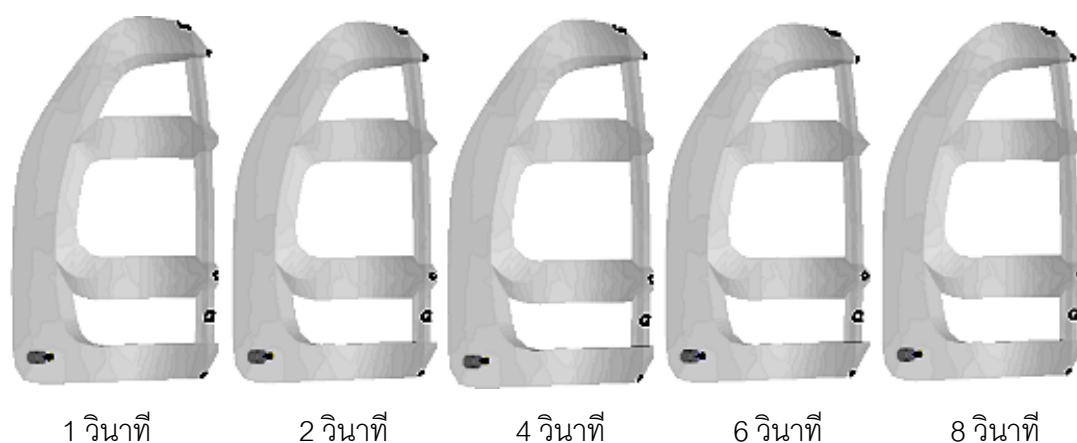
ภาพที่ 140 แรงปิดแม่พิมพ์ที่มากที่สุดที่เวลาการไหลเต็มของทางเข้าทั้ง 5 ตำแหน่ง

จากตารางที่ 28 เมื่อเปรียบเทียบจำนวนและขนาดของการเกิด Air Trap พบว่าตำแหน่งทางเข้าแม่พิมพ์ของโพลียูรีเทนที่ดีที่สุด คือ ตำแหน่ง D โดยตำแหน่งนี้ มี Air Trap ขนาดเล็ก (S) เกิดจำนวน 5 แห่งเท่ากันไม่ว่าจะใช้เวลาฉีด (Fill Time) ที่แตกต่างกัน (ตามแสดงในภาพที่ 141) ดังนั้น ตำแหน่งทางเข้าที่จุด D จึงเป็นตำแหน่งที่นำไปใช้เจาะรูให้เป็นทางเข้าแม่พิมพ์ของโพลียูรีเทน

ทางเข้าที่จุด D มี Air Trap เกิดขึ้นที่จุดบนสุดของชิ้นงาน (ภาพที่ 141) ตำแหน่งที่เกิดนี้สามารถสังเกตเห็นได้ง่าย ส่วนสี่บริเวณที่เหลือเกิดที่ขอบด้านขวาของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อนำไปประกอบเข้ากับกรอบไฟท้ายของรถแล้ว จะไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นตำแหน่ง Air Trap ที่จุดบนสุดของชิ้นงานเป็นจุดที่ต้องทำช่องลม (Air Vent) ที่แม่พิมพ์

ตำแหน่งทางเข้าที่จุด D เป็นผลให้ค่า ความเร็วสูงสุด อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงาน และแรงปิดแม่พิมพ์ มีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับจุดอื่น ๆ (ตามแสดงในภาพที่ 137 ถึง 140 ตามลำดับ)

ผลที่ได้จากการจำลองการไหลของโพลียูรีเทนนี้ ได้นำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ และกำหนดตำแหน่งทางเข้า (Gate) โดยการใช้ CAD ออกแบบแม่พิมพ์ ได้ดำเนินการตาม **วิธีการ หัวข้อที่ 5 การออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้ CAD** และรายละเอียดของแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบอยู่ในหัวข้อนี้เช่นกัน

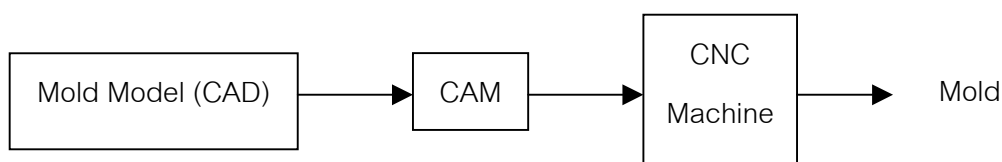


ภาพที่ 141 แสดงบริเวณที่เกิด Air Trap ของตำแหน่งทางเข้าที่จุด D เมื่อเวลาการไหลเต็มเท่ากับ 1, 2, 4, 6 และ 8 วินาที

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ จากภาพที่ 137 ถึง 140 ณ. เวลาต่าง ๆ ของการไหลของ โพลียูรีเทนเข้าเต็มแม่พิมพ์ (Fill Time) ในช่วงเวลา 1 ถึง 8 วินาที ได้ผลสอดคล้องกับความเป็นจริง กล่าวคือ ถ้าใช้เวลานานในการไหลเต็ม เป็นผลให้อัตราการไหลของโพลียูรีเทนลดลง (ภาพที่ 137) ทำให้ลดความเร็วสูงสุดของการไหล (ภาพที่ 138) และลดแรงในการปิดแม่พิมพ์ (ภาพที่ 140) แต่มีผลทำให้อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานสูงมากขึ้น (ภาพที่ 139) โดยความสัมพันธ์ของทั้ง 4 ค่า เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear)

6. ผลการผลิตแม่พิมพ์

แม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย ด้วยกระบวนการ RIM ได้พิจารณาเลือกใช้วัสดุเป็นโลหะ เพราะมีความทนทาน และอายุการใช้งานสูง กรรมวิธีการผลิตแม่พิมพ์สมัยใหม่ที่ใช้ปฏิบัติจะอาศัยข้อมูลที่ออกแบบโดยใช้ CAD แล้วใช้ CAM และเครื่องจักรกล CNC ในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ โดยมีขั้นตอนตามแสดงในภาพที่ 142 ข้อมูลหลักที่ใช้ คือ แบบ CAD ของแม่พิมพ์ (Part File) ที่ได้จากผลการออกแบบในหัวข้อที่แล้ว (ตามภาพที่ 65)



ภาพที่ 142 กรรมวิธีการผลิตแม่พิมพ์

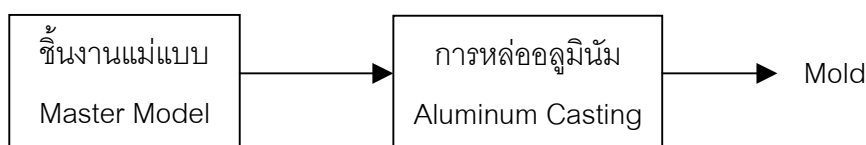
กระบวนการในภาพที่ 142 เป็นการผลิตแม่พิมพ์โดยใช้เครื่องจักรกล CNC ในการชุดก่อนโลหะรูปลูกบาศก์ ให้เป็นรูปทรงของผิวของชิ้นงานตามแบบ CAD ของผิวของ Core และ Cavity จากผลการออกแบบแม่พิมพ์ ต้องใช้โลหะขนาด 200x420x225 มิลลิเมตร สำหรับแม่พิมพ์ด้าน Core และ 200x420x190 มิลลิเมตร สำหรับแม่พิมพ์ด้าน Cavity

โดยเมื่อให้แม่พิมพ์เป็นเหล็ก แม่พิมพ์ด้าน Core จะมีน้ำหนัก 35.335 กิโลกรัม และด้าน Cavity มีน้ำหนัก 54.956 กิโลกรัม แม่พิมพ์เหล็กมีต้นทุนในการผลิตสูงมาก เนื่องจากความซับซ้อนของผิวประกอบที่ Parting Line และของผิวชิ้นงาน ทำให้ค่าใช้จ่ายในการแมชชีนสูง ข้อเสียของแม่พิมพ์เหล็ก คือ มีน้ำหนักมาก ทำให้การเปิดปิด และเคลื่อนย้ายแม่พิมพ์มีความไม่สะดวก และเสี่ยงต่ออันตราย เนื่องจากต้องใช้แรงงานคนในการปฏิบัติ นอกจากนี้แม่พิมพ์เหล็กยังมี

ความยุ่งยากในการเก็บรักษา เนื่องจากเกิดสนิมได้ง่าย แม่พิมพ์เหล็กจึงไม่สะดวกในการนำมาใช้สำหรับการผลิตด้วยเครื่อง RIM การลดน้ำหนักสามารถทำได้โดยการขุดเนื้อด้านนอกออก (ด้านตรงข้ามกับด้านผิวชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 51) ซึ่งส่งผลให้ราคาในการแมชชีนสูงเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นกระบวนการผลิตแม่พิมพ์โดยการหล่อเป็นอลูมิเนียมได้ดำเนินการตามขั้นตอนแสดงในภาพที่ 143 และได้ดำเนินการผลิตตาม **วิธีการ หัวข้อที่ 6 การผลิตแม่พิมพ์**

การผลิตแม่พิมพ์นี้ใช้การว่าจ้างโรงงานหล่ออลูมิเนียมเป็นผู้ผลิตแม่พิมพ์ ดังนั้น สิ่งที่ทางโรงงานหล่อต้องการ คือ ชิ้นงานแม่แบบ หรือ Master Model ชิ้นงานสำหรับใช้เป็นแม่แบบ สามารถผลิตได้จาก (สัจจาทิพย์ และคณะ, 2549)

- ชิ้นงานดินเหนียว
- ชิ้นงาน Thermoforming
- ชิ้นงานจากเครื่องทำต้นแบบรวดเร็ว หรือ Rapid Prototyping (RP)
- ชิ้นงานจากการแมชชีน โดยใช้ CAD/CAM และเครื่องจักรกล CNC



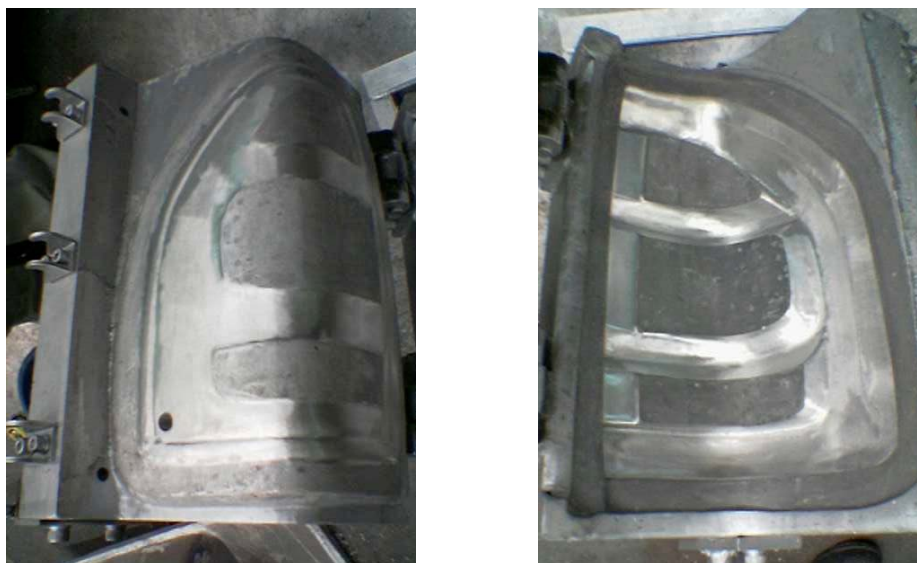
ภาพที่ 143 กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ด้วยการหล่อ

งานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงานฝาครอบประดับกรอบไฟท้ายที่เป็นพลาสติก ABS ทำการผลิตโดยใช้กระบวนการ Thermoforming เป็นแม่แบบสำหรับการหล่อแม่พิมพ์อลูมิเนียม

ข้อสำคัญของชิ้นงานแม่แบบที่จะนำไปใช้สำหรับการหล่อ คือ ชิ้นงานแม่แบบต้องเป็นชิ้นงานที่ได้ทำการชดเชยการหดตัว (Shrinkage) โดยให้ขนาดของแม่พิมพ์ใหญ่กว่าชิ้นงานที่ต้องการผลิต การหดตัวเป็นผลจากการกลายสภาพของโพลีเอทิลีนจากของเหลวเป็นของแข็ง

แม่พิมพ์อลูมิเนียมที่ผลิตเสร็จสมบูรณ์ได้แสดงในภาพที่ 144 โดยมีน้ำหนักของชิ้น Core เท่ากับ 12.5 กิโลกรัม และชิ้น Cavity เท่ากับ 20 กิโลกรัม แม่พิมพ์ที่ประกอบเข้ากับฐานแล้วได้แสดงในภาพที่ 145 มีน้ำหนักรวมเท่ากับ 32.5 กิโลกรัม และแม่พิมพ์ที่ได้อัปเดตฐานทดสอบ

สำหรับการผลิตแบบ RIM ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แสดงในภาพที่ 146 แม่พิมพ์ชุดนี้มี น้ำหนักรวมเท่ากับ 41 กิโลกรัม ตารางที่ 29 สรุปเปรียบเทียบน้ำหนักของแม่พิมพ์ที่คำนวณจาก CAD และน้ำหนักจริง ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณน้ำหนักเกิดจากความคลาดเคลื่อนจาก กระบวนการทำ Pattern เพื่อใช้ในการหล่อ ที่โรงงานผลิตได้ปรับปรุงตามความเหมาะสม



ภาพที่ 144 แม่พิมพ์อลูมิเนียม แยกชิ้น Core และ Cavity



ภาพที่ 145 แม่พิมพ์อลูมิเนียม บนฐานทดสอบ



ภาพที่ 146 แม่พิมพ์อลูมิเนียม ที่นำไปใช้ในการผลิตในงานวิจัยนี้

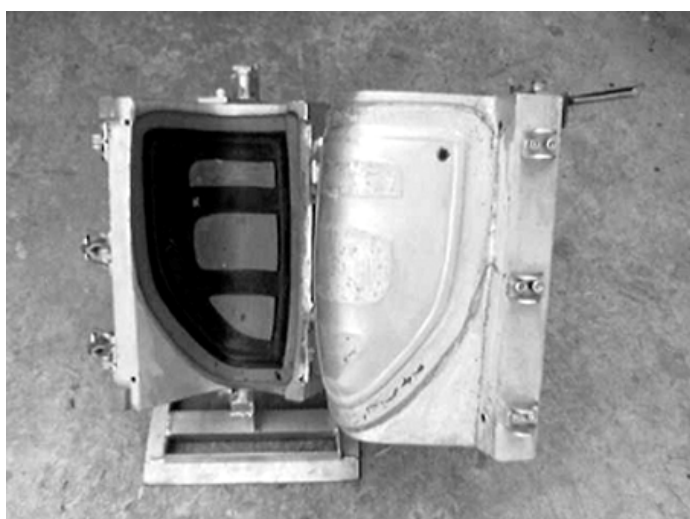
ตารางที่ 29 เปรียบเทียบน้ำหนักของแม่พิมพ์ที่คำนวณจาก CAD และน้ำหนักจริง

น้ำหนัก (kg)	CAD (เหล็ก)	CAD (อลูมิเนียม)	น้ำหนักจริง (อลูมิเนียม)	Error % (อลูมิเนียม)
แม่พิมพ์ด้าน Core	35.335	11.80	12.5	8.4
แม่พิมพ์ด้าน Cavity	54.956	18.36	20	8.2
แม่พิมพ์พร้อมฐานทดสอบ	-	-	41	-

7. ผลการผลิตชิ้นงานโพลียูรีเทนแข็งจากกระบวนการ RIM

ฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย ที่ผลิตโดยใช้โพลียูรีเทนแข็ง (ตาม **วิธีการ หัวข้อที่ 7 การผลิตฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายด้วยโพลียูรีเทนแข็ง**) ภาพที่ 147 แสดงชิ้นงานภายหลังการแข็งตัวในแม่พิมพ์ ภาพที่ 148 แสดงด้านหน้าและด้านหลังของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ได้มีเนื้อแน่นและแข็งเหมือนไม้ มีรูปทรง และรายละเอียดต่าง ๆ ของชิ้นงานตามที่ได้ออกแบบไว้ ผิวของชิ้นงานปรากฏเป็นรู หรือหลุมที่เป็น Air Trap ขนาดเล็ก โดยถ้าค่าเงื่อนไขการผลิตของเครื่อง RIM ที่ตั้งไว้ไม่ได้คุณภาพ จะเกิด Air Trap เพิ่มจำนวนมากขึ้น คุณภาพของผิวของชิ้นงาน ขึ้นอยู่กับคุณภาพของผิวของแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดด้วย

ผลการทดสอบการผลิตเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้สูงขึ้น สามารถลดการขาดหายของ โพลียูรีเทน ที่ไหลไปไม่เต็มทัวแม่พิมพ์ (ภาพที่ 149 และ 150) สาเหตุหนึ่งของการที่โพลียูรีเทน ไหลไม่เต็มเนื่องจากการเกิด Air Trap อัตราส่วนโดยปริมาตรของ A และ B ที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 3.33 ต่อ 1 เมื่อเพิ่ม A จะทำให้ ชิ้นงานแข็งมากขึ้น แต่ผิวจะไม่เรียบและมีรอยย่นเกิดขึ้นดังแสดง ในภาพที่ 150 ในขณะที่การเพิ่ม B เป็นผลให้ ผิวของชิ้นงานเรียบมากขึ้น แต่ความแข็งแรงน้อยลง



ภาพที่ 147 ชิ้นงานเมื่ออยู่ในแม่พิมพ์

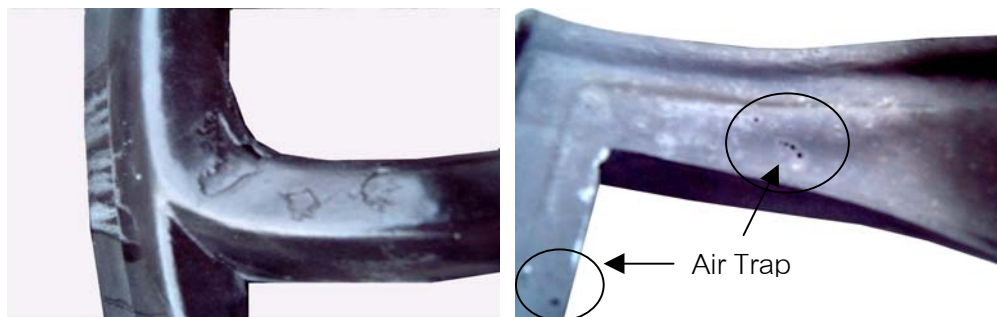
ก



ข



ภาพที่ 148 ด้านหน้า (ภาพ ก) และด้านหลัง (ภาพ ข) ของฝาครอบประดับกรอบไฟท้ายวัสดุเป็น โพลียูรีเทนแบบแข็ง



ภาพที่ 149 ผิวของชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ



ภาพที่ 150 สภาพรอยย่นของผิวชิ้นงานที่ไม่ได้คุณภาพ

การใช้ CAE ในการจำลองการไหลของโพลียูรีเทน โดยตำแหน่ง Gate ที่ใช้ คือ ตำแหน่ง D มีผลในการลดการเกิด Air Trap จริงในชิ้นงานได้ ชิ้นงานที่ผลิตได้จากกระบวนการ RIM ได้นำไปตกแต่งให้มีคุณภาพสูงขึ้น โดยทำการตัดครีปที่เกิดขึ้นตามขอบของชิ้นงาน อุดรูของ Air Trap ที่ผิวหน้าของชิ้นงานด้วยกาว ล้างทำความสะอาดเพื่อขจัดคราบมันของ Release Agent ขัดชิ้นงานให้เรียบด้วยกระดาษทราย และพ่นสี ตัวอย่างชิ้นงานที่ตกแต่งเรียบร้อยแล้ว ได้แสดงในภาพที่ 151 การประกอบของชิ้นงานบนผิวของกรอบไฟท้ายได้แสดงในภาพที่ 152 และ 153

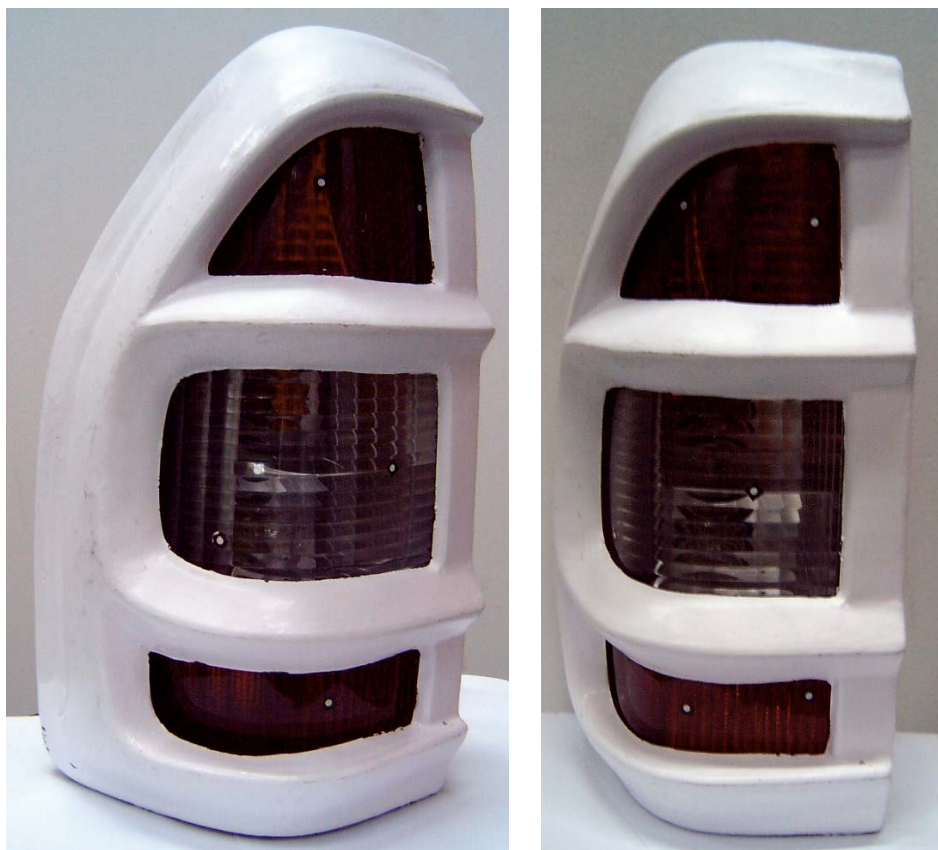
ข้อได้เปรียบ และเสียเปรียบของชิ้นงานโพลียูรีเทนแข็ง สามารถสรุปได้ดังนี้

ข้อได้เปรียบของชิ้นงานโพลียูรีเทนแข็ง ในการผลิตฝาครอบระดับกรอบไฟท้าย

- 1) แข็งแรง สามารถรับแรงกระแทกได้ เนื่องจากวัสดุมีความแข็ง
- 2) ชิ้นงานมีคุณภาพผิวที่ดี
- 3) ซ่อมผิวได้ โดยใช้กาวอุด แล้วขัดตกแต่ง ทำให้ผิวเรียบมันเงาได้



ภาพที่ 151 ชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการ RIM ภายหลังตบแต่งเรียบร้อยแล้วเป็นสีต่าง ๆ
(ก. สีดำ ข. สีขาว และ ค. สีเงิน)



ภาพที่ 152 การประกอบฝาครอบประดับกรอบไฟท้ายที่ทำจากโพลีเอทิลีนแข็งบนกรอบไฟท้าย



ภาพที่ 153 ฝาครอบประดับกรอบไฟท้ายที่ได้ผลิตจากงานวิจัยนี้

- 4) ตบแต่ง และพ่นสีได้
- 5) แม่พิมพ์ราคาถูกเมื่อเทียบกับกระบวนการฉีด (Injection Molding) เนื่องจากเครื่อง RIM ใช้ความดันต่ำกว่ากระบวนการฉีด และจำนวนชิ้นส่วนแม่พิมพ์น้อย
- 6) ใช้แม่พิมพ์ได้หลายวัสดุ
- 7) ทนความร้อนได้ดี เหมาะสำหรับใช้เป็นชิ้นส่วนยานยนต์
- 8) มีความสะดวกในการติดเพื่อกาว
- 9) เหมาะสมกับการผลิตเพื่อการค้า
- 10) ไม่ต้องตัดช่องแสงไฟ

ข้อเสียเปรียบของชิ้นงานโพลียูรีเทนแข็ง ในการผลิตฝาครอบประดับกรอบไฟท้าย

- 1) เครื่อง RIM มีราคาสูง
- 2) ราคาวัตถุดิบสูง Isocyanate และ Polyol ขายเป็นถัง ถังละ 240 กิโลกรัม และ 210 กิโลกรัม ตามลำดับ
- 3) การเก็บรักษาวัตถุดิบมีความยากลำบาก
- 4) วัตถุดิบเป็นสารพิษ มีอันตราย
- 5) ต้องมีขั้นตอนการตกแต่งชิ้นงาน (Post-Processing) หลังฉีดเสร็จ
- 6) ต้องมีตู้หรือห้องสำหรับอบแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ต้องมีอุณหภูมิในช่วง 70 ถึง 90°C

- 7) การบำบัด และการ Recycle วัสดุโฟลียูรีเทนทำได้ยากลำบาก และมีค่าใช้จ่ายสูง
- 8) การสูญเสียวัตถุดิบ เกิดจากการไหลซึมตามขอบ การไหลล้นที่ช่องลม และท่อทางเข้า
- 9) จำนวนแม่พิมพ์ ต้องใช้จำนวนหลายชุด เมื่อต้องการผลผลิตสูง
- 10) ชิ้นงานสำหรับบางผลิตภัณฑ์อาจต้องใช้ Jig เพิ่มขึ้น
- 11) ใช้แรงงานจำนวนมากในการตกแต่งผิว และทำสี
- 12) ใช้พื้นที่มาก โดยต้องจัดเตรียมพื้นที่สำหรับห้องอบแม่พิมพ์ พื้นที่สำหรับจัดเก็บแม่พิมพ์และ Jig ขณะรอให้โฟลียูรีเทนแข็งตัว และพื้นที่สำหรับตกแต่งผิวและพ่นสี
- 13) การผลิตแบบ RIM จะไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก และชิ้นงานที่มีรายละเอียดสูง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา กระบวนการออกแบบ และผลิตผลิตภัณฑ์สำหรับการผลิตแบบ RIM และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัสดุจากโพลียูรีเทน ซึ่งใช้ในกระบวนการผลิตแบบ RIM โดยผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นผลิตภัณฑ์ที่กำหนดตามความประสงค์ของบริษัท เสถียรพลาสติก แอนด์ ไฟเบอร์ จำกัด คือ ฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายรถ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่จัดว่ามีรูปทรงที่ซับซ้อนมาก นอกจากนี้แล้วการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้ต้องอ้างอิงกับผิวของกรอบไฟท้ายรถ ด้วยความแม่นยำ และเที่ยงตรงสูง เพื่อให้สามารถประกอบเข้าด้วยกันได้อย่างแนบสนิท เพื่อความสวยงาม และแข็งแรง ในกระบวนการออกแบบได้ประยุกต์เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (CAD) พัฒนารูปทรงของผลิตภัณฑ์ และออกแบบแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังได้นำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (CAE) โดยการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการกระแทก ที่ชิ้นงานที่มีเอลิเมนต์แบบผนังบาง และแบบตัน และจำลองการไหลในแม่พิมพ์ เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ RIM และกระบวนการ TIM โดยใช้วัสดุเป็นโพลียูรีเทน และโพลีโพรพีลีนตามลำดับ และนำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ เพื่อช่วยให้การผลิตชิ้นงานได้ผลอย่างมีคุณภาพ แม่พิมพ์ที่ออกแบบและผลิตสำหรับใช้ในการทดสอบการผลิตแบบ RIM ได้ผลิตเป็นแม่พิมพ์อลูมิเนียม โดยใช้กระบวนการหล่ออลูมิเนียม แม่พิมพ์ที่ได้นี้ได้ใช้ทำการทดสอบผลิตชิ้นงานจากเครื่อง RIM ผลิตฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายด้านซ้ายเป็นโพลียูรีเทนแข็ง และได้สรุปเป็นวิธีการออกแบบผลิตภัณฑ์สำหรับการผลิตแบบ RIM ที่มีความแม่นยำและรวดเร็ว โดยผลการวิจัยได้บรรลุวัตถุประสงค์ ในการเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทนโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของการฉีดแบบทำปฏิกิริยา

ผลการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เนื่องจากผลิตภัณฑ์ฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนของผิวที่สูงมาก ทำให้การใช้ CAD จำลองรูปทรงให้ถูกต้องตามชิ้นงานต้นแบบ กระทำได้ลำบาก นอกจากนี้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูง เหตุผลหลักของการใช้ CAD คือ ความสะดวก และแม่นยำเพื่อใช้สำหรับการผลิตแม่พิมพ์ โดยเฉพาะการผลิตแม่พิมพ์สมัยใหม่ที่ใช้ CAD/CAM/CAE และเครื่องจักรกล CNC

2. การใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการกระแทก สามารถช่วยคาดการณ์ความสามารถในการรับแรงกระแทก เพื่อเปรียบเทียบความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกระแทกแบบต่างๆ ของฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายที่เป็นแบบผนังบาง (ทำจากวัสดุ ABS) และแบบตัน (โพลีเอทิลีน) ฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายที่เป็นผนังบางสามารถรับแรงกระแทกต่ำกว่าแบบตัน โดยฝาครอบระดับกรอบไฟท้ายแบบบาง สามารถรับแรงได้สูงสุด เท่ากับ 1,191.50 นิวตัน และแบบตัน เท่ากับ 22,413.38 นิวตัน หรือ แบบตันรับแรงได้มากกว่าแบบบาง 18.81 เท่า ในขณะที่น้ำหนักของแบบตันมากกว่าแบบบาง 3.63 เท่า

3. การวิเคราะห์การไหลของโพลีเอทิลีนในแม่พิมพ์ สามารถช่วยคาดการณ์ตำแหน่งทางเข้า (Gate) ที่เหมาะสม เวลาที่ใช้ในการฉีด อุณหภูมิของชิ้นงาน การเกิด Air Trap แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ความแข็งของชิ้นงานจากการเปลี่ยนสัดส่วนการผสมระหว่างสาร A และ B ได้ และมีข้อจำกัดในการกำหนดค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของโพลีเอทิลีนให้ตรงกับโพลีเอทิลีนที่ใช้ในการฉีดจริงได้ การทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของโพลีเอทิลีนต้องมีอุปกรณ์ และเครื่องมือเฉพาะในการวัดค่าเหล่านั้น ซึ่งไม่อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้

4. การวิเคราะห์การไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีนที่ผลิตด้วยกระบวนการ RIM แสดงผลความดันและอุณหภูมิในการฉีดต่ำกว่าชิ้นงานโพลีโพรพิลีนที่ผลิตจากกระบวนการ TIM เป็นผลให้ความเร็วของพลาสติกเหลวที่ไหลในแม่พิมพ์ และอุณหภูมิในชิ้นงานน้อยกว่าชิ้นงานโพลีโพรพิลีน ชิ้นงานโพลีโพรพิลีนมีจำนวน Air Trap ขนาดเล็กกว่าชิ้นงานโพลีเอทิลีน แต่มีจำนวนมากกว่า และทิศทางการไหลในแม่พิมพ์ของทั้งสองวัสดุมีลักษณะการไหลที่คล้ายกัน ดังนั้น การออกแบบชิ้นงาน และแม่พิมพ์ของทั้งสองกระบวนการสามารถใช้หลักการเดียวกันได้

5. แม่พิมพ์ของกระบวนการ RIM มีความซับซ้อนน้อย โดยมากจะเป็นแม่พิมพ์แบบหนึ่ง Cavity ซึ่งมีส่วนประกอบ คือ Core, Cavity และระบบการเปิดปิดแม่พิมพ์ ความดันที่ใช้ในการฉีดต่ำ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างแม่พิมพ์ต่ำ

6. การผลิตแม่พิมพ์โพลีเอทิลีนได้ใช้กรรมวิธีการหล่อ โดยแม่พิมพ์ที่ได้ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอลูมิเนียมหล่อ น้ำหนักของแม่พิมพ์ชิ้น Core เท่ากับ 12.5 กิโลกรัม และแม่พิมพ์ชิ้น Cavity

หนักเท่ากับ 20 กิโลกรัม การเปิดปิดแม่พิมพ์เป็นการใช้แรงงาน โดยใช้บานพับหมุนแม่พิมพ์ขึ้น Cavity (ขึ้นบน) ค่า Mass Moment of Inertia รอบแกนหมุนของแม่พิมพ์เท่ากับ $85.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

7. โพลีเอทิลีนมีการหดตัวหลังจากการฉีด (Shrinkage) เช่นเดียวกับวัสดุ Thermoplastic ดังนั้นในการออกแบบแม่พิมพ์ จึงต้องชดเชยการหดตัวของโพลีเอทิลีน และแม่แบบที่ใช้สำหรับการหล่อ แม่พิมพ์ต้องชดเชยการหดตัวโดยให้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่ต้องการผลิต สำหรับการปิดตัวที่อาจเกิดขึ้นในชิ้นงานขนาดใหญ่ สามารถแก้ปัญหาได้โดยการใช้ Jig

8. โพลีเอทิลีนแข็ง มีกระบวนการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งได้เป็นชิ้นงานสำเร็จรูป ใช้พื้นที่มากและแรงงานที่ต้องได้รับการฝึกฝนจำนวนมาก เครื่องจักร (RIM) มีความละเอียดอ่อน ถ้าขาดการดูแลและใช้งานอย่างเหมาะสมอาจทำให้เครื่องจักรเสียหาย และเกิดอันตรายได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชาติ ตระการกุล. 2537. **การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ

บรรเลง ศรีนิล. 2539. **เทคโนโลยีพลาสติก**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ

บริษัท Huntsman Polyurethanes จำกัด. **คุณสมบัติของโพลียูรีเทน**

บริษัท Krauss-Maffei จำกัด. **User Manual for RIM Machine**

พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. 2521. **พลาสติก**. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ

ทานตวรรณ เต็กชื่น, นิรันดร์ จันรัสมิ, อติศักดิ์ แก้วใส. 2544. **พลาสติก1**. สำนักพัฒนาเทคนิค
ศึกษาสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สัจจาทิพย์ ทัศนียพันธุ์. 2002. **เอกสารประกอบการเรียนวิชา 208413 CAD/CAM for
Mechanical Engineering III**

_____. 2544. **เทคโนโลยี CNC การโปรแกรม และการใช้งานสำหรับเครื่องกลึงและ
เครื่องกัด**. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

_____. 2545. **โซลิตโมเดล เทคโนโลยีแท้จริงสำหรับการออกแบบ**. วิศวกรรมสาร 55(7):
(2545): 37-43

_____และคณะ. 2545. **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการออกแบบภาชนะบรรจุ
ของเหลวโดยกรรมวิธีวิศวกรรม**. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญา
เลขที่ RDG4550001

_____และคณะ. 2548. รายงานวิจัยฉบับร่าง โครงการการพัฒนาวิธีการออกแบบ
ผลิตภัณฑ์สำหรับการผลิตแบบ RIM. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
สัญญาเลขที่ RDG4650004

Christopher W.Macosko. 1988. RIM Fundamentals of Reaction Injection molding.

Donald V.Rosato .Ph.D. 1990. Plastic processing data handbook: 283-284

George Woods. 2000. The ICI Polyurethanes Book (2nd Edition). John Wiley & Son.

บริษัท Aerosoft จำกัด. <http://www.aerosoftshoe.com/shoesole.php>. 23 มีนาคม 2548

บริษัท Bayer จำกัด. http://www.bayer.co.th/eng_version/polymer/poly.html. 23 มีนาคม
2548

eFunda, Inc. [http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_
datasheet.cfm?MajorID=PU&MinorID=1](http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=PU&MinorID=1). 20 พฤษภาคม 2547

บริษัท Elliott จำกัด. <http://www.elliottfoam.com/features.html>. 23 มีนาคม 2548

บริษัท Goodyear จำกัด. <http://www.goodyearindustrialproducts.com/polyurethanebelts>.
23 มีนาคม 2548

บริษัท Krauss Maffei จำกัด. http://www.krauss-maffei.de/english/kn3_113.htm.
17 มีนาคม 2548

Automation Creations, Inc. <http://www.matweb.com>. 10 ตุลาคม 2547

กรมควบคุมมลพิษ. <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=2365>. 10 เมษายน 2548

กรมควบคุมมลพิษ. [http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=134#อันตรายต่อสุขภาพ \(Health%20Effect\)](http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?VID=134#อันตรายต่อสุขภาพ(Health%20Effect)). 10 เมษายน 2548

บริษัท Polyurethaneweb จำกัด. <http://www.polyurethaneweb.com/>. 23 มีนาคม 2548

บริษัท Rim molding จำกัด. <http://www.rim molding.com/products/index.html>. 3 มีนาคม 2546

บริษัท Rimnetics จำกัด. <http://www.rimnetics.com/polyurethanesystems.html>. 23 ตุลาคม 2545

บริษัท Tytlab จำกัด. http://www.tytlabs.co.ja/japanese/review/rev313pdf/313_057itoh.pdf. 20 กันยายน 2547

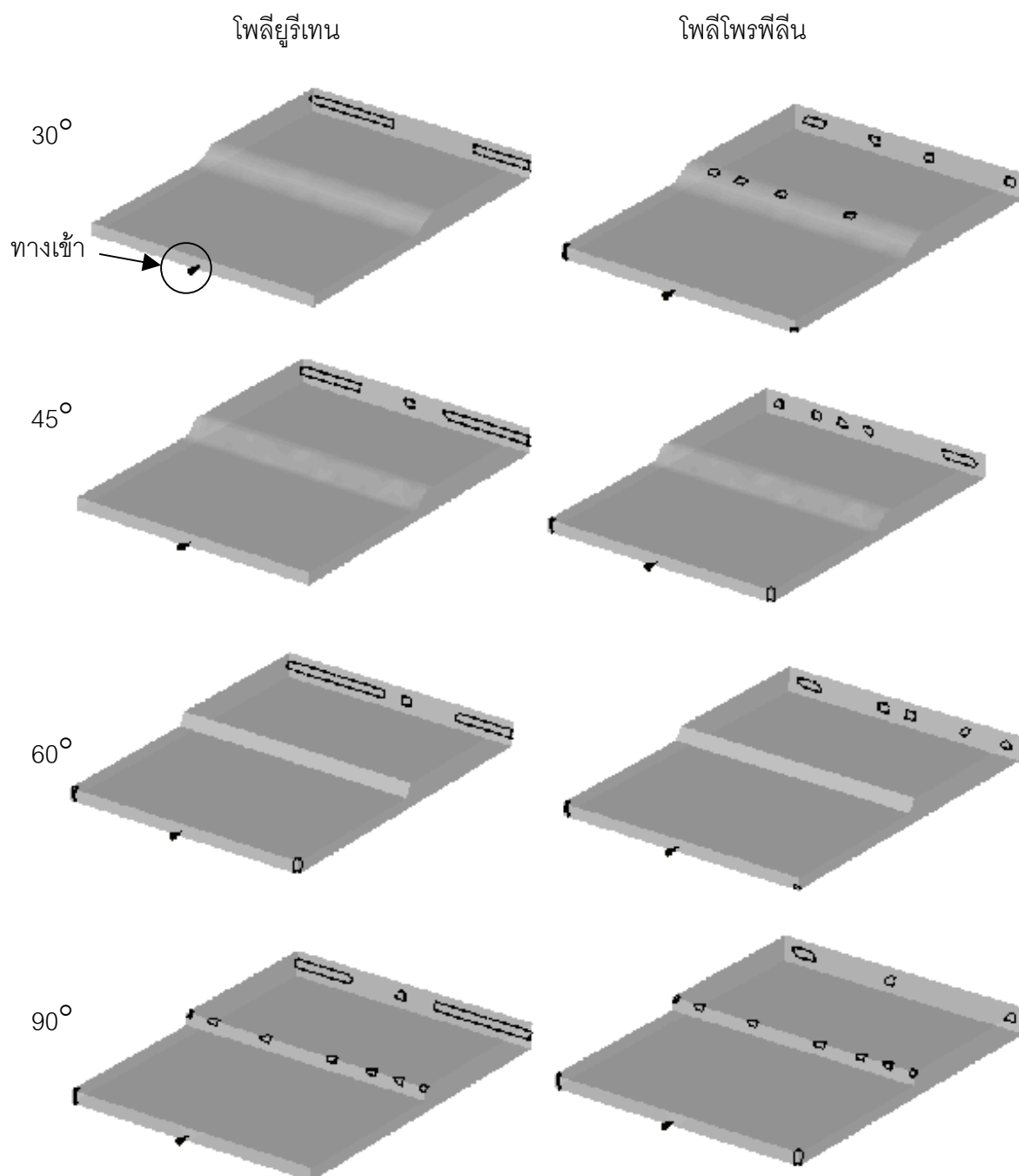
บริษัท Ultima Automation จำกัด. <http://www.ultima-automation.com>. 17 มีนาคม 2548

Richardson & Lokensgard. 1997. **Industrial Plastics (Theory and Application)**. 3rd Edition.

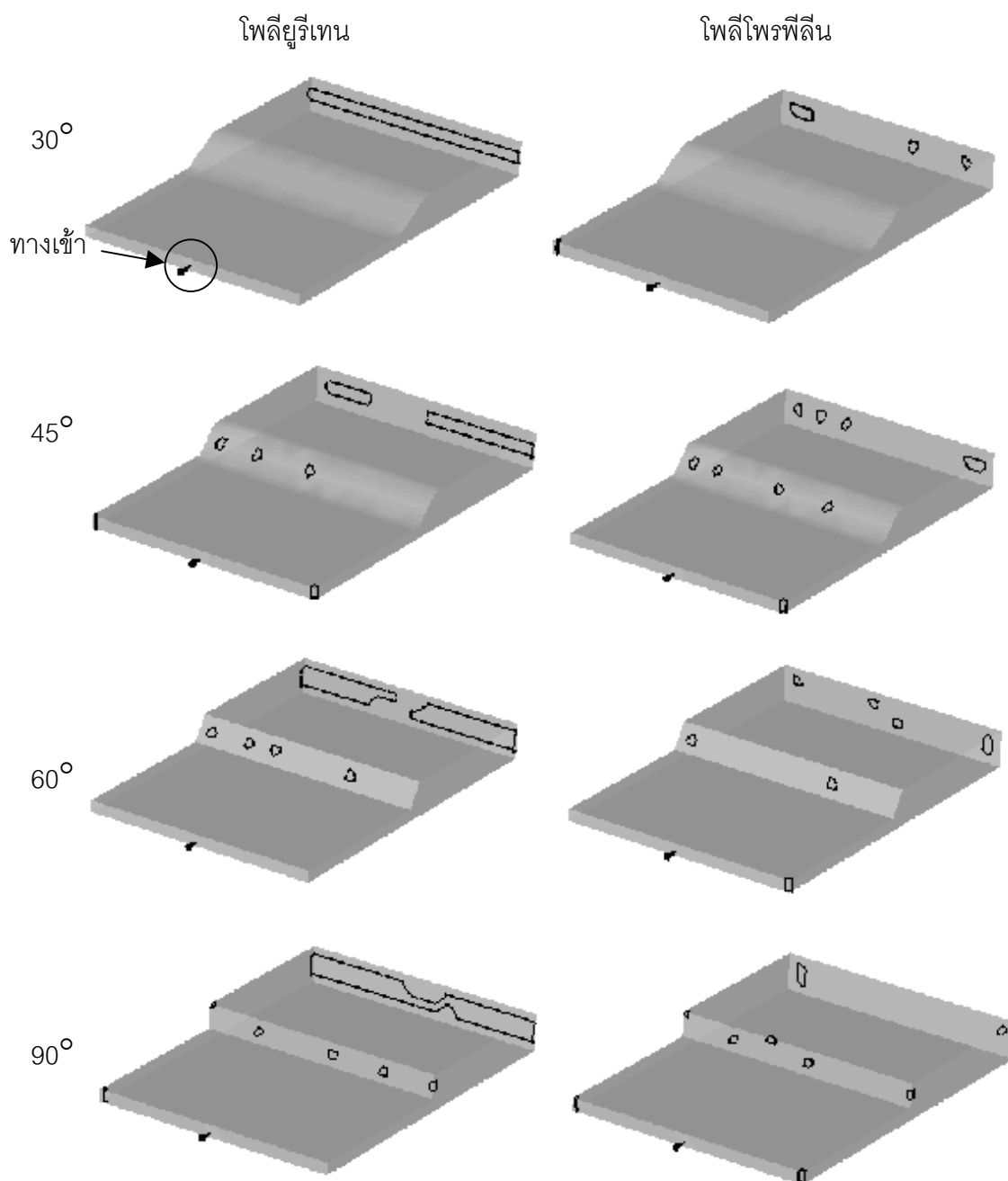
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

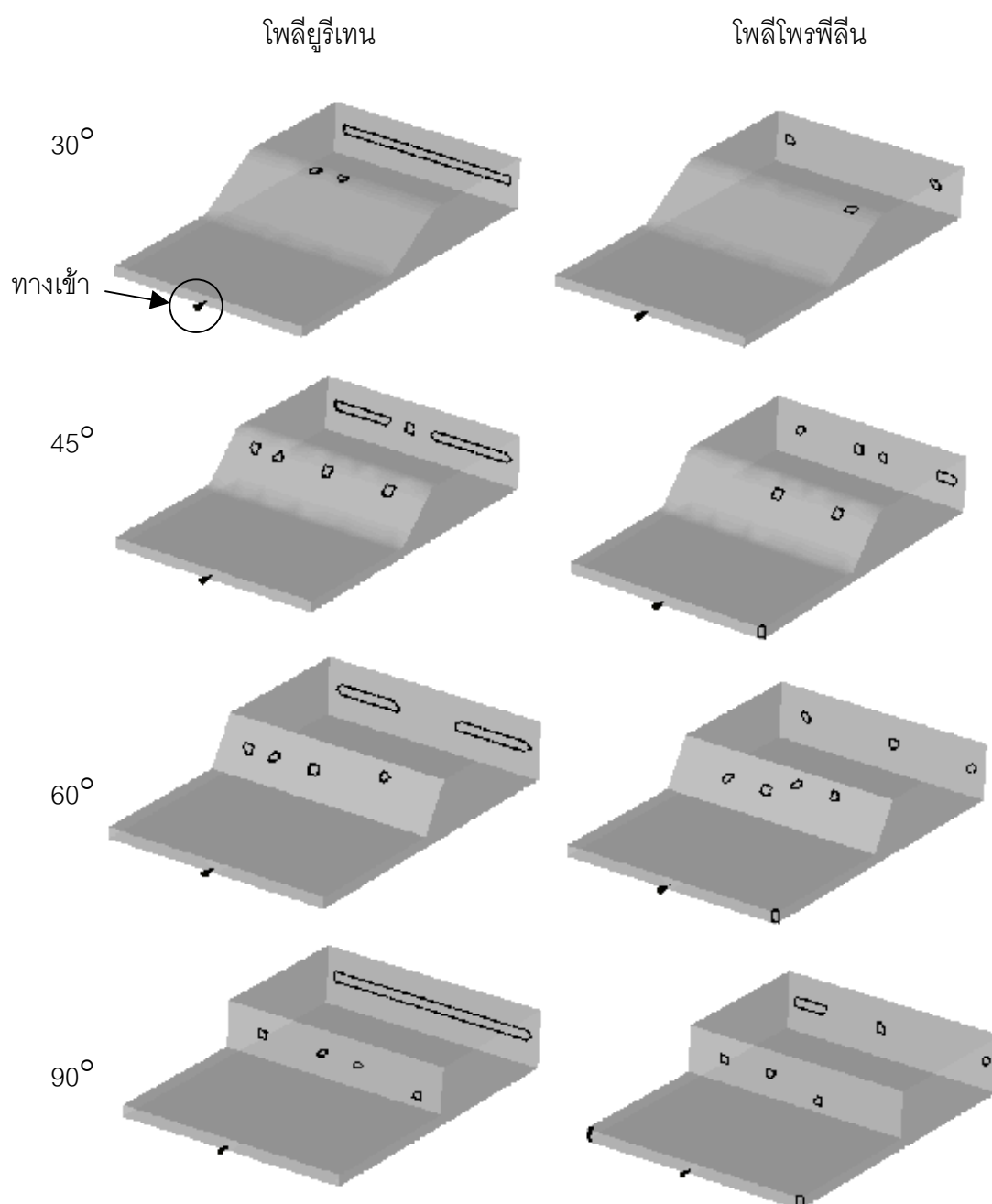
การเปรียบเทียบ Air Trap และทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีพรพิลีน
ที่แปรเปลี่ยนตามความหนา



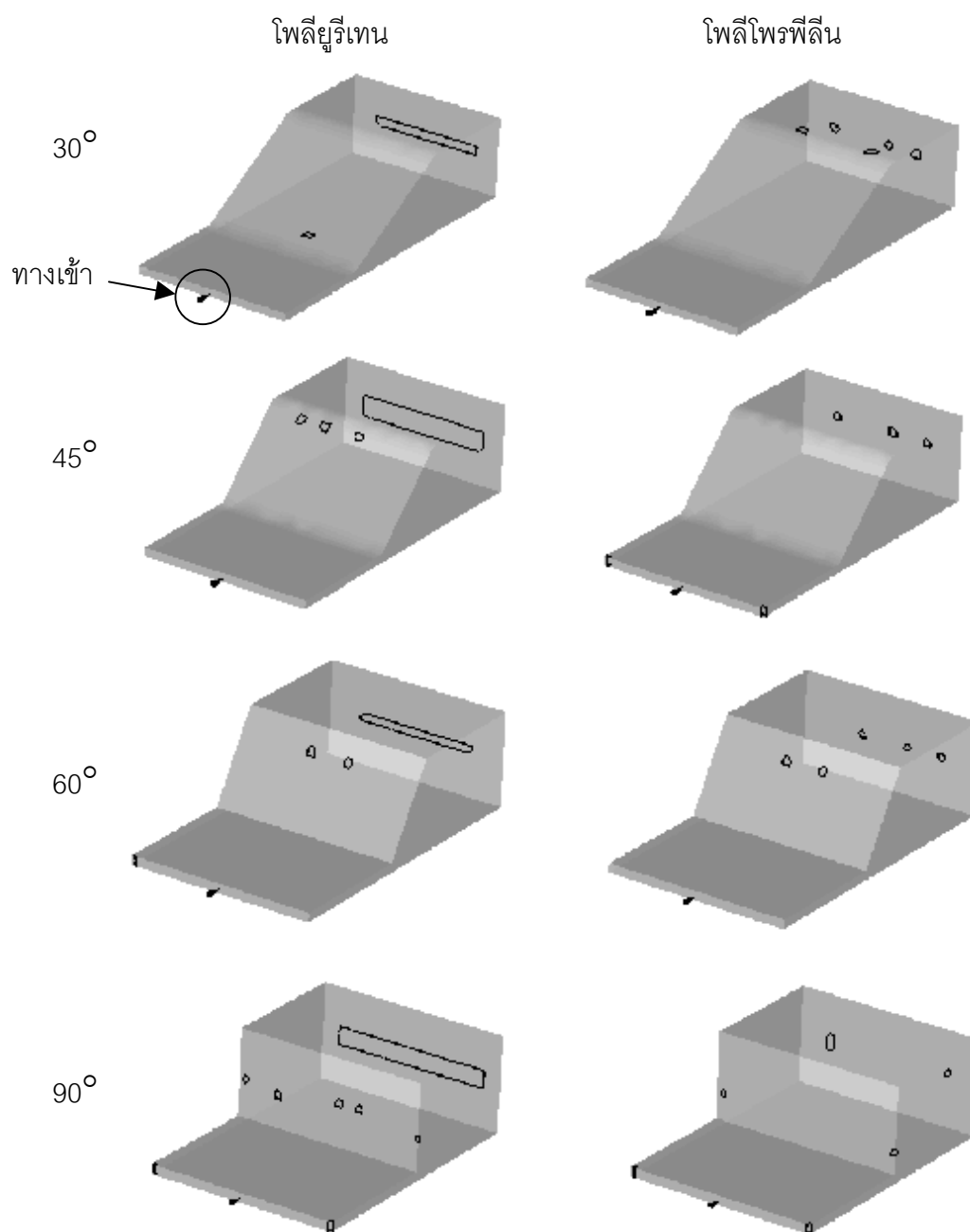
ภาพผนวกที่ ก1 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 2 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จาก แถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



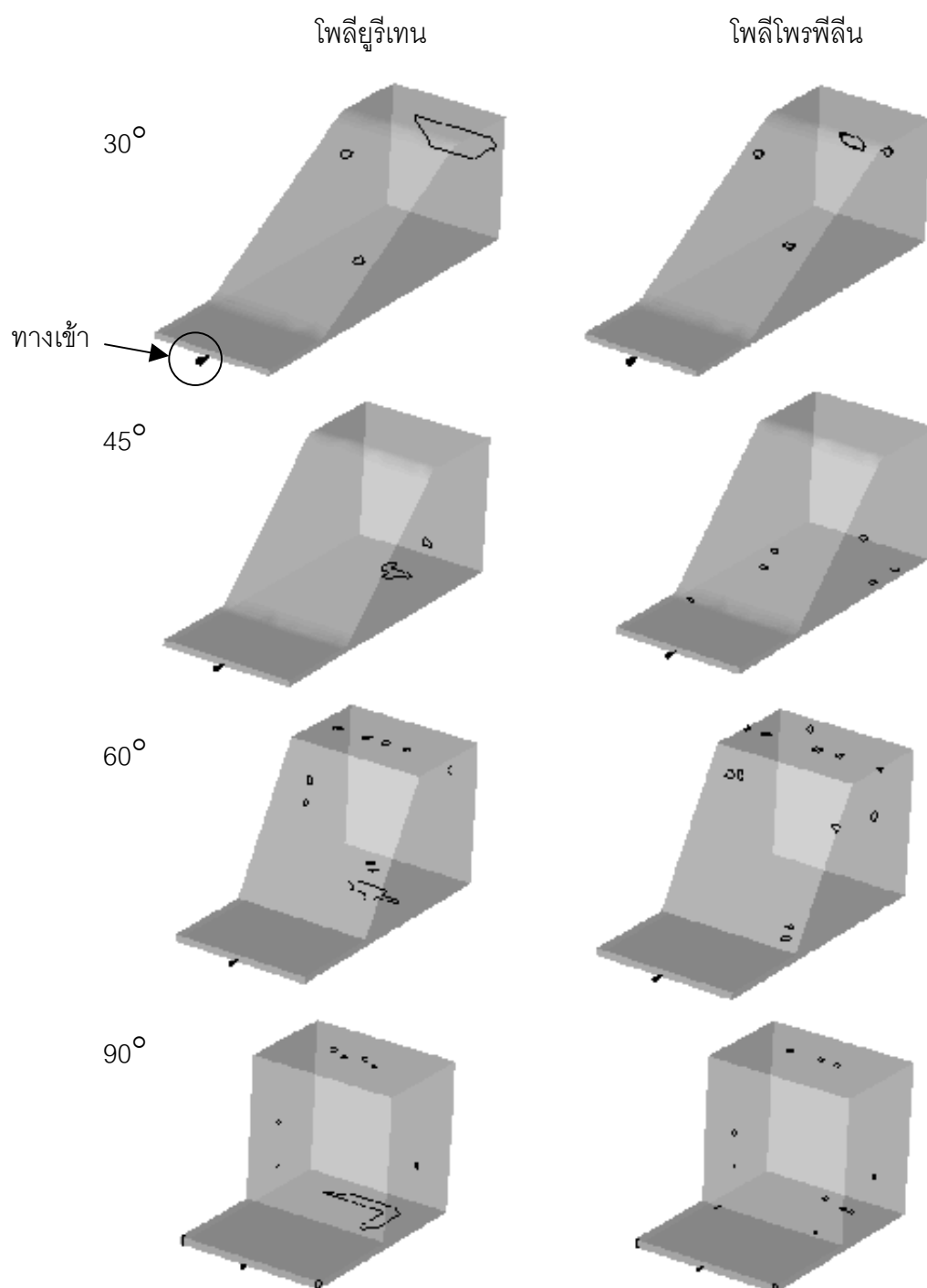
ภาพผนวกที่ ก2 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 3 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จาก แถวนบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



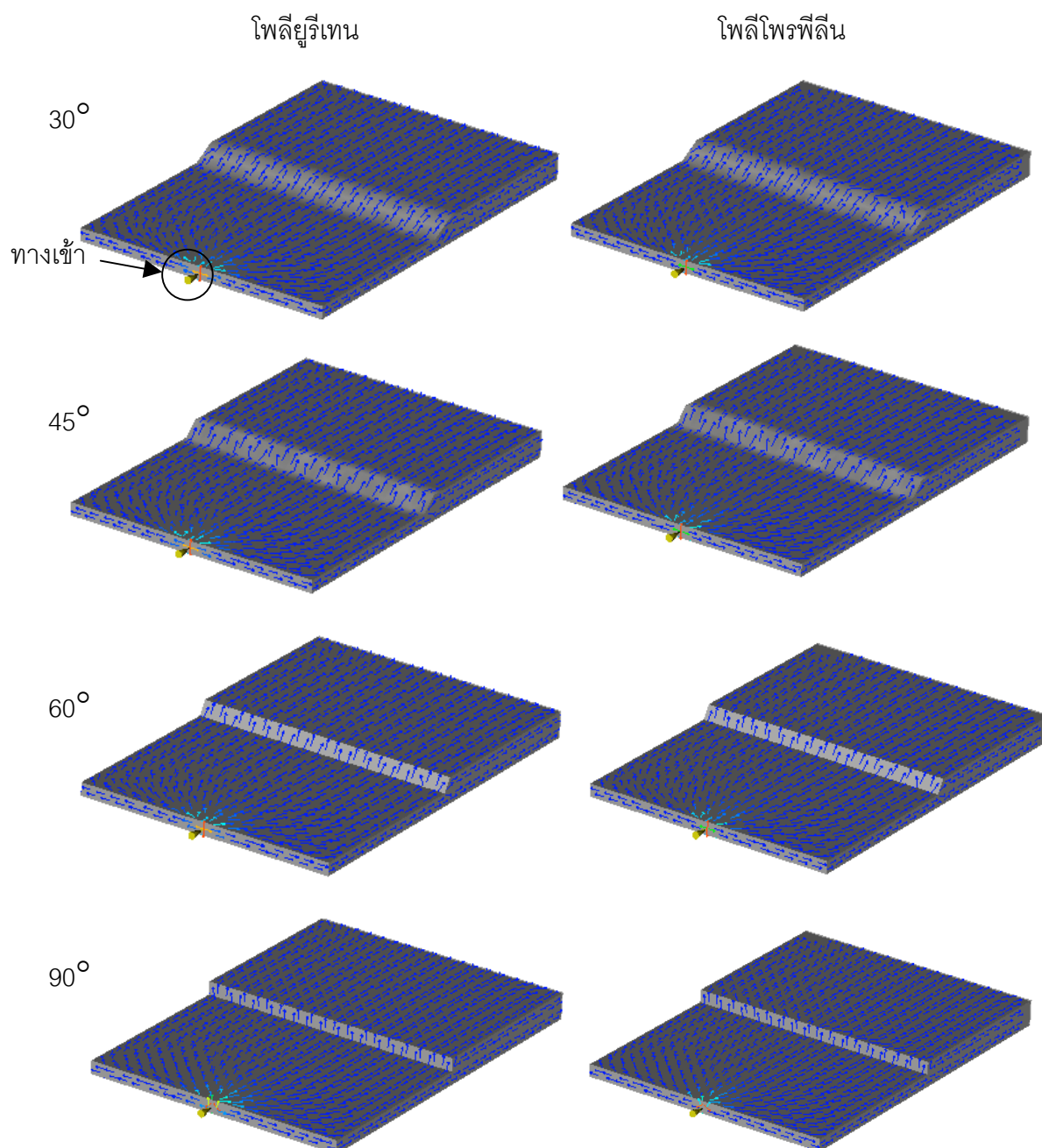
ภาพผนวกที่ ก3 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 5 และความชัน (θ) เท่ากับ $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ และ 90° จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



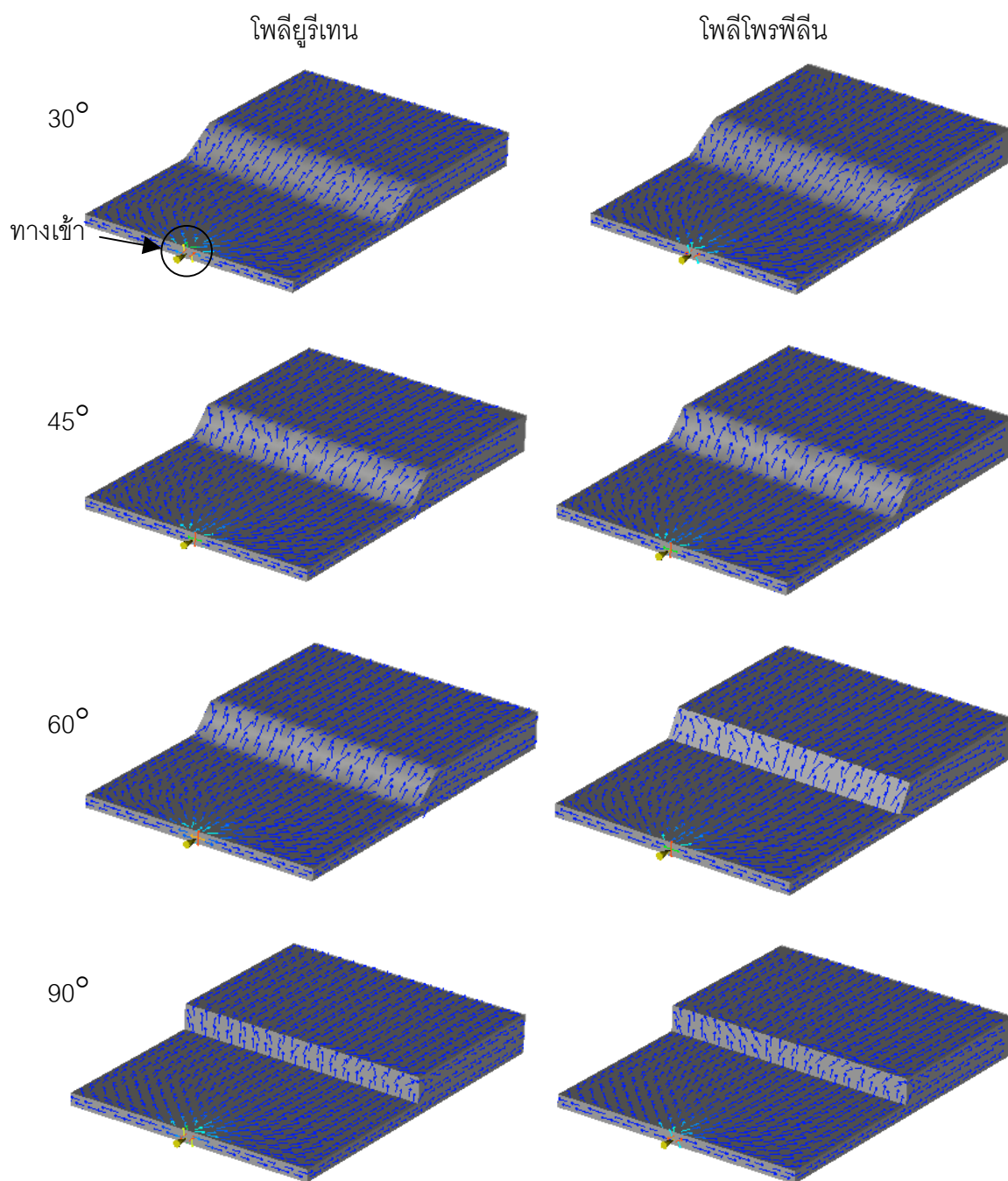
ภาพผนวกที่ ก4 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 10 และความชัน (θ) เท่ากับ 30°, 45°, 60° และ 90° จาก แถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



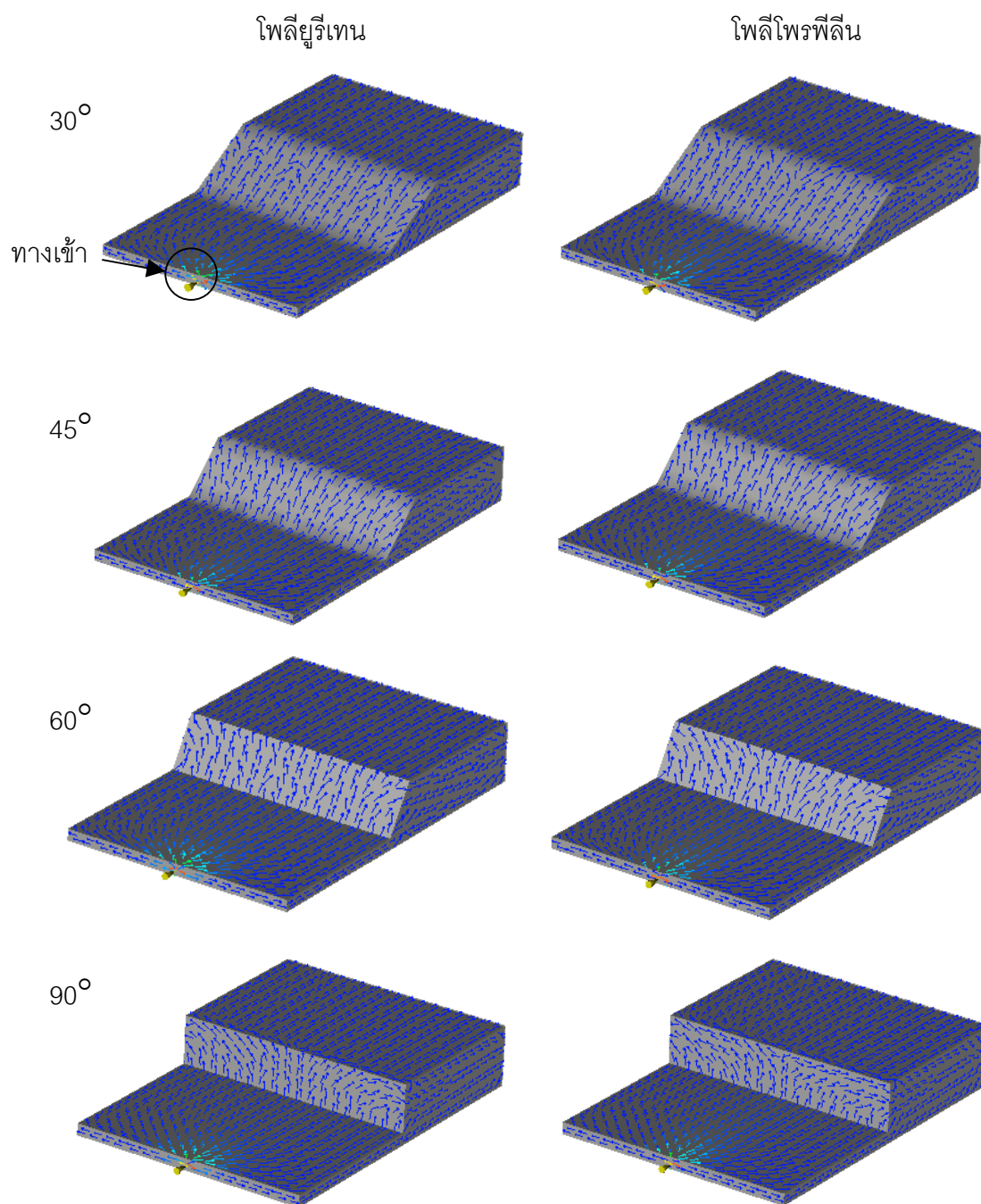
ภาพผนวกที่ ก5 การเกิด Air Trap ของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 20 และความชัน (θ) เท่ากับ 30°, 45°, 60° และ 90° จาก แถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



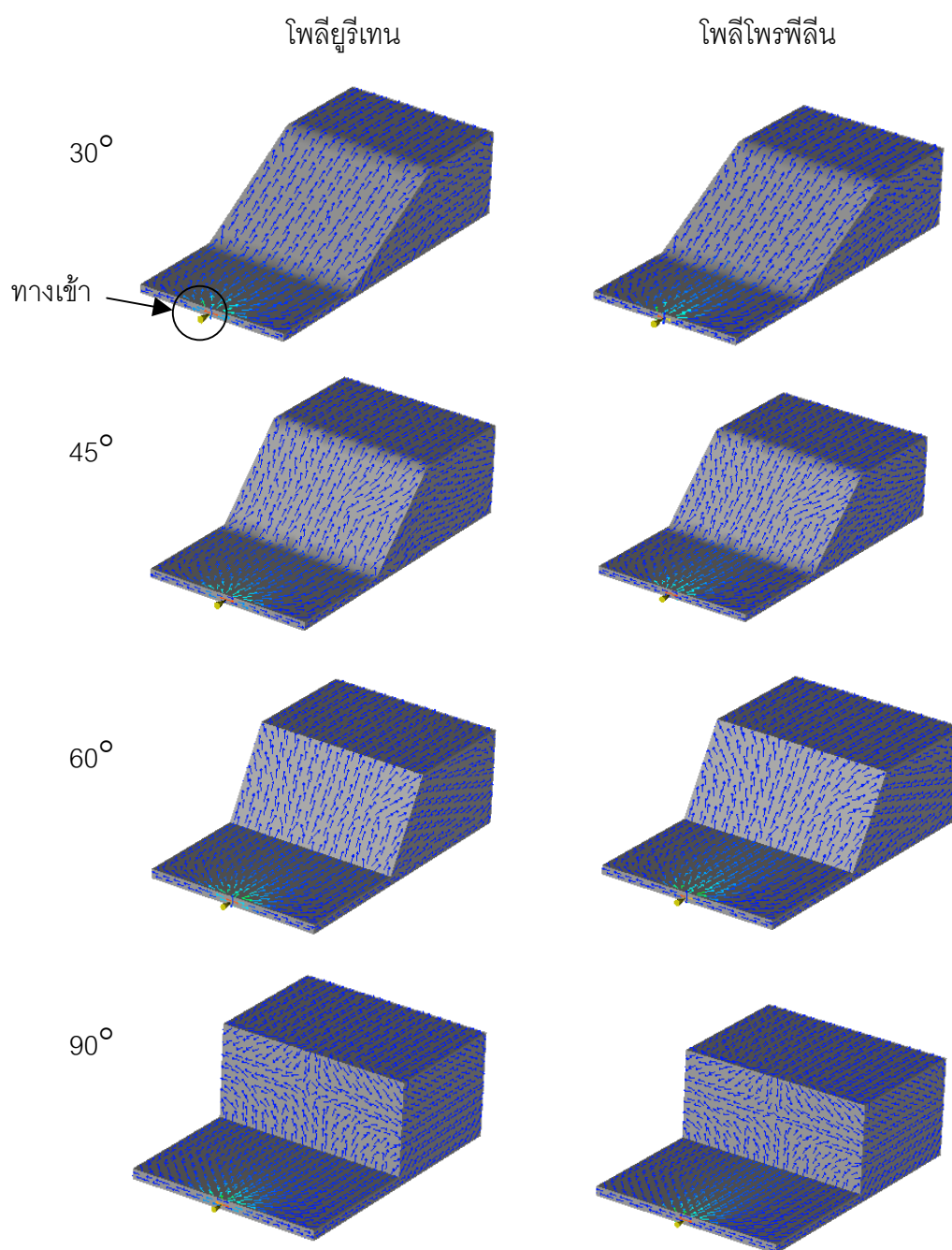
ภาพผนวกที่ ๖ ทิศทางการไหลของคลื่นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 2 และความชัน (θ) เท่ากับ 30° , 45° , 60° และ 90° จากแถบบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



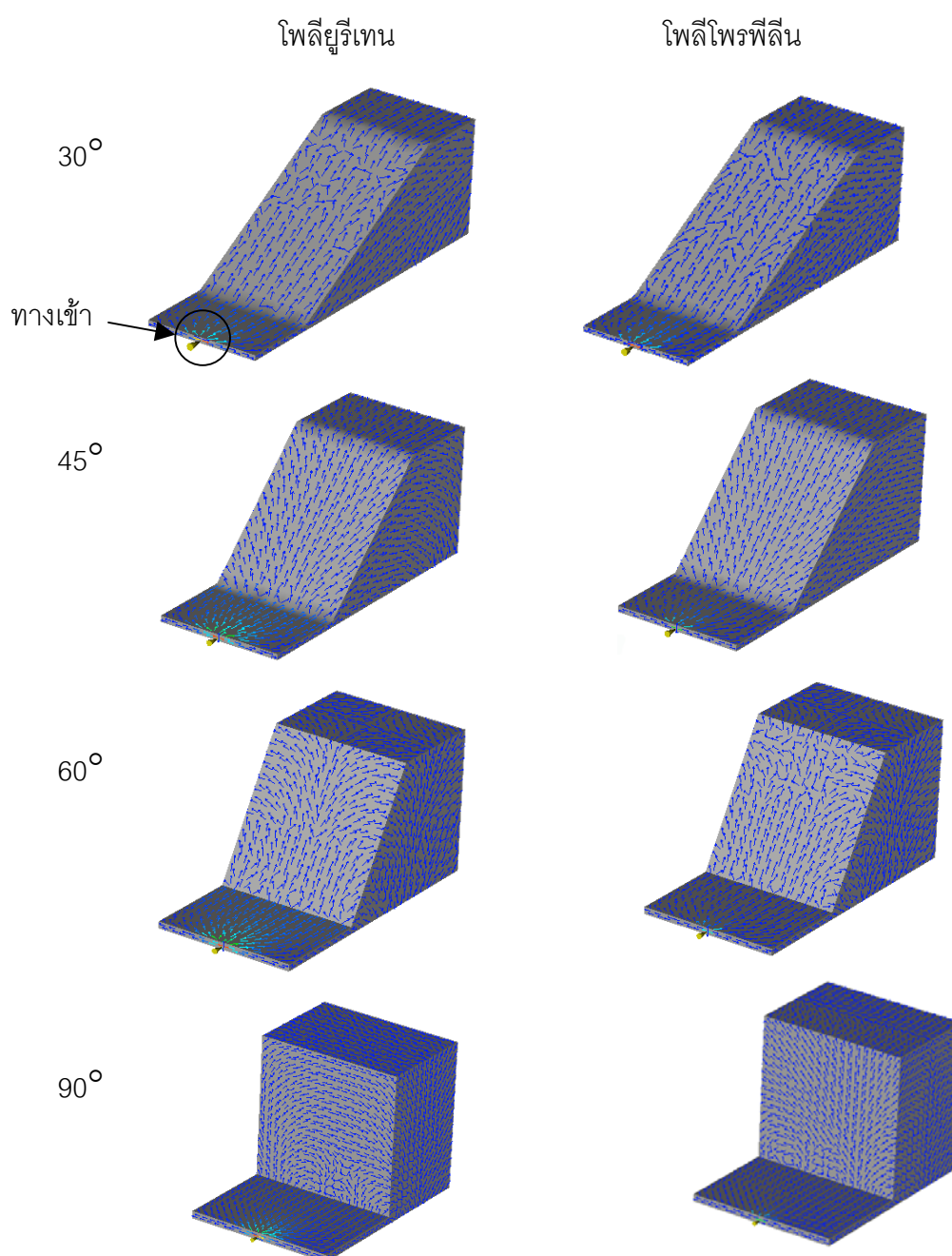
ภาพผนวกที่ ก7 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทิลีน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 3 และความชัน (θ) เท่ากับ 30° , 45° , 60° และ 90° จากแนวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ ๘ ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลียูรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 5 และความชัน (θ) เท่ากับ 30° , 45° , 60° และ 90° จากแถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



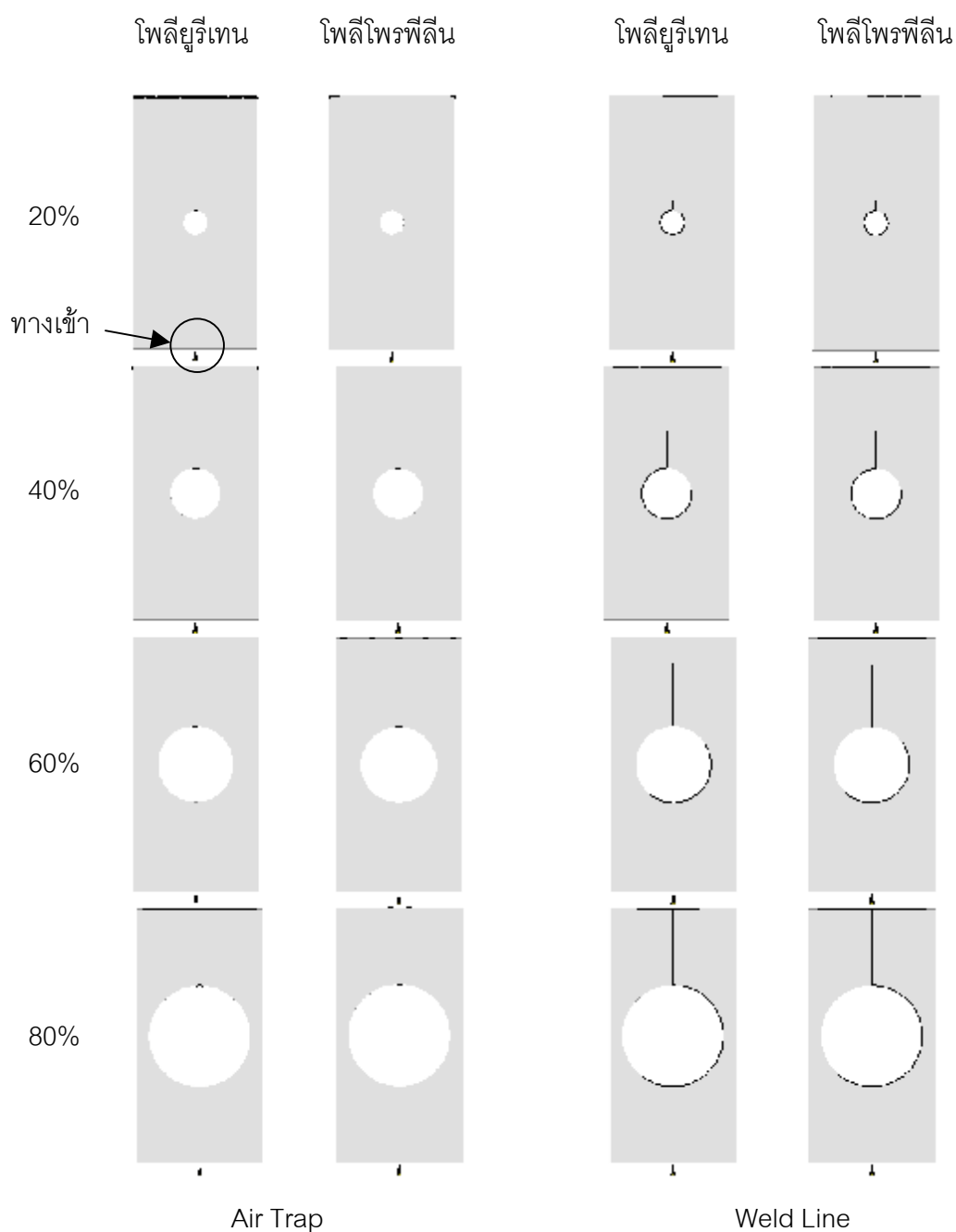
ภาพผนวกที่ ก9 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 10 และความชัน (θ) เท่ากับ 30° , 45° , 60° และ 90° จากแถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร



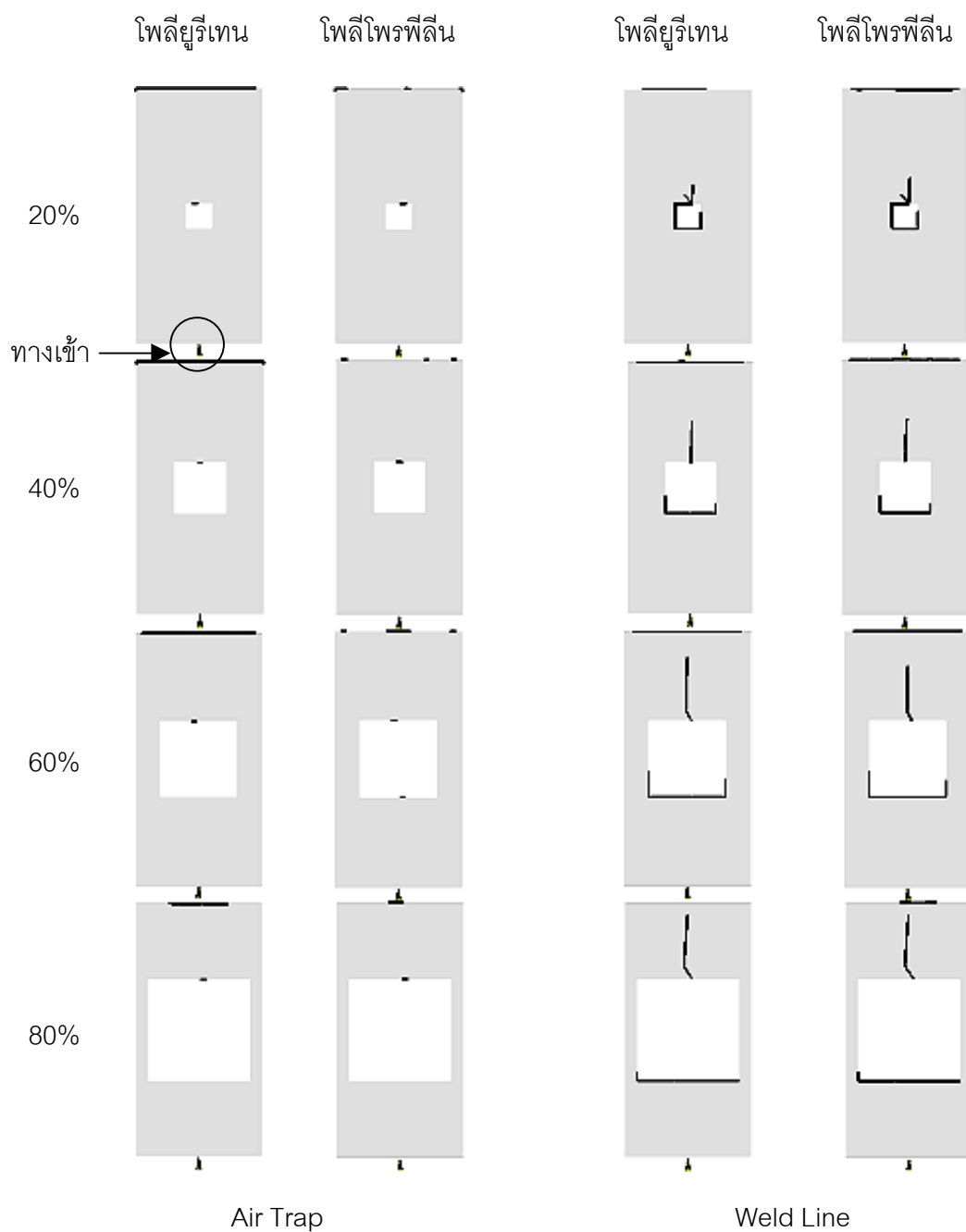
ภาพผนวกที่ 10 ทิศทางการไหลของชิ้นงานโพลีเอทรีเทน (ซ้าย) และโพลีโพรพิลีน (ขวา) เมื่อ T_2/T_1 เท่ากับ 20 และความชัน (θ) เท่ากับ 30° , 45° , 60° และ 90° จากแถวบนมาล่าง ตามลำดับ โดยมีความหนา $T_1 = 5$ มิลลิเมตร และความกว้าง = 100 มิลลิเมตร

ภาคผนวก ข

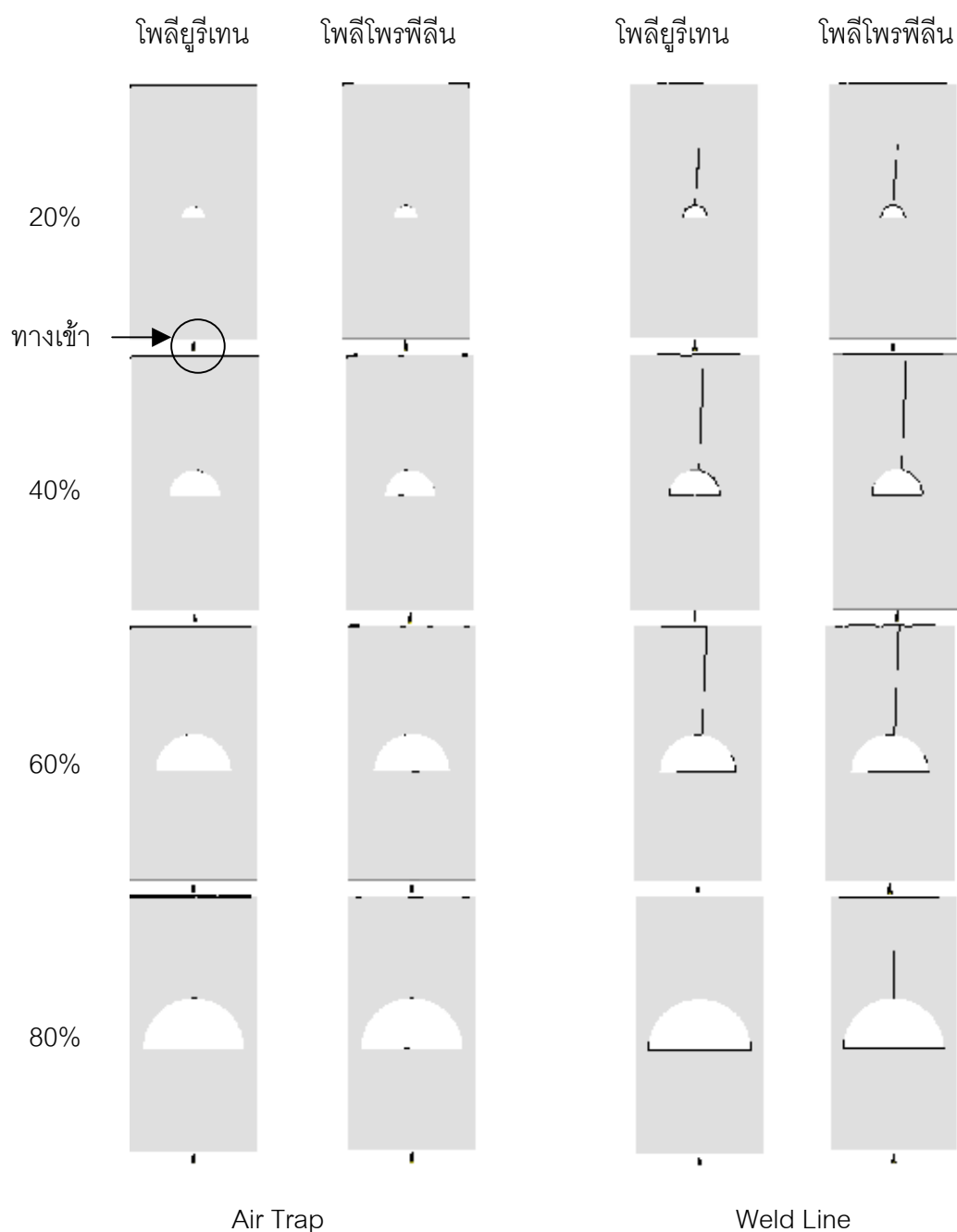
การเปรียบเทียบการเกิด Air Trap และ Weld Line ของการไหลของโพลีเอทิลีน
และโพลีโพรพิลีนผ่านแกนกลางแบบต่างๆ



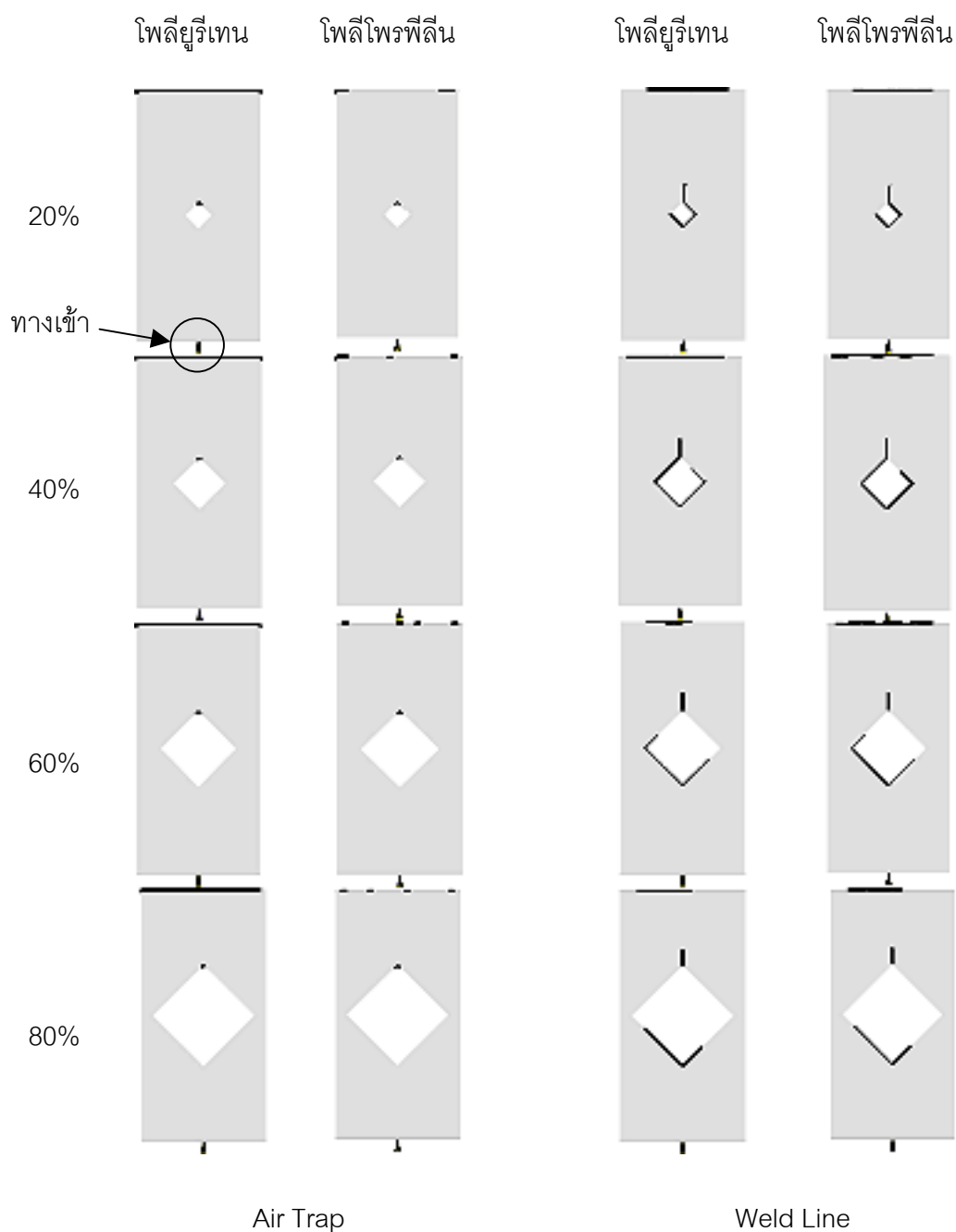
ภาพผนวกที่ ข1 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



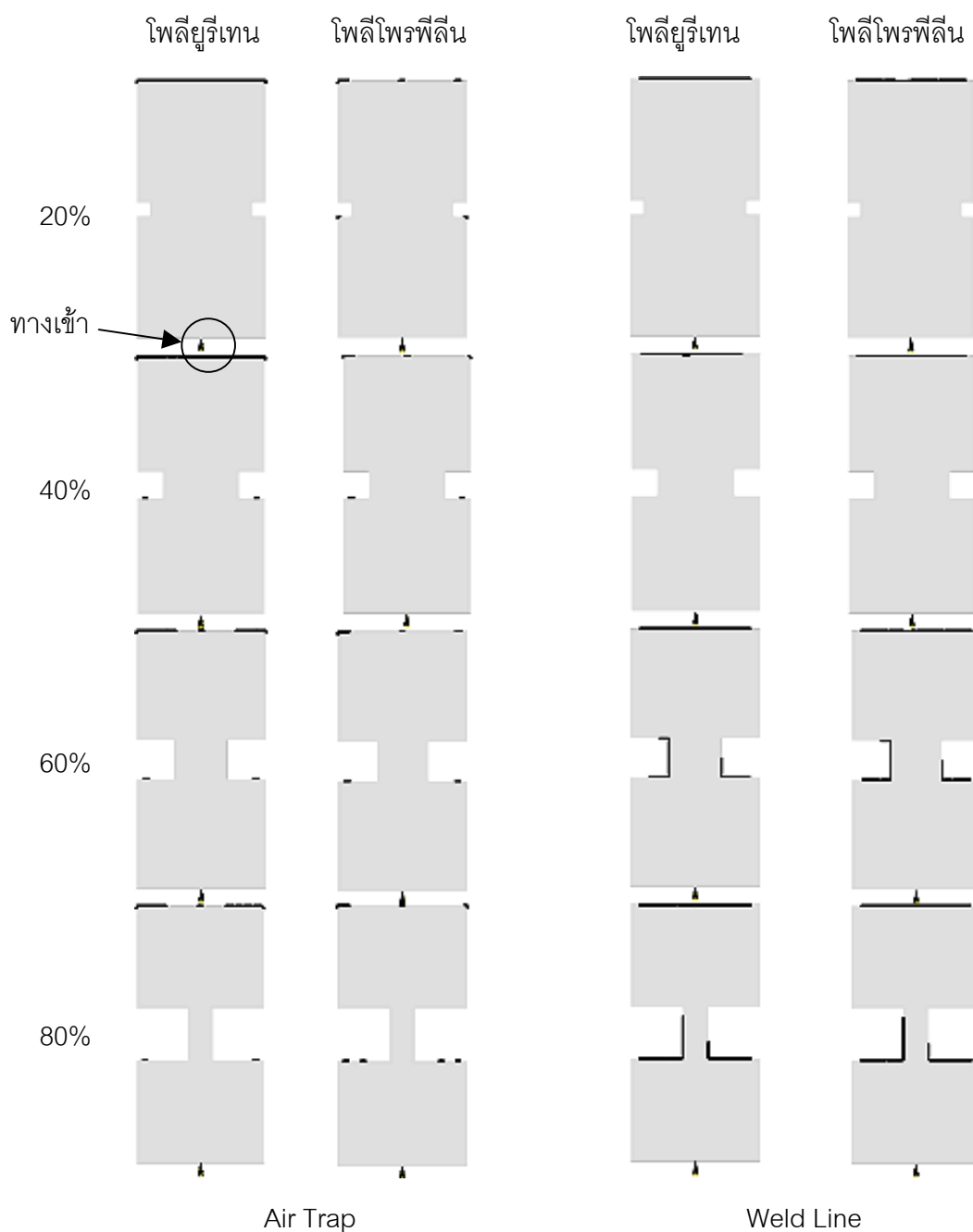
ภาพผนวกที่ ข2 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นสีเหลือง และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



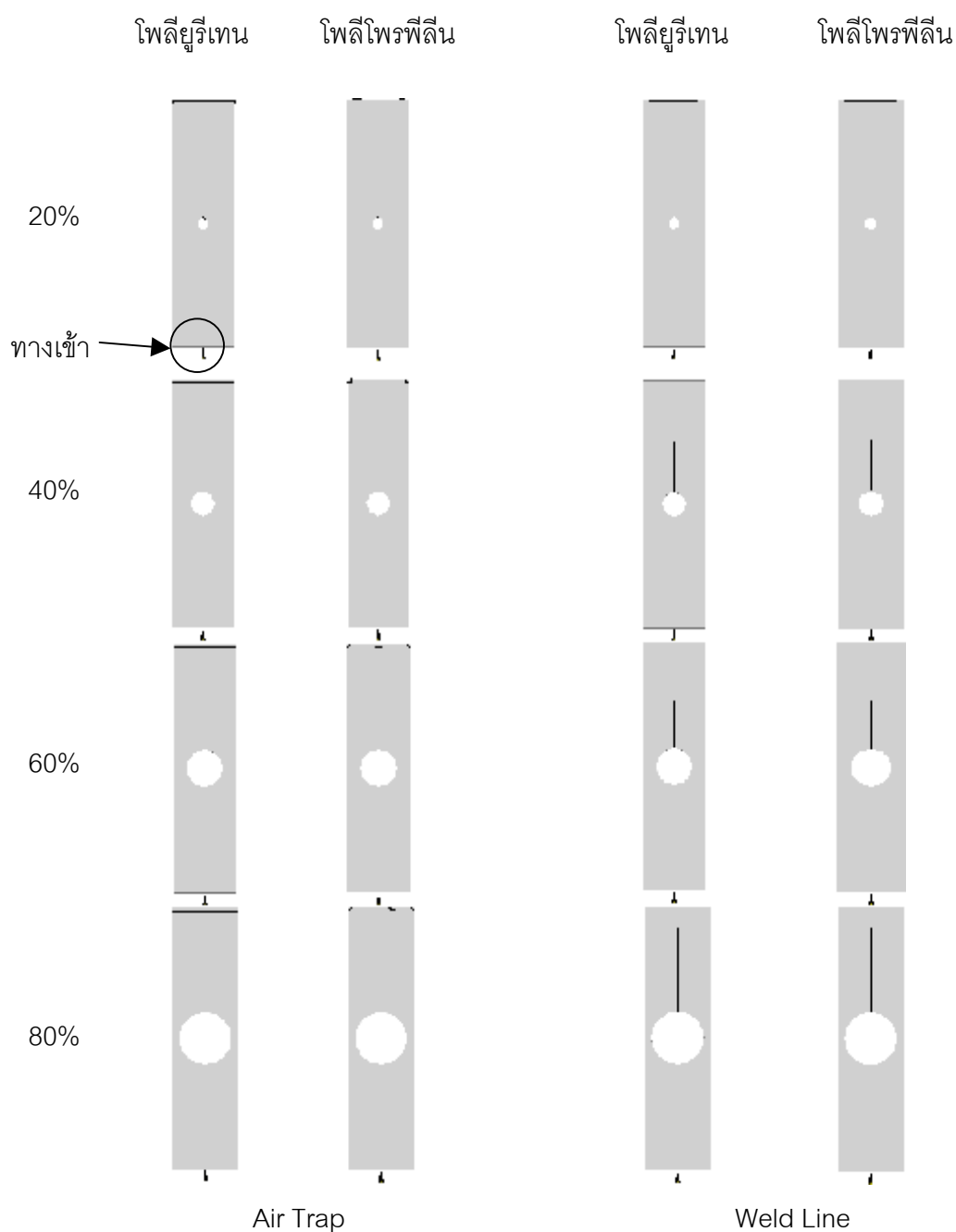
ภาพผนวกที่ ข3 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นครึ่งวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



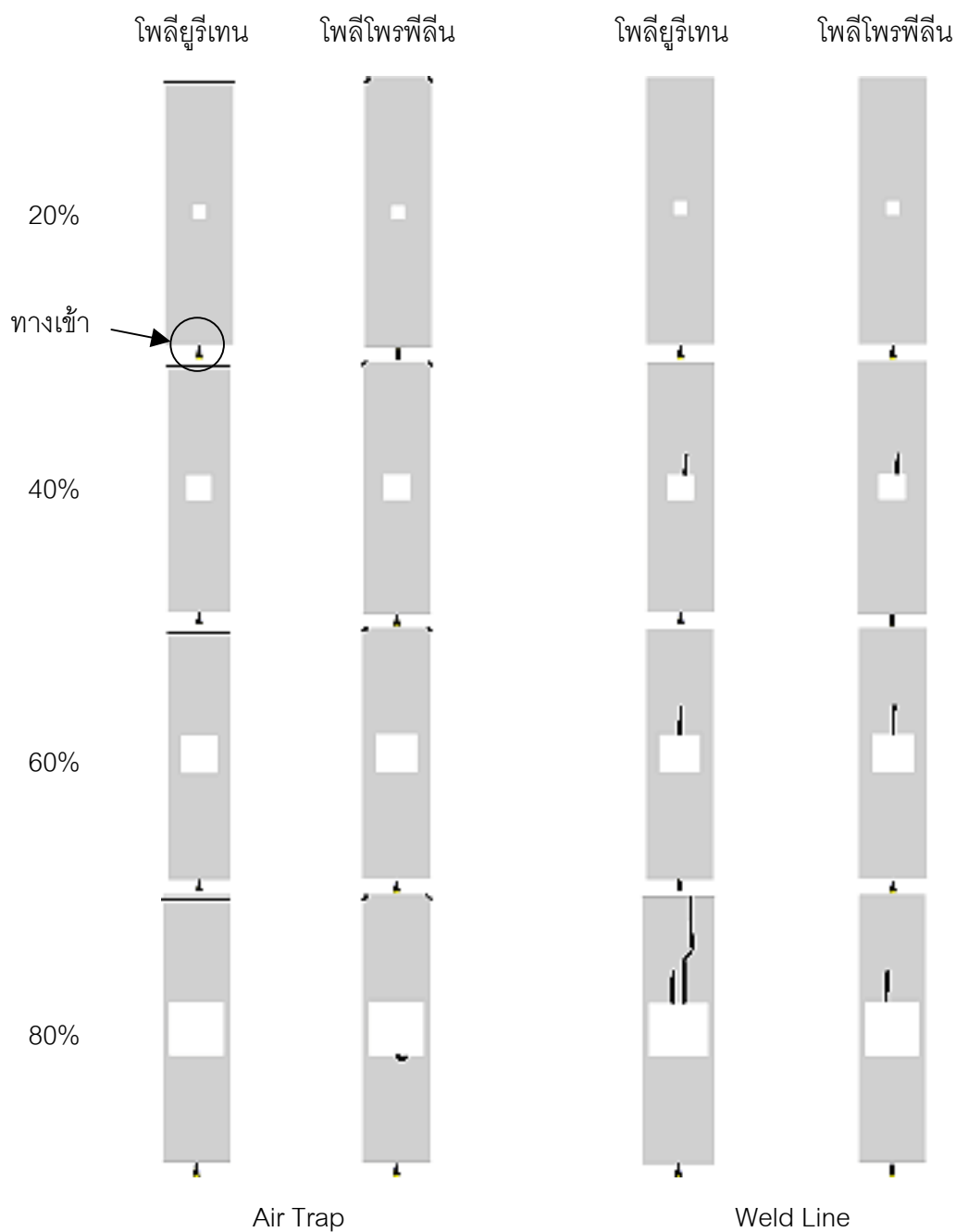
ภาพผนวกที่ ๔ เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นข้าวหลามตัด และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



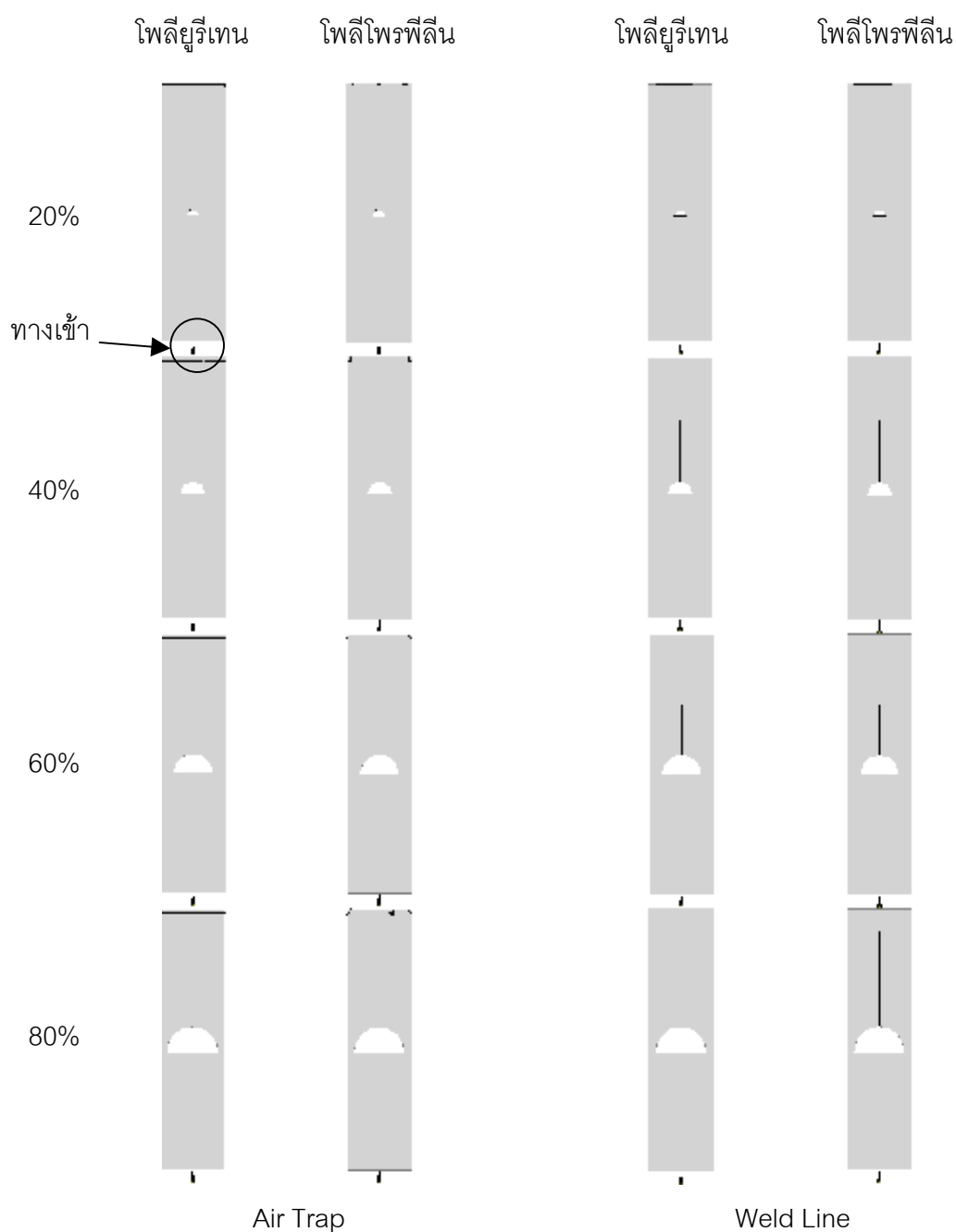
ภาพผนวกที่ ๕ เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 20 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีการเจาะร่องด้านข้าง และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



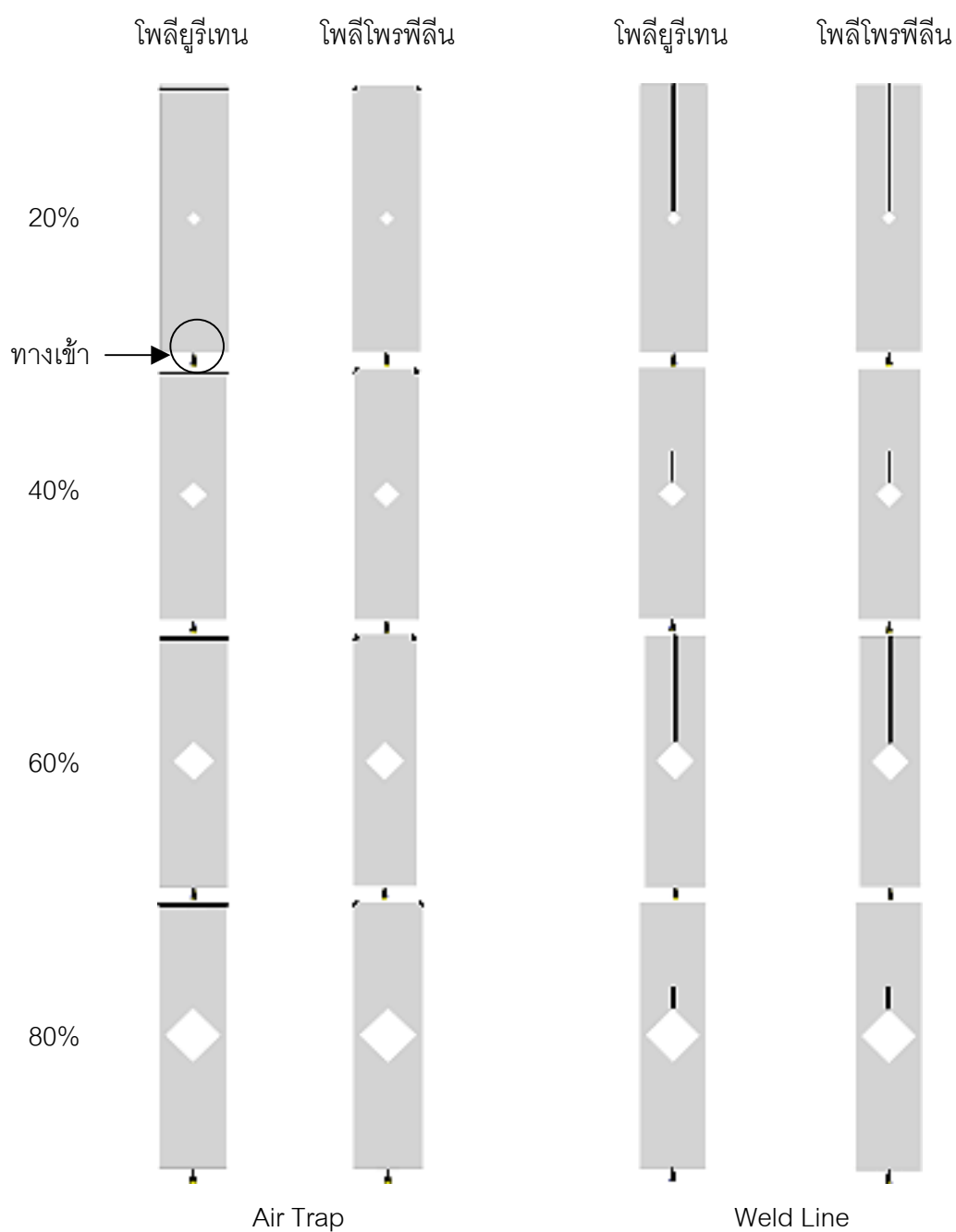
ภาพผนวกที่ ข6 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



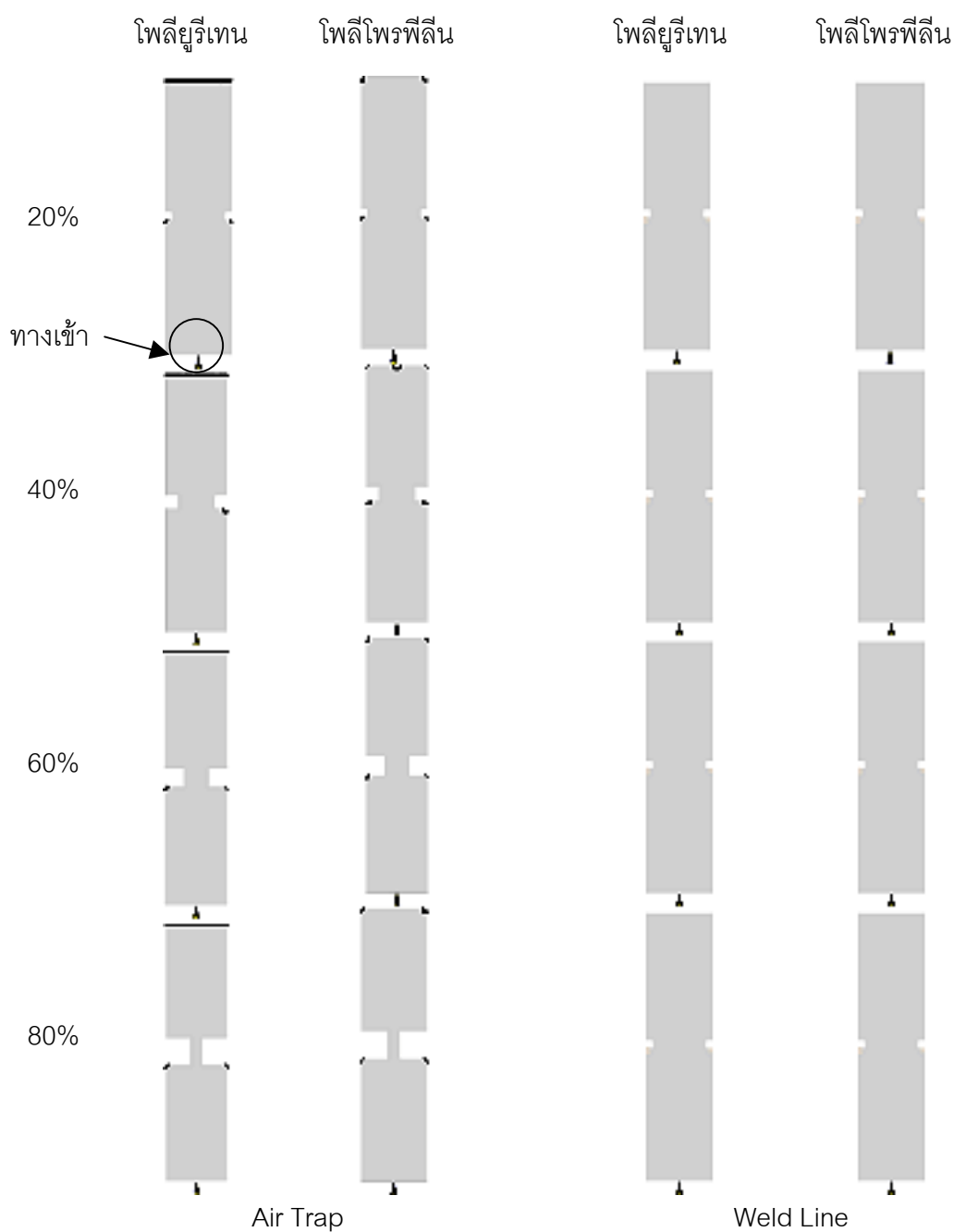
ภาพผนวกที่ ข7 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นสี่เหลี่ยม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



ภาพผนวกที่ ๑๘ เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นครึ่งวงกลม และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



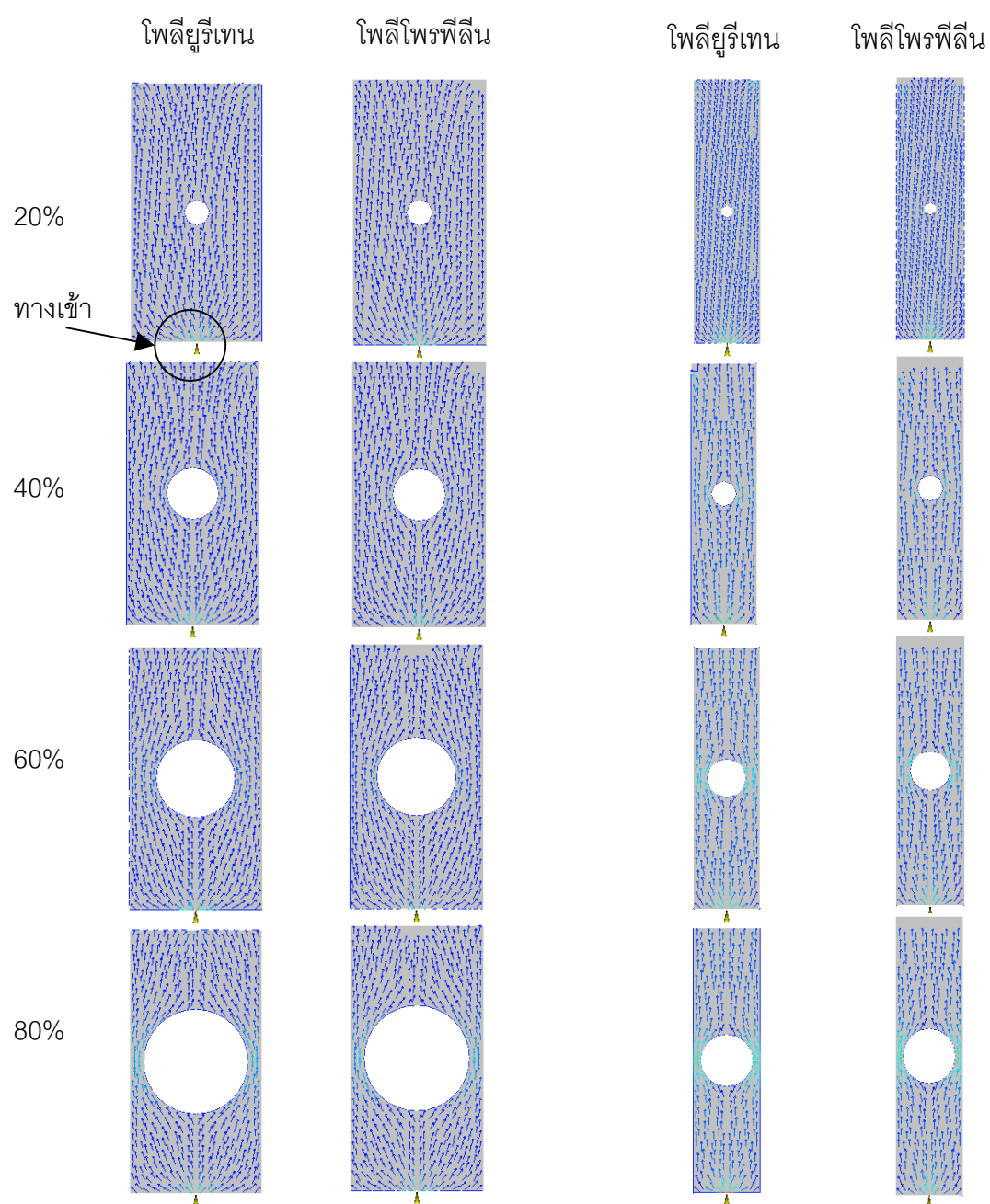
ภาพผนวกที่ ๑๙ เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีแกนกลางเป็นข้าวหลามตัด และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



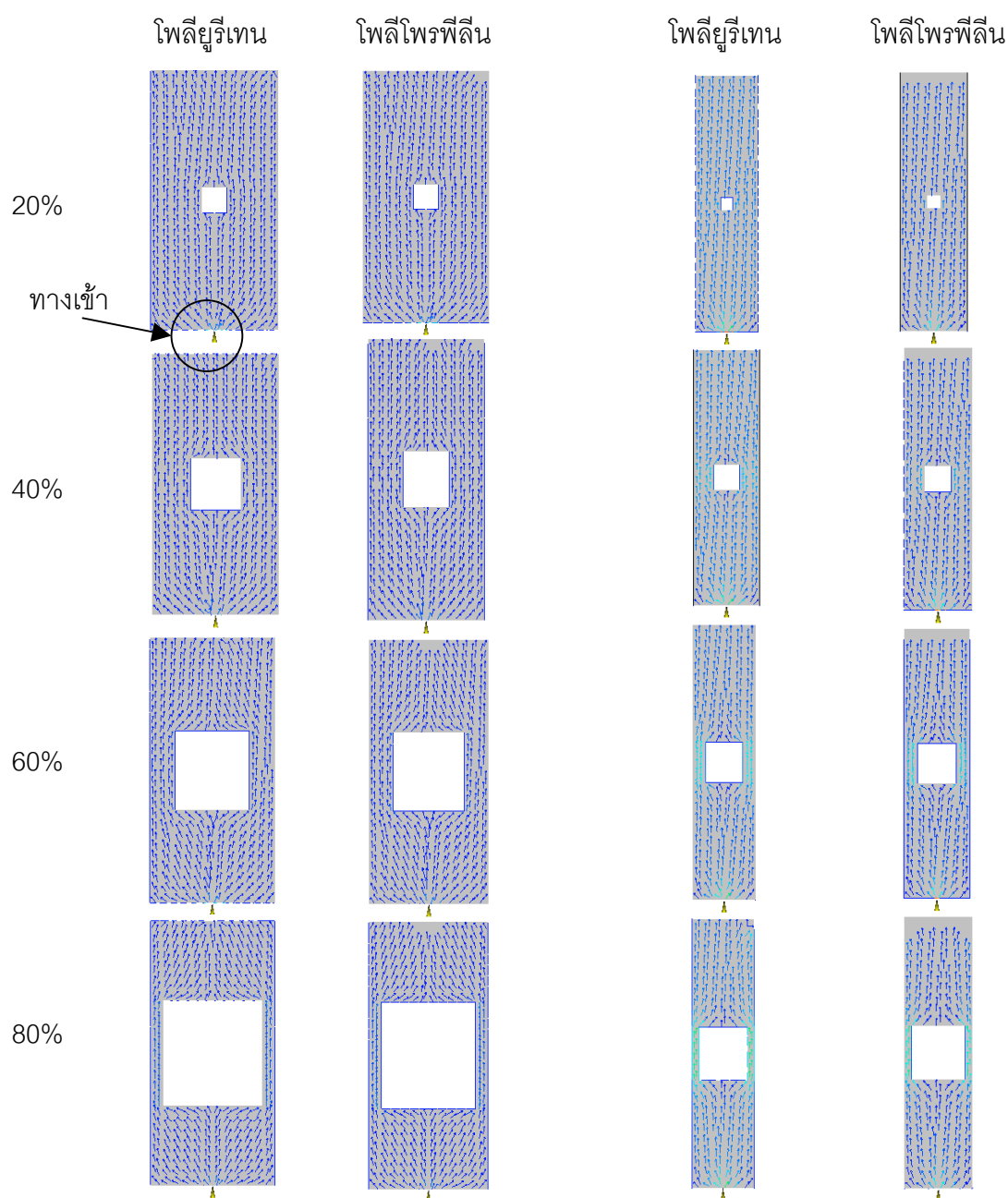
ภาพผนวกที่ ข10 เปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของการเกิด Air Trap (2 แถวซ้าย) และ Weld Line (2 แถวขวา) ที่เกิดในชิ้นงานโพลีเอทิลีนและโพลีโพรพิลีน ความยาว 40 มิลลิเมตร (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) ที่มีการเซาะร่องด้านข้าง และพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%

ภาคผนวก ค

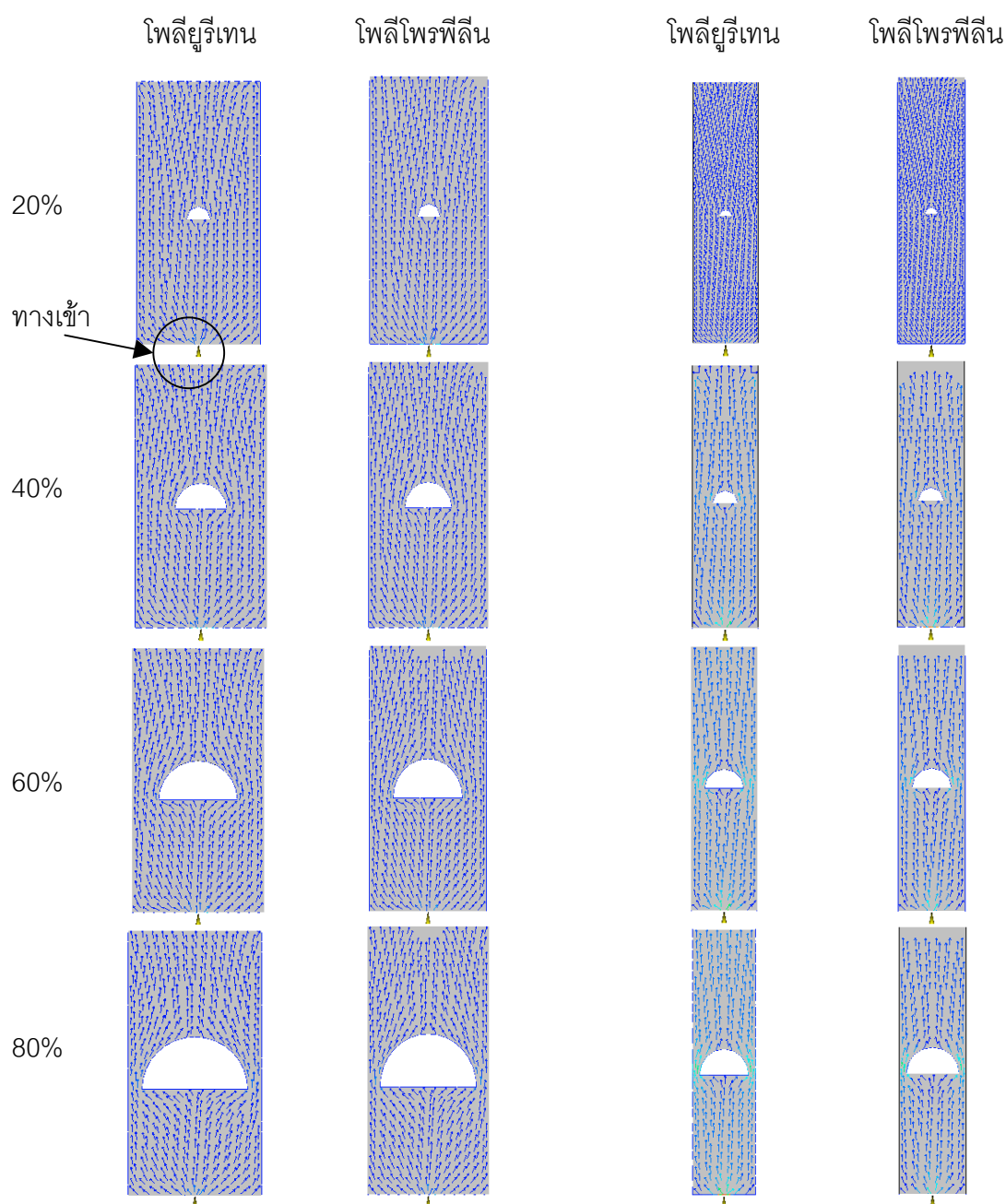
การเปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลีเอธิลีนและโพลีโพรพิลีนผ่านแกนกลาง
แบบต่างๆ



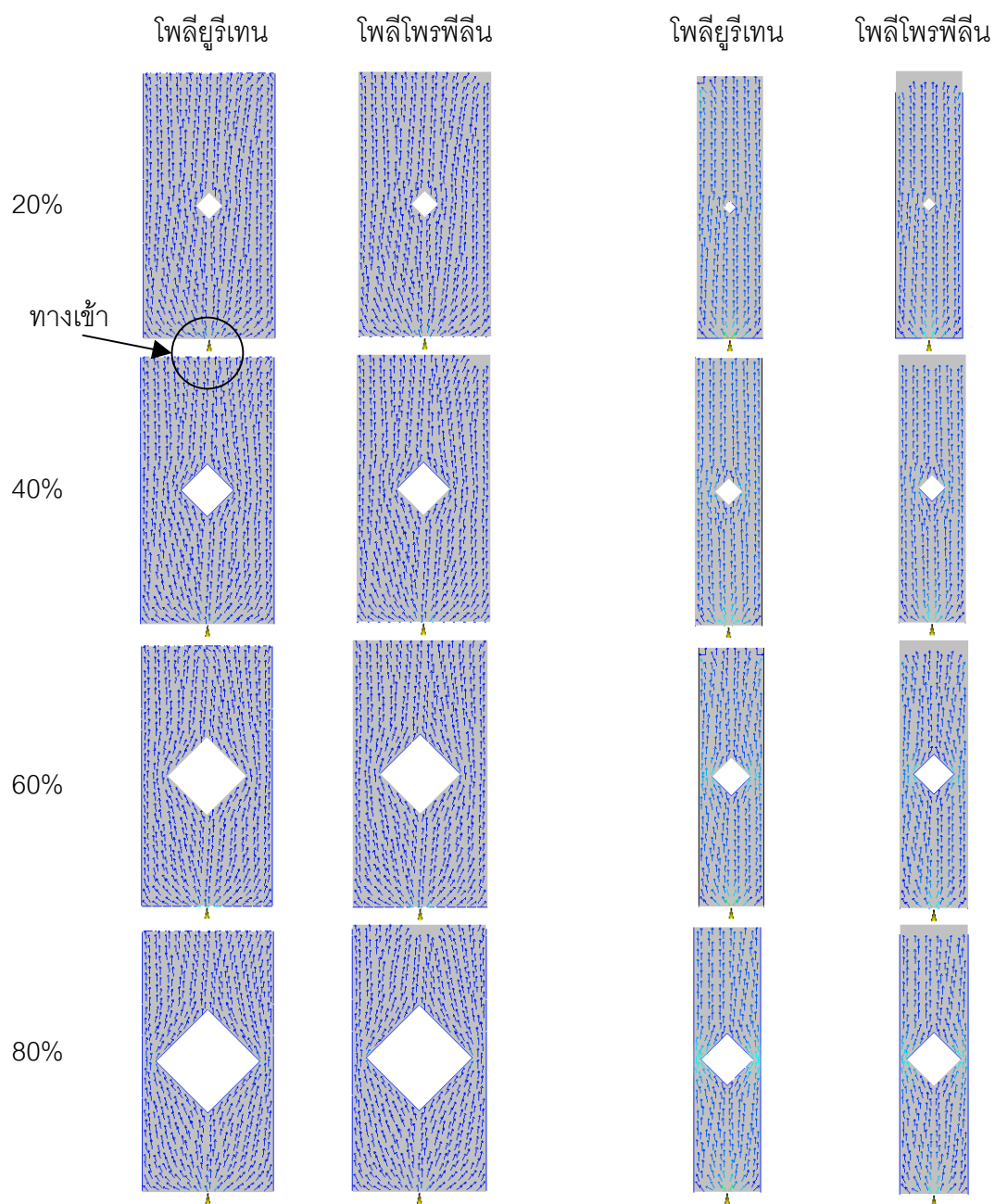
ภาพผนวกที่ ค1 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน
 แขนกลางวงกลม ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40
 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร)
 เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแขนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



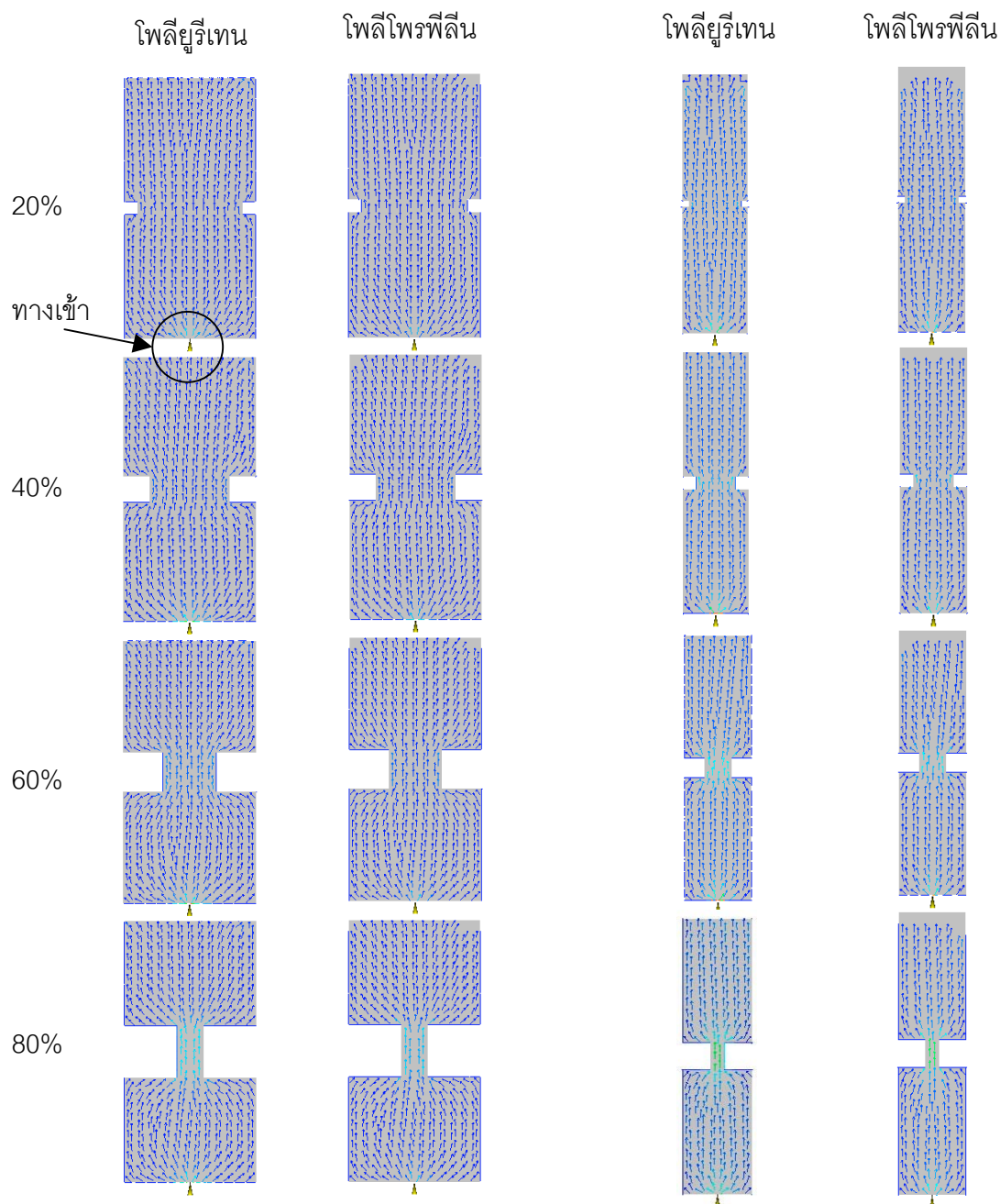
ภาพผนวกที่ ค2 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน แกนกลางสี่เหลี่ยม ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



ภาพผนวกที่ ค3 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน
แกนกลางครึ่งวงกลม ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40
มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร)
เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



ภาพผนวกที่ ค4 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน
 แขนกลางข้าวหลามตัด ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถวซ้าย) และ 40
 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร)
 เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแขนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%



ภาพผนวกที่ ค5 เปรียบเทียบทิศทางการไหลของโพลียูรีเทนและโพลีโพรพิลีน เมื่อไหลผ่าน แกนกลางที่มีการเจาะรูทางด้านข้าง ของชิ้นงานยาว 20 มิลลิเมตร (2 แถว ซ้าย) และ 40 มิลลิเมตร (2 แถวขวา) (ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร) เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแกนกลาง เท่ากับ 20%, 40%, 60% และ 80%

ภาคผนวก ง
การคำนวณอื่นๆ

1. การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการเปิดแม่พิมพ์

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการเปิดแม่พิมพ์นี้ จากภาพผนวกที่ ง1 แสดงค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม Pro/ENGINEER ประกอบด้วย น้ำหนักของแม่พิมพ์ Center of Gravity และ Principal Moments of Inertia เป็นต้น

```
VOLUME = 4.4899636e+06 MM^3
SURFACE AREA = 4.0811972e+05 MM^2
DENSITY = 2.6300000e-06 KILOGRAM / MM^3
MASS = 1.1808604e+01 KILOGRAM

CENTER OF GRAVITY with respect to _CORE2 coordinate frame:
X Y Z 2.3974392e+02 8.2211796e+01 1.4465660e+02 MM
PRINCIPAL MOMENTS OF INERTIA: (KILOGRAM * MM^2)
I1 I2 I3 8.5290617e+04 1.7756268e+05 2.4573682e+05
```

ภาพผนวกที่ ง1 ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม Pro/ENGINEER

1.1 แม่พิมพ์มีการเปิดและปิดแบบเชิงเส้น

การเปิดและปิดแม่พิมพ์แบบเชิงเส้น หรือ ขึ้นลง มีข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางผนวกที่ ง1

ตารางผนวกที่ ง1 ค่าที่ใช้คำนวณการเปิดแม่พิมพ์แบบเชิงเส้น

รายละเอียดของแม่พิมพ์	ค่าที่ใช้
น้ำหนักของ Core, m (kg.)	11.8
ระยะการเคลื่อนที่แนวตั้ง, h (m.)	0.35
เวลาการเคลื่อนที่, t (sec)	2

พลังงานศักย์

$$\begin{aligned}
 PE &= mgh \\
 &= (11.8)(9.81)(0.35) \\
 &= 40.51 \text{ Joules}
 \end{aligned}$$

พลังงานจลน์

$$\begin{aligned}
 KE &= \frac{1}{2}mv^2 \\
 &= \frac{1}{2}(11.80)\left(\frac{0.35}{2}\right)^2 \\
 &= 0.181 \text{ Joules}
 \end{aligned}$$

พลังงานที่ใช้ในการเปิดแม่พิมพ์ (E_1)

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_p + E_k \\
 &= 40.51 + 0.181 \\
 &= 40.696 \text{ Joules}
 \end{aligned}$$

1.2 แม่พิมพ์มีการเปิดและปิดแบบเชิงมุม

การเปิดและปิดแม่พิมพ์แบบเชิงมุม มีข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณดังแสดงในตารางผนวกที่ 2

ตารางผนวกที่ 2 ค่าที่ใช้คำนวณการเปิดแม่พิมพ์แบบเชิงมุม

รายละเอียดของแม่พิมพ์	ค่าที่ใช้
Moment of Inertia, J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	85.20
ระยะจากแกนหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวล, r (m.)	0.145
เวลาการเคลื่อนที่, t (sec)	2
มุมของการเปิด, θ (rad)	$\frac{2}{3}\pi$

พลังงานจลน์

$$\omega = \frac{0.304}{2}$$

$$= 0.152 \text{ rad/sec}$$

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$$= \frac{1}{2} (85.2)(0.152)^2$$

$$= 0.984 \text{ Joules}$$

พลังงานที่ใช้ในการเปิดแม่พิมพ์ (E_2)

$$E_2 = 0.984 \text{ Joules}$$

$$\% \text{ของพลังงานที่ลดลง} = \frac{E_1 - E_2}{E_2} \times 100\%$$

$$= \frac{40.696 - 0.984}{40.696} \times 100\%$$

$$= 97.5 \%$$

2. การคำนวณการสูญเสียวัสดุ ABS จากกระบวนการ Thermoforming

การคำนวณปริมาณวัสดุ ABS ที่ต้องตัดทิ้งนี้ สิ่งสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณา คือ พื้นที่ผิวของแม่พิมพ์ฝั่ง Core และ พื้นที่ผิวของชิ้นงาน ABS ที่คำนวณได้จากโปรแกรม Pro/ENGINEER

พื้นที่ผิวของแผ่น ABS โดยคำนวณจากพื้นที่ของแม่พิมพ์ด้าน Core

$$A_1 = \text{กว้าง} \times \text{ยาว}$$

$$= 200 \times 420$$

$$= 84,000 \text{ mm}^2$$

พื้นที่ผิวของชิ้นงาน ABS

$$A_2 = 62,740 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \% \text{ของ ABS ที่ถูกตัดออก} &= \frac{A_1 - A_2}{A_2} \times 100\% \\ &= \frac{84,000 - 62,740}{84,000} \times 100\% \\ &= 25.31\% \end{aligned}$$

ประวัติการศึกษาและประสบการณ์

ชื่อ ชลิต อรรถคำภีวงศ์

สถานที่เกิด เขตยานนาวา กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

- ประถมศึกษา โรงเรียนทุ่งมหาเมฆ
- มัธยมศึกษา โรงเรียนวัดสุทธิวราธรรม
- ระดับปริญญาตรี วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2541-2544)
- ระดับปริญญาโท วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2545-2548)

ทุนการศึกษาที่ได้รับ

- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (พ.ศ. 2545-2548)
- ทุนผู้ช่วยสอนจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล (พ.ศ. 2545-2547)
- ทุนผู้ช่วยสอนจากสาขาวิชาไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต (พ.ศ. 2548)

ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน บริษัท Dubuit Far East จำกัด
- ผู้ช่วยวิจัยของโครงการ “การพัฒนาวีธีการออกแบบผลิตภัณฑ์สำหรับการผลิตแบบ RIM” (พ.ศ. 2545-2549) โดยมีผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศัจจาทิพย์ ทศนียพันธ์ุ สกว. และบริษัท เสถียรพลาสติก แอนด์ ไฟเบอร์ จำกัด เป็นผู้ร่วมวิจัยของโครงการ
- นักวิจัย ประจำหน่วยปฏิบัติการวิจัยการออกแบบและผลิตภัณฑ์ (พ.ศ. 2545-2549)