

การศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะสองชนิดโดยใช้การสร้างแบบจำลองผ่าน
โปรแกรมคอมพิวเตอร์

COMPUTER SIMULATION STUDYING OF CO-EXTRUSION PROCESS

นางสาว	กาญจนา	พูลสวัสดิ์
นาย	วชิรวิทย์	ภูนิลมัย
นาย	อดิคุณ	พิริยวัฒนา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

COMPUTER SIMULATION STUDYING OF CO-EXTRUSION PROCESS

KANCHANA	PHOONSAWAD
WHACHIRAWIT	PHUNILAMAI
ARTIKHUN	PERAYAWATANA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

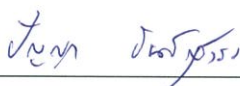
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะสองชนิดโดยใช้การสร้างแบบจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

COMPUTER SIMULATION STUDYING OF CO-EXTRUSION PROCESS

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|-----------|-----------|------------|-----------------------|
| 1. นางสาว | กาญจนา | พูลสวัสดิ์ | รหัสประจำตัว 54010095 |
| 2. นาย | วชิรวิทย์ | ภูนิลมัย | รหัสประจำตัว 54011107 |
| 3. นาย | อติคุณ | พริยวัฒนา | รหัสประจำตัว 54011460 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ)

การศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะสองชนิดโดยใช้การสร้างแบบจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

นางสาวกาญจนา พูลสวัสดิ์	52010129
นายอชิรวิทย์ ภูนิลมัย	54011107
นายอดิคุณ พีริวัฒน์นา	54011460
ผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2557	

บทคัดย่อ

กระบวนการอัดขึ้นรูปร่วม (Co-extrusion) เป็นกระบวนการอัดขึ้นงานที่ใช้วัสดุมากกว่าหนึ่งชนิด ซึ่งเรียงตัวอยู่ในลักษณะซ้อนกันเป็นชั้น และมีโครงสร้างที่เกิดการประสานกันระหว่างวัสดุต่างชนิดกันในกระบอกอัดผ่านแม่พิมพ์หรือตาย เพื่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะออกมาในลักษณะทรงกระบอก มีวัสดุสองชนิดซ้อนกันเป็นชั้นในชิ้นงานเดี่ยวหรือไบแมททีเรียล (Bi-material) แบ่งเป็นวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก โดยงานวิจัยได้มุ่งศึกษาตัวแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการและส่งผลต่อความบกพร่องภายในชิ้นงานของช่องว่าง (Gap) ระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก จากงานวิจัยพบว่า อัตราส่วนปิวของ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก โดยอาศัยโปรแกรม MSC Marc Mentat ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ไขปัญหา นอกจากนี้ยังพบว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถกำหนดและปรับค่าตัวแปรได้อย่างอิสระ ซึ่งการทดลองจริงทำได้ยาก ค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลานาน

คำหลัก: กระบวนการอัดขึ้นรูปร่วม, ไบแมททีเรียล, ช่องว่าง

COMPUTER SIMULATION STUDYING OF CO-EXTRUSION OR CO-DRAWING PROCESS

Kanchana	Phoonsawad	54010095
Whachirawit	Phunilamai	54011107
Artikhun	Perayawatana	54011460
Assis.Prof. Dr.Panya Kansuwan	Advisor	
Year 2557		

ABSTRACT

Co-extrusion is the process of cold forming that is one of the most used metal forming process in the industrial field, the cross-section of bi-metal is reduced by pushing it through a die.

The research is study variable affecting the gap in bi-material by MSC Marc Mentat. The result found the Poisson's Ratio will affect the gap between the material and the material in the outer layer. Moreover, the numerical simulation can define and adjust the variables independently to save time and reduce the expenses in the experimental.

Keywords: Co-extrusion; Bi-material; Gap

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยมีผศ.ดร.ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำในทุกๆเรื่องรวมทั้งแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาเมื่องานเกิดปัญหาตอนทำการวิจัย ตลอดจนความสนใจ เอาใจใส่ คอยดูแลตลอดการศึกษาทำวิจัยโครงการนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านคณาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณนางสาวนภัทร์ เกียรติกิจवालไกล และนางสาวทัฬหฬศมน ดุสิตโคภิตวงศ์ รุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำปรึกษาทางด้านรูปเล่มและเนื้อหาทางทฤษฎีแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ MSC Software ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรม MSC Marc Mentat Student Edition ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของงานวิจัย

และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญในชีวิตคือบิดา มารดา ที่เป็นผู้ให้กำเนิด อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และคอยสนับสนุน ให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มกำลังความสามารถของท่านที่ทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบให้ บิดา มารดา ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้ข้าพเจ้ามาตลอด ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นางสาวกาญจนา พูลสวัสดิ์
นายวชิรวิทย์ ภูนิลมัย
นายอดิคุณ พิรยวัฒนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ขอบเกรน.....	3
2.1 การเกิดขอบเกรน.....	3
2.2 การวิเคราะห์ขอบเกรน.....	4
บทที่ 3 โมเลกุลาร์ไดนามิกส์.....	9
3.1 บทนำ.....	9
3.2 โมเลกุลาร์ไดนามิกส์ (molecular dynamics)	9
3.3 พื้นฐานของเครื่องมือในการคิดค่าพลังงาน.....	10
3.4 The Lennard-Jones potential.....	10
3.5 Potential truncation and long-range corrections.....	11
3.6 Periodic boundary conditions.....	11
3.7 Time integration algorithm.....	12
3.8 The Verlet algorithm.....	12
3.9 Predictor-corrector algorithm.....	13
3.10 Running, measuring, analyzing.....	14
3.11 Interatomic potentials.....	16
3.12 วิธี Embedded.....	18
บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	21
4.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกแบบ FCC.....	21
4.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกแบบ BCC.....	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
5.1 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกแบบ FCC.....	41
5.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกแบบ BCC.....	46
บทที่ 6 สรุปผลดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	51
6.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	51
6.2 วิจัยรณผลกรจ้ลอง.....	51
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	51
บรรณานุกรม.....	52
ภาคผนวก.....	53
ภาคผนวก ก.....	53
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	90

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Σ และระนาบ.....	7
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการหาค่าความยาวเกรน.....	23

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแสดง การอัดขึ้นรูปแบบ Direct Extrusion และแบบ Indirect	3
รูปที่ 2.2 รูปแสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันที่เกิดจากการอัดขึ้นรูปผ่านด้ายกับระยะอัดของตัว ดัน.....	3
รูปที่ 3.1 แสดงการ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid – Perfectly Plastic.....	8
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Elastic – Perfectly Plastic.....	8
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic	9
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic.....	9
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Nonlinearly Strain Hardening Plastic	10
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid Nonlinearly Strain Hardening Plastic.....	10
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic - Nonlinearly Strain Hardening Plastic.....	11
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic - Nonlinearly Strain Hardening Plastic.....	11
รูปที่ 3.9 แสดงด้ายเซ็ทพร้อมแม่พิมพ์	12
รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการบีบขึ้นงาน	13
รูปที่ 3.11 แสดงกรรมวิธี Coining และ Embossing	14
รูปที่ 3.12 แสดงแม่พิมพ์แบบ Compound Die	14
รูปที่ 3.13 แม่พิมพ์แบบ Progressive Die	15
รูปที่ 3.14 แสดงกลไกของเครื่องกดชนิดต่างๆ	16
รูปที่ 3.15 Burr และ Rollover ที่เกิดขึ้นในงานเจาะรู	17
รูปที่ 3.16 ข้อแนะนำในกรรมวิธี Blanking	18
รูปที่ 3.17 ข้อแนะนำในกรรมวิธี piercing	19
รูปที่ 3.18 ข้อแนะนำในกรรมวิธี Bending	20
รูปที่ 3.19 ข้อแนะนำในกรรมวิธี Drawing	20
รูปที่ 3.20 การจัดวางแลพการปรับเปลี่ยนแบบขึ้นงานเพื่อลดเศษวัสดุ.....	21
รูปที่ 3.21 (a) เจาะรูก่อนพับ, (b) พับก่อนแล้วเจาะรู, (c) เจาะรูก่อนแล้วพับโดยขยายรูใดรูหนึ่งให้ กว้างขึ้น, (d) เจาะรูก่อนแล้วพับโดยมีรูยึดขึ้นงานในการพับ.....	21
รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของรูปร่าง Mesh, Element และ Node	22

รูปที่ 4.2	แผนภาพการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง.....	24
รูปที่ 4.3	ชนิดของเอลิเมนต์พื้นฐาน	25
รูปที่ 5.1	แสดงแผนภาพโครงข่ายเอลิเมนต์ของชิ้นงาน.....	29
รูปที่ 5.2	แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใส่ค่าคุณสมบัติของวัสดุแล้ว.....	29
รูปที่ 5.3	แสดงผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	30
รูปที่ 6.1	กราฟแสดงค่าแรงและระยะยึดจากงานวิจัยของ M. Noorani-Azad	32
รูปที่ 6.2	กราฟแสดงค่าแรงและระยะยึดของตัวต้นที่ได้จากโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ M. Noorani-Azad	32
รูปที่ 6.3	แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat.....	33
รูปที่ 6.4	แสดงถึงหน้าต่างคำสั่งในโปรแกรม MSC Marc Mentat.....	33
รูปที่ 6.5	แสดงลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานก่อนการอัดขึ้นรูป จากโปรแกรม MSC Marc Mentat.....	34
รูปที่ 6.6	แสดงถึงผิวสัมผัสระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกในลักษณะที่มีช่องว่างระหว่างวัสดุ.....	35
รูปที่ 6.7	แสดงถึงผิวสัมผัสระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกในลักษณะที่ไม่มีช่องว่างระหว่างวัสดุ.....	35
รูปที่ 6.8	แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก.....	35
รูปที่ 6.9	แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก (ต่อ)	36
รูปที่ 6.10	แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก (ต่อ)	37
รูปที่ ก.1	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Geometry & Mesh.....	43
รูปที่ ก.2	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Table and Coordinate systems.....	43
รูปที่ ก.3	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Geometric & Properties.....	43
รูปที่ ก.4	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Axis symmetric.....	44
รูปที่ ก.5	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Materials Properties.....	44
รูปที่ ก.6	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Boundary Conditions.....	44
รูปที่ ก.7	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Contact.....	45

รูปที่ 4.2	แผนภาพการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง.	24
รูปที่ 4.3	ชนิดของเอลิเมนต์พื้นฐาน	25
รูปที่ 5.1	แสดงแผนภาพโครงข่ายเอลิเมนต์ของชิ้นงาน.....	29
รูปที่ 5.2	แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใส่ค่าคุณสมบัติของวัสดุแล้ว.....	29
รูปที่ 5.3	แสดงผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	30
รูปที่ 6.1	กราฟแสดงค่าแรงและระยะอัดจากงานวิจัยของ M. Noorani-Azad	32
รูปที่ 6.2	กราฟแสดงค่าแรงและระยะอัดของตัวต้นที่ได้จากโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ M. Noorani-Azad	32
รูปที่ 6.3	แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat.....	33
รูปที่ 6.4	แสดงถึงหน้าต่างคำสั่งในโปรแกรม MSC Marc Mentat.....	33
รูปที่ 6.5	แสดงลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานก่อนการอัดขึ้นรูป จากโปรแกรม MSC Marc Mentat.....	34
รูปที่ 6.6	แสดงถึงผิวสัมผัสระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกในลักษณะที่มีช่องว่างระหว่างวัสดุ.....	35
รูปที่ 6.7	แสดงถึงผิวสัมผัสระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกในลักษณะที่ไม่มีช่องว่างระหว่างวัสดุ.....	35
รูปที่ 6.8	แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก.....	35
รูปที่ 6.9	แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก (ต่อ)	36
รูปที่ 6.10	แสดงความความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก (ต่อ)	37
รูปที่ ก.1	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Geometry & Mesh.....	43
รูปที่ ก.2	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Table and Coordinate systems.....	43
รูปที่ ก.3	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Geometric & Properties.....	43
รูปที่ ก.4	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Axis symmetric.....	44
รูปที่ ก.5	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Materials Properties.....	44
รูปที่ ก.6	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Boundary Conditions.....	44
รูปที่ ก.7	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Contact.....	45
รูปที่ ก.8	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Mesh Adaptivity.....	46
รูปที่ ก.9	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Global Remeshing.....	46
รูปที่ ก.10	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Results.....	47
รูปที่ ก.11	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Job.....	48
รูปที่ ก.12	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Run Job.....	48
รูปที่ ก.13	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Loadcase.....	49
รูปที่ ก.14	แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Post File Control.....	49
รูปที่ ข.1	แสดงหลักการทำงานของโปรแกรม.....	52
รูปที่ ข.2	แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Table.....	53

รูปที่ ข.3 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Geometry & Mesh.....	53
รูปที่ ข.4 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Materials Properties.....	54
รูปที่ ข.5 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Job.....	54
รูปที่ ข.6 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Reslts.....	55
รูปที่ ค.1 แสดงหน้าจอแสดงการทำงานของโปรแกรม MSC Marc Mentat.....	57
รูปที่ ค.2 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Geometry & Mesh.....	58
รูปที่ ค.3 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Surfaces.....	58
รูปที่ ค.4 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Solids.....	59
รูปที่ ค.5 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Nodes.....	59
รูปที่ ค.6 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Elements.....	59
รูปที่ ค.7 แสดงแบบจำลองจำลองผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่ไม่เกิดช่องระหว่างสองวัสดุ.....	59
รูปที่ ค.8 แสดงแบบจำลองจำลองผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่ไม่เกิดช่องระหว่างสองวัสดุ (ต่อ)	60
รูปที่ ค.9 แสดงแบบจำลองจำลองผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่ไม่เกิดช่องระหว่างสองวัสดุ (ต่อ)	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปริมาณการใช้โลหะทั่วโลกมีจำนวนมากขึ้น เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายจึงกลายเป็นวัสดุหลักในงานอุตสาหกรรม ซึ่งก่อนจะนำมาใช้นั้นต้องผ่านการแปรรูปโลหะให้มีลักษณะต่างๆด้วยกระบวนการขึ้นรูปโลหะ (Metal forming) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การหล่อขึ้นรูป (Casting) การทุบขึ้นรูป (Forging) การรีดขึ้นรูป (Rolling) และการอัดขึ้นรูป (Extrusion) ซึ่งแตกต่างกันที่การนำไปใช้งาน

กระบวนการที่เป็นที่นิยมมากชนิดหนึ่งในงานอุตสาหกรรมคือกระบวนการอัดขึ้นรูปเพราะมีข้อได้เปรียบกว่าการขึ้นรูปแบบอื่นคือ ได้ชิ้นงานที่มีความยาวต่อเนื่องและพื้นที่หน้าตัดคงที่ ผลิตชิ้นงานได้ครั้งละมากๆแบบ Mass Production (มากกว่า 2000 ชิ้นต่อชั่วโมง) อีกทั้งชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูปยังมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับตาย (Near Net Shape) ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักรอีกครั้ง และเมื่อเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างการอัดขึ้นรูปและการรีดขึ้นรูป พบว่าการอัดขึ้นรูปสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายประเภทมากกว่า

นอกจากนี้ยังพบปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอัดขึ้นรูป ได้แก่ ชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปบางครั้งเกิดข้อบกพร่องขึ้นที่ชิ้นงาน (Defects) โดยแบ่งเป็นสามประเภทใหญ่ๆคือรอยแตกของผิว นอก (Surface Cracking) ที่เกิดจากแรงเสียดทาน ความเร็วในการดันสูงเกินไป อีกทั้งการที่ชิ้นงานมีลักษณะคล้ายท่อบาน (Pipe Defect) ซึ่งเกิดจากออกไซด์ที่ผิวและมีสิ่งเจือปน (Impurities) เข้าไปในส่วนกลางของแท่งโลหะก่อนการอัดขึ้นรูป และรอยแตกของผิวชิ้นงานด้านใน (Internal Cracking) อันเป็นผลมาจากมุมตายและพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดใหญ่เกินไป ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปมีความแข็งแรงลดลง

จึงได้มีการศึกษาผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม Marc Mentat เพื่อประยุกต์ปรับค่าตัวแปรต่างๆในการจำลองการขึ้นรูปและศึกษาพฤติกรรมของชิ้นงาน เช่น ความเครียด ความดัน แรงที่ใช้เพื่อนำค่าที่มีความเหมาะสมมาใช้สำหรับกรออกแบบตาย (Die Design) และปรับปรุงกระบวนการอัดขึ้นรูปเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ลดความเสียหายที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยการนำข้อมูลทางทฤษฎีมาปรับใช้ในการผลิตชิ้นงานจริง และเพื่อเป็นแนวทางในการปรมิวดอระยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก (Gap) ของวัสดุที่มีลักษณะเป็นไบแมททีเรียล (Bi-material)

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 ทราบปัจจัยเบื้องต้นที่ส่งผลทำให้เกิดช่องว่างระหว่างวัสดุสองชนิดที่ผ่านการอัดขึ้นรูป

1.3.2 งานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าวิจัยแก่ผู้สนใจ นักศึกษาและบัณฑิตศึกษา

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยได้มุ่งศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความบกพร่องภายในชิ้นงานของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านการอัดขึ้นรูป และวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.5.2 ศึกษาบทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.3 ศึกษา contact ของกระบวนการ Sheet Metal และโปรแกรม MARC®

1.5.4 ทำการออกแบบโครงสร้างตามแบบ

1.5.4.1 สร้างโครงสร้าง Geometric & Mesh

1.5.4.2 ใส่ Materials Properties และ แยกชนิด Contact

1.5.4.3 ใส่ Boundary condition และ Loadcase

1.5.4.4 ให้โปรแกรมเริ่มการคำนวณ

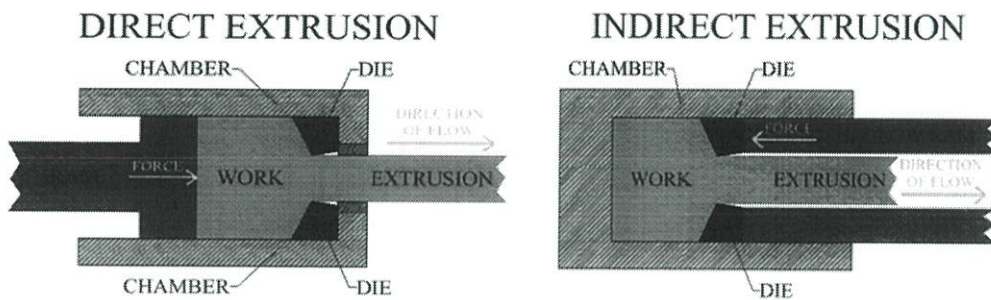
1.5.5 เขียนกราฟและวิเคราะห์ผล

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

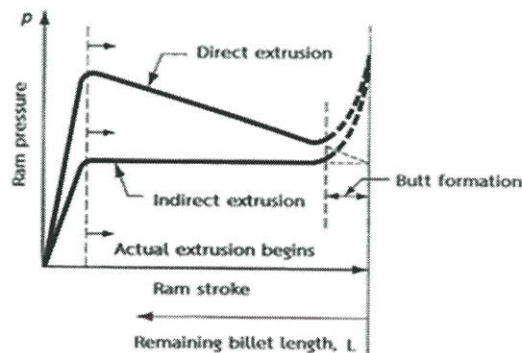
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการอัดขึ้นรูป

กระบวนการอัดขึ้นรูป เป็นการทำให้พื้นที่หน้าตัดของแท่งวัสดุ (Billet) ลดลงหรือถูกเปลี่ยน โดยใช้แรงกดให้แท่งวัสดุไหลผ่านตาย (Die) ที่มีรูปร่างแน่นอน คุณสมบัติเด่นของงานอัดขึ้นรูปคือ ได้ชิ้นงานที่มีความยาวต่อเนื่องและพื้นที่หน้าตัดคงที่ อีกทั้งชิ้นงานยังมีลักษณะใกล้เคียงกับตาย มีจำนวนเนื้อโลหะที่เสียไปจากการอัดขึ้นรูปน้อยมาก ผิวของชิ้นงานมีคุณภาพดี และยังสามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่องอีกด้วย



รูปที่ 2.1 การอัดขึ้นรูปแบบ Direct Extrusion และแบบ Indirect Extrusion [3]

การอัดขึ้นรูปสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดตามลักษณะการอัดดังรูปที่ 1 ดังนี้คือ การอัดขึ้นรูปแบบทางตรง (Direct Extrusion or Forward Extrusion) เป็นการอัดโลหะผ่านตายซึ่งชิ้นงานที่ได้จะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแรงอัด และการอัดขึ้นรูปแบบสวนทาง (Indirect Extrusion or Reverse Extrusion) เป็นการอัดโลหะผ่านตายซึ่งชิ้นงานที่ได้จะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของแรงอัด



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันที่เกิดจากการอัดขึ้นรูปผ่านตายกับระยะอัดของตัวต้น [3]

จากรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันที่เกิดจากการอัดขึ้นรูปผ่านตายที่มุม 90 องศา กับระยะอัดของตัวตัน (Ram Stroke) ซึ่งค่าของการอัดขึ้นรูปแบบทางตรงจะให้ค่าความดันของตัวตัน (Ram Pressure) เพิ่มขึ้นในช่วงอีลาสติก (Elastic) อันเป็นผลมาจากแรงเสียดทานที่กระบอกอัด (Container) กับ วัสดุ

นอกจากนี้การอัดขึ้นรูปยังแบ่งเป็นอีกสองประเภทใหญ่ๆ คือ กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Extrusion) โดยหาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 350 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 2000 องศาเซลเซียส ซึ่งการอัดขึ้นรูปร้อนช่วยลดการสึกหรอของตาย ด้วยการลดความแข็งของวัสดุจากการให้ความร้อน ลดแรงในการอัด เป็นต้น

กระบวนการอัดขึ้นรูปเย็น (Cold Extrusion) โดยหาที่อุณหภูมิต่ำ มีข้อดีว่าการอัดขึ้นรูปร้อนคือ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้ชิ้นงาน (Work Hardening) อีกทั้งยังไม่ต้องให้ความร้อน (Preheat) แก่ชิ้นงานก่อน ทำให้ผลิตชิ้นงานได้มาก และนอกจากนี้การอัดขึ้นรูปเย็นยังมีพิภคความเผื่อที่ดี ทำให้ไม่มีฟิล์มออกไซด์ที่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย จึงช่วยลดกระบวนการเสริมหลังจากนั้น ตัวแปรที่สำคัญที่มีผลในกระบวนการอัดขึ้นรูป เช่น มุมตาย ความเร็วในการอัดขึ้นรูป อัตราส่วนการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด แรงเสียดทาน ความเค้น ความเครียด และค่า Young's Modulus เป็นต้น

ในงานวิจัยทำการศึกษาระบวนการอัดขึ้นรูปร่วม (Co-Extrusion) นับเป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปเย็นแบบหนึ่งโดยมีข้อแตกต่างจากการอัดขึ้นรูปแบบทั่วไปคือ ในส่วนของวัสดุที่นำมาอัดขึ้นรูปนั้นเป็นวัสดุผสม ซึ่งข้อแตกต่างคือ เมื่อกดผ่านตายแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาเป็นวัสดุในชั้นเดียว

2.2 สมการที่เกี่ยวข้องกับการอัดขึ้นรูป

2.2.1 อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด (Extrusion Ratio), r_x

อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดก่อนอัดขึ้นรูปกับพื้นที่หน้าตัดหลังอัดขึ้นรูป [4,5]

$$r_x = \frac{A_0}{A_f} \quad (2.1)$$

r_x คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งวัสดุ (Billet) ก่อนอัดขึ้นรูป

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งวัสดุหลังอัดขึ้นรูป

2.2.2 ค่าความเครียดจริง (True Strain), ϵ

ค่าความเครียดจริง มีพื้นฐานมาจากอัตราส่วนการอัดขึ้นรูป

$$\epsilon = \ln r_x \quad (2.2)$$

ϵ คือ ค่าความเครียดจริง

r_x คือ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด

2.2.3 ค่าความเค้นจริง (True Stress), σ_T

ค่าความเค้นจริง เป็นแรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำ

$$\sigma_T = K\epsilon^n \quad (2.3)$$

σ_T คือ ค่าความเค้นจริง

K คือ ค่า Strength Coefficient

n คือ ค่า Strain-Hardening Exponent

2.2.4 ค่าเฉลี่ยของความเค้น (Average Flow Stress), \bar{Y}_f

ค่าเฉลี่ยของความเค้น จะมีค่าตั้งแต่ค่า Yield Strength เป็นต้นไป จนถึงค่า

$$\bar{Y}_f = \frac{K\epsilon^n}{1+n} \quad (2.4)$$

\bar{Y}_f คือ ค่าเฉลี่ยของความเค้น

ϵ คือ ค่าความเครียดจริง

K คือ ค่า Strength Coefficient

n คือ ค่า Strain-Hardening Exponent

2.2.5 ความเครียดของการอัดขึ้นรูป (Extrusion Strain), ϵ_x

เป็นค่าที่เกิดจากการอัดขึ้นรูปโดยนำสมการความเครียดจริงและ Johnson's Extrusion Strain Formula มาประกอบเข้าด้วยกัน

$$\epsilon_x = a + b \ln r_x \quad (2.5)$$

โดยที่ a=0.8 และ b= 1.5 ตาม Johnson's Extrusion Strain Formula

2.2.6 ความดันของตัวดัน (Ram Pressure), p

ความดันของตัวดัน เป็นค่าความดันของตัวดันแท่งวัสดุผ่านตาย

$$p = \bar{Y}_f \left(\epsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right) \quad (2.6)$$

\bar{Y}_f คือ ค่าเฉลี่ยของความเค้น

ϵ_x คือ ความเครียดของการอัดขึ้นรูป

L คือ ความยาวของแท่งวัสดุ

D_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแท่งวัสดุก่อนอัดขึ้นรูป

2.2.7 แรงของตัวดัน (Ram Force), F

แรงของตัวดัน เป็นแรงของตัวกดแท่งวัสดุผ่านตาย

$$F = pA_0 \quad (2.7)$$

F คือ แรงของตัวดัน

p คือ ความดันของตัวดัน

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งวัสดุ (Billet) ก่อนอัดขึ้นรูป

2.3.8 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio), ν

อัตราส่วนที่มีค่าเป็นลบระหว่างความเครียดทางด้านข้างต่อความเครียดทางด้านยาว (ความเครียดตามแนวของความเค้น)

$$\nu_{yx} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (2.8)$$

ν_{yx} คือ ค่าอัตราส่วนปัวซอง

ϵ_x คือ ความเครียดทางด้านข้าง

ϵ_y คือ ความเครียดทางด้านยาว

2.3.9 มุมวิกฤตพื้นที่อันตรายของมุมตาย (Dead-zone cone angle), α_1

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{3}{2} \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right)} \quad (2.9)$$

R_0 คือ รัศมีของแท่งโลหะก่อนอัดขึ้นรูป

R_f คือ รัศมีของแท่งโลหะหลังอัดขึ้นรูป

บทที่ 3

กระบวนการขึ้นรูปโลหะ

3.1 บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะ (Metal Forming Process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของโลหะ โดยการทำให้แท่งโลหะหรือที่เรียกว่าบิลเลท (Billet) ถูกแรงกระทำผ่านแม่พิมพ์ (Die) หรืออุปกรณ์และเครื่องมืออื่น ให้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างตามที่ต้องการ ซึ่งบิลเลทที่ถูกแรงกระทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปนั้น จะอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุจากช่วงอีลาสติก (Elastic State) ไปสู่ช่วงพลาสติก (Plastic State) กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้นทฤษฎีหลักที่ใช้วิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะคือ ทฤษฎีพลาสติก (Plasticity Theory) กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เป็นต้น

ถึงแม้ทฤษฎีพลาสติกจะสามารถอธิบายหลักการขึ้นรูปโลหะได้ แต่ก็ยังเป็นทฤษฎีขั้นพื้นฐานที่หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะอย่างถาวร ซึ่งการใช้ทฤษฎีนี้เพียงอย่างเดียวอาจไม่เหมาะสม หากนำมาใช้วิเคราะห์ในงานอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันในเรื่องเทคโนโลยีทางการผลิต ดังนั้นจึงได้มีการใช้โปรแกรม MSC Mentat มาช่วยในเรื่องการคำนวณอีกด้วย

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ

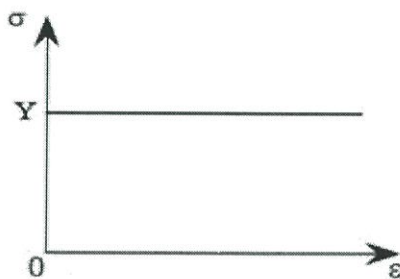
การศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะนั้น เกี่ยวข้องโดยตรงกับการศึกษาสมบัติทางกลของโลหะ ซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำ ซึ่งสิ่งที่สำคัญที่สุดในการวิเคราะห์กระบวนการขึ้นรูปโลหะคือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยโลหะแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างออกไป โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในอุดมคติ (Idealized Stress-Strain Curve) ที่แสดงถึงพฤติกรรมต่างๆ ของโลหะสามารถแบ่งออกเป็น 7 แบบ และแต่ละแบบมีสมการที่หาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังนี้

3.2.1 Rigid – Perfectly Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid – Perfectly Plastic ซึ่งวัสดุแบบนี้เมื่อถูกแรงกระทำก็จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรในทันที ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 \tag{3.1}$$

โดย σ_0 คือ ความเค้นที่จุดคราก (Yield Stress)



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid – Perfectly Plastic

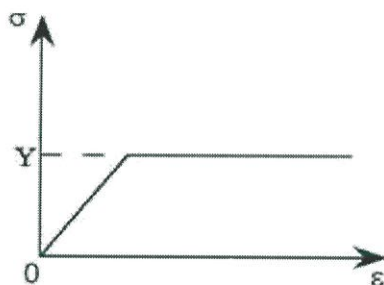
3.2.2 Elastic – Perfectly Plastic

โลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Elastic – Perfectly Plastic นั้นเป็นโลหะที่หากถูกแรงกระทำแล้วยังไม่ถึงจุดครากจะสามารถคืนตัวได้ แต่เมื่อถูกกระทำเลยจุดครากแล้วโลหะนั้นจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่อไปแม้ไม่มีการเพิ่มแรงกระทำ ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2 และมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = E \epsilon \quad ; \quad \sigma = 0 \text{ ถึง } \sigma_0 \quad (3.2)$$

$$\sigma = \sigma_0 \quad ; \quad \sigma \geq \sigma_0 \quad (3.3)$$

เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)



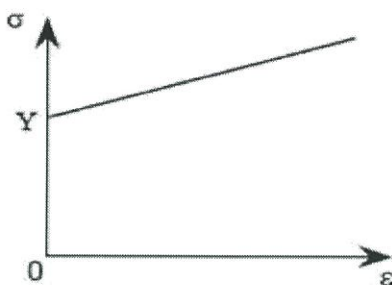
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Elastic – Perfectly Plastic

3.2.3 Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งพฤติกรรมของโลหะในช่วงหลังจากจุดครากนั้น ถ้าหากต้องการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโลหะต่อไปจะต้องเพิ่มแรงกระทำ ซึ่งพฤติกรรมแบบนี้เรียกว่าการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain Hardening) มีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 + K \epsilon \quad (3.4)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid – Linearly Strain Hardening Plastic

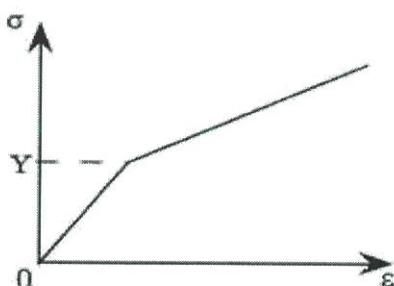
3.2.4 Linearly Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Linearly Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งพฤติกรรมของโลหะก่อนจุดครากนั้นเป็นแบบเชิงเส้น และในช่วงหลังจากจุดครากก็เป็นการทำให้แข็งด้วยความเครียดแบบเชิงเส้น (Linearly Strain Hardening) เช่นกัน โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = E\epsilon; \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_0 \quad (3.5)$$

$$\sigma = \sigma_0 K \epsilon; \quad \sigma > \sigma_0 \quad (3.6)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่



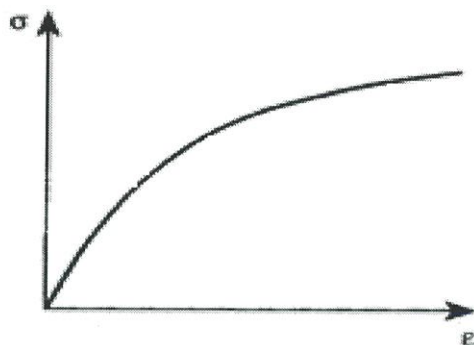
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic – Linearly Strain Hardening Plastic

3.2.5 Nonlinearly Strain Hardening Plastic

กราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Nonlinearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งพฤติกรรมของโลหะนั้นไม่แสดงจุดครากที่ชัดเจน โดยกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตลอดเวลาที่มีแรงกระทำ สมการความสัมพันธ์แบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Hollomon – Ludwik Power Law เนื่องจากได้มาจากการทดลองของ Hollomon และ Ludwik ซึ่งมีสมการคือ

$$\sigma = K\epsilon^n; \quad 0 < n < 1 \quad (3.7)$$



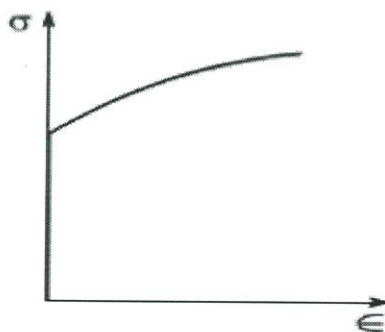
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Nonlinearly Strain Hardening Plastic

3.2.6 Rigid Nonlinearly Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Rigid Nonlinearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 โดยความสัมพันธ์แบบนี้ไม่พิจารณาช่วงอีลาสติกเนื่องจากมีช่วงที่แคบมาก เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงพลาสติกซึ่งมีสมการคือ

$$\sigma = \sigma_0 + K\epsilon^n \quad (3.8)$$

เมื่อ K และ n คือค่าคงที่



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Rigid Nonlinearly Strain Hardening Plastic

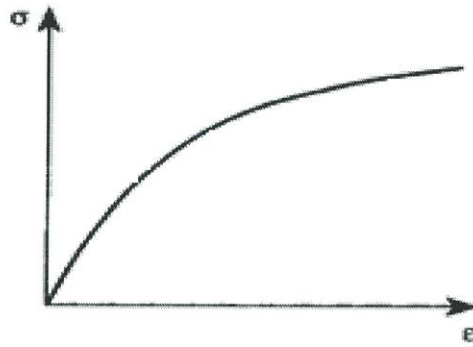
3.2.7 Linearly Elastic – Nonlinearly Strain Hardening Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Linearly Elastic – Nonlinearly Strain Hardening Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.7 โดยความสัมพันธ์แบบนี้ในช่วงอีลาสติกจะมีลักษณะเชิงเส้น และช่วงอีลาสติกมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีสมการคือ

$$\sigma = E\epsilon; \quad 0 \leq \sigma \leq \sigma_0 \quad (3.9)$$

$$\sigma = K\epsilon^n \quad ; \quad \sigma > \sigma_n, 0 < n < 1 \quad (3.10)$$

เมื่อ K และ n คือค่าคงที่



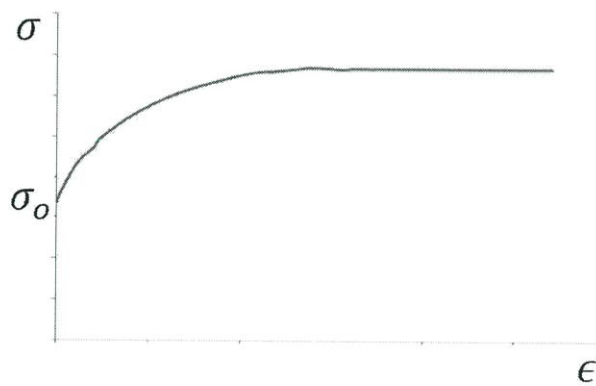
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic - Nonlinearly Strain Hardening Plastic

3.2.8 Elastic – Steady state Plastic

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะ ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบ Elastic – Steady state Plastic ตามที่แสดงในรูปที่ 3.8 โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\sigma = \sigma_0 + C[1 - e^{-D\epsilon}]^n \quad (3.11)$$

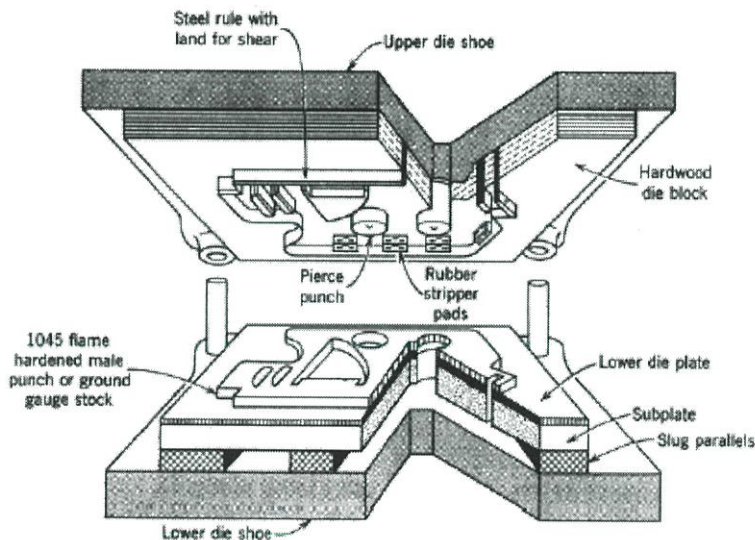
เมื่อ C , D และ n คือค่าคงที่ของโลหะแต่ละชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด (*Strain rate*) และอุณหภูมิของโลหะในขณะที่ถูกแรงกระทำ



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโลหะที่มีพฤติกรรมแบบ Linearly Elastic - Nonlinearly Strain Hardening Plastic

3.3 กระบวนการปั๊มเข้ารูปโลหะแผ่น

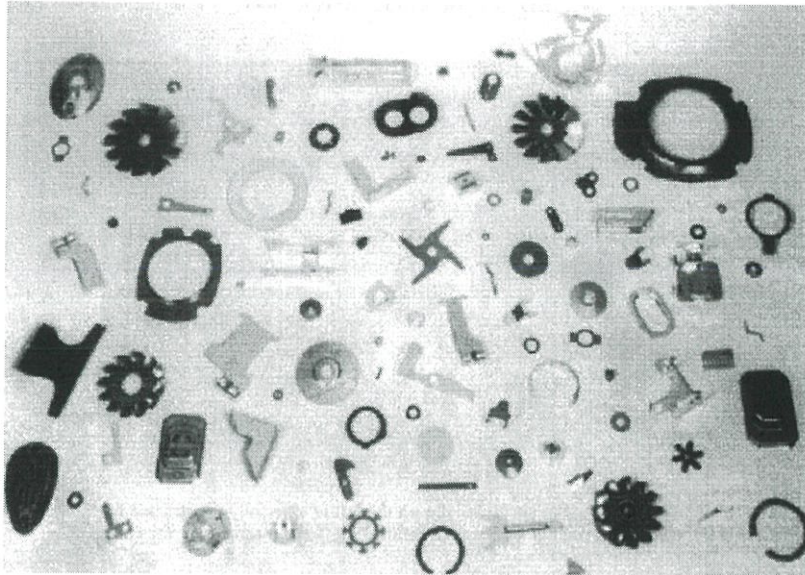
โลหะแผ่น (sheet metal) ถูกนิยามด้วยอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อความหนาสูง ถ้าความหนา มากกว่า 6 มิลลิเมตร จะเรียกว่าเพลท (plate) โลหะแผ่นมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ดังนั้นชิ้นส่วนที่ทำจากโลหะแผ่นจะมีน้ำหนักเบาและแข็งแรง การขึ้นรูปโลหะแผ่นจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูป (deformation) ด้วยการพับหรือดัด (bending) และ/หรือการยืด (stretching) การปั๊ม (stamping) ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปเย็น (cold-working) ของโลหะแผ่นด้วยแม่พิมพ์และเครื่องกด (press) แม่พิมพ์จะเป็นตัวกำหนดรูปร่างและขนาดของชิ้นงานสำเร็จ ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ พUNCH หรือแม่พิมพ์ และตาย (die) หรือแม่พิมพ์ตัวเมีย โดยปกติพUNCHจะอยู่ด้านบน มีขนาดเล็กกว่าตาย มีรูปร่างคล้ายตายและจะเป็นตัวเคลื่อนที่เข้าหาตาย เมื่อพUNCHและตายประกบกันจะมีช่องว่างเกิดขึ้น ช่องว่างนี้จะถูกกำหนดโดยชนิดและความหนาของแผ่นโลหะชิ้นงานและวิธีการขึ้นรูป พUNCHและตายจะถูกติดตั้งใตตายเซ็ท (die set) โดยตายจะติดอยู่ที่ฐานล่าง (lower die shoe) และพUNCHติดอยู่กับฐานบน (upper die shoe) ตายเซ็ททำหน้าที่นำพUNCHและตายให้เคลื่อนที่เข้าประกบกันอย่างถูกต้อง ตายเซ็ทจะถูกนำไปติดตั้งบนเครื่องกด (press machine) โดยส่วนของตายจะยึดติดอยู่ด้านล่างและพUNCHจะยึดติดอยู่ด้านบน



รูปที่ 3.9 แสดงตายเซ็ทพร้อมแม่พิมพ์ [14]

ข้อได้เปรียบของกระบวนการปั๊ม (Advantages of Stamping Process) กระบวนการปั๊มขึ้นรูปมีข้อได้เปรียบเหนือกว่ากระบวนการอื่นๆ เช่น การหล่อ (casting) การทุบขึ้นรูป (forging) และการกัดแต่ง (machining) ดังนี้

- 3.3.1. สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ผลิตด้วยวิธีอื่นได้ยาก
- 3.3.2. ไม่จำเป็นต้องตกแต่งชิ้นงานหลังการปั๊ม
- 3.3.3. ขนาดของชิ้นงานปั๊มทุกชนิดเท่ากัน สามารถเปรียบเทียบกันได้ในงานประกอบ
- 3.3.4. สมบัติทางกลเพิ่มขึ้น เช่น ความแข็งแรง เป็นต้น
- 3.3.5. ชิ้นงานมีน้ำหนักเบา
- 3.3.6. อัตราการผลิตสูง



รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างการปั๊มชิ้นงาน [14]

3.3.1 กรรมวิธีที่ใช้ในงานปั๊ม (Stamping Process)

กรรมวิธีที่ใช้ในงานปั๊มชิ้นรูปโลหะแผ่นมีหลายกรรมวิธี แต่แบ่งได้เป็น 3 กรรมวิธีพื้นฐานหลัก คือ 1. การตัดเฉือน (shearing) ซึ่งแบ่งเป็นการปั๊มเจาะ (blanking) และการตัดเจาะรู (piercing) 2. การดัด (bending) หรือการขึ้นรูป (forming) และ 3. การลากขึ้นรูป (drawing) นอกจากนี้ยังมีกรรมวิธีดั้งเดิมอื่นๆ เช่น การปั๊มบุ (embossing) การปั๊มจมน (coining) การบีบอัด (swaging) การผ่านขอบ (shaving) และการตัดขอบ (trimming) การผลิตชิ้นงานโลหะแผ่นจะต้องใช้หลายกรรมวิธีที่กล่าวมาแต่ไม่จำเป็นต้องใช้กรรมวิธีทั้งหมด กรรมวิธีที่กล่าวทั้งหมดมีลักษณะการทำงานดังนี้

1. Blanking เป็นขั้นตอนแรกที่จะต้องทำในการผลิต โดยจะเป็นการตัดแผ่นโลหะด้วย 펀ช์และดายให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ แผ่นโลหะที่ตัดออกมาจะนำไปผ่านกรรมวิธีอื่นเพื่อผลิตเป็นชิ้นงานต่อไป

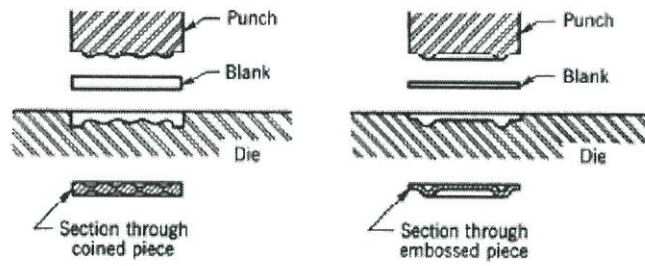
2. Piercing โดยทั่วไปเป็นขั้นตอนที่ต่อจาก blanking โดยจะตัดแผ่นโลหะให้เป็นรูตามตำแหน่งที่ต้องการบางครั้ง blanking และ piercing สามารถทำพร้อมกันได้ขั้นตอนเดียว ข้อแตกต่างระหว่าง blanking และ piercing จะใช้แผ่นโลหะที่ตัดออกมาด้วย 펀ช์และดายเป็นชิ้นงาน ส่วน piercing จะใช้แผ่นโลหะที่ถูกตัดเป็นรูเป็นชิ้นงาน

3. Bending เป็นการดัดพื้นผิวระนาบของโลหะทำมุมกันตั้งแต่หนึ่งมุมขึ้นไปโดยความหนาของแผ่นโลหะไม่เปลี่ยนแปลงและรัศมีการดัดจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับความหนาของแผ่นโลหะ

4. Drawing เป็นการสาลขึ้นรูปโลหะแผ่นด้วย 펀ช์เข้าไปในโพรงของดายโดยปราศจากการยึดของแผ่นโลหะ ดังนั้นช่องว่างระหว่าง 펀ช์และดายจะเท่ากับความหนาของแผ่นโลหะ

5. Embossing เป็นการขึ้นรูปแผ่นโลหะให้เป็นหลุมหรือปุ่มตื้นๆ โดยที่ความหนาไม่เปลี่ยนแปลงปรกติทำแผ่นป้ายต่างๆ ที่มีตัวอักษรนูน

6. Coining เป็นการขึ้นรูปแผ่นโลหะให้เป็นลวดโดยการบีบอัดแผ่นโลหะในแม่พิมพ์ปิด ลวดลายทั้งสองด้านจะไม่เหมือนกันก็ได้ เช่น การทำเหรียญ



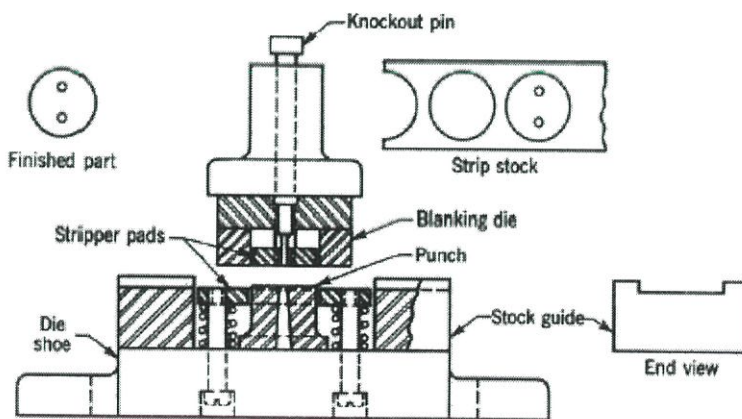
รูปที่ 3.11 แสดงกรรมวิธี Coining และ Embossing [14]

7. Swaging เป็นการขึ้นรูปโลหะโดยการบีบอัดในแม่พิมพ์เปิด โลหะจะสามารถไหลผ่านแม่พิมพ์ออกมาได้อย่างอิสระ
8. Shaving เป็นการตัดแต่งขอบแผ่นโลหะผ่านการ blanking หรือ piercing มาแล้ว
9. Trimming เป็นการทำงานคล้าย blanking เพื่อตัดโลหะส่วนเกินออก วิธีนี้จะทำทีหลังสุดเมื่อแผ่นโลหะผ่านกรรมวิธีอื่นๆ มาแล้ว

3.3.2 ชนิดของแม่พิมพ์ (Types of Dies)

การแบ่งชนิดของแม่พิมพ์สามารถแบ่งตามกรรมวิธีเช่น แม่พิมพ์ดัด (bending die) หรือจะแบ่งตามวิธีการทำงาน ซึ่งแบ่งได้ดังต่อไปนี้

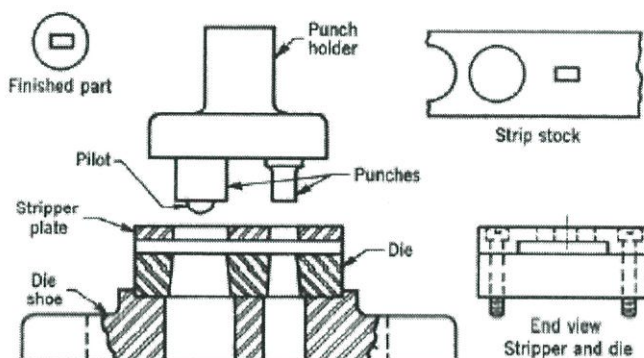
1. แม่พิมพ์ธรรมดา (simple die) เป็นแม่พิมพ์ที่ทำงานได้กรรมวิธีเดียวในการกดหนึ่งครั้ง เช่น blanking เป็นต้น
2. แม่พิมพ์ผสม (compound die) เป็นแม่พิมพ์ที่ทำงานดัด (shearing) ตั้งแต่สองกรรมวิธีขึ้นไปอยู่ในสถานีเดียวกันและสามารถทำงานได้พร้อมกันในการกดหนึ่งครั้ง เช่นสามารถทำ blanking และ piercing ได้พร้อมกันในการกดหนึ่งครั้ง ดังนั้นในการกดหนึ่งครั้งจะได้ชิ้นงานซึ่งหลุดออกจากแถบโลหะ (strip) ที่ป้อนเข้าไป



รูปที่ 3.12 แสดงแม่พิมพ์แบบ Compound Die[14]

3. แม่พิมพ์รวม (combination die) เป็นแม่พิมพ์ที่ทำงานเหมือน compound die นอกจากทำงานตัดแล้ว จะทำงานอย่างอื่นไปพร้อมกันได้ด้วย เช่น bending และ drawing เป็นต้น

4. แม่พิมพ์แบบลำดับ (progressive die) เป็นแม่พิมพ์ที่สามารถทำงานพร้อมกันได้ ตั้งแต่สองกรรมวิธีขึ้นไป แตกต่างจาก compound die ตรงที่แต่ละกรรมวิธีจะอยู่แยกสถานีกัน ดังนั้นการออกแบบ progressive die จะง่ายกว่า compound die ชิ้นงานที่ถูกป้อนผ่านแต่ละสถานีด้วยระบบกลไกอัตโนมัติจะยังคงติดอยู่กับแถบโลหะจนถึงสถานีสุดท้ายจึงจะหลุดออกมาเป็นชิ้นงานสำเร็จ



รูปที่ 3.13 แม่พิมพ์แบบ Progressive Die[14]

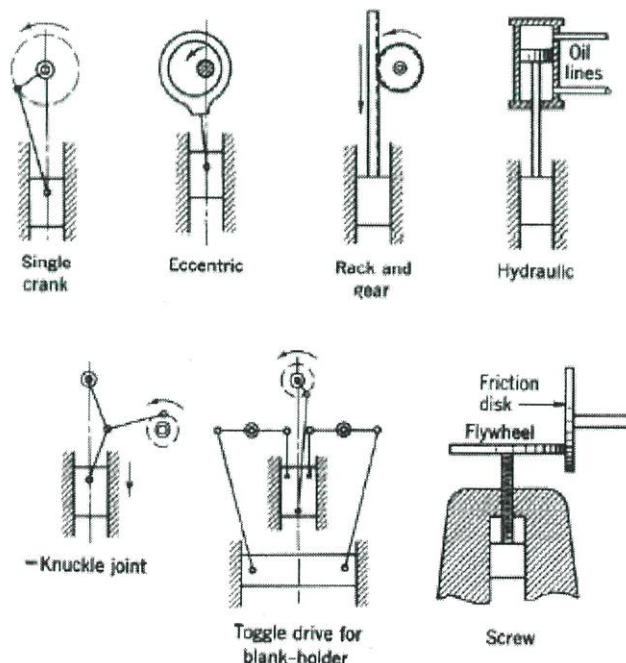
5. แม่พิมพ์แบบชิ้นงานเคลื่อน (transfer die) เป็นระบบที่แตกต่างกันจาก progressive die ตรงที่ชิ้นงานเป็นชิ้นที่หลุดออกจากแถบโลหะแล้วจะถูกส่งผ่านแต่ละสถานีด้วยกลไกของก้านโยก (lever) หรือลูกเบี้ยว (cam) ที่สร้างขึ้นหรือติดตั้งบนเครื่องกด ระบบนี้ต้องการอุปกรณ์เพิ่มเช่น ตัวปลด (stripper) , เข็มกระทุ้ง (ejector pin) และ ตัวกันกระแทกแม่พิมพ์ (die cushion) เป็นต้น

3.3.3 ชนิดของเครื่องกด (Press Machines)

การแบ่งชนิดของเครื่องกดสามารถแบ่งได้หลายวิธีเช่น แบ่งตามแหล่งให้กำลัง แบ่งตามชนิดก้านกระทุ้ง (ram) แบ่งตามโครงสร้างของเครื่อง หรือแบ่งตามจุดมุ่งหมายในการทำงาน เป็นต้น แต่ในที่นี้จะแบ่งชนิดของเครื่องกดตามกลไกการถ่ายทอดกำลังให้แก่ก้านกระทุ้ง ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. กลไกแบบข้อเหวี่ยง (crank) เป็นระบบขับเคลื่อนที่ธรรมดาที่สุด ใช้ข้อเหวี่ยง ในจังหวะเคลื่อนที่ลงความเร็วจะเพิ่มขึ้น ความเร็วจะสูงสุดที่กึ่งกลางของช่วงชัก (stroke) ส่วนมากการกดแม่พิมพ์จะเกิดขึ้นที่ความเร็วสูงสุดนี้

2. กลไกแบบเยื้องศูนย์กลาง (eccentric) จะเหมือนกับ crank แต่ช่วงชักจะสั้นกว่า และจะมีความแข็งแรงกว่า
3. กลไกแบบลูกเบี้ยว (cam) จะคล้ายกับ eccentric แต่จะใช้กับการเคลื่อนที่ของ ram ที่พิเศษตามความต้องการ
4. กลไกแบบเฟืองรางและเกียร์ (rank and gear) ใช้เมื่อต้องการช่วงชักที่ยาวมากๆ การเคลื่อนที่สม่ำเสมอแต่จะช้ากว่าแบบ crank จะมีตัวหยุดเพื่อควบคุมช่วงชักได้ และอาจจะติดตั้งอุปกรณ์ quick-return เพื่อให้ ram เคลื่อนที่กลับไปจุดตั้งต้นได้อย่างรวดเร็ว
5. กลไกแบบไฮดรอลิก (hydraulic) ใช้ในเครื่องกดและงานต่างๆ มากมาย การเคลื่อนที่ช้าแต่ให้แรงกดมาก เหมาะกับงาน forming และ drawing
6. กลไกแบบข้อต่อร่วม (knuckle joint) เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากความได้เปรียบทางกลสูงที่ระบบยึดสุดซึ่งจะให้แรงกดสูง จึงเหมาะสำหรับการทำ coining และ sizing
7. กลไกแบบข้อศอก (toggle) ใช้ในการยึดแผ่นโลหะ (blank-holder) ในงาน drawing เป็นหลัก การออกแบบมีหลากหลายแต่จุดประสงค์หลักคือต้องยึดแผ่นโลหะให้อยู่ในตำแหน่งได้อย่างเพียงพอ
8. กลไกแบบสกรู (screw) เป็นระบบขับเคลื่อนที่ใช้แผ่นจานเสียดทาน (friction disk) ขับล้อตุ่นกำลัง (flywheel) ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มาก ที่ระยะยึดสุดพลังงานที่สะสมที่ล้อตุ่นกำลังจะถ่ายทอดลงชิ้นงาน



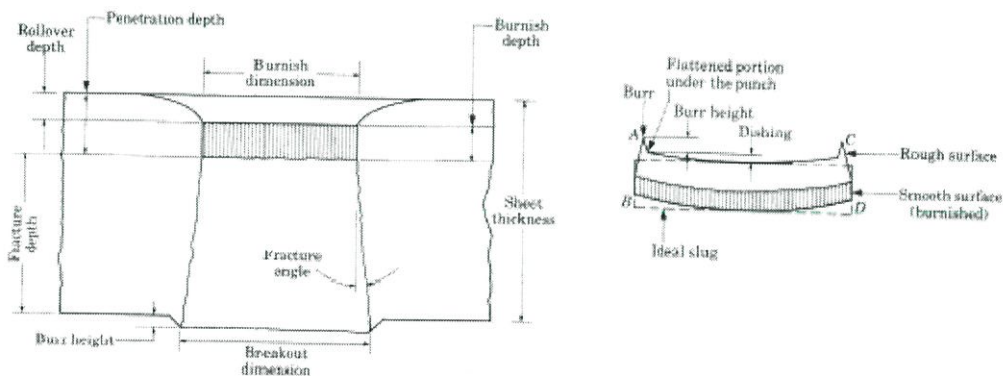
รูปที่ 3.14 แสดงกลไกของเครื่องกดชนิดต่างๆ [14]

เครื่องกดที่ใช้ระบบกลไกโดยใช้ flywheel ในการให้กำลังจะสามารถให้แรงกดได้ตั้งแต่ 20-6,000 ตันและช่วงชักได้ตั้งแต่ 5-500 มิลลิเมตรและมีความเร็วตั้งแต่ 20-1,500 ครั้งแต่นาที ระบบกลไกนี้จึงเหมาะกับงาน blanking และงาน drawing สำหรับเครื่องกดที่ใช้ระบบไฮดรอลิกในการให้กำลังสามารถสร้างแรงกดได้ตั้งแต่ 20-10,000 ตัน ช่วงชักได้ตั้งแต่ 10-800 มิลลิเมตร ระบบไฮดรอลิกสามารถให้กำลังเต็มที่ได้ทุกระยะของช่วงชัก จึงเหมาะสำหรับงาน deep drawing และงานที่ใช้ combination die (blanking และ bending)

3.3.4 ลักษณะของชิ้นงานปั๊ม (Characteristics of Stamped Parts)

ชิ้นงานที่เกิดจากกระบวนการปั๊มจะมีความหนาของชิ้นงานคงที่สม่ำเสมอ (ยกเว้นบางกรณี) รูปร่างชิ้นงานมีได้แต่รูปร่างง่ายๆ ไปจนถึงรูปร่างที่ซับซ้อน ความหนาของชิ้นงานปั๊มอยู่ในช่วงระหว่าง 0.025 มิลลิเมตร ถึง 20 มิลลิเมตร แต่โดยส่วนใหญ่มักอยู่ระหว่าง 1.3 มิลลิเมตร ถึง 9.5 มิลลิเมตร ขนาดของชิ้นงานปั๊มสามารถมีขนาดเล็กเท่าชิ้นส่วนนาฬิกาข้อมือไปจนถึงตัวถังรถบรรทุกหรือเครื่องบิน ลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการปั๊มจะมีลักษณะที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

1. ขอบหนาม (burr-side) และรัศมีการตัด (cut radius) การตัดแผ่นโลหะด้วยวิธี blanking หรือ piercing จะเกิดลักษณะที่ขอบรอยตัดของแผ่นโลหะ ด้านหนึ่งขรุขระไม่เรียบเหมือนหนาม เรียกลักษณะนี้ว่า burr-side ส่วนขอบรอยตัดด้านตรงข้ามจะเกิดรัศมีการตัด หรือที่เรียกว่า rollover การแก้ไขสามารถทำได้โดยกรรมวิธี deburring



รูปที่ 3.15 Burr และ Rollover ที่เกิดขึ้นในงานเจาะรู [14]

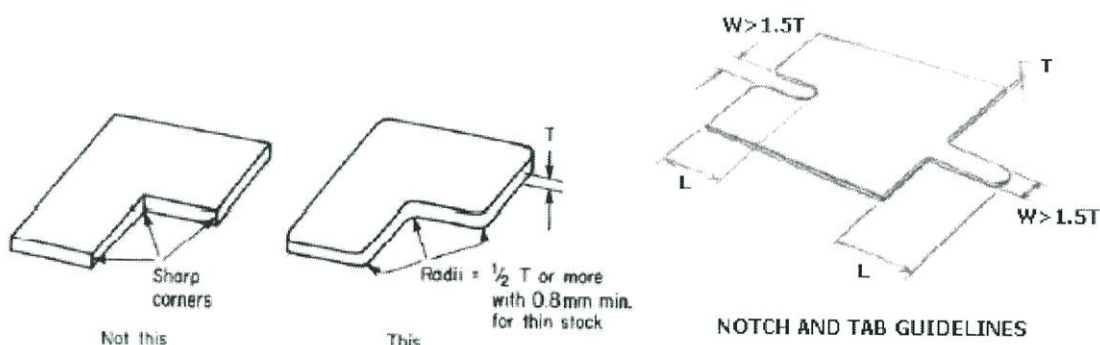
2. Concentricity เป็นการเอียงกันเล็กน้อยของจุดศูนย์กลางของเส้นรอบรูปวงในและวงนอกซึ่งจะเกิดขึ้นในทุกกระบวนการปั๊มยกเว้นการใช้ compound die ชิ้นงานจะยอมรับได้ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินค่าที่ระบุไว้

3. Flatness/Blanking Distortion เป็นการโก่งงอของชิ้นงานเล็กน้อยเนื่องจากความเค้นที่ขอบของชิ้นงานจากแรงกด ปริมาณการโก่งงอจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของพื้นที่ผิว ชนิดของวัสดุ ความหนา และรูปร่างของชิ้นงาน มีผลกระทบต่อ การควบคุมความแบนราบ (flatness) และชนิดของแม่พิมพ์มากที่สุด compound die จะให้ชิ้นงานมีความแบนราบมากที่สุด

3.3.5 ข้อเสนอแนะในการออกแบบชิ้นงานปั๊ม (Design Recommendations)

การออกแบบชิ้นงานปั๊มที่ดีจะต้องใช้วัสดุดีให้คุ้มค่าที่สุดและสามารถผลิตได้โดยไม่มีของเสียเกิดขึ้น ลำดับขั้นตอนการผลิตก็มีความสำคัญเช่นกัน กรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตก็ยังมีข้อจำกัดในตัวเอง ข้อเสนอแนะในการออกแบบแยกเป็นแต่ละกรรมวิธีหลักได้ดังนี้

- มุมมองชิ้นงานควรมีรัศมีอย่างน้อยเท่ากับ 0.5 เท่าของความหนาของแผ่นโลหะและแผ่นโลหะต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 0.8 มิลลิเมตร
- ความกว้างของ slot และ Tab ควรมีค่ามากกว่า 1.5 คูณความหนาของแผ่นโลหะและความยาวต้องไม่เกิน 5 เท่าของความกว้าง
- หลีกเลี่ยงการปั๊มส่วนโค้งครึ่งวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับความกว้างของแผ่นโลหะ



รูปที่ 3.16 ข้อเสนอแนะในกรรมวิธี Blanking [14]

3.3.5.1 Piercing

- รูควรมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่าความหนาแผ่นโลหะ (หรือเท่ากับ 2 เท่าสำหรับเหล็กสแตน)

- ระยะห่างระหว่างรูควรเท่ากับ 2 เท่าของความหนาแผ่นโลหะหรือมากกว่า

- ระยะห่างระหว่างรูกับชิ้นงานควรเท่ากับความหนาแผ่นโลหะเป็นอย่างน้อย

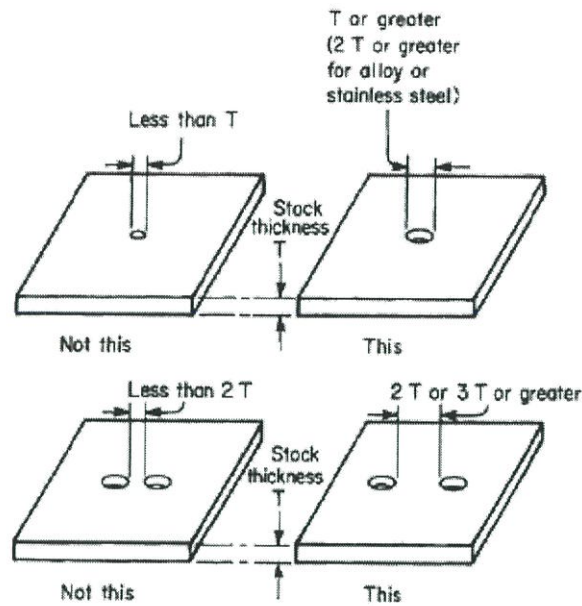
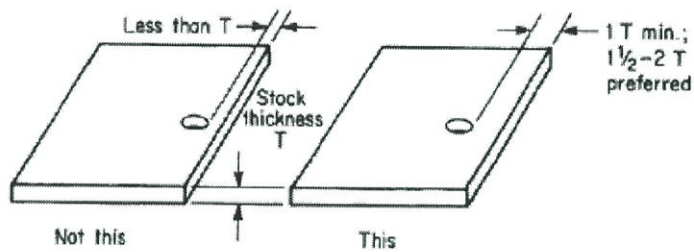


FIGURE 3.2.16 Design rules for size and spacing of holes.



รูปที่ 3.17 ข้อแนะนำในกรรมวิธี piercing [14]

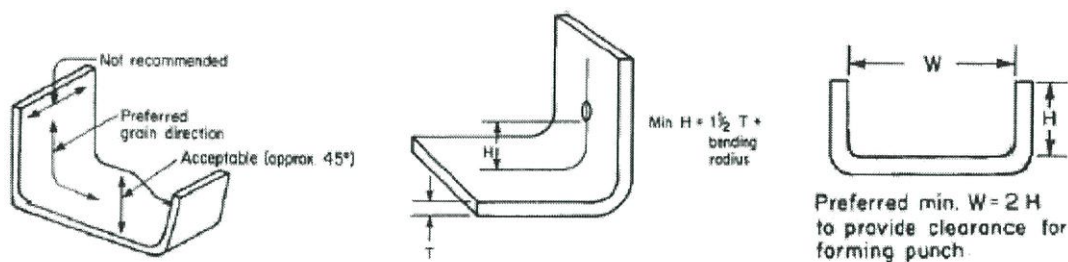
3.3.5.2 Bending

-แนวรอยพับควรตั้งฉากกับแนวเกรนของแผ่นโลหะ (แนวการกรีด) เพื่อป้องกันการแตกตามรอยพับ

-รูควรห่างจากรอยพับอย่างน้อยเท่ากับ 1.5 เท่าของความหนาแผ่นโลหะบวกกับรัศมีการพับเพื่อป้องกันรูบิดเบี้ยว

-มุมการพับด้านในควรจะเท่ากับ 90 องศา

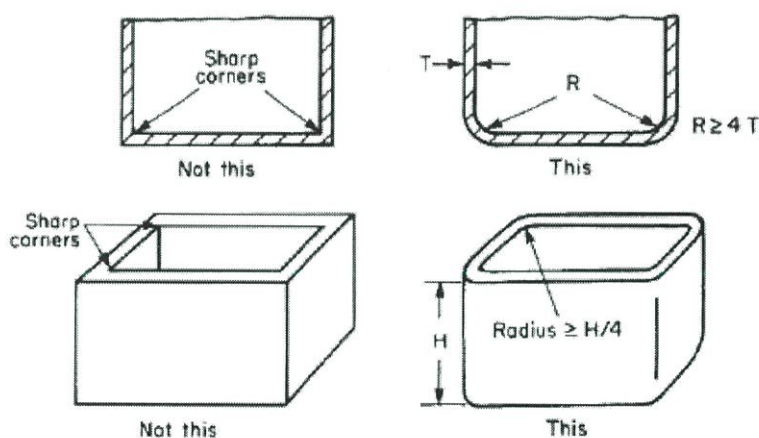
-การพับเป็นรูป Channel ความกว้างต่อความสูงอย่างน้อยควรเท่ากับ 2:1 และความกว้างควรเท่ากับ 3 เท่าของความหนาแผ่นโลหะเป็นอย่างน้อย



รูปที่ 3.18 ข้อเสนอแนะในกรรมวิธี Bending [14]

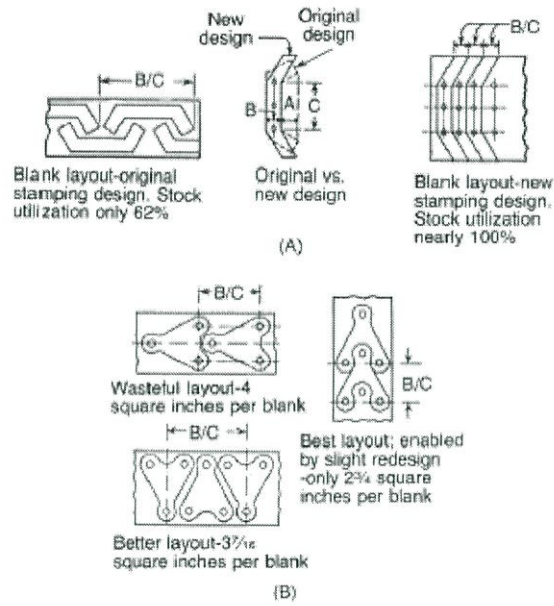
3.3.5.3 Drawing

- หลีกเลียงผนังถั่วที่เป็น Taper เพราะค่าใช้จ่ายสูงมากกว่าผนังตรง
- กำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉพาะด้านใน ด้านในหรือด้านนอกเท่านั้น เพราะสามารถควบคุมขนาดได้ด้านเดียว
- หลีกเลียงมุมแหลมที่กันถั่ว ควรมีรัศมีอย่างน้อย 4 เท่าของความหนาแผ่นโลหะ
- มุมของกล่องสี่เหลี่ยมควรมีรัศมีอย่างน้อย 0.25 เท่าของความลึกของกล่อง

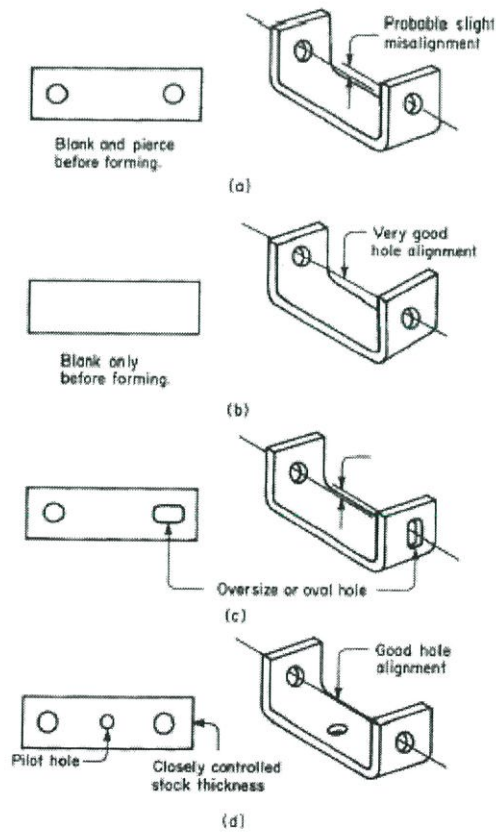


รูปที่ 3.19 ข้อเสนอแนะในกรรมวิธี Drawing [14]

นอกจากข้อเสนอแนะในกรรมวิธีการผลิตแล้ว การจัดวางชิ้นงานลงบนแผ่นโลหะก็มีความสำคัญที่จะช่วยลดเศษวัสดุลงได้ บางครั้งจำเป็นต้องแก้ไขแบบชิ้นงานใหม่โดยชิ้นงานยังคงทำหน้าที่ได้เหมือนเดิมแต่สามารถประหยัดวัตถุดิบลงได้ดังภาพที่ 12 และในงานที่ต้องการความเที่ยงตรง ลำดับขั้นตอนการผลิตก็สามารถช่วยลดของเสียลงได้ ดังตัวอย่างในภาพที่ 13 ซึ่งต้องการให้รูอยู่ในแนวเดียวกัน



รูปที่ 3.20 การจัดวางแลพการปรับเปลี่ยนแบบชิ้นงานเพื่อลดเศษวัสดุ [14]



รูปที่ 3.21 (a) เจาะรูก่อนพับ, (b) พับก่อนแล้วเจาะรู, (c) เจาะรูก่อนแล้วพับโดยขยายรูใดรูหนึ่งให้กว้างขึ้น, (d) เจาะรูก่อนแล้วพับโดยมีรูยึดชิ้นงานในการพับ [14]

บทที่ 4

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

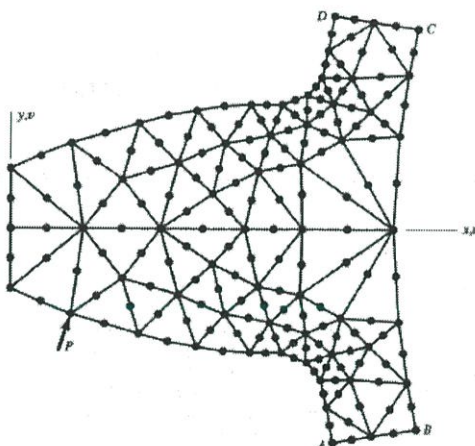
4.1 บทนำเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้ปัญหา ทางฟิสิกส์ หรือทางวิศวกรรม และอื่นๆ รูปแบบปัญหาคือ การหาฟังก์ชันการกระจายตัวของตัวแปรในระบบสามมิติ ซึ่งปัญหาแต่ละอันจะสามารถอธิบายด้วย Differential equation หรือ Integral equation และคำว่า Finite element คือ องค์ประกอบย่อยๆ ของโดเมนโครงสร้าง สำหรับวิธีการของ FEM โดเมนของโครงสร้างถูกแบ่งย่อยเป็นองค์ประกอบย่อยๆ ที่มีรูปร่างอย่างง่ายขนาดเล็ก องค์ประกอบย่อยๆ นี้จะถูกเรียกเป็น “element”

โดเมนของโครงสร้าง: มีระดับความเสรีแบบอนันต์ (infinite number of DOF)

โดเมนของแบบจำลอง : มีระดับความเสรีจำกัด (finite number of DOF)

ดังนั้น เองนี้จึงเป็นที่มาของ “*Finite element method*” ในแต่ละ element การกระจายตัวของตัวแปรที่เราสนใจนั้น จะมีค่าต่างกันตามตำแหน่งใดๆ



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของรูปร่าง Mesh, Element และ Node [11]

4.1.1 ข้อดีของ FEM

1. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ (จุดเด่นที่สุด)
2. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ซับซ้อน
3. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่รับภาระต่างๆ เช่น
4. ภาระที่กระทำกับ node เช่น point loads
5. ภาระที่กระทำกับ element เช่น pressure, thermal, inertia forces, gravity forces
6. ภาระที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือภาระที่ขึ้นอยู่กับความถี่
7. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Non-Isotropic, Orthotropic, Anisotropic
8. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่วัสดุมีคุณสมบัติพิเศษเช่น

9. คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ อาทิเช่น Plasticity, Creep, Swelling
10. สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มีเป็นแบบ Large displacement, Large rotations, Contact (gap) conditions

4.1.2 ข้อเสียของ FEM

1. เป็นวิธีการประเมินเชิงตัวเลขดังนั้นจะมี error เกิดขึ้นเสมอ
2. ผู้ใช้ต้องมีประสบการณ์และความชำนาญในการทำแบบจำลอง FEM ถึงจะทำให้ได้คำตอบที่สอดคล้องกับความเป็นจริง
3. ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงและซอฟต์แวร์ที่น่าเชื่อถือได้ (ราคาแพง)
4. มีปัญหาเชิงตัวเลขเกิดขึ้น เนื่องจากคอมพิวเตอร์สามารถเก็บค่าเลขน้อยสำคัญได้จำกัด Round-off error สะสม
5. มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากการทำ Modeling เนื่องจากการเลือกใช้ชนิดอิเลเมนต์ที่ไม่เหมาะสม, การใช้ Distorted element ในโมเดล, การทำเมชที่ไม่เหมาะสม
6. พฤติกรรมบางอย่างไม่ได้รวมให้โดยอัตโนมัติ เช่น Buckling, Large displacements และ Large rotations, Materials nonlinearities, Nonlinearities อื่นๆ เช่น Contact condition

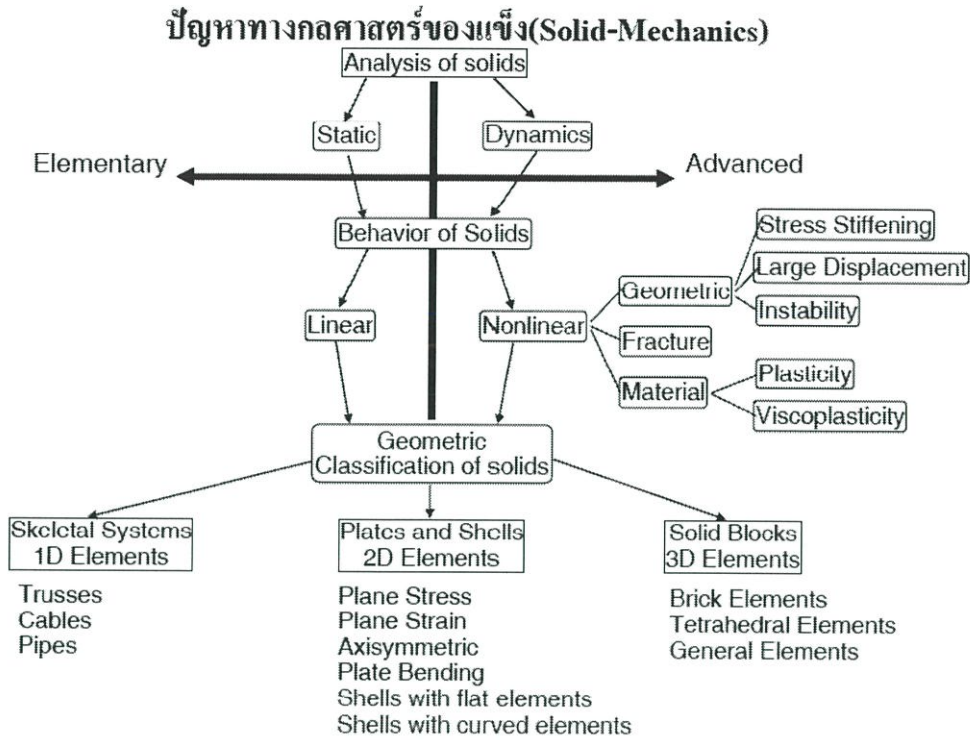
4.2 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์

โดยการแก้ปัญหาของวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์นั้น เป็นปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งซึ่ง รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพทางการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง โดยแสดงขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลอง (Preprocessing phase)
 - 1.1 การสร้างรูปร่างของแบบจำลอง (Geometric construction)
 - 1.2 การแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นอิเลเมนต์ย่อยๆต่อกัน โดยแต่ละอิเลเมนต์จะประกอบไปด้วยโหนด (Discretization)
 - 1.3 การกำหนด shape function ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมทางกายภาพของอิเลเมนต์หรือผลเฉลยของอิเลเมนต์ (ค่าประมาณ)
 - 1.4 สร้างสมการสำหรับอิเลเมนต์
 - 1.5 กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะโหนดและสภาวะขอบให้กับปัญหา
 - 1.6 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)
2. ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution phase)

การแก้หาคำตอบของสมการซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งคำตอบคือค่าภาิกระจัดที่โหนดต่างๆ หรือค่าอุณหภูมิที่โหนดต่างๆ (ในกรณีเป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อน)
3. การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Postprocessing phase)

การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติมเช่นเราอาจอยากจะทราบค่าความเค้นหลัก ฟลักซ์ความร้อน เป็นต้น



รูปที่ 4.2 แผนภาพการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง [11]

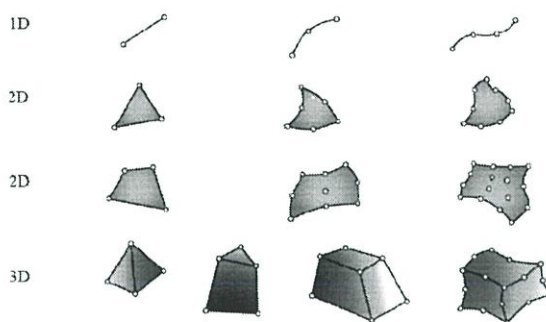
4.3 ชนิดของอีลิเมนต์พื้นฐาน

การวิเคราะห์โครงสร้าง หรือ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จำเป็นต้องแบ่งโครงสร้าง หรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนเล็กๆ และเลือกใช้ชนิดของอีลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงาน และการกระทำของโหลด ชนิดของอีลิเมนต์อาจจะแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามมิติ คือ อีลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ ดังรูปที่ 4.3 แสดงชนิดของอีลิเมนต์พื้นฐานแบ่งดังต่อไปนี้

อีลิเมนต์มิติเดียว เป็นอีลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโก่งของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียวกัน เป็นต้น

อีลิเมนต์สองมิติ มักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดระนาบ โดยทั่วไปอีลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม และ สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรง หรือเส้นโค้ง โดยทั่วไปอีลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะได้รับความนิยมมากกว่าอีลิเมนต์สามเหลี่ยม ทั้งนี้เพราะในกรณีที่ระดับชั้นความเสรีเท่ากับอีลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ส่วนจะเลือกใช้อีลิเมนต์สี่เหลี่ยม หรือด้านโค้งนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงานจริง และโดยทั่วไปจะสมมติให้ความหนาของอีลิเมนต์มีค่าคงตัว แต่อาจจะกำหนดให้ความหนาเป็นฟังก์ชันกับพิกัดก็ได้

อีลิเมนต์สามมิติ จะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติต่างๆไป ลักษณะของอีลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึม และรูปกรวยสามเหลี่ยม



รูปที่ 4.3 ชนิดของเอลิเมนต์พื้นฐาน [11]

4.4 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตามที่กล่าวมาแล้ว เราสามารถจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้าง เช่น หากการกระจัด, ความเค้น-ความเครียด และใช้วิธีวิเคราะห์ปัญหาของการถ่ายเทความร้อน การไหลของของเหลว เป็นต้น ในที่นี้จะเน้นการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างทางกล และชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่ซับซ้อนที่ไม่สามารถจะหาผลเฉลยจากวิธีธรรมดา ๆ ได้ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธี คือ วิธีแรงหรือวิธียืดหยุ่น (Force or Flexibility Method) และ วิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนส (Displacement or Stiffness Method)

วิธีแรกจะสามารถหาแรงภายใน และ แรงปฏิกิริยาโดยอาศัยสมการสมดุลของแรง และ สมการเงื่อนไขการกระจัด (Compatibility Equation) ส่วนวิธีที่สองจะสามารถหาการกระจัดที่สมมุติขึ้นโดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละจุดต่อ หรือที่ขอบบริเวณที่สัมผัสกันไม่วก่อน และหลังไหลลดกระทำยังคงมีความต่อเนื่องเหมือนเดิม ดังนั้นสมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละจุดต่อ และค่าของการกระจัดก็สามารถจะหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการกระจัด การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น นิยมใช้วิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนสหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า ทั้งนี้จะสามารถหาสมการสมดุลและหาผลเฉลยได้สะดวกกว่า

ส่วนใหญ่ก็นิยมใช้วิธีการกระจัดด้วยหลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็คือ จะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ เรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (Displacement Function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงกันด้วยจุดต่อ (Node) หรือเส้นขอบ หรือ ผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกัน และ อาศัยคุณสมบัติทางกล ของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้าง หรือชิ้นงาน เราสามารถจะหาการกระจัด, ความเค้น-ความเครียด ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้าง หรือชิ้นงานขั้นตอนต่างๆ ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง หรือชิ้นส่วน เช่น สปริง, ท่อนโลหะ, เหล็ก, โครงข้อหมุน, โครงข้อแขนง, แผ่นโลหะ, ถังความดัน ฯลฯ ภายใต้อาณัติของสถานะต่างๆ ของโหลดซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ไปคล้ายๆ กันเพื่อให้มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้นจึงมีการแบ่งรูปแบบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ออกเป็น 6 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพท์นั้นออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาที่เกี่ยวกับอุณหภูมิ และความร้อน

(Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของไหล (Fluid Problem)

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) เช่น เราทำปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรือ อาจเป็นค่าอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเท ความร้อน หรือ ไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของเหลวหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับของไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายตัวของตัวไม่รู้ค่าบนอีลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายใน และตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ ดังนี้ [11]

$$\phi(x,y) = N_1(x,y)\phi_1 + N_2(x,y)\phi_2 + N_3(x,y)\phi_3$$

โดย $N_i(x,y)$, $i = 1, 2, 3$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์

สมการ (3.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\phi(x,y) &= [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N]_{(1 \times 3)} \{ \phi \}_{(3 \times 1)}\end{aligned}$$

โดยที่ $[N]$ คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์ และ $\{ \phi \}$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของอีลิเมนต์นั้นๆ ในที่นี้ $[\]$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวอน (Row Matrix) และ $\{ \}$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวตั้ง (Column Matrix)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการอีลิเมนต์ (Element Equation) ดังตัวอย่าง เช่น สมการของอีลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.20 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น $[K]_e \{ \phi \}_e = \{ F \}_e$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ การสร้างสมการของอีลิเมนต์ที่อยู่ในรูปแบบของสมการ (3.3) สามารถทำได้โดย

- ก. วิธีการโดยตรง (Direct approach)
- ข. วิธีการแปรผัน (Variation approach)
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละอีลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้นในรูปแบบ ดังนี้

$$\Sigma (\text{element equation}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}}$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (Nodal Unknown) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้าง หรือ ค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ หากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน หรือ อาจเป็นค่าของความเร็วของของเหลวหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบต่อไปได้เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างเราสามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (Strain) และ ความเค้น (Stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อรู้อุณหภูมิที่จุดต่างๆก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้หรือเมื่อรู้ความเร็วของของไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

4.5 การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เราจะสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาต่างๆทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่เป็นโครงสร้างและที่ไม่ใช่โครงสร้างได้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น ปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างจะประกอบด้วย การวิเคราะห์ความเค้น ซึ่งรวมทั้งการวิเคราะห์โครงข้อหมุน โครงข้อแข็ง ความเข้มข้นของความเค้นตรงบริเวณที่เป็นรูเป็นรอยบาก หรือตรงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่าง นอกจากนี้ยังใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การโก่งของเสา การล้า (Fatigue) และ การสั่นสะเทือนของระบบโครงสร้างและระบบเครื่องจักรกลด้วย ส่วนใหญ่ที่ไม่ใช่โครงสร้างเช่น การถ่ายเทความร้อน การไหลของของเหลว รวมทั้งการซึมผ่านวัสดุพอร์ และ การตึงค้ำของแม่เหล็กไฟฟ้าก็สามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาเหล่านั้นได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านชีววิศวกรรม เช่น วิเคราะห์การทำงานของหัวใจตามข้อต่อต่างๆของร่างกาย เป็นต้น

เนื่องจากรูปแบบทางชิ้นงานต่างๆในทางวิศวกรรมโดยปกติจะมีความซับซ้อน วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ นับตั้งแต่ปัญหาการยืดหยุ่นของของแข็ง การถ่ายเทความร้อนในวัตถุตลอดจนการไหลของของไหลโดยการศึกษาวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำให้เรามองเห็นภาพรวม และประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถนำมาใช้ประยุกต์กับงานชนิดต่างๆกันได้หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้นๆสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ ประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่ไปกับการวิวัฒนาการทางคอมพิวเตอร์ ทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยสะดวกและในขณะเดียวกันช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการทดลองดังที่เคยปฏิบัติกันมา

บทที่ 5

ขั้นตอนการดำเนินงาน

5.1 การออกแบบโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม MSC Marc Meatat Student edition 2013 ของบริษัท MSC Software Corporation โดยแผนการวิเคราะห์การอัดรีดด้วยระเบียบไฟไนต์ อิลิเมนต์ในครั้งนี้ จะทำการวิเคราะห์ตามตัวแปรที่กำหนดเช่นเดียวกับที่แสดงในตารางที่ 5.1 และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมในครั้งนี้ไม่คิดผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดรีด

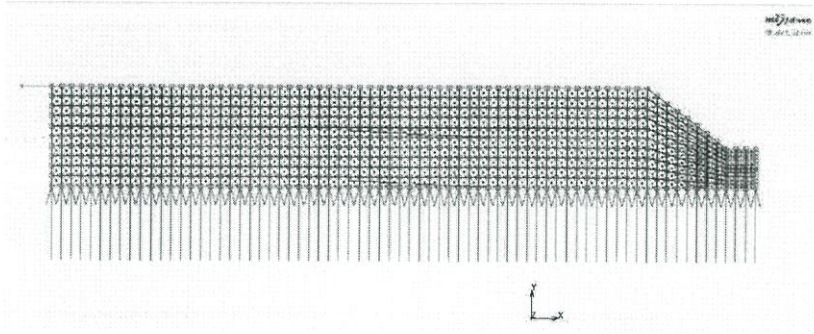
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้
ความยาวของชิ้นงาน, L	มิลลิเมตร	71
มุมตาย, α_1	องศา	37
รัศมีวัสดุชั้นใน, R_{oc}	มิลลิเมตร	5
รัศมีชิ้นงานก่อนอัดขึ้นรูป, R_o	มิลลิเมตร	10
รัศมีชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูป, R_f	มิลลิเมตร	4
สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานบริเวณกระบอกอัด, μ	-	0.3
อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด, r_x	-	6.25
ความเร็วของแรม, v_o	มิลลิเมตรต่อวินาที	1

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ต่างๆที่ใส่เข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์นั้น มีตัวแปรที่แตกต่างจากการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดหลายประการในการทดลองจริง ในการวิเคราะห์ที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยรูปแบบ 2 มิติ ที่มีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน (Axis Symmetric) โดยวิเคราะห์ภาคตัดครึ่งหนึ่งตามแนวยาวของชิ้นงาน ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.2 การสร้างแผนโครงข่ายอิลิเมนต์ (Mesh Generation)

ขั้นตอนนี้เริ่มต้นจากการขึ้นรูปอิลิเมนต์ของแบบจำลองโดยใส่ค่าตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 5.1 การสร้างโครงร่างทำได้โดยใช้คำสั่ง Geometry & Mesh เพื่อได้แบบจำลองคร่าวๆดังรูปที่ 5.1 ซึ่งในแบบจำลองจะมีการแบ่งการคำนวณเป็นแบบ คือ แบบสมมาตร (Axis symmetric) ซึ่งแบบสมมาตรจะช่วยลดระยะเวลาของเครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณในเรื่องของเวลาในการคำนวณและความสะดวกในเรื่องของโครงสร้างทำให้การคำนวณเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 5.1 แสดงแผนภาพโครงข่ายอิเลเมนต์ของชิ้นงาน

5.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

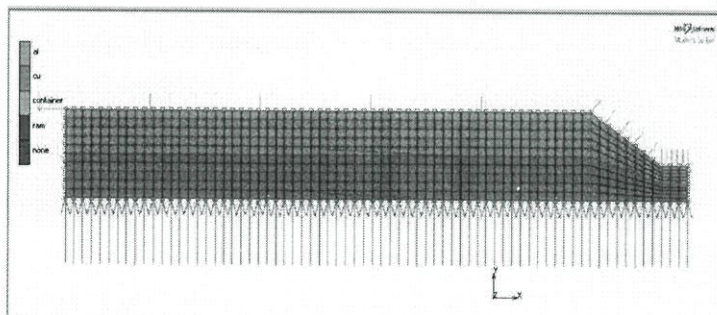
ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) นั้นได้กำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนตัว (Fixed Displacement) ที่แกนกลางแนวนอนตามแนวยาวของโครงสร้างแบบจำลอง เนื่องจากมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกนดังกล่าว จากนั้นจึงกำหนดให้หัวกด (Ram) มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว เท่ากับความเร็วการอัดขึ้นรูป ในส่วนของแรงดันที่ใช้ในการดันหัวกดจะใช้วิธีการรวมแรงที่จุดต่อ (Node) จุดแต่ละจุด

5.4 การกำหนดสมบัติของวัสดุ (Materials Properties)

การวิเคราะห์ครั้งนี้กำหนดให้คาน กระจบกอัด และหัวกด เป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Body) และกำหนดให้ชิ้นงานมีค่าตัวแปรต่างๆตามตารางที่ 5.1 โดยกำหนดให้โปรแกรมวิเคราะห์วัสดุด้วยสมการ Elastic – Plastic

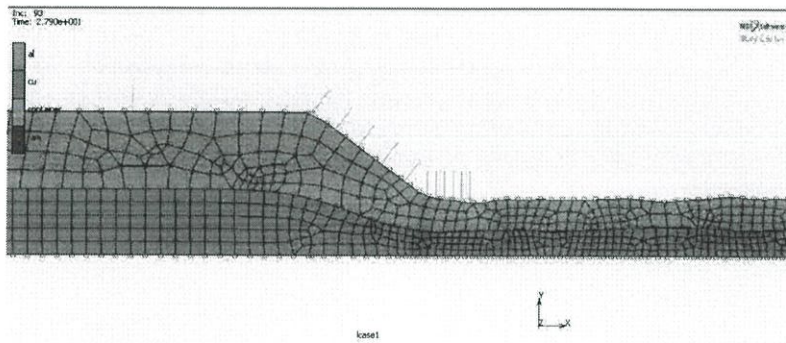
5.5 การกำหนดลักษณะของผิวสัมผัส (Contact Body)

การสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานวัสดุกับคาน กระจบกอัด และตัวหัวกดนั้นได้กำหนดให้มีการสัมผัสกันตลอดเวลาในระหว่างกระบวนการอัดรีด เพื่อกำหนดสภาพการหล่อลื่นหรือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานตามที่กำหนด การสัมผัสกันระหว่างสองวัสดุด้วยชุดคำสั่ง Contact ซึ่งแยกชนิดออกเป็น deform และ non-deform ใส่ Boundary condition ต่างๆลงในโครงสร้างจะได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใส่ค่าคุณสมบัติของวัสดุแล้ว

หลังจากนั้นนำแบบจำลองที่ใส่คุณสมบัติต่างๆของวัสดุแล้ว มาในส่วนของ Remeshing ซึ่ง จะช่วยให้การคำนวณมีความละเอียด และคำตอบคู่เข้าค่าจริงมากยิ่งขึ้น และยังคงใส่ค่าในชุดคำสั่ง Loadcase และ Run เพื่อดูผลที่ได้จากการจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งรูปผลที่ได้จากการจำลอง จะเป็นดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์

5.6 การหาผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

หลังจากที่ได้มีการกำหนดค่าต่างๆ ให้โปรแกรมมีข้อมูลในการคำนวณครบแล้ว จึงสั่งให้ โปรแกรมเริ่มคำนวณ โดยผลลัพธ์ของการคำนวณที่ต้องการคือ ค่าความเค้นที่กระจายในชิ้นงานใน ระหว่างกระบวนการ แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟของความเค้นที่กระจายในชิ้นงาน ผลลัพธ์ของการ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่ต้องการอีกค่าหนึ่งคือ ค่าความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ของชิ้นงาน จากการรันเรียบร้อยแล้วว่ามีลักษณะการกระจายความเค้นอย่างไร

บทที่ 6

ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ข้อมูล

6.1 ผลการศึกษาโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทำงานวิจัยเป็น 2 ส่วน คือในส่วนการวิเคราะห์คือ ส่วนของการทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้ Single Material และ Bi-materials ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดช่องว่างระหว่างสองวัสดุ (Gap) ใน Bi-Materials เป็นสำคัญ ส่วนในเรื่องของ Single Material จะพิจารณาที่แรงและระยะของตัวต้นเป็นสำคัญ เพื่อเอาผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่เคยมีผู้ศึกษาค้นคว้ามาก่อนซึ่งในส่วนนี้จะเป็นตัวเปรียบเทียบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จำลองไปแล้วนั้น สามารถนำมาใช้ได้จริง

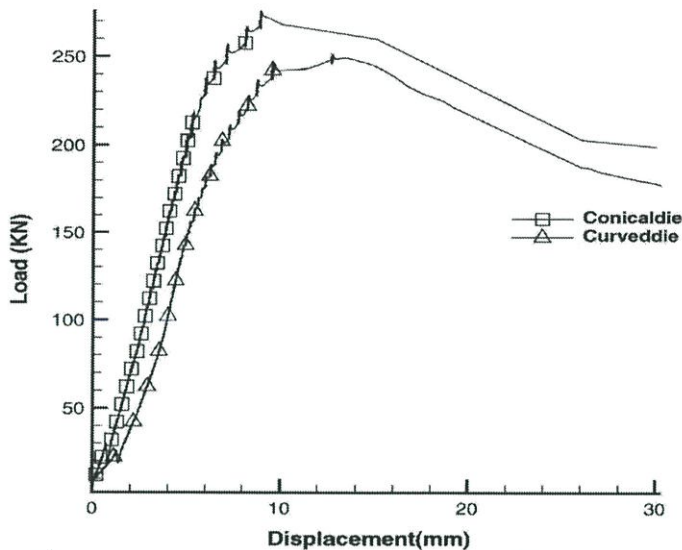
6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอัดขึ้นรูปของวัสดุชนิดเดียว (Single Material)

จากงานวิจัยในครั้งนี้เป็นงานวิจัยที่ได้ทำการวิเคราะห์เรื่องช่องว่างระหว่างสองวัสดุเป็นสำคัญ แต่ก็ต้องทำการศึกษาในเรื่องของแรงและระยะอัดของตัวต้นใน Single Material ด้วย เพื่อใช้เป็นตัวยืนยันและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ว่ามีความถูกต้องแม่นยำอย่างไร โดยได้ทำการจำลองผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat Student edition 2013 เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งจำเป็นต้องใส่ค่าต่างๆลงในโปรแกรม ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการอัดขึ้นรูป Single Material

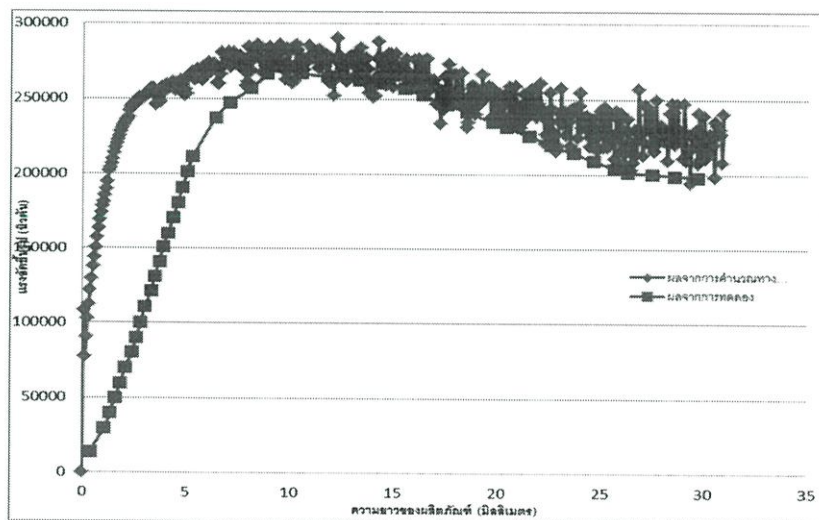
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้
ความยาวของชิ้นงาน, L	มิลลิเมตร	40
มุมตาย, α	องศา	30
รัศมีชิ้นงานก่อนอัดขึ้นรูป, R_0	มิลลิเมตร	15
รัศมีชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูป, R_f	มิลลิเมตร	12.5
สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานบริเวณกระบอกอัด, μ	-	0.15
อัตราส่วนปัวซอง, ν	-	0.33
สัมประสิทธิ์ความแข็ง, K	เมกะพาสคาล	287.288

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มระหว่างกราฟข้อมูลที่อ้างอิง [13] รูปที่ 6.1 กราฟแสดงค่าแรงและระยะอัดจากงานวิจัยของ M. Noorani-Azad ที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างมุมของแม่พิมพ์ที่มีขอบมนและขอบที่เป็นมุม ซึ่งกราฟดังรูปที่ 6.1 ได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะของแม่พิมพ์ย่อมมีผลต่อการอัดรีดขึ้นรูป แต่เทรนกราฟยังมีแนวโน้มที่เหมือนกัน ต่างกันที่ค่าแรงที่กระทำมากที่สุดเพียงเท่านั้น

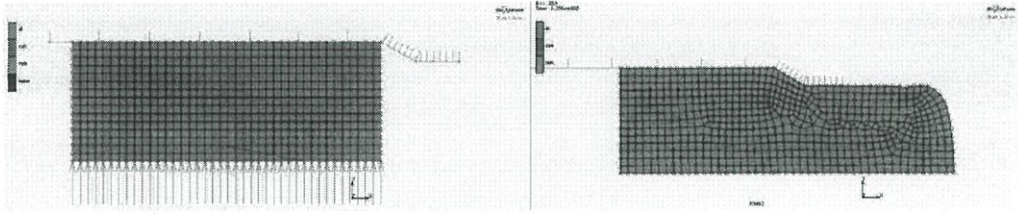


รูปที่ 6.1 กราฟแสดงค่าแรงและระยะอัดจากงานวิจัยของ M. Noorani-Azad [13]

กราฟที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แนวโน้มดังรูปที่ 6.2 กราฟแสดงค่าแรงและระยะอัดของตัวต้นที่ได้จากโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ M. Noorani-Azad [13] ซึ่งมีค่าความผิดพลาดจากกราฟคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์จากค่าที่ได้จากกราฟ ซึ่งเป็นข้อที่สามารถยืนยันได้ว่ารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถใช้งานได้จริงเพราะได้ค่าผลที่เป็นไปตามแบบจำลองตามงานวิจัยของ M. Noorani-Azad ที่กล่าวถึงการทดลองกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปและเทรนแนวโน้มของกระบวนการ ซึ่งแบบจำลองที่เราได้สร้างขึ้นผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat จะเป็นดังรูปที่ 6.3 ซึ่งได้แสดงเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เห็นเป็นภาพเรขาคณิตอย่างง่าย



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงค่าแรงและระยะอัดของตัวต้นที่ได้จากโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ M. Noorani-Azad [13]

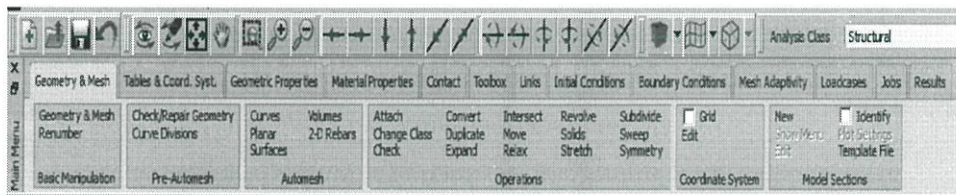


รูปที่ 6.3 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat

6.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอัดขึ้นรูปของวัสดุไบแมททีเรียล (Bi-Material)

วัสดุไบแมททีเรียล (Bi-Materials) เป็นโครงสร้างที่เกิดการประสานกันของวัสดุต่างชนิดในลักษณะซ้อนกันเป็นชั้น โดยมีคุณสมบัติทางกลแตกต่างกัน จึงเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายบริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน หรือการนำไปใช้ในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น [8,9]

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาช่องว่างระหว่างวัสดุสองชนิดเป็นสำคัญ เพราะความเสียหายในวัสดุส่วนมากมาจากการบดป่นภายในชิ้นงานหรือผิวสัมผัส ซึ่งรวมถึงช่องว่างระหว่างวัสดุตรงส่วนนั้นด้วย สิ่งที่จะบ่งบอกว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นในระหว่างสองวัสดุนั้นคือช่องว่าง (Gap) ซึ่งใช้เกณฑ์การวัดดังนี้ โดยการใช้ค่าความเผื่อเท่ากับ 0.04 มิลลิเมตร, 0.12 มิลลิเมตร, 0.2 มิลลิเมตร หรือ 1%, 3%, 5% ของอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกกับความหนาของชิ้นงานตลอดความยาวของชิ้นงานหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ ถ้าหากมีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับค่าความเผื่อ จะนับว่ามีการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก แต่หากมีขนาดน้อยกว่าค่าความเผื่อ จะนับว่าไม่มีการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก



รูปที่ 6.4 แสดงถึงหน้าต่างคำสั่งในโปรแกรม MSC Marc Mentat

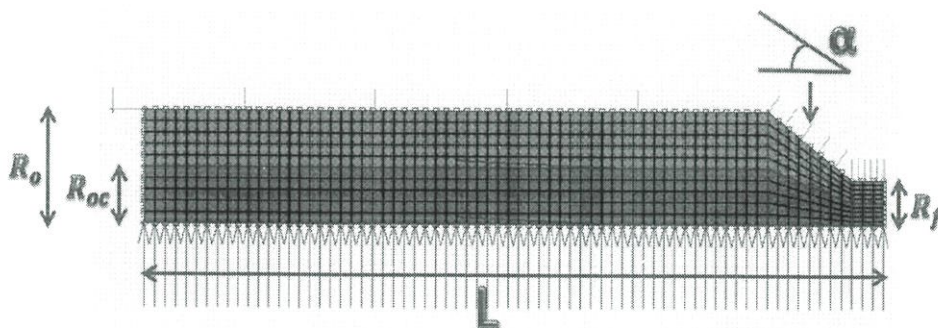
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาโดยใช้โปรแกรม MSC Marc Mentat ซึ่งมีคำสั่งต่างๆ ดังรูปที่ 6.4 กำหนดเงื่อนไขขอบของกระบวนการอัดขึ้นรูปพร้อม ดังตารางที่ 6.2 และค่าคุณสมบัติของวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยหรือวัสดุเอ (Material A) และวัสดุที่มีความแข็งแรงมากหรือวัสดุบี (Material B) ดังตารางที่ 6.3 จะได้แบบจำลองที่มีลักษณะโครงสร้างต่างๆ ดังรูปที่ 6.5 หลังจากนั้น ให้เปลี่ยนชนิดของวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกเพื่อแยกกรณีสำหรับวิเคราะห์ และปรับค่าอัตราส่วนปัวซองของเท่ากับ 0.3 และ 0.4 ในแต่ละกรณี เพื่อสังเกตการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่ใช้
ความยาวของชิ้นงาน, L	มิลลิเมตร	71
มุมตาย, α_1	องศา	37
รัศมีวัสดุชั้นใน, R_{oc}	มิลลิเมตร	5
รัศมีชิ้นงานก่อนอัดขึ้นรูป, R_o	มิลลิเมตร	10
รัศมีชิ้นงานหลังอัดขึ้นรูป, R_f	มิลลิเมตร	4
สัมประสิทธิ์ของความเสียหาย ทานบริเวณกระบอกอัด, μ	-	0.3
อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด, r_x	-	6.25
ความเร็วของแรม, v_o	มิลลิเมตร ต่อวินาที	1

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของชิ้นงานในแต่ละกรณี

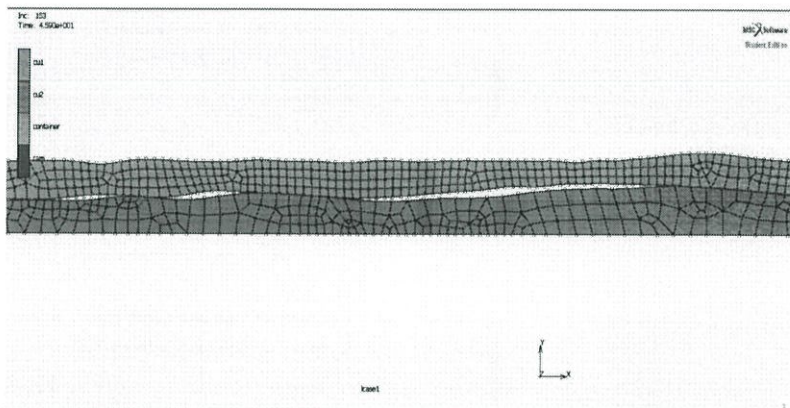
คุณสมบัติของวัสดุ	ชนิดของวัสดุที่ใช้	
	วัสดุเอ	วัสดุบี
มอดุลัสของสภาพ ยืดหยุ่น, E	69,000 เม กะพาสคาล	110,000 เม กะพาสคาล
อัตราส่วนปัวซอง, ν	0.33	0.36
สัมประสิทธิ์ระดับ ความเค้น, K	175 เมกะ พาสคาล	300 เมกะ พาสคาล
การเพิ่มความแข็งแรง จากความเครียด, n	0.2	0.5

ตารางที่ 6.3 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

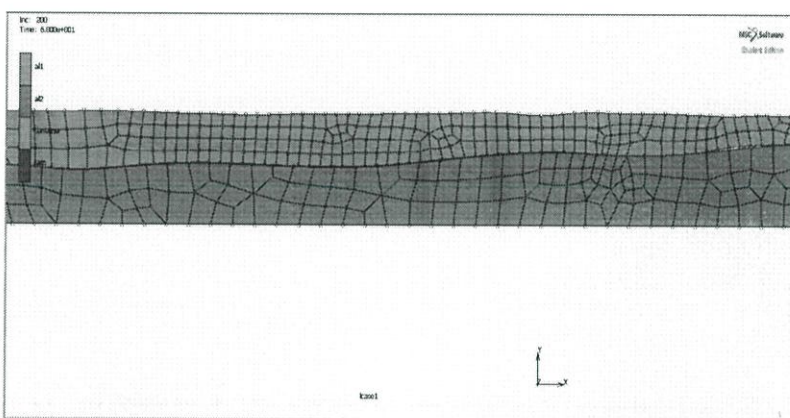


รูปที่ 6.5 แสดงลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานก่อนการอัดขึ้นรูป จากโปรแกรม MSC Marc Mentat

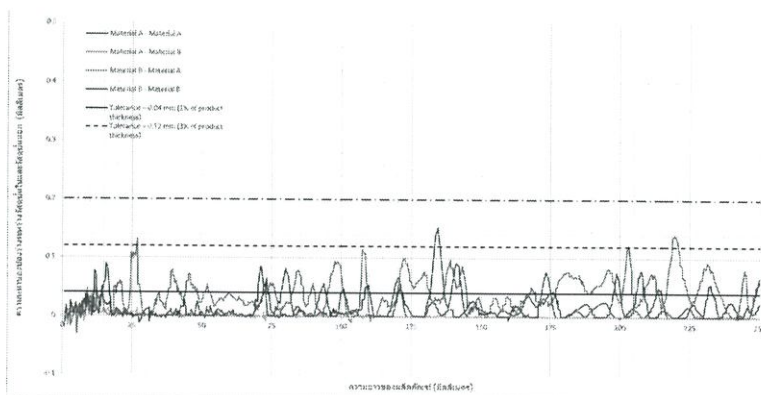
จากผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงผลภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังการอัดขึ้นรูปพร้อม เพื่อสังเกตการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก ดังรูปที่ 6.6 – รูปที่ 6.7 จากกราฟที่ได้ โดยใช้เกณฑ์ในการประเมินช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก ดังรูปที่ 6.8 – รูปที่ 6.10



รูปที่ 6.6 แสดงถึงผิวสัมผัสระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอก ในลักษณะที่มีช่องว่างระหว่างวัสดุ



รูปที่ 6.7 แสดงถึงผิวสัมผัสระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกในลักษณะที่ไม่มีช่องว่างระหว่างวัสดุ



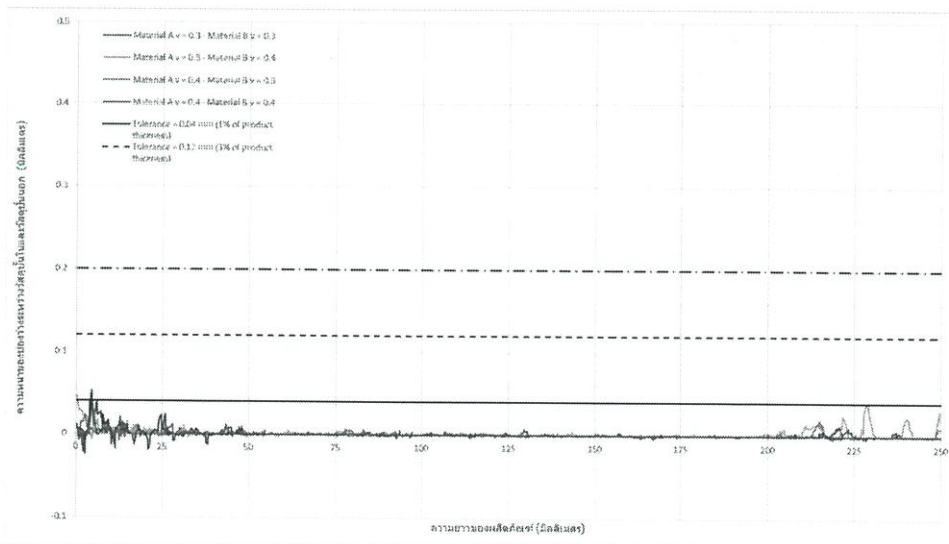
รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกกับความหนาของชิ้นงานเทียบกับความยาวของชิ้นงานหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ โดยใช้วัสดุเอและวัสดุบี และอัตราส่วนปัวซองที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ

วัสดุ ชั้นใน	วัสดุ ชั้นนอก	อัตราส่วนปัวซอง, ν		ผลที่ได้ในแต่ละค่าความเผื่อ		
		วัสดุ ชั้นใน	วัสดุ ชั้นนอก	1 เปอร์เซ็นต์	3 เปอร์เซ็นต์	5 เปอร์เซ็นต์
วัสดุเอ	วัสดุเอ	0.33	0.33	G	G	✓
วัสดุเอ	วัสดุบี	0.33	0.36	✓	✓	✓
วัสดุบี	วัสดุเอ	0.36	0.33	G	G	✓
วัสดุบี	วัสดุบี	0.36	0.36	G	G	✓

หมายเหตุ : ✓ = ไม่พบช่องว่างระหว่างวัสดุ เมื่อวัดผลจากเกณฑ์ที่กำหนด, G = พบช่องว่างระหว่างวัสดุ เมื่อวัดผลจากเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ 6.4 แสดงผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม MSC Marc Mentat ของวัสดุเอและวัสดุบี โดยใช้อัตราส่วนปัวซองที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ

หลังจากประเมินผลที่ได้จากรูปที่ 8 โดยใช้เกณฑ์ที่กำหนด และบันทึกลงในตารางที่ 3 พบว่า ค่าความเผื่อเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ และ 3 เปอร์เซ็นต์ ชนิดของวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกจะมีผลต่อการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุ โดยวัสดุชั้นในที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุชั้นนอกจะไม่พบช่องว่างระหว่างวัสดุ แต่วัสดุชั้นในที่มีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุชั้นนอกจะพบว่ามีช่องว่างระหว่างวัสดุ ในกรณีที่ใช้วัสดุชนิดเดียวกันจะพบว่ามีช่องว่างระหว่างวัสดุ และที่ค่าความเผื่อเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ จะไม่พบช่องว่างระหว่างวัสดุในทุกกรณี



รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนาของช่องว่างระหว่างวัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกกับความหนาของชิ้นงานเทียบกับความยาวของชิ้นงานหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ โดยใช้

บทที่ 7

สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการดำเนินการ

การปรับค่าตัวแปรได้อย่างอิสระโดยใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat ทำนายผลที่เกิดขึ้นของกระบวนการอัดขึ้นรูปร่วมพบว่า อัตราส่วนปิวของจะไม่มีผลต่อการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุ แต่ในกรณีที่ใช้วัสดุชั้นในและวัสดุชั้นนอกชนิดเดียวกัน อัตราส่วนปิวของจะมีผลต่อการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุ ซึ่งในความเป็นจริงอัตราส่วนปิวของของวัสดุไม่สามารถปรับค่าได้อย่างอิสระเนื่องจากเป็นค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ จึงศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมต่อไป

7.2 วิจารณ์ผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเป็นการสร้างแบบจำลองดังนั้นจึงมีความคาดเคลื่อนได้ดังนี้

- ข้อจำกัดทางด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MSC Mar Mentat เนื่องจากเป็น Student Edition จึงทำให้มีข้อจำกัดทางด้านโปรแกรมบางส่วน
- ไม่สามารถจำลองให้ระบบใหญ่ได้มากนัก เพราะอาจเกินขีดจำกัดของโปรแกรมในเรื่อง Student Edition

7.3 ข้อเสนอแนะ

นอกเหนือจากปัจจัยในเรื่องค่าอัตราส่วนปิวของที่ไม่มีผลต่อการเกิดช่องว่างระหว่างสองวัสดุนี้แล้วซึ่งที่ได้จากการจำลองที่ได้ทำไว้ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว ผู้เขียนได้วางแนวทางเพื่อที่จะศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องของการเกิดช่องว่างระหว่างสองวัสดุในกระบวนการอัดขึ้นรูป ต่อในอนาคต ดังนี้

- Die Angle
- Ram Velocity
- Ram Force

บรรณานุกรม

- [1] ธเนศ รัตโนชัยกุล (2553). รายงานการวิจัยเรื่อง การพัฒนากระบวนการอัดรีดอะลูมิเนียมแบบ กึ่งของแข็ง, โครงการวิจัยของนักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 1 – 20.
- [2] จิรสุข ศรีราช, จงจุลีย์ เก่งคำ, ศรายุทธ ธรรมลี และ พลพัก วรรณทอง (2556). รายงานการวิจัย เรื่อง การออกแบบแม่พิมพ์อัดรีดโลหะโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์, โครงการวิจัยของ นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น, หน้า 13 – 31.
- [3] ดร. วสวัชร นาคเขียว. การขึ้นรูปโลหะ, [การขึ้นรูปขึ้นงานก้อน], แหล่งที่มา <http://eng.cmu.ac.th/~wasawat/Extrusion1.pdf>, เข้าดูเมื่อวันที่ 28/03/2558.
- [4] Mikell P. Groover (2011). *Principles of Manufacturing*, 4th edition, ISBN: 978-0-470-50592-2, John Wiley & Son, New York.
- [5] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid (2008). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 5th edition, ISBN: 981-06-7935-X, Pearson Prentice Hall, Singapore.
- [6] สมชัย ตัณฑวิรุฬห์, สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ และ กรรณชัย กัลยาศิริ (2549). ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการดัดขึ้นรูปแบบเย็นต่อสมบัติเชิงกลของแท่งอลูมิเนียม, *การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่20*, จังหวัด นครราชสีมา.
- [7] B. Vamsi Krishna, P. Venugopal, K. Prasad Rao (2005). Co-extrusion of dissimilar sintered P/M preforms—An explored route to produce bimetallic tubes, *Materials Science and Engineering A409 (2005)*, pp. 77 – 83.
- [8] Pawel Kazanowski, Mario E. Epler, Wojciech Z. Misiolek (2004). Bi-metal rod extrusion—process and product optimization, *Materials Science and Engineering A369 (2004)*, pp. 170 – 180.
- [9] Dyi-Cheng Chen, Sheng-Kai Syu, Cing-Hong Wu, Sin-Kai Lin (2007). Investigation into cold extrusion of aluminum billets using three-dimensional finite element method, *Journal of Materials Processing Technology 192-193 (2007)*, pp. 188 – 193.
- [10] Betzlel Avitzur (1968), *Metal Forming Processes and Analysis (1968)*, pp. 166 – 169.
- [11] อนุรักษ์ กันตังค์ (2551). รายงานวิจัยเรื่อง การประเมินวิธีการออกแบบพื้นไร้คานอัดแรงที่ใช้ ทั่วไปโดยการวิเคราะห์แผ่นพื้นภายใต้แรงหักเหของเคเบิลโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์, โครงการวิจัย ของนักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 19 – 57.
- [12] อติศักดิ์ ชมมิ (2551). รายงานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์การอัดรีดผ่านแม่พิมพ์หมุน, โครงการวิจัย หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, หน้า 59 – 61.
- [13] M. Noorani-Azad, M. Baknshi-Jooybari, S.J. Hosseinipour, A. Gorji(2005). Experimental and numerical study of optimal die profile in cold forward rod

extrusion of aluminum, Journal of Materials Processing Technology 164-165 (2005), pp. 1572 – 1577.

- [14] ดร.ฉัตรชัย จันทร์เด่นดวง. กระบวนการบีบเข้ารูปโลหะแผ่น, [การขึ้นรูปโลหะแผ่น], แหล่งที่มา <http://www.vcharkarn.com/varticle/38806>, เข้าดูเมื่อวันที่ 23/05/2558.

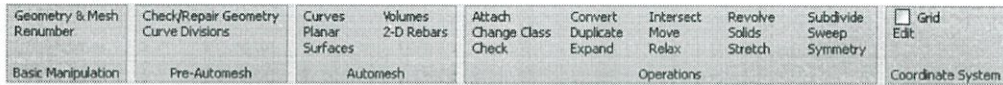
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ชุดคำสั่งเบื้องต้นของโปรแกรม MSC Marc Mentat

ชุดคำสั่งเบื้องต้นของโปรแกรม MSC Marc Mentat

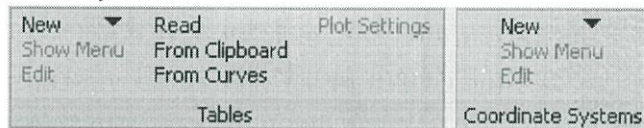
Geometry & Mesh



รูปที่ ก.1 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Geometry & Mesh

การแสดงผลทางเรขาคณิตอาจจะใช้เป็นจุดเริ่มต้นที่จะตาข่ายองค์ประกอบ จำกัด หรืออาจนำมาใช้โดยตรงในการจำลองวัตถุเกร็งแบบจำลองทางเรขาคณิตอาจถูกสร้างขึ้นทั้งที่นี้หรือนำเข้ามาจากระบบ CAD การแสดงผลทางเรขาคณิตอาจถูกสร้างขึ้นโดยใช้การสร้างแบบจำลองที่เป็นของแข็งหรือการสร้างจุดเส้นโค้งและพื้นผิว พื้นฐานของการวิเคราะห์ทางกลคอมพิวเตอร์ได้รับความช่วยเหลือเป็นตาข่ายองค์ประกอบ จำกัด ตาข่ายเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เมนูภายใต้แท็บนี้ ซึ่งใช้สร้างแบบจำลองในรูปแบบเริ่มต้น ตัวอย่างเช่น เส้น จุด พื้นผิว รวมไปถึงสร้างแบบจำลองสามมิติและนอกจากนี้ยังมีคำสั่งที่ใช้ควบคุม Geometry เหล่านั้น เช่น การเลื่อน การรีเซ็ตหมายเลขโหนด พ้อยพื้นผิว เส้น และยังสามารถใช้แบ่งเป็นส่วนย่อยเล็กๆของเส้นหรือพื้นผิว หรือแบบจำลองสามมิติ

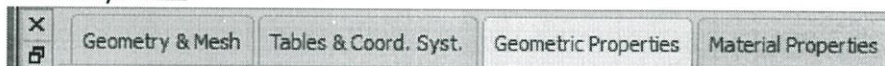
Table and Coordinate Systems



รูปที่ ก.2 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Table and Coordinate systems

การใช้ตารางการขับเคลื่อนขั้นตอนการป้อนข้อมูลจริงข้อมูลทางกายภาพทั้งหมดสามารถอ้างอิงตาราง / ฟังก์ชัน เมื่อใดก็ตามที่จำเป็นในการวิเคราะห์ตารางจะขึ้นอยู่กับประเมินมูลค่าปัจจุบันของตัวแปรอิสระคุณด้วยค่าอ้างอิงตารางจะมีมากที่สุดเท่าที่สี่ตัวแปรอิสระที่ตัวแปรอิสระมีความหมายทางร่างกายตัวอย่างเช่นขอให้โมดูลส์ของหนุ่มสาวก็คือฟังก์ชันของสายพันธุ์พลาสติกเทียบเท่าถือว่าเป็นข้อผิดพลาดของข้อมูลที่ยึดหยุ่นเพราะไม่สนับสนุนการทำงานนี้

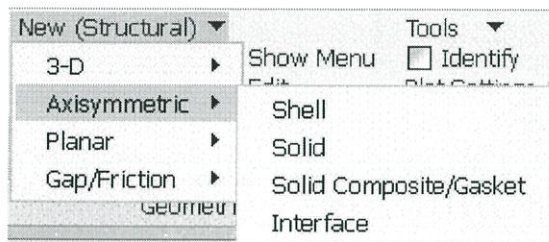
Geometric Properties



รูปที่ ก.3 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Geometric & Properties

พารามิเตอร์เหล่านี้รวมถึงข้อมูลความหนาสำหรับภาพถ่าย, เมมเบรนและองค์ประกอบประเภทเปลือก นอกจากนี้ยังมีพื้นที่หน้าตัดช่วงเวลาและทิศทางของปิดปากและ beams.It ยังเป็นไปได้ที่จะกำหนดขดเชย นอกจากนี้ชนิดองค์ประกอบบางอย่างที่จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการแก้ไขในการปรับปรุงพฤติกรรมการใช้องค์ประกอบสันนิษฐานว่าความเครียดหรือการขยายอย่างต่อเนื่อง เหล่านี้พารามิเตอร์เรขาคณิตจะถูกจัดกลุ่มขึ้นอยู่กับการต้องการของเทคโนโลยีองค์ประกอบที่เป็นภาพสะท้อนของฟิสิกส์ที่มีการสร้างแบบจำลอง ส่วนหนึ่งของการสร้างแบบจำลอง

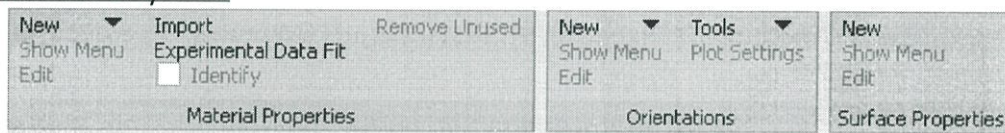
ทางกายภาพนอกจากนี้ยังสะท้อนให้เห็นในประเภทมาร์คคอปประกอบ ในการสร้างแบบจำลองหนึ่ง ต้องกำหนดรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนส่วนที่เกี่ยวข้องกับระดับโครงสร้างขององค์ประกอบ เพื่อเป็นตัวแทนของฟิสิกส์องค์ประกอบจะได้รับยังประเภทองค์ประกอบ



รูปที่ ก.4 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Axis symmetric

Axis symmetric เป็นองค์ประกอบที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางฟิสิกส์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับทิศทางเส้นรอบวงไม่มี องค์ประกอบเหล่านี้อาจมีพฤติกรรมแรงบิดรูปแบบในมาร์คคอปประกอบที่อนุญาตให้มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เส้นรอบวงโดยใช้เทคนิคฟูริเยร์ แต่องค์ประกอบเหล่านี้จะไม่ได้รับการสนับสนุนโดย GUI

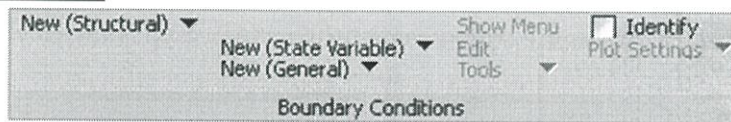
Materials Properties



รูปที่ ก.5 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Materials Properties

รายละเอียดสำหรับคุณสมบัติสำหรับวัสดุพฤติกรรมในทิศทางที่มีความหนา, พฤติกรรมเฉือนขวางและพฤติกรรมเมมเบรนที่มี uncoupled อย่างเต็มที่เฉือนขวางและเมมเบรน พฤติกรรมที่เป็นเชิงเส้นยืดหยุ่นที่โดดเด่นด้วยโมดูลัสเฉือนขวางและในเครื่องบินโมดูลัสของยังอัตราส่วนของปัวซองตามลำดับ ในทิศทางที่มีความหนาพฤติกรรมในความตึงเครียดยังเป็นเชิงเส้นและถูกควบคุมโดยโมดูลัสแรงดึงที่กำหนดไว้เป็นความดันต่อหน่วยความยาว ทุกโมดูลที่ใช้ในการอธิบายลักษณะของเมมเบรนในระนาบเฉือนขวางและพฤติกรรมแรงดึงจะมีการเปลี่ยนแปลงที่มีอุณหภูมิโดยใช้ตารางตัวแปรเดียว

Boundary Conditions



รูปที่ ก.6 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Boundary Conditions

เพื่อกระตุ้นหรือ จำกัด รูปแบบหนึ่งต้องใช้เงื่อนไขขอบเขตเงื่อนไขขอบเขตรวมถึงการไหลและข้อจำกัด นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ผ่านการสัมผัสแข็ง ในการวิเคราะห์โครงสร้างคงเป็นสิ่งสำคัญที่ จำกัด เพียงพอที่จะนำไปใช้เพื่อให้แน่ใจว่าการเคลื่อนไหวร่างกายแข็งเป็นไปได้

หมายเหตุ: ในฐานะที่เป็นเงื่อนไขขอบเขตมากที่สุดเท่าที่จำเป็นอาจจะกำหนด แต่พวกเขาจะไม่นำไปใช้ในการวิเคราะห์จนกว่าพวกเขาจะได้รับการเปิดใช้งานผ่าน Loadcase> โหลดหรืองาน> Properties> เมนูโหลดเริ่มต้น

Contact



รูปที่ ก.7 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Contact

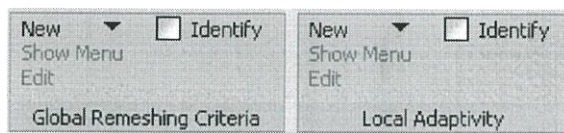
แบบจำลองของปัญหาทางกายภาพหลายต้องใช้ความสามารถในการจำลองปรากฏการณ์การติดต่อ ท่ามกลางคนอื่น ๆ รวมถึงการวิเคราะห์ข้อต่อ, ซีลยางยางและกระบวนการผลิต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับการวิเคราะห์ข้อต่อ จำกัด ที่แตกต่างกันจะต้องนำมาพิจารณาในพื้นที่ที่ติดต่อ ยกตัวอย่างเช่นในการวิเคราะห์โครงสร้างการรูกของร่างกายเข้าไปอีกจะต้องมีการหลีกเลี่ยงที่ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนไหลของความร้อนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่ร่างกายต้องได้รับการจำลอง

ในบทนี้ครั้งแรกความหมายของหน่วยงานที่ติดต่อกับการหารหรือ เรียงจะได้รับเงินที่แตกต่างกันของร่างกายติดต่อกับวิธีการในการตรวจสอบความถูกต้องของค่านิยมของร่างกายเพิ่มพารามิเตอร์ทางกายภาพและอื่น ๆ ถัดไปติดต่อดารจะนำ พวกเขาสามารถใช้ในการกำหนดคุณสมบัติเฉพาะต่อการติดต่อการรวมกันของร่างกาย ในที่สุดพื้นที่ที่ติดต่อและไม่รวมส่วนจะได้รับการแนะนำว่าเป็นตัวเลือกที่มีอิทธิพลต่อการตรวจสอบรายชื่อผู้ติดต่อโดยอัตโนมัติ

มันควรจะสังเกตว่าในบางกรณีตัวเลือกที่ติดต่อสามารถนำมาใช้เพื่อลดความซับซ้อนของการตั้งค่ารูปแบบของประกอบ จำกัด , ไม่จริงการสร้างแบบจำลองปรากฏการณ์การติดต่อกทางกายภาพตัวอย่างที่เรียกว่าการติดต่อกาวซึ่งสามารถนำไปใช้โดยอัตโนมัติสร้างข้อ จำกัด การเคลื่อนที่ระหว่างสองพื้นที่ที่ตาข่ายแยกของส่วนโครงสร้างเดียว

ค่าเริ่มต้นและขั้นตอนวิธีการติดต่อที่ใหญ่มากที่สุดในมาร์คจะขึ้นอยู่กับโหมดส่วน (NTS) อัลกอริทึม นี้ก็หมายความว่าโหมดสามารถในการติดต่อกับส่วนและที่ จำกัด ติดต่อกที่สอดคล้องกันจะนำไปใช้โหมดติดต่อ เมื่อเร็ว ๆ นี้ส่วนส่วน (STS) ขั้นตอนวิธีการได้รับการแนะนำที่บังคับใช้ข้อ จำกัด ในส่วนของรายชื่อผู้ติดต่อ (ขอบของประกอบใน 2 มิติหรือใบหน้า 3-D) พื้นฐานถึงความเครียดติดต่อกที่ถูกต้องมากขึ้นการจัดจำหน่ายและง่ายต่อการบังคับใช้ การรวมกันของเปลือกและองค์ประกอบที่เป็นของแข็งหรือเชิงเส้นและสมการกำลังสององค์ประกอบที่เป็นของแข็ง ซึ่งแตกต่างจากอัลกอริทึม NTS ก็ยังสนับสนุนการติดต่อเปลือกสองด้าน อัลกอริทึมเอสทีจะให้บริการเฉพาะในการวิเคราะห์โครงสร้าง การเลือกของอัลกอริทึม NTS หรือเอสทีจะทำในส่วนของการงาน สำหรับพารามิเตอร์บางอย่างที่กล่าวไว้ในบทปัจจุบันก็จะมีแสดงให้เห็นว่าพวกเขาจะนำไปใช้อัลกอริทึม NTS

Mesh Adaptivity



รูปที่ ก.8 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Mesh Adaptivity

adaptivity ตาข่ายในมาร์คประกอบด้วยสองขั้นตอน: remeshing ทั่วโลกและ adaptivity ท้องถิ่นใน remeshing ทั่วโลกส่วนที่สมบูรณ์ของรูปแบบการ remeshed ซึ่งหมายความว่าตาข่ายใหม่ถูกสร้างขึ้นและข้อมูลการแก้ปัญหาจากตาข่ายเก่าจะถูกย้ายไปอยู่ที่ใหม่ตาข่าย ในองค์ประกอบ adaptivity ท้องถิ่นจะแบ่งออกเป็นองค์ประกอบที่มีขนาดเล็ก ข้อมูลการแก้ปัญหาจะถูกโอนจากองค์ประกอบเดิมเพื่อองค์ประกอบใหม่ซึ่งครอบคลุมพื้นที่เดียวกันหรือปริมาณเป็นองค์ประกอบที่แยกทั้งสองขั้นตอนสามารถขณะนี้อย่างไม่นำมารวมกัน ทั้งในระดับโลกและ remeshing adaptivity ท้องถิ่นได้รับการสนับสนุนสำหรับการประมวลผลแบบขนาน (DDM) ด้วย remeshing ทั่วโลกมีข้อจำกัด ที่ร่างกายติดต่อ remeshing จะต้องสมบูรณ์ภายในโดเมน



รูปที่ ก.9 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Global Remeshing

Global remeshing ในขณะนี้ทำงานร่วมกันกับผู้ติดต่อ เป็นส่วนหนึ่งที่จะ remeshed ต้องมีร่างกายที่ติดต่อกัน มันไม่สามารถที่จะเชื่อมต่อไปยังส่วนอื่น ๆ ของรุ่นที่มีโหนดที่ใช้ร่วมกัน (ถ้าเป็นเช่นนั้นแล้วก็จะกลายเป็นตัดการเชื่อมต่อหลังจาก remeshing) เฉพาะองค์ประกอบที่ต่ำกว่าเพื่อที่ได้รับการสนับสนุนและความสามารถในการ remeshing สนับสนุนของแข็ง 2 มิติ, หอยและของแข็ง 3 มิติ เงื่อนไขขอบเขตจะถูกเก็บไว้กับ remeshing ข้อยกเว้นสำหรับรูสี่เหลี่ยมซ้อนทับและ hexahedral meshers ซึ่งสนับสนุนการไหลลดปริมาณ โปรดทราบว่า การป้อนข้อมูลรูปแบบใหม่ตารางที่ขับเคลื่อนด้วย (ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้น) จะต้องใช้ถ้าไหลลดจะนำไปใช้ในขอบเขตของร่างกายที่จะ remeshed

Results

Model Plot Path Plot History Plot	Design Plot Generalized XY Plot	Sample Points	Tools Geometry Distance Report Writer	Animation Movies
-----------------------------------------	------------------------------------	---------------	---------------------------------------------	---------------------

รูปที่ ก.10 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Results

เมื่อคุณเสร็จสิ้นการวิเคราะห์คุณจะต้องวิเคราะห์ผลและตรวจสอบเกณฑ์ที่ได้รับการยอมรับสำหรับแต่ละการเพิ่มผลการร้องขอจะถูกเก็บไว้ในแฟ้มตามลำดับ ใช้ขั้นตอนพื้นฐานต่อไปนี้ THRE เพื่อให้เข้าถึงผลการผลการประมวลผลบนแผง postprocessing ช่วยให้เข้าถึงตัวเลือกต่างๆที่มีพล็อต

ใน MSC Marc Mentat

Loadcase 1: ใช้ P1 ก่อนโหลด

Loadcase 2: ทำการวิเคราะห์ eigenfrequency ตามโครงสร้างก่อนเครียด

Loadcase 3: ทำการวิเคราะห์โดยใช้ชั่วคราวซ้อนโหมดไอเกน โหลด P2 ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชัน

เวลาผ่านตัวเลือกตาราง loadcase แต่ละคนสามารถมีค่าที่แตกต่างกันสำหรับการควบคุมซ้ำ

กระบวนการที่ใช้

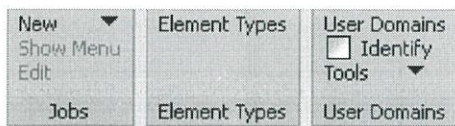
ขั้นตอนที่ 1 เปิดไฟล์ผล

ขั้นตอนที่ 2 เลือกข้อมูลที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 3 เลือกเทคนิคการแสดงผลที่เหมาะสมและการแสดงผล

การแนะนำ

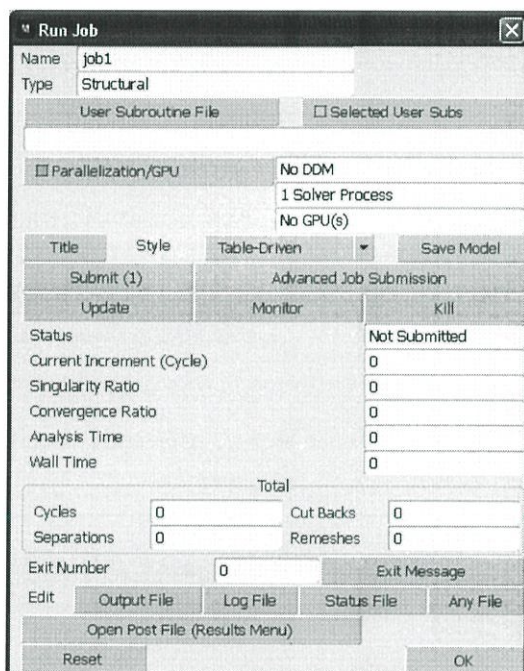
ขณะที่เราได้กล่าวแล้วการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยทั่วไปไม่เชิงเส้น จำกัด ประกอบด้วยหลายขั้นตอนที่เรียกว่าเพิ่มขึ้นสำหรับผลที่เพิ่มขึ้นสามารถเข้าถึงได้ผ่านเปิดต่อไปหรือข้ามลำดับของคำสั่ง เปิดเข้าถึงไฟล์และเปิดมันสำหรับการอ่าน ชื่อไฟล์ผลเป็นกำหนดการชื่องานและ .t19 ต่อท้ายหรือ .t16 ถัดไปส่งแฟ้มซีไปที่เพิ่มขึ้นต่อไป ข้อมูลผลประกอบการเพิ่มขึ้นที่ถูกอ่านโดยคำสั่งต่อไปสามารถใช้ได้สำหรับการประมวลผลวิธีการแก้ปัญหาของการวิเคราะห์องค์ประกอบ จำกัด ที่เกี่ยวข้องกับการไม่ต่อเนื่องทางเรขาคณิตของวัตถุและถ้ามีชั่วคราวต่อเนื่อง เรขาคณิตต่อเนื่องจะได้รับโดยการสร้างตาข่ายองค์ประกอบ จำกัด ที่ประกอบด้วยส่วนใหญ่ของโหนดและองค์ประกอบ ผล (ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพวกเขา) จะจัดที่ใดโหนดหรือจุดรวมตัวกันขององค์ประกอบ เราสร้างความแตกต่างโดยอ้างถึงหนึ่งเป็นข้อมูลที่โหนดและอื่น ๆ ที่เป็นข้อมูลจากองค์ประกอบที่จุดบูรณาการข้อมูลที่โหนดเป็นเวกเตอร์ที่จำนวนองศาของเสรีภาพในการแสดงให้เห็นปริมาณจำนวนขององค์ประกอบในเวกเตอร์ ข้อมูลจากองค์ประกอบที่จุดบูรณาการเป็นทั้งเวกเตอร์หรือข้อมูลเมตริกซ์ข้อมูลจากองค์ประกอบที่จุดบูรณาการไม่ได้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำมาใช้โดยตรงในโปรแกรมกราฟฟิก ข้อมูลจากองค์ประกอบที่จุดบูรณาการมีการประเมินไปยังโหนดดังนั้นการสร้างข้อมูลที่โหนดจากองค์ประกอบค่าที่โหนดคำนวณโดยการคาดการณ์เชิงเส้นของค่าเฉลี่ยและ centroidal จุดบูรณาการที่ใกล้เคียงกับโหนด โหนดอาจจะใช้ร่วมกันโดยองค์ประกอบหลายอย่าง แต่ละองค์ประกอบมีส่วนช่วยในค่าที่แตกต่างกันที่อาจเกิดขึ้นกับโหนดที่ใช้ร่วมกัน ค่าจะสรุปและเฉลี่ยจากจำนวนองค์ประกอบที่เอื้อถ้าโหนดใช้ร่วมกันโดยองค์ประกอบของวัสดุที่แตกต่างกันกระบวนการเฉลี่ยอาจไม่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้โปรแกรมหาจากค่าเฉลี่ยค่าใช้ตัวเลือกระยะเขตอันตราย

Job

รูปที่ ก.11 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Job

คำสั่งกลุ่มซึ่งรวมกรณีโหลดหลายที่จะนำมาใช้ในการจำลอง นอกจากนี้ยังถูกใช้ไป:

- การส่งออกกำหนดและควบคุมตัวแปรทั่วโลก
 - กำหนดประเภทองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบ
 - ระบุพารามิเตอร์การคำนวณเช่นจัดสรรหน่วยความจำวิธีการแก้และแบบขนาน
- เมนูย่อยจะขึ้นอยู่กับชนิดของการวิเคราะห์ เป็นกลุ่มของบทนี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์โครงสร้าง



รูปที่ ก.12 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Run Job

Run Job เป็นชุดคำสั่งที่ควบคุมการทำงานของงานโดย MSC Marc Mentat จำนวนการตั้งค่าที่มีอยู่ในเมนูนี้และมันยังสามารถใช้ในการติดตามความคืบหน้าของงานในระหว่างขั้นตอนการแก้ปัญหา

Loadcase

รูปที่ ก.13 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Loadcase

แท็บนี้จะใช้ในการกำหนดประเภทของกรณีนี้ไหลดเลือกเงื่อนไขขอบเขตระยะเวลาของระยะเวลาและการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่จะควบคุมการบรรจบกันและความถูกต้องของการจำลองเมนูกรณีไหลดจะขึ้นอยู่กับระดับการวิเคราะห์

Post File Control

รูปที่ ก.14 แสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Post File Control

หน้าต่างการควบคุม ใช้การควบคุมหน้าต่างมาตรฐานซึ่งจะช่วยให้คุณปรับขนาดเมนูหลัก หนึ่งยังสามารถปรับขนาดภาพที่แสดงผลเมนูป๊อปอัพมาในทั้งสองรูปแบบ - ลอย / undockable และลอย / dockable ในลอย / สไตล์ undockable เช่นระบุเมนูที่ปรากฏข้างต้นเมนูที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ทุกที่บนหน้าจอและจะยังคงเปิดจนกว่าจะมีการปิดการใช้คำสั่งตกลง คำสั่งอื่น ๆ ที่อาจจะมีการดำเนินการก่อนป๊อปอัพนี้ถูกปิด ในลอย / เมนู dockable ตามที่แสดงด้านล่าง ปันเมนูทรัพย์สินสามารถปรับเปลี่ยนได้ทุกที่ แต่คำสั่งในเมนูปันทรัพย์สินสามารถดำเนินการได้คำสั่งในโครงสร้างการปกครองคุณสมบัติป๊อปอัพไม่สามารถดำเนินการและเมนูที่ผู้ปกครองไม่สามารถย้ายไปจนกว่าเด็กป๊อปอัพจะปิด ข้อจำกัดนี้นำไปใช้กับหน้าต่างผู้ปกครองรวมทั้งหน้าต่างหลัก

ภาคผนวก ข

การใช้โปรแกรม MSC Marc Mentat เบื้องต้น

คู่มือการใช้งาน MSC Marc Mentat เบื้องต้น

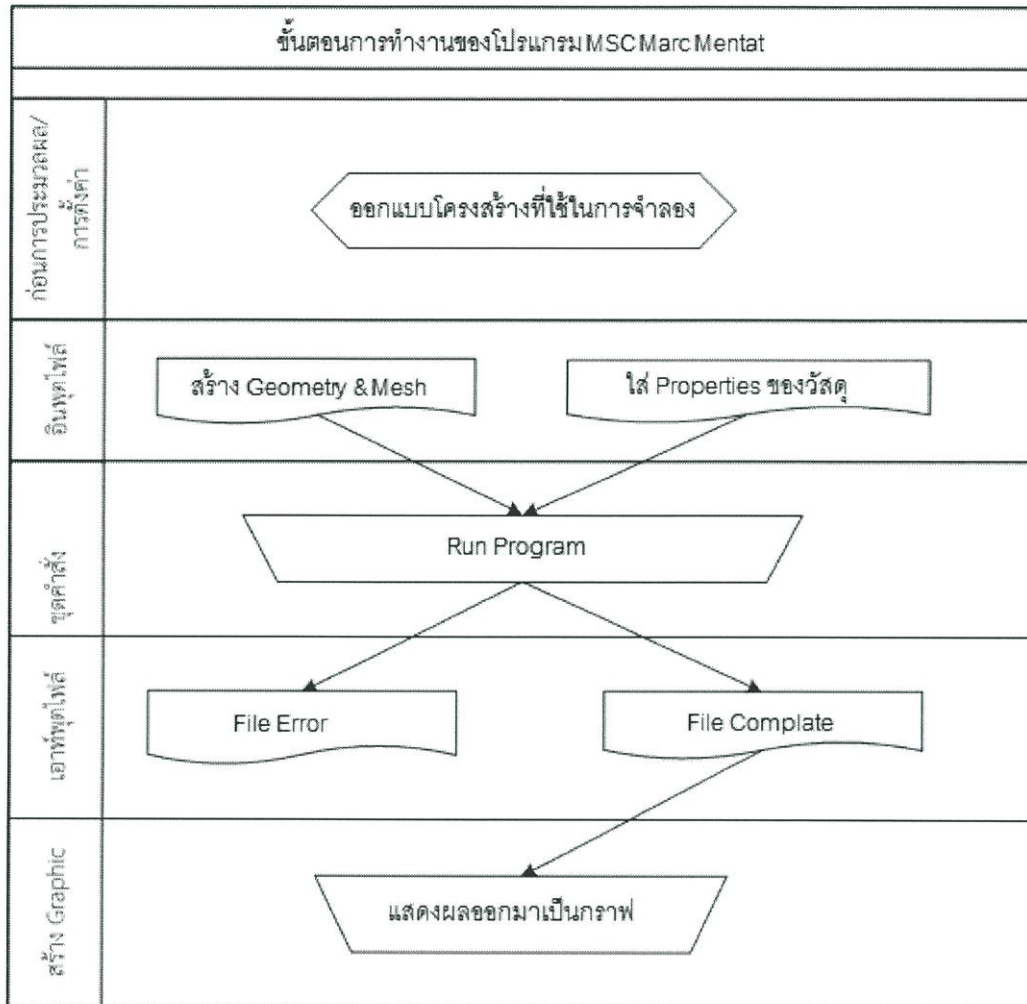
MSC Marc Mentat

Marc ในการส่งมอบโซลูชันที่สมบูรณ์ (ก่อนการประมวลผล, การแก้ปัญหาและการโพสต์) สำหรับ FEA ไม่เชิงเส้นโดยปริยาย มาร์คให้ภัยที่สุดในการใช้งานและความสามารถในการที่แข็งแกร่งที่สุดสำหรับการติดต่อสายพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่และการวิเคราะห์ Multiphysics มีอยู่ในปัจจุบันในการแก้ปัญหาเชิงเส้นแบบคงที่และกึ่งคงที่

Marc ไม่มีข้อจำกัดดังกล่าวที่สร้างขึ้นจากวันแรกของการแก้ปัญหาเชิงมาร์คใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงและเทคโนโลยี FE ที่จะได้รับอย่างต่อเนื่องโซลูชันแปรสภาพปัญหาไม่เชิงเส้นสูงที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้นสายพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่และการกำจัดและการติดต่อ Marc ยังรวมเอาความสามารถในการ Multiphysics ร้ายแรงที่ช่วยให้วิศวกรในการจำลองสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการมีเพศสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างความร้อนของเหลวอะคูสติกไฟฟ้าและแม่เหล็ก

สามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://www.mssoftware.com/>

หลักการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ ข.1 แสดงหลักการทำงานของโปรแกรม

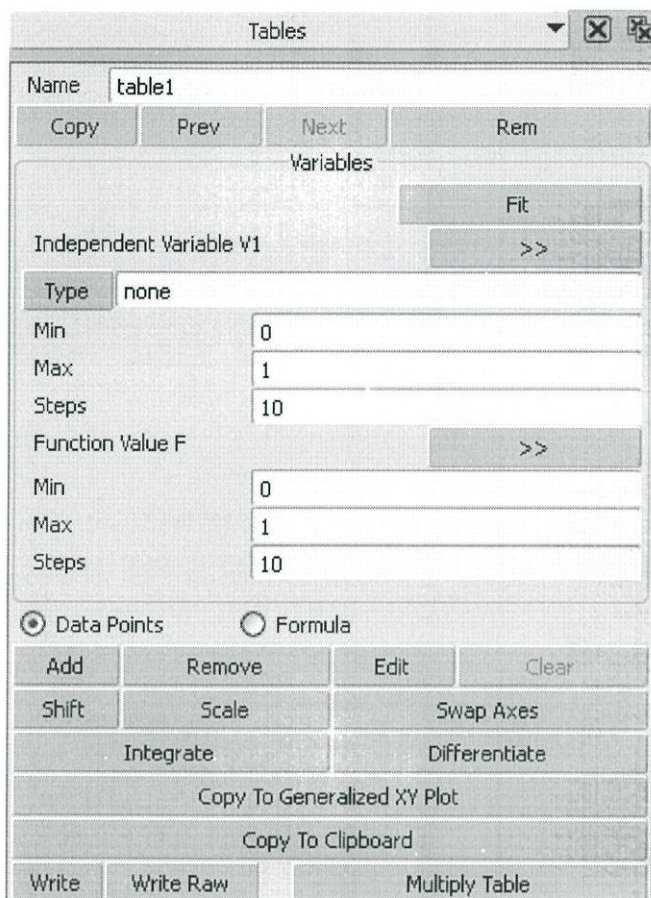
ส่วนประกอบการทำงาน

โครงสร้างการทำงานของชุดคำสั่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆ คือ การกำหนดค่าเริ่มต้นในการจำลอง การสร้างแบบจำลอง การตั้งค่าวิธีการคำนวณ และการคำนวณ

การกำหนดค่าเริ่มต้นในการจำลอง เป็นการกำหนดค่าต่างๆก่อนที่จะสร้างการจำลองหรือการคำนวณเช่นการกำหนดหน่วยที่ใช้ในการจำลอง การกำหนดมิติในการจำลอง ฯ ตัวอย่างเช่น

----- Input Value in Table -----

Tables



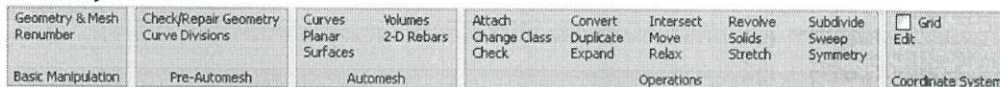
รูปที่ ข.2 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Table

การใช้ตารางขับเคลื่อนขั้นตอนการป้อนข้อมูลจริงข้อมูลทางกายภาพทั้งหมดสามารถอ้างอิงตาราง / ฟังก์ชัน เมื่อใดก็ตามที่จำเป็นในการวิเคราะห์ตารางจะขึ้นอยู่กับค่าประเมิณมูลค่าปัจจุบันของตัวแปรอิสระคูณด้วยค่าอ้างอิงตารางจะมีมากที่สุดเท่าที่สี่ตัวแปรอิสระตราบใดที่ตัวแปรอิสระมีความหมายทางร่างกายตัวอย่างเช่นขอให้โมดูลัสของหนุ่มสาวก็คือฟังก์ชันของสายพันธุ์พลาสติกเทียบเท่าถือว่าเป็นข้อผิดพลาดของข้อมูลที่ยึดหยุ่นเพราะไม่สนับสนุนการทำงานนี้

การสร้างแบบจำลอง เป็นชุดคำสั่งสำหรับสร้างแบบจำลองและกำหนดค่าต่างๆของโครงร่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตัวอย่างเช่น

----- Create Model -----

Geometry & Mesh



รูปที่ ข.3 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Geometry & Mesh

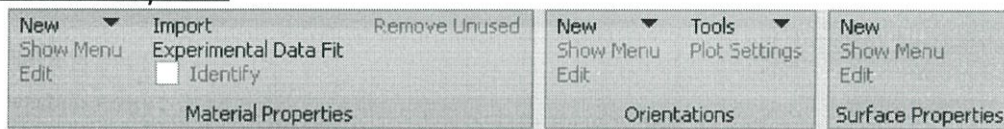
การแสดงผลทางเรขาคณิตอาจใช้เป็นจุดเริ่มต้นที่จะตาข่ายองค์ประกอบ จำกัด หรืออาจนำมาใช้โดยตรงในการจำลองวัตถุเกร็งแบบจำลองทางเรขาคณิตอาจถูกสร้างขึ้นทั้งที่นี้หรือนำเข้าจากระบบ CADการแสดงผลทางเรขาคณิตอาจถูกสร้างขึ้นโดยใช้การสร้างแบบจำลองที่เป็นของแข็งหรือ

การสร้างจุดเส้นโค้งและพื้นผิว พื้นฐานของการวิเคราะห์ทางกลคอมพิวเตอร์ได้รับความช่วยเหลือเป็นตาข่ายองค์ประกอบ จำกัด ตาข่ายเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เมนูภายใต้แท็บนี้ ซึ่งใช้สร้างแบบจำลองในรูปแบบเริ่มต้น ตัวอย่างเช่น เส้น จุด พื้นผิว รวมไปถึงสร้างแบบจำลองสามมิติและนอกจากนี้ยังมีคำสั่งที่ใช้ควบคุม Geometry เหล่านั้น เช่น การเลื่อน การรีเซ็ตหมายเลขโหนด พ้อยพื้นผิว เส้น และยังสามารถใช้แบ่งเป็นส่วนย่อยเล็กๆของเส้นหรือพื้นผิว หรือแบบจำลองสามมิติ

การตั้งค่าวิธีการคำนวณ เป็นการตั้งค่ารูปแบบการคำนวณ และตั้งค่าตัวแปรที่ต้องการให้เก็บข้อมูล ตัวอย่างเช่น

----- Input Material Properties -----

Materials Properties



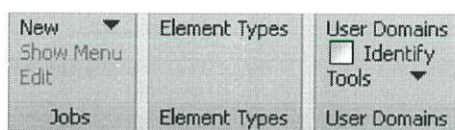
รูปที่ ข.4 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Materials Properties

รายละเอียดสำหรับคุณสมบัติสำหรับวัสดุพฤติกรรมในทิศทางที่มีความหนา, พฤติกรรมเฉือนขวางและพฤติกรรมเมมเบรนที่มี uncoupled อย่างเต็มที่เฉือนขวางและเมมเบรน พฤติกรรมที่เป็นเชิงเส้นยืดหยุ่นที่โดดเด่นด้วยโมดูลัสเฉือนขวางและในเครื่องบินโมดูลัสของยังอัตราส่วนของปัวซองตามลำดับ ในทิศทางที่มีความหนาพฤติกรรมในความตึงเครียดยังเป็นเชิงเส้นและถูกควบคุมโดยโมดูลัสแรงดึงที่กำหนดไว้เป็นความดันต่อหน่วยความยาว ทุกโมดูลที่ใช้ในการอธิบายลักษณะของเมมเบรนในระนาบเฉือนขวางและพฤติกรรมแรงดึงจะมีการเปลี่ยนแปลงที่มีอุณหภูมิโดยใช้ตารางตัวแปรเดียว

การคำนวณเป็นการกำหนดค่าต่างๆที่ต้องการให้แสดงผล จำนวนที่ต้องการให้คำนวณหรือเงื่อนไขในการหยุดคำนวณของโปรแกรม ตัวอย่างเช่น

----- Job & Result-----

Job



รูปที่ ข.5 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Job

คำสั่งกลุ่มซึ่งรวมกรณีไหลหลายที่จะนำมาใช้ในการจำลอง นอกจากนี้ยังถูกใช้ไป:

- การส่งออกกำหนดและควบคุมตัวแปรทั่วโลก
 - กำหนดประเภทองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบ
 - ระบุพารามิเตอร์การคำนวณเช่นจัดสรรหน่วยความจำวิธีการแก้และแบบขนาน
- เมนูย่อยจะขึ้นอยู่กับชนิดของการวิเคราะห์ เป็นกลุ่มของบทนี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์โครงสร้าง

Results

Model Plot Path Plot History Plot	Design Plot Generalized XY Plot	Sample Points	Tools Geometry Distance Report Writer	Animation Movies
-----------------------------------------	------------------------------------	---------------	---------------------------------------------	---------------------

รูปที่ ข.6 แสดงหลักการทำงานของชุดคำสั่ง Reslts

เมื่อคุณเสร็จสิ้นการวิเคราะห์คุณจะต้องวิเคราะห์ผลและตรวจสอบเกณฑ์ที่ได้รับการยอมรับสำหรับแต่ละการเพิ่มผลการร้องขอจะถูกเก็บไว้ในแฟ้มตามลำดับ ใช้ขั้นตอนพื้นฐานต่อไปนี้ THRE เพื่อให้เข้าถึงผลการผลการประมวลผลบนแผง postprocessing ช่วยให้เข้าถึงตัวเลือกต่างๆที่มีพล็อตใน MSC Marc Mentat

Loadcase 1: ใช้ P1 ก่อนโหลด

Loadcase 2: ทำการวิเคราะห์ eigenfrequency ตามโครงสร้างก่อนเครียด

Loadcase 3: ทำการวิเคราะห์โดยใช้ชั่วคราวซ้อนโหมดไอเกน โหลด P2 ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชัน

เวลาผ่านตัวเลือกตาราง loadcase แต่ละคนสามารถมีค่าที่แตกต่างกันสำหรับการควบคุมซ้ำ

กระบวนการที่ใช้

ขั้นตอนที่ 1 เปิดไฟล์ผล

ขั้นตอนที่ 2 เลือกข้อมูลที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 3 เลือกเทคนิคการแสดงผลที่เหมาะสมและการแสดงผล

การแนะนำ

ขณะที่เราได้กล่าวแล้วการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยทั่วไปไม่เชิงเส้น จำกัด ประกอบด้วยหลายขั้นตอนที่เรียกว่าเพิ่มขึ้นสำหรับผลที่เพิ่มขึ้นสามารถเข้าถึงได้ผ่านเปิดต่อไปหรือข้ามลำดับของคำสั่ง เปิดเข้าถึงไฟล์และเปิดมันสำหรับการอ่าน ชื่อไฟล์ผลเป็นกำหนดการชื่องานและ .t19 ต่อท้ายหรือ .t16 ถัดไปส่งแฟ้มชี้ไปที่เพิ่มขึ้นต่อไป ข้อมูลผลประกอบการเพิ่มขึ้นที่ถูกอ่านโดยคำสั่งต่อไปสามารถใช้ได้สำหรับการประมวลผลวิธีการแก้ปัญหาของการวิเคราะห์องค์ประกอบ จำกัด ที่เกี่ยวข้องกับการไม่ต่อเนื่องทางเรขาคณิตของวัตถุและถ้ามีข้อต่อเนื่อง เรขาคณิตต่อเนื่องจะได้รับโดยการสร้างตาข่ายขององค์ประกอบ จำกัด ที่ประกอบด้วยส่วนใหญ่ของโหนดและองค์ประกอบ ผล (ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของพวกเขา) จะจัดที่ใดโหนดหรือจุดรวมตัวกันขององค์ประกอบ เราสร้างความแตกต่างโดยอ้างถึงหนึ่งเป็นข้อมูลที่โหนดและอื่น ๆ ที่เป็นข้อมูลจากองค์ประกอบที่จุดบูรณาการข้อมูลที่โหนดเป็นเวกเตอร์ที่จำนวนองศาของเสรีภาพในการแสดงให้เห็นปริมาณจำนวนขององค์ประกอบในเวกเตอร์ ข้อมูลจากองค์ประกอบที่จุดบูรณาการเป็นทั้งเวลาเวกเตอร์หรือข้อมูลเมตริกซ์ข้อมูลจากองค์ประกอบที่จุดบูรณาการไม่ได้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำมาใช้โดยตรงในโปรแกรมกราฟิก ข้อมูลจากองค์ประกอบที่จุดบูรณาการมีการประเมินไปยังโหนดดังนั้นการสร้างข้อมูลที่โหนดจากองค์ประกอบค่าที่โหนดคำนวณโดยการคาดการณ์เชิงเส้นของค่าเฉลี่ยและ centroidal จุดบูรณาการที่ใกล้เคียงกับโหนด โหนดอาจจะใช้ร่วมกันโดยองค์ประกอบหลายอย่าง แต่ละองค์ประกอบมีส่วนช่วยในค่าที่แตกต่างกันที่อาจเกิดขึ้นกับโหนดที่ใช้ร่วมกัน ค่าจะสรุปและเฉลี่ยจากจำนวนองค์ประกอบที่เอื้อถ้าโหนดใช้ร่วมกันโดยองค์ประกอบของวัสดุที่แตกต่างกันกระบวนการเฉลี่ยอาจไม่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้โปรแกรมหาค่าเฉลี่ยค่าใช้ตัวเลือกระยะเขตอันตราย

ภาคผนวก ค

การใช้โปรแกรม MSC Marc Mentat เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้น

การใช้งานโปรแกรม MSC Marc Mentat

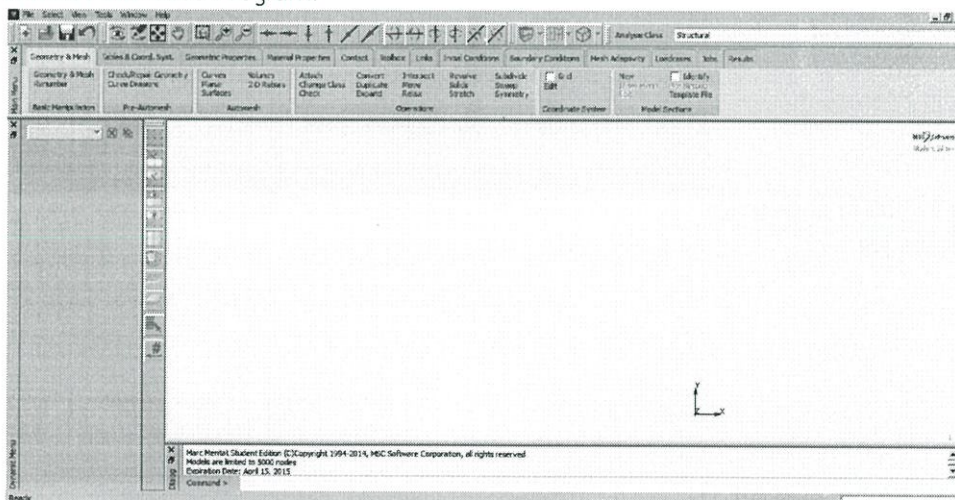
MSC Marc Mentat เป็นโปรแกรมที่ใช้ MSC ทำให้ผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ที่ช่วยให้วิศวกรในการตรวจสอบและเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบของพวกเขาโดยใช้ต้นแบบเสมือน ลูกค้านำเกือบทุกส่วนหนึ่งของการผลิตที่ใช้ซอฟต์แวร์ของเราที่จะเติมเต็มและในบางกรณีแม้แทนที่ต้นแบบทางกายภาพ "การสร้างและการทดสอบ" กระบวนการที่ได้รับการแบบดั้งเดิมที่ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ในฐานะที่เป็นพันธมิตรที่เชื่อถือได้, MSC ซอฟต์แวร์จะช่วยให้ บริษัท ปรับปรุงคุณภาพประหยัดเวลาและลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการทดสอบของสินค้าที่ผลิต ผลิตภัณฑ์ของเราได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้คาดการณ์ว่าผลิตภัณฑ์ที่จะทำงานในโลกแห่งความจริงที่จะช่วยให้วิศวกรด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เป็นนวัตกรรมมากขึ้นได้อย่างรวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

MSC เทคโนโลยีซอฟต์แวร์จะถูกใช้โดยผู้ผลิตชั้นนำสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ จำกัดเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น (FEA), อะคูสติกมีปฏิสัมพันธ์ของเหลวโครงสร้าง (FSI) หลายฟิสิกส์เพิ่มประสิทธิภาพความเมื่อยล้าและความทนทานการเปลี่ยนแปลงหลายร่างกายและการควบคุมการจำลองระบบ MSC เป็นหัวหน้าในหลายเทคโนโลยีที่มีตอนนี้ฟิงพาอุตสาหกรรมการวิเคราะห์และคาดการณ์ความเครียดและความเครียดการสั่นสะเทือนและการเปลี่ยนแปลง, อะคูสติกและการวิเคราะห์ความร้อนในผลิตภัณฑ์ของเราเรื่อง MSC Marc Mentat

สามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://www.mssoftware.com>

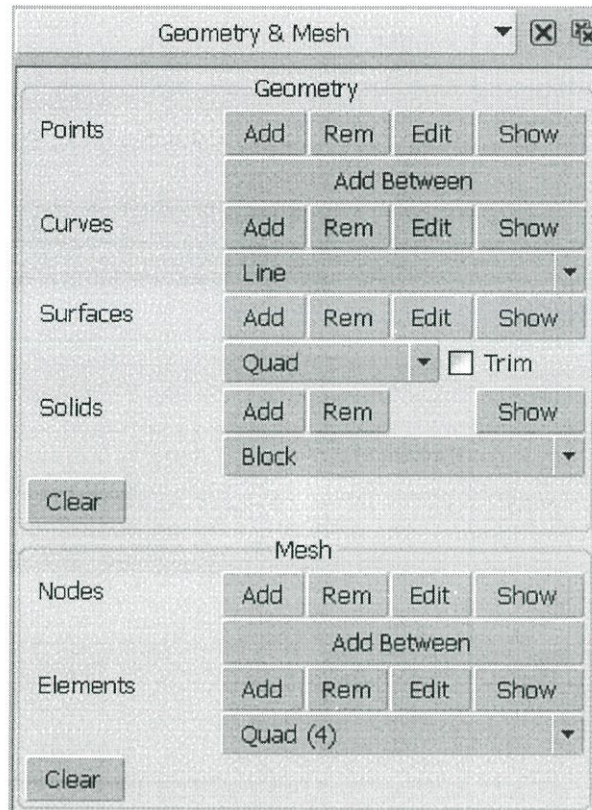
วิธีใช้งาน MSC Marc Mentat

1. เปิดหน้า Interface Program:



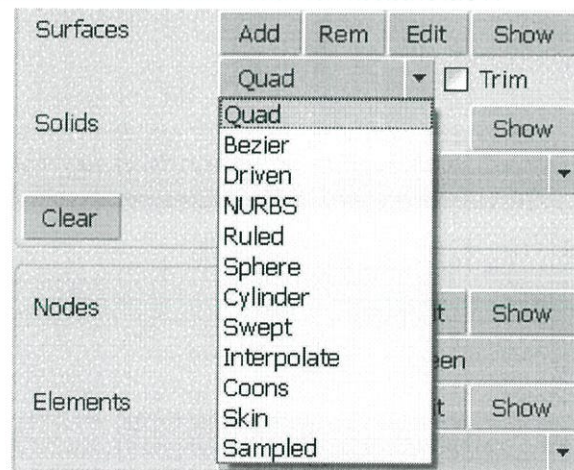
รูปที่ ค.1 แสดงหน้าจอแสดงการทำงานของโปรแกรม MSC Marc Mentat

- 1.1 เลือกใช้ชุดคำสั่ง Geometry & Mesh เพื่งการจำลองโครงสร้างอย่างคร่าวๆ



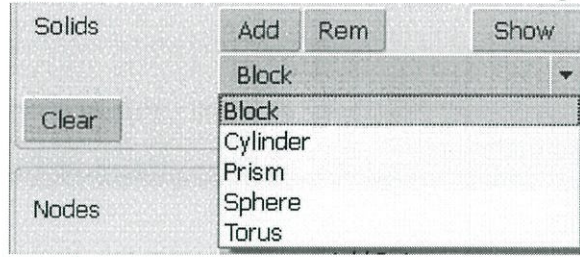
รูปที่ ค.2 แสดงหน้าจอแสดงหน้าต่างคำสั่ง Geometry & Mesh

1.1.1 เลือกใช้คำสั่ง Surfaces เพื่อสร้างพื้นผิวในการคำนวณโครงสร้าง



รูปที่ ค.3 แสดงหน้าจอแสดงหน้าต่างคำสั่ง Surfaces

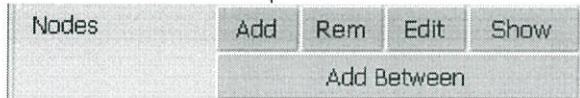
1.1.2 เลือกใช้คำสั่ง Solid เพื่อกำหนดว่าแบบจำลองที่ทำการคำนวณเป็น Rigid Body



รูปที่ ค.4 แสดงหน้าจอแสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Solid

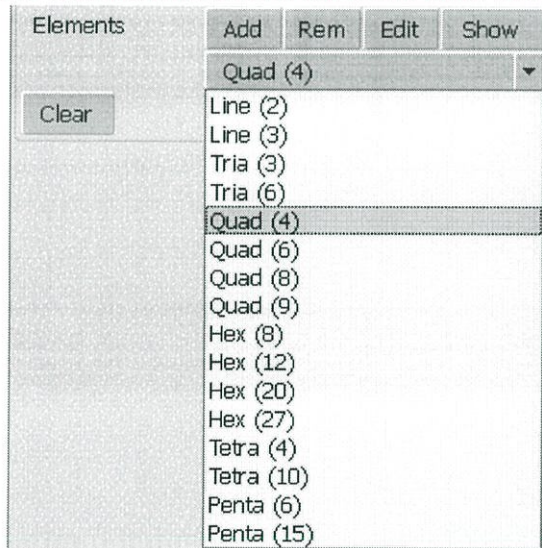
1.2 ชุดคำสั่ง Mesh

1.2.1 ชุดคำสั่ง Nodes ใช้ในการคำนวณเฉพาะจุดเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ



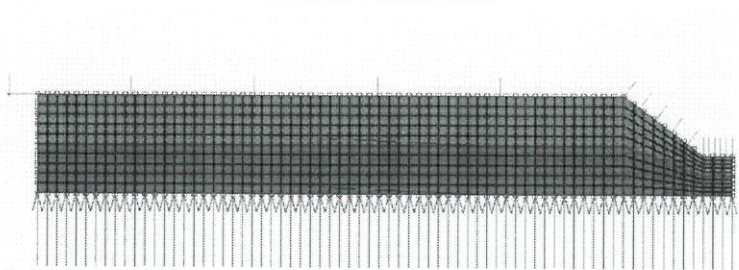
รูปที่ ค.5 แสดงหน้าจอแสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Nodes

1.2.2 ชุดคำสั่ง Elements ใช้ในการคำนวณเพื่อให้ค่าที่คำนวณมานั้นเข้าใกล้ค่าจริง



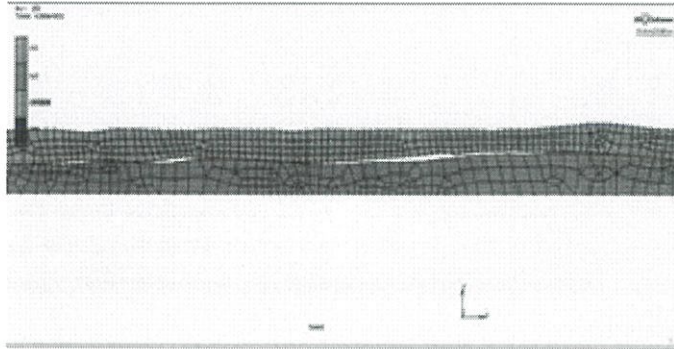
รูปที่ ค.6 แสดงหน้าจอแสดงหน้าต่างชุดคำสั่ง Elements

2. แสดงภาพแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการสร้าง

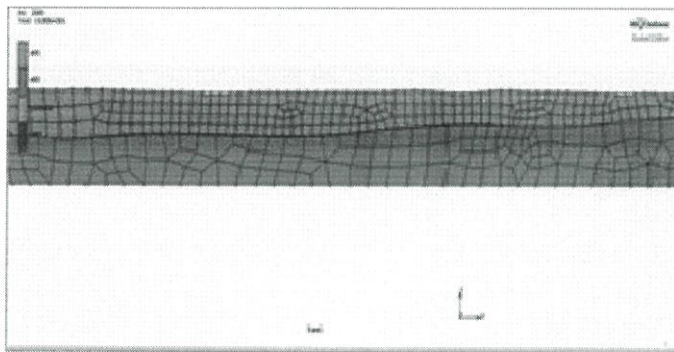


รูปที่ ค.7 แสดงโครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat

3. แสดงแถบสีของชนิดวัสดุ ซึ่งจะแสดงสีให้เห็นอย่างชัดเจนหากวัสดุนั้นแตกต่างกัน และนอกจากนี้ยังทำให้มองเห็น Mesh และ Element ชัดเจนขึ้น



รูปที่ ค.8 แสดงแบบจำลองจำลองผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่เกิดช่องระหว่างสองวัสดุ



รูปที่ ค.9 แสดงแบบจำลองจำลองผ่านโปรแกรม MSC Marc Mentat ที่ไม่เกิดช่องระหว่างสองวัสดุ