



โครงการวิจัยเรื่อง...

การศึกษาอิทธิพลในการตัดเฉือนเพื่อลดครีบ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study the efface of the shaving without burr By Finite Element Method.

คณะผู้วิจัย...

นายเสน่ห์ กลิ่นบุญนาค

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

นายปพน สมประสงค์

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

นายสัญญา คำจริง

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

.....

งบประมาณกองทุนส่งเสริมงานวิจัย

ประจำปี พ.ศ. 2555

การศึกษาอิทธิพลในการตัดเฉือนเพื่อลดครีบ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

นายเสน่ห์ กลิ่นบุญนาค ,นายปพน สมประสงค์ และนายสัญญา คำจริง

คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองการตัดเฉือน วัสดุ SUS304 ความหนา 1.5 mm. กำหนดค่า Clearances ไม่เกิน 5% ของความหนาชิ้นงาน โดยใช้ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม DYNAFORM ปรากฏว่าชิ้นงานนี้สามารถทำการบีบตัดเฉือนได้โดยไม่ก่อให้เกิดการเสียหายกับผิวขอบด้านข้างของชิ้นงาน และนำไปสู่การลดการเกิดครีบของชิ้นงานได้จริง โดยจำลองโอกาสการเกิดครีบที่บริเวณรอยตัดของชิ้นงานก่อนการสร้างแม่พิมพ์จริง ซึ่งผลการตรวจสอบคุณภาพของการตัดเฉือนที่ได้จากการไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงผลการตรวจสอบคุณภาพรอยตัดเฉือน และแสดงผลการวัดอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ คือ ลักษณะขอบชิ้นงานที่ได้จากการตัดเฉือนเกิดส่วนโค้งมน 0.207 มิลลิเมตร, รอยตัดเฉือน 0.699 มิลลิเมตร, รอยแตก 1.1750 มิลลิเมตร และ รอยตัดเฉือน 0.143 มิลลิเมตร โดยเฉลี่ยความสูงของชิ้นงานไม่รวมครีบ 2.077 มิลลิเมตร

คำสำคัญ : การตัดเฉือนโลหะ การไฟไนต์เอลิเมนต์

A study the efface of the shaving without burr by Finite element method

Sana kinseesuk ,Praporn somprasong and Sanya kumjring

Faculty of Engineering and Architecture

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

Abstract

This research is to simulate machining SUS304 material thickness 1.5 mm. Clearances configured not exceed 5% of the thickness of the workpiece. Software using finite element program DYNAFORM. It appears that this work can be cutting pump without causing damage to the lateral surface of the workpiece. And lead to a reduction in the fins of the piece actually works. By simulating the chance of cutting the fins of the piece before the actual mold. The results of monitoring the quality of machining obtained from the finite element software. Can display inspection characteristic of blanking surface. And the measure is acceptable is the edge of the workpiece from the machining of Draw - in 0.207 mm, Smoot Cut Zone 0.699 mm, Breaking Zone 1.1750 mm and Cutting Burr 0.143 mm. Average height of specimen not Cutting Burr 2.077 mm.

Keywords : Blanking Finite element

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการโครงการวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีการตัดโลหะแผ่น	3
2.2 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	11
2.3 โปรแกรม MSC. Marc Mentat	22
2.4 กริด (Grid)	40
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	43
3.1 วัสดุและชิ้นงานและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	43
3.2 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง	37
4.1 ผลการวิเคราะห์ความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน	37
4.2 ผลการวิเคราะห์ไดอะแกรมขีดจำกัดในการลากขึ้นรูป	40
4.3 ผลการวิเคราะห์ความหนาของชิ้นงานที่ได้หลังการจำลองขึ้นรูป	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	46

เอกสารอ้างอิง

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบของการตัดโลหะแผ่นด้วย 펀ช์ และดาวยการวิเคราะห์การตัด	3
2.2 แรงเฉือนขั้นตอนของการตัด	4
2.3 การขยายระยะกินลึก 0.25 มม. (200 x)	4
2.4 รูปร่างหน้าตัดเฉือน	6
2.5 ระยะกินลึก	7
2.6 ทิศทางขอแรงเฉือน	8
2.7 รอยตัดเฉือนที่สอง	8
2.8 ลักษณะของรอยตัดเฉือนแบบต่างๆ ตามขนาดของช่องว่างที่ใช้	9
2.9 การใช้งานของแผ่นคั่นโลหะแผ่น	11
2.10 สมการรูปทั่วไปของไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเมทริกซ์ (Matrix)	13
2.11 ค่าแรงกระทำต่อเอลิเมนต์ (f) ที่ทำให้โหนดมีการเคลื่อนที่ (u)	13
2.12 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ	14
2.13 การใช้ Beam Element ในงานโครงสร้าง	15
2.14 การใช้ Shell Element ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง	15
2.15 การใช้งาน Solid Element ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา	16
2.16 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ	16
2.17 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม	17
2.18 การออกแบบโดยแบ่งบริการนั้นออกเป็นส่วนย่อยของ Patran	21
2.19 วงจรการวิเคราะห์ (The Analysis Cycle)	22
2.20 ระบบของโปรแกรม MSC. Marc Mentat	24
2.21 หน้าต่างของโปรแกรม MSC. Marc Mentat	24
2.22 หน้าต่างพื้นฐานของโปรแกรม MSC. Marc Mentat	27
2.23 พื้นที่หลักๆ ของโปรแกรม (กราฟฟิกส์ เมนู บทสนทนา)	28
2.24 เอกลักษณะของเอลิเมนต์	30
2.25 ชนิดเอลิเมนต์	31
2.26 ตัวอย่างกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ที่หายาบ	32
2.27 กลุ่มของเอลิเมนต์ที่เป็นแบบสามเหลี่ยม (Triangular Mesh)	34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.28 Overlay Mesh	34
2.29 กลุ่มเอลิเมนต์ที่เป็นแบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral Mesh)	35
2.30 กลุ่มของเอลิเมนต์แบบ Tetrahedral (Tetrahedral Mesh)	35
2.31 กลุ่มของเอลิเมนต์แบบ Hexahedral (Hexahedral Mesh)	35
2.32 กลุ่มของเอลิเมนต์ที่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง (A Biased Mesh)	36
2.33 การเปลี่ยนแปลงกลุ่มของเอลิเมนต์ (A Transition Mesh)	37
2.34 การสัมผัสของผิวชิ้นงาน และแม่พิมพ์ (Contact)	38
2.35 กริดวงกลมบนโลหะแผ่นขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปและเปลี่ยนรูป	40
2.36 แบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับโลหะแผ่น	41
2.37 กริดแบบวงกลมผสมสี่เหลี่ยม (Combination)	41
2.38 การวัดความเครียดหลัก (e_1) ความเครียดรอง (e_2)	42
3.1 สร้างแบบจำลองของวัสดุชิ้นงาน	44
3.2 สร้างแบบจำลอง PUNCH	44
3.3 สร้างแบบจำลอง BLANK HOLDER	45
3.4 สร้างแบบจำลอง DIE	45
3.5 สร้างแบบจำลอง COUNTER PUNCH	46
3.6 สร้าง MESH ของชิ้นงาน	46
3.7 กำหนดสมบัติของชิ้นงาน	47
3.8 กำหนดสมบัติของชิ้นงาน ในช่วงอีลาสติก	47
3.9 เลือกสมการการแตกหัก	48
3.10 ตั้งค่าการควบคุมของโปรแกรม ขั้น 1	48
3.11 ตั้งค่าการควบคุมต่างของโปรแกรม ขั้น 2	49
3.12 ตั้งค่าการควบคุมต่างของโปรแกรม ขั้น 3	49
3.13 ตั้งค่าการควบคุมของโปรแกรม ขั้น 4	50
3.14 ตั้งค่าการควบคุมต่างของโปรแกรม ขั้น 5	50
3.15 กำหนดค่า Inter object	51
3.16 ตั้งค่า Generate	51
3.17 ตั้งค่า Generate ผ่าน	52

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 คอมพิวเตอร์ประมวลผล	52
3.19 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	53

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย เรื่อง การศึกษาอิทธิพลในการตัดเฉือนเพื่อลดครีป โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ต้องขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ด้วยการเอื้อเฟื้อสถานที่ และให้การสนับสนุนด้านซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรม DYNAFORM Version 5.6 ตลอดจนอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการจัดทำโครงการวิจัย และยังต้องขอขอบคุณบุคคล หรือหน่วยงานอื่นๆ ที่มีได้เอื้อนาม แต่มีส่วนร่วมในความสำเร็จของโครงการวิจัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้วิจัย

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการลงทุนในภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก ซึ่งชิ้นส่วนที่ใช้ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องมีความแม่นยำสูงและชิ้นส่วนที่ถูกตัดขาดก็ต้องเกิดครีบน้อยที่สุด ซึ่งปัจจุบันการผลิตแม่พิมพ์ไม่สามารถผลิตในประเทศไทยได้ เพราะคุณภาพด้านความแม่นยำยังไม่สูงพอ ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาความสามารถทางด้านนี้ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษากระบวนการตัดเฉือนเพื่อลดครีบที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

สำหรับการจำลองปัญหาทางวิศวกรรมโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองนั้น ขั้นแรกต้องออกแบบแบบจำลองโดยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design : CAD) ซึ่งประโยชน์ของการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบคือ สามารถแสดงลักษณะการทำงาน ขนาดสัดส่วนได้อย่างสมจริง อีกทั้งโปรแกรมสามารถเก็บบันทึกข้อมูล และเรียกขึ้นมาทำการแก้ไขได้ง่าย นอกจากนี้ข้อมูลที่ถูกเก็บบันทึกยังสามารถเปิดใช้ในโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ได้ การใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นแรกต้องกำหนดกรณีศึกษา ซึ่งมีหลายกรณี อาทิ การศึกษาความร้อน การศึกษาภาระแรงกระทำแบบสถิตย์ การศึกษาเชิงเส้น ไม่เชิงเส้น ฯลฯ จากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในปัญหาต่างๆ อาทิ เงื่อนไขการจับยึด การกำหนดแรงกระทำ เงื่อนไขการพาความร้อน เป็นต้น จากนั้นจึงทำการเลือกชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับแบบจำลอง และลักษณะของปัญหา ซึ่งขั้นตอนการเลือกชนิดเอลิเมนต์นี้บางโปรแกรมอาจจะต้องกำหนดชนิดก่อนกำหนดเงื่อนไขต่างๆ เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการเตรียมการแล้ว โปรแกรมก็จะทำการสร้างสมการทางเรขาคณิต และหาผลเฉลยของปัญหา สำหรับการแสดงผลพล็อตนั้นจะแสดงเป็นกราฟฟิกส์แถบชั้นสีบนแบบจำลองทำให้ง่ายต่อการเห็นบริเวณที่บกพร่องเพราะบริเวณที่บกพร่องจะเป็นสีแดง ทำให้ทราบว่า เป็นบริเวณที่ต้องปรับปรุงให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อีก ทำให้ทราบถึงกระบวนการเปลี่ยนรูปร่างก่อนทำการผลิตจริงได้ดียิ่งขึ้น

ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยนี้ จะมีส่วนทำให้ผู้ประกอบการเกิดการพัฒนาศักยภาพด้านการแข่งขัน เนื่องจากอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ของประเทศเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อศึกษาความแม่นยำและการเกิดครีบชิ้นส่วน ที่ถูกตัดขาดให้เกิดครีบน้อยที่สุด รวมถึงความจำเป็นที่จะใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการศึกษาปัญหา

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อสร้างแบบจำลองการลดการเกิดครีบกของชิ้นงาน
2. เพื่อศึกษากรรมวิธีการตัดเฉือนโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ทำการศึกษากกรรมวิธีการตัดเฉือนโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์
2. ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการตัดเฉือน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการตัดเฉือนโลหะ
2. กำหนดชิ้นงานทำจากวัสดุ SUS304 ความหนา 1.5 mm.
3. กำหนดค่า Clearances ไม่เกิน 5% ของความหนาชิ้นงาน
4. สร้างแบบจำลองในการตัดเฉือน
5. ทำการบันทึกผลการทดลอง
6. สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

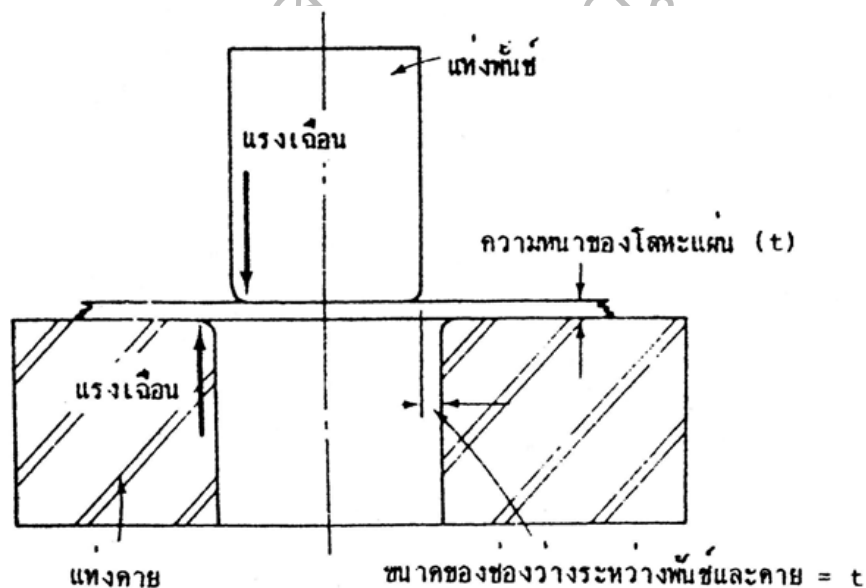
1. สามารถเข้าใจการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการตัดเฉือนโลหะ
2. สามารถเข้าใจตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการตัดเฉือน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการตัดโลหะแผ่น

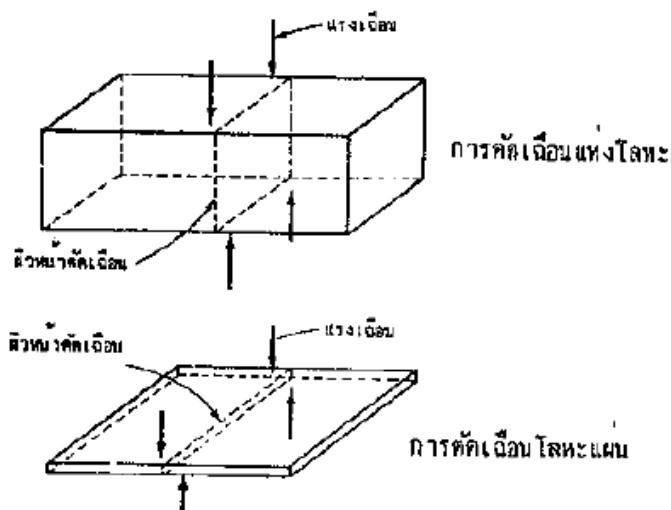
ขบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นเพื่อทำเป็นสินค้าสำเร็จรูปนั้นจะมีขบวนการที่ใช้อยู่สามขบวนการ คือการตัด (Cutting) การดัดงอ (Forming) และการลากขึ้นรูป (Drawing) ขบวนการเหล่านี้จะเรียกรวมๆ กันไปว่าการขึ้นรูปโดยการกดกระแทก (Stamping) การปั๊มขึ้นงานขึ้นรูป (Press working) การปั๊มขึ้นงานโดยใช้พunch (Punch press working) ซึ่งขบวนการตัดเป็นขบวนการที่ง่ายที่สุดและได้ถูกทำขึ้นมาก่อนเพื่อนำเอาชิ้นงานที่ได้ไปทำในขบวนการอื่นต่อไปการตัดโลหะโดยใช้แท่งพunch (Punch) และแท่งดาย (Die) นั้น แผ่นชิ้นงานจะถูกตัดด้วยคมตัดสองอย่างคือ จะถูกตัดด้วยคมตัดของพunchซึ่งเป็นขอบคมตัดใน (inner cutting edge) และคมตัดของดายซึ่งเป็นขอบคมตัดนอก (outer cutting edge) ระหว่างของคมตัดในและขอบคมตัดนอกจะมีช่องว่างเล็กๆเกิดขึ้น ซึ่งเรียกช่องว่างนี้ว่า ช่องว่างระหว่างพunchและดาย (clearance) หรือ เรียกสั้นๆ ว่า ช่องว่าง



รูปที่ 2.1 รูปแบบของการตัดโลหะแผ่นด้วยพunchและดายการวิเคราะห์การตัด

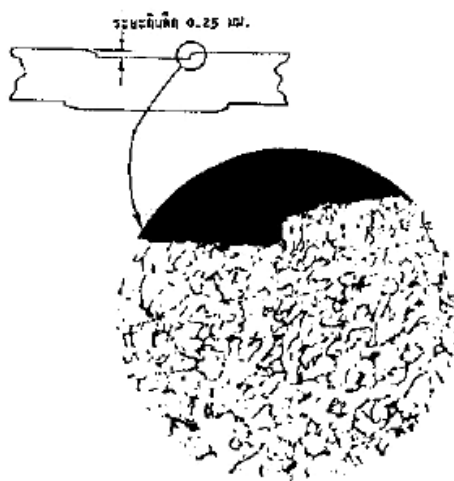
ในการตัดโลหะแผ่น แรงที่ให้แก่แท่งพunch (Punch steel) และแท่งดาย (Die steel) เพื่อใช้ในการตัดโลหะเรียกว่า แรงเฉือน (Shear force) แรงนี้จะมีขนาดเท่ากันและอยู่ตรงข้ามกัน โดยมีช่องว่าง

เล็กๆ อยู่ขึ้นกลางระหว่างแรงทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อมีแรงมากระทำต่อโลหะจะทำให้เกิดความเค้นเฉือน (Shear stress) เกิดขึ้นบนโลหะแผ่น แต่ในโลหะแผ่นจะมีแรงต้านแรงเฉือนเกิดขึ้น เรียกว่า ความแข็งแรงเฉือน (Shear strength) ถ้าให้แรงเฉือนมีขนาดมากพอที่จะทำให้เกิดความเค้นเฉือนมากกว่าความแข็งแรงเฉือนของโลหะนั้นก็จะทำให้โลหะแผ่นขาดออกจากกัน



รูปที่ 2.2 แรงเฉือนขึ้นตอนของการตัด

ขั้นตอนของการตัดโลหะแผ่นจะเริ่มขึ้นเมื่อแท่งพินชักคลงมาสัมผัสกับผิวหน้าของแผ่นชิ้นงาน จนกระทั่งเกิดการฉีกขาดที่แผ่นชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างในการทดลองตัดจะใช้วัสดุโลหะแผ่นหนา 9.5 มม. ทำจากเหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำ รีดร้อน มีสเกลเกิดขึ้นที่ผิวหน้าทั้งสองด้าน โดยแท่งพินจะเริ่มต้นกดแผ่นชิ้นงานลงมาเป็นระยะๆ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การขยายระยะกินลึก 0.25 มม. (200 x)

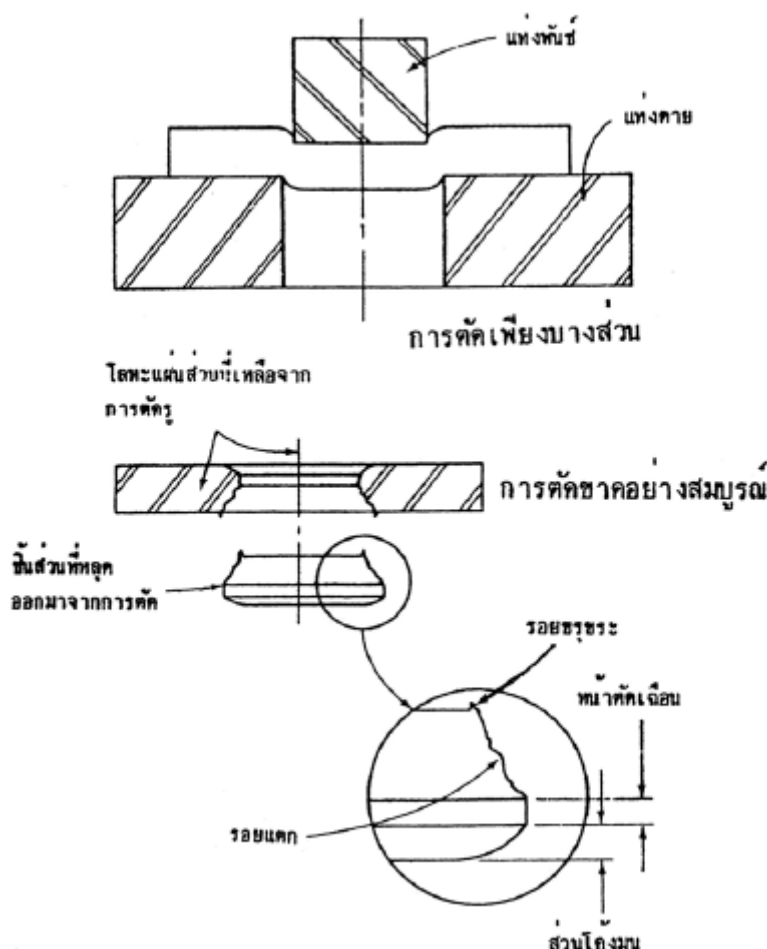
รูปร่างของหน้าตัดที่เกิดขึ้นเมื่อนำเอาเหล็กกล้ามาตัดบนคาน โดยการใช้ช่องว่างระหว่างพินซ์ และคานน้อยกว่าความหนาของแผ่นชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 7 จะเกิดลักษณะบนหน้าตัดที่ถูกตัดขาดแล้วได้ 4 ส่วนคือ

1. ส่วนที่เกิดโค้งมน (roll over) ส่วนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อแท่งพืดกคชันงานให้ไหลตัวลงไปในช่องว่างของพืดและคายทำให้มีรูปร่างคล้ายกับก้นจาน การเกิดโค้งมนจะมีมากขึ้นถ้าใช้ช่องว่างของพืดและคายมากและโลหะที่นำมาตัดนั้นเป็นโลหะอ่อน

2. ส่วนหน้าตัดเฉือน (burnish) เป็นส่วนที่เกิดขึ้นหลังจากแท่งพืดถูกกดกินลึกลงไปในเนื้อของโลหะระยะหนึ่งแล้วก็จะเกิดการตัดเฉือนขึ้นงานในแนวตั้ง ทำให้เกิดการขัดถูระหว่างขอบคมตัดของพืดและเนื้อของโลหะที่ถูกตัด ส่วนที่ถูกตัดตรงบริเวณพืดที่นี้จะมีลักษณะเป็นมันแวและแนวที่ถูกตัดจะได้ฉากกับผิวหน้าของแผ่นขึ้นงานหน้าตัดเฉือนเป็นส่วนที่สำคัญมากเพราะขนาดและความเที่ยงตรงของผลผลิตจะถูกกำหนดไว้ที่ส่วนนี้ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของหน้าตัดเฉือนและช่องว่างระหว่างพืดและคายมีดังนี้คือ ถ้าใช้ขนาดของช่องว่างมากจะทำให้ความสูงของหน้าตัดเฉือนน้อยลง เพราะแทนที่แผ่นขึ้นงานจะถูกพืดตัดขาดกลับกลายเป็นส่วนที่เปรียบเหมือนถูกดึงขาดมาก แต่ถ้าใช้ขนาดของช่องว่างน้อยจะได้ความสูงของหน้าตัดเฉือนมากขึ้นและพืดที่ถูกตัดจะดูเลสวยงาม ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อกำหนดให้ใช้ขนาดช่องว่างเท่ากับ 8 เปอร์เซนต์ของความหนาของแผ่นขึ้นงาน

3. ส่วนที่เกิดรอยแตก (fracture) เป็นส่วนที่เกิดหลังจากมีการตัดเฉือนของพืดขึ้นงานแล้ว แรงที่ใช้บนแท่งพืดจะทำให้เกิดความเค้นดึงสูงกว่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะนั้นจึงทำให้เกิดการแตกขึ้น การแตกจะเกิดขึ้นในลักษณะถูกดึงขาด ดังนั้นรูปร่างของรอยแตกจึงมีรูปร่างขรุขระไม่เป็นระเบียบความสัมพันธ์ของรอยแตกที่เกิดขึ้นและขนาดของช่องว่างระหว่างพืดและคายนั้นจะแตกต่างกับความสัมพันธ์ในส่วนอื่นๆ ในกรณีที่ใช้ขนาดของช่องว่างน้อยกว่า 10 % ของความหมายของแผ่นขึ้นงานจะทำให้ความกว้างของรอยแตกเล็กน้อยตามลำดับ แต่ถ้าใช้ขนาดของช่องว่างมากกว่า 10 ถึง 25 % เกือบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่รอยแตก แต่ถ้าขนาดของช่องว่างที่ใช้มากกว่า 25 % จะทำให้ความกว้างของรอยแตกเพิ่มขึ้นอีก และถ้าใช้ขนาดของช่องว่างมากมุมที่รอยแตกกระทำกับพื้นผิวของแผ่นขึ้นงานก็จะยิ่งโตขึ้นดังนั้นจึงควรกำหนดขนาดของช่องว่างที่ใช้ให้เหมาะสมสำหรับงานนั้นๆ

4. ส่วนที่เกิดรอยขรุขระ (burr) ที่ผิวหน้าแผ่นขึ้นงาน ส่วนนี้เกิดจากขอบคมตัดที่แท่งพืดและแท่งคายที่อ ซึ่งในการตัดโลหะแผ่นด้วยคายจะต้องมีเกิดขึ้น ถ้าขอบคมตัดที่อมากจะเกิดรอยขรุขระสูงมาก โลหะอ่อนจะเกิดรอยขรุขระสูงมาก นอกจากนั้นรอยขรุขระยังมีส่วนสัมพันธ์กับช่องว่างระหว่างพืดและคายอีกด้วย ซึ่งถ้ากำหนดให้ขนาดของช่องว่างมากกว่า 18 % ของความหนาของแผ่นขึ้นงานแล้วรอยขรุขระจะเกิดมากขึ้นตามลำดับ การทำรอยขรุขระให้มีค่าความสูงประมาณ 0.025 มม. อยู่คงที่นั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยากเพราะว่าจะต้องคอยลับคมตัดอยู่เสมอ

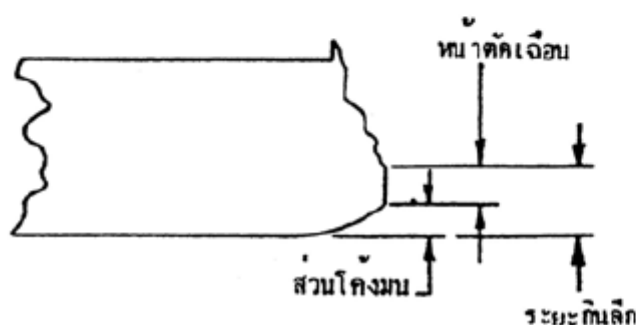


รูปที่ 2.4 รูปร่างหน้าตัดเฉือน

ระยะกินลึก (Penetration)

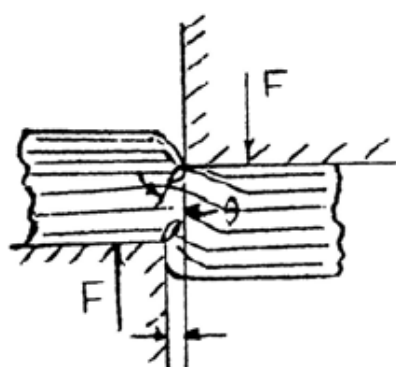
ระยะกินลึกหมายถึงระยะที่ขอบคมตัดของแทงคันและแทงคายกดกินลึกลงไปบนเนื้อโลหะ จนกระทั่งรอบแตกเริ่มปรากฏขึ้น ระยะกินลึกหาได้จากระยะความสูงของหน้าตัดเฉือนรวมกับระยะความสูงของส่วนโค้งมน ระยะกินลึกนั้นตามปกติจะวัดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของความหนาของโลหะแผ่นที่ถูกตัด ดังนั้นจึงมักจะเรียกเทอมนี้ว่าเปอร์เซ็นต์ระยะกินลึก (Percent penetration) เปอร์เซ็นต์ระยะกินลึกของโลหะชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 โลหะแผ่นที่มีความแข็งจะมีเปอร์เซ็นต์ระยะกินลึกน้อย ดังนั้นโลหะแข็งจะมีระยะโค้งมนและระยะหน้าตัดเฉือนน้อย การเปรียบเทียบระยะกินลึกของโลหะสองชนิดทำได้โดยดูจากระยะหน้าตัดเฉือนของโลหะนั้นหรืออาจทำได้โดยการวัดความแข็ง (Hardness) ของมัน ในกรณีที่เป็โลหะชนิดเดียวกันถูกนำมาตัด โลหะที่มีความหนากว่าต้องการระยะกินลึกมากกว่าโลหะที่บาง

วัสดุ	% ระยะกินลึก	
ตะกั่ว	50	
คีมุก	40	
อลูมิเนียม	60	
สังกะสี	50	
ทองแดง	55	
ทองเหลือง	50	
บรอนซ์	25	
เหล็กกล้า 0.10 C	50	อบคืนตัว
	38	รีดเย็น
เหล็กกล้า 0.20 C	40	อบคืนตัว
	28	รีดเย็น
เหล็กกล้า 0.30 C	33	อบคืนตัว
	22	รีดเย็น
เหล็กกล้าซิลิกอน	30	
นิกเกิล	55	



รูปที่ 2.5 ระยะกินลึก

ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายมีผลต่อการตัดโลหะแผ่นบนคายมาก ถ้าเลือกใช้ขนาดของช่องว่างไม่ถูกต้องจะมีผลทำให้การผลิตชิ้นงานออกมาไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ หรืออาจทำให้แท่งพื้นซ์และแท่งคายที่ใช้ที่เร็วกว่าปกติ ขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายมักจะเรียกกันในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของความหนาของโลหะแผ่นที่นำมาตัด ถ้าใช้ขนาดของช่องว่าง 10 ถึง 15 % จะได้ผลเกิดขึ้นที่ของรอยตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อแท่งพื้นซ์กดลงมารอยแตกจะยิ่งโตขึ้น ต่อมารอยแตกที่เกิดขึ้นขอบคมตัดของพื้นซ์และคายจะมาบรรจบกันทำให้ขอบการตัดเสร็จสิ้นสมบูรณ์ รอยแตกที่เกิดขึ้นจะทำมุม θ กับทิศทางกดลงของพื้นซ์ จุดเริ่มต้นของรอยแตกทั้งสองข้างมีระยะห่างเท่ากับขนาดของช่องว่างที่ใช้ ถ้าพื้นซ์และคายมีช่องว่างเหมาะสมตามคุณสมบัติและความหนาของโลหะแผ่นแล้ว รอยแตกทั้งสองด้านจะมาบรรจบกันพอดีที่ทำให้เกิดแรงต้านทานของชิ้นงานเกิดขึ้นน้อยที่สุด



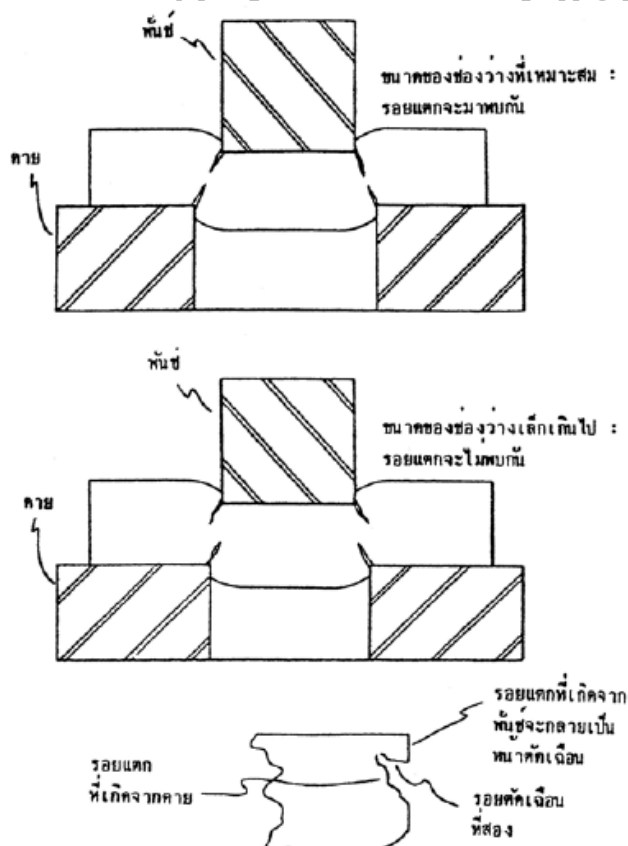
θ = มุมที่รอยแตกกระทำกับทิศทางการกด
ลงของพื้นที่

C = ระยะช่องว่างระหว่างพื้นที่และคาน

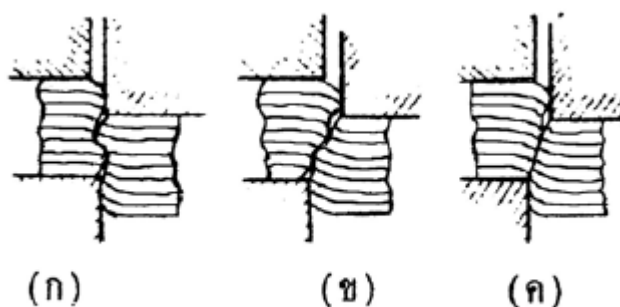
F = แรงที่พื้นที่ใช้

รูปที่ 2.6 ทิศทางขอแรงฉีกขาด

เนื่องจากทิศทางของรอยแตกซึ่งขยายตัวโตขึ้นมีทิศทางมุ่งไปยังคงตัดตรงกันข้าม ฉะนั้นรอยแตกจะมาบรรจบกันพอดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับว่าขนาดของช่องว่างที่ใช้มีมากน้อยเพียงใด กล่าวคือถ้าขนาดของช่องว่างน้อยเกินไปรอยแตกจะเชื่อมกัน ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะมีรอยตัดเฉือนที่สอง (Secondary shear) เกิดขึ้น ทำให้ผิวหน้าเฉือนไม่สวย ถ้าขนาดของช่องว่างมากเกินไปรอยแตกจะไม่บรรจบกันที่ตำแหน่งพอเหมาะ ทำให้ผิวหน้าเฉือนไม่สวยและจะเกิดส่วนโค้งมนและส่วนขรุขระขึ้นมากด้วย



รูปที่ 2.7 รอยตัดเฉือนที่สอง



รูปที่ 2.8 ลักษณะของรอยตัดเฉือนแบบต่างๆ ตามขนาดของช่องว่างที่ใช้

- (ก) ขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายน้อย
- (ข) ขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายมาก
- (ค) ขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายที่เหมาะสม

การเลือกขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคาย

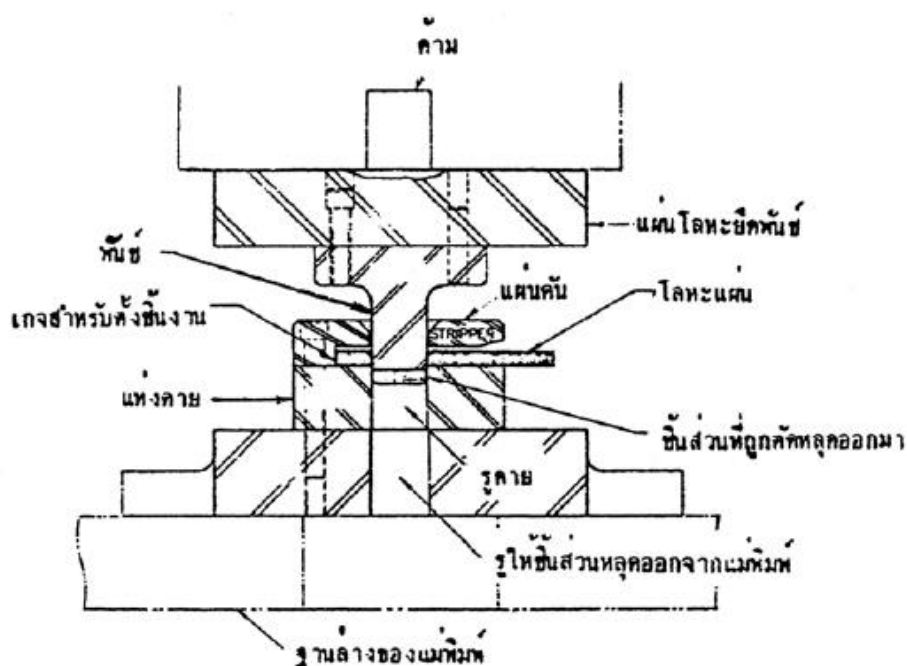
การเลือกขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายที่จะใช้ขึ้นอยู่กับผลสุดท้ายที่ต้องการจะได้รับการใช้ขนาดของช่องว่างมากกว่า 15 % ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงแนวศูนย์กลางของเครื่องปัมโลหะกับคายมากนัก และมีโอกาสน้อยมากที่ขอบคมตัดของพื้นซ์และคายจะมากระทบกัน แต่อย่างไรก็ตาม การเกิดส่วนโค้งมนมากอาจจะไม่เป็นที่ต้องการก็ได้ การใช้ขนาดของช่องว่างน้อยกว่า 10 % นั้นได้ถูกใช้เพื่อทำให้เกิดรอยตัดเฉือนที่สองขึ้นมา เพื่อต้องการให้ได้รับขอบที่เต็มของชิ้นงานที่ถูกตัด การใช้ขนาดของช่องว่างที่น้อยจะเป็นสาเหตุทำให้ขอบคมตัดของพื้นซ์และคายสึกหรออย่างมาก เนื่องจากต้องตัดเฉือนขอบของชิ้นงานมากขึ้น และโลหะที่ถูกตัดจะไปติดอยู่ที่แท่งพื้นซ์และคายจึงต้องเพิ่มแรงผลักดันขึ้นส่วนที่หลุดออกมาจากการตัดให้หลุดออกไปจากรูของแท่งคาย โดยต้องใช้แรงดันแผ่นชิ้นงานให้หลุดออก (Stripping force) อย่างมากเพื่อดันเอาแผ่นชิ้นงานออกจากแท่งพื้นซ์การใช้ขนาดของช่องว่างที่เหมาะสม (Proper clearance) จะทำให้ได้ขอบของชิ้นงานที่ถูกตัดสะอาดและได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนตัดเฉือนตามที่ระบุไว้ในพิมพ์เขียว นอกจากนั้นยังไม่เกิดความยุ่งยากในการตัดชิ้นงานบนคายขนาดของช่องว่างที่เหมาะสมหมายถึงขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายที่กำหนดขึ้นมาใช้ โดยที่มิให้เกิดส่วนโค้งมนที่ขอบของชิ้นงานเกิดขึ้นน้อยที่สุดและไม่มียอยตัดเฉือนที่สองเกิดขึ้น การหาขนาดของช่องว่างเหมาะสมทำได้โดยวิธีการลองผิดลองถูก ไม่มีสูตรหรือตารางกำหนดขนาดของช่องว่างที่แน่นอนขึ้นมาใช้หลักการต่างๆ ไปในการกำหนดขนาดของช่องว่างระหว่างพื้นซ์และคายที่เหมาะสม มีดังต่อไปนี้

- 1) โลหะหนาต้องการขนาดของช่องว่างมาก
- 2) โลหะอ่อนต้องการขนาดของช่องว่างมาก

- 3) โลหะแข็งจะมีขนาดของช่องว่างประมาณ 6 ถึง 10 % ของความหนาของชิ้นงาน
- 4) โลหะอ่อนจะมีขนาดของช่องว่างประมาณ 10 ถึง 18 % ของความหนาของชิ้นงาน
- 5) โลหะแข็งจะเกิดส่วนโค้งมนและส่วนรอยตัดเฉือนน้อย
- 6) โลหะหนาจะเกิดส่วนโค้งมนมาก
- 7) โลหะอ่อนจะมีมุมของการแตกมาก

การกระดุ้งตัวกลับและการเชื่อมแบบเย็นตัว (Spring back and Cold welding)

หลังจากที่เกิดรอยแตกระหว่างการตัดโลหะแผ่นแล้ว ชิ้นส่วนที่ถูกตัดยังไม่หลุดออกมาเป็นอิสระทันที มันจะเกิดการยึดตัวเข้ากับขอบของรอยแตกอีกด้านหนึ่งทำให้เกิดการเชื่อมติดเข้าด้วยกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการใช้แรงกดอัดอย่างสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มแรงเข้าไปที่แท่งพื้นที่อีกเพื่อผลักชิ้นส่วนที่ติดอยู่ให้หลุดออก แต่แรงที่เพิ่มเข้าไปนี้น้อยมากเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแรงที่ใช้ตัดจึงไม่จำเป็นต้องคำนวณหาลักษณะของการเชื่อมแบบเย็นตัวจะเกิดขึ้นเมื่อทำการตัดโลหะอ่อนในขณะที่ตัดโลหะด้วยคานา กรนของโลหะบางส่วนจะเกิดความเค้นต่ำกว่าจุดยืดหยุ่นจำกัด ดังนั้นเมื่อขบวนการตัดเสร็จสิ้นแล้วเกรนเหล่านี้จะกระดุ้งตัวกลับ (Spring back) เข้าสู่รูปเดิม การกระดุ้งตัวกลับของโลหะจะทำให้รูที่เกิดจากการตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง และรูนั้นจะไปยึดติดแน่นอยู่กับแท่งพื้นที่เช่นเดียวกันชิ้นส่วนที่ถูกตัดออกมาก็จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นส่วนนั้นไปยึดติดแน่นอยู่กับรูของคานา ซึ่งบ่อยครั้งจะเกิดลักษณะการเชื่อมแบบเย็นตัวขึ้นตรงบริเวณพื้นที่ของส่วนหน้าตัดเฉือนกับผนังของแท่งพื้นที่และคานา การที่จะให้ชิ้นส่วนที่ติดอยู่กับผนังของแท่งคานาหลุดออกมาทำได้โดยการกดแท่งพื้นที่ให้เคลื่อนที่ลงมาผลักชิ้นส่วนนั้นให้หลุดไป และที่รูของคานานั้นจะต้องทำให้ปากด้านล่างของแท่งคานาผายออกเพื่อที่จะทำให้ชิ้นส่วนนั้นหลุดออกมาได้ทันทีที่แท่งพื้นที่เคลื่อนตัวลงมาเล็กน้อย หรืออาจจะทำได้โดยการเคลื่อนที่แท่งคานาขึ้นไปหากก็ได้การที่จะให้แผ่นชิ้นงานที่เป็นรูหลุดออกจากผนังของแท่งพื้นที่ ทำได้โดยการใช้แผ่นคัน (Stripper) ชิ้นงานนำไปติดไว้ใกล้กับตำแหน่งของแผ่นชิ้นงานที่จะดันออก เมื่อแท่งพื้นที่ดึงตัวเองขึ้นก็จะยกแผ่นชิ้นงานติดขึ้นมาด้วย เมื่อได้ระยะที่ตั้งไว้แผ่นชิ้นงานก็จะถูกแผ่นคันดันชิ้นงานให้หลุดออกจากแท่งพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 2.9 การใช้งานของแผ่นคั่นโลหะแผ่น

2.2 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

2.2.1 บทนำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Introduction to Finite Element Analysis)

ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหาที่หลากหลายในทางวิศวกรรม [8] ซึ่งประกอบด้วยสมการควบคุมระบบ และใช้เงื่อนไขขอบเขตเพื่อแก้สมการ ในระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดโหนด (Node) ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของปัญหาโดยประมาณต้องนำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์บนโดเมน จากนั้นจึงทำการแก้ปัญหาดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยของปัญหาที่จุดต่อบนโดเมน แม้การพัฒนาระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์แรกเริ่มเดิมทีจะเน้นไปที่การศึกษาความเค้นในโครงสร้างที่ซับซ้อน ตั้งแต่นั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในสาขาที่เกี่ยวข้องทางกลศาสตร์ เพราะระเบียบการนี้มีความหลากหลาย อีกทั้งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจในสถานศึกษาทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรม [9] ที่กล่าวข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์ได้ดังนี้ ความแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Analysis) ระบบของความร้อน (Thermal System Analysis) การไหล และการไหลที่มีการนำพาความร้อน (Flow Analysis and Flow Convection Heat Transfer) กระบวนการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน (Thermo

Mechanical Process Analysis) เช่น การตีขึ้นรูป (Forging) การรีดขึ้นรูป (Rolling) งานฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) ฯลฯ

จากข้างต้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์มีประสิทธิภาพมากก็จริงแต่ทว่า ก็ยังพบข้อเสียของการใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์เพื่อหาผลลัพธ์ของปัญหา ซึ่งควรระลึกเสมอทุกครั้งที่มีการใช้ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือ ระเบียบการที่มีหลักการคล้ายคลึงกันคือ อิทธิพลของความเค้นที่ทำให้ความสำคัญของปัญหา ตัวแปรอื่นอีก ดังเช่น สมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาวิเคราะห์ ลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นงาน และที่สำคัญคือ การป้อนข้อมูลเข้ากระบวนการ บางทีผลลัพธ์ของปัญหาอาจผิดพลาดถ้าหากป้อนข้อมูลที่ไม่ถูกต้องเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ ซึ่งบางทีอาจถูกมองข้ามจากนักวิเคราะห์ หรือบางครั้งสิ่งที่สำคัญยิ่งคือ หลักการในการสร้างแบบจำลองตามทฤษฎีนั้น จะขึ้นอยู่กับทักษะการฝึกฝนของนักวิเคราะห์ โดยนักวิเคราะห์ต้องรู้จักวิเคราะห์ และประมวลผล ซึ่งจะช่วยให้การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นส่งผลให้ผลลัพธ์จากการทดลองมีความเป็นไปได้มาก [10]

การใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Software) ในการวิเคราะห์โดยปกติทั่วไปจะประกอบด้วย 3 หลักการที่สามารถจัดเรียงลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

1. ขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (Pre Processing) โดยทั่วไปใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของส่วนที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งแบ่งรูปทรงเรขาคณิตออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ โดยที่เอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดโหนด โหนดนี้จะถูกกำหนดการเคลื่อนที่ และนอกเหนือจากนี้จะต้องทำการกำหนดแรง หรือ ภาระที่มากระทำกับชิ้นงานที่ต้องวิเคราะห์ ในขั้นตอนเตรียมการ การเตรียมแบบจำลองนี้จะต้องใช้เวลาในการเตรียมเป็นจำนวนมาก และนอกจากนี้ขั้นตอนเตรียมการบางกระบวนการสามารถรวมกับขั้นตอนออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบได้ [10]

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) ข้อมูลต่างๆ เช่นแบบจำลอง เอลิเมนต์ โหนด โหนดต่างๆ ฯลฯ ที่ได้ถูกเตรียมการจากขั้นตอนการเตรียมกระบวนการจะถูกนำมาใช้ป้อนเข้าสู่ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ตามหลักการของระเบียบการเอง ที่สร้าง และแก้ไขปัญหาแบบเชิงเส้น (Linear) หรือ ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ด้วยสมการทางพีชคณิต โดยไฟไนต์เอลิเมนต์มีสมการรูปทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ 2.1 สมการเมทริกซ์ ดังรูปที่ 2.1 [11]

$$\{k\} \{d\} = \{f\} \quad (2.1)$$

เมื่อ k = เมทริกซ์ความแข็งแกร่ง (Stiffness Matrix)

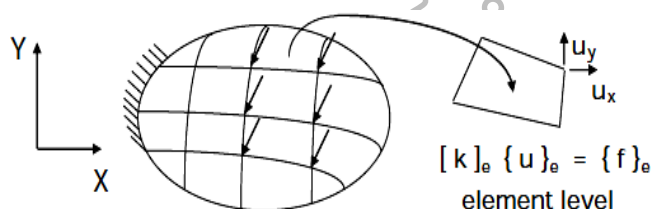
f = ค่าแรงที่มากระทำต่อเอลิเมนต์

d = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF)

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix}$$

รูปที่ 2.10 สมการรูปทั่วไปของไฟไนต์เอลิเมนต์แบบเมทริกซ์ (Matrix)

เมื่อมีการแทนที่ d และ f อีกทั้งมีการประยุกต์ใช้แรงภายนอกที่จุดสำคัญ การสร้างสมการเมทริกซ์ K ขึ้นอยู่กับชนิดของปัญหาที่ถูกกระทำ และเกณฑ์ของการวัด หน่วยที่นำมาประกอบเป็นโครงสร้างมอดนี้ทำให้เข้าใจประเด็น จุดหมายของโครงสร้างการวิเคราะห์ความเค้นที่ยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น (Linear Elastic Stress Analyses) บางครั้งในรหัสการประมวลเอลิเมนต์ก็มีมาก ซึ่งเอลิเมนต์ที่มีความหลากหลายจะมีความเหมาะสมกับรูปแบบปัญหาแต่ละชนิด หลักเกณฑ์ที่เป็นข้อดีของหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์คือ ปัญหาหลากหลายประเภทสามารถใช้รหัสการประมวลได้ด้วยรหัสเดียวกัน แต่การระบุชนิดของเอลิเมนต์จากคลังเก็บ หรือ ห้องสมุด (Library) [10]



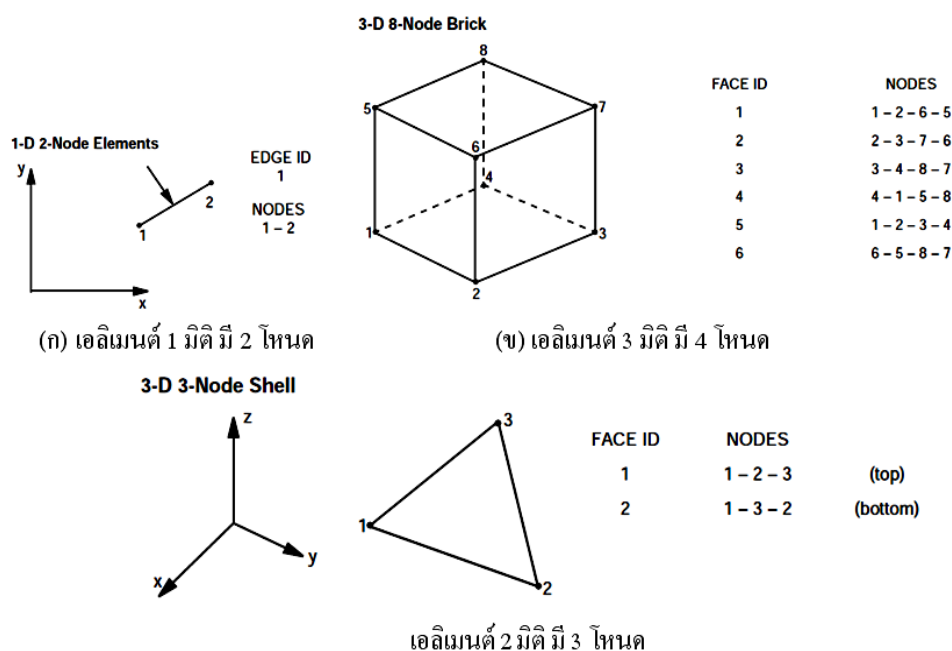
รูปที่ 2.11 ค่าแรงกระทำต่อเอลิเมนต์ (f) ที่ทำให้โหนดมีการเคลื่อนที่ (u)

3. ขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (Post Processing) ก่อนหน้านี้การวิเคราะห์ ผู้ใช้จะต้องเพ่งเอาใจใส่แถวของตัวเล็กที่ถูกสร้างขึ้นโดยรหัส(Code) การลงรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นลงบนแบบจำลองให้มีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ด้วยวิธีนี้ทำให้พบข้อผิดพลาดได้ง่าย และจุดอันตราย อีกทั้งรหัสที่ทันสมัยจะใช้ภาพกราฟฟิกส์แสดงเพื่อให้ง่ายต่อการเห็นผลลัพธ์ ซึ่งรูปแบบของการนำเสนอทางกราฟฟิกส์จะแสดงเป็นระดับชั้นสีของความเค้นจนเต็มบนแบบจำลอง

2.2.2 โหนด (Node)

โหนดเป็นตัวช่วยเชื่อมต่อโครงสร้างขึ้นเล็กลงๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แต่ละเอลิเมนต์ให้ติดกันด้วยจุดของโหนด นอกจากนี้โหนดยังช่วยในการกำหนดรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีองศา

อิสระ โดยปกติแล้วโหนดจะอยู่ที่มุมของเอลิเมนต์ หรือ จุดของเอลิเมนต์ แล้วกลุ่มของเอลิเมนต์ และ โหนดจะอยู่ติดกันเป็นกลุ่มที่เรียกว่า แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะเป็นตัวแทนของชิ้นงานเพื่อนำไปจำลองเป็นสมการเมทริกซ์ (Matrix) เพื่อนำไปคำนวณที่ซับซ้อนต่อไป

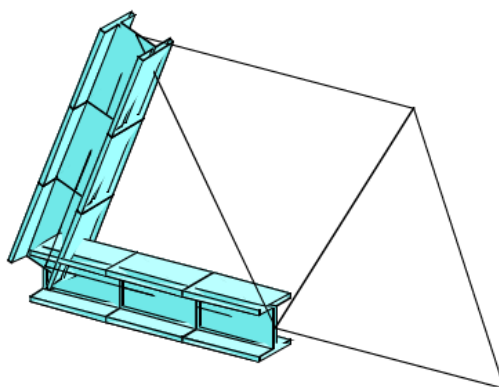


รูปที่ 2.12 โหนดในเอลิเมนต์แต่ละมิติ [12]

2.2.3 เอลิเมนต์ (Element)

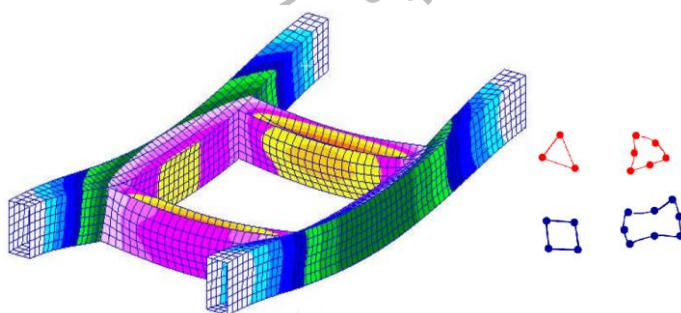
โดยทั่วไปแล้วเอลิเมนต์จะมีมิติอยู่ 1 ถึง 3 มิติ นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์ชนิดพิเศษที่มีลักษณะ 0 มิติ ดังเช่น กลุ่มของจุด (Lumped Springs) เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าเอลิเมนต์ที่มีลักษณะ 1 มิติ จะเป็นเส้นตรง เส้นโค้ง (Beam Element) มักใช้ในการวิเคราะห์งานลักษณะที่เป็นโครง เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) จะเป็นรูปร่างรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมที่มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์งานที่เป็นพื้นผิว (Surface) ผนังบาง สอดท้ายแบบ 3 มิติ (Solid Element) โดยปกติส่วนมากรูปทรงเป็นแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral (Bricks) หรือ เป็นแบบปริซึม (Prisms) สามารถใช้กับงานที่เป็นปริมาตรตัน (Solid) ซึ่งเอลิเมนต์แต่ละมิติจะมีจุดที่สามารถสังเกตได้ง่าย จุดเหล่านี้เรียกว่า จุดโหนด (Nodal Points) หรือ โหนด (Node) ประโยชน์แบบทวีคูณของโหนดคือ เป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของเอลิเมนต์กับเอลิเมนต์ที่รูปร่างมีองศาเป็นแบบอิสระ โดยปกติโหนดจะตั้งอยู่ที่มุม หรือ จุดปลายของเอลิเมนต์ดังแสดงในรูป มากกว่านั้นในทางกลศาสตร์เอลิเมนต์เหล่านี้จะมีความเฉพาะเจาะจงกับพฤติกรรมของวัสดุสำหรับตัวอย่างเช่น เชิงเส้นยืดหยุ่น (Linear Elastic) ในวัสดุที่เป็นท่อน (Bar Element) [13]

1. เอลิเมนต์ 1 มิติ มีลักษณะเป็นเส้น (Beam Element) เท่านั้นซึ่งมีแต่ความยาว และไม่สามารถมองเห็นพื้นที่หน้าตัด หรือพื้นผิวได้อย่างชัดเจน และนอกจากเป็นเส้นแล้วจะไม่มีรูปทรงเรขาคณิตอื่นใดอีก เป็นแค่เพียงเส้นอาทิ เส้นตรง เส้นโค้งเท่านั้น ซึ่งมักนิยมเรียกว่า บีม (Beam) โดยเอลิเมนต์ต่อกันหลายเอลิเมนต์จะกลายเป็นกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) [14]



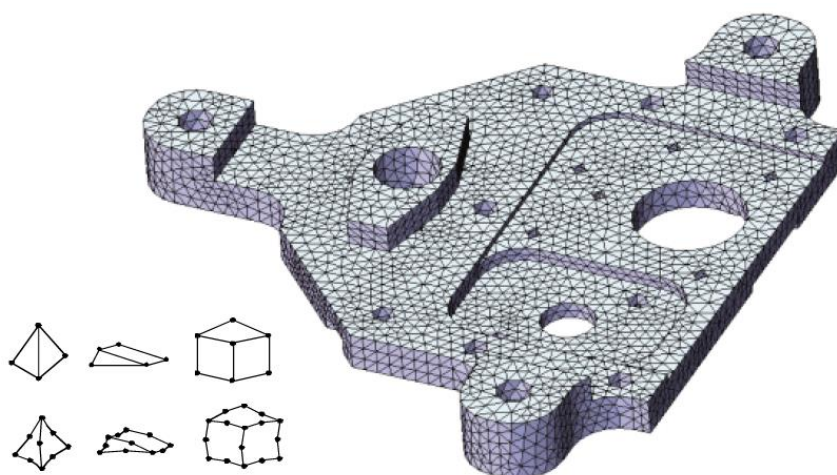
รูปที่ 2.13 การใช้ Beam Element ในงานโครงสร้าง

2. เอลิเมนต์ 2 มิติ (Shell Element) ที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม โดยมีโหนด 3 และ 4 โหนดตามลำดับ แต่โดยพื้นฐานแล้วจะมีขั้นต่ำ 3 โหนด เอลิเมนต์ชนิดนี้จะใช้กับงานที่เป็นพื้นผิว หรือ ผนัง ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น ผนังบาง (Thin Shell) และผนังหนา (Thick Shell) [12]

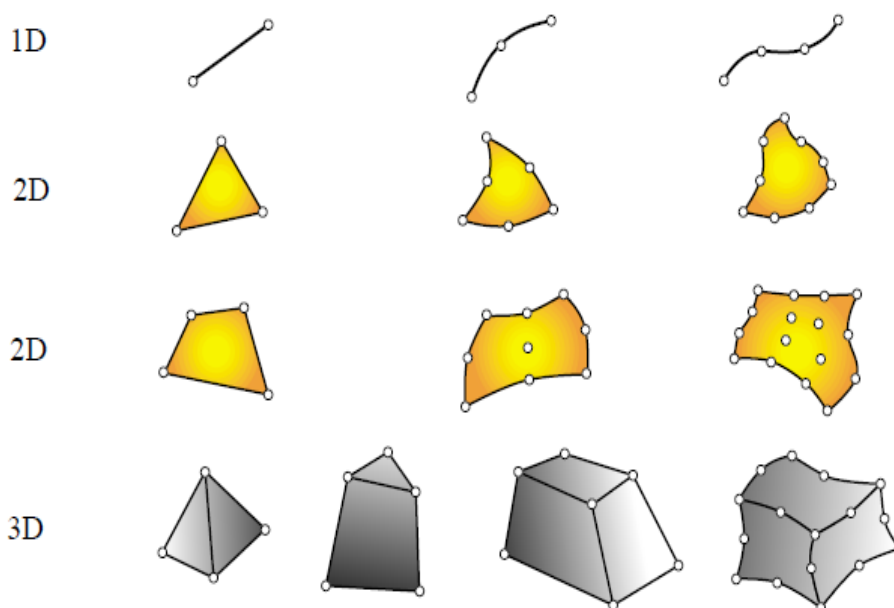


รูปที่ 2.14 การใช้ Shell Element ในงานที่มีลักษณะเป็นผนัง

3. เอลิเมนต์ 3 มิติ (Solid Element) จะมีโครงสร้างเป็น 3 มิติ รูปทรงจะมีความกว้าง ยาว สูง โดยพื้นฐานของเอลิเมนต์ชนิดนี้จะมีโหนดตั้งแต่ 3 โหนดขึ้นไปเอลิเมนต์แบบนี้จะเหมาะกับการจำลองโครงสร้างที่มีความหนา (Thick) เมื่อเทียบกับพื้นผิว

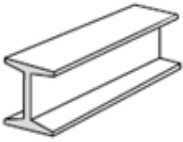
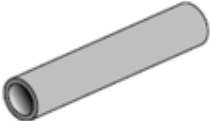
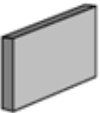
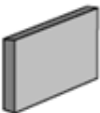
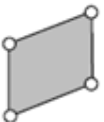


รูปที่ 2.15 การใช้งาน Solid Element ในงานที่เป็นปริมาตรตันที่มีความหนา



รูปที่ 2.16 ชนิดของเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1 ถึง 3 มิติ

การจัดหมวดหมู่แบ่งประเภทของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ในทางกลศาสตร์โครงสร้าง ความเหนียวแน่น ความหยาบของเอลิเมนต์บนพื้นฐานจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางกายภาพดั้งเดิม ที่ชี้แจงหัวข้อนี้เพราะเป็นส่วนย่อยของระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีความเข้าใจในเทคนิคการออกแบบจำลองขึ้นสูง ดังเช่น รายละเอียดลำดับขั้น และการวิเคราะห์โดยรวมกับเฉพาะแห่ง ดังรูปที่ 2.17

องค์ประกอบ โครงสร้างทางกายภาพ	ชื่อแบบจำลอง ทางพีชคณิต	การทำให้เป็นแบบอย่าง ไฟไนต์เอลิเมนต์
	ท่อน	
	ท่อน , ก้าน	
	ท่อ	
	ผืน , พังผืด	
	แผ่นเลื่อน	

รูปที่ 2.17 ตัวอย่างโครงสร้างเอลิเมนต์ดั้งเดิม

รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างดั้งเดิมของเอลิเมนต์ (Primitive Structural Element) โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะจำแนกตามโครงสร้างกลศาสตร์โครงสร้างซึ่งเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง เอลิเมนต์ทั้งหลายเหล่านี้ปกติมาจากกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการเข้าใจทฤษฎีทางกายภาพของวัสดุมากกว่าทางคณิตศาสตร์ดังรูป เอลิเมนต์มีลักษณะเป็น แท่ง (Bars), ก้าน (Cables) และเส้น (Beams)

สำหรับการแบ่งเอลิเมนต์ในกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกันด้วยจุดต่อ (Node) โดยการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามารถใช้หลักการดังนี้ คือ ควรหลีกเลี่ยงการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างผิดปกติ เช่น เอลิเมนต์ที่มีมุมป้านมากๆ หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านยาวมากๆ เอลิเมนต์ที่มุมแคบมากๆ และมีลักษณะอัตราส่วนกว้าง (Large Aspect Ratio) เป็นต้น ควรเลือกใช้เอลิเมนต์ที่เป็นสี่เหลี่ยมด้านเท่าจะดีมาก หรือ อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความยาวมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง อีกทั้งควรใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดในส่วนที่มีความหนาแน่น และแบ่งเอลิเมนต์ขนาดใหญ่ขึ้นในบริเวณที่ไกลออกไป

2.2.4 ความอิสระของการเคลื่อนที่ (Degrees of Freedom : DOF)

ความอิสระของการเคลื่อนที่จะเป็นตัวกำหนดสถานะของเอลิเมนต์ ซึ่งจะทำหน้าที่เรื่องจัดการ การเชื่อมต่อของเอลิเมนต์ ในการเชื่อมต่อของตัวแปรในจุดโหนดการกำหนดค่าอนุพันธ์ตัวแปรของอิสระการเคลื่อนที่จะมีหลายค่า สำหรับความอิสระของการเคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของลักษณะชนิดของการวิเคราะห์ โดยที่ความอิสระของการเคลื่อนที่จะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งความอิสระของการเคลื่อนที่แต่ละชนิดสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 DOF ของลักษณะการวิเคราะห์แต่ละชนิด

ขอบข่าย (Discipline)	อิสระการเคลื่อนที่ (DOF)
โครงสร้าง (Structural)	การเคลื่อนที่ (Displacement)
ความร้อน (Thermal)	อุณหภูมิ (Temperature)
ไฟฟ้า (Electrical)	โวลต์ (Voltage)
ของไหล (Fluid)	ความดัน (Pressure)
แม่เหล็ก (Magnetic)	สภาพแม่เหล็ก (Magnetic Potential)

2.2.5 การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Analysis)

ไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความสามารถในการวิเคราะห์สมการทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และ ไม่เชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับสมการแบบไม่เชิงเส้นจะเหมาะสมสำหรับชิ้นงาน หรือวัสดุที่มีการเสียรูปร่าง (Deformation) ไปแล้ว ดังนั้นจึงมีความยุ่งยากมากกว่า ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่า ความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น และ ไม่เชิงเส้น ก็คือ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น สมการแบบไม่เชิงเส้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของเวลา เมื่อเกิดการเสียรูปร่าง เปลี่ยนแปลงรูปร่าง อีกทั้งสมบัติทางกายภาพจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปทำให้ค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนแบบเชิงเส้น เมื่อวัสดุเกิดการเสียรูปร่าง สมบัติทางกายภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่จะคงที่เสมอซึ่งทำให้ค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ไม่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ดังนั้นก่อนที่จะวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จึงต้องพิจารณาเสียก่อนว่า ชิ้นงานจะวิเคราะห์แบบเชิงเส้น หรือแบบไม่เชิงเส้น ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมเนื่องจากการวิเคราะห์แบบสถิต (Static) และ พลศาสตร์ (Dynamic) จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบเชิงเส้น และ ไม่เชิงเส้น

ในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ถ้าแบ่งตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้

1. เรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) คือ มีสาเหตุของการเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านรูปทรงทางเรขาคณิต (Geometry) ประเภทการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deflection) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการหมุนขนาดใหญ่ (Large Rotation) มักจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีความเหนียวสูง และมี Deflection มากเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ หรือมีความสามารถในการบิดตัวได้มาก คือวัสดุมีการเสียรูป หรือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมาก (Large Deformation) จนทำให้ค่าความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุ ขึ้นงานสูงขึ้นมากกว่าเดิมตามเวลาที่ผ่านไป ซึ่งสมการทั่วไปแบบเรขาคณิตแบบไม่เชิงเส้น (Geometric Nonlinear) มีดังนี้ [17,21,22]

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dv \quad (2.2)$$

เมื่อ K = เมทริกซ์ความแข็งแกร่ง (Stiffness Matrix)
 B = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Large Strain)
 D = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF) [15,20]

2. วัสดุแบบไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) โดยปกติแล้วการวิเคราะห์วัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่จะเกิดการคืนรูปอย่างสมบูรณ์เมื่อนำแรงหรือภาระกระทำออกไปแล้ว ค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ซึ่งเรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) จะมีค่าคงที่เสมอ แต่สำหรับวัสดุบางประเภทการคืนรูปเมื่อนำแรง หรือ ภาระกระทำออกไป จะเกิดความไม่สมบูรณ์จนเกิดช่วง Plastic Strain มักเกิดจากแรงที่มากระทำกับวัสดุมีขนาดมากเกินกว่าค่าจุดคราก (Yield) จนทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ซึ่งจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบวัสดุไม่เชิงเส้น (Materials Nonlinear) ซึ่งในการวิเคราะห์จะใช้รูปแบบสมการโดยทั่วไปเหมือนกับสมการที่ 2.2 แต่แตกต่างกันที่ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (D) จะเป็นกรณี (Small Strain) อย่างเดียวเท่านั้น และความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (B) ไม่เป็นกรณี (Small Strain) [15,18,20]

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dv \quad (2.3)$$

เมื่อ K = เมทริกซ์ความแข็งแกร่ง (Stiffness Matrix)
 B = ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
 D = ความเคลื่อนที่อิสระของโหนด เอลิเมนต์ (DOF) กรณี (Small Strain) [15,20]

3. การเปลี่ยนสถานะแบบไม่เชิงเส้น (Changing Status Nonlinear) มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่าง การดึงสลับกับการ

หย่อนสายเคเบิลนานๆ หรือ ยางที่ต้องสัมผัสกับความร้อน ความเย็นสลับกันจนทำให้สมบัติของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปคือ ความสามารถในการรับแรงของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา หรือความสมบัตินด้านอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) เท่านั้น [23,24,25]

2.3 โปรแกรม MSC. Marc Mentat (MSC Marc. Mentat Program)

2.3.1 ภาพรวมของบริษัท (Company Over View) [26]

บริษัท MSC. Software (MSC. Software Corporation) โดยแรกเริ่มก่อตั้งบริษัทมีชื่อว่า MACNEAL-SCHWENDLER CORPORATION มีหน้าที่จัดหาจัดส่งซอฟต์แวร์ด้านคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์งานทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering : CAE) ที่มีความซับซ้อน ตั้งแต่ปี 1963 จนถึงปัจจุบันทางบริษัทได้พัฒนาการจัดจำหน่าย และสนับสนุนโปรแกรมที่ช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างที่สมบูรณ์ที่สุดในโลก Nastran เป็นโปรแกรมในเชิงพาณิชย์โปรแกรมแรกที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ที่เกิดขึ้น โดย MSC. Software Corporation โปรแกรมอื่นดังนี้ Patran, Adams, MSC. Marc Mentat, MSC. Dytran, MSC. MVision, MSC. Fatigue, MSC. Laminate Modeler, MSC Superform, MSC Superforge ซึ่งโปรแกรมมีลักษณะเด่นดังต่อไปนี้ [12]

1. Nastran (Implicit)

- การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (Linear Analysis)
- การแกว่ง การสั่นสะเทือน (Vibration)
- ความเป็นเลิศด้านพลศาสตร์ (Classic Dynamic)
- พื้นฐานการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Basic Nonlinear)

2. MSC. Marc Mentat (Implicit)

- การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นขั้นสูง (Advanced Nonlinear)
- การดีดกลับ (Springback)
- การขึ้นรูปพลาสติก (Plastic Forming)
- การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Displacement)

3. MSC. Dytran (Explicit)

- การขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet Metal Forming)
- ภาชนะพลาสติก (Container)
- การขึ้นรูป (Forming) และงานเชื่อม (Welding)
- การวิเคราะห์ความผิดพลาด (Crash Analysis)

4. MSC. Superform (Implicit)

- เพื่อวัตถุประสงค์ทั่วไป (General Purpose Bulk)
- การขึ้นรูป (Forming)

5. MSC. Superforge (Eulerian)

- การขึ้นรูปแบบ 3 มิติ (3D Forming)

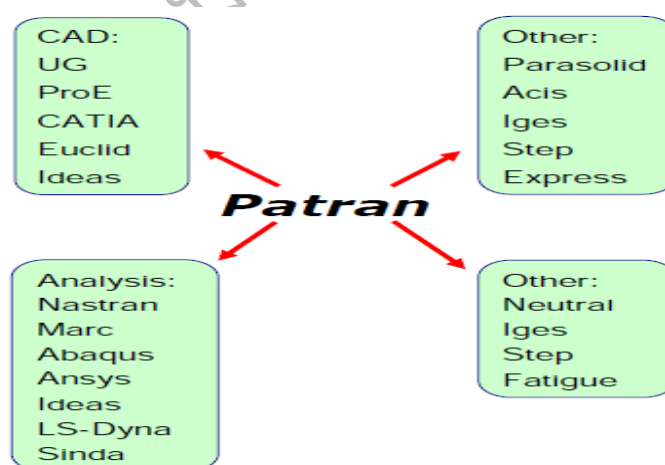
6. Adams

- กลศาสตร์การเคลื่อนไหวก (Rigid Body Kinematics)

2.3.2 Patran

Patran คือขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (Pre Processing) และขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (Post Processor) ซึ่งมีการรวมกลุ่มคำสั่งที่บางครั้งเรียกว่า เครื่องมือการวิเคราะห์หลายๆ รวมทั้งหมดที่โปรแกรม MSC. Marc Mentat และ Nastran สำหรับการหาคำตอบของสถานการณ์ที่แน่นอน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งรวมอยู่ในโปรแกรมด้วย นอกจากนี้การกลุ่มของเอลิเมนต์ ให้มีประสิทธิภาพสามารถทำได้โดยผ่านโปรแกรม Patran อีกทั้งในการวิเคราะห์โปรแกรม MSC. Marc Mentat จะกำหนดรูปแบบในการวิเคราะห์ และประเมินผ่านโปรแกรม Patran ได้ ซึ่งประโยชน์ของ Patran ยังมีอีกมากแต่จะยกตัวอย่างบางส่วนเช่น ใช้กับรูปทรงเรขาคณิตที่ได้จาก CAD ให้มีความสมบูรณ์มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถจัดการกับกลุ่มเอลิเมนต์ในแต่ละแบบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น [13]

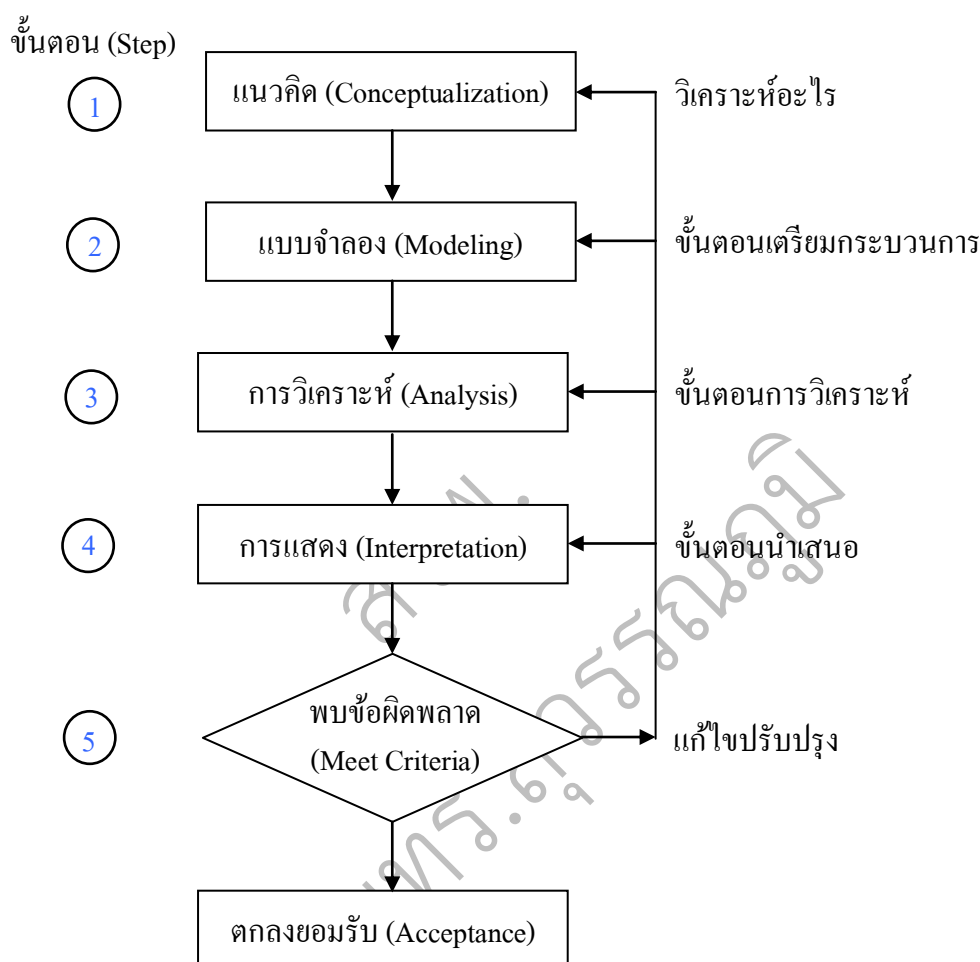
Patran สามารถใช้ร่วมกับโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบได้ (CAD) ตัวอย่างเช่นโปรแกรม UG, Pro Engineer, Catia, Euclid, Ideas และโปรแกรมการวิเคราะห์อื่นๆ เช่น Nastran, Marc, Abaqus, Ansys, Ideas, LS-Dyna, Sinda อีกทั้งมีอินเตอร์เฟซ รหัสสำคัญของโปรแกรม CAD และการวิเคราะห์ ฯลฯ ซึ่งทำให้คุณนำข้อมูลมาใช้ร่วมกันได้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.18 การออกแบบโดยแบ่งบริการนั้นออกเป็นส่วนย่อยของ Patran

2.3.3 โปรแกรม MSC. Marc Mentat (MSC. Marc Mentat Program) [26]

กล่าวนำผู้ใช้โปรแกรมกราฟิกส์แบบอินเทอร์เฟสที่ช่วยให้คุณดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ตั้งแต่แรกเริ่มกระบวนการจนกระทั่งเสร็จสิ้น ซึ่งสามารถแสดงกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ออกเป็นวงจรดังนี้



รูปที่ 2.19 วงจรการวิเคราะห์ (The Analysis Cycle)

กล่าวโดยสรุปกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเสริมความเข้าใจของโปรแกรมนั้นจึงต้องพิจารณาถึงวงจรการวิเคราะห์กระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนแนะนำให้รู้จักกลไกของโปรแกรมหาดังรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็น 5 ขั้นตอนเกี่ยวกับวงจรของกระบวนการนี้ ในบางครั้งเฉพาะบางกระบวนการเท่านั้นที่ต้องมีการตรวจตราการออกแบบมากกว่า 1 ครั้ง หากผลการทดลองไม่ตรงกับเกณฑ์การออกแบบ คุณสามารถย้อนกลับไปแก้ไขที่ขั้นตอนที่ 1 ซึ่งเป็นแนวคิดในการวิเคราะห์ (Conceptualization) หรือ ขั้นตอนที่ 2 การสร้างแบบจำลอง (Modeling) ซึ่งเป็นช่วงระยะที่แก้ไข

ปรับปรุงกระบวนการ ดังนั้น 5 ขั้นตอนของวงจรการวิเคราะห์นี้ถือเป็นพื้นฐานของงานวิจัยเล่มนี้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิต เนื้อหาของหัวข้อนี้จะถูกออกแบบมาเพื่อให้มุ่งความสนใจไปที่ขั้นตอนไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม 2 ขั้นตอน ในวงจรการวิเคราะห์คือ ขั้นตอนที่ 2 ช่วงการสร้างแบบจำลอง และขั้นตอนที่ 4 ช่วงของผลการทดลอง โดยโปรแกรม MSC. Marc Mentat มีข้อเด่นคือเป็นเครื่องมือที่ใช้พิสูจน์ปัญหาทางวิศวกรรม และพยากรณ์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขั้นตอนที่ 2 และ 4 ของวงจรการวิเคราะห์ (The Analysis Cycle) แบบจำลอง และผลลัพธ์การตีความ สำหรับปัญหาทางวิศวกรรม นอกจากนี้โปรแกรม MSC. Marc Mentat ได้รับการเลือกให้ใช้ได้ตามหลักเกณฑ์การวิเคราะห์ทั้ง 2 ข้อดังนี้

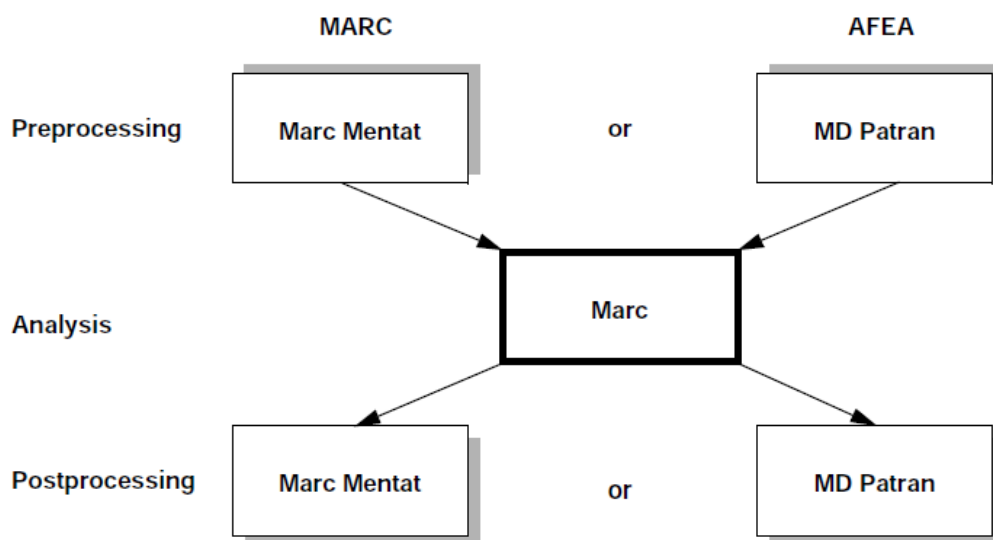
1. เพื่อนำหลายวิธีให้คุณในการสร้างแบบจำลองที่มีความยุ่งยาก
2. เพื่อแสดงประเภทการวิเคราะห์ที่หลากหลาย และให้คุณคุ้นเคยกับความสามารถต่างๆ ของโปรแกรม โปรแกรมจะดำเนินการไปตามวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จจะแสดงผลแบบกราฟฟิกส์ และการแสดงการเคลื่อนไหวเพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และแสดงผลออกมาเป็นกราฟ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลออกมาเป็นค่าต่างๆ ทางวิศวกรรมได้อีกด้วย อาทิ ค่าความเค้น ความเครียด การบิดกลับ หรือแม้แต่ความหนาของเอลิเมนต์ ซึ่งถ้าต้องการดูผลเชิงตัวเลขที่แสดงแต่ละเอลิเมนต์แต่ละโหนดก็สามารถทำได้ [26]

การกำหนดเทคนิคแต่ละมิติของวัตถุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง และแสดงผลลัพธ์ ดังนั้นระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีการจัดจำแนกเป็นประเภทตามมิติ และในหลายกรณีความซับซ้อนของแบบจำลองจะสอดคล้องกับมิติ จากนั้นคุณสามารถสรุปว่าเมื่อคุณทราบวิธีการแก้ปัญหาแบบ 1 มิติ และ 3 มิติ (One and Three Dimension) อย่างไรก็ตามเอกลักษณ์ที่เป็นคุณสมบัติของวัตถุแบบ 1 มิติ ซึ่งตัวอย่างที่ครอบคลุมรูปแบบของการเชื่อมโยงเครือข่าย (Topology) ดังตัวอย่างเป็นการยากที่จะแสดงเส้นรูปร่างแบบเส้นที่เอลิเมนต์ (Element) กับชนิดทางเรขาคณิต และการวิเคราะห์ ดังเช่น การถ่ายโอนความร้อน การแพร่ของความร้อน สถิติศาสตร์ พลศาสตร์ และการนำไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้ในเนื้อหาวิชาที่ต้องใช้จะครอบคลุมเกี่ยวกับวัสดุที่เป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญ ซึ่งมีความจำเป็นมาก และง่ายต่อการเข้าถึงคำสั่ง ทำความเข้าใจ และเป็นมิตรกับผู้ที่ใช้การทำงานโปรแกรมเป็นครั้งแรก [26]

2.4.4 ระบบ MSC. Marc Mentat (The MSC. Marc Mentat System) [26]

ระบบของโปรแกรม MSC. Marc Mentat จะมีชุดโปรแกรมอื่นๆ ที่ช่วยสนับสนุนอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมแขนงกลศาสตร์โครงสร้าง การถ่ายเทความร้อน และการวิเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะช่วยในการปรับปรุงพื้นผิว (Surface) ของแบบจำลองให้มีความสมบูรณ์สวยงามเสียใหม่ ซึ่งระบบของโปรแกรม MSC. Marc Mentat สามารถแสดงดังรูปที่ 2.20 โดยระบบของโปรแกรม MSC. Marc Mentat จะประกอบไปด้วยโปรแกรมต่างๆ ทั้งหมด 5 โปรแกรม ดังนี้

1. MSC. Marc Mentat for Analysis
2. MSC. Marc Mentat หรือ MD Patran for GUI
3. MSC. Marc Mentat or MD Patran
4. Analyze Your Structure (MSC. Marc Mentat)
5. Graphically Depict the Results (MSC. Marc Mentat or MD Patran)



รูปที่ 2.20 ระบบของโปรแกรม MSC. Marc Mentat



รูปที่ 2.21 หน้าต่างของโปรแกรม MSC. Marc Mentat

MSC. Marc Mentat สำหรับวิเคราะห์ (MSC. Marc Mentat for Analysis)

โปรแกรม MSC. Marc Mentat สามารถใช้วิเคราะห์ความเค้นแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นได้ทั้งแบบคงที่สถิตยศาสตร์ (Static) และการเคลื่อนที่พลศาสตร์ (Dynamic) รวมถึงการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) และการวิเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Analysis) ความสัมพันธ์ผลลัพธ์ที่ได้กับแรงที่มากระทำ (Nonlinearities) อาจเกี่ยวเนื่องจากพฤติกรรมของวัสดุ (Material Behavior) การเสียรูปร่างโครงสร้างขนาดใหญ่ (Large Deformation) หรือ ขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Conditions) ปัญหาทางกายภาพใน 1 มิติ 2 มิติ หรือ 3 มิติ รูปร่างของเอลิเมนต์ที่ใช้จะมีความแตกต่างกัน เอลิเมนต์เหล่านี้รวมถึงเอลิเมนต์แบบโครงถัก (Trusses) แบบเส้นตรง (Beams) แบบผนังแผ่น (Shell) และแบบปริมาตรตัน (Solids)

MSC. Marc Mentat or MD Patran for GUI

Marc Mentat เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สนับสนุนต่อการเตรียมการ และกระบวนการข้อมูลสำหรับใช้กับระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการสนับสนุนของคอมพิวเตอร์ สามารถช่วยลดภาระของมนุษย์ในการวิเคราะห์ระเบียบการไฟไนต์เอลิเมนต์ การนำเสนอข้อมูลในรูปแบบกราฟฟิกส์นี้ช่วยในการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบข้อมูลที่มีความเชื่อมโยงในปริมาณที่มาก ข้อสำคัญของ MSC. Marc Mentat คือคุณสามารถติดต่อโดยตรงกับโปรแกรม ซึ่งสามารถป้อนข้อมูลยืนยันข้อมูลได้ทางคีย์บอร์ด และยังแสดงข้อเสนอแนะกลับมายังผู้ใช้งาน หรือ มีการเตือนเมื่อโปรแกรมทำการตรวจสอบจนกระทั่งพบปัญหา นอกจากนี้โปรแกรมยังทำการตรวจสอบข้อมูลไฟล์ที่ป้อนเข้าไป อีกทั้งสร้างคำเตือนที่เกี่ยวกับการชี้แจงข้อมูลถ้าโปรแกรมเกิดความไม่แน่ใจจัดช่องในการประมวลผลข้อมูล ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานเห็นถึงความชัดเจนของการเปลี่ยนการสร้างข้อมูลที่น่าเข้าไป นอกจากนี้โปรแกรม MSC. Marc Mentat ยังช่วยให้คุณเห็นถึงความชัดเจนในการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่ผู้ใช้งานป้อนเข้าไป กระบวนการที่โปรแกรมสามารถกระทำได้ต่อ Mesh ทั้งแบบ 2 และ 3 มิติมีดังนี้

1. สร้าง และแสดงกลุ่มของเอลิเมนต์ (Generate and Display a Mesh)
2. สามารถสร้างเงื่อนไข และกำหนดภาระ (Loads) ที่มากระทำได้ (Generate and Display - Boundary Conditions and Loadings)
3. ดำเนินการเพื่อสร้างเส้น รูปร่าง และสามารถแสดงประวัติการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในขั้นตอนนำเสนอกระบวนการ (Post Processing)

สำหรับขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (Pre Processing) โดยคำสั่ง MESH GENERATION ในส่วนกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ซึ่งข้อมูลที่มีส่วนประกอบในการประมวลผลกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) มีข้อมูลทั้งหมดดังต่อไปนี้ (The Data That is Processed Includes)

1. พิกัดของโหนด (Nodal Coordinates)

2. การเชื่อมต่อเอลิเมนต์ (Element Connectivity)
3. เงื่อนไข ขอบเขตโหนด (Nodal Boundary Conditions)
4. ระบบพิกัดโหนด (Nodal Coordinate Systems)
5. สมบัติเอลิเมนต์วัสดุ (Element Material Properties)
6. สมบัติเรขาคณิตเอลิเมนต์ (Element Geometric Properties)
7. ภาระที่กระทำเอลิเมนต์ (Element Loads)
8. การตั้งค่าเอลิเมนต์ โหนด (Element and Nodal Setting)

โครงสร้างของ MSC. Marc Mentat (Structure of MSC. Marc Mentat) [26]

โปรแกรม MSC. Marc Mentat มีคลัง (Library) ที่ครอบคลุมถึง 4 ส่วนใหญ่ๆ ที่ทำให้โปรแกรมสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย โดยคลังของโปรแกรมนี้อาจจัดวางอยู่ที่ระเบียบการข้อปฏิบัติของทางด้านโครงสร้าง (Structure Procedure) วัสดุ (Materials) และเอลิเมนต์ (Elements) และฟังก์ชันของโปรแกรม (Program Functions) เนื้อหาคลังจะมี 4 หัวข้อและคลังของโปรแกรมแต่ละคลังจะมีความแตกต่างกันสามารถอธิบายไว้ดังนี้

1. แนวทางการปฏิบัติของคลัง (Procedure Library) วงจำกัดของคลังในส่วนข้อปฏิบัติด้านโครงสร้าง อาทิเช่น สถิตยศาสตร์ (Static) พลศาสตร์ (Dynamic) ครีป (Creep) การโก่ง (Buckling) การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) การนำไฟฟ้า การวิเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Analysis) แนวทางการปฏิบัติของคลังเพื่อความสะดวกสอดคล้องกับกายภาพทางโครงสร้างที่หลากหลาย ดังนั้นโปรแกรมจึงควบคุมผู้ใช้ให้ใช้งานในส่วนโมดูลที่อนุญาตให้ใช้ อาทิเช่น การเคลื่อนที่พลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic) และการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Analysis)

2. คลังวัสดุ (Materials Library) ในกรณีนี้คลังวัสดุจะรวมไปถึงวัสดุหลายๆ แบบดังที่แสดงวัสดุทางวิศวกรรมหลายชนิดมากที่สุดตัวอย่างเช่น พฤติกรรมที่ไม่ยืดหยุ่นของโลหะ การเปิดเปื้อนบนเปื้อนของโลหะ และวัสดุที่เป็นยาง สมบัติของวัสดุหลายชนิดแสดงออกเป็นแบบไม่เชิงเส้นดังตัวอย่างเช่น กรณีที่วัสดุเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวรโดยผิววัสดุไม่มีการฉีกขาด หรือ แตกหัก จัดว่ามีเป็นแบบพลาสติก (Plasticity) วัสดุที่มีสมบัติเหนียวหนืด (Viscoelasticity) และวัสดุที่มีความยืดหยุ่นแบบยาง (Hypoelasticity) รวมทั้งวัสดุที่ยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น (Linear Elasticity) บางทีอาจเป็นวัสดุที่มีสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

3. คลังเอลิเมนต์ (Element Library) ในกรณีนี้คลังของเอลิเมนต์จะมีเอลิเมนต์มากกว่า 200 เอลิเมนต์ที่ส่วนนี้คุณต้องใช้รูปทรงเรขาคณิตมาช่วยในการตัดสินใจในการเลือกใช้เอลิเมนต์ภายใต้เงื่อนไขภาระที่กระทำทั้งแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น โดยเอลิเมนต์จะถูกแบ่งตามจุดโหนดโดยมี

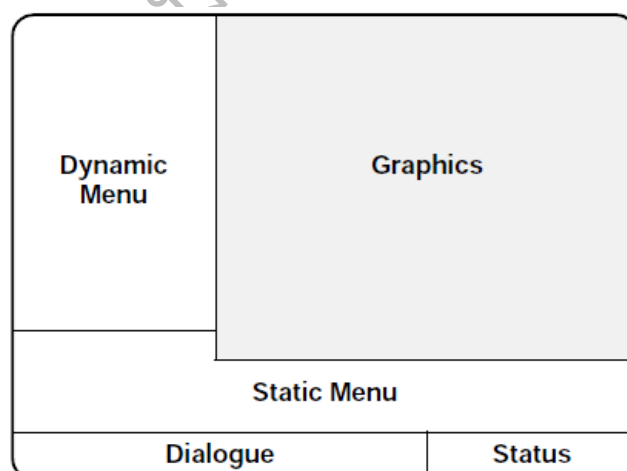
รูปแบบการเลือกคือ เอลิเมนต์แบบอัตโนมัติ และเอลิเมนต์ที่สามารถกำหนดขนาด รูปร่าง และลักษณะเองได้โดยใช้ระยะของโหนดเป็นตัวกำหนด และควบคุมเป็นหลัก

4. คลังฟังก์ชันโปรแกรม (Program Function Library) ในกรณีนี้คลังฟังก์ชันโปรแกรม ดังเช่น การคัดแยกการประกอบ (Selective Assembly) โปรแกรมได้รับการออกแบบด้านการเพิ่มความเร็วและเหมาะสมง่ายต่อการวิเคราะห์งานซึ่งเป็นมิตรกับผู้ใช้งาน จากคลังทั้งสี่ที่รวมเป็นส่วนประกอบในโปรแกรม MSC. Marc Mentat ของผู้ใช้งานทำให้เป็นเครื่องมือที่สามารถปรับปรุงแก้ไขปัญหาทางด้านกลศาสตร์โครงสร้างได้เกือบทุกปัญหา

2.3.5 กลไกของ MSC. Marc Mentat (Mechanics of MSC. Marc Mentat)

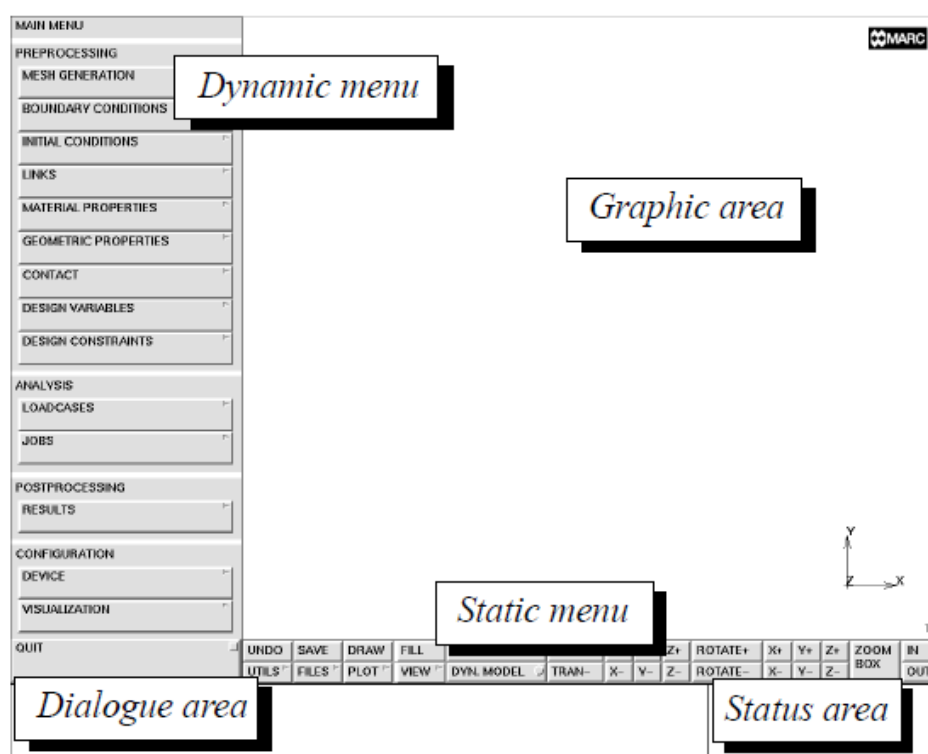
ก่อนที่จะเริ่มต้นใช้โปรแกรม MSC. Marc Mentat คุณจำเป็นต้องทราบวิธีสื่อสารกับทางโปรแกรมเสียก่อน ดังเช่น การสื่อสารโดยการพิมพ์คำสั่งลงที่บริเวณกล่องโต้ตอบโดยคำสั่ง (Command) บริเวณพื้นที่ของบทสนทนา (Dialogue) หรือ การสื่อสารโดยใช้กราฟของสมบัติวัสดุ หรือ แม้แต่การป้อนสมการสมบัติวัสดุลงไปในตารางสมบัติวัสดุ (Tables) ฯลฯ โดยจุดประสงค์ของหัวข้อนี้คือ ต้องการให้ทราบภาพรวมการทำงานของโปรแกรม MSC. Marc Mentat และเพื่อให้ทราบข้อมูลพื้นฐานที่สามารถติดต่อสื่อสารกับโปรแกรมได้อย่างสะดวก ซึ่งเมื่อผ่านหัวข้อนี้แล้วคุณจะเข้าใจการทำงาน ระบบดังต่อไปนี้

1. รูปแบบพื้นฐานของหน้าต่าง (The Basic Window Layout) เป็นจุดเริ่มต้นของการติดต่อสื่อสารทั้งหมดดังรูปที่ 2.13 นั้นปรากฏเมื่อคุณเริ่มต้นเปิดโปรแกรม MSC. Marc Mentat ซึ่งหน้าต่างของโปรแกรมที่ปรากฏบนหน้าจอของคุณจะถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ในส่วนกราฟฟิกส์ (Graphic) ใช้แสดงผลการปฏิบัติงานในขั้นตอนต่างๆ ผลการวิเคราะห์ ในส่วนเมนู (Menu) ใช้ในการป้อนคำสั่ง ในส่วนบทสนทนา (Dialogue) ใช้โต้ตอบสื่อสาร และป้อนคำสั่งใช้งานเชิงตัวเลข และสมการสมบัติของวัสดุ



รูปที่ 2.22 หน้าต่างพื้นฐานของโปรแกรม MSC. Marc Mentat

พื้นที่กราฟฟิกส์จะใช้เพื่อแสดงสถานะปัจจุบันของฐานข้อมูล เมื่อคุณเริ่มต้นเปิดโปรแกรม MSC. Marc Mentat พื้นที่กราฟฟิกส์นี้จะเป็นที่ว่างเปล่าเพื่อแสดงให้เห็นฐานข้อมูลที่ยังว่างอยู่ พื้นที่เมนูมีไว้เพื่อแสดงรายการย่อยของเมนูโปรแกรม และแบ่งออกเป็นพื้นที่ย่อยๆ ออกเป็น 2 ส่วน คือ เมนูแบบคงที่ และเมนูแบบไดนามิกส์ ซึ่งเนื้อหาของเมนูรายการแบบไดนามิกส์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเมนูรายการถูกเลือก ในทางตรงกันข้ามเมนูแบบคงที่จะมีรายการที่อยู่กับที่ไม่เปลี่ยนแปลงเนื้อหาเมื่อถูกเลือกตลอดเวลา พื้นที่สนทนาจะเป็นพื้นที่ที่เลื่อนได้ประมาณ 5 บรรทัดจะปรากฏเมื่อเกิดการสนทนาโต้ตอบกับโปรแกรม การแจ้ง การเตือนของโปรแกรม และเป็นพื้นที่ที่ผู้ใช้สามารถป้อนข้อมูลหรือ คำสั่ง บริเวณพื้นที่สนทนาเป็นบริเวณที่สงวนไว้เพื่อการสื่อสารสำหรับผู้ใช้งานกับโปรแกรม โดยการทำงาน ความพร้อมในการทำงานจะแสดงในพื้นที่นี้เพื่อให้เห็นถึงสถานะของโปรแกรม



รูปที่ 2.23 พื้นที่หลักๆ ของโปรแกรม (กราฟฟิกส์ เมนู บทสนทนา)

2.3.6 ข้อมูลเบื้องหลังของโปรแกรม (MSC. Marc Mentat Background Information)

วัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้คือการให้ภาพรวมของคุณสมบัติ และลักษณะที่พบได้บ่อยของโปรแกรม MSC. Marc Mentat ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะมีผลตลอดช่วงของการใช้โปรแกรม ซึ่งจะพบว่ามีประโยชน์ที่ใช้ข้อมูลในหัวข้อนี้ เพราะมีส่วนช่วยให้การทำงานที่มีปัญหาผ่านไปได้ด้วยดีเช่น คุณลักษณะของลำดับขั้นตอนการเตรียมกระบวนการ (Pre Processing) ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis)

ขั้นตอนการนำเสนอกระบวนการ (Post Processing) ตามกระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม MSC. Marc Mentat โดยหัวข้อที่กล่าวมีดังนี้

1. การกำเนิดกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh Generation)
 - เอกลักษณ์กลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh Entities)
 - เอกลักษณ์เรขาคณิต (Geometric Entities)
 - เทคนิคการสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์โดยตรง (Direct Meshing Technique)
 - การสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์โดยเรขาคณิต (Geometric Meshing Technique)
2. เงื่อนไขขอบเขต สภาพเริ่มต้น และการเชื่อมโยง (Boundary Conditions , Initial Conditions and Links)
3. สมบัติวัสดุ และสมบัติทางเรขาคณิต (Material and Geometric Properties)
4. การสัมผัส การเชื่อมโยง (Contact)
5. การตีความผลลัพธ์ (Results Interpretation)

2.3.7 การสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh Generation)

ขั้นตอนการเตรียมกระบวนการเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ในกระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนการเตรียมกระบวนการจะเป็นขั้นตอนที่มีความซับซ้อนยุ่งยากและเสียเวลามากที่สุดด้วยเหตุผลที่ว่าเป็นช่วงสำคัญของแนวความคิดในการตัดสินใจของการเตรียมกระบวนการดังรูปที่ 2.10 วงจรการวิเคราะห์ (The Analysis Cycle) ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงวัตถุประสงค์ที่แน่ชัดของการวิเคราะห์ และเพื่อให้ทราบว่าผลการทดลอง คำตอบของสิ่งที่คุณกำลังหาสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ เงื่อนไขต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ โปรแกรม MSC. Marc Mentat จำแนกเทคนิควิธีในการสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์ไว้ 2 แบบ วิธีการแรกเป็นการสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) โดยวิธีการโดยตรง หรือ วิธีการตามคู่มือการสร้างของโปรแกรม (Direct or Manual Approach) วิธีการที่สองเป็นวิธีการทางเรขาคณิต (Geometric Approach) การสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์สองเทคนิคนี้อยู่แยกจากกันไม่ได้ และผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจะได้ออกมาจากการสลับเปลี่ยนหมุนเวียนกันระหว่างสองเทคนิค หลักเกณฑ์ของวิธีการหนึ่งต่อไปนี้จะช่วยให้ง่ายต่อการสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) [26] นอกจากนี้เอกลักษณ์กลุ่มของเอลิเมนต์ หรือเอกลักษณ์เอลิเมนต์ (Mesh Or Element Entities) แสดงดังรูปที่ 2.15

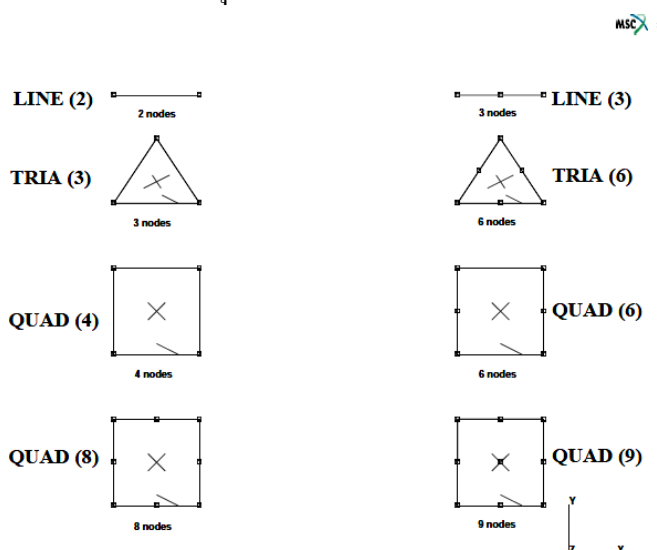
1. วางแผนแบบจำลองของคุณ (Plan Your Model) คือใช้เวลาในการวางแผนแบบจำลองอย่างรอบคอบ และกำหนดรูปแบบกระบวนการ แผนการ เพื่อประหยัดเวลาอีกทั้งประหยัดทรัพยากร
2. ค้นหาความสมมาตร และการทำสำเนา (Look for Symmetry and Duplication) คือหลายๆ โครงสร้างในแบบจำลองแสดงออกมาในรูปแบบที่มีความสมมาตร ให้คุณมองหาส่วนประกอบอย่างง่ายของแบบจำลองและมองหาส่วนอื่นๆ ที่เหมือนกันแล้วทำการทำสำเนาให้มีความสมมาตรกัน

3. การตัดสินใจเลือกจุดกำเนิด (Select a Logical Origin) คือเขียนมุมซ้ายล่างของแบบจำลอง หรือไม่ตำแหน่งที่ดีที่สุดคือเขียนที่จุดกำเนิด (Origin) โดยทั่วไปการเลือกจุดกำเนิดเพื่อสร้างแบบจำลองมักนิยมเลือกใช้จุดศูนย์ และควบคุมทิศทางของเส้นด้วยค่าบวก และค่าลบ และขนาดของเส้นต่างๆ โดยจุดกำเนิดแกน X และ Y จะถูกกำหนดให้เป็น 0 และ 0 ซึ่งเป็นการกำหนดแบบ 2 มิติเท่านั้น ส่วนจุดกำเนิดที่เป็นแบบ 3 มิติจะถูกกำหนดเป็น X, Y และ Z ดังนี้ 0, 0 และ 0

4. ตรวจสอบแบบจำลองที่จะทำให้การสร้างแบบจำลองสะดวกสบายง่ายขึ้น

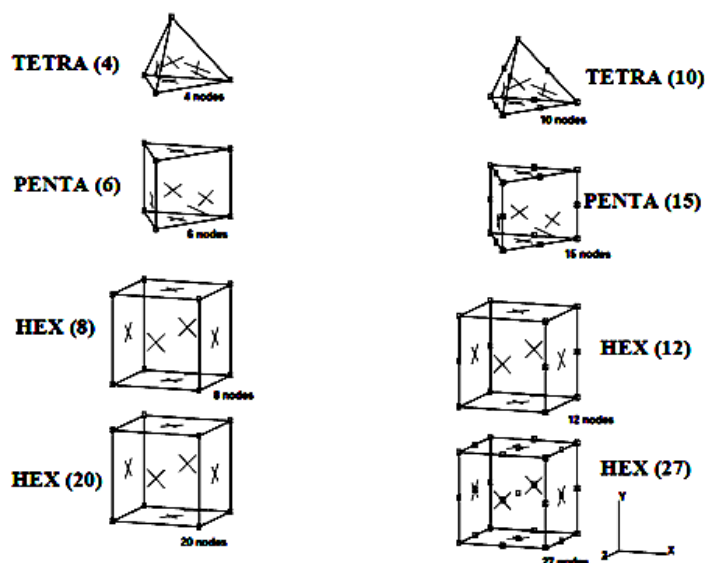
5. ตัดสินใจเลือกระบบพิกัด (Choose a Logical Coordinate System) เริ่มต้นระบบพิกัดในโปรแกรม MSC. Marc Mentat เป็นสี่เหลี่ยม มุมฉากคาเทเชียน ทรงกระบอก ทรงกลม บางทีความเหมาะสมของระบบพิกัดอาจขึ้นอยู่กับโปรแกรมบางรุ่น

6. สร้างกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ (Create Mesh 1-D and 2-D before 3-D) สำหรับงานโครงสร้างที่มีจำนวนมาก กลยุทธ์ที่ดีที่สุดคือการสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) คือขั้นแรกสร้างแบบ 1 และ 2 มิติ สุดท้ายพัฒนาเป็นแบบ 3 มิติ



รูปที่ 2.24 เอกลักษณ์ของเอลิเมนต์

เอกลักษณ์ของกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ทั้งสองชนิดจะมีความโดดเด่นที่ โหนด (Nodes) และเอลิเมนต์ (Element) โดยโหนด (Nodes) จะมีลักษณะแบบ 3 พิกัด (Three Coordinates) และมีสัญลักษณ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมบนหน้าจอ โปรแกรมเมื่อโหนดมีความเกี่ยวข้องกับรูปทรงเรขาคณิต สัญลักษณ์วงกลมก็จะถูกใช้ขึ้นมาแทนที่ ส่วนเอลิเมนต์จะประกอบด้วยเส้น และผิวหน้าของเอลิเมนต์ และมีการกำหนดลำดับของโหนด มีจำนวนเส้น จำนวนผิวหน้า จำนวนโหนด โปรแกรม MSC. Marc Mentat มีความหลากหลายจากการใช้ประโยชน์ในองค์ประกอบดังรูป เมื่อเอลิเมนต์ (Element) ถูกวาดในโหมดของโครงลวด (Wire Frame) ผิวหน้าจะแสดงเครื่องหมายขีดกากบาท



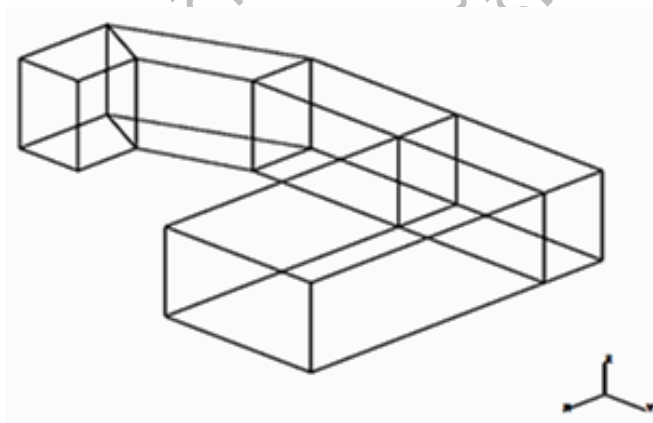
รูปที่ 2.25 ชนิดเอลิเมนต์

ในระหว่างการสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) โปรแกรมไม่จำเป็นต้องตัดสินใจเกี่ยวกับชนิดของเอลิเมนต์ที่ถูกใช้เพียงแต่ในขั้นตอนการจัดพวแบ่งชั้นของเอลิเมนต์มีความสำคัญมาก

เอกลักษณ์ทางเรขาคณิต (Geometric Entities) จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองที่ส่งผลถึงการสร้าง ซึ่งแบบจำลองนั้นจะประกอบด้วยจุด เส้น โค้ง พื้นผิว และปริมาตรตันของแบบจำลองซึ่งถือเป็นเทคนิคในการสร้าง ด้วยการสร้างแบบจำลองโดยใช้เส้นในส่วนของคุณนั้นมีลักษณะเป็น 3 พิกัดจะแทนด้วยสัญลักษณ์ (+) บนหน้าจอ เส้นสามารถกำหนดได้โดยการใช้เส้นดังต่อไปนี้ เส้นตรง เส้นอิสระ เส้นสัมผัสวง ส่วนโค้ง วงกลม ฯลฯ ในส่วนของการสร้างแบบจำลองโดยพื้นผิวปัจจุบันนี้โปรแกรม MSC. Marc Mentat ถึงผลลัพธ์ที่จะตามมาของประเภทของพื้นผิว สามารถระบุกำหนดกฎเกณฑ์ของพิกัดควบคุมชนิดของพื้นผิวรูปทรงสี่เหลี่ยม ทรงกระบอก ทรงกรวย ฯลฯ ได้ อย่างเช่นพื้นผิวของรูปสี่เหลี่ยมเป็นพื้นผิวที่เรียบง่ายที่สุดโดยการกำหนดพิกัดไว้เพียง 4 จุด พื้นผิวทรงกรวยจะมีการกำหนดพิกัดบนแกน 2 จุดและรัศมี 2 จุด และตัวอย่างสุดท้ายเช่นพื้นผิวของทรงกลมจะกำหนดพิกัดไว้ที่จุดศูนย์กลางรัศมี นอกจากนี้ยังสามารถสร้างพื้นผิวของแบบจำลองในลักษณะที่หมุนโคจรรอบแกนต่างๆ ได้เรียกวิธีการนี้ว่า การหมุนโคจรรอบแกน (Revolve) ในส่วนของแบบพื้นผิวปริมาตรตันจะขึ้นกับจำนวนด้านของปริมาตรตันซึ่งพื้นผิวจะมีขอบเขตอยู่ติดกับขอบปริมาตรตัน ซึ่งโปรแกรมจะเน้นพื้นฐานของของแข็ง 5 ประเภทคือ แบบก้อน แบบทรงกระบอก แบบทรงกลม แบบโดนัท แบบปริซึม สำหรับแบบก้อนจะมีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมซึ่งสามารถระบุจุดมุมพิกัดได้ และเป็นแบบ 3 มิติ ส่วนแบบทรงกระบอกก็จะเป็นแบบปริมาตรตันซึ่งอาจรวมถึงรูปทรงกรวยด้วย ซึ่งสามารถกำหนดได้ทั้งใน

แนวแกน และรัศมีด้วย ส่วนปริมาตรตันทรงกลมสามารถกำหนดได้ที่เส้นศูนย์กลางและรัศมี ส่วนปริมาตรตันแบบโดนัทสามารถกำหนดได้โดยใช้เส้นศูนย์กลาง และรัศมีทั้ง 2 อัน สุดท้ายแบบปริซึมกำหนดโดยใช้จุดแกนทั้ง 2 รัศมี และจำนวนด้านของปริซึม ในการสร้างแบบจำลองแบบปริมาตรตันต้องเข้าใจพื้นฐานแรกๆ ที่ควรทราบคือกระบวนการสร้างแบบรวมให้เป็นก้อนเดียวเนื้อเดียวกัน (Unite) การตัด หรือลบส่วนของแบบจำลองที่ไม่ต้องการออก (Subtract) การเนื้องานของแบบจำลองที่เหมือนกันใช้ร่วมกัน (Intersect) นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุง แบบจำลองได้ด้วย (Chamfer) ในการลบคม และใช้ (Fillet , Blend) ในการทำส่วนโค้ง

เทคนิคการก่อกำเนิดกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) โดยตรง (The Direct Meshing Technique) แรกเริ่มเดิมที Mesh ที่ถูกสร้างจากการรวมกลุ่มก้อนของเอลิเมนต์ หลายเอลิเมนต์นั้นยังมีความหยาบ (Coarse Mesh) อยู่แต่ในภายหลังจากที่ได้ขีดเคลาปรับแต่งโดยเครื่องมือของโปรแกรม MSC. Marc Mentat เพื่อใช้วัตถุประสงค์นี้โดยเฉพาะ ซึ่งเหมาะสมกับโดเมน (Domain) กับเรขาคณิตอย่างง่าย โดยแท้จริงเทคนิคนี้กลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) เกิดโดยการปรับแต่งจากผู้ใช้แต่ส่วนใหญ่กลุ่มของเอลิเมนต์ที่ต้องการใช้งานก็ยังหยาบอยู่ เมื่อคุณได้สร้างแบบจำลองขึ้นมาแบบหยาบๆ คุณสามารถแก้ไขขีดเคลาเฉพาะส่วนได้ไปจนถึงระดับที่ผู้ใช้งานต้องการ โดยใช้หน่วยประมวลผลแยกย่อย นอกจากนี้คุณยังสามารถขยายรูปแบบแบบจำลองไปยังมิติที่สูงกว่าการใช้เครื่องประมวลผลขยาย [26]



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ที่หยาบ

กระบวนการก่อกำเนิดกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) โดยตรงของโปรแกรม MSC. Marc Mentat จะมีลำดับขั้นตอนของระเบียบการ 3 ข้อดังต่อไปนี้

1. พิกัด (Coordinates) ในการสร้างพิกัดต้องมีความถูกต้องใกล้เคียงกัน และการติดต่อเชื่อมโยงกันอย่างถูกต้อง ซึ่งต้องทำการปรับแต่งเอลิเมนต์ทั้งหลาย (Elements) ที่แสดงในขั้นตอนแรกเท่าที่จำเป็น

2. แก้ไขปรับปรุงขอบเขตของโหนด (Nodes) เพื่อให้ขอบเขตของโหนดที่ตรงพิกัดที่ต้องการบนเส้นรอบรูปชิ้นงาน

3. จัดสรรภายในพิกัดใหม่เพื่อสร้างบรรทัดฐานรูปร่างของเอลิเมนต์ที่มีความเหมาะสม หรือ เป็นการคล้ายตัวให้กับเอลิเมนต์

เทคนิคทางเรขาคณิตของกลุ่มเอลิเมนต์ (The Geometric Meshing Technique) รูปทรงเรขาคณิตเป็นเอกลักษณ์ที่โดดเด่นของกลุ่มเอลิเมนต์แทนที่จะเป็นการสร้างรูปทรงพื้นฐานที่รวมกันเป็นก้อน ในโปรแกรม MSC. Marc Mentat เอกลักษณ์ลักษณะเด่นของรูปทรงเรขาคณิตที่สามารถหา และ ใช้ประโยชน์ได้คือ จุด เส้นโค้ง พื้นผิว และปริมาตร และเมื่อแบบทางรูปทรงเรขาคณิตเสร็จ จุด เส้นโค้ง พื้นผิว ปริมาตร จะถูกแปลงให้เป็นลักษณะเอกลักษณ์หนึ่งของกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีความยุ่งยากซับซ้อนยิ่งกว่าวิธี (The Direct Meshing Technique) มันมีความเชื่อมโยงเกี่ยวเนื่องกับระดับชั้นทางรูปทรงเรขาคณิตกันอย่างเป็นพิเศษ อย่างไรก็ตามข้อที่เห็นเด่นชัดของเทคนิคของกลุ่มเอลิเมนต์ทางเรขาคณิตคือความซับซ้อนที่มีมากขึ้น แต่สิ่งที่มาชดเชยข้อเสียนี้ก็คือเกิดความยืดหยุ่นในการสร้างของกลุ่มเอลิเมนต์โดยเฉพาะรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อน สิ่งที่สำคัญคือความแตกต่างของเอกลักษณ์ลักษณะของกลุ่มเอลิเมนต์ได้จากรูปทรงเรขาคณิตตั้งตัวอย่างเช่น เส้นเอลิเมนต์จากการต่อกันที่จุดโหนด 2 จุด จะไม่เหมือนกับเส้นของเอลิเมนต์ที่เกิดจากเส้นโค้ง (Line Curve) เส้นเดียว และโหนดนั้นก็ยังมีลักษณะที่ไม่เหมือนกับจุด

การเปลี่ยนแปลง (Convert) การเปลี่ยนของกลุ่มเอลิเมนต์แบบจำลองทางเรขาคณิตบางทีการแปลงลักษณะทางเรขาคณิตของไฟไนต์เอลิเมนต์ตัวอย่างเช่น เส้นโค้งสามารถแปลงเป็นเอลิเมนต์เส้น พื้นผิวสามารถแปลงเป็นเอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการแปลงที่เป็นไปได้ดังนี้

1. จุด (Point) กลายเป็น โหนด (Node)
2. เส้นโค้ง (Curve) กลายเป็น เอลิเมนต์เส้น (Line Elements)
3. พื้นผิว (Surface) กลายเป็น เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม (Quadrilateral Elements)

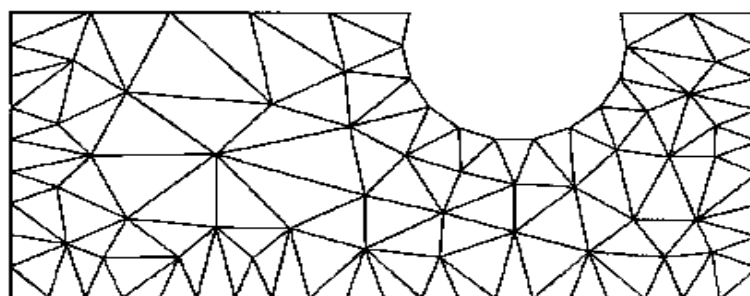
กลุ่มของเอลิเมนต์อัตโนมัติ (Auto Mesh) ในโปรแกรมมีความสามารถในการสร้างแบบอัตโนมัติบนของแข็ง บนพื้นผิว และแบบ 2 มิติ ซึ่งการจัดเรียงให้เป็นระเบียบเรียบร้อยบนพื้นผิวโดย Mesh จะสร้างที่เส้นรอบรูปชิ้นงาน และเชื่อมต่อกันด้วยจุดโหนด ซึ่งจะมีรูปร่างลักษณะอย่างไรนั้นจะขึ้นกับเส้นรอบรูป ลักษณะของแบบจำลอง ซึ่งมีขั้นตอน 3 ขั้นตอน ที่ความพิจารณาดังนี้

1. การขจัดออกตัดออก หรือ ปรับปรุงเส้นโค้ง ส่วนโค้งที่ได้มาจากโปรแกรม CAD (Clean up and Repair of the Curves Coming From a CAD Tool)
2. การติดตั้ง และควบคุมความหนาแน่นของกลุ่มของเอลิเมนต์ (Set the Curve Divisions Which Basically Controls the Mesh Density)
3. การกำเนิดของกลุ่มเอลิเมนต์แบบอัตโนมัติ (Automatic Generation of the Mesh)

ในการสร้างกลุ่มเอลิเมนต์แบบอัตโนมัติบนพื้นผิวของแข็ง หรือบริเวณภายในเส้นรอบรูปของชิ้นงานที่สร้างขึ้นโดยที่โปรแกรม MSC. Marc Mentat จะสร้างขึ้นให้โดยอัตโนมัติ โดยกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ที่สร้างจะมีความแตกต่างดังนี้

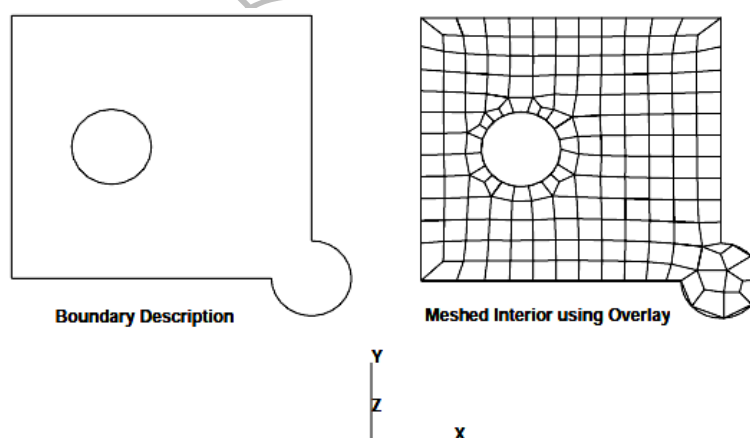
1. การสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์แบบ 2 มิติ (2-D Planar Meshing)
2. การสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์แบบพื้นผิว (Surface Meshing)
3. การสร้างกลุ่มของเอลิเมนต์แบบปริมาตรตัน (Solid Meshing)

กลุ่มของเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (Tri Mesh) จะถูกทำให้เกิดขึ้นโดยเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างเป็นแบบสามเหลี่ยมโดยเชื่อมต่อกันด้วยจุดโหนดทั้งหมด 3 จุดดังรูปที่ 2.27

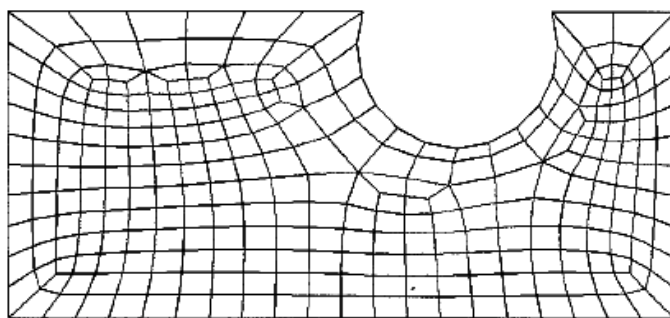


รูปที่ 2.27 กลุ่มของเอลิเมนต์ที่เป็นแบบสามเหลี่ยม (Triangular Mesh)

กลุ่มเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม (Quad Mesh) เกิดจากการสร้างขึ้นด้วยเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมบนพื้นผิวหน้าของแข็ง บนระนาบของส่วนที่ถูกตัด หรือ ส่วนโค้ง โดยช่องสี่เหลี่ยมย่อยๆ หรือเอลิเมนต์นี้จะถูกนำมาต่อกัน

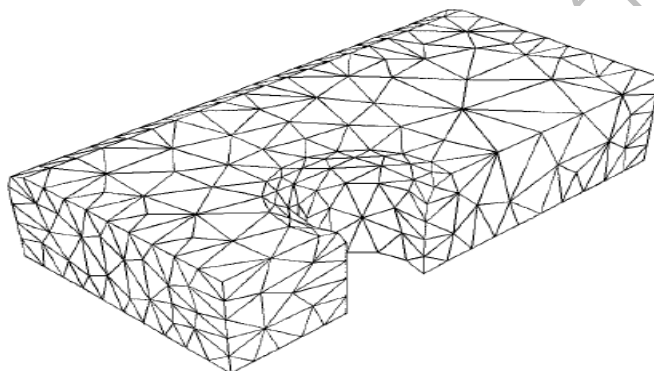


รูปที่ 2.28 Overlay Mesh



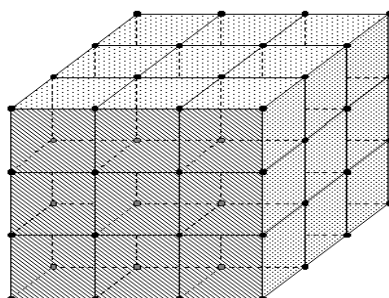
รูปที่ 2.29 กลุ่มเอลิเมนต์ที่เป็นแบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral Mesh)

Tet Mesh เกิดจากเอลิเมนต์ที่มีรูปทรง 3 มิติแบบ Tetrahedral ที่ปริมาตรของแข็ง หรือ ขอบเขตปริมาตรเป็นเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม แล้วนำเอลิเมนต์แบบ Tetrahedral มาเรียงต่อกันโดย เชื่อมกันด้วยจุดโหนดจนกระทั่งกลายเป็นเอลิเมนต์



รูปที่ 2.30 กลุ่มของเอลิเมนต์แบบ Tetrahedral (Tetrahedral Mesh)

Hex Mesh เกิดจากเอลิเมนต์ที่มีรูปทรง 3 มิติแบบของแข็งเรียกว่า Hexahedral ใ้กับ แบบจำลองที่มีปริมาตรเป็นของแข็ง แล้วนำเอลิเมนต์แบบ Hexahedral มาเรียงต่อกันโดยเชื่อมกันด้วย จุดโหนดจนกระทั่งกลายเป็นเอลิเมนต์



รูปที่ 2.31 กลุ่มของเอลิเมนต์แบบ Hexahedral (Hexahedral Mesh)

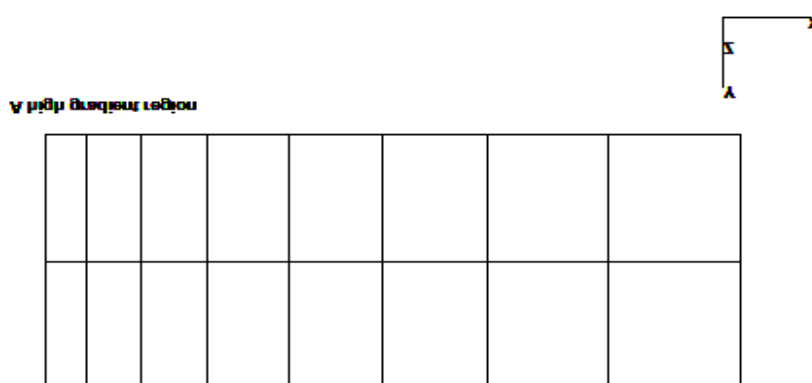
อะไรคือกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ที่ดี (What Constitutes a Good Mesh?) เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างที่เหมาะสม มีข้อผิดพลาดน้อยในการคำนวณทางเรขาคณิตด้วยโปรแกรม หรือ ไม่มีข้อผิดพลาดเลยกลุ่มของเอลิเมนต์จะดีมากถ้าหากว่าเอลิเมนต์มีมุมเท่ากันทุกด้าน อีกทั้งเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (Quadrilateral Always Squares) เสมอ หรือเป็นแบบ Hexahedral ก็เป็นรูปทรงนี้เสมอ (Hexahedral Always Cubes) อย่างไรก็ตามแทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่เอลิเมนต์จะเป็นไปตามอุดมคติที่กล่าวข้างต้นเมื่อแบบจำลองมีความซับซ้อน เพราะฉะนั้นจึงแนะนำให้เลือกใช้เอลิเมนต์ หรือ กลุ่มของเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ และรูปทรงรูปร่างของแบบจำลอง ซึ่งรวมไปถึงขนาดด้วย

ลักษณะอัตราส่วน (Aspect Ratio ; AR) ลักษณะอัตราส่วนเอลิเมนต์คือ ผลหารระหว่างความยาวสูงสุด และความสั้นที่สุดของมิติเอลิเมนต์โดยอัตราส่วนนี้กำหนดให้มากกว่า หรือ เท่ากับหนึ่ง ถ้าลักษณะของอัตราส่วนเท่ากับหนึ่ง ถือว่าเป็นอุดมการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัด ช่วงที่สามารถยอมรับได้ของเอลิเมนต์ที่ขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหามีดังนี้

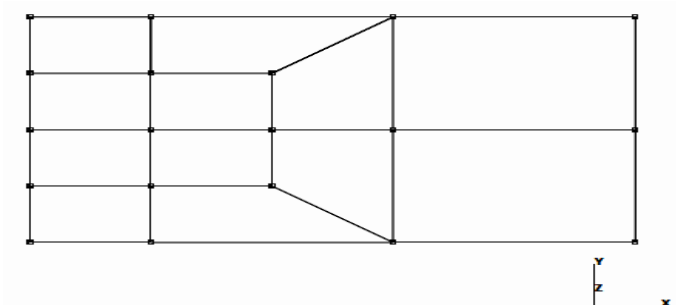
$$AR < 3 \text{ For Linear Elements}$$

$$AR < 10 \text{ For Quadratic Elements}$$

การบิดเบือนเปลี่ยนรูป (Distortion) ความเอียงเอียงของเอลิเมนต์ และการบิดเบี้ยวโค้งงอของระนาบมีความสำคัญที่ควรพิจารณา ความเอียงที่กำหนดไว้ของเอลิเมนต์คือ มุมความเอียงที่ตั้งไว้เมื่อเทียบแนวตั้งเท่ากับ 90 องศา (Vertex Angles From 90 Degrees) สำหรับเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral) และ 60 องศา สำหรับเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม (Triangles) การโค้งงอของระนาบเกิดขึ้นเมื่อระนาบของโหนดทั้งหมดแบบ 3 มิติ หรือ โหนดไม่อยู่ในระนาบที่เหมือนกัน หรือ เมื่อโหนดใดโหนดหนึ่งออกนอกระนาบเดียวกันกับโหนดตัวอื่น การเปลี่ยนแปลง (Transitioning) การเปลี่ยนแปลงมี 2 ประเภทคือ การเปลี่ยนแปลงด้านความหนาแน่นโดยความหนาแน่นเอียงไปด้านใดด้านหนึ่งมาก ดังรูปที่ 2.23 และ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามขวางในระนาบแนวราบ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.32 กลุ่มของเอลิเมนต์ที่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง (A Biased Mesh)



รูปที่ 2.33 การเปลี่ยนแปลงกลุ่มของเอลิเมนต์ (A Transition Mesh)

เงื่อนไขขอบเขตเบื้องต้น (Boundary Conditions, Initial Conditions)

กระบวนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดการประยุกต์ใช้แบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับการดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ของโปรแกรม MSC. Marc Mentat มีดังต่อไปนี้

1. ขอบเขตในโปรแกรม MSC. Marc Mentat

- ในทางเชิงกล (Mechanical)
- อุณหภูมิ (Thermal)
- หน่วยวัดของพลังงาน (Joule)
- เกี่ยวกับเสียง (Acoustic)
- ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic)
- พลังงาน (Magnetostatic)
- แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic)

ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับของการวิเคราะห์โดยเงื่อนไขขอบเขตต้องมาจากในกลุ่มหนึ่งประเภทดังที่แสดงข้างต้นไว้แต่อยู่ในกฎเกณฑ์ที่วิเคราะห์ควบคู่กัน ดังเช่น การวิเคราะห์เชิงกล และอุณหภูมิควบคู่กัน ซึ่งตัวอย่างของเงื่อนไขสภาพขอบเขตที่สามารถพบได้ในทางเชิงกลมีดังนี้

1. ขอบเขตเงื่อนไขเชิงกล

- กำหนดการตายตัวของการเคลื่อนที่ (Fixed Displacement)
- กำหนดความเร็วความเร่ง (Acceleration)
- จุดของภาระที่กระทำ (Point Load)
- ขอบ จุดสิ้นสุดของภาระกระทำ (Edge Load)
- ผิวนอกที่รับภาระกระทำ (Face Load)
- แรงดึงดูด (Global Load)
- แรงเหวี่ยง (Centrifugal Load)

- สัมประสิทธิ์ของไหล หรือ แรงต้านการไหล (Fluid Drag)
- ขอบของโครงสร้าง (Edge Foundation)
- ผิวหน้าของโครงสร้าง (Face Foundation)
- สภาพการณ์ของตัวแปรที่แปรปรวน แปรผันได้ (Variable)
- อุณหภูมิโหนด (Nodal Temperature)
- การยกเว้นโหนด (Release Nodes)

ข้อกำหนดของเงื่อนไขขอบเขต และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องพร้อมกับตำแหน่งที่มีการจัดกลุ่มบนเมนูการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตถือเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของคำถาม ประยุกต์อะไร ประยุกต์ที่ไหน และประยุกต์เมื่อไหร่

2.3.8 สมบัติของวัสดุ และเรขาคณิต (Material and Geometric Properties)

ความจริงทั้งหมดที่สำคัญจำเป็นต่อการวิเคราะห์คือข้อมูลวัสดุ ซึ่งการป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรม MSC. Marc Mentat หรือ ที่มีบันทึกอยู่ใน โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลวัสดุจะมีดังนี้

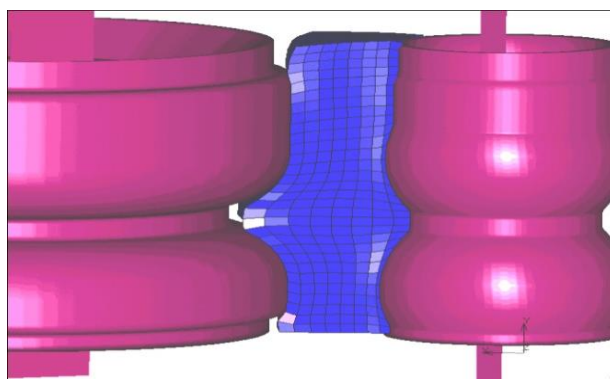
1. ข้อมูลวัสดุ

- เป็นวัตถุไอโซโทรปิก (Isotropic) คือมีสมบัติอีลาสติกเท่ากันทุกทิศทาง
- (Linear Orthotropic Elastic) เรียกว่าแบบจำลองมาตรฐาน และโครงสร้างใย
- (Anisotropic) คือ การแตกหักทางกลไม่เหมือนกันทุกทิศทางของวัสดุ
- วัสดุที่มีสมบัติเป็นยาง (Hypoelastic)
- ความหนืด (Mooney)
- โฟม (Foam)
- การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)
- ความร้อนโดยความต้านทานไฟฟ้า (Joule Heating)

เพิ่มเติมสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาบางอย่างต้องมีการวิเคราะห์ควบคู่กันกับสมบัติวัสดุที่ต่างกัน ซึ่งต้องนำมาวิเคราะห์รวมกันเช่น การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนกับกลไกทางกล

2.3.9 การสัมผัส (Contact)

ความสามารถในการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพมากในโปรแกรม MSC. Marc Mentat คือการสัมผัสติดต่อเชื่อมโยงโดยอัตโนมัติ เงื่อนไขขอบเขตของโหนด และกลุ่มของเอลิเมนต์จะได้รับการพิจารณาเมื่อการวิเคราะห์ต้องการมัน โดยเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้จะเป็นการดัดแปลงโดยอัตโนมัติ ซึ่งความสามารถทั้งหมดนี้จะช่วยสนับสนุนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม ดังเช่น ปัญหาความเสียดทาน การกด (Rigid Body) และ อุณหภูมิที่สัมผัส ซึ่งความหมายในโปรแกรมมีดังนี้



รูปที่ 2.34 การสัมผัสของผิวชิ้นงาน และแม่พิมพ์ (Contact)

1. (Contact Bodies) วัตถุรูปร่างสัมผัส คือการกำหนดการสัมผัสของรูปร่างวัตถุ การกำหนดสมบัติของผิวที่สัมผัส การกำหนดแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิว และตามด้วยผลยืนยันทางกราฟฟิกส์ถ้ารูปร่างผิวที่สัมผัสมีความถูกต้อง

2. การตรวจสอบผิวสัมผัสอย่างใดอย่างหนึ่งภายนอก (Contact Tables) เช่น การตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายใน การตรวจสอบแดกร้าวเฉพาะที่ และการตรวจสอบการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งเรียกการติดต่อประเภทนี้ว่าการติดต่อบางกราว (Glue Contact)

3. พื้นที่สัมผัส (Contact Areas) คือการสัมผัสของพื้นที่เฉพาะพื้นที่ซึ่งเป็นพื้นที่ย่อยๆ ร่วมกัน (Subset) ของโหนด เพื่อทำการตรวจสอบ

เกณฑ์ทั่วไปในการพิจารณาการสัมผัส (General Consideration in Contact) ในการใช้งาน มีดังนี้ ใช้สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นที่ขนาดกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ที่มีความใหญ่ และมีการติดต่อกันหลายผิวสัมผัส และในวัสดุที่ไม่มีความยืดหยุ่น

2.3.10 การตีความผลลัพธ์ (Results Interpretation)

เมื่อคุณเสร็จสิ้นการวิเคราะห์ คุณจำเป็นต้องวิเคราะห์ผลลัพธ์ และตรวจสอบหลักเกณฑ์สำหรับการยอมรับ ผลการวิเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นจะถูกบันทึกไว้ในแฟ้มตามลำดับ ซึ่งมีขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน เพื่อเข้าใช้ผลลัพธ์ดังนี้

1. ขั้นตอนแรกเปิดไฟล์ผลลัพธ์
2. เลือกข้อมูลที่ต้องการ
3. เลือกเทคนิคการแสดงผลที่เหมาะสม

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่แสดงไว้ในขั้นตอนกระบวนการนำเสนอผลลัพธ์ โดยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วการเข้าถึงผลลัพธ์นั้นสามารถทำได้โดยการเลือกคำสั่ง เปิด (Open) ถัดไป (Next)

ข้าม (Skip) วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะเกี่ยวข้องกับรูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ และผลจะขึ้นอยู่กับลักษณะของโหนด อีกทั้งการบูรณาการของเอลิเมนต์ ข้อมูลของโหนดเป็นเวกเตอร์ที่ค่าองศาอิสระ

สเกลาร์ (Scalar Plots) ข้อมูลแบบสเกลาร์อาจแสดงได้ดังกราฟ โดยสามารถแสดงออกเป็นแถบ เส้น รูปร่างสัญลักษณ์ ฯลฯ

เวกเตอร์ (Vector Plots) ข้อมูลเวกเตอร์อาจจะแสดงเป็นกราฟตามลูกศรที่ปรากฏที่โหนด

เทนเซอร์ (Tensor) ข้อมูลแบบเทนเซอร์จะแสดงกราฟตามลูกศรที่ปรากฏในเซนทรอยด์ (Centroid) ของเอลิเมนต์

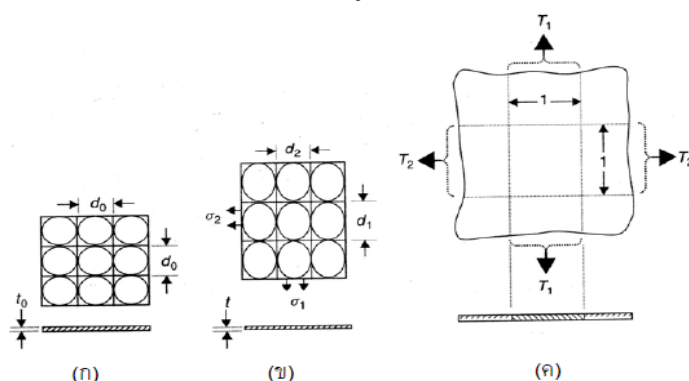
รูปร่างที่ผิดปกติ (Deformed Shape Plots) ซึ่งเกิดจากรูปร่างของกลุ่มของเอลิเมนต์ (Mesh) ที่ผิดปกติ หรือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโหนด [26]

2.4 กริด (Grid)

การคำนวณหาความเครียดตามแบบกริด (Grid Pattern) จะทำการสร้างโดยการกักรัด และปล่อยกระแสไฟฟ้าที่บริเวณส่วนที่เป็นพื้นผิวหน้าของโลหะเพื่อให้เกิดแถวเรียงต่อกันเป็นพื้นที่ของจุดทดสอบ ซึ่งกริดนั้นต้องมีความถูกต้องแม่นยำก่อนที่จะขึ้นรูปโลหะให้เป็นรูปร่างสุดท้ายโดยใช้แรงขึ้นรูป ซึ่งกริดที่ใช้สร้างบนชิ้นงานโลหะทั่วไปจะมีรูปแบบ สี่เหลี่ยม วงกลม วงรี และวงกลมผสมกับสี่เหลี่ยม (Combination) และกริดที่เป็นรูปร่างต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปหลังจากทำการขึ้นรูปโลหะ

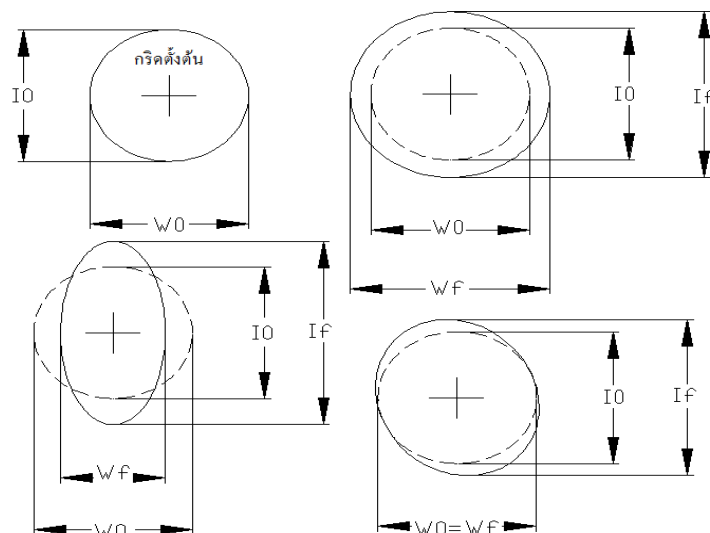
2.4.1 การเปลี่ยนรูปของโลหะในระนาบความเค้น (Deformation of Metal in Plane Stress)

ในขณะที่มีการเปลี่ยนรูปบนระนาบความเค้น (Plane Stress) ของวัสดุซึ่งกำลังประยุกต์ใช้กับทฤษฎีสัดส่วนการเปลี่ยนรูปในรูปที่ 2.35 ลักษณะที่ยังไม่มีการเปลี่ยนรูปที่ความหนา t_0 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d_0 หรือตารางขนาด d_0 แสดงในรูปที่ 2.35 (ก) ดังนั้นในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างวงกลมจะเปลี่ยนไปเป็นวงรีแกนหลัก (Major) คือ d_1 แกนรอง (Minor) คือ d_2 ถ้าปรับตารางสี่เหลี่ยมให้เข้ากับทิศทางหลักของกริดวงกลม จะกลายเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังรูปที่ 2.35 (ข) ส่วนความหนา คือ t ตามที่กรณีแสดงดังรูปที่ 2.35 (ค) ความเค้นที่ทำให้เปลี่ยนรูปคือ σ_1 และ σ_2



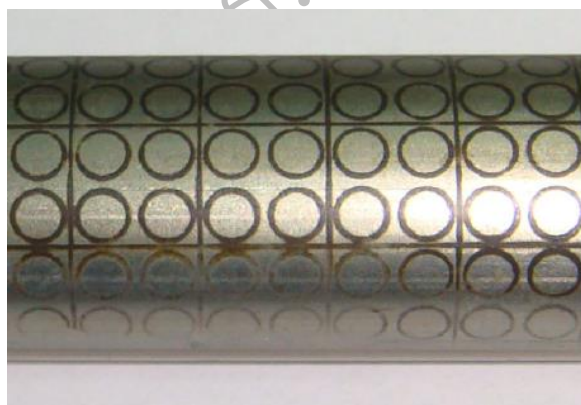
รูปที่ 2.35 กริดวงกลมบนโลหะแผ่นขณะที่ยังไม่เปลี่ยนรูปและเปลี่ยนรูป

การเปลี่ยนรูปร่างไปของกริดอาจมีรูปร่างหลายลักษณะนอกเหนือจากวงรี อาทิเช่น กริดวงกลมใหม่อาจจะใหญ่กว่าวงกลมเดิม หรือเกิดการเอียงกันระหว่างกริดเดิมกับกริดใหม่ โดยกริดจะเปลี่ยนรูปหลังจากการขึ้นรูปโลหะแล้ว ซึ่งสามารถยกตัวอย่างในการเปลี่ยนรูปร่างของกริด ได้ดังนี้



รูปที่ 2.36 แบบกริดที่เปลี่ยนไปจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับโลหะแผ่น

ซึ่งในงานวิจัยเล่มนี้จะใช้กริดวงกลมที่มีความกว้าง 2.5 มิลลิเมตร และความยาว 2.5 มิลลิเมตร หรือ เรียกอีกอย่างว่าเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นกริดแบบวงกลมผสมกับสี่เหลี่ยม (Combination) คือมีสี่เหลี่ยมล้อมรอบกริดวงกลมสี่วง ซึ่งรูปร่างของกริดได้ดังรูปที่ 2.37

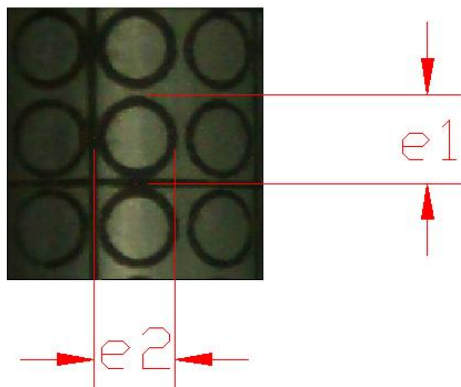


รูปที่ 2.37 กริดแบบวงกลมผสมสี่เหลี่ยม (Combination)

2.4.2 การคำนวณความเครียดหลักที่สัมพันธ์กับความเครียดรอง [29]

การคำนวณหาความเครียดหลัก (Major Strain) แทนด้วยสัญลักษณ์ (e_1) และความเครียดรอง (Minor Strain) แทนด้วยสัญลักษณ์ (e_2) ต้องทำการเลือกบริเวณที่กริดเกิดการเปลี่ยนรูป และทำการ

วัดหาขนาดความกว้าง ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของกริดหลังจากการขึ้นรูป หรือนำขนาดของกริดวงกลมหลังจากการขึ้นรูปมาหักลบออกด้วยขนาดของกริดวงกลมก่อนการขึ้นรูปก็ได้ ซึ่งสมการความเครียดหลัก และความเครียดรองดังสมการที่ 2.4 และ สมการที่ 2.5 และการวัดขนาด กริดดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 การวัดความเครียดหลัก (e_1) ความเครียดรอง (e_2)

$$\text{ความเครียดหลัก } (e_1) \% = [(L_f - L_0) \times 100] / L_0 \quad (2.4)$$

$$\text{ความเครียดรอง } (e_2) \% = [(W_f - W_0) \times 100] / W_0 \quad (2.5)$$

เมื่อ L = ความยาว (Length)
 W = ความกว้าง (Width)
 0 = จุดเริ่มต้น
 f = จุดสุดท้าย

นอกจากค่าความเครียดหลัก และความเครียดรองแล้ว ยังใช้ในการคำนวณหาความเค้น (Stress) สามารถใช้กฎของฮุกส์ (Hooke's Law) มาช่วยในการคำนวณหาความเค้นได้เนื่องจากในช่วงแรกของการทดสอบการคัดโลหะ แรงดึง (Tensile) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเป็นสัดส่วนกับความยืด ซึ่งสามารถแสดงสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma = E \times e_t \quad (2.6)$$

เมื่อ σ = ความเค้น (Stress)
 E = โมดูลัสยืดหยุ่น หรือ โมดูลัสของยัง (Young's Modulus)
 e_t = ความเครียดหลัก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยจะทำการศึกษาอิทธิพลในการตัดเฉือนเพื่อลดครีบ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

3.1 วัสดุและชิ้นงานและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

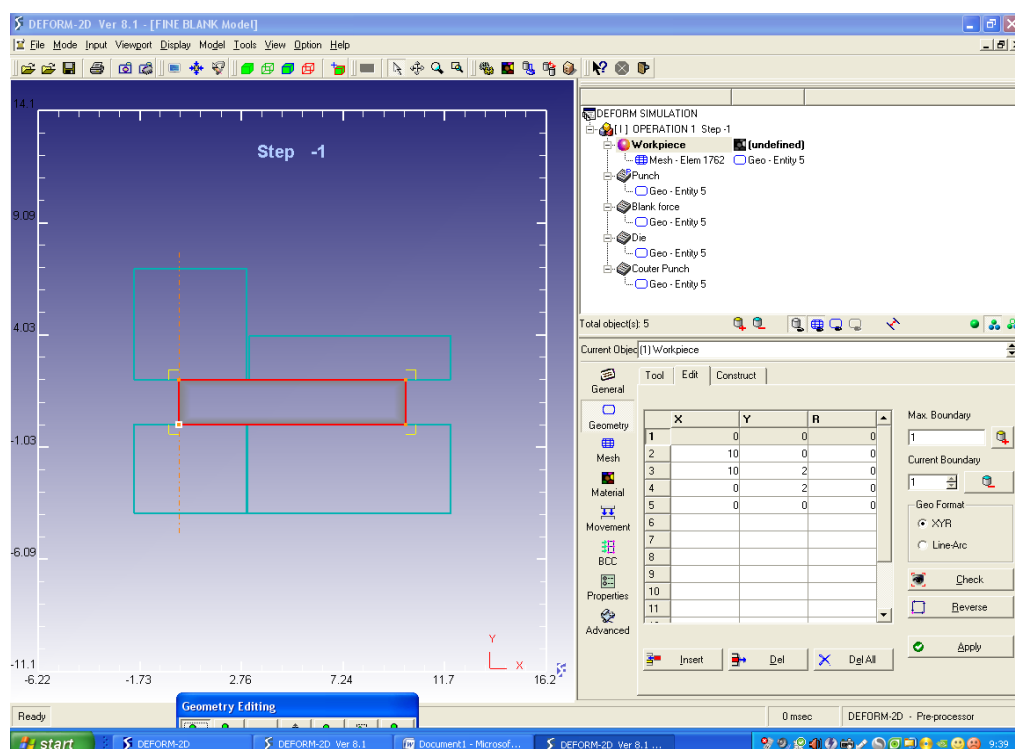
การดำเนินการจำลองสภาวะการขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวัสดุชิ้นงานเป็นเหล็ก SUS 304 มีส่วนผสมทางเคมีดังนี้ Carbon (C) $\leq 0.08\%$,Silicon (Si) $\leq 1.00\%$,Manganese (Mn) $\leq 2\%$,Phosphorus (P) $\leq 0.045\%$,Sulphur (S) $\leq 0.030\%$,Nickel (Ni) $\leq 8-10.5\%$ และ Chromium (Cr) $\leq 18.00-20.00\%$ ส่วนคุณสมบัติทางกลของเหล็ก SUS 304 จะมีค่า ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุ

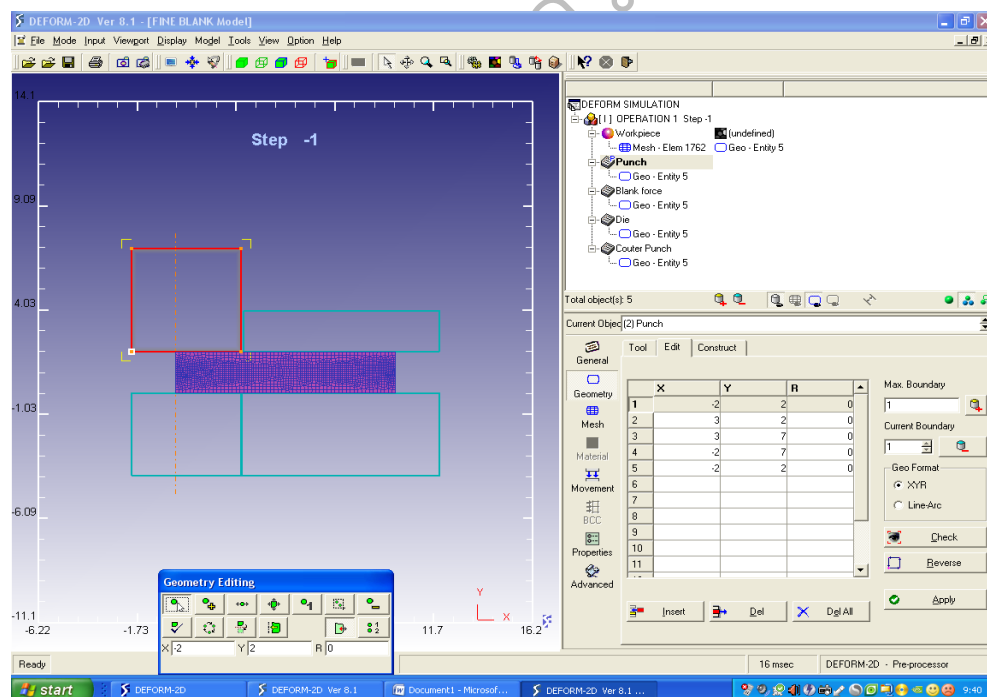
SUS304 (Stainless steel)	Mechanical Properties
Tensile Strength, Ultimate (MPa.)	520
Tensile Strength, Yield (MPa.)	240
ค่าความแข็งModulus of Elasticity (GPa.)	190
Poisson's Ratio	0.27- 0.30
Power law	$654\varepsilon^{0.28}$
ค่าความแข็ง	88 HB

3.2 การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

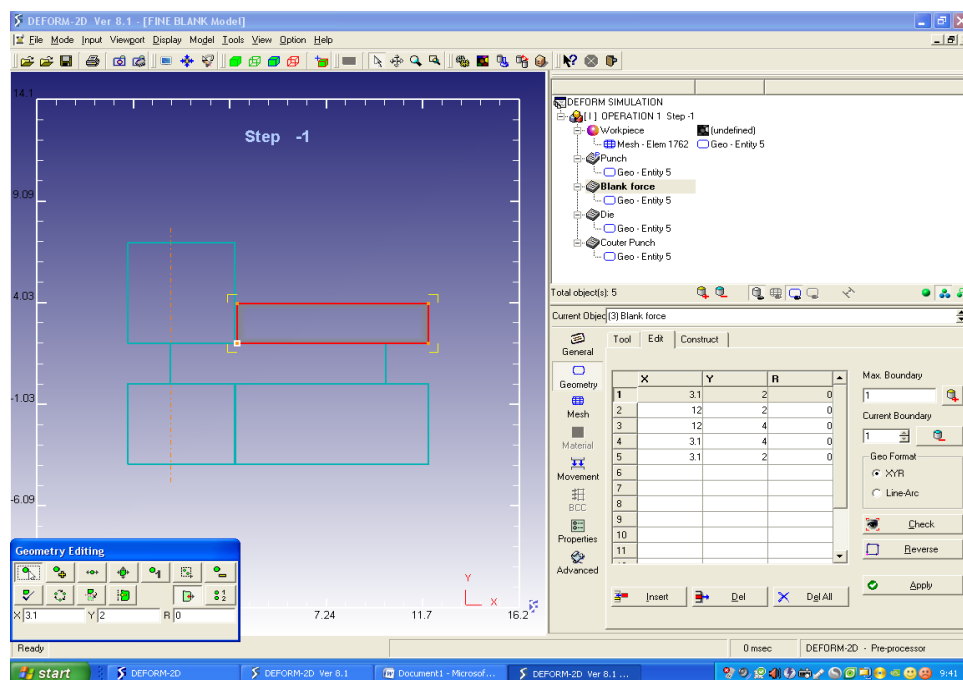
ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์



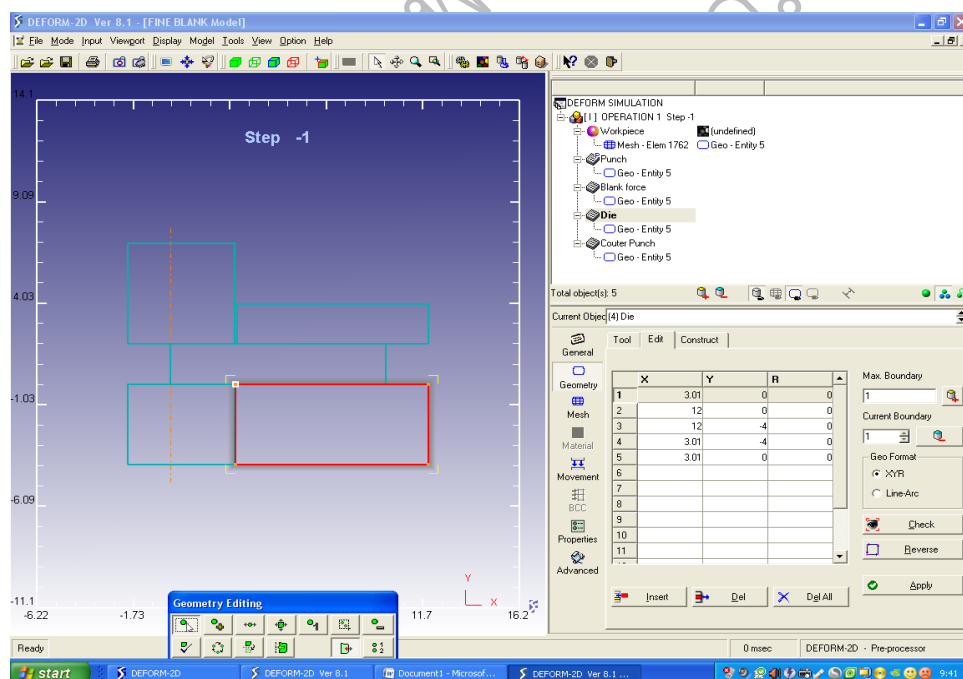
รูปที่ 3.1 สร้างแบบจำลองของวัสดุชิ้นงาน



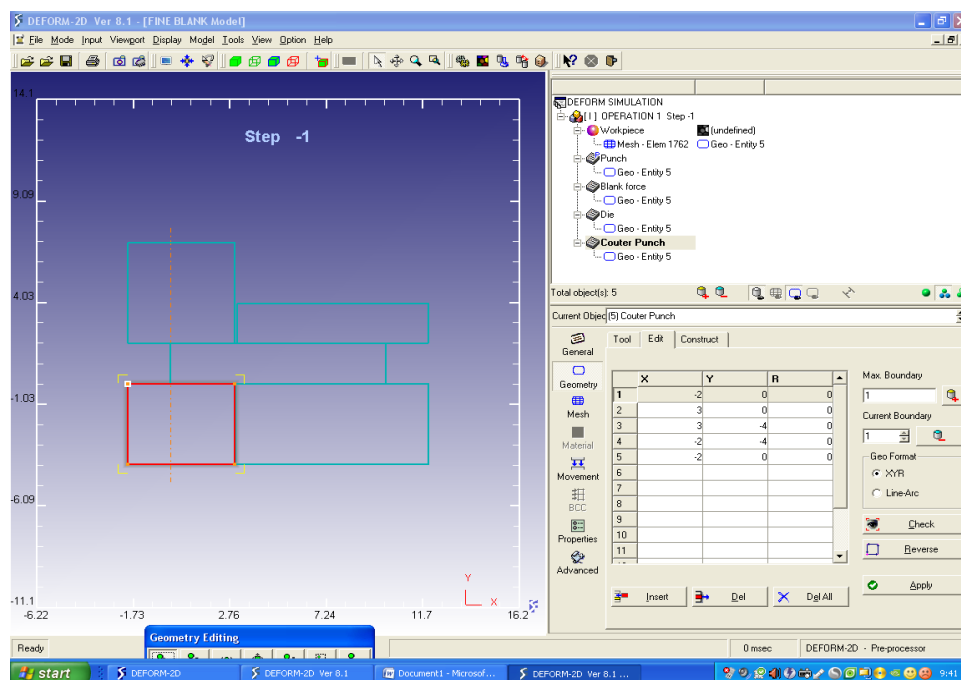
รูปที่ 3.2 สร้างแบบจำลอง PUNCH



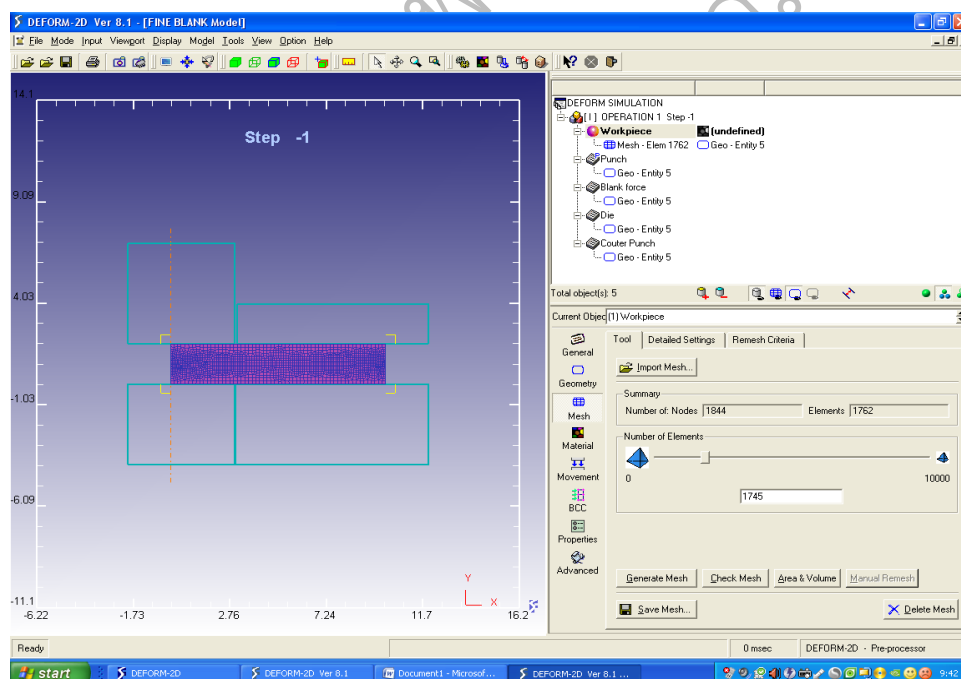
รูปที่ 3.3 สร้างแบบจำลอง BLANK HOLDER



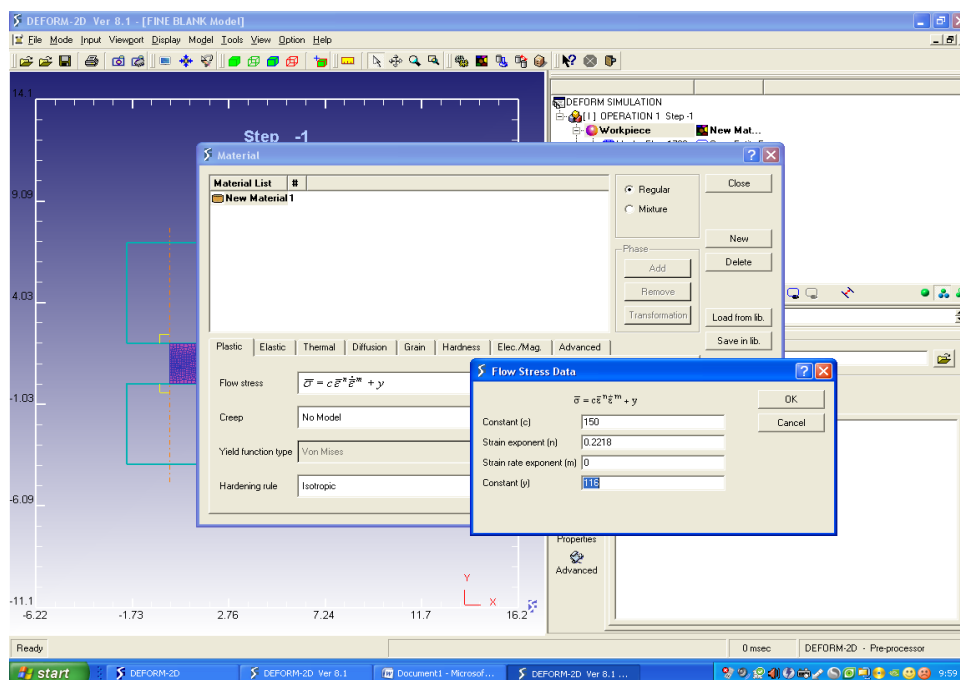
รูปที่ 3.4 สร้างแบบจำลอง DIE



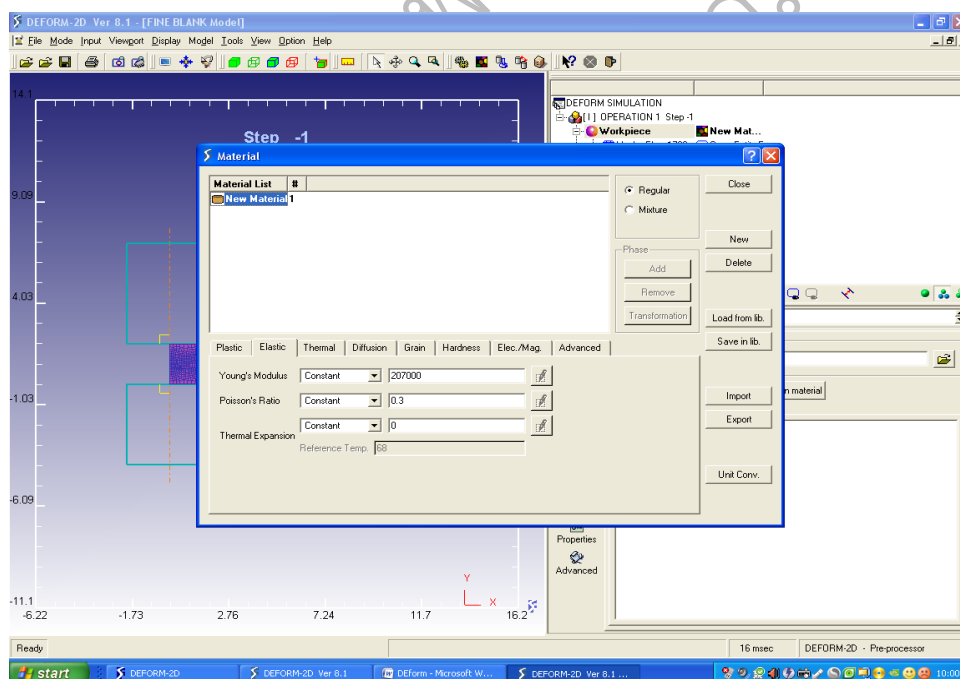
รูปที่ 3.5 สร้างแบบจำลอง COUNTER PUNCH



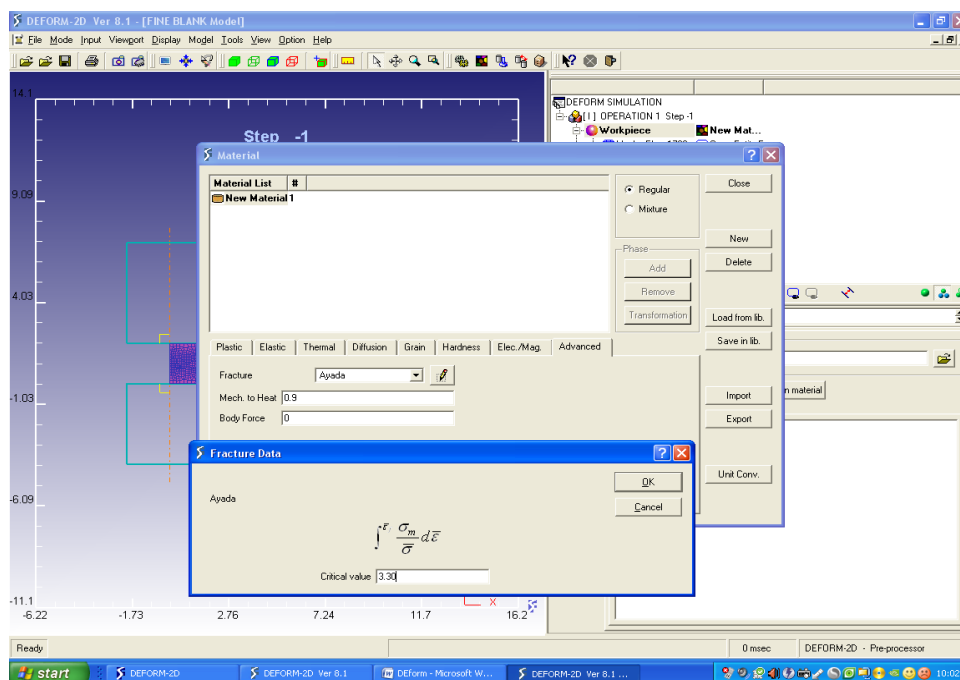
รูปที่ 3.6 สร้าง MESH ของชิ้นงาน



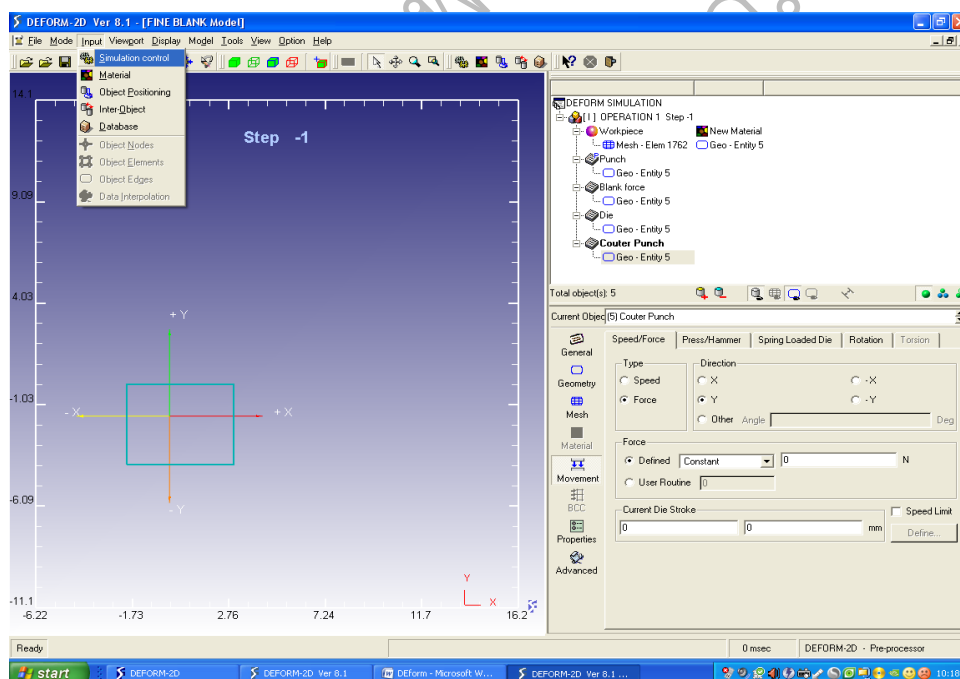
รูปที่ 3.7 กำหนดสมบัติของชิ้นงาน



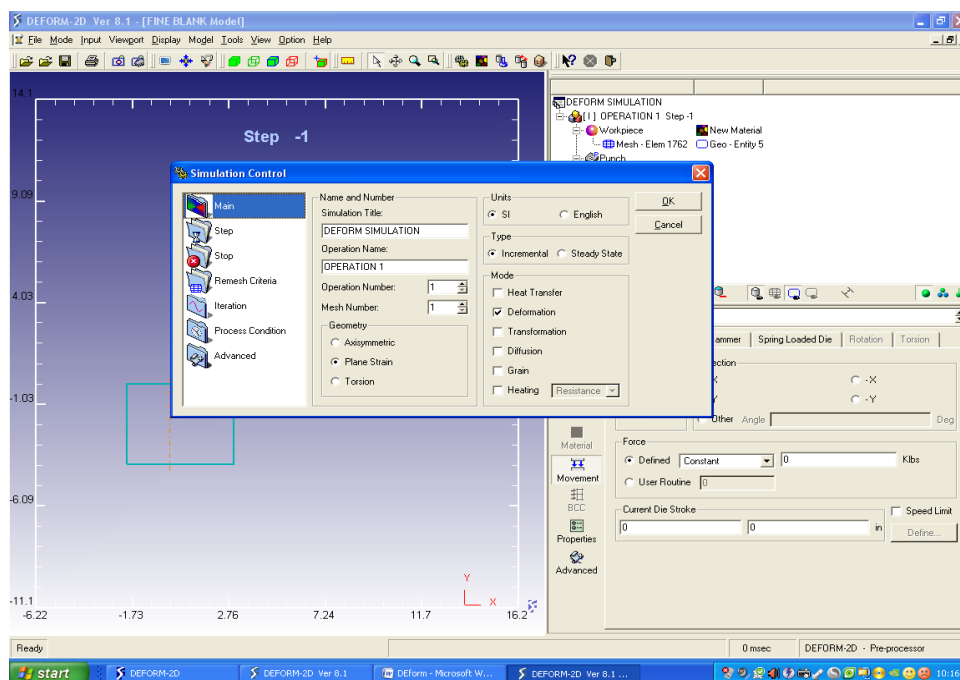
รูปที่ 3.8 กำหนดสมบัติของชิ้นงาน ในช่วงอีลาสติก



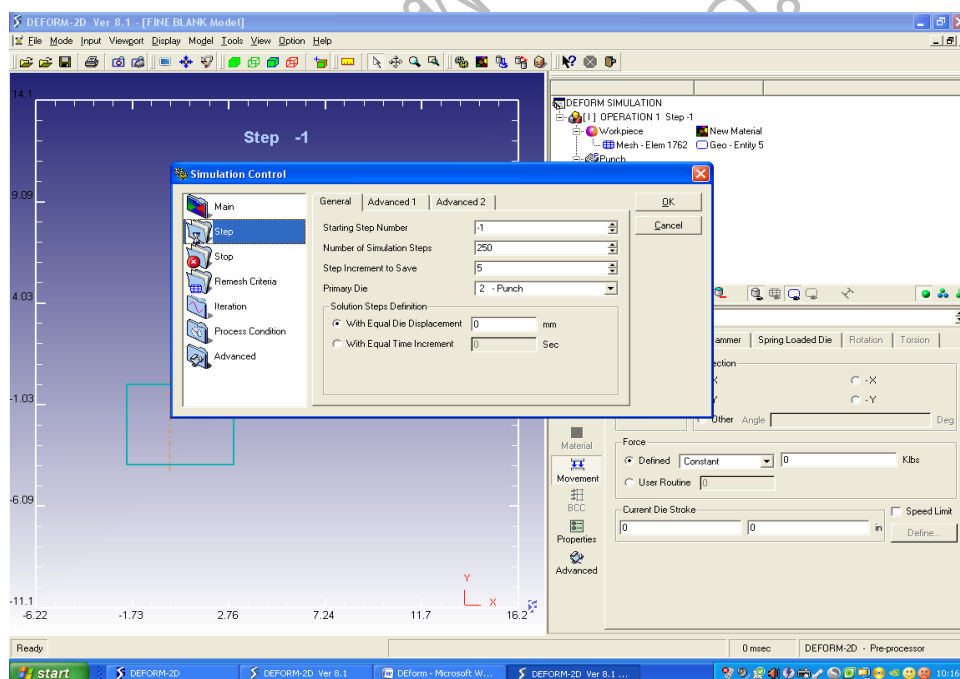
รูปที่ 3.9 เลือกสมการการแตกหัก



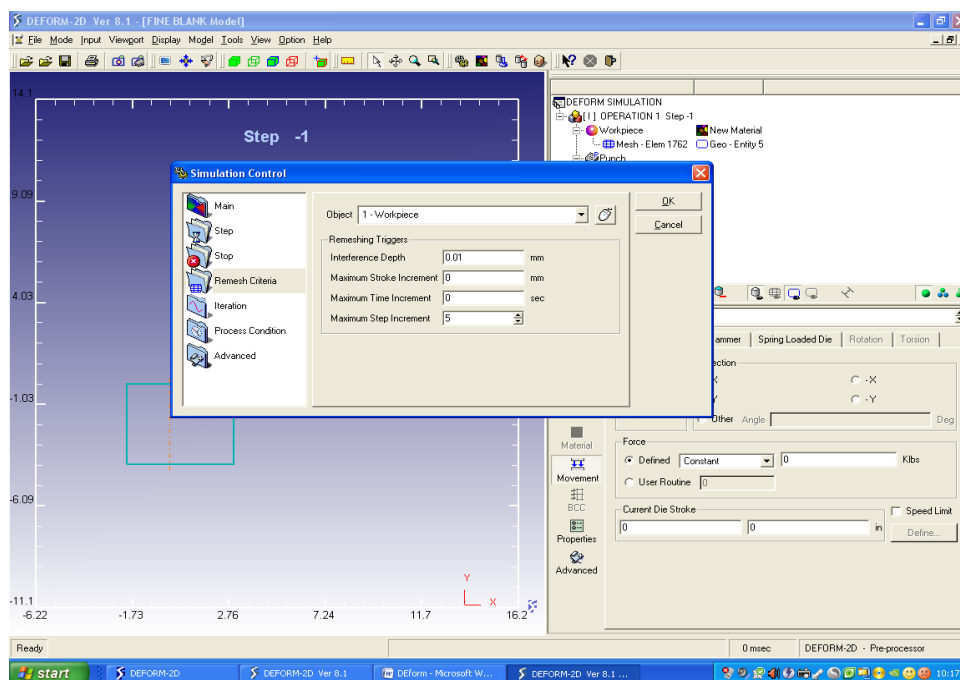
รูปที่ 3.10 ตั้งค่าการควบคุมของโปรแกรม ขั้น 1



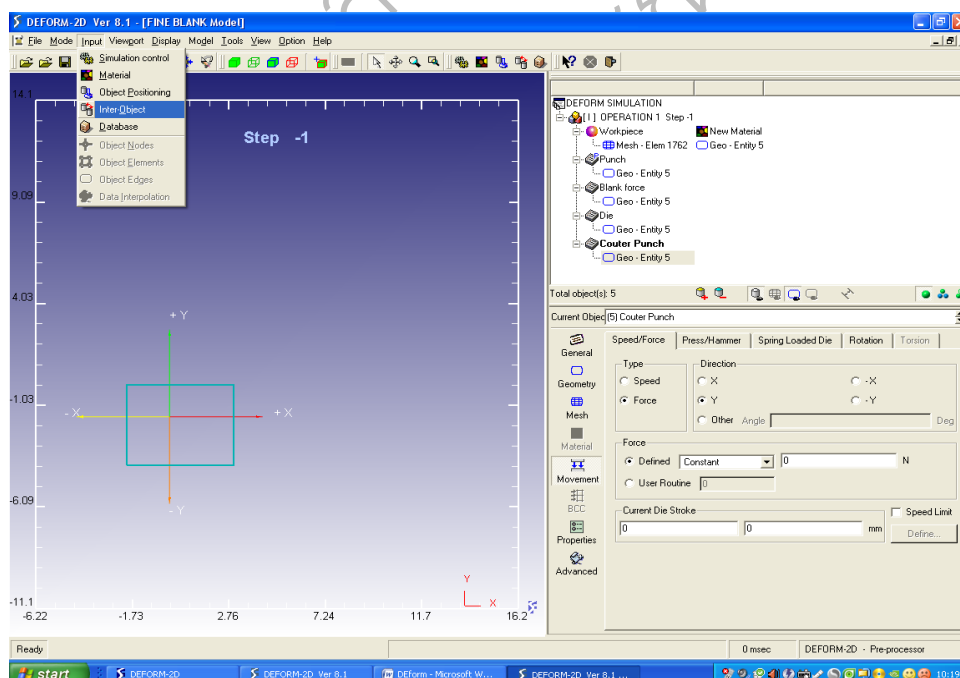
รูปที่ 3.11 ตั้งค่าการควบคุมของโปรแกรม ขั้น 2



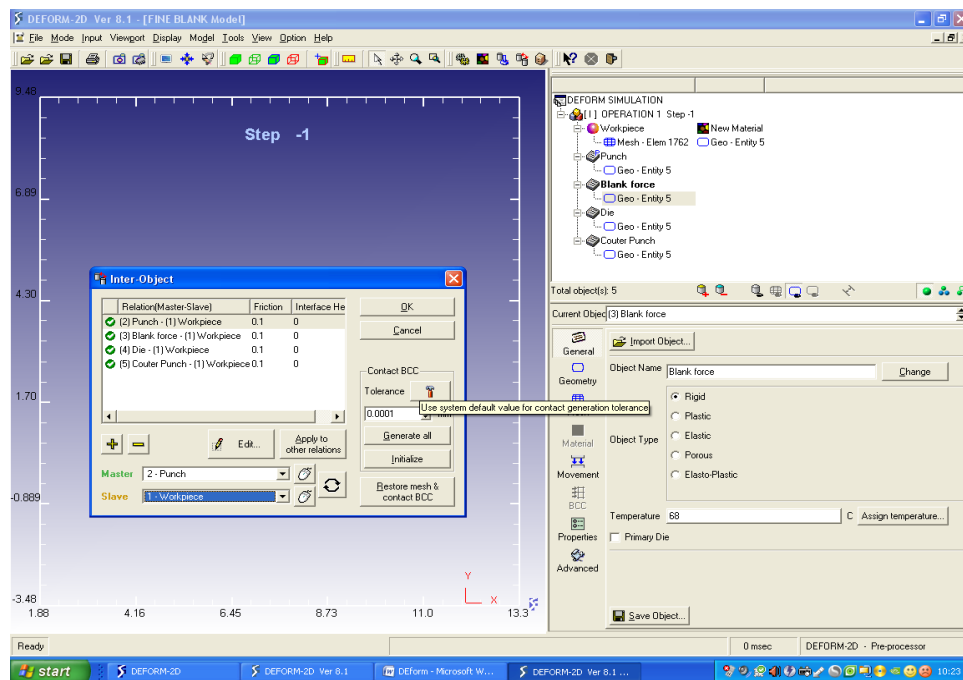
รูปที่ 3.12 ตั้งค่าการควบคุมของโปรแกรม ขั้น 3



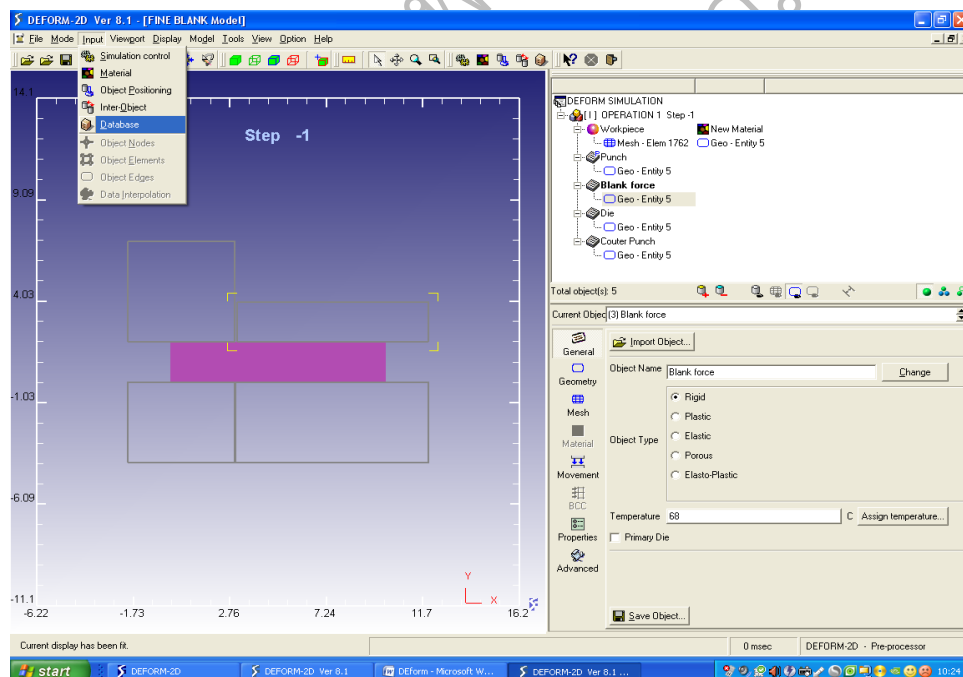
รูปที่ 3.13 ตั้งค่าการควบคุมของโปรแกรม ขั้น 4



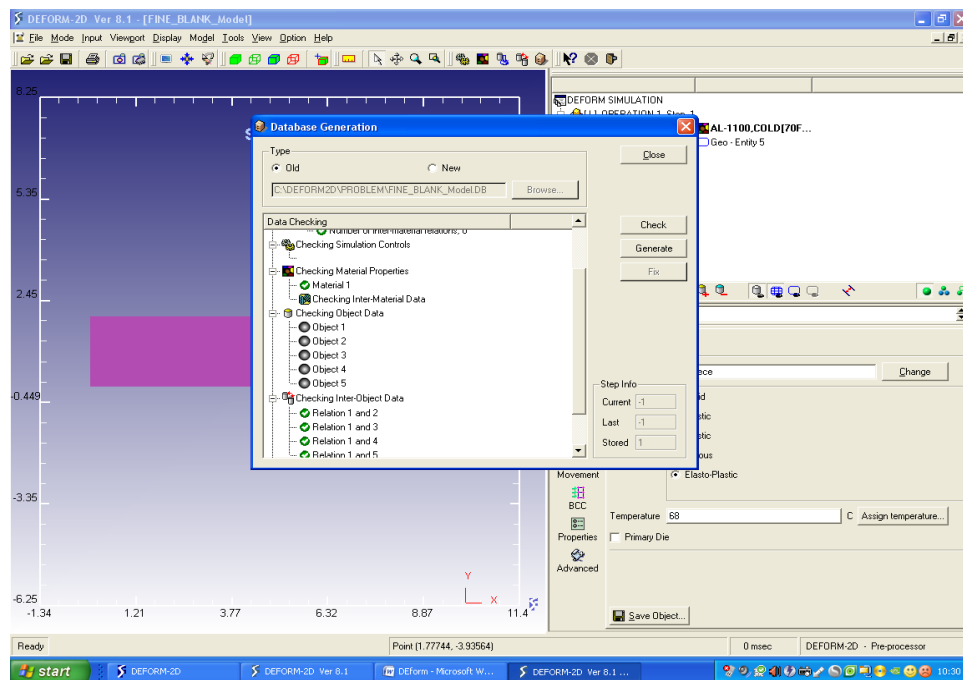
รูปที่ 3.14 ตั้งค่าการควบคุมของโปรแกรม ขั้น 5



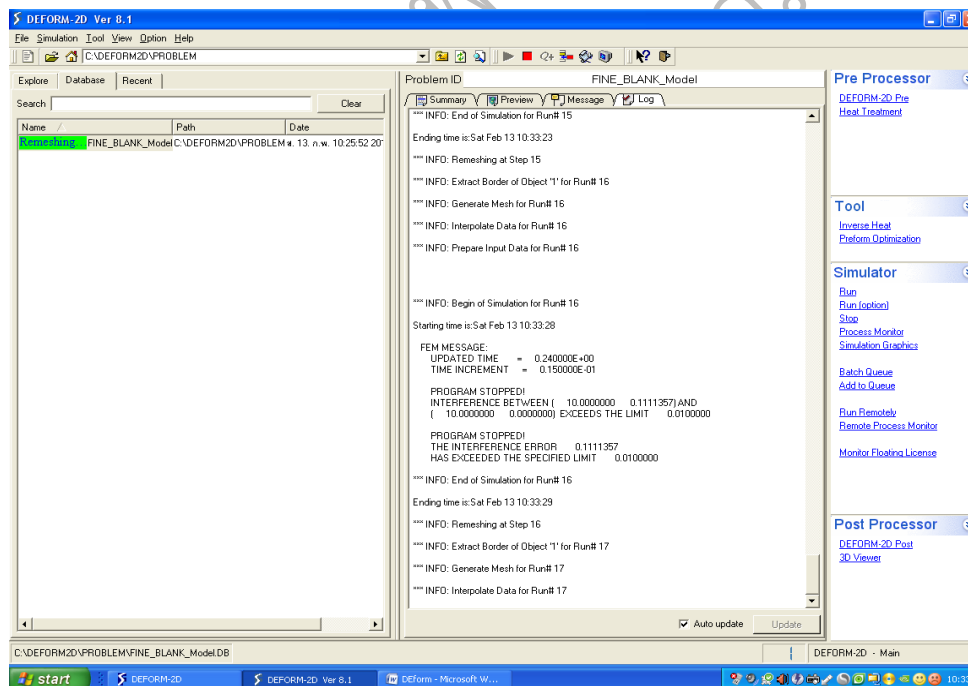
รูปที่ 3.15 กำหนดค่า Inter object



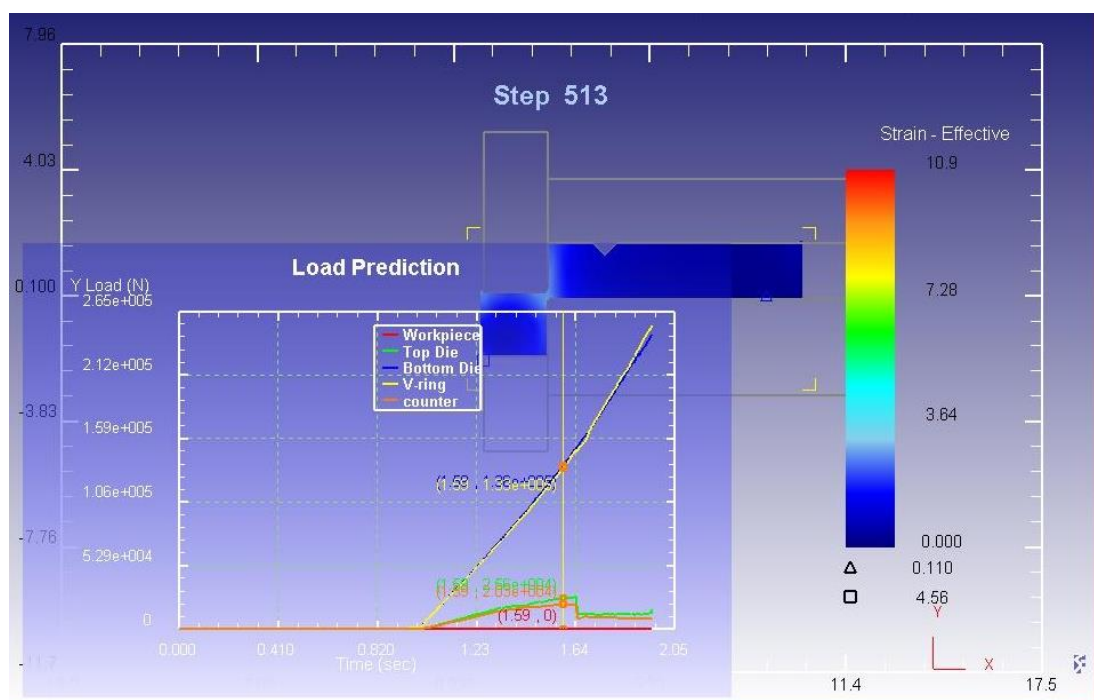
รูปที่ 3.16 ตั้งค่า Generate



รูปที่ 3.17 ค่า Generate ผ่าน



รูปที่ 3.18 คอมพิวเตอร์ประมวลผล



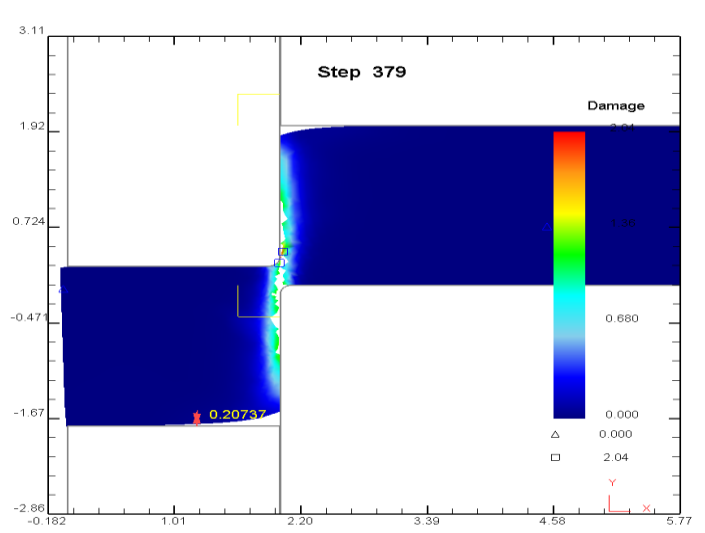
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 4

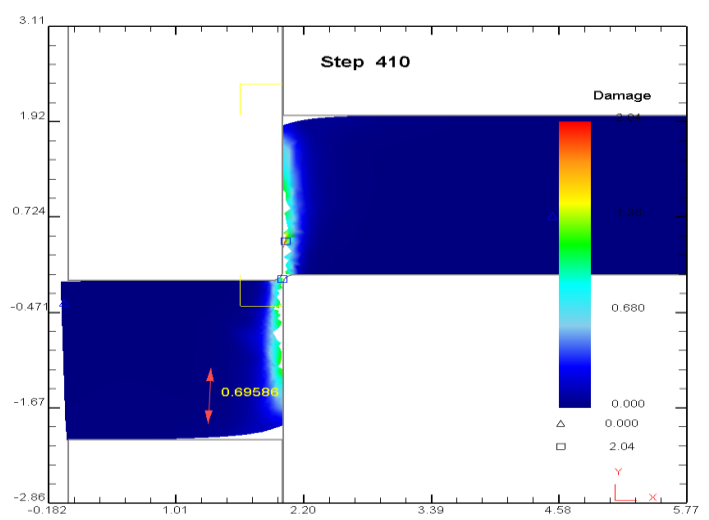
ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษากรรมวิธีการตัดเฉือนโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการกำหนดชิ้นงานทำจากวัสดุ SUS304 ความหนา 1.5 mm. กำหนดค่า Clearances ไม่เกิน 5% ของความหนาชิ้นงาน สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน และแสดงผลการการตรวจสอบคุณภาพรอยตัดเฉือนดังต่อไปนี้

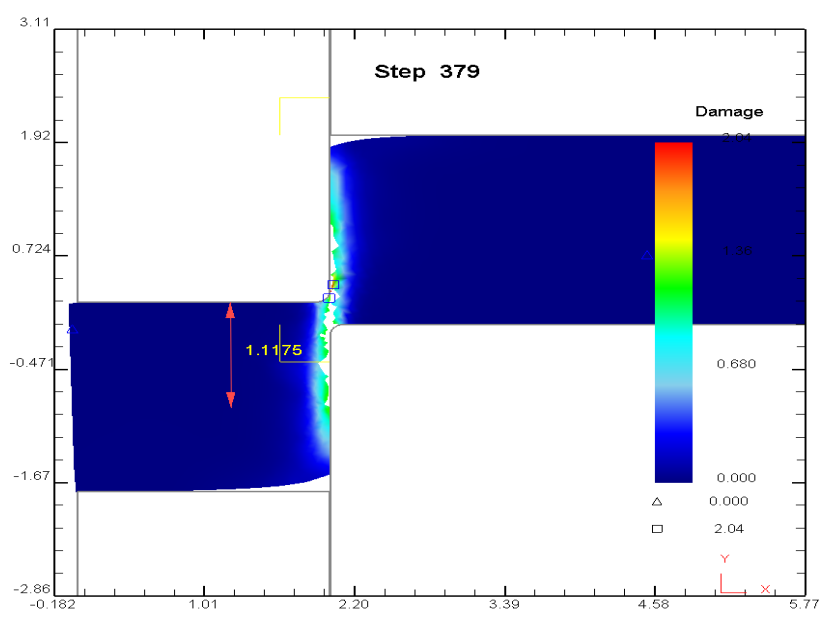
4.1 ผลการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ



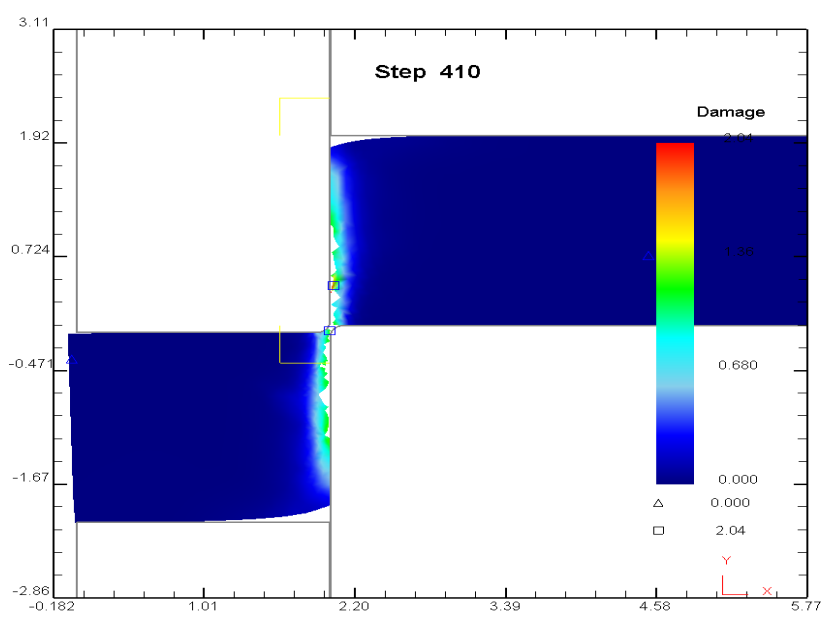
รูปที่ 4.1 ส่วนโค้งมนที่ได้จากการตัดเฉือนอย่างง่าย



รูปที่ 4.2 รอยตัดเฉือนที่ได้จากการตัดเฉือนอย่างง่าย



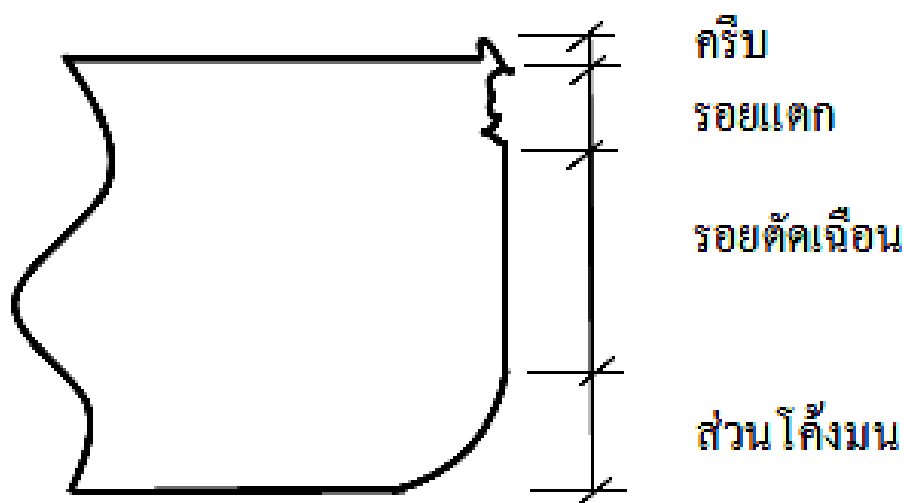
รูปที่ 4.3 รอยแตกที่ได้จากการตัดเฉือนอย่างง่าย



รูปที่ 4.4 ครีบที่ได้จากการตัดเฉือนอย่างง่าย

4.2 ผลการตรวจสอบคุณภาพของการตัดเฉือนจริง

จากรอยตัดเฉือนที่ได้จากการไฟไนท์เอลิเมนต์ สามารถแสดงผลการตรวจสอบคุณภาพรอยตัดเฉือน และแสดงผลการวัดได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.5 รูปแสดงการวิเคราะห์คุณภาพรอยตัดเฉือน

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองด้วยวิธีทางไฟฟ้าในต่เหล็ก

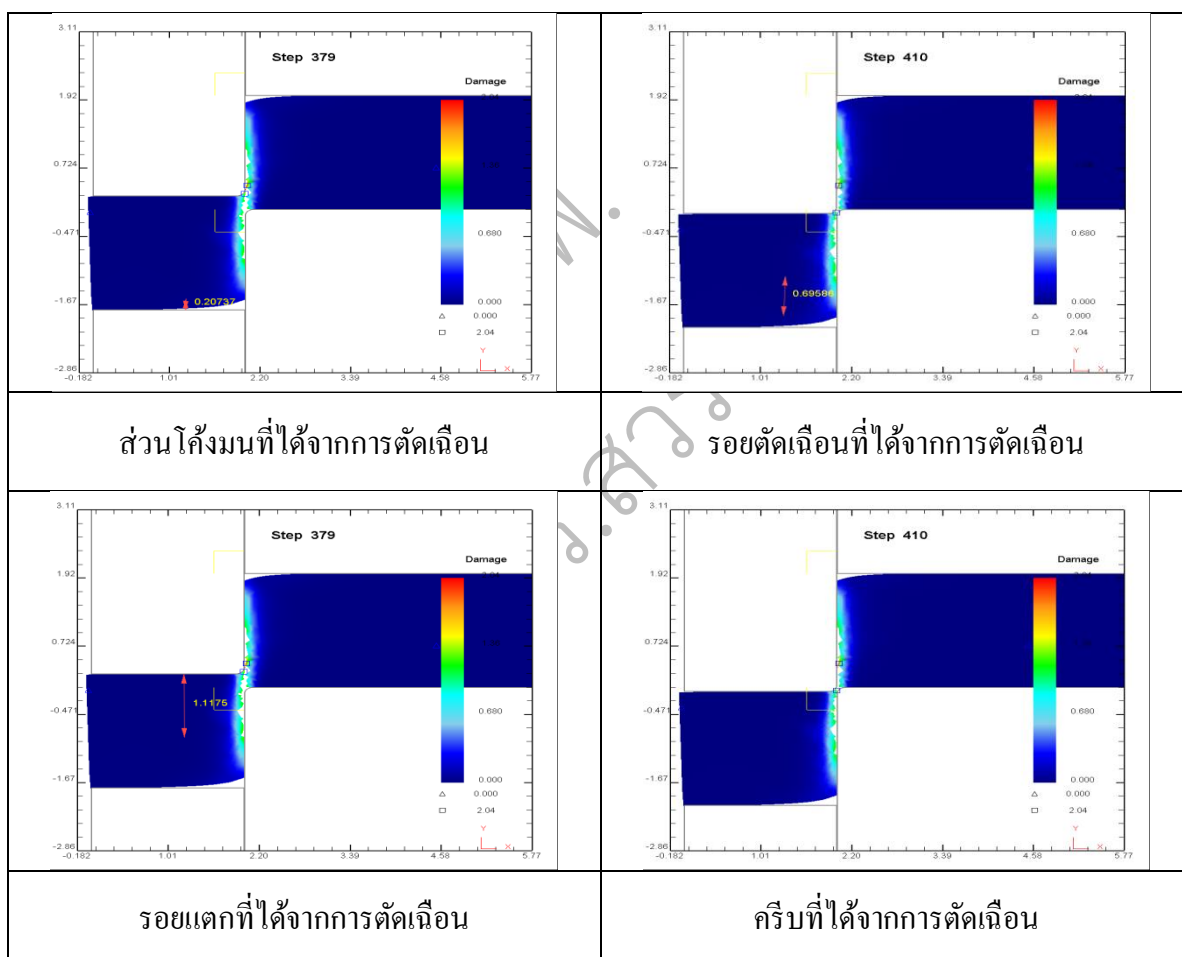
ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากการตัดเฉือน	ผลการวัด (มิลลิเมตร)
ส่วนโค้งมน	0.207
รอยตัดเฉือน	0.699
รอยแตก	1.175
คีรีบ	0.143
เฉลี่ยความสูงของชิ้นงานไม่รวมคีรีบ	2.077

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการวิจัย โดยการกำหนดชิ้นงานทำจากวัสดุ SUS304 ความหนา 1.5 mm. กำหนดค่า Clearances ไม่เกิน 5% ของความหนาชิ้นงาน โดยการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยกรรมวิธีการตัดเฉือน สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ความเครียดประสิทธิผลที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน และแสดงผลการตรวจสอบคุณภาพรอยตัดเฉือน ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการจำลองด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ



จากรูปการจำลองการตัดเฉือนด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ ปรากฏว่าชิ้นงานนี้สามารถทำการป้อนตัดเฉือนได้โดยไม่ก่อให้เกิดการเสียหายกับผิวขอบด้านข้างของชิ้นงาน และนำไปสู่การลดการเกิดครีปของชิ้นงานได้จริง โดยจำลองโอกาสการเกิดครีปที่บริเวณรอยตัดของชิ้นงานก่อนสร้างแม่พิมพ์จริง

5.2 ผลการตรวจสอบคุณภาพของการตัดเฉือนจริง

จากรอยตัดเฉือนที่ได้จากการไฟไนท์เอลิเมนต์ วัสดุ SUS304 ความหนา 1.5 mm. กำหนดค่า Clearances ไม่เกิน 5% ของความหนาชิ้นงาน สามารถแสดงผลการตรวจสอบคุณภาพรอยตัดเฉือน และแสดงผลการวัดอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ คือ ลักษณะขอบชิ้นงานที่ได้จากการตัดเฉือนเกิดส่วนโค้งมน 0.207 มิลลิเมตร, รอยตัดเฉือน 0.699 มิลลิเมตร, รอยแตก 1.1750 มิลลิเมตร และ รอยตัดเฉือน 0.143 มิลลิเมตร โดยเฉลี่ยความสูงของชิ้นงานไม่รวมครีป 2.077 มิลลิเมตร

สวพ.
มทร.สุวรรณภูมิ

เอกสารอ้างอิง

1. จุลศิริ ศรีงามผ่อง, 2539, **วิศวกรรมแม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่นเบื้องต้น**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พิมพ์ครั้งที่ 8.
4. ชาญยุทธ มะกา, 2545, **การศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุทำแม่พิมพ์ที่มีผลต่อการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัด**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 67 – 86.
5. ชาญ ถนัดงาน และคณะ, 2533, **คู่มือการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ราคาถูกลำหรับงานเพรส**, กรุงเทพฯ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, หน้า 45 – 58.
6. วีระศักดิ์ กรชัยเชียร, 2544, **น้ำมันหล่อลื่น**, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 1 – 7.
7. ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ, 2545, **การสึกหรอ**, สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, หน้า 9 – 36, 122 – 123.
8. Lyman, T., 1969, Shaving, **Metals Handbook**, 8 th ed, Vol.4, Ohio, American Society for Metals, p. 43.
9. Schey, J. A., 1984, **Tribology in Metalworking**, The American Society for metals, U.S.A., pp. 1 – 5.
10. Koji, K. and Koshi, K., 1999, “Wear Mechanisms”, **In Modern Tribology Handbook**, McGraw – Hill, New York, pp. 273 – 299.
11. Bowden, F.P. and Tabor, D., 1971, **The Friction and Lubrication of Solids**, Part1, Oxford University Press, London, pp. 245 – 267.
12. Gang Fang, Pan Zeng and Lulian Lou, 2002, “Finite element simulation of effect of clearance on the forming quality metals in blanking”, **Journal of material Technology**, Netherlands.