



## รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การออกแบบและสร้างซัพพอร์ตของเครื่องกลึงสำหรับการซ่อมโรเตอร์ที่หน้างาน  
Design and fabrication of on-site lathe machine supports for rotor  
service

นางสาวญานิกา สุทธิวิวัฒน์

สาขาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการสหกิจศึกษา การออกแบบและสร้างซัพพอร์ทของเครื่องกลึงสำหรับการซ่อมโรเตอร์ที่โรงงาน

ชื่อ – สกุล นักศึกษา นางสาวญานิกา สุทธิวิวัฒน์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ชื่อ – สกุล อาจารย์นิเทศ ผศ.ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์

ชื่อ – สกุล ผู้นิเทศงาน นายดิณภพ พูลเขาล้าน

ชื่อสถานประกอบการ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

## บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้ามีการตรวจสอบสภาพเพื่อการบำรุงรักษาภายในรอบ 2 – 5 ปี โดยขึ้นกับขนาดของโรเตอร์ที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 15 – 120 ตัน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ภายในกังหันแก๊ส และกังหันไอน้ำที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า โรงไฟฟ้าจึงทำการหยุดเดินเครื่องเพื่อซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และขนย้ายอุปกรณ์มาทำการซ่อมบำรุงที่โรงงาน ซึ่งทำให้เสียเวลาและเสียค่าใช้จ่ายเป็นอย่างมาก ดังนั้นทางโรงงานคิดว่าถ้ามีเครื่องจักรที่สามารถทำการซ่อมบำรุงที่โรงไฟฟ้าได้จะเป็นการลดปัญหาในการขนย้าย จึงเป็นที่มาของโครงการนี้ โดยมีจุดประสงค์ในการออกแบบและสร้างซัพพอร์ทของเครื่องกลึงสำหรับการซ่อมแซมโรเตอร์ ซึ่งการออกแบบซัพพอร์ทได้นำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมแอนซิสมาช่วย ในการคำนวณหาผลลัพธ์ของค่าการเสียรูปแล้วนำไปหาค่าความแกร่ง (Stiffness) เพื่อหาแบบซัพพอร์ทที่มีค่าความแกร่งสูงที่สุดที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างจริง และทำการตรวจสอบเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม โดยใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยการวัดระยะการเสียรูปของซัพพอร์ทในการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Co-operation Title:** Design and fabrication of on-site lathe machine supports  
for rotor service

**Student Intern Name:** Miss Yanika Sutthiwiwat

**Faculty:** Engineering **Department:** Mechanical Engineering

**Advisor name:** Asst.Prof.Dr. Maturose Suchatawat

**Mentor name:** Mr. Tinnaphop Poolkhaolan

**Company:** Electricity Generating Authority of Thailand

## Abstract

Rotor is an important component of gas turbine and steam turbine which are typically used in the power plant for electric generation. The weight of the rotor is normally between 15 – 120 tons. Generally, maintenance of the power plant is carried out every 2 – 5 years depending on the rotor size. In order to do that, the system is shut off and the rotor is transported to the service factory. This process is cost and time consuming. Thus, it is required that the rotor service should be performed on-site. Therefore, the purpose of the project is to design and fabricate the supports of the lathe machine for rotor service. The design is based on finite element using Ansys program to calculate the deformation and stiffness. After that, this project will find the suitable supports that have the highest stiffness. Finally, the support is tested for the authentic result, by using the result from program compared with the result of experiment by measuring the deformation of supports.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำชี้แนะ และคอยให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการดำเนินงานต่าง ๆ ซึ่งผู้จัดทำ

ขอขอบคุณ ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรเป็นอย่างสูงที่คอยให้คำปรึกษา และคำแนะนำเป็นอย่างดี จนทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กองโรงงาน ฝ่ายโรงงานและอะไหล่ แผนกโรงงาน 2 ที่ให้ความกรุณา สนับสนุน คำแนะนำ คำชี้แนะ และให้ประสบการณ์ในการทำงาน และการทำวิจัยปริญญาบัตร

ขอขอบคุณ คุณติณภพ พูลเขาล้าน ที่คอยเป็นที่ปรึกษาปัญหาต่าง ๆ ช่วยเหลือข้อมูลในการออกแบบและคำนวณผลเพื่อทำวิจัยปริญญาบัตร

ญาณิกา สุทธิวิวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป .....	VII
สารบัญกราฟ.....	X
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1.1 แผนภาพความเค้น – ความเครียด (Stress – Strain Diagram).....	3
2.1.2 กฎของฮุก (Hooke’s Law).....	6
2.1.3 การเสียรูปของวัสดุ (Deformation).....	7
2.1.4 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) .....	8
2.1.5 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) .....	16
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 ศึกษาส่วนซัพพอร์ตของเครื่องกลึง.....	27
3.2 ออกแบบส่วนซัพพอร์ตของเครื่องกลึง .....	28
3.3 วางแผนขั้นตอนการผลิตและจัดซื้อวัสดุ.....	45
3.4 ผลิตและประกอบส่วนซัพพอร์ตของเครื่องกลึง.....	49
3.5 ทดสอบส่วนซัพพอร์ตของเครื่องกลึงและแก้ไขปรับปรุง.....	57

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	58
4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม .....	58
4.2 ผลลัพธ์จากการคำนวณจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม .....	63
4.3 ผลลัพธ์จากการทดลองวัดระยะการเสียรูปของซัพพอร์ตในการใช้งานจริง.....	67
4.4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณกับการทดลอง.....	72
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
5.1 สรุปผลวิจัย .....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	75
เอกสารอ้างอิง .....	76



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างโดยใช้โปรแกรมของแบบซัพพอร์ต 4 แบบ.....	39
3.2 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างโดยใช้โปรแกรมของแบบซัพพอร์ตที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างกับแบบซัพพอร์ตที่จะสร้างขึ้นจริง.....	45
3.3 แสดงขนาดและจำนวนของแผ่นเหล็กสำหรับซัพพอร์ต 2 ตัว.....	47
3.4 แสดงขนาด, จำนวน และหมายเลขชิ้นงานของแผ่นเหล็กสำหรับซัพพอร์ต 2 ตัว.....	51
4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการเสียรูปจากการคำนวณกับการทดลอง.....	62
4.2 แสดงพิกัดตำแหน่งในแนวแกน z ของซัพพอร์ตแบบมีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์.....	71
4.3 แสดงพิกัดตำแหน่งในแนวแกน z ของซัพพอร์ตแบบไม่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์หรือหลังยกยกโรเตอร์ออกจากซัพพอร์ต.....	71
4.4 แสดงระยะความต่างของค่าพิกัดของตำแหน่งในแนวแกน z ของซัพพอร์ต.....	72
4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการเสียรูปจากการคำนวณกับการทดลอง.....	72
4.6 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งที่ทำการวัดค่าการเสียรูปจากการคำนวณกับการทดลอง.....	73

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพความเค้น – ความเครียด (Stress – Strain Diagram) .....	3
2.2 (a) วัสดุเกิดคอคอด (Necking) (b) ความเสียหายของวัสดุเหนียว .....	6
2.3 แผนภาพความเค้น-ความเครียด (Stress – Strain Diagram) ของเหล็กแต่ละชนิด .....	7
2.4 (ก) ตัวอย่างเอลิเมนต์ 1 มิติ (ข) ตัวอย่างเอลิเมนต์ 2 มิติ (ค) ตัวอย่างเอลิเมนต์ 3 มิติ .....	10
3.1 เครื่องกลึงใหญ่ .....	27
3.2 แบบจำลองส่วนซัพพอร์ต .....	28
3.3 ขั้นตอนการคำนวณ Topology Optimization .....	29
3.4 แบบซัพพอร์ตเดิมของ Support#2 .....	30
3.5 แบบจำลองที่ทำการ Topology Optimization.....	31
3.6 แบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ของ Support#2 (ก) แบบไม่มี stiffener (ข) แบบมี stiffener .....	31
3.7 แบบจำลองสำหรับการวางโรเตอร์.....	32
3.8 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ต .....	32
3.9 ตำแหน่งของจุดจับยึด.....	33
3.10 ตำแหน่งของแรงที่มากระทำกับซัพพอร์ต.....	34
3.11 การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลองซัพพอร์ต .....	35
3.12 การเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร .....	36
3.13 การสุ่มค่าการเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร .....	36
3.14 การเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร.....	37
3.15 การสุ่มค่าการเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร .....	37
3.16 การเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร.....	37
3.17 การสุ่มค่าการเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร .....	38
3.18 การเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร.....	38
3.19 การสุ่มค่าการเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร .....	38
3.20 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร .....	40
3.21 การสุ่มค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร .....	40
3.22 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร .....	41
3.23 การสุ่มค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร .....	41
3.24 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร .....	41
3.25 การสุ่มค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร .....	42
3.26 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร .....	42
3.27 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร .....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร .....	42
3.28 แบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง .....	43
3.29 การเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง .....	43
3.30 การสุมค่าการเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง .....	44
3.31 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง .....	44
3.32 การสุมค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง .....	44
3.33 แบบจำลองซัพพอร์ต .....	46
3.34 แบบตัดเหล็กสำหรับซัพพอร์ต .....	46
3.35 แบบเชื่อมประกอบสำหรับซัพพอร์ต .....	47
3.36 ตารางคุณสมบัติทางกลและส่วนประกอบทางเคมีของความหนาต่าง ๆ .....	48
3.37 เหล็ก SS400 .....	49
3.38 ทำการตัดเหล็กด้วยเครื่องตัดแก๊ส .....	49
3.39 ทำการกัด (Milling) เหล็กให้ได้ตามขนาดที่ใช้งานจริง .....	50
3.40 แผ่นเหล็กที่ทำการ Chamfer เพื่อเตรียมแนวเชื่อม .....	50
3.41 แผ่นเหล็กตัดชิ้นงานที่ 1 (ด้านล่าง) และ ชิ้นงานที่ 5 (ด้านบน) .....	51
3.42 แผ่นเหล็กตัดชิ้นงานที่ 4 .....	52
3.43 แผ่นเหล็กตัดชิ้นงานที่ 2 (ด้านซ้าย) และ ชิ้นงานที่ 3 (ด้านขวา) .....	52
3.44 ทำการเชื่อมประกอบแผ่นเหล็ก .....	53
3.45 เชื่อมประกอบ Stiffener ของซัพพอร์ต .....	53
3.46 เชื่อมประกอบส่วนด้านข้างของซัพพอร์ต (ชิ้นส่วนที่ 3) .....	54
3.47 เชื่อมประกอบส่วนด้านข้างของซัพพอร์ต (ชิ้นส่วนที่ 5) .....	54
3.48 เชื่อมประกอบส่วนด้านข้างของซัพพอร์ต .....	55
3.49 เชื่อมประกอบส่วนด้านบนของซัพพอร์ต .....	55
3.50 เชื่อมประกอบส่วนด้านบนของซัพพอร์ต แล้วเสร็จ .....	56
3.51 ซัพพอร์ตเชื่อมประกอบแล้วเสร็จ .....	56
4.1 ตัวอย่างทดสอบ .....	57
4.2 ขนาดแผ่นสี่เหลี่ยมของตัวอย่างทดสอบ .....	58
4.3 ระยะเวลาการเสียรูปของแผ่นสี่เหลี่ยม .....	61
4.4 ค่าความเค้นของแผ่นสี่เหลี่ยม .....	62
4.5 ผลลัพธ์ของค่าการเสียรูปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ตที่จะสร้างขึ้น จริง .....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 การใช้งานจริงของซัพพอร์ต สำหรับวางโรเตอร์ด้านหน้า .....	64
4.7 การใช้งานจริงของซัพพอร์ต สำหรับวางโรเตอร์ด้านข้าง .....	64
4.8 แบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง.....	65
4.9 การเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง .....	65
4.10 การสุ่มค่าการเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง.....	66
4.11 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง .....	66
4.12 การสุ่มค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง .....	66
4.13 ตำแหน่งสำหรับวัดระยะการเสียรูปของซัพพอร์ต .....	68
4.14 ตำแหน่งสำหรับวัดระยะการเสียรูปของซัพพอร์ตตัวที่ 1.....	68
4.15 ตำแหน่งสำหรับวัดระยะการเสียรูปของซัพพอร์ตตัวที่ 2.....	69
4.16 แบบจำลองตำแหน่งสำหรับวัดระยะการเสียรูปของซัพพอร์ต (ก) ซัพพอร์ตตัวที่ 1 และ (ข) ซัพพอร์ตตัวที่ 2 .....	69
4.17 วัดค่าพิคัดของตำแหน่ง โดยใช้ Dial gauge.....	70
4.18 ค่าพิคัดของตำแหน่งที่กำหนดไว้บนซัพพอร์ต.....	70

## สารบัญกราฟ

กราฟที่	หน้า
3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเอลิเมนต์กับการเสียรูปมากที่สุดของแบบจำลองซัพพอร์ต .....	35
4.1 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งที่ทำการวัดค่าการเสียรูปจากการคำนวณกับการทดลอง .....	73



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีการหยุดเครื่องตามแผนรายปี (Planned Outage) ซึ่งคือ การหยุดเครื่องที่มีการจัดทำแผนแจ้งล่วงหน้าเป็นรายปี และ การแจ้งซ่อมใหญ่ (Major Overhaul) โดยมีการกำหนดช่วงเวลาที่ต้องการจะเริ่มหยุดและจำนวนวันที่หยุดเครื่อง ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่น้อยเมื่อเทียบกับจำนวนงานที่มากที่สุดที่ต้องทำการซ่อมบำรุงชิ้นส่วน และอาจมีปัญหาจากสภาพความสึกหรอของชิ้นส่วนที่มากกว่าที่คาดการณ์ไว้ จึงทำให้ต้องปรับแผนงานการซ่อมบำรุง และทำให้กระทบต่อวันครบกำหนดส่งงาน (Due Date) โดยทำการซ่อมบำรุงนานเกินกว่าวันครบกำหนดส่งงานและเกิดการส่งมอบงานที่ล่าช้า

ชิ้นส่วนที่สำคัญในโรงไฟฟ้าในการหยุดเครื่องเดินเพื่อตรวจสอบสภาพสำหรับการซ่อมบำรุง คือ โรเตอร์ของกังหันแก๊ส และกังหันไอน้ำ ซึ่งมีขนาดใหญ่มาก มีน้ำหนักตั้งแต่ 15 – 120 ตัน เมื่อชิ้นส่วนนี้เกิดความเสียหาย ทำให้ต้องใช้เครื่องมือขนาดใหญ่ในการซ่อมบำรุง อาทิเช่น เครื่องกลึง ซึ่งเครื่องมือขนาดใหญ่อาจหาไม่ได้ในโรงไฟฟ้าหรือพื้นที่ใกล้เคียง และส่วนใหญ่เครื่องมือจะอยู่ในโรงงานที่มีที่ตั้ง ที่อาจห่างไกลจากโรงไฟฟ้า ทำให้ต้องมีการขนย้ายชิ้นส่วน ซึ่งใช้เวลาในการขนย้ายเป็นระยะเวลานาน ต้องใช้รถขนย้ายที่มีขนาดใหญ่ และต้องทำประกันสำหรับการขนย้ายเนื่องจากชิ้นส่วนมีมูลค่าสูงและอาจเกิดความเสียหายที่อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย ทำให้มีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และยังไม่สะดวกต่อการขนย้าย จึงเป็นที่มาว่า ถ้าสามารถเตรียมเครื่องกลึงขนาดใหญ่ไปทำการซ่อมบำรุงที่โรงไฟฟ้าได้จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนย้ายและลดระยะเวลาในการซ่อมบำรุงได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อลดเวลาในการซ่อมบำรุงโรงไฟฟ้า โดยสามารถทำการกลึงสำหรับโรเตอร์ที่โรงไฟฟ้า โดยไม่ต้องขนย้าย
- 1.2.2 เพื่อลดต้นทุนในการดำเนินการซ่อมบำรุงโรงไฟฟ้า
- 1.2.3 เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันเพื่อเพิ่มรายได้ของธุรกิจเดินเครื่องและบำรุงรักษา รวมทั้งธุรกิจวิศวกรรมและการก่อสร้าง

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ซีพพอร์ตของเครื่องกลึง ต้องสามารถรับน้ำหนักโรเตอร์ได้อย่างน้อย 75 ตัน
- 1.3.2 ซีพพอร์ต แต่ละชั้นต้องมีน้ำหนักไม่เกิน 5 ตัน โดยที่รอล์ฟคลิฟท์สามารถยกได้

### 1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาซีพพอร์ตของเครื่องกลึง
- 1.4.2 ออกแบบซีพพอร์ตของเครื่องกลึง
- 1.4.3 วางแผนขั้นตอนการผลิตและจัดซื้อวัสดุ อุปกรณ์
- 1.4.4 ผลิตและประกอบซีพพอร์ตของเครื่องกลึง
- 1.4.5 ทดสอบซีพพอร์ตของเครื่องกลึงและแก้ไขปรับปรุง
- 1.4.6 จัดทำรายงานนำเสนอ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถซ่อมบำรุงชิ้นส่วนภายในโรงไฟฟ้าได้สะดวกมากขึ้น
- 1.5.2 ลดต้นทุนในการดำเนินการซ่อมบำรุงโรงไฟฟ้า
- 1.5.3 เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันเพื่อเพิ่มรายได้ของธุรกิจเดินเครื่องและบำรุงรักษา รวมทั้งธุรกิจวิศวกรรมและการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

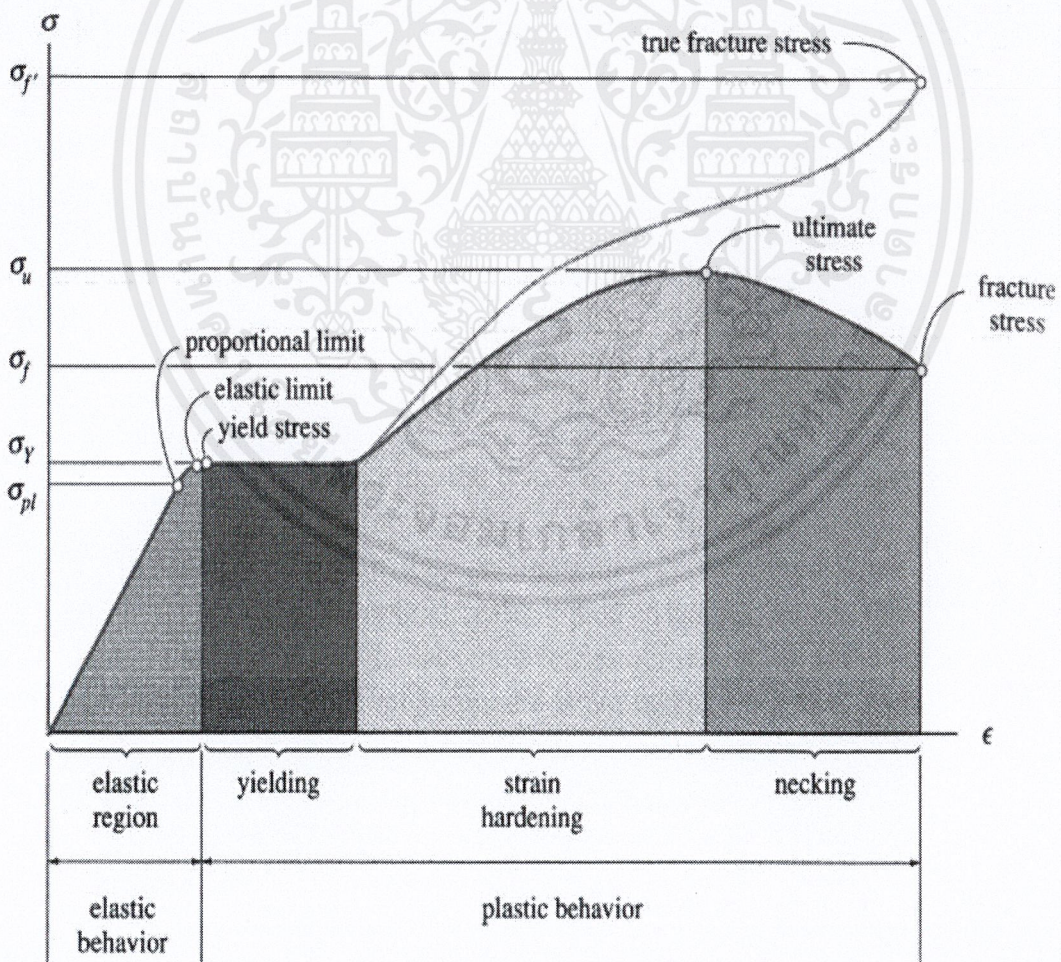
## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 แผนภาพความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain Diagram)

ข้อมูลของแรงดึงและการยืดตัวที่ได้มาจากการทดสอบแรงดึงหรือข้อมูลของแรงกดอัดและการหดตัวที่ได้มาจากการทดสอบแรงกดอัด ซึ่งจะถูกนำมาคำนวณเพื่อเขียนแผนภาพ Stress - Strain Diagram ดังแสดงในรูป 2.10 ซึ่งเป็นแผนภาพความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain Diagram) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild Steel) และโดยทั่วไป แผนภาพความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain Diagram) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ Engineering Stress - Strain Diagram และ True Stress - Strain Diagram



รูปที่ 2.1 แผนภาพความเค้น - ความเครียด (Stress - Strain Diagram)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.1 Engineering Stress – Strain

ค่าของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการเขียนแผนภาพความเค้น – ความเครียด (Stress – Strain Diagram) ชนิดนี้จะหามาได้โดยการใช้ค่าเริ่มต้นของพื้นที่หน้าตัด ( $A_0$ ) และค่าเริ่มต้นของความยาว ( $L_0$ ) ของตัวอย่างทดสอบ (Specimen) ซึ่งสมการของความเค้นและความเครียดจะแสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.2)$$

### 2.1.1.2 True Stress – Strain

ค่าของความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการเขียนแผนภาพ True Stress – Strain Diagram จะหาได้โดยการใช้ค่าเริ่มต้นของพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) และความยาว ( $L$ ) ของตัวอย่างทดสอบ (Specimen) ในขณะที่เราอ่านค่าของแรงดึง ( $P$ ) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ( $\delta$ ) ซึ่งสมการของความเค้นและความเครียดจะแสดงดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$\tilde{\sigma} = \frac{P}{A} = \sigma \left( \frac{A_0}{A} \right) \quad (2.3)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\delta}{L_0} \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln (1 + \varepsilon) \quad (2.4)$$

โดยทั่วไป โครงสร้างทางด้านวิศวกรรมจะถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ภายใต้การกระทำของแรงหรือน้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งในช่วงนี้วัสดุจะยังคงมีความแกร่ง (Stiffness) ที่สูงและความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของ Engineering Stress – Strain Diagram และ True Stress – Strain Diagram แทบจะไม่มีแตกต่างกัน ดังนั้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้ Engineering Stress – Strain Diagram มากกว่า True Stress – Strain Diagram เพราะว่าเขียน Engineering Stress – Strain Diagram ได้ง่ายกว่า True Stress – Strain Diagram จากรูปที่ 2.1 พฤติกรรมของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำจะถูกแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วง ดังต่อไปนี้

## Elastic Behavior (1<sup>st</sup> Region)

ในช่วงนี้วัสดุที่ใช้ทำตัวอย่างทดสอบจะตอบสนองต่อแรงกระทำแบบยืดหยุ่นคือ เมื่อเอาแรงที่กระทำออกจากตัวอย่างทดสอบแล้ว ตัวอย่างทดสอบจะคืนตัวกลับไปสู่รูปร่างและความยาวเริ่มต้น ซึ่งในช่วงนี้ค่าของความเค้น (Stress) จะแปรผันโดยตรงกับความเครียด (Strain) จนถึงค่าของความเค้นค่าหนึ่ง ซึ่งถูกเรียกว่า พิกัดภูมิภาคหรือ Proportional limit ( $\sigma_{pl}$ )

เมื่อค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่า Proportional Limit ( $\sigma_{pl}$ ) แล้ว วัสดุจะยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นอยู่ จุดสุดท้ายบน Stress – Strain Diagram ที่วัสดุยังคงมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นนี้จะถูกเรียกว่า พิกัดยืดหยุ่นหรือ Elastic Limit โดยทั่วไป ค่าความชันของ Stress – Strain Curve จากจุด Proportional Limit จนถึงจุด Elastic Limit จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ

ในการทดสอบแรงดึงของเหล็กนี้จะทำการหาจุด Elastic Limit ได้ยากมาก ซึ่งทำได้โดยการดึงตัวอย่างทดสอบให้ค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่า Proportional Limit ( $\sigma_{pl}$ ) เล็กน้อย แล้วเอาแรงดึงดังกล่าวออก จากนั้น ตรวจสอบดูว่าตัวอย่างทดสอบดังกล่าวยังคงมีความยาวเท่าเดิมหรือไม่ถ้ายังคงเท่าเดิมจะทำการดึงตัวอย่างทดสอบอีกครั้ง โดยให้แรงดึงในครั้งนี้มีค่ามากกว่าค่าแรงดึงครั้งก่อนหน้านี้นิดหน่อย แล้วทำการตรวจสอบเช่นเดิม กระทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเริ่มไม่มีการคืนตัวกลับมาเท่าเดิม ค่าเฉลี่ยของความเค้นที่เกิดจากแรงดึงดังกล่าวกับแรงดึงก่อนที่ตัวอย่างทดสอบเริ่มไม่มีการคืนตัวกลับมาเท่าเดิมจะเป็นค่า Elastic Limit ของวัสดุที่ใช้ทำตัวอย่างทดสอบนั้น

## Yielding (2<sup>nd</sup> Region)

ช่วงการคราก (Yielding) จะเริ่มเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเกิดขึ้น ซึ่งค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่จุดนี้มีค่าเท่ากับความเค้นคราก (Yielding Stress,  $\sigma_y$ ) หลังจากผ่านจุดนี้ไปแล้ว ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการยืดอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรงดึงเลยซึ่งพฤติกรรมของวัสดุในลักษณะนี้เราจะเรียกว่า พฤติกรรมแบบพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (Perfectly Plastic) ซึ่งเกิดขึ้นจากการที่ระนาบของผลึกของเหล็กมีการจัดเรียงตัวกันใหม่อย่างเป็นระเบียบมากขึ้นเรื่อย ๆ

## Strain Hardening (3<sup>rd</sup> Region)

เมื่อสิ้นสุดช่วงการคราก (Yielding) ของวัสดุแล้ว ตัวอย่างทดสอบจะมีความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ Stress – Strain Curve เริ่มที่มีความชันเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่ความชันของ Curve นี้จะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ จนกระทั่งสุดท้ายความชันของ Curve นี้ก็จะมีค่าเป็นศูนย์ที่ความเค้นประลัยหรือ Ultimate Stress ( $\sigma_u$ ) หรือจุดที่วัสดุมีความสามารถในการรับความเค้นสูงสุด มักจะเรียกพฤติกรรมของวัสดุในช่วงนี้ว่า Strain Hardening

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Necking (4<sup>th</sup> Region)

หลังจากความเค้นในตัวอย่างทดสอบมีค่าเท่ากับความเค้นประลัยหรือ Ultimate Stress ( $\sigma_u$ ) พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ในบริเวณ Gauge – length จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วหรือที่เรียกกันว่า คอคอด (Necking) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (a) ซึ่งเป็นผลมาจากการเลื่อน (Slip) ของระนาบของผลึกของเหล็กและจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่าแรงดึงและค่าความชันของ Stress – Strain Curve มีค่าลดลงตามไปด้วยจนกระทั่งถึงจุดที่วัสดุมีการแตกหักเกิดขึ้น ค่าของความเค้นที่จุดนี้มักจะเรียกว่า ความเค้นแตกหักหรือ Fracture Stress ( $\sigma_f$ )



รูปที่ 2.2 (a) วัสดุเกิดคอคอด (Necking) (b) ความเสียหายของวัสดุเหนียว

### 2.1.2 กฎของฮุก (Hooke's Law)

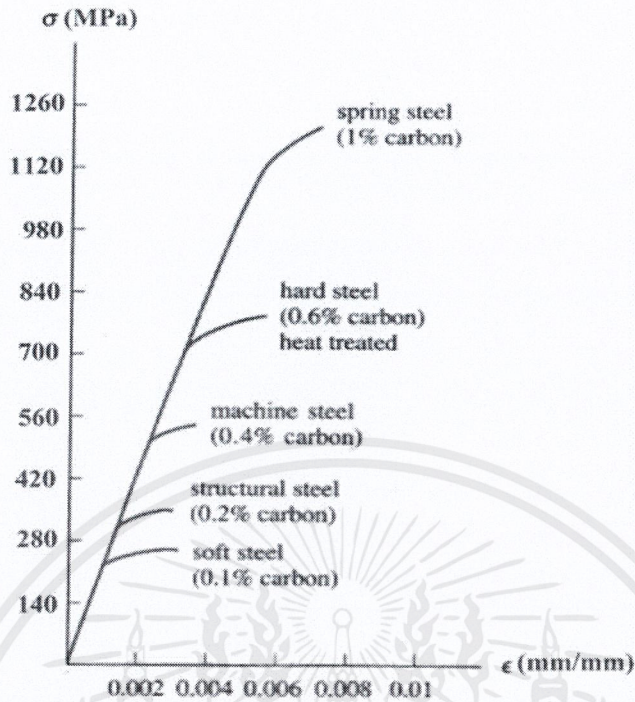
ในปีค.ศ. 1676 Robert Hooke ได้พบว่า เมื่อวัสดุมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) ค่าความเค้น (Stress) จะแปรผันโดยตรงกับค่าความเครียด (Strain) ซึ่งเรียกว่า Hooke's Law

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.5)$$

เมื่อ E คือ Modulus of Elasticity หรือ Young's Modulus ของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าความชันของ Stress – Strain Curve ในช่วงดังกล่าว ค่า Modulus of Elasticity นี้จะมีหน่วยเช่นเดียวกับความเค้น เช่น GPa เป็นต้น

ค่า Modulus of Elasticity เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับกำลังของวัสดุ จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า เหล็กแต่ละชนิดจะมีค่า Proportional Limit ที่แตกต่างกัน แต่ค่า Modulus of Elasticity ของเหล็กเหล่านั้นจะมีค่าที่เท่ากันคือ  $\cong 200$  GPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนภาพความเค้น-ความเครียด (Stress – Strain Diagram) ของเหล็กแต่ละชนิด

### 2.1.3 การเสียรูปของวัสดุ (Deformation)

การเสียรูปของวัสดุ เกิดเมื่อวัสดุถูกกระทำจากแรงภายนอก ซึ่งแรงภายนอกเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงภายใน สร้างความเค้นในวัสดุ และวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูป 2 แบบ คือ

#### 2.1.3.1 การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation)

เป็นขบวนการเปลี่ยนรูป หรือการแปรรูปแบบยืดหยุ่น คือเมื่อวัสดุมีแรงมากระทำในช่วง ๆ หนึ่งที่วัสดุนั้น ๆ สามารถทนอยู่ได้ โดยเมื่อถอดแรงหรือปลดแรงนั้นออก วัสดุนั้น ๆ จะยังสามารถกลับคืนรูปให้อยู่ในสภาพเดิมได้

#### 2.1.3.2 การเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation)

เป็นขบวนการเปลี่ยนรูป หรือการแปรรูปแบบถาวร คือเมื่อวัสดุมีแรงมากระทำจนถึงจุดเกินพิกัดที่จะสามารถทนอยู่ในสภาพนั้น ๆ ได้อีกจนถึงขนาดเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปอย่างถาวร จนไม่อาจจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างต้องคำนึงถึงความเค้นที่เกิดในวัสดุ ซึ่งมีค่าไม่มากกว่าความเค้นครากของวัสดุโครงสร้างนั้น ๆ เพื่อป้องกันการเสียรูปอย่างถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนิยามของความเค้น – ความเครียด และกฎของฮุก (Hooke’s Law) ในสมการ 2.1, 2.2 และ 2.5 สามารถหาค่าการเสียรูป (ระยะที่วัสดุหดหรือยืดตัว) และทำให้ได้ความสัมพันธ์ว่า ค่าการเสียรูปแปรผันตรงกับแรงที่มากระทำ

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (2.6)$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของโครงสร้างเมื่อรับแรงตามแนวแกนกับการตอบสนองของสปริงเมื่อรับแรงตามแนวแกน จะพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดของสปริง ( $\delta_s$ ) กับแรง (P) โดย k คือ ค่าคงที่ของสปริง (Spring’s constant)

$$P = k\delta_s \quad (2.7)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดของสปริง ( $\delta_s$ ) กับแรง (P) และค่าการเสียรูปในสมการ 2.6 และ 2.7 จะสามารถหาความแกร่ง (Stiffness) ได้

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{AE}{L} \quad (2.8)$$

ความแกร่ง หมายถึง ความสามารถในการต้านทานการโก่งของวัสดุชิ้นนั้น ๆ หรืออาจจะเรียกว่าการวัดปริมาณของการโก่งที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักที่กระทำบนวัสดุได้เช่นเดียวกับที่ใช้ค่า Young’s Modulus, E สำหรับวัดความแข็ง ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าความแกร่งมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties)

ความแข็งแรง (Strength) หมายถึง ความสามารถในการต้านทานการแตกหักหรือการเสียรูปของวัสดุ ก่อนที่จะทำให้เกิดการเสียรูปหรือแตกหักได้อย่างถาวรนั้น โดยส่วนมากจะอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) และใช้ค่าความเค้นคราก (Yield Stress,  $\sigma_y$ ) เป็นตัววัดความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้วัสดุเชิงประกอบ (Composite Materials) ของวัสดุชนิดนั้น ๆ เพราะฉะนั้นวัสดุประเภทเดียวกันอาจจะมีค่าความแข็งแรง (Strength) ที่แตกต่างกัน

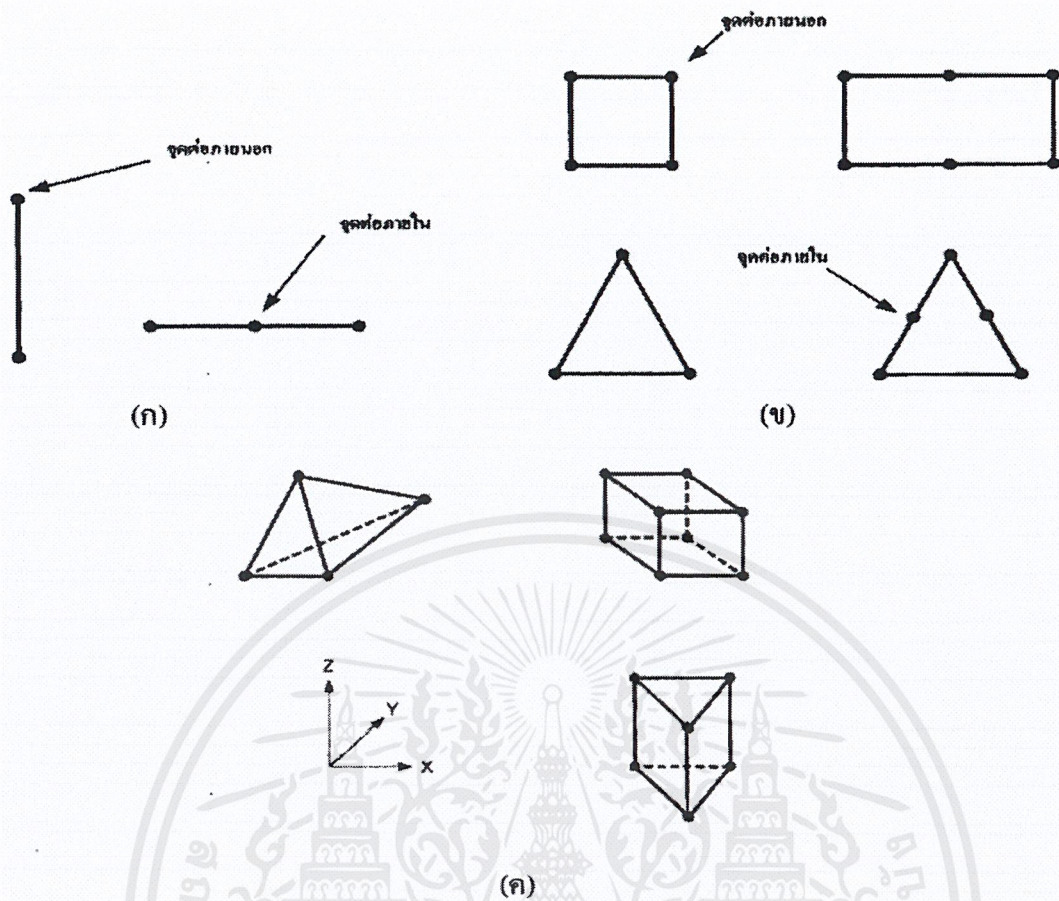
#### 2.1.4 ทฤษฎีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า โดยการแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยที่เรียกว่า เอลิเมนต์ และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะเชื่อมกันด้วยจุดต่อ (Nodes) และเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์ที่สัมผัสกัน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยอาศัยการกำหนดคุณสมบัติทางกลที่ถูกต้องให้กับวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์และกำลังเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง และโครงสร้างที่ซับซ้อนที่ประกอบไปด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่าง ๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ จึงมีผลทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยที่แม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์ได้ ดังนั้นจึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการอนุพันธ์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบและให้ผลคำตอบที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 2.1.4.1 การแบ่งโครงสร้างของแบบจำลองเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

ในการสร้างแบบจำลองการแบ่งโครงสร้างของแบบจำลองให้เป็นเอลิเมนต์ย่อยต้องคำนึงถึงรูปร่างและความสอดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง มีรู หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างมาก จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้การวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างน้อยอาจแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไปจะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลนาน แต่ถ้าจำนวนของเอลิเมนต์น้อยหรือมีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้ผลที่ได้ไม่ถูกต้องแม่นยำเพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างและการกระทำของแรง เช่น ชนิดเอลิเมนต์ในปัญหามิติเดียว สองมิติ สามมิติ หรือ แบบแกนสมมาตร ดังตัวอย่างเอลิเมนต์ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 (ก) ตัวอย่างเอลิเมนต์ 1 มิติ  
 (ข) ตัวอย่างเอลิเมนต์ 2 มิติ  
 (ค) ตัวอย่างเอลิเมนต์ 3 มิติ

ซึ่งจำเป็นต้องเลือกฟังก์ชันภายในเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ เช่น ฟังก์ชันเชิงเส้น หรือฟังก์ชันพอลิโนเมียล ซึ่งอาจจะเป็นพอลิโนเมียลยกกำลังหนึ่ง ยกกำลังสอง หรือยกกำลังสาม ซึ่งฟังก์ชันพอลิโนเมียลให้ความสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่าฟังก์ชันอนุกรมทางเลขาคณิตชนิดอื่น ๆ เพื่อความสะดวกและง่ายในการประมวลผลหรือแก้สมการทางคณิตศาสตร์โดยคอมพิวเตอร์ จึงนิยมจัดฟังก์ชันดังกล่าวในรูปของเมทริกซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันรูปร่างของโครงสร้างโดยรวม

#### 2.1.4.2 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (True Stress – True Strain Curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า (Flow Curve) ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Non – Linearity ) โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้ถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริง เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทาง ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบการดึง (Uni – Axial Tension Test) หรือการทดสอบการกด (Compression Test) ในการทดสอบแรงดึง ขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกแรงกระทำโดยการดึงหรือกดเพิ่มแรง อย่างช้า ๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นทดสอบเปลี่ยนรูปอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของขึ้นทดสอบจนกระทั่งขึ้นงานทดสอบเกิดความเสียหายหรือขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุขึ้นทดสอบ

#### 2.1.4.3 การหาสมการรวมของระบบและสติฟเนสเมทริกซ์รวมของเอลิเมนต์

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถหาได้จากการรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์โดยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่าวิธีสติฟเนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) ซึ่งอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์และการต่อเนื่องของโครงสร้าง ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ ได้ดังนี้

$$\{F\} = [K]\{\bar{d}\} \quad (2.9)$$

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ * \\ * \\ F_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & * & * & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & * & * & K_{2n} \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \\ K_{m1} & K_{m2} & * & * & K_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ * \\ * \\ d_n \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\{F\}$  คือ เมทริกซ์แรงที่กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์  $[K]$  คือ สติฟเนสเมทริกซ์รวมของเอลิเมนต์ และ  $\{\bar{d}\}$  คือ เมทริกซ์ของการกระจัดรวมของระบบ ซึ่งสามารถทราบค่าได้โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตเพื่อช่วยให้สามารถหาเมทริกซ์การกระจัดที่แต่ละจุดต่อได้ในสมการที่ 2.9 และ 2.10 ในการหาสมการสติฟเนสเมทริกซ์ สามารถหาได้หลายวิธี เช่น วิธีสมดุลโดยตรง (Direct Equilibrium Method) โดยหาสติฟเนสเมทริกซ์ได้ด้วยการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ เช่น ในปัญหามานสปริง ท่อนโลหะ เพลลา และคาน เป็นต้น วิธีเวทเรซิดิว (Weighted Residual Method) ซึ่งนิยมใช้กันมาก เช่น ทฤษฎีของกาลอร์ดีน (Galerkin's Method) มักจะใช้ในกรณีวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุด แต่ไม่เหมาะที่ใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของเหลว การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนที่ของมวล เป็นต้น และวิธีงานหรือพลังงาน (Work or Energy Method) จะอาศัยหลักของงานสมมติ (Principle of Virtual Work) หรือ หลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (Principle of Minimum Potential Energy) หรือ ทฤษฎีของแคสติกเลียโน (Castigliano's Theorem) ซึ่งวิธีพลังงานต่ำสุดเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์โครงสร้างช่วงยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Pi = U + W \quad (2.11)$$

ซึ่ง  $\Pi$  คือ พลังงานรวมของระบบ  $U$  คือ พลังงานความเค้นและความเครียดภายในระบบ และ  $W$  คือ พลังงานศักย์จากแรงภายนอก ซึ่งพลังงานความเค้นและความเครียดในระบบประกอบด้วย

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV = \frac{1}{2} \int_V \{d\}^T [B]^T [D] [B] \{d\} dV \quad (2.12)$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือ ความเครียด  $\sigma$  คือ ความเค้น  $dV$  คือ ปริมาตรของเอลิเมนต์  $[D]$  คือ เมทริกซ์ความเค้นและความเครียด  $\{d\}$  คือ การกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และ  $[B]$  คือ เมทริกซ์ของจุดต่อ และพลังงานศักย์จากแรงภายนอกประกอบด้วย

$$W = W_b + W_p + W_s \quad (2.13)$$

$$W_b = - \int_V \{\phi\} \{X\} dV = \{d\}^T [N]^T \{X\} dV \quad (2.14)$$

$$W_p = - \{d\}^T \{P\} \quad (2.15)$$

$$W_s = - \int_V \{\phi\}^T \{T\} ds = \{d\}^T [N] \{T\} ds \quad (2.16)$$

โดยที่  $W_b$  คือ งานเนื่องจากน้ำหนักของเอลิเมนต์  $W_p$  คือ แรงที่กระทำเป็นจุด  $W_s$  คือ งานเนื่องจากโหลดกระจาย หรือแรงตึงผิว โดยที่  $\{\phi\}$  คือ ฟังก์ชันของการกระจัด และ  $\{X\}$  คือ ความหนาแน่นจำเพาะของวัสดุ  $[N]$  คือ ฟังก์ชันรูปร่าง  $\{d\}$  คือ การกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และ  $\{P\}$  คือ แรงภายนอกที่กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์  $\{T\}$  คือ โหลดที่กระจาย หรือแรงตึงผิวบนพื้นที่  $s$  ของเอลิเมนต์ และ  $ds$  คือ พื้นที่บนเอลิเมนต์

ดังนั้นพลังงานรวมของระบบ คือ

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{d\}^T [B]^T [D] [B] \{d\} dV - \{d\}^T [N]^T \{X\} dV - \{d\}^T \{P\} - \{d\}^T [N]^T \{T\} ds \quad (2.17)$$

กำหนดให้  $\{F\}$  เท่ากับแรงทั้งหมดที่กระทำบนเอลิเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\{F\} = - \int_V [N]^T \{X\} dV + \{P\} + [N]^T \{T\} ds \quad (2.18)$$

ดังนั้นจะได้สมการพลังงานรวมแรง คือ

$$\Pi = \frac{1}{2} \{d\}^T \int_V [N]^T [D] [B] \{d\} dV - \{d\}^T \{F\} \quad (2.19)$$

พลังงานศักย์รวมต่ำสุดสามารถหาได้โดยการหาอนุพันธ์ของการกระทำ (  $\frac{\partial \Pi}{\partial \{d\}} = 0$  ) คือ

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{d\}} = \int_V [B]^T [D] [B] \{d\} dV - \{F\} = 0 \quad (2.20)$$

$$\{F\} = \int_V [B]^T [D] [B] \{d\} dV \quad (2.21)$$

หรือสามารถเขียนในรูปแบบเมทริกซ์ คือ

$$\{F\} = [K] \{d\} \quad (2.22)$$

โดยที่  $[K]$  คือ สตีเฟนสมเมทริกซ์รวมของเอลิเมนต์

การแก้สมการสตีเฟนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ และสมการของแรง โดยการแก้สมการพีชคณิตของแต่ละเอลิเมนต์พร้อม ๆ กันอาจใช้วิธีของเกาส์ (Gauss's Elimination Method) หรือวิธีสมมติ (Iteration Method) เพื่อให้เข้าใจง่ายและสามารถเห็นผลการคำนวณแบบเมทริกซ์ จึงนิยมแปลความหมายของตัวเลขในรูปแบบกราฟฟิกและเฉดสีต่าง ๆ ซึ่งจะบอกถึงขนาดโดยแถบสีลาเบล (Contour Label) รวมทั้งในรูปแบบกราฟ เพื่อเป็นประโยชน์และสะดวกในการวิเคราะห์ผลในขั้นตอนต่อไป

#### 2.1.4.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ในการวิเคราะห์แก้สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันด้วยวิธีซ้อนทับ (Superposition Method) หรือเรียกว่าวิธีสตีเฟนสโดยตรง (Direct Stiffness Method) โดยอาศัยหลักการสมดุลของแรงที่จุดต่อเอลิเมนต์ที่ต่อเนื่องของโครงสร้างเขียนในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\{F\} = [K] \{\bar{d}\} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $\{F\}$  คือ เมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ  $[K]$  คือ สตีเฟนสเมทริกซ์รวมของระบบ และ  $\{\bar{d}\}$  คือ เมทริกซ์รวมของการกระจัดซึ่งอาจทราบค่าเพียงบางค่า จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต หรือเงื่อนไขบังคับ หรือ จุดรองรับเพื่อช่วยทำให้เมทริกซ์สามารถหาค่าการกระจัดในจุดต่อที่ต้องการได้ ตัวอย่างชนิดเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ คือ แบบฟิกซ์ แบบสไลด์ แบบพิน แบบอิสระ และแบบสมมาตร

#### 2.1.4.5 การหาการกระจัดของระบบ

การวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นิยมแบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ แล้วพิจารณาแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วยจุดต่อในระนาบของแกน X และ Y แบบปัญหา 2 มิติ (i j) หรือในระนาบของแกน X Y และ Z แบบปัญหา 3 มิติ (i j k) โดยที่  $\{d_n\}$  เป็นพิกัดของจุดใด ๆ และ  $\bar{u}_n, \bar{v}_n, \bar{w}_n$  เป็นตำแหน่งบนแกน X Y และ Z ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบการกระจัด คือ

$$\{d_n\} = \{\bar{u}_n, \bar{v}_n, \bar{w}_n\} \quad (2.24)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการแบบปัญหา 2 มิติ

$$\{\phi\} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{u}(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \\ \bar{v}(x, y) = a_7 + a_8x + a_9y + a_{10}x^2 + a_{11}xy + a_{12}y^2 \end{array} \right\} \quad (2.25)$$

โดย  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{12}$  คือ ค่าคงที่ และ  $\{\phi\}$  คือ ฟังก์ชันการกระจัดในรูปแบบพิกัดรวมและสามารถเขียนอยู่ในรูปของฟังก์ชันรูปร่าง  $[N]$  คือ

$$\{\phi\} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{u}(x, y) = N_i\bar{u}_i + N_j\bar{u}_j + N_k\bar{u}_k \\ \bar{v}(x, y) = N_i\bar{v}_i + N_j\bar{v}_j + N_k\bar{v}_k \end{array} \right\} = [N]\{\bar{d}\} \quad (2.26)$$

ผลรวมของ  $N_i + N_j + N_k = 1$  เสมอ เพราะว่าจุด x และ y ดังกล่าวอยู่ในตำแหน่งใด ๆ บนผิวของเอลิเมนต์

#### 2.1.4.6 การหาค่าความเค้นและความเครียด

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ จำเป็นต้องทราบถึงค่าความเค้น ความเครียด และความเค้นเฉือนในเนื้อวัสดุ เพื่อให้การออกแบบอยู่ในช่วงที่มีความปลอดภัยหรือในช่วงที่ยอมรับได้ หรือเพื่อทำการวิจัยและศึกษาความเป็นไปได้ในงานดังกล่าว ซึ่งสามารถแสดงค่าความเค้นที่ทำนายได้และเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ ในกรณีของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการกระจัด สามารถหาได้โดยอาศัยพื้นฐานความรู้ทางด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลศาสตร์ของแข็ง ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ โดยสามารถทราบความเครียดได้จากการหาอนุพันธ์สมการฟังก์ชันการกระจัด และอาศัยพื้นฐานความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง คือ

$$\{\varepsilon\} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_i & 0 & \beta_j & 0 & \beta_k & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & \gamma_j & 0 & \gamma_k \\ \gamma_i & \beta_i & \gamma_j & \beta_j & \gamma_k & \beta_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{v}_i \\ \bar{u}_j \\ \bar{v}_j \\ \bar{u}_k \\ \bar{v}_k \end{Bmatrix} = [\beta_i \quad \beta_j \quad \beta_k] \begin{Bmatrix} \bar{d}_i \\ \bar{d}_j \\ \bar{d}_k \end{Bmatrix} \quad (2.27)$$

สามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ที่ง่ายขึ้นได้

$$\{\varepsilon_i\} = [B_{ij}]\{\bar{d}_j\} \quad (2.28)$$

ซึ่งเมทริกซ์  $[B_{ij}]$  จะขึ้นอยู่กับพิกัดหรือตำแหน่งของจุดต่อและไม่ขึ้นอยู่กับพิกัด  $x$  และ  $y$  ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากผลที่ได้จากฟังก์ชันการกระจัดในโครงสร้างหรือชิ้นงานที่ทำการวิเคราะห์ คือ

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.29)$$

ซึ่ง  $[D]$  เรียกว่า เมทริกซ์ความเค้นและความเครียด ดังนั้น

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\bar{d}\} \quad (2.30)$$

ความเค้นสามารถหาได้จากเมทริกซ์ความเค้นและความเครียด เมทริกซ์พิกัดหรือตำแหน่งของจุดต่อ และเมทริกซ์ของการกระจัด

#### 2.1.4.7 การวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลที่คำนวณได้จากขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต การหาค่าการกระจัดของระบบ และการหาค่าความเค้นและความเครียด ทำให้สามารถทราบได้ว่าจุดต่อใด ๆ เป็นบริเวณที่ต้องสนใจเป็นพิเศษ เช่น บริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปมากหรือมีความเค้นสูง โดยสามารถเปรียบเทียบได้ว่าผลการทำนายที่ได้มีความแม่นยำหรือใกล้เคียงกับการทดลองหรือไม่อย่างไร ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความเหมาะสมของโครงสร้างหรือชิ้นส่วน เพื่อใช้ในการปรับปรุงการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะงานที่ทำการวิเคราะห์หรือการเลือกใช้วัสดุอื่นที่เหมาะสมกว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบกว่าวิธีทั่วไป เช่น สามารถสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดีและสะดวกกว่า สามารถจำลองการกระทำของแรงและเปลี่ยนแปลงค่าของแรงในสภาวะต่าง ๆ ได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง สามารถวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นงานหลายชิ้นที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยง่าย สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อนได้สะดวก สามารถเลือกขนาดของเอลิเมนต์ในบริเวณที่สนใจให้มีขนาดที่เหมาะสมได้โดยง่าย และสามารถเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้สะดวกและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย

### 2.1.5 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

ทฤษฎีและเทคนิคการออกแบบของงานทางด้านวิศวกรรมมีอยู่หลายแบบและหลายวิธีด้วยกันแต่ละแบบและวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ดังนั้นจึงมีเทคนิคการออกแบบอยู่มากมายหลายวิธี อย่างไรก็ตามความรู้พื้นฐานทางด้านวิศวกรรมเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นมากในการสร้างสมการ Objective Function สำหรับกำหนดเงื่อนไขบังคับให้สอดคล้องกับงานจริงที่เราต้องการทำการออกแบบ และเพื่อให้สามารถหาค่าตอบได้อย่างถูกต้อง ผู้ออกแบบจึงต้องมีความรู้พื้นฐานในเรื่องนั้น ๆ เป็นอย่างดี จึงจะสามารถสร้างสมการ Objective Function ขึ้นมาได้ และสามารถเลือกกำหนดสมการ Constrain ได้อย่างถูกต้อง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) จัดอยู่ในวิชาการวิจัยดำเนินงาน (Operation Research) ซึ่งเป็นแขนงวิชาที่พัฒนามาแล้วเป็นเวลากว่า 30 ปี เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับกันสำหรับความสำเร็จและผลประโยชน์ที่ได้ การนำเทคนิคต่าง ๆ มาใช้นักวิชาการในสาขาวิชาซีฟต่าง ๆ ได้พยายามอย่างยิ่งในการวิจัยปัญหาในสายงานที่เกี่ยวข้องเพื่อจะได้นำวิธีการต่าง ๆ มาพัฒนาปรับปรุงงานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ประกอบกับความก้าวหน้าทางคอมพิวเตอร์มีมากขึ้น ทำให้สามารถแก้ปัญหาที่มีขนาดใหญ่และผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น แนวโน้มความสนใจและการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ จึงมีมากยิ่งขึ้นเช่นกัน

การวิจัยดำเนินงานมีจุดเริ่มต้นในปีคริสต์ศักราช 1937 ซึ่งอยู่ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง โดยฝ่ายทหารของอังกฤษได้ให้นักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อว่า Sir Robert Watson – Wait ทำการวิเคราะห์ปัญหาการใช้อุปกรณ์เรดาร์ในการจับเครื่องบินและเวลาที่เครื่องบินเข้าศึกเข้าโจมตีจริง ๆ ถ้าเรดาร์จับได้เร็วก็จะทำให้มีเวลาเตรียมการส่งเครื่องบินประจัญบานขึ้นไปต่อสู้ได้ทัน นักวิทยาศาสตร์ได้วิเคราะห์ลักษณะการปฏิบัติการของสถานีเรดาร์แต่ละแห่ง ตลอดจนวงจรการสื่อสารและวิธีการปฏิบัติงาน จนได้ผลเป็นตัวเลขเสนอต่อรัฐบาลเพื่อปรับปรุงสถานีเรดาร์ทั้งหมดของกองทัพอากาศอังกฤษ ผลงานครั้งนี้แสดงว่านักวิทยาศาสตร์สามารถช่วยนักบริหารในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ ต่อมาในคริสต์ศักราช 1941 กองทัพอากาศอังกฤษได้จัดตั้งหน่วยวิจัยทางทหารและนำไปใช้แพร่หลายในหน่วยงานของกองทัพบกและกองทัพเรือ ในปีคริสต์ศักราช 1942 รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้ตั้งหน่วยงานวิจัยดำเนินงานขึ้นเป็นครั้งแรก โดยได้รับคำแนะนำจากรัฐบาลอังกฤษและเป็นการร่วมมือกับการปฏิบัติการทางทหารของอังกฤษ ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ตั้งหน่วยวิจัยดำเนินงานโดยใช้ชื่อต่างกัน ในกองทัพอากาศเรียกว่า Operation Analysis แต่ในกองทัพบกและกองทัพเรือเรียกว่า Operations Research and Operation Evaluation

ในช่วงทศวรรษของปีคริสต์ศักราช 1940 นักวิทยาศาสตร์หลาย ๆ ท่านได้พัฒนาวิธีการที่เรียกว่า โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เพื่อนำไปใช้ในเรื่องการจัดสรรทรัพยากรในวงการอุตสาหกรรมต่าง ๆ และนักคณิตศาสตร์ชาวอเมริกา ชื่อ George B. Danzig ได้คิดค้นวิธีการแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นที่มีประสิทธิภาพสูงที่เรียกว่า วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) ในปีคริสต์ศักราช 1950 Von Neuman ได้พัฒนา วิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) สำหรับแก้ปัญหาในโครงการป้องกันเรือดำน้ำนิวเคลียร์ ในปีคริสต์ศักราช 1958 กองทัพเรือสหรัฐอเมริกาได้ทำการวิจัยเพื่อหาวิธีการวางแผนและควบคุมในโครงการผลิตและติดตั้งจรวดที่เรียกว่า โพลาริส (Polaris) โดยได้คิดค้นวิธี PERT (Program Evaluation Review Technique) ซึ่งเทคนิคเหล่านี้รู้จักเพียงในกลุ่มนักวิจัยดำเนินงานก็ได้รับการนำไปพัฒนาใช้กับวงการอุตสาหกรรมทำให้การวิจัยดำเนินงานได้รับการยอมรับและได้รับการพัฒนาทั้งวิธีการและรูปแบบให้ทวีขอบเขตขนาดและซับซ้อน ตามการขยายตัวของเศรษฐกิจและสังคม

ภายหลังสงครามโลกครั้งที่สองสิ้นสุดลง ประเทศอังกฤษได้นำเอาวิธีการวิจัยดำเนินงานมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมและรัฐวิสาหกิจเป็นประเทศแรก โดยได้เริ่มใช้กับอุตสาหกรรมทำถ่านหินเป็นอุตสาหกรรมประเภทแรก ต่อมาจึงได้ขยายตัวไปสู่อุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ และใช้ในการบริหารงานด้านการขนส่ง ส่วนสหรัฐอเมริกานั้นไม่ค่อยให้ความสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านธุรกิจมากในระยะแรก จนกระทั่งได้มีการขยายตัวในการใช้เครื่องจักรแทนคน สหรัฐอเมริกาจึงได้ทำการฟื้นฟูและส่งเสริมวิทยาการแขนงนี้จนนิยมใช้อย่างแพร่หลาย ได้มีการจัดตั้งสมาคมและจัดสอนขึ้นในมหาวิทยาลัยและสถาบันการศึกษาชั้นสูง ประกอบกับในช่วงทศวรรษของปีคริสต์ศักราช 1950 ได้มีการคิดค้นเครื่องคอมพิวเตอร์และได้มีการนำเอาเครื่องคอมพิวเตอร์มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิจัยดำเนินงาน ทำให้การวิจัยดำเนินงานได้รับการพัฒนาหลักการและวิธีการไปสู่ข่ายงานต่าง ๆ ที่มีความสลับซับซ้อนได้มากขึ้นตามลำดับ

นักวิทยาศาสตร์ได้มีความพยายามพัฒนาและนำเอาวิธีการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการจัดการทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด และมีผู้นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เช่น การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม การหาเส้นทางการบินพาณิชย์ ส่วนผสมของอาหารสัตว์ การกำหนดทิศทางของชิปนาวู การหากระบวนการที่เหมาะสมที่สุดของการทำปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5.1 ความจำเป็นของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (The Need for Optimization)

เป้าหมายของการแก้ปัญหาในทางอุตสาหกรรม คือ การตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตจะต้องทำการปรับปรุงส่วนใดบ้าง การจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้ได้ประโยชน์มากที่สุด การเลือกวิธีการออกแบบที่มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นน้อยที่สุดและให้ผลกำไรสูงสุด เป็นต้น การวางแผนและการกำหนดการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้ เช่นเดียวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนใหม่เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่มีราคาต่ำ การออกแบบทางวิศวกรรมจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบ ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายด้าน เช่น ขอบเขตจำกัดทางรูปร่าง น้ำหนัก ราคาของวัตถุดิบ งบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด และวิธีการผลิตที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เป็นต้น

ปัญหาดังกล่าวทำให้ข้อกำหนดในการออกแบบมีความยุ่งยากมากขึ้น เมื่อทางเลือกที่เป็นไปได้มีหลายทางเลือก ผู้ออกแบบจะทำการเลือกทางเลือกที่ตรงกับความต้องการที่กำหนดไว้ โดยการนำวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เพื่อเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด ซึ่งค่าคำตอบที่ได้จะอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของปัญหาที่กำหนดขึ้นตามลักษณะของปัญหาหรือตามความต้องการของผู้ออกแบบ

### 2.1.5.2 การประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในทางวิศวกรรม

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างแพร่หลาย ยกตัวอย่างเช่น

1. การออกแบบเครื่องบินเพื่อให้น้ำหนักน้อยที่สุด
2. การกำหนดนโยบายการผลิตที่ดีที่สุด การกำหนดระดับจำนวนการผลิตเพื่อให้ได้กำไรมากที่สุด ภายใต้ทรัพยากรที่มีอยู่จำกัด
3. หาทิศทางการเดินทางที่เหมาะสมที่สุดของยานอวกาศ
4. การจัดสรรทรัพยากรน้ำเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
5. การออกแบบชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องจักรกล ให้มีขนาดที่เหมาะสมและมีราคาประหยัด
6. ใช้ในการหาสถานที่ตั้งโรงงานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัตถุดิบและค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าไปสู่ผู้บริโภคมากที่สุด
7. ใช้หาระบบหรือกระบวนการทางเคมีที่เหมาะสมที่สุด
8. วางแผนการซ่อมบำรุงและการเปลี่ยนชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลที่เหมาะสมในการดำเนินงาน
9. ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสม
10. ใช้ในการเลือกเงื่อนไขในการตัดโลหะแผ่นให้ได้ปริมาณชิ้นส่วนที่ต้องการมากที่สุด และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. การออกแบบเครื่องใช้ไฟฟ้าเช่น มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด
12. การออกแบบในทางวิศวกรรมโยธา เช่น การออกแบบอาคาร สะพานและเขื่อน เป็นต้น เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่ต่ำที่สุด
13. ใช้ในการจัดระบบการสื่อสารและคมนาคม เพื่อให้ได้ผลตอบแทนมากที่สุด
14. ใช้ในการออกแบบวางท่อประปา เพื่อให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด
15. การหาสัดส่วนการผสมอาหารสัตว์ว่าจะใช้วัตถุดิบอย่างไรบ้าง จำนวนเท่าไรจึงจะทำให้ต้นทุนการผสมอาหารสัตว์ต่ำที่สุด โดยคุณค่าของอาหารสัตว์นั้นยังคงเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด เป็นต้น

การออกแบบทางวิศวกรรมมีเป้าหมายการออกแบบ คือ การเลือกตัวแปรที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้ภายใต้เงื่อนไขหรือสภาวะแวดล้อมที่กำหนดจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบหรือจากทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ผู้ออกแบบต้องการ และเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม และข้อกำหนดในการออกแบบ เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นวิธีที่นำข้อดีทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการศึกษาปัญหาเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด นักออกแบบต้องคำนึงถึงเสมอว่าการออกแบบไม่ใช่ทำเพื่อตอบสนองความอยากรู้อยากเห็นในทางวิทยาศาสตร์เท่านั้น เพราะสิ่งที่ออกแบบควรเป็นสิ่งที่สังคมต้องการและเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเมื่อทราบความต้องการของสังคมแล้ว อันดับต่อไป คือ การสร้างกรอบความคิด หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ โดยขั้นตอนนี้อาจมีการทำซ้ำเพื่อให้แนวคิดที่วางไว้มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

สมัยก่อนในการออกแบบผลิตภัณฑ์จะใช้วิธีการเดิมที่กำหนดไว้ก่อนหน้า เมื่อทำตามขั้นตอนดังกล่าวก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยไม่มีการปรับปรุงแก้ไขวิธีการแต่อย่างใด ในบางครั้งประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบและวิธีการออกแบบที่ใช้ไม่มีการพัฒนา ในความเป็นจริงในการออกแบบควรมีการปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

การออกแบบที่เหมาะสมที่สุด คือ การเลือกขนาดหรือวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปตามข้อกำหนดที่กำหนดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น มีราคาอยู่ในช่วงที่กำหนด สามารถทำงานได้ตามต้องการ เป็นต้น โดยทั่วไปการออกแบบที่เหมาะสมจะอยู่ภายใต้พื้นฐานความรู้ทางวิศวกรรมที่อยู่ในรูปของสมการความสัมพันธ์หรือกราฟแสดงความสัมพันธ์ และประสบการณ์ของผู้ออกแบบ

### 2.1.5.3 ประเภทของแบบจำลองของปัญหา

แบบจำลอง (Model) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางเพราะจะเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าเราเข้าใจลึกซึ้งในปัญหามากน้อยแค่ไหน แบบจำลองโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5.3.1 แบบจำลองทางกายภาพ (Physical Model)

คือ แบบจำลองที่จำลองความจริงออกมาให้มีรูปร่างเดียวกัน และมองเห็นเหมือนจริง เช่น แบบจำลองการจับยึดของโมเลกุลทางเคมี ทำให้ทราบถึงลักษณะของการจับยึดของอนุภาค เป็นต้น

### 2.1.5.3.2 แบบจำลองแผนภาพ (Schematic Model)

คือ การแสดงข้อเท็จจริงหรือข้อความต่าง ๆ ออกมาเป็นแผนภาพ ซึ่งง่ายและสะดวกต่อการทำความเข้าใจ หรือเป็นการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ มาจำลองในรูปของแผนภาพหรือแผนภูมิต่าง ๆ แบบจำลองแผนภาพนี้อาจจะเหมือนหรือไม่เหมือนกับสภาพการณ์ของเหตุการณ์จริงก็ได้ เช่น แผนภาพแสดงปริมาณการขายสินค้าในแต่ละไตรมาส แผนภูมิควบคุมชนิดค่าเฉลี่ย - พิสัย เป็นต้น

### 2.1.5.3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

คือ การจำลองสภาพเหตุการณ์ต่าง ๆ ออกมาในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวในการตัดสินใจต่าง ๆ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการทำนายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอนาคต หรือใช้ในการควบคุมการดำเนินงานขององค์กรต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ถึงแม้ว่าจะพยายามสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ให้ใกล้เคียงกับเหตุการณ์หรือปัญหาจริงที่สุดแล้วก็ตาม แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นยังไม่สามารถสร้างเหมือนเหตุการณ์จริงหรือปัญหาจริงได้อย่างสมบูรณ์ เพราะในการสร้างแบบจำลองนี้จะต้องสร้างภายใต้ข้อสมมติฐานต่าง ๆ ดังนั้นในการทำนายเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคตจะต้องคำนึงถึงข้อสมมติฐานด้วย เพราะในบางครั้งสมมติฐานที่กำหนดขึ้นอาจจะไม่ถูกต้อง ทำให้ค่าคำตอบที่ได้ไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง หรือในบางครั้งการตั้งสมมติฐานไม่ถูกต้องอาจจะทำให้ไม่สามารถหาคำตอบได้

### 2.1.5.4 ขั้นตอนของการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมไม่ว่าจะเป็นปัญหาใด ๆ ก็ตามจะต้องมีวิธีการและขั้นตอนในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดดังต่อไปนี้

#### 2.1.5.4.1 การกำหนดปัญหา

ปัญหาที่จะทำการแก้ไขจะต้องกำหนดขอบเขตและเป้าหมายของการแก้ปัญหาอย่างชัดเจน เพราะในบางครั้งขอบเขตของปัญหากว้างเกินไปหรือไม่ชัดเจน จะทำให้การแก้ไขปัญหานั้นเป็นไปได้ยาก ในบางครั้งไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้หรือถ้าแก้ไขปัญหานั้นได้ผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ถูกต้อง ปัญหาอาจมีเป้าหมายหลายอย่างในขณะเดียวกัน และเป้าหมายแต่ละอย่างมีความสำคัญไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถแบ่งเป้าหมายออกเป็น 2 ประเภท คือ

- เป้าหมายเดียว เป้าหมายของปัญหามีเพียง 1 เป้าหมายเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นเป้าหมายแบบสูงสุดหรือต่ำสุดก็ได้ เช่น ต้องการออกแบบเครื่องบินเพื่อให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด การออกแบบวางแผนการวางท่อประปาเพื่อให้เสียค่าใช้จ่ายในการวางท่อน้อยที่สุด เป็นต้น

- เป้าหมายหลายเป้าหมาย คือ เป้าหมายของปัญหามีมากกว่า 1

เป้าหมาย ซึ่งแต่ละเป้าหมายอาจจะเป็นแบบเดียวกันหรือตรงกันข้ามกันก็ได้ เช่น ต้องการทำให้ส่วนแบ่งของสินค้าในตลาดมีค่าสูงสุด และขณะเดียวกันก็ต้องการทำให้ได้กำไรรวมสูงสุดด้วย ปัญหาลักษณะนี้เรียกว่า เป้าหมายเดียวกัน แต่ในบางกรณีเป้าหมายอาจจะเป็นคนละแบบก็ได้ เช่น ต้องการผลิตสินค้าเพื่อให้ได้กำไรสูงสุด และในขณะเดียวกันต้องทำให้เสียค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุดด้วย

ขั้นตอนในการกำหนดปัญหาของการออกแบบพอกกล่าวโดยสังเขปได้ดังนี้

- กำหนดเป้าหมายของการออกแบบ
- ศึกษาตัวแปรในการออกแบบที่มีผลต่อเป้าหมายของการออกแบบ
- กำหนดข้อจำกัดหรือเงื่อนไขของการออกแบบ
- กำหนดแนวทางในการออกแบบ
- กำหนดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ปัญหาและระยะในการดำเนินงาน

#### 2.1.5.4.2 การจัดรูปปัญหาให้เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้จัดตั้งปัญหาและทำความเข้าใจปัญหาอย่างถูกต้องแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การจัดรูปแบบของปัญหาให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ โดยจัดรูปของปัญหาให้เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะมีโครงสร้างดังนี้

1. สมการกำหนดเป้าหมายหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของเป้าหมายกับตัวแปรสำหรับตัดสินใจ สมการเป้าหมายนี้จะแบบสูงสุดหรือต่ำสุด (Maximize, Minimize) ก็ได้ และค่าของสมการเป้าหมายจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของตัวแปรสำหรับการตัดสินใจ เช่น การผลิตเพื่อให้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด การผลิตสินค้าเพื่อให้ได้กำไรสูงสุด การออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุด ฯลฯ โดยสมการแสดงความสัมพันธ์อาจจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา

2. สมการแสดงขอบข่ายหรือเงื่อนไขบังคับ (Constrain) ซึ่งแสดงขอบเขตหรือข้อจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากรในรูปของ สมการ (Equality) หรือ อสมการ (Inequality)

3. ตัวแปรในการออกแบบหรือตัวแปรตัดสินใจ เป็นตัวแปรที่เราต้องการทราบค่าตัวแปรดังกล่าวจะมีตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ และเป็นตัวแปรที่มีผลต่อสมการเป้าหมายที่กำหนดขึ้น ตัวแปรในการออกแบบสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ ตัวแปรที่มีความต่อเนื่อง ตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง และตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.5.4.3 การทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาและการหาผลลัพธ์ของปัญหา

บ่อยครั้งที่รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาไม่ถูกต้อง เนื่องจากความบกพร่องบางประการ ทำให้รูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวไม่ใช่ตัวแทนของปัญหาอย่างแท้จริง จึงทำให้การหาผลลัพธ์เป็นไปได้ ดังนั้นควรมีการตรวจสอบการจัดตั้งปัญหาเปรียบเทียบกับปัญหาจริง ตรวจสอบการใช้หน่วยและมิติของตัวแปรต่าง ๆ ว่าสอดคล้องกันหรือไม่ โดยสามารถทำการตรวจสอบด้วยการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในสมการทางคณิตศาสตร์ แล้วดูว่าจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นสอดคล้องกับค่าที่ควรจะเป็นหรือไม่ และตรวจสอบโดยใช้ข้อมูลในอดีตมาทดสอบรูปแบบทางคณิตศาสตร์ แล้วนำเอาผลลัพธ์ไปเปรียบเทียบกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นในการหาผลลัพธ์หรือ คำคำตอบของปัญหาจะเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับปัญหาหรือสามารถแก้ปัญหานั้นได้หรือไม่ และเมื่อได้ผลลัพธ์แล้วต้องคำนึงถึงพฤติกรรมของผลลัพธ์ที่จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวแปรในการออกแบบของปัญหาเปลี่ยนแปลงไป นั่นคือ จะต้องมีการวิเคราะห์ให้ความไว ซึ่งการวิเคราะห์ให้ความไวมีความสำคัญมากเพราะว่าตัวแปรในการออกแบบของปัญหาที่ศึกษาไม่อาจประมาณค่าได้แน่นอน จะต้องหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมจากค่าต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้เคียง

#### 2.1.5.4.4 การทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

ถ้าหากผลที่ได้ถูกต้องและน่าเชื่อถือได้ จะต้องสามารถทดสอบได้โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ข้อมูลในอดีตกับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง ๆ อย่างไรก็ตามการทดสอบความถูกต้องไม่เหมาะสมกับปัญหาที่ไม่เคยคิดมาก่อน เพราะจะไม่มีข้อมูลในอดีตที่จะนำมาเปรียบเทียบได้

#### 2.1.5.4.5 การนำผลลัพธ์หรือคำตอบไปใช้งาน

จะต้องทำการแปลผลลัพธ์ที่ได้ให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานได้ และเมื่อนำไปใช้งานแล้ว ควรทำการประเมินผลการใช้งาน เพื่อนำข้อบกพร่องที่ได้มาปรับปรุงและแก้ไขให้เป็นไปตามความต้องการต่อไป เพราะในบางครั้งผลลัพธ์ที่ได้ไม่สามารถทำให้เป็นจริงตามที่เราร้องขอได้หรือไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ

#### 2.1.5.5 ประเภทของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ลักษณะของปัญหาและตัวแปรในการออกแบบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เป็นสิ่งที่เราควรให้ความสำคัญ เพราะวิธีการทางการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดในการใช้แก้ปัญหาแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของปัญหา ประเภทของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งตามลักษณะต่าง ๆ ได้ 6 ประเภท คือ

1. แบ่งตามสมการขอบเขต คือ ปัญหาที่มีสมการกำหนดขอบเขตของการออกแบบ และปัญหาที่ไม่กำหนดสมการขอบเขต

2. แบ่งตามลักษณะของตัวแปรในการออกแบบ คือ ถ้าสมการเป้าหมายมีตัวแปรในการออกแบบเพียงหนึ่งตัวจะเรียกปัญหาแบบนี้ว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตัวแปรเดียว (Single – Variable Optimization) ถ้าสมการเป้าหมายมีตัวแปรในการออกแบบสองตัวแปรหรือมากกว่านั้นเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายตัวแปร (Multi – Variable Optimization) หรือ ถ้าค่าของตัวแปรในการออกแบบเป็นจำนวนเต็มเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมแบบจำนวนเต็ม (Integer Optimization) เป็นต้น

3. แบ่งตามลักษณะของสมการเป้าหมาย คือ สมการเป้าหมายมีตัวแปรในการออกแบบมีทั้งแบบเป้าหมายเดียวและเป้าหมายหลายเป้าหมาย สมการเป้าหมายเดียว คือ ปัญหาที่มีจำนวนของสมการเป้าหมายเพียงสมการเดียว ส่วนสมการเป้าหมายหลายเป้าหมาย คือ ปัญหาที่มีจำนวนของสมการเป้าหมายมากกว่าหนึ่งสมการเป้าหมาย

4. แบ่งตามลักษณะความสัมพันธ์ของสมการเป้าหมาย คือ ถ้าสมการเป้าหมายมีความสัมพันธ์ของสมการเป้าหมายเป็นแบบเชิงเส้น จะเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP) หรือถ้าสมการเป้าหมายมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น จะเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear Programming, NLP)

5. แบ่งตามลักษณะของสมการเป้าหมายที่ขึ้นกับเวลา คือ ถ้าปัญหาเป็นปัญหาที่ขึ้นอยู่กับเวลาจะเรียกปัญหาแบบนี้ว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบพลวัต (Dynamic Optimization) ถ้าเป็นปัญหาที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาจะเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบสถิตย์ (Static Optimization)

6. แบ่งตามลักษณะของข้อมูล คือ ถ้าปัญหาที่ทราบค่าของข้อมูลที่แน่นอน จะเรียกปัญหานี้ว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบทราบค่าแน่นอน (Deterministic Optimization) ส่วนปัญหาที่ไม่สามารถทราบค่าข้อมูลได้อย่างแน่นอน จะเรียกว่า ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบทราบค่าไม่แน่นอน (Stochastic Optimization)

#### 2.1.5.6 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการหาค่าคำตอบของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งได้ 4 วิธี คือ

##### 2.1.5.6.1 วิธีการกราฟ (Graphical Method)

เป็นวิธีที่ต้องพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมการเป้าหมายและตัวแปรในการออกแบบ ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ ใช้ได้กับปัญหาหนึ่งมิติและสองมิติเท่านั้น กล่าวคือ จำนวนตัวแปรในการออกแบบสูงสุดที่จะใช้วิธีนี้ได้ต้องไม่เกินสองตัวแปร

##### 2.1.5.6.2 วิธีการวิเคราะห์ (Analytical Technique)

สิ่งสำคัญของปัญหาที่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ในการหาค่าคำตอบ คือ สมการความสัมพันธ์จะต้องสามารถหาอนุพันธ์ได้และความสัมพันธ์ของสมการต้องเป็นแบบต่อเนื่องเพราะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาคำตอบของปัญหาจะใช้วิธีหาค่าอนุพันธ์ของสมการเป้าหมาย ถ้าปัญหาเป็นแบบที่มีสมการขอบเขตจำกัดจะใช้วิธีตัวคูณของลากรองจ์ (Lagrange Multipliers) ทำการแปลงสมการขอบเขตให้เป็นเทอมที่เพิ่มขึ้นของสมการเป้าหมาย จะทำให้ปัญหากลายเป็นปัญหาที่ไม่มีสมการขอบเขตจำกัด

### 2.1.5.6.3 วิธีการทดลอง (Experimental Technique)

วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องแปลงปัญหาให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ เป็นการทดลองหาคำตอบทุกทางเลือกที่เป็นได้ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าคำตอบที่ได้หาคำตอบที่เหมาะสม วิธีการนี้เหมาะสมกับปัญหาที่ไม่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรในการออกแบบไม่มากนัก เพราะถ้าเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและตัวแปรในการออกแบบมีจำนวนมาก จะใช้ระยะเวลาในการหาคำตอบนานและมีค่าใช้จ่ายมากกว่าวิธีอื่น

### 2.1.5.6.4 วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Technique)

วิธีเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่ทำซ้ำเพื่อหาคำคำตอบที่เหมาะสมที่สุด สามารถแยกประเภทได้จากหลายลักษณะ คือ สามารถแบ่งได้จากลักษณะของสมการเป้าหมายและจากลักษณะของปัญหาที่มีเงื่อนไขบังคับหรือไม่มีเงื่อนไขบังคับ เป็นต้น

### 2.1.5.7 ประโยชน์ของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการออกแบบ

ประโยชน์ของการนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้หรือนำไปใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ในการออกแบบมีดังนี้ คือ

1. สามารถลดเวลาในการออกแบบได้ กล่าวคือ โดยทั่วไปในการออกแบบนั้นค่าของตัวแปรในการออกแบบแต่ละตัวเราไม่อาจทราบได้ เมื่อเราไม่ทราบค่าของตัวแปรในการออกแบบดังกล่าว ทำให้เราจำเป็นต้องสุ่มค่าตัวแปรในการออกแบบเพื่อนำไปออกแบบจริง โดยที่เราไม่ทราบว่าค่าตัวแปรนั้นจะทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นตามที่เรากำหนดไว้ตั้งแต่ต้นหรือไม่ ถ้าผลลัพธ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามต้องการ ก็ต้องทำการสุ่มค่าตัวแปรในการออกแบบใหม่ จะทำให้เสียเวลาในขั้นตอนนี้มากและทำให้ค่าใช้จ่ายมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อเรานำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการหาค่าของตัวแปรในการออกแบบที่เหมาะสม จะทำให้เราประหยัดเวลาได้และยังช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนนี้ลงได้อีกด้วย

2. สามารถนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปช่วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้มากยิ่งขึ้น

3. ทำให้ขั้นตอนในการออกแบบหรือขั้นตอนพัฒนาผลิตภัณฑ์ ใช้จำนวนคนและเครื่องจักรน้อยลงและสามารถลดค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ได้

4. สามารถนำประสบการณ์ของผู้ออกแบบหรือปัญหาที่พบมา ช่วยในการกำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขบังคับ เพื่อให้สมการความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นตัวแทนของปัญหาอย่างแท้จริง ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เราควรให้ความสำคัญและมีความระมัดระวังในการกำหนดขอบเขตและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของปัญหา เพราะถ้าไม่มีความเข้าใจในปัญหาหรือความต้องการที่แท้จริง คำตอบที่ได้จากการใช้วิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดก็ไม่สามารถแก้ปัญหาได้จริงหรือในบางครั้งไม่สามารถหาคำคำตอบได้

5. เมื่อนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการออกแบบ สามารถเปลี่ยนค่าตัวแปรในการออกแบบได้ที่หลายตัว และสามารถเปลี่ยนสมการเงื่อนไขบังคับได้ เพื่อให้สมการดังกล่าวแทนปัญหาอย่างแท้จริง ซึ่งถ้าเราใช้วิธีพล็อตกราฟหรือใช้ตารางจะมีความยุ่งยากมากและใช้เวลานาน เป็นต้น

#### 2.1.5.8 ข้อจำกัดของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรในการออกแบบ ถ้าจำนวนของตัวแปรในการออกแบบมีปริมาณมากจะเสียเวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นในการออกแบบควรคำนึงถึงจำนวนของตัวแปรในการออกแบบ ให้มีความเหมาะสมในการออกแบบแต่ละครั้ง เพราะบางตัวแปรก็มีผลต่อคำตอบของสมการเป้าหมายน้อยมาก

2. การกำหนดปัญหาถ้ากำหนดเป้าหมายไม่ถูกต้องและเข้าใจยาก เมื่อนำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการแก้ปัญหาจะใช้เวลาในการแก้ปัญหา นาน หรือในบางกรณีไม่สามารถหาคำคำตอบได้

3. วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะมีความยุ่งยากมาก เมื่อนำไปใช้กับปัญหาที่มีความสัมพันธ์ของสมการเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องและเป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นมาก ๆ จะทำให้หาคำคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ยาก และใช้เวลาในการคำนวณนานหรือในบางครั้งก็ไม่สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้

4. คำตอบที่ได้จากการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด อาจจะไม่ใช่ว่าคำตอบที่แท้จริง (Global solution) ของปัญหา ดังนั้นจะต้องทำการตรวจสอบให้แน่ชัด โดยทำการเปลี่ยนค่าเริ่มต้นหลายๆค่า เพื่อดูว่าคำตอบที่ได้ยังเป็นค่าเดิมหรือไม่ ถ้ายังเป็นค่าเดิมแสดงว่าคำตอบที่ได้เป็นค่าคำตอบที่แท้จริง

5. วิธีการทุกวิธีของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ไม่สามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาได้ทุกปัญหา เพราะวิธีการบางวิธีมีข้อจำกัดหรือมีขั้นตอนที่แตกต่างกันไปเช่น วิธี Quasi-Newton ใช้ได้กับปัญหาที่สามารถหาอนุพันธ์ได้เท่านั้น เป็นต้น ดังนั้นในการเลือกวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดวิธีนั้น ๆ ด้วย

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิศาล มุลอำคา [1] ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องเจาะพลาสติกโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณหาค่าสูงสุดของเสีयरูป, ความเค้น, การสั่นสะเทือน และ ความถี่ธรรมชาติของเครื่องเจาะแผ่นพลาสติก เพื่อให้ประสิทธิภาพของเครื่องเจาะใหม่ที่ออกแบบให้ดีขึ้น ในการคำนวณการเสีयरูปของเครื่องเจาะแผ่นพลาสติกที่ออกแบบใหม่นั้นได้ลดการเสีयरูปลงจากเดิม 95.72% ส่วนค่าของความเค้นสูงสุดลดลงจากเดิม 83.4% ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของความหนาที่เพิ่มขึ้นในบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่ง ในการหาค่าที่เหมาะสมนั้นจะพิจารณาค่าของการเสียรูป, ความเค้นสูงสุดและน้ำหนักของชิ้นส่วนของเครื่องเจาะแผ่นพลาสติกเพื่อให้ขนาดของการเสียรูปน้อยที่สุด ในส่วนของการสันสะเทือนซึ่งเครื่องเจาะแผ่นพลาสติกเดิมมีระยะการกระจัดสูงสุดอยู่ที่ 3.0105 มิลลิเมตร เมื่อออกแบบเครื่องเจาะแผ่นพลาสติกใหม่สามารถลดระยะการกระจัดลงได้เหลือ 0.8038 มิลลิเมตร และค่าของความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 1 ของเครื่องเจาะแผ่นพลาสติกเดิมอยู่ที่ 74.15 เฮิรท์สเปลี่ยนไปเป็น 135.90 เฮิรท์ส หลังจากที่ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่าง ๆ พบว่าวิธีการนี้สามารถใช้แก้ปัญหาเหล่านี้ได้เป็นอย่างดี

ปกรณ บुरาคร [2] ได้ทำการศึกษาวเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้ง ตามมาตรฐานการทดสอบโดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างที่นั้ง เพื่อออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างที่นั้ง จากผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างที่นั้งเกิดความเสียหายที่บริเวณเปลี่ยนหน้าตัดของพนักพิงและโครงสร้างเหล็กกล่องของฐานที่นั้ง จึงได้ปรับปรุงโดยออกแบบการทดลอง ได้ผลเป็นปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าความเค้นของพนักพิงลดลงคือ ขนาดของเหล็กกล่องที่โครงสร้างพนักพิงหลัก ระยะการเปลี่ยนหน้าตัดของเหล็กกล่องพนักพิง และความหนาของเหล็กกล่องตามลำดับ และการปรับปรุงขนาด ความหนาของเหล็กกล่องที่โครงสร้างฐานที่นั้ง และการลบมุมของส่วนเสริมของฐานที่นั้งส่งผลต่อความเค้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าความเค้นของฐานที่นั้งตามลำดับ จึงได้นำตัวแปรต่าง ๆ มาใช้ในการปรับปรุงและเพิ่มขนาดของส่วนเสริมของฐานที่นั้ง เพื่อให้ได้โครงสร้างที่นั้งที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบของกรมการขนส่งทางบก และได้ต้นแบบของโครงสร้างที่นั้งที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ

ปกรณ บुरาคร [3] ได้ทำการศึกษาวเคราะห์ความแข็งแรงและความแข็งตึงของโครงสร้างหลักรถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโครงฐานและโครงสร้างกระบะบรรทุกบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม และพิจารณาภายใต้สมมติฐานภาระกระทำแบบสถิตศาสตร์และสมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยเลือกใช้เอลิเมนต์แบบคาน สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ความแข็งแรงและความแข็งตึงนั้น ภาระที่กระทำต่อโครงสร้างเป็นภาระพื้นฐาน 4 รูปแบบ ได้แก่ ภาระการตัด ภาระการบิด ภาระกระทำในแนวยาว และภาระกระทำในแนวด้านข้าง โดยทำการยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบโครงสร้างทดสอบอย่างง่าย พบว่า ค่าความเค้นจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมจะสูงกว่าค่าความเค้นจากการทดสอบชิ้นงานจริงประมาณ 16.2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนระยะการเสียรูปนั้น ผลจากการทดสอบชิ้นงานจริงจะสูงกว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมช่วยทางวิศวกรรมประมาณ 16.4 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

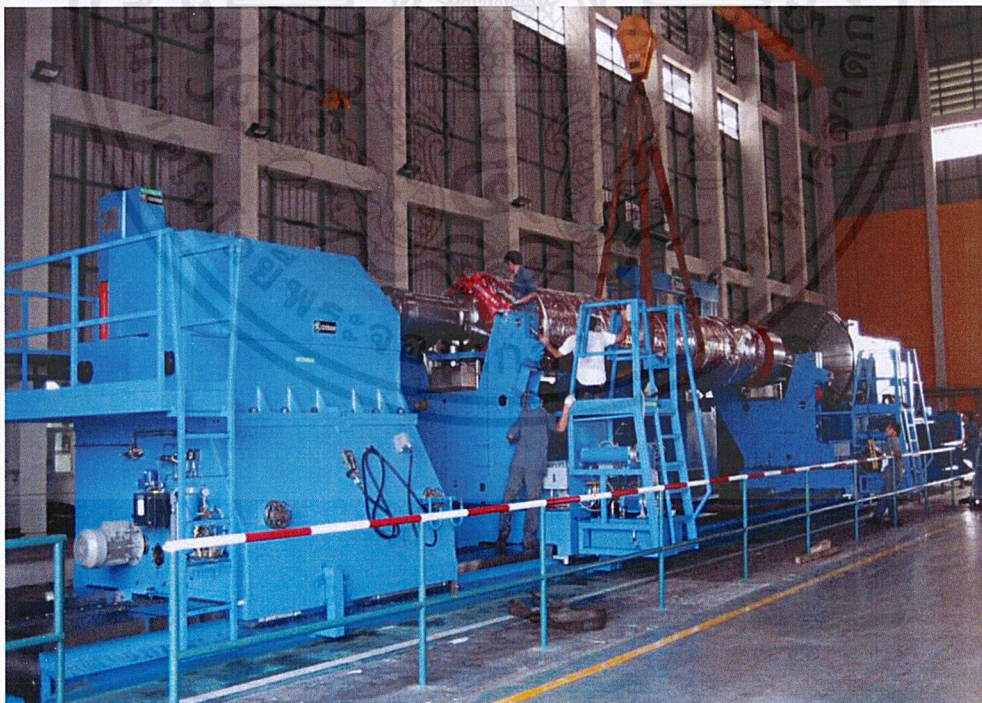
### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ศึกษาส่วนซัพพอร์ตของเครื่องจักร

จากการศึกษาส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในเครื่องกลึงใหญ่ ทำให้ทราบว่าส่วนประกอบที่สำคัญภายในเครื่องกลึงใหญ่มีส่วนประกอบดังนี้

1. Support
2. Head stock
3. Carriage

และได้ศึกษาจากเครื่องกลึงใหญ่ที่ใช้งานจริงสำหรับซ่อมบำรุงโรเตอร์ภายในโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ทำให้ทราบว่าส่วนซัพพอร์ตต้องมีความแข็งแรงมาก สามารถรองรับน้ำหนักของโรเตอร์ และในขณะที่ทำการกลึงโรเตอร์ ส่วนซัพพอร์ตต้องสามารถล็อกโรเตอร์ที่กำลังหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ไม่ให้เคลื่อนที่ออกจากส่วนซัพพอร์ตได้



รูปที่ 3.1 เครื่องกลึงใหญ่

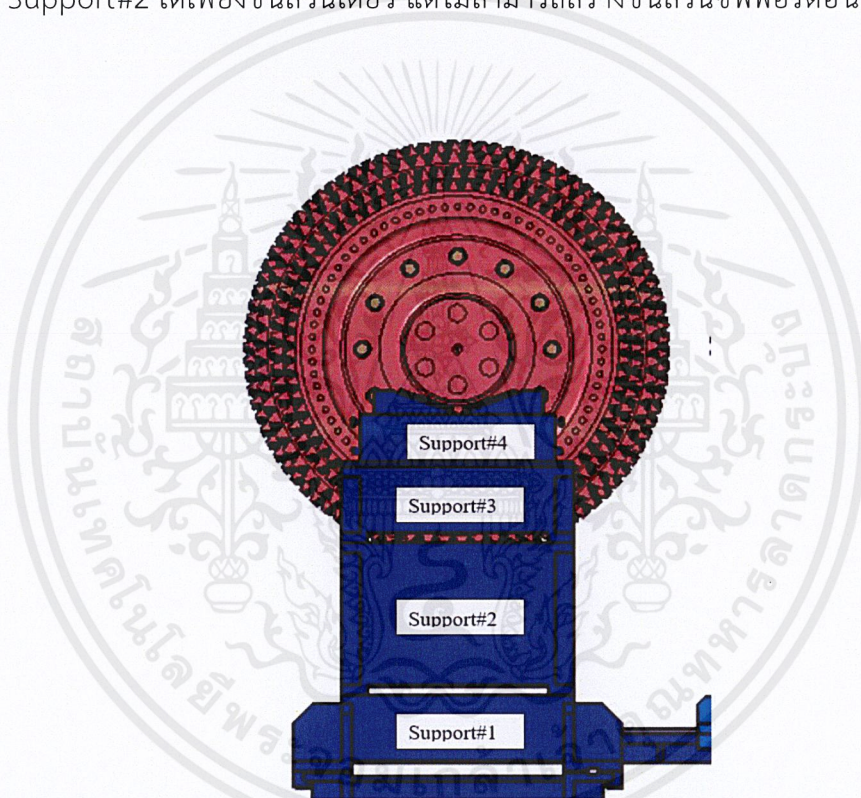
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ออกแบบส่วนซัพพอร์ทของเครื่องกลึง

เครื่องกลึงสำหรับการซ่อมโรเตอร์ที่โรงงานที่ทำการออกแบบมา เพื่อพัฒนาบริการการกลึง เจียรระโน อะไหล่และชิ้นส่วนของโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ณ ที่ตั้งโรงไฟฟ้านั้น ๆ จึงออกแบบให้ส่วนซัพพอร์ทของเครื่องกลึงต้องมีน้ำหนักไม่เกิน 5 ตัน โดยสามารถใช้รถโพล์คลิฟท์ยกได้ เพื่อให้การขนย้ายสะดวก

#### 3.2.1 การออกแบบส่วนซัพพอร์ทของเครื่องกลึง

การออกแบบและสร้างส่วนซัพพอร์ทของเครื่องกลึงสำหรับการซ่อมโรเตอร์ที่โรงงาน ซึ่งส่วนซัพพอร์ทสามารถแบ่งแยกได้เป็น 4 ชั้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แต่เนื่องจากมีระยะเวลาที่จำกัด จึงสามารถสร้างชิ้นส่วน Support#2 ได้เพียงชิ้นส่วนเดียว แต่ไม่สามารถสร้างชิ้นส่วนซัพพอร์ทอื่น ๆ ได้ครบทุกชิ้นส่วน



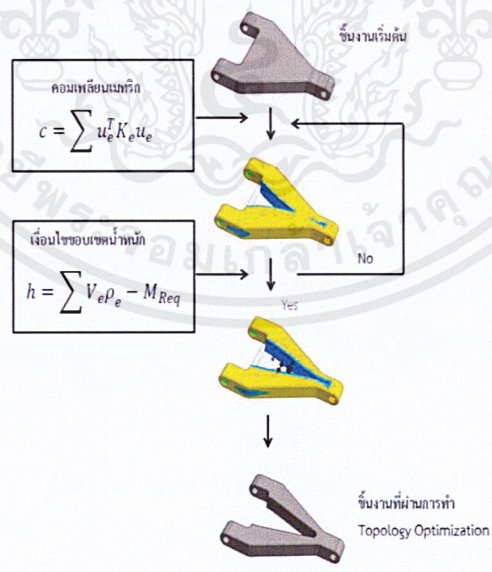
รูปที่ 3.2 แบบจำลองส่วนซัพพอร์ท

ในการออกแบบและสร้างส่วนซัพพอร์ทของเครื่องกลึงสำหรับการซ่อมโรเตอร์ที่โรงงานนั้นต้องออกแบบให้ซัพพอร์ทเป็นไปตามขอบเขต คือ สามารถรับน้ำหนักของโรเตอร์ได้ไม่น้อยกว่า 75 ตัน ซึ่งโดยทั่วไปโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมจะถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ภายใต้การกระทำของแรงหรือน้ำหนักบรรทุกทุกที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งในช่วงนี้วัสดุจะยังคงมีความแกร่งที่สูง และความเค้นที่เกิดขึ้นต้องมีค่าไม่เกิน Yield Strength ของวัสดุ เนื่องจากถ้าความเค้นมีค่าเกินกว่า Yield Strength ของวัสดุแล้วนั้น วัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ดังนั้นจึงต้องออกแบบส่วนซัพพอร์ทให้มีความเค้นไม่เกิน Yield Strength ของวัสดุ และมีความแกร่งสูง เพื่อให้เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียรูปได้น้อย คือ เมื่อมีแรงมากระทำแล้วเกิดระยะยืดหรือหดตัวน้อยและมีความสามารถต้านทานการเสียรูปสูง แต่วัสดุที่มีความแข็งที่สูงนั้นส่วนมากจะเป็นวัสดุตัน แต่ถ้านำวัสดุตันมาสร้างเป็นซัพพอร์ต เพื่อรองรับน้ำหนักของโรเตอร์ที่มีน้ำหนักมาก ยิ่งทำให้ต้องใช้วัสดุตันที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งวัสดุตันจะมีน้ำหนักที่มากตามขนาดไปด้วย ดังนั้นวัสดุตันอาจจะมีน้ำหนักเกินกว่า 5 ตัน ทำให้ไม่สามารถใช้รถไฟล์คลิฟท์ยกได้ จึงทำการเคลื่อนย้ายได้ลำบาก ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบให้ซัพพอร์ตเป็นวัสดุโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและระยะหดตัวเมื่อมีวัสดุมาวางต้องมิต้านน้อย

การออกแบบซัพพอร์ต โดยทำการสร้างแบบ 3D เพื่อเป็นต้นแบบ และวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง โดยใช้โปรแกรม ซึ่งได้นำแบบ Support#2 ที่ทางโรงงานเคยได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.4 โดยมีต้นแบบมาจากซัพพอร์ตของเครื่องกลึงใหญ่ดังรูปที่ 3.1 แต่เนื่องจากว่าแบบซัพพอร์ตนี้มีน้ำหนักเกิน 5 ตัน ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบ โดยมีวัสดุประสงค์เพื่อลดน้ำหนักซัพพอร์ตให้มีน้ำหนักไม่เกิน 5 ตันและมีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยใช้หลักการ Topology Optimization ในการคำนวณ ซึ่ง Topology Optimization คือ การหาค่าต่ำสุดของคอมเพลียนเมทริกซ์, [C] ซึ่งคอมเพลียนเมทริกซ์นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเนื้อของชิ้นงานนั้นเปลี่ยนแปลงไป ค่าของคอมเพลียนเมทริกซ์ที่ต่ำสุดนี้ก็คือจุดที่โครงสร้างมีความแข็งแรงสูงที่สุด โดยที่จะมีเงื่อนไขของการหยุดกระบวนการหาค่าคอมเพลียนเมทริกซ์คือเมื่อเนื้อของชิ้นงานเหลือน้ำหนักตามที่ต้องการนั้นก็จะหยุดกระบวนการทำ Optimize ทั้งหมด



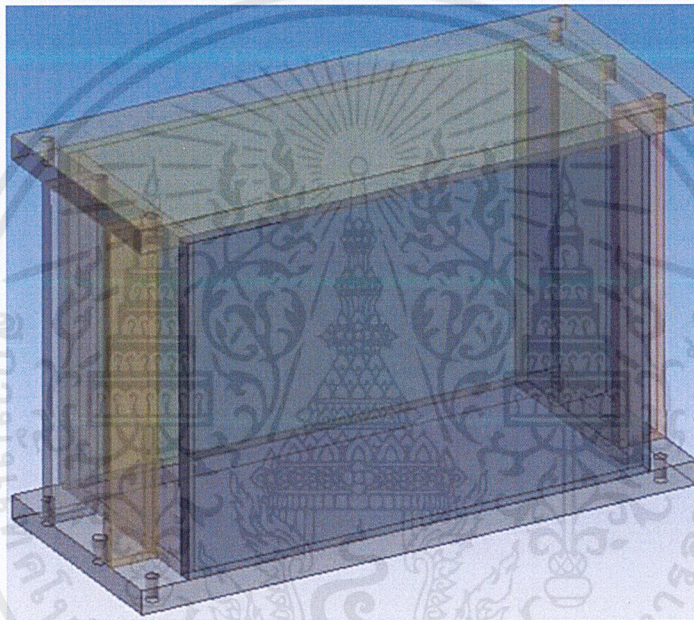
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณ Topology Optimization

โดยการทำ Optimization นั้นจะเป็นการหารูปทรงที่มีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงของชิ้นงานตามที่ต้องการ ในการกำหนดน้ำหนักให้กับชิ้นงานเพื่อเป็นขอบเขตในการทำ Optimization จะกำหนดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงหรือกำหนดเป็นค่าน้ำหนักที่ต้องการ การกำหนดขอบเขตน้ำหนักที่น้อยเกินไป ส่งผลให้ไม่สามารถหารูปทรงได้ ในการกำหนดนั้นให้กำหนดที่ละน้อย แล้วปรับรูปทรงแล้วทำ Optimize อีกครั้งจนได้รูปทรงชิ้นงานและน้ำหนักที่ต้องการ และยังมีขอบเขตที่ต้องกำหนดอีก คือ ความแข็งแรงของ ชิ้นงาน การกำหนดความแข็งแรงนั้นสามารถกำหนดได้จากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ไม่ว่าจะเป็น Yield Strength หรือ Tensile Strength ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานของชิ้นงานที่ออกแบบ

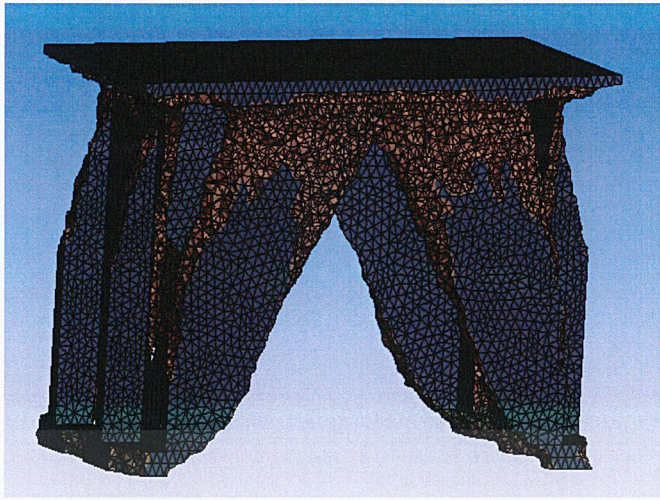
- ซึ่งขอบเขตเงื่อนไขมีดังนี้
1. เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง 50%
  2. Yield Strength 250 MPa



รูปที่ 3.4 แบบซัพพอร์ตเดิมของ Support#2

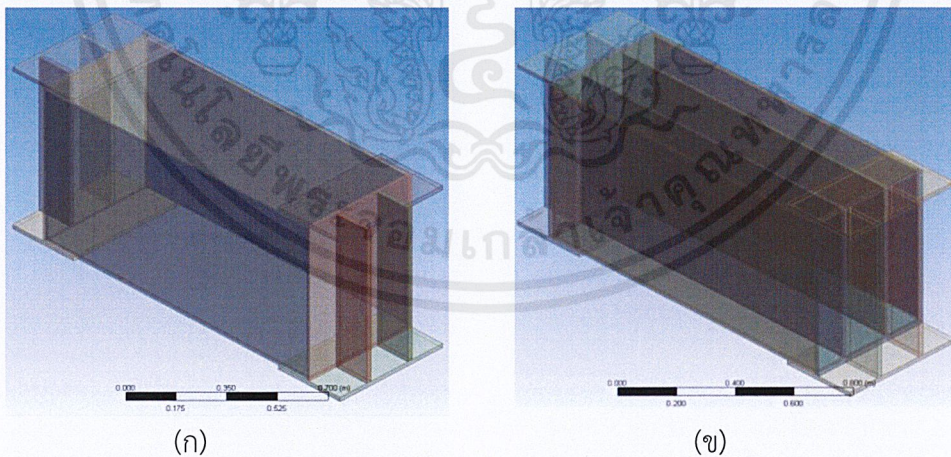
เราจะทำการวิเคราะห์ในโปรแกรม โดยใส่ค่าขอบเขตเงื่อนไขข้างต้นในโปรแกรม แล้วทำการ Simulation จะได้รูปทรงที่ทำการ Topology Optimization ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แบบจำลองที่ทำการ Topology Optimization

รูปทรงที่ทำการ Topology Optimization โดยทำการลดน้ำหนักและยังคงความแข็งแรงในโครงสร้างได้เหมือนเดิม จะนำมาใช้ในการออกแบบซัพพอร์ตใหม่ โดยทำการปรับปรุงจากรูปทรงที่ทำการ Topology Optimization เนื่องจากรูปทรงนั้นยากสำหรับการสร้างเป็นชิ้นงานจริง ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงแบบให้ง่ายขึ้นสำหรับการสร้างเป็นชิ้นงาน โดยทำการออกแบบซัพพอร์ตใหม่ได้ทั้งหมด 4 แบบ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง เพื่อศึกษาว่าจากแบบซัพพอร์ตทั้งหมด 4 แบบ แบบใดที่เหมาะสมที่สุด



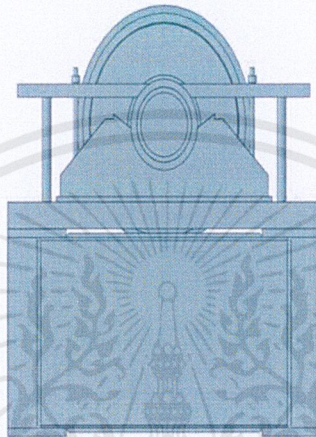
รูปที่ 3.6 แบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ของ Support#2 (ก) แบบไม่มี stiffener (ข) แบบมี stiffener

### 3.2.2 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ต

ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเพื่อหาผลลัพธ์ก่อนการสร้างจำเป็นต้อง เนื่องจากเป็นการลดต้นทุนการผลิต รวมทั้งการหาตำแหน่งที่อาจเกิดความเสียหายในขณะที่รองรับน้ำหนัก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

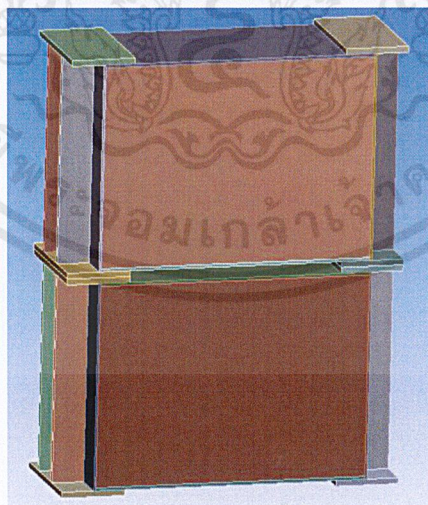
จากวัตถุที่วางบนตัวซัพพอร์ตได้ ดังนั้นจึงให้ความสนใจการเสียรูปของซัพพอร์ต เพื่อให้ได้ ซัพพอร์ตที่ดี ก่อนที่จะทำการสร้างจริง และเพื่อศึกษาว่าจากแบบซัพพอร์ตทั้งหมด 4 แบบที่ทำการออกแบบ แบบใดที่เหมาะสมที่สุด

เนื่องจากซัพพอร์ตไม่ได้รับน้ำหนักของโรเตอร์โดยตรง เนื่องจากโรเตอร์ จะวางบน V block เพื่อล๊อคไม่ให้โรเตอร์ขยับหรือเคลื่อนที่ได้ และ V block จะวางลงบนซัพพอร์ตอีกที ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองสำหรับการวางโรเตอร์

ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงทำการใช้ซัพพอร์ต 2 ตัวในการหามลล์พ์ ดังรูปที่ 3.8 โดยสมมติให้ซัพพอร์ตตัวบนเป็น V block และสนใจมลล์พ์ของซัพพอร์ตตัวล่าง

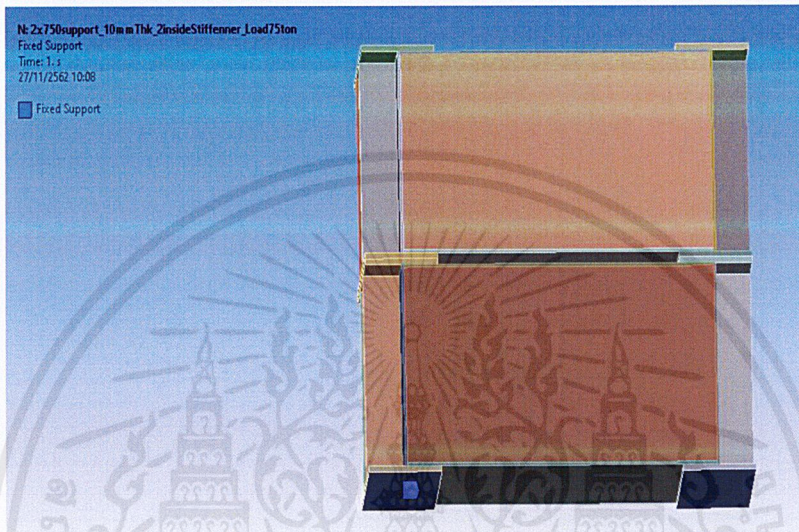


รูปที่ 3.8 แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.1 การกำหนดตำแหน่งของจุดจับยึด

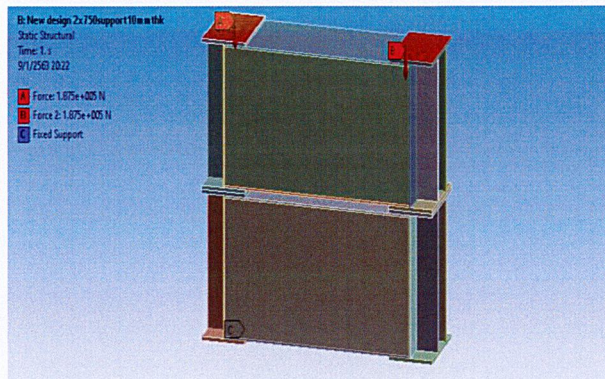
เนื่องจากสภาพจริงของซีพพอร์ตจะมีน้ำหนักของตัวเอง และซีพพอร์ตตั้งอยู่กับพื้น ไม่มีการเคลื่อนที่จึงพิจารณาให้ฐานของซีพพอร์ตตัวล่างไม่มีการเคลื่อนที่หรือหมุนตัวรอบแกนใด ๆ จึงกำหนดให้พื้นผิวของฐานทั้งสองพื้นผิว มีระยะการเคลื่อนที่มีค่าเป็น  $x = y = z = 0$  และมีการหมุนรอบแกนของ  $x, y, z$  มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของจุดจับยึด

### 3.2.2.2 การกำหนดค่าของแรงที่กระทำกับซีพพอร์ต

การออกแบบและสร้างส่วนซีพพอร์ตของเครื่องกลึงสำหรับการซ่อมโรเตอร์ที่หน้างานนั้นต้องออกแบบให้ซีพพอร์ตเป็นไปตามขอบเขต คือ สามารถรับน้ำหนักของโรเตอร์ได้ไม่น้อยกว่า 75 ตัน และใช้ซีพพอร์ต 2 ตัวในการรับน้ำหนักของโรเตอร์ ดังนั้นแรงที่มากระทำกับซีพพอร์ต คือ หนึ่งในสองส่วนของภาระจากน้ำหนักของโรเตอร์ที่มีขนาดประมาณ 375,000 นิวตัน โดยแรงที่มากระทำกับพื้นผิวของซีพพอร์ตตัวบนถึง 2 พื้นผิว ซึ่งคือพื้นที่ที่รับน้ำหนักของโรเตอร์โดยตรง เนื่องจากสมมติให้เป็น V block จึงมีการแบ่งแรงที่มากระทำกับพื้นผิวของซีพพอร์ตตัวบนทั้ง 2 พื้นผิวให้แรงมีขนาดเท่ากัน คือ 187,500 นิวตัน



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของแรงที่มากระทำกับชัฟพอร์ด

### 3.2.2.3 คุณสมบัติของวัสดุให้กับแบบจำลอง

คุณสมบัติวัสดุที่กำหนดให้แบบจำลองนั้นจะเป็นตัวบอกถึงการเสียรูป การต้านแรงต่างๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) โดยจะไม่พิจารณาการขยายตัวของวัสดุเนื่องจากความร้อน ในการคำนวณหาค่าของการเสียรูปของชัฟพอร์ดนี้ จะใช้เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ (Structural Steel) ที่มีข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุในโปรแกรม โดยมีค่าจำเพาะดังนี้

ความหนาแน่น (Density)	7850	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Ultimate Strength	460	MPa
Yield Strength	250	MPa
Young's Modulus	200	GPa
Poisson's Ratio	0.3	

### 3.2.2.4 การกำหนดเอลิเมนต์ให้กับแบบจำลอง

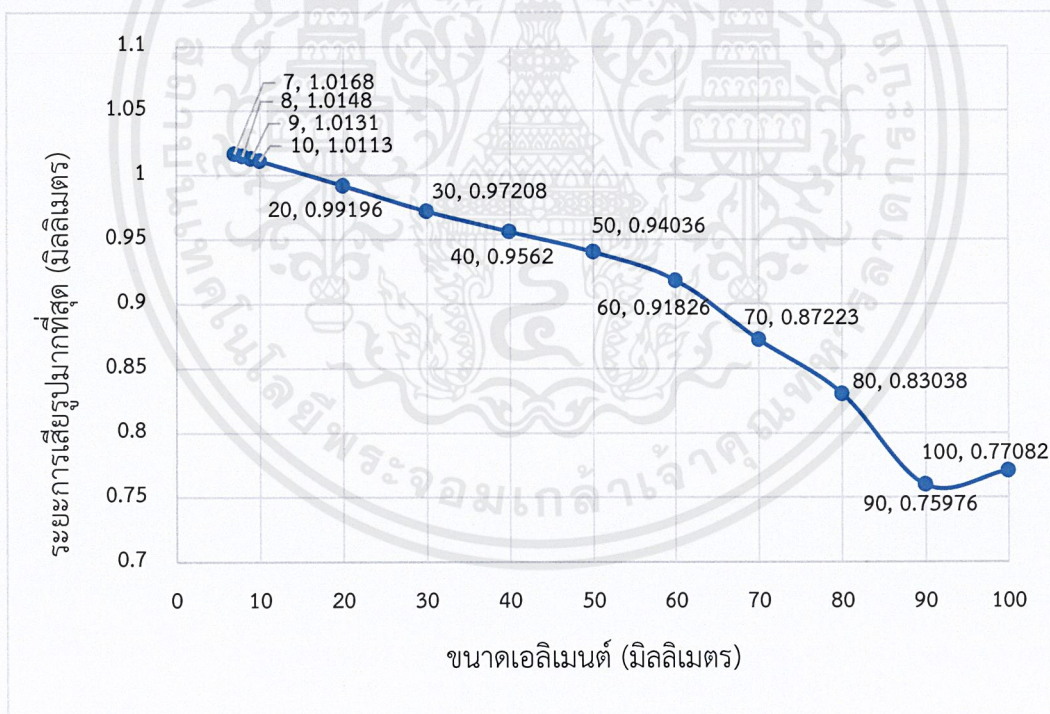
ในการกำหนดเอลิเมนต์มีความสำคัญพอสมควรที่ส่งผลถึงผลลัพธ์ตามลักษณะของเอลิเมนต์ เอลิเมนต์แบบสามมิติที่นิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติมีอยู่สองแบบคือ เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) และเอลิเมนต์ทรงหกหน้า (Hexahedral element) ในที่นี้จะใช้เอลิเมนต์แบบ Hexahedral Element ขนาด 10 มิลลิเมตร ในแบบจำลองชัฟพอร์ด ดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การสร้างเอลิเมนต์ของแบบจำลองซีฟพอร์ต

ขนาดเอลิเมนต์มีความสำคัญต่อผลลัพธ์ ยิ่งใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กมากเท่าไร จะได้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดมากตามไปด้วย ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง ซีฟพอร์ตด้วยเอลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ เพื่อหาขนาดเอลิเมนต์ที่ให้ผลลัพธ์ที่ละเอียดและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์



กราฟที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเอลิเมนต์กับการเสีรูปร่างมากที่สุดของแบบจำลอง ซีฟพอร์ต

จากกราฟที่ 3.1 โดยทำการวิเคราะห์จนได้ผลลัพธ์ของระยะการเสีรูปร่างมากที่สุดของขนาดเอลิเมนต์ต่าง ๆ ซึ่งขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 7 – 10 มิลลิเมตร มีค่าระยะการเสีรูปร่างมากที่สุดที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก และ ยิ่งใช้ขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กมากเท่าไร จะต้องใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์นานมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

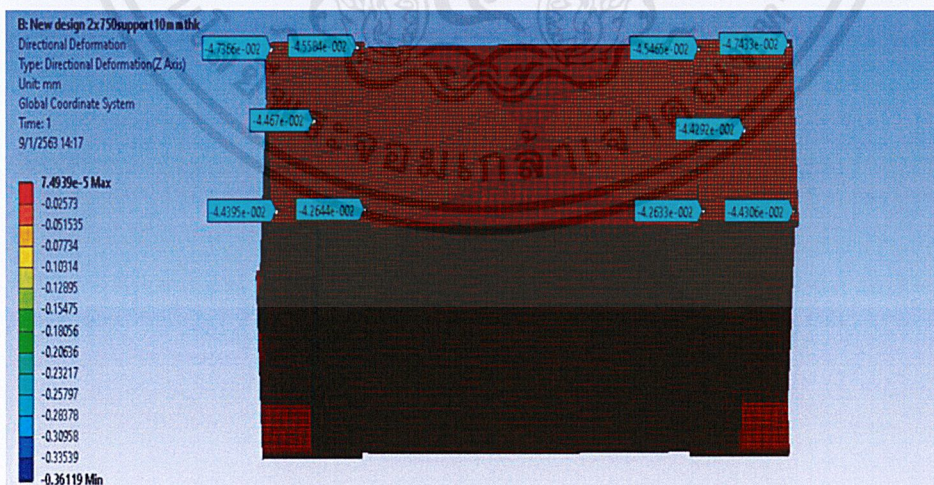
เท่านั้น ดังนั้นจึงทำการเลือกขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ต คือ 10 มิลลิเมตร เนื่องจากได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กกว่า และใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ไม่นานมากนัก

### 3.2.2.5 ผลลัพธ์จากการคำนวณค่าการเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ต

การเสีรูปของซัพพอร์ตที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) ดังรูปด้านล่าง แต่เราจะสนใจแค่เพียงซัพพอร์ตตัวล่างเท่านั้น โดยสนใจการเสีรูปของพื้นผิวบน 2 พื้นผิว และทำการสุ่มเอลิเมนต์ในพื้นที่ 2 พื้นผิวมา 5 เอลิเมนต์ รวมทั้งสิ้น 10 เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของการเสีรูปของแบบซัพพอร์ต 4 แบบ

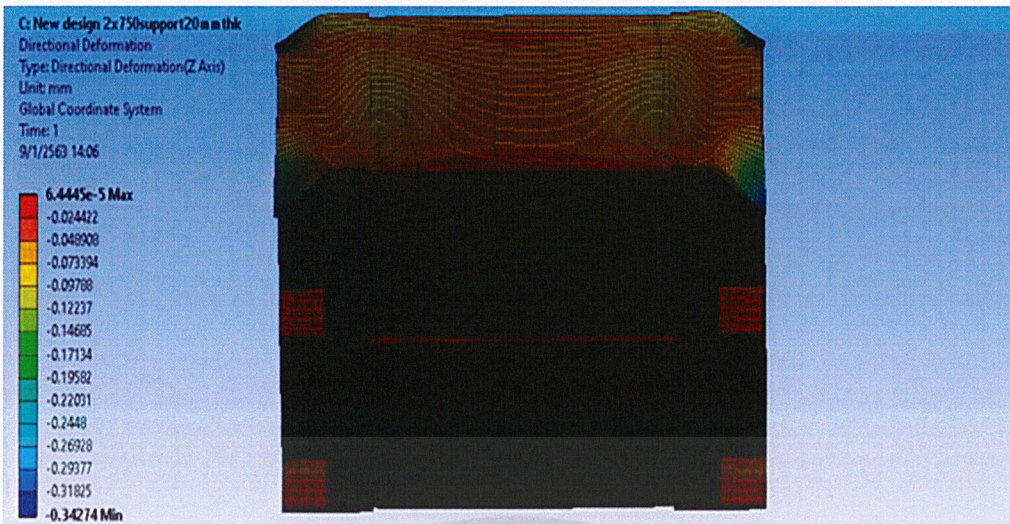


รูปที่ 3.12 การเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร

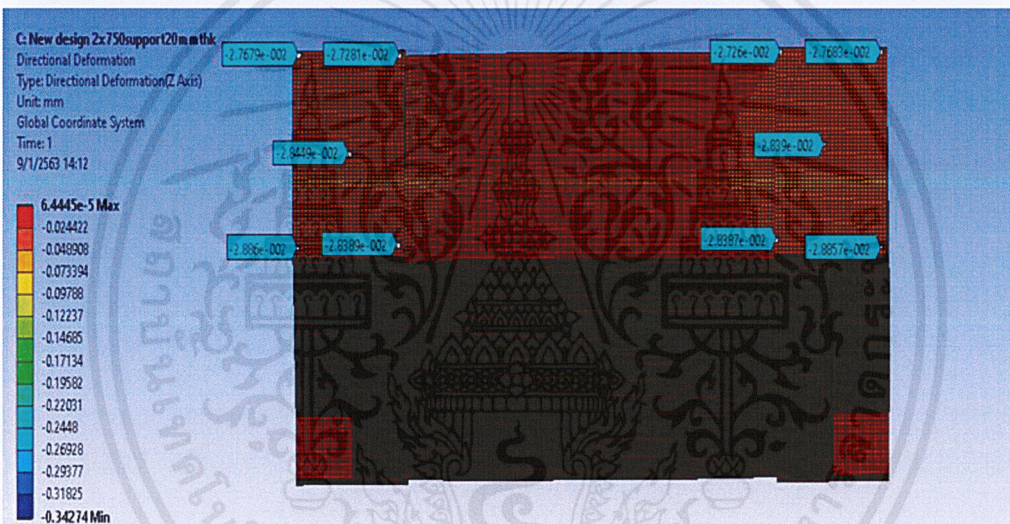


รูปที่ 3.13 การสุ่มค่าการเสีรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร

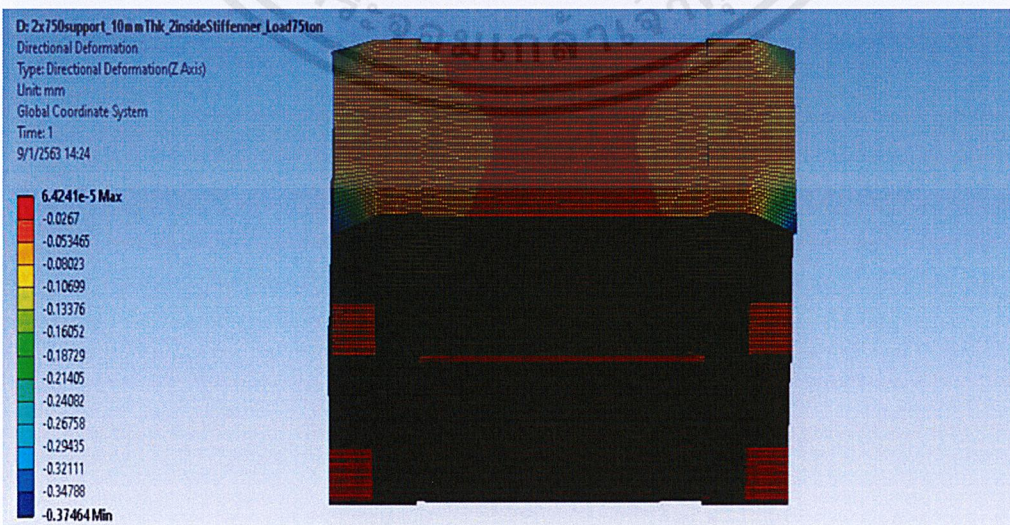
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร

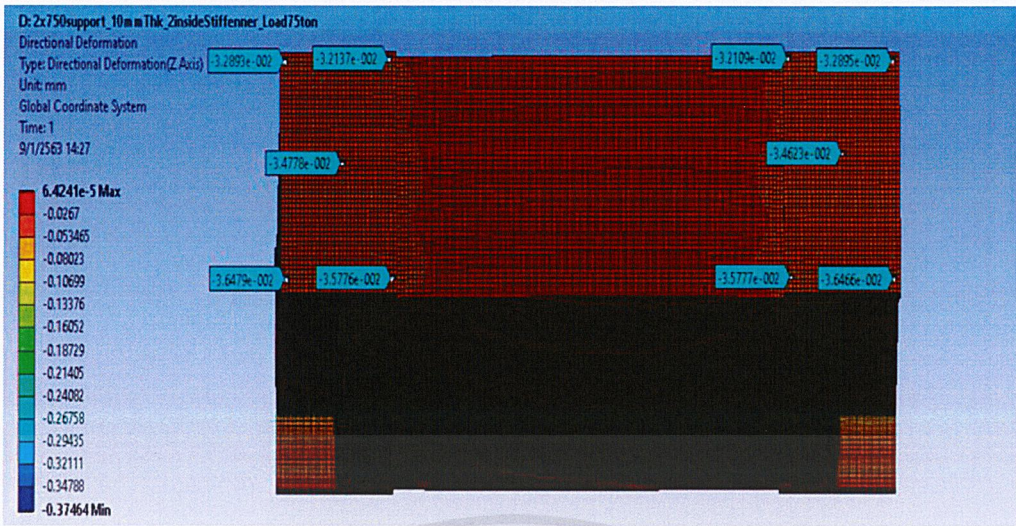


รูปที่ 3.15 การสุ่มค่าการเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.16 การเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร

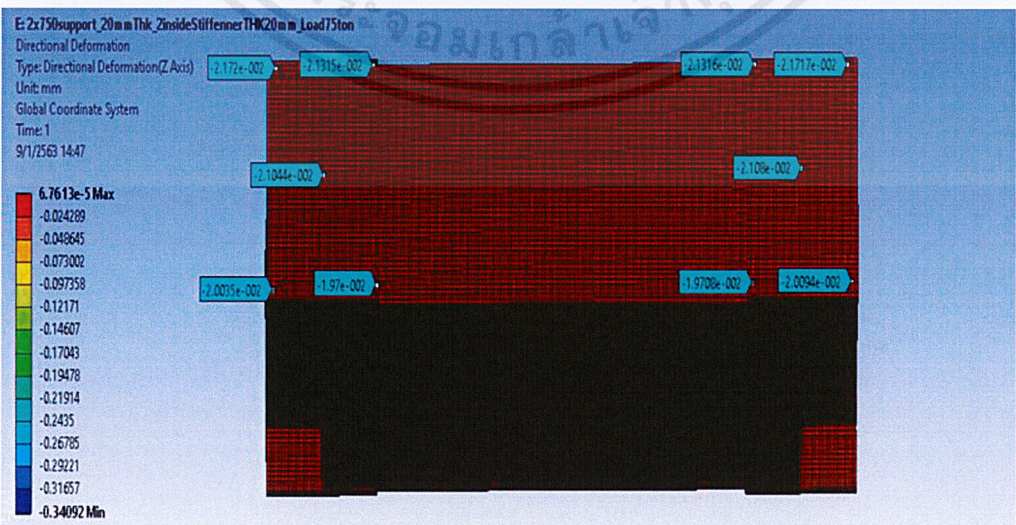
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 การสุ่มค่าการเสียรูปของแบบจำลองซีพพอร์ดแบบมี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.18 การเสียรูปของแบบจำลองซีพพอร์ดแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 การสุ่มค่าการเสียรูปของแบบจำลองซีพพอร์ดแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างจนได้ผลลัพธ์จากการคำนวณของแบบจำลองซัพพอร์ตทั้งหมด 4 แบบ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ดังรูปข้างต้น โดยทำการหาค่าเฉลี่ยของการเสียรูปของพื้นผิวบน 2 พื้นผิวที่ทำการสุ่มเอลิเมนต์ในพื้นที่ผิว 2 พื้นผิวมา 5 เอลิเมนต์ รวมทั้งสิ้น 10 เอลิเมนต์ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความแกร่ง โดยหาว่าแบบใดจากทั้งหมด 4 แบบที่ควรใช้ในการนำไปสร้างเป็นซัพพอร์ตจริงมากที่สุด โดยที่มีความแกร่งสูงสุด สามารถเปรียบเทียบเป็นข้อมูลได้ดังตามตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างโดยใช้โปรแกรมของแบบซัพพอร์ต 4 แบบ

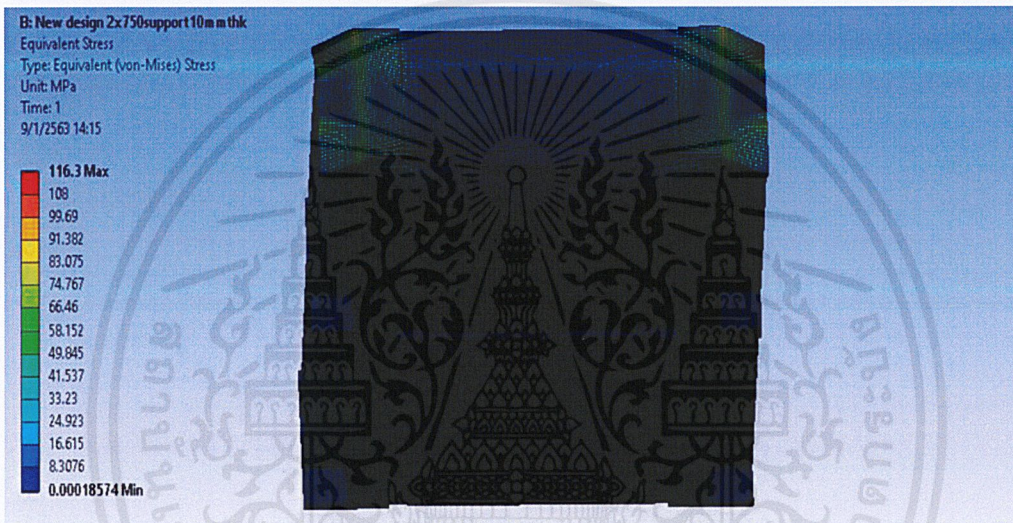
	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4
	ไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร	ไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร	มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร	มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	455.96	735.45	594.62	1000.5
ภาระ (นิวตัน)	375000	375000	375000	375000
ภาระ (กิโลกรัม)	38226	38226	38226	38226
ระยะการเสียรูปใน แนวแกน z (มิลลิเมตร)	0.0404	0.0252	0.0307	0.0188
ความแกร่ง (Stiffness) ในแนวแกน z (กิโลกรัม/มิลลิเมตร)	945068	1514645	1243265	2037253
ความแกร่งจำเพาะ (Specific stiffness) (กิโลกรัม/มิลลิเมตร/ กิโลกรัมซัพพอร์ต)	2072.70	2059.48	2090.86	2036.2

จากตารางที่ 3.1 ที่แสดงการเปรียบเทียบแบบซัพพอร์ต 4 แบบ พบว่าแบบที่ 4 มีความแกร่งสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้วนั้น แบบที่ 3 มีความแกร่งต่อกิโลกรัมสูงสุด คือ คุ้มค่าที่สุดในการสร้างซัพพอร์ตน้อยที่สุด แต่ได้ความแกร่งสูงสุด ดังนั้นจึงเป็นแบบที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง

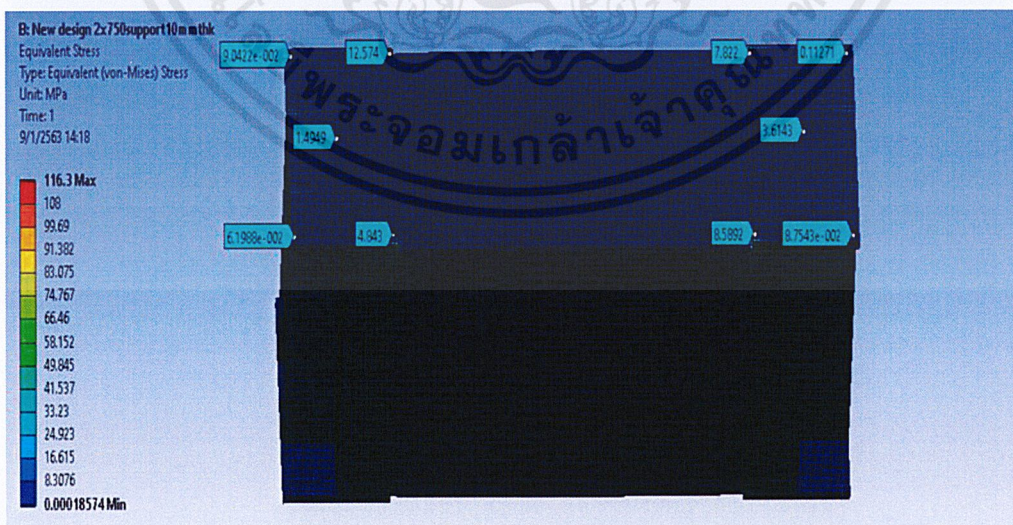
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.6 ผลลัพธ์จากการคำนวณหาค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ต

ผลลัพธ์ของค่าความเค้นจะพิจารณาความเค้น Von Mises สูงสุดที่เกิดขึ้นเป็นหลัก จากรูปด้านล่างจะสามารถพิจารณาได้จากแถบสีที่แสดง ซึ่งสีแดงจะเป็นค่าของบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงและสีน้ำเงินจะเป็นบริเวณที่มีค่าของความเค้นต่ำ แต่เราจะสนใจแค่เพียงซัพพอร์ตตัวกลางเท่านั้น จะพบว่าซัพพอร์ตตัวกลางมีค่าความเค้นแสดงเพียงแค่น้ำเงินเท่านั้น ซึ่งจากแถบสีที่บอกค่าความเค้นและทำการซูมเอลิเมนต์เหมือนกับการหาค่าเฉลี่ยการเสียรูป ทำให้ทราบว่าซัพพอร์ตมีค่าความเค้นอยู่ในช่วง 16.637 – 0.00018574 MPa

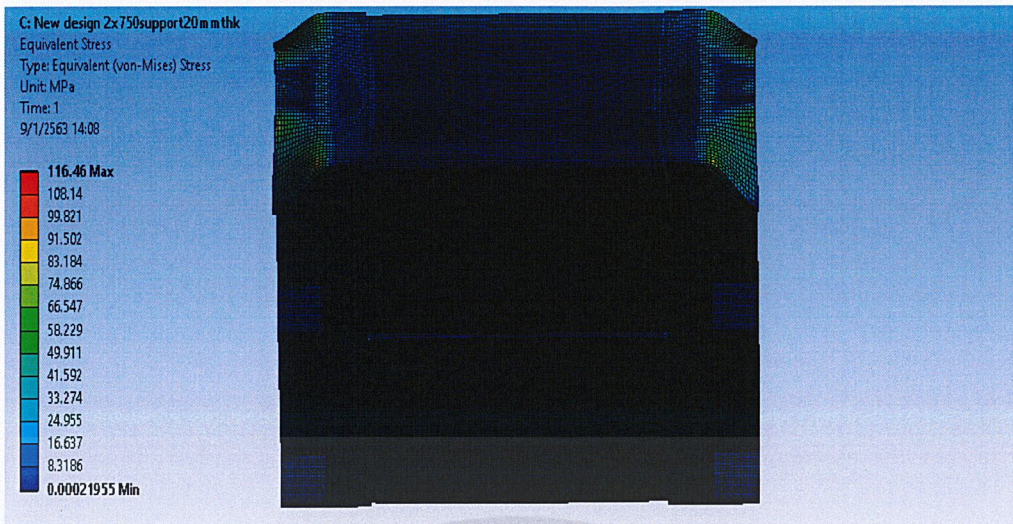


รูปที่ 3.20 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร

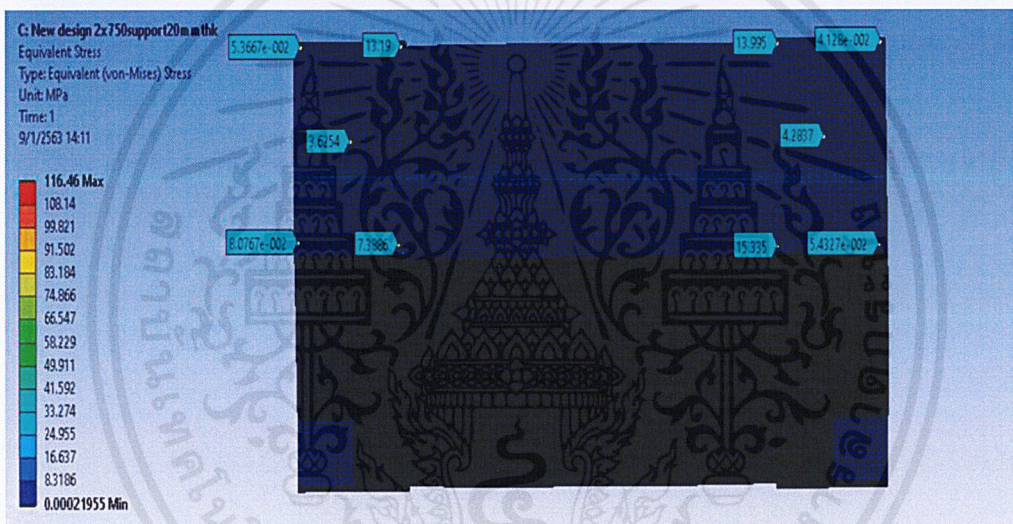


รูปที่ 3.21 การซูมค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร

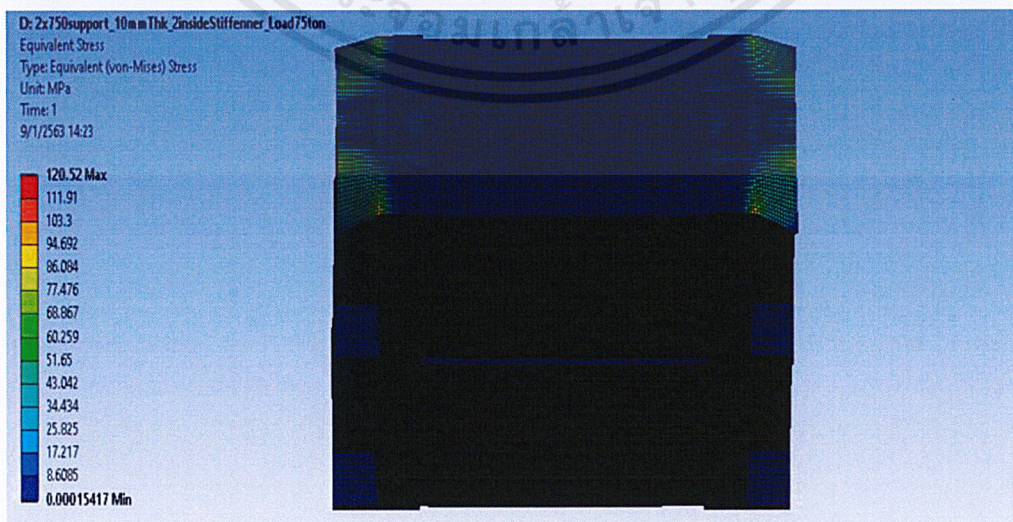
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 ค่าความเค้นของแบบจำลองซีพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร

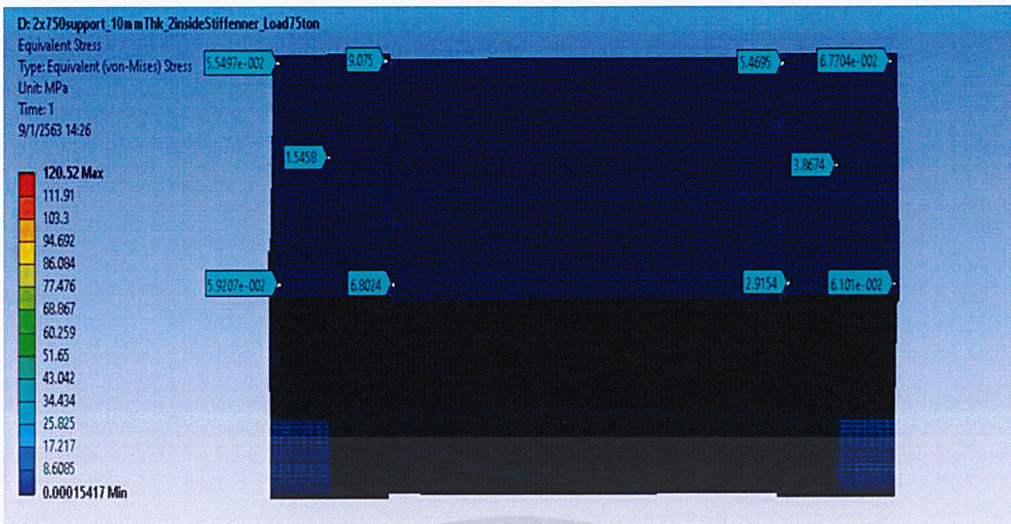


รูปที่ 3.23 การซูมค่าความเค้นของแบบจำลองซีพพอร์ตแบบไม่มี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.24 ค่าความเค้นของแบบจำลองซีพพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร

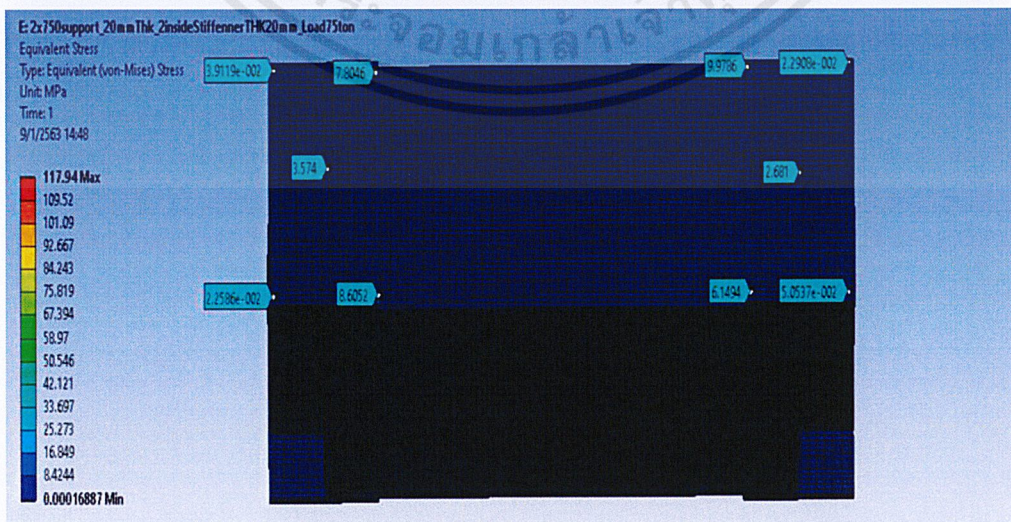
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 การสุ่มค่าความเค้นของแบบจำลองซีฟพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.26 ค่าความเค้นของแบบจำลองซีฟพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร

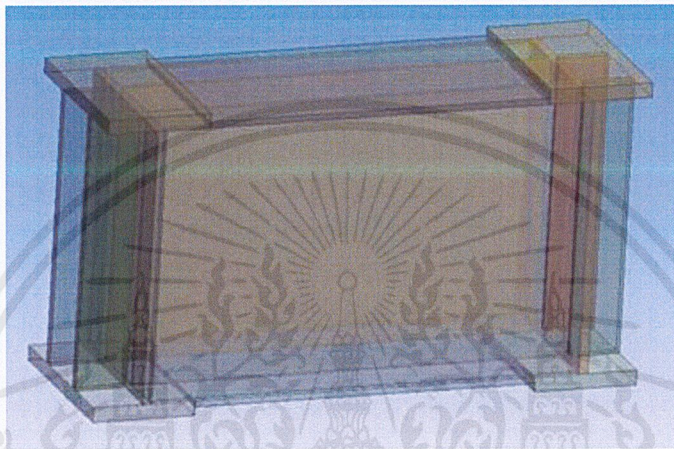


รูปที่ 3.27 การสุ่มค่าความเค้นของแบบจำลองซีฟพอร์ตแบบมี Stiffener ขนาด 20 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.7 การออกแบบซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง

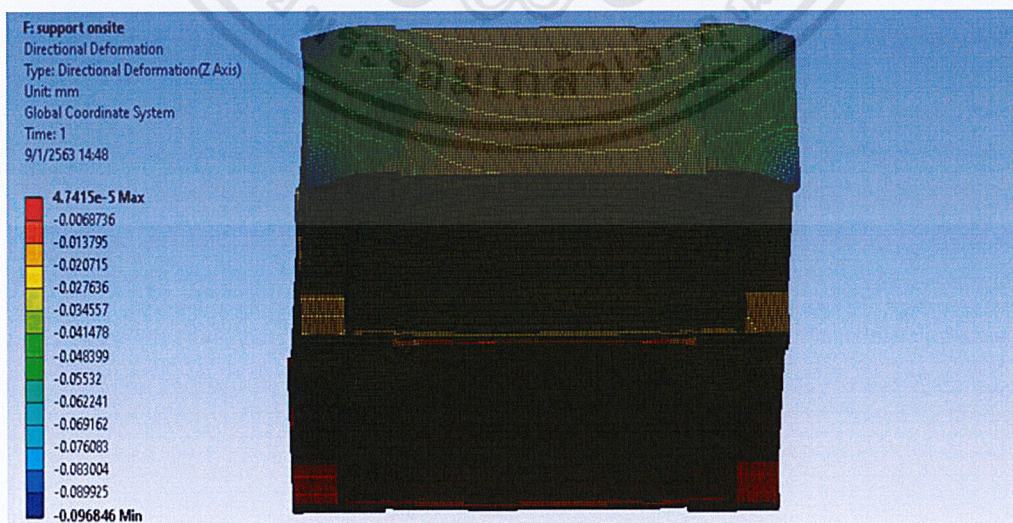
เนื่องจากการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ ไม่สามารถที่จะดำเนินการเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ได้ จึงจำเป็นต้องทำการแก้ไขแบบจำลองใหม่ตามที่ได้ดำเนินการมาก่อนหน้านี้ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่ถูกต้อง เป็นไปตามวัสดุที่มีอยู่ และเพื่อให้ง่ายแก่การสร้าง แล้วนำแบบจำลองใหม่ที่ได้ทำการแก้ไขแล้ว ไปวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าการเสียรูป, ความเค้น เหมือนกับข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 3.28 แบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง

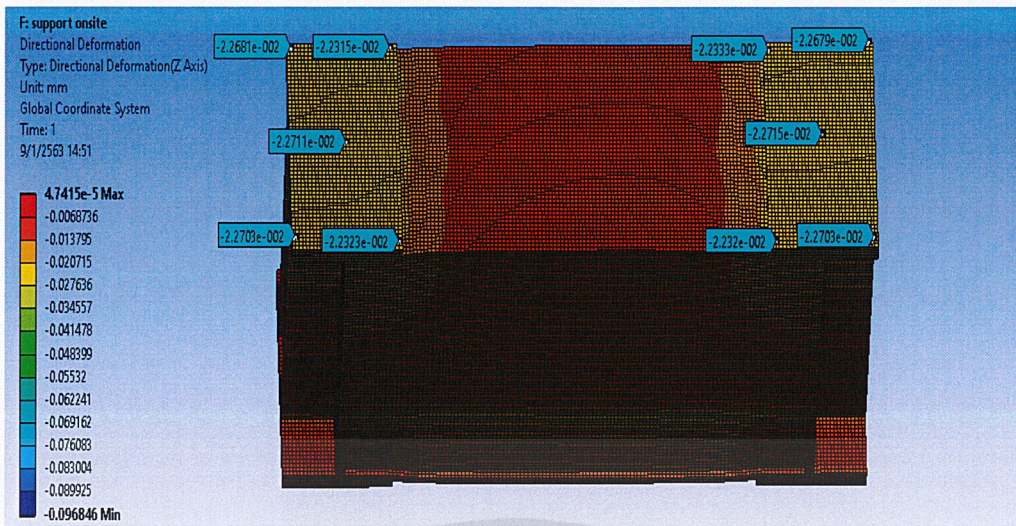
### 3.2.2.8 ผลลัพธ์ของการเสียรูปและความเค้นของซัพพอร์ตที่จะสร้างขึ้นจริง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่จะสร้างขึ้นจริงเพื่อให้ง่ายแก่การสร้างซัพพอร์ตนั้นจะมีลักษณะของการคำนวณคล้ายกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังรูปด้านล่าง

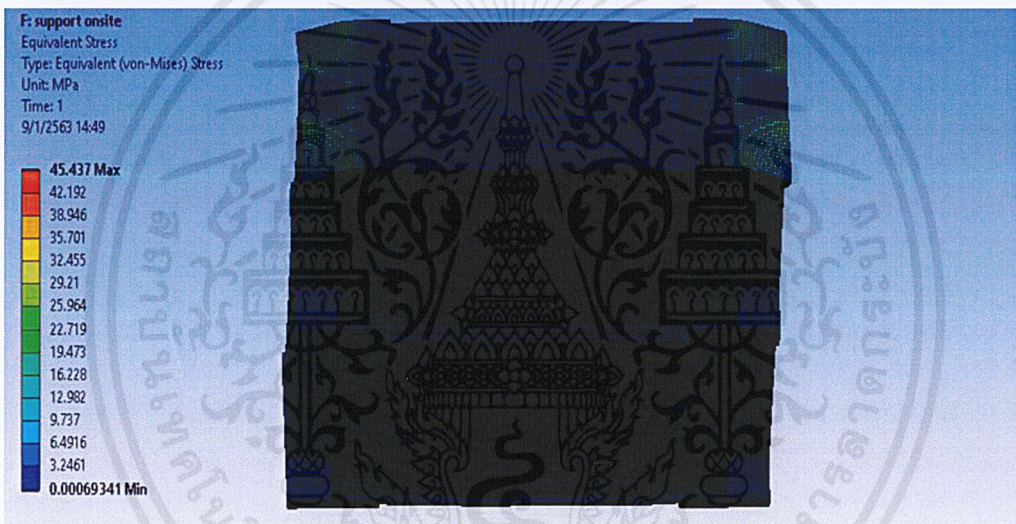


รูปที่ 3.29 การเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง

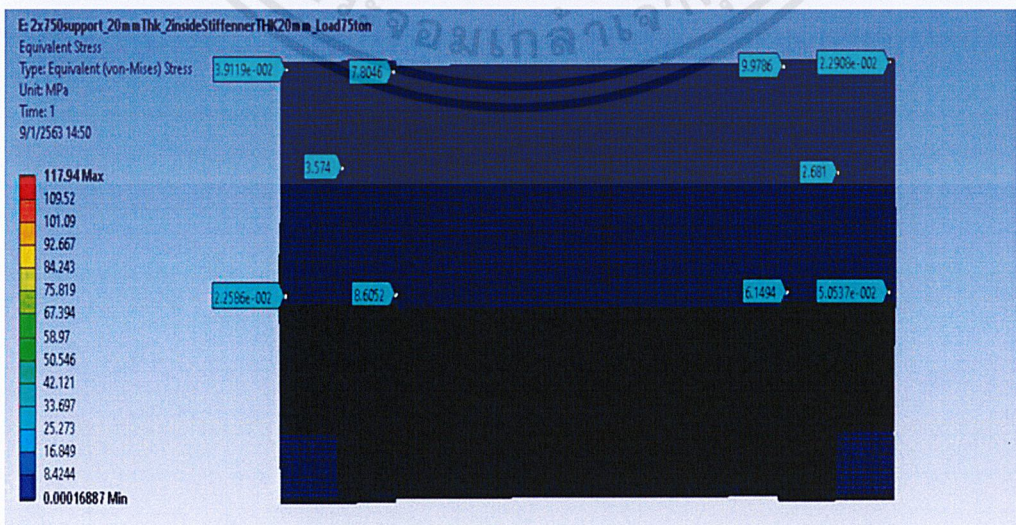
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 การสุ่มค่าการเสียรูปของแบบจำลองซีฟพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง



รูปที่ 3.31 ค่าความเค้นของแบบจำลองซีฟพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง



รูปที่ 3.32 การสุ่มค่าความเค้นของแบบจำลองซีฟพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างจนได้ผลลัพธ์จากการคำนวณของแบบจำลองซัพพอร์ตใหม่ที่จะสร้างขึ้นจริง โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ดังรูปข้างต้น โดยทำการหาค่าเฉลี่ยของการเสียรูปของพื้นผิวบน 2 พื้นผิวที่ทำการสุ่มเอลิเมนต์ในพื้นที่ผิว 2 พื้นผิวมา 5 เอลิเมนต์รวมทั้งสิ้น 10 เอลิเมนต์ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความแกร่ง และการหาค่าความเค้น โดยทำการสุ่มเอลิเมนต์เหมือนกับการหาค่าเฉลี่ยการเสียรูป ทำให้ทราบว่าซัพพอร์ตมีค่าความเค้นอยู่ในช่วง 16.849 – 0.0016887 MPa

**ตารางที่ 3.2** แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างโดยใช้โปรแกรมของแบบซัพพอร์ตที่เหมาะสมสำหรับนำไปสร้างกับแบบซัพพอร์ตที่จะสร้างขึ้นจริง

	แบบซัพพอร์ตที่เหมาะสม สำหรับนำไปสร้าง	แบบซัพพอร์ตที่จะ สร้างขึ้นจริง
น้ำหนัก (กิโลกรัม)	594.62	889.91
ภาระ (นิวตัน)	375000	375000
ภาระ (กิโลกรัม)	38226	38226
ระยะการเสียรูปในแนวแกน z (มิลลิเมตร)	0.0307	0.0203
ความแกร่ง (Stiffness) ในแนวแกน z (กิโลกรัม/มิลลิเมตร)	1243265	1885112
ความแกร่งจำเพาะ (Specific stiffness) (กิโลกรัม/มิลลิเมตร/กิโลกรัมซัพพอร์ต)	2090.86	2118.32

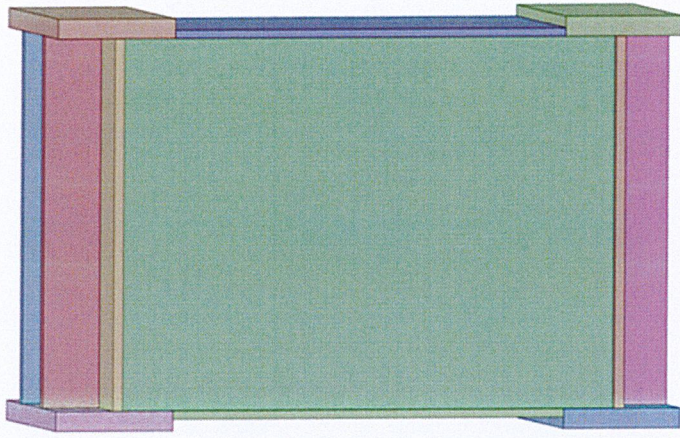
### 3.3 วางแผนขั้นตอนการผลิตและจัดซื้อวัสดุ

หลังจากที่ได้ทำการแก้ไขแบบเพื่อให้ง่ายแก่การสร้างจริง และทำการวิเคราะห์จนได้ผลลัพธ์ออกมาตรงตามเป้าหมายที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว จากนั้นจะนำแบบที่ได้มาสร้างซัพพอร์ตจึงต้องมีการวางแผนและคำนวณว่าต้องใช้วัสดุชนิดใด ขนาดและความหนาไต่บ้าง เพื่อให้ทราบว่าต้องสั่งซื้อวัสดุใด และปริมาณเท่าใด

#### 3.3.1 แผนการสำหรับขั้นตอนการผลิต

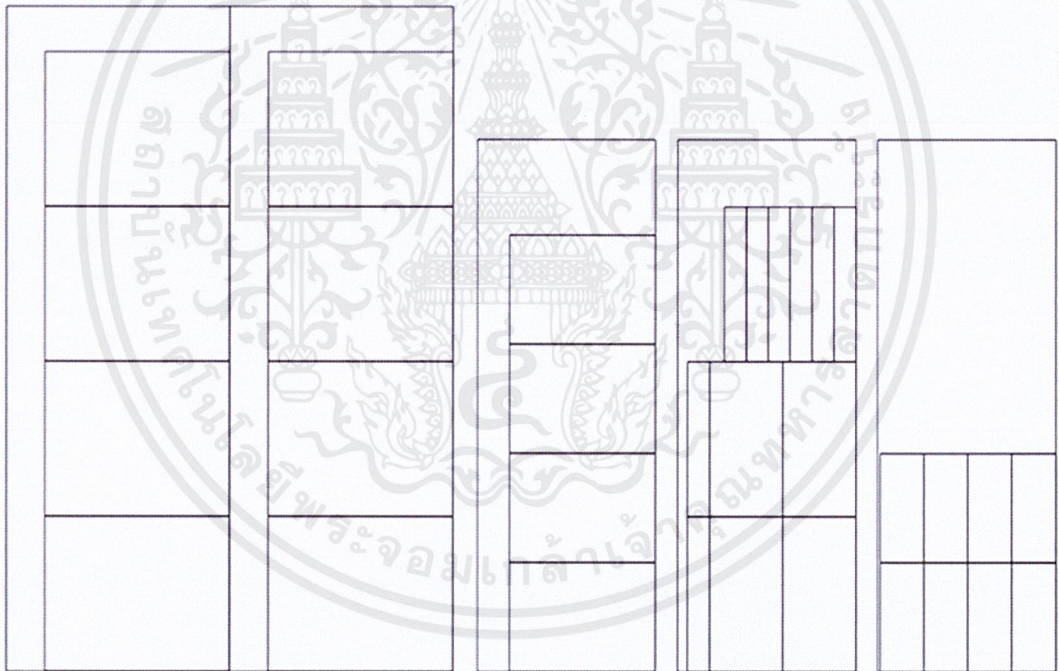
##### 1. ทำแบบจำลองซัพพอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 แบบจำลองชัฟพอร์ด

2. ทำแบบชัฟพอร์ดสำหรับตัด โดยมีขนาดของแผ่นเหล็กและจำนวนแผ่นสำหรับ ชัฟพอร์ด 2 ตัวเป็นไปตามตารางด้านล่าง



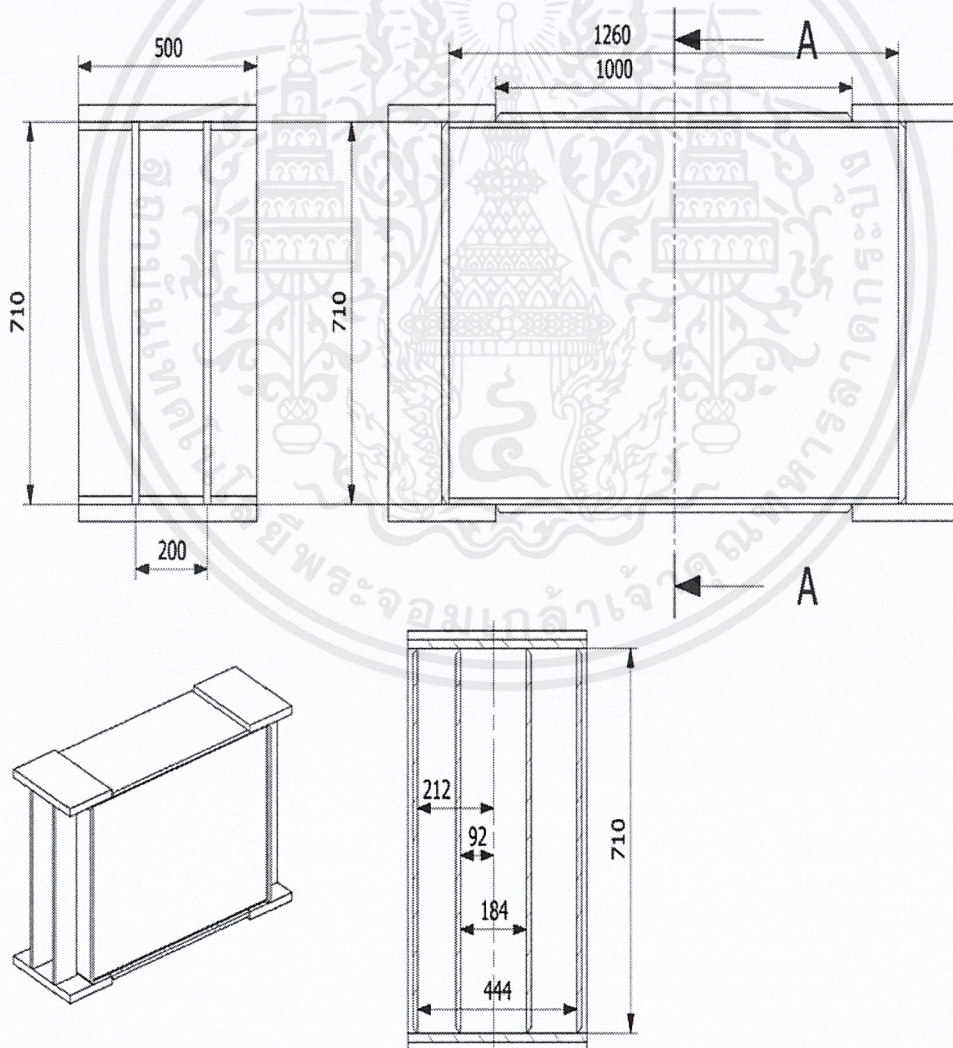
รูปที่ 3.34 แบบตัดเหล็กสำหรับชัฟพอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงขนาดและจำนวนของแผ่นเหล็กสำหรับซัพพอร์ต 2 ตัว

ขนาด			จำนวน (แผ่น)
ความยาว (มิลลิเมตร)	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	
1260	710	13	8
1000	500	16	4
710	500	25	4
500	300	38	8
710	150	25	8

3. ทำแบบซัพพอร์ต สำหรับเชื่อมประกอบ



รูปที่ 3.35 แบบเชื่อมประกอบสำหรับซัพพอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ซึ่วัสดุสำหรับทำซีพพอร์ต
5. ผลิตขึ้นส่วนของซีพพอร์ต
6. เชื่อมประกอบขึ้นส่วนของซีพพอร์ต

### 3.3.2 การจัดซื้อวัสดุ อุปกรณ์

จากการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซีพพอร์ตแล้ว ทำให้ทราบว่าควรใช้วัสดุที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และเป็นวัสดุที่ทนความร้อนได้ เนื่องจากมีการนำมาเชื่อมประกอบเป็นโครงสร้าง และมีคุณสมบัติของวัสดุใกล้เคียงกับวัสดุของแบบจำลองในโปรแกรม ดังนั้นจึงเลือกใช้เหล็ก SS400

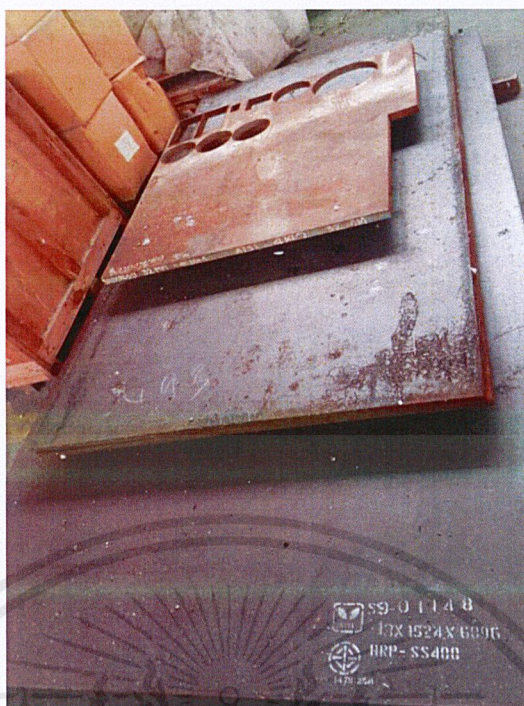
เหล็ก SS400 ตามเกรดวัสดุและชื่อที่กำหนดในมาตรฐาน JIS G 3101 เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมในประเทศญี่ปุ่น ซึ่ง S ตัวที่หนึ่ง หมายถึง เหล็ก S ตัวที่สอง หมายถึง โครงสร้าง และ 400 หมายถึง ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ชัดจำกัดล่างที่ 400 MPa

เหล็ก SS400 เป็นเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดมันววน แผ่นแถบ แผ่นหนา และแผ่นบาง สำหรับงานโครงสร้างทั่วไปและเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งแผ่นเหล็ก SS400 เป็นคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมต่ำ มีคุณสมบัติในการเชื่อมที่ดี สามารถเชื่อมต่อได้ง่าย การใช้งานครอบคลุมโครงสร้าง เช่น สะพาน บ้าน เรือ และอุตสาหกรรมยานยนต์ในรูปของแผ่นเหล็ก, เหล็กเส้นและส่วน และวัสดุเสริมเกือบทั้งหมดสำหรับเครื่องจักรและโครงสร้างที่ใช้ และสามารถนำไปใช้ในการสร้างตู้บรรจุสินค้าที่สามารถทนน้ำทะเลอุณหภูมิต่ำได้ สามารถชุบแข็งได้โดยการเติมคาร์บอน (Carburizing) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง เหล็ก SS400 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 1479-2541 และมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS G 3101-2004 โดยมีคุณสมบัติทางกล (Mechanical property) และส่วนประกอบทางเคมี (Chemical composition) ดังนี้

มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 1479-2541 และ มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS G3101-2004											
คุณสมบัติทางกล (Mechanical Property)							ส่วนประกอบทางเคมี (Chemical Composition)				
Grade	Y.S. (Mpa)			T.S. (Mpa)	%EL		%C	%Mn	%Si	%P	%S
	THK ≤ 16 mm	16 mm < THK ≤ 40 mm	THK > 40 mm		THK (mm)	%EL (min)					
SS400	245 min.	235 min.	215 min.	400 - 510	≤ 5	21	-	-	-	0.050	0.050
					5 < THK ≤ 16	17					
					16 < THK ≤ 50	21					
					> 50	23					

รูปที่ 3.36 ตารางคุณสมบัติทางกลและส่วนประกอบทางเคมีของความหนาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

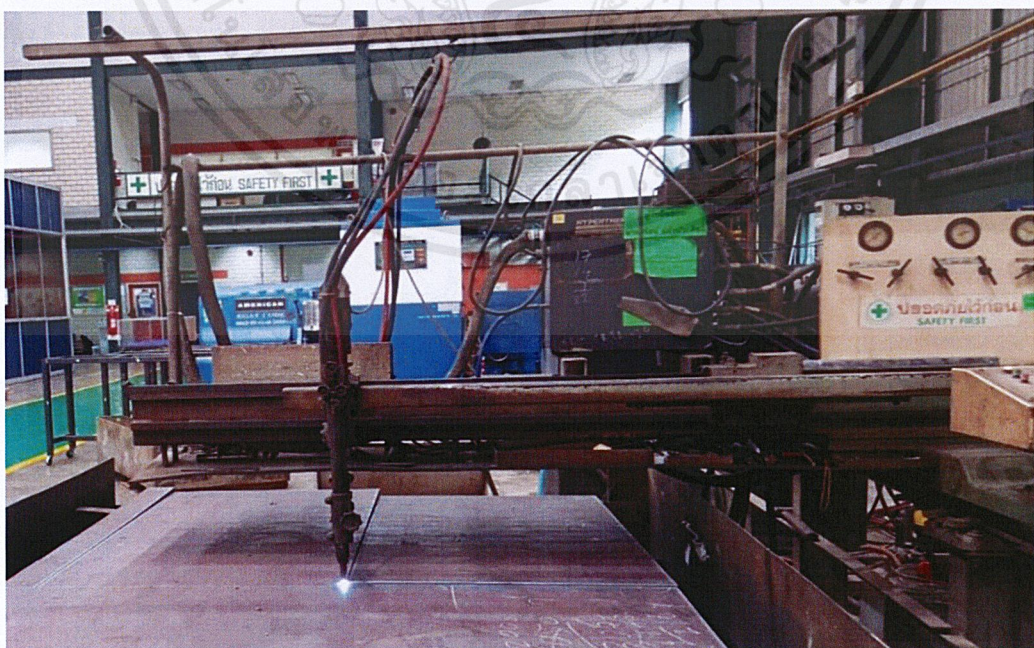


รูปที่ 3.37 เหล็ก SS400

### 3.4 ผลิตและประกอบส่วนซัพพอร์ตของเครื่องกลึง

#### 3.4.1 ตัดเหล็ก

ตัดด้วยเครื่องตัดแก๊สให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ แต่ต้องทำการเผื่อขนาดเนื่องจากหัวตัดมีขนาดใหญ่ ทำให้อาจกินเนื้อเหล็กได้ถ้าทำการตัดตามขนาดที่ใช้งานจริง

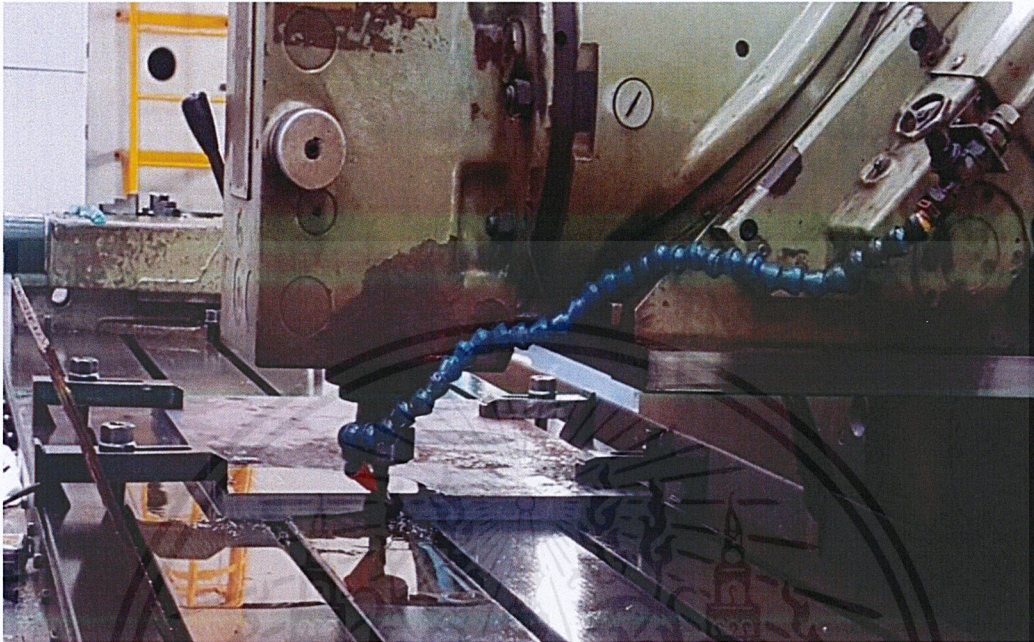


รูปที่ 3.38 ทำการตัดเหล็กด้วยเครื่องตัดแก๊ส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 กัดเหล็ก (Milling)

นำเหล็กมากัด (Milling) ให้ได้ขนาดที่ใช้งานจริง



รูปที่ 3.39 ทำการกัด (Milling) เหล็กให้ได้ตามขนาดที่ใช้งานจริง

### 3.4.3 Chamfer

นำเหล็กมา Chamfer เพื่อเตรียมแนวเชื่อม



รูปที่ 3.40 แผ่นเหล็กที่ทำการ Chamfer เพื่อเตรียมแนวเชื่อม

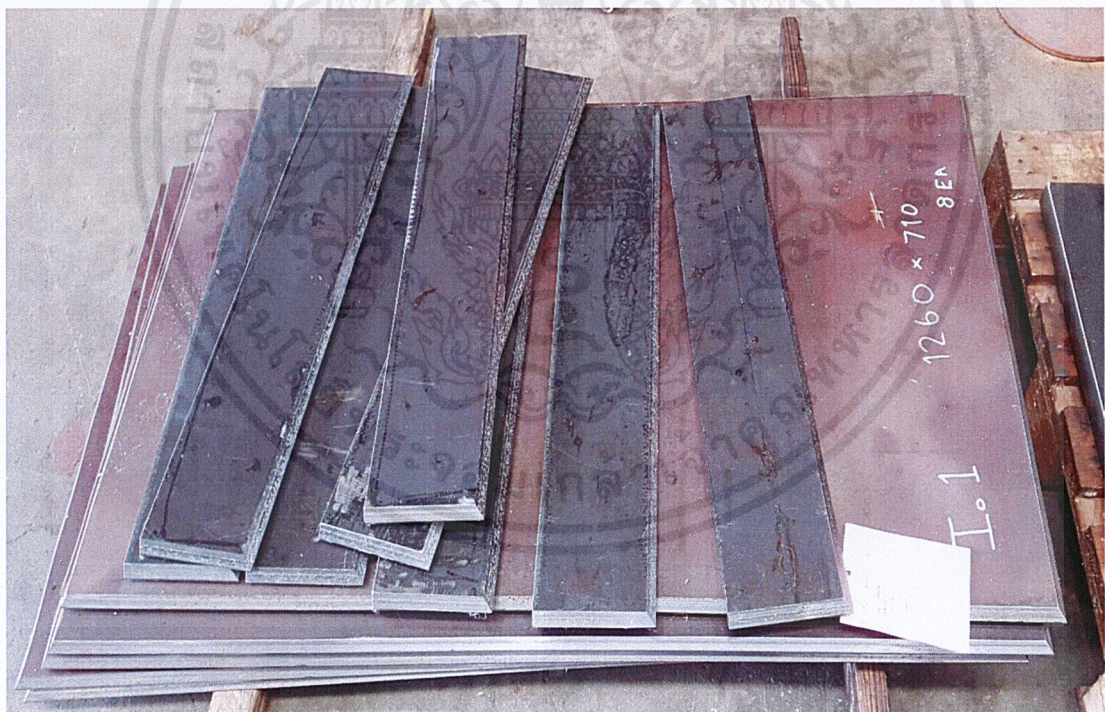
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 เชื่อมประกอบ

ทำการเชื่อมประกอบแผ่นเหล็กให้เป็นไปตามแบบด้วยการเชื่อมไฟฟ้า โดยใช้ลวด E7016 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มิลลิเมตร โดยมีขั้นตอนการเชื่อม และขนาดของแผ่นเหล็กเป็นไปตามด้านล่าง

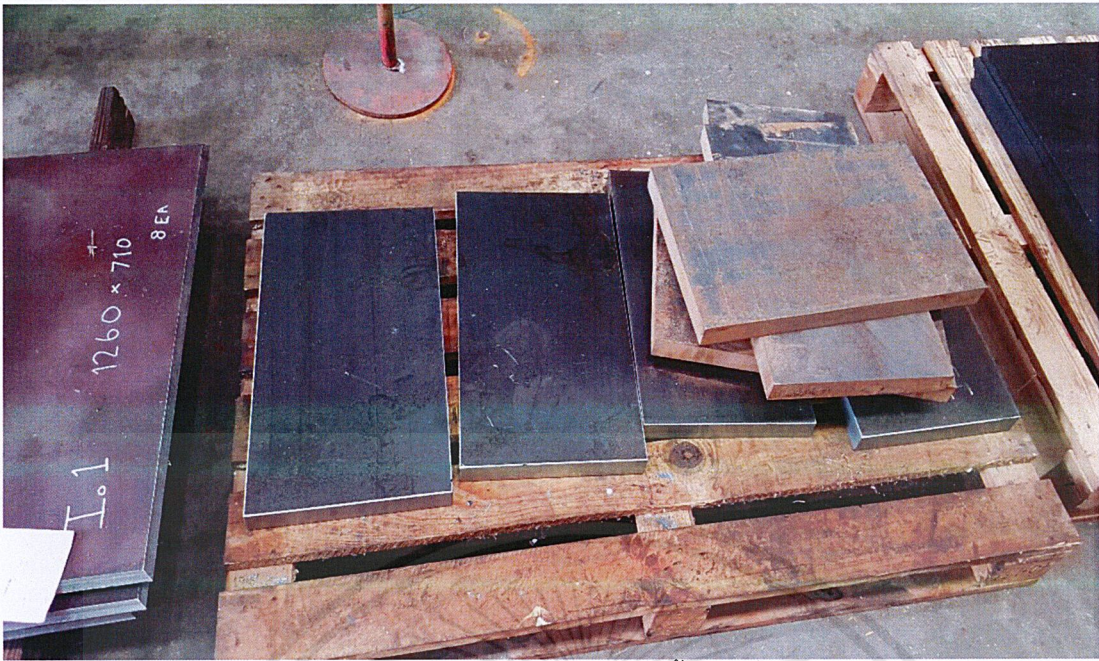
ตารางที่ 3.4 แสดงขนาด, จำนวน และหมายเลขชิ้นงานของแผ่นเหล็กสำหรับชัฟพอร์ท 2 ตัว

หมายเลขชิ้นงาน	ขนาด			จำนวน (แผ่น)
	ความยาว (มิลลิเมตร)	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	
1	1260	710	13	8
2	1000	500	16	4
3	710	500	25	4
4	500	300	38	8
5	710	150	25	8



รูปที่ 3.41 แผ่นเหล็กตัดชิ้นงานที่ 1 (ด้านล่าง) และ ชิ้นงานที่ 5 (ด้านบน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.42 แผ่นเหล็กตัดชิ้นงานที่ 4



รูปที่ 3.43 แผ่นเหล็กตัดชิ้นงานที่ 2 (ด้านซ้าย) และ ชิ้นงานที่ 3 (ด้านขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเชื่อมฐานของซัพพอร์ต โดยใช้แผ่นเหล็กชิ้นงานที่ 2 จำนวน 1 แผ่น และชิ้นงานที่ 4 จำนวน 2 แผ่น



รูปที่ 3.44 เชื่อมประกอบฐานของซัพพอร์ต

ขั้นตอนที่ 2 ทำการเชื่อม Stiffener ของซัพพอร์ต โดยใช้แผ่นเหล็กชิ้นงานที่ 1 จำนวน 2 แผ่น



รูปที่ 3.45 เชื่อมประกอบ Stiffener ของซัพพอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเชื่อมชิ้นส่วนด้านข้างของชัฟพอร์ท 2 ด้าน โดยใช้แผ่นเหล็กชิ้นงานที่ 3 จำนวน 2 แผ่น



รูปที่ 3.46 เชื่อมประกอบส่วนด้านข้างของชัฟพอร์ท (ชิ้นส่วนที่ 3)

ขั้นตอนที่ 4 ทำการเชื่อมชิ้นส่วนด้านข้างของชัฟพอร์ท 2 ด้าน โดยใช้แผ่นเหล็กชิ้นงานที่ 5 จำนวน 8 แผ่น



รูปที่ 3.47 เชื่อมประกอบส่วนด้านข้างของชัฟพอร์ท (ชิ้นส่วนที่ 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.48 เชื่อมประกอบส่วนด้านข้างของซีพพอร์ด

ขั้นตอนที่ 5 ทำการเชื่อมชิ้นส่วนด้านบนของซีพพอร์ด โดยใช้แผ่นเหล็กชิ้นงานที่ 2 จำนวน 1 แผ่น และชิ้นงานที่ 4 จำนวน 2 แผ่น



รูปที่ 3.49 เชื่อมประกอบส่วนด้านบนของซีพพอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.50 เชื่อมประกอบส่วนด้านบนของซัพพอร์ต แล้วเสร็จ

ขั้นตอนที่ 6 ทำการเชื่อมชิ้นส่วนด้านหน้าซัพพอร์ต โดยใช้แผ่นเหล็กชิ้นงานที่ 1 จำนวน 2 แผ่น



รูปที่ 3.51 ซัพพอร์ตเชื่อมประกอบแล้วเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ทดสอบส่วนซีพพอร์ตของเครื่องกลึงและแก้ไขปรับปรุง

หลังจากทำการประกอบซีพพอร์ตเสร็จแล้วนั้น จะทำการทดสอบซีพพอร์ตโดยการนำโรเตอร์ที่มีขนาด 75 ตัน วางบน V block เพื่อไม่ให้โรเตอร์ขยับหรือเคลื่อนที่ โดยที่ V block จะวางบนซีพพอร์ตแล้วทำการตรวจสอบว่าซีพพอร์ตสามารถรับภาระจากน้ำหนักของโรเตอร์ได้หรือไม่ และถ้ารับน้ำหนักของโรเตอร์ได้ จะมีระยะหดตัวเมื่อได้รับภาระจากน้ำหนักของโรเตอร์ที่ม่าวางจะมีผลลัพธ์เป็นไปตามที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างจากโปรแกรมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หรือไม่



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

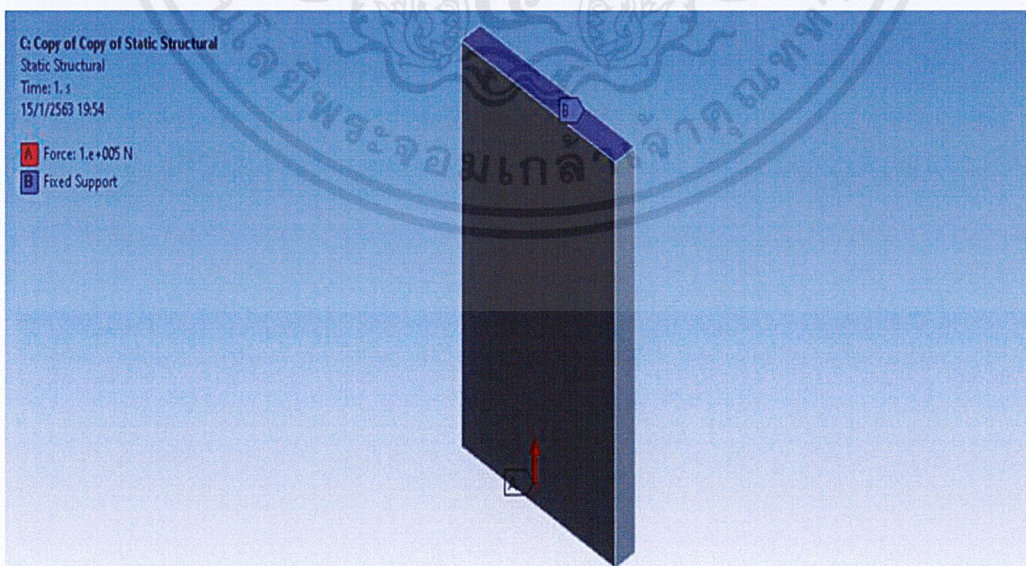
ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการตามบทที่ 3 ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างซัพพอร์ต โดยใช้การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ตด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรมมาช่วยในการออกแบบ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สนใจ คือ ค่าการเสียรูปและความเค้น และทำการทดสอบเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม โดยใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยการวัดระยะการเสียรูปของซัพพอร์ตในการใช้งานจริง

#### 4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม เพื่อตรวจสอบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมให้ค่าที่ถูกต้องหรือไม่ โดยทำการทดสอบเรื่องแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมที่มีแรงกระทำ โดยมีการอ้างอิงจากหนังสือ Mechanical Engineering Design เพื่อหาผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรมและนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่คำนวณมาจากทฤษฎี

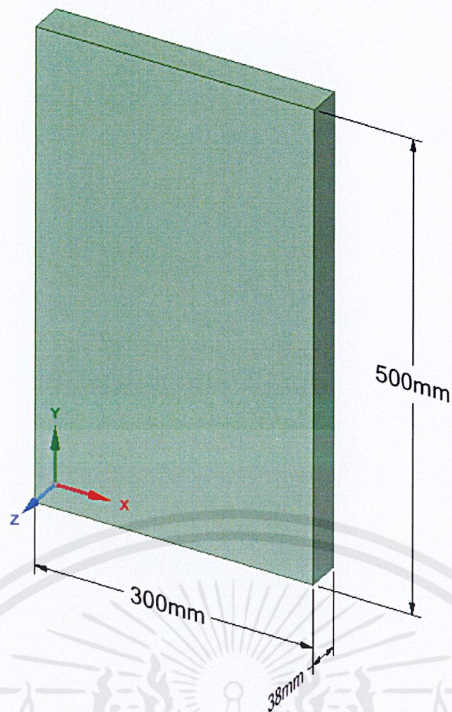
##### ตัวอย่างการทดสอบ

แผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมที่มีแรงกระทำ โดยกำหนดจุดจับยึดไว้ฝั่งตรงข้ามกับแรง ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ขนาด และคุณสมบัติของวัสดุของตัวอย่างการทดสอบเป็นไปตามด้านล่าง โดยหาความเค้นตามทฤษฎี Von mises ในหน่วย MPa และระยะการเสียรูปที่มากที่สุดในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ขนาดแผ่นสี่เหลี่ยมของตัวอย่างทดสอบ

คุณสมบัติของวัสดุ

Young's Modulus (E)	200	GPa
Poisson's Ratio ( $\nu$ )	0.3	

ขนาดของแผ่นสี่เหลี่ยม

ความยาว (L)	500	มิลลิเมตร
ความกว้าง (w)	300	มิลลิเมตร
ความหนา (t)	38	มิลลิเมตร

แรงที่มากกระทำ

แรง (F)	100	กิโลนิวตัน
---------	-----	------------

#### 4.1.1 ผลลัพธ์ที่คำนวณจากทฤษฎี

ระยะการเสีรูปที่มากที่สุด

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\delta}{L}$$

$$\frac{\delta}{L} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \frac{FL}{AE}$$

โดยที่  $F = 100$  กิโลนิวตัน

$L = 500$  มิลลิเมตร

$E = 210$  GPa

$A = 38 \times 300 = 11,400$  ตารางมิลลิเมตร

$$\delta = \frac{(100\text{kN})(500\text{mm})}{(11400\text{mm}^2)(200\text{GPa})}$$

$\therefore \delta = 0.02193$  มิลลิเมตร

ความเค้นตามทฤษฎี Von mises

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2}$$

โดยที่  $F = 100$  กิโลนิวตัน

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_x = \sigma_z = 0; \quad \sigma_y = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_y = \frac{100000\text{N}}{(300\text{mm})(38\text{mm})}$$

$$\sigma_y = 8.7719 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = \frac{F}{A}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0; \quad \tau_{zx} = \frac{F}{A}$$

$$\tau_{zx} = \frac{100000\text{N}}{(300\text{mm})(500\text{mm})}$$

$$\tau_{zx} = 0.6667 \text{ MPa}$$

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (0 - 8.7719)^2 + (8.7719 - 0)^2 + (0 - 0)^2 + 6(0^2 + 0^2 + 0.6667^2) \right]^{1/2}$$

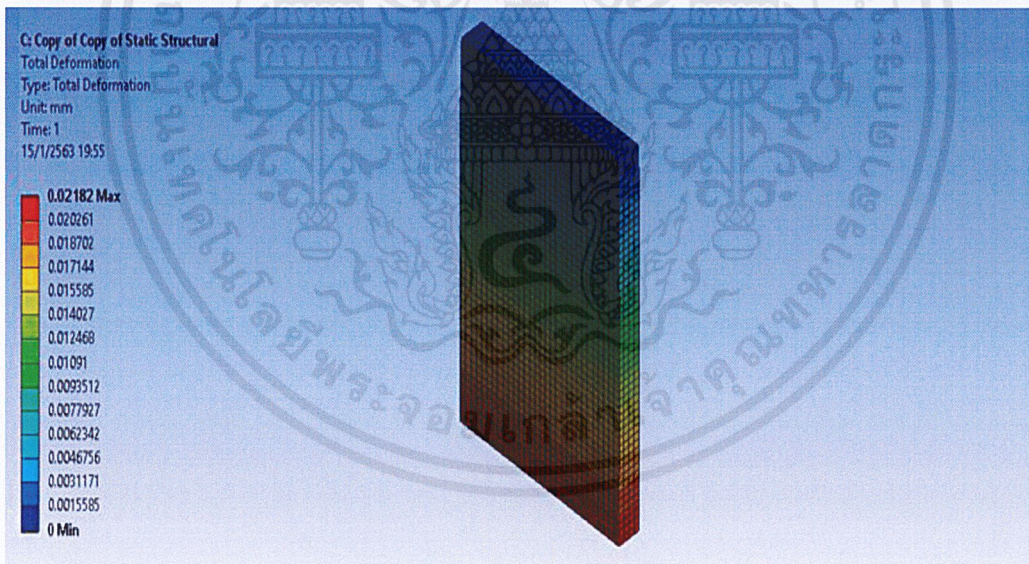
$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} [(8.7719)^2 + (8.7719)^2 + 6(0.6667^2)]^{1/2}$$

∴  $\sigma' = 8.8476 \text{ MPa}$

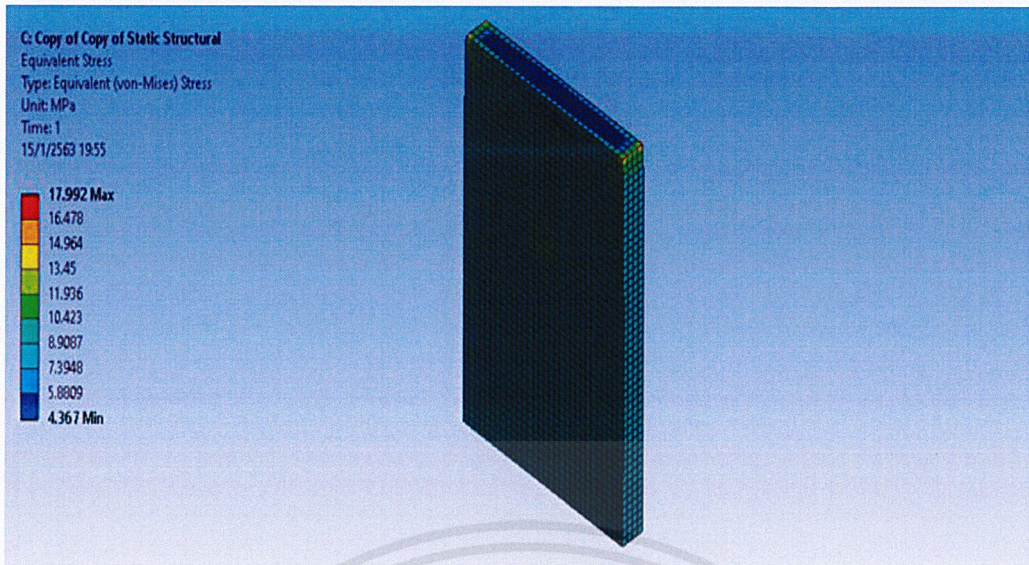
จากที่ได้คำนวณโดยใช้สูตรจากทฤษฎี เพื่อหาความเค้นตามทฤษฎี Von mises ในหน่วย MPa และระยะการเสีรูปที่มากที่สุด ในหน่วยมิลลิเมตร โดยได้ค่าความเค้นตามทฤษฎี Von mises เท่ากับ 8.8476 MPa และ ระยะการเสีรูปที่มากที่สุด เท่ากับ 0.09524 มิลลิเมตร

#### 4.1.2 ผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างการทดสอบด้วยโปรแกรม เพื่อหาความเค้นสูงสุดตามทฤษฎี Von mises ในหน่วย MPa และระยะการเสีรูปที่มากที่สุด ในหน่วยมิลลิเมตร ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นไปตามรูปด้านล่าง โดยได้ค่าความเค้นตามทฤษฎี Von mises เท่ากับ 8.6625 MPa และ ระยะการเสีรูปที่มากที่สุด เท่ากับ 0.02182 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.3 ระยะการเสีรูปของแผ่นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.4 ค่าความเค้นของแผ่นสี่เหลี่ยม

ผลลัพธ์ของความเค้นตามทฤษฎี Von Mises

ค่ามากที่สุด (Maximum) = 17.992 MPa

ค่าเฉลี่ย (Average) = 8.6625 MPa

ค่าน้อยที่สุด (Minimum) = 4.367 MPa

โดยเราจะใช้ค่าเฉลี่ยในการเปรียบเทียบ

#### 4.1.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรมกับคำนวณจากทฤษฎี

จากที่ทำการคำนวณด้วยโปรแกรมกับคำนวณจากทฤษฎีในการคำนวณหาความเค้นตามทฤษฎี Von mises ในหน่วย MPa และระยะการเสียรูปที่มากที่สุดในหน่วยมิลลิเมตรซึ่งจะได้ผลเป็นไปตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการเสียรูปจากการคำนวณกับการทดลอง

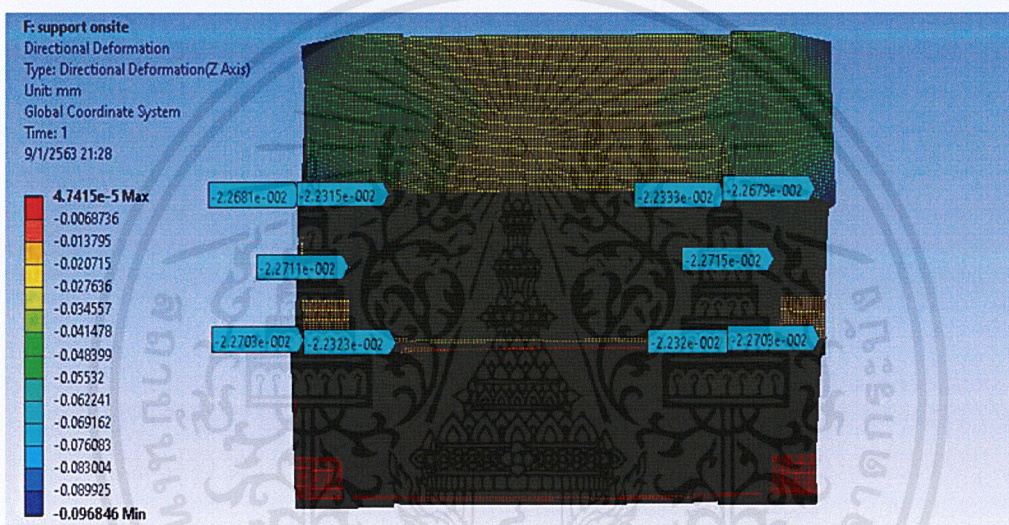
	ผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม	ผลลัพธ์ที่คำนวณจากทฤษฎี	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
ความเค้นตามทฤษฎี Von Mises (MPa)	8.6625	8.8476	2.0921
ระยะการเสียรูปที่มากที่สุด (มิลลิเมตร)	0.02193	0.02182	0.5016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมด้วยการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรมกับคำนวณจากทฤษฎีของตัวอย่างทดสอบแล้วนั้น ผลลัพธ์ของทั้งสองมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งยอมรับ แสดงว่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมีความถูกต้อง

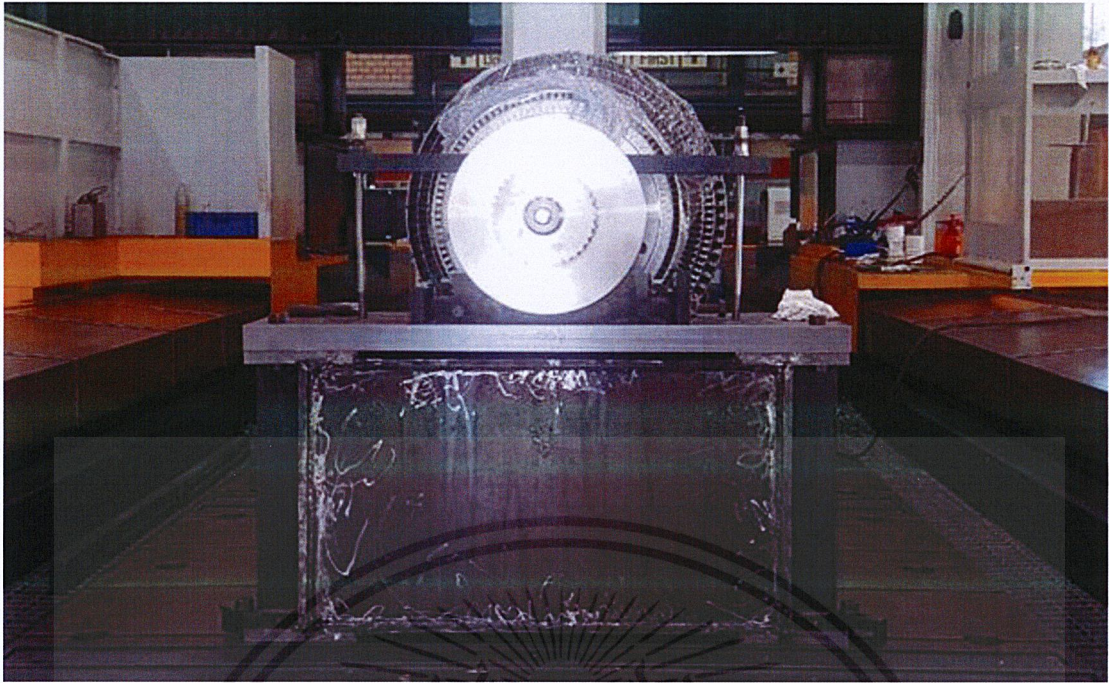
## 4.2 ผลลัพธ์จากการคำนวณจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

จากผลลัพธ์ของค่าการเสียรูปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ตที่จะสร้างขึ้นจริง โดยใช้แบบจำลองซัพพอร์ต 2 ตัวรับภาระจากน้ำหนักโรเตอร์ 75 ตัน ในการวิเคราะห์ และทำการสุ่มเอลิเมนต์ เพื่อหาค่าเฉลี่ยการเสียรูป ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งได้ค่าการเสียรูปเท่ากับ 0.0405 มิลลิเมตร

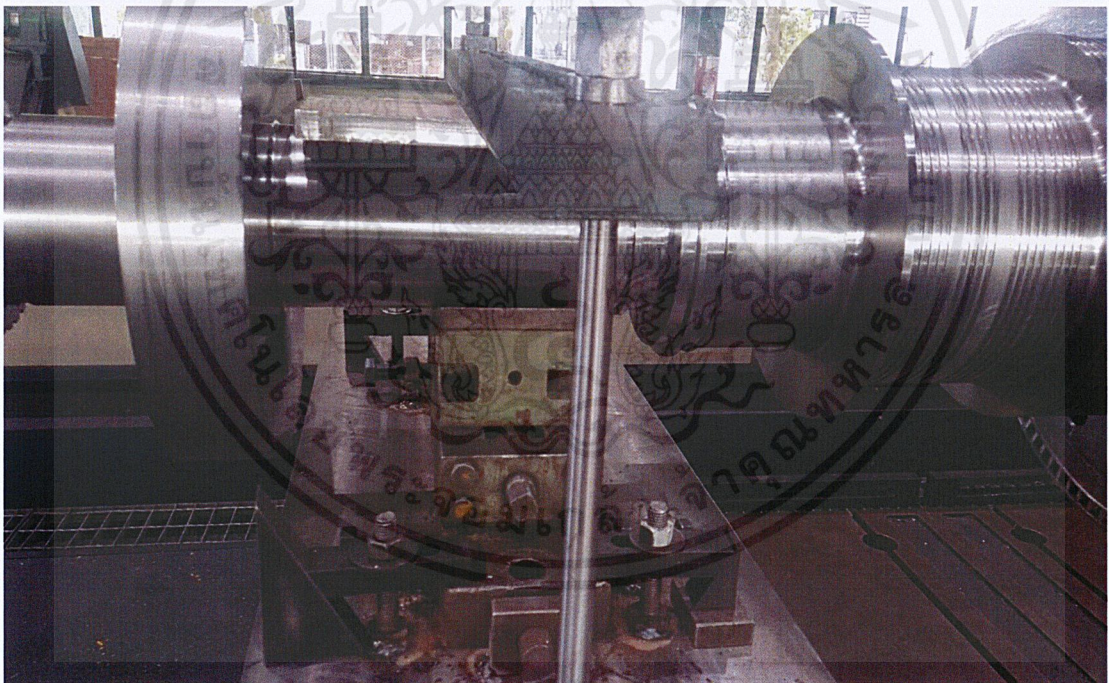


รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์ของค่าการเสียรูปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ตที่จะสร้างขึ้นจริง

เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้ จะทำการทดลองโดยนำซัพพอร์ตไปใช้งานสำหรับวางโรเตอร์ของบริษัท Thai cane paper มีน้ำหนัก 42 ตัน โดยวางบน V block และทำการยึด V block กับตัวซัพพอร์ต ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ตใหม่ โดยทำการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายให้มีลักษณะเหมือนการใช้งานจริง ดังรูปที่ 4.4 และลักษณะการคำนวณคล้ายกับที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3

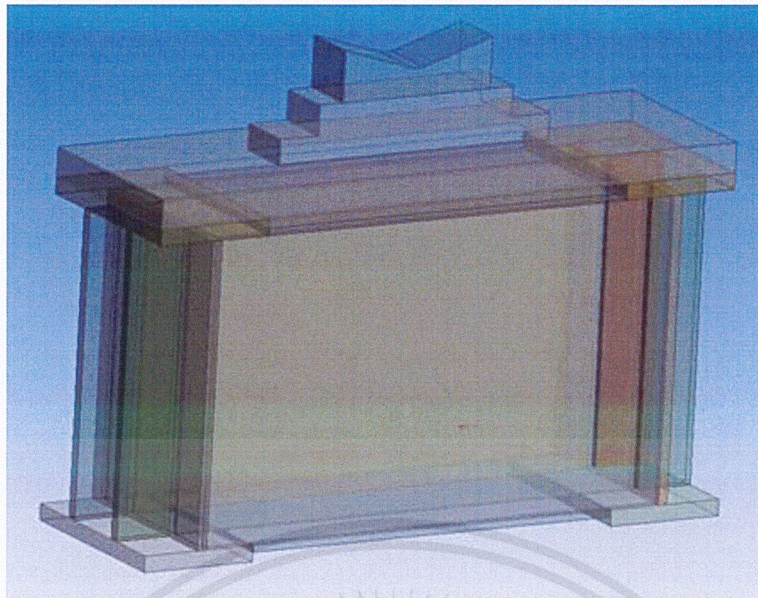


รูปที่ 4.6 การใช้งานจริงของซัพพอร์ต สำหรับวางโรเตอร์ด้านหน้า



รูปที่ 4.7 การใช้งานจริงของซัพพอร์ต สำหรับวางโรเตอร์ด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



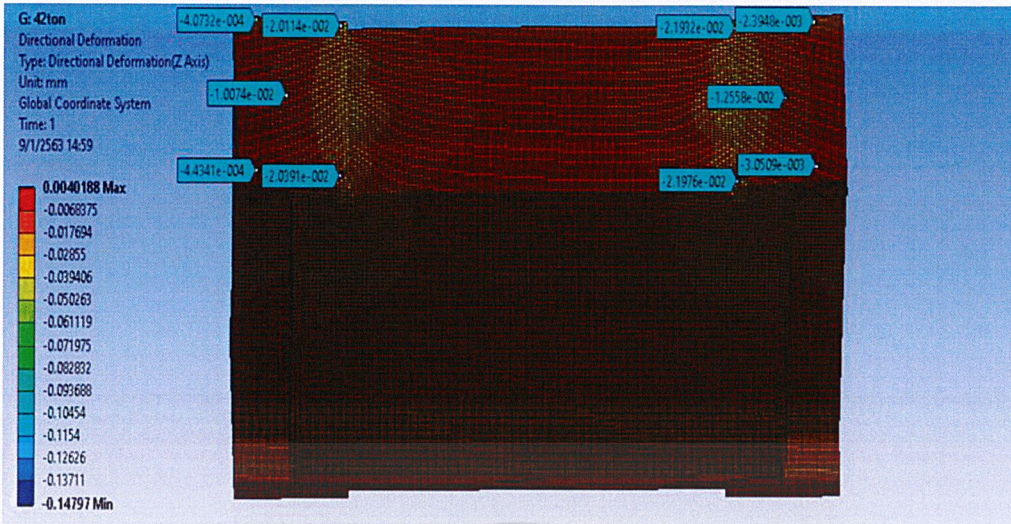
รูปที่ 4.8 แบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างซัพพอร์ตที่ใช้งานจริง จนได้ผลลัพธ์ของค่าการเสี้ยวรูปและความเค้น ดังรูปด้านล่าง โดยค่าการเสี้ยวรูปและค่าความเค้น จะทำการสุ่มเอลิเมนต์ในพื้นที่ผิว 2 พื้นผิวมา 5 เอลิเมนต์ รวมทั้งสิ้น 10 เอลิเมนต์ เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของการเสี้ยวรูปและค่าความเค้นอยู่ในช่วงใด

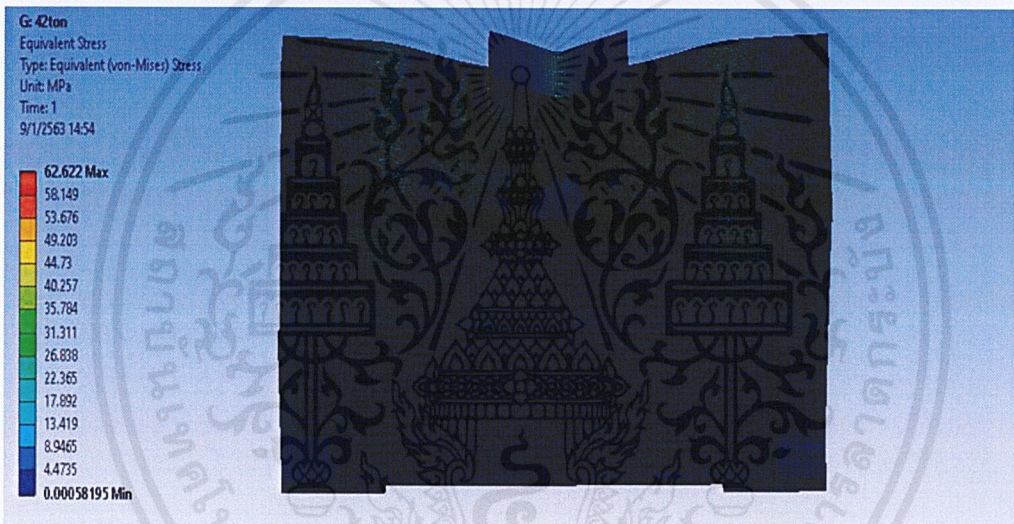


รูปที่ 4.9 การเสี้ยวรูปของแบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง

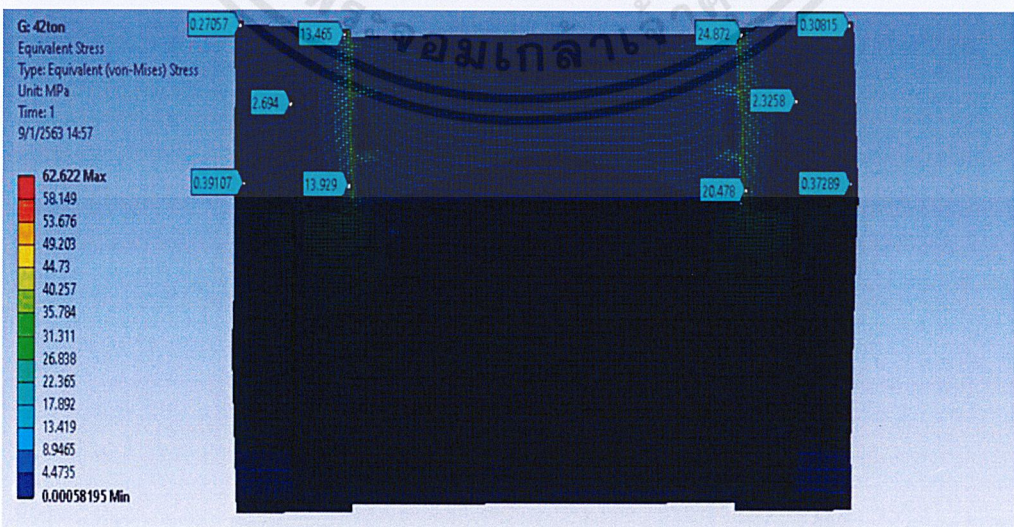
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การสุ่มค่าการเสียรูปของแบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง



รูปที่ 4.11 ค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง



รูปที่ 4.12 การสุ่มค่าความเค้นของแบบจำลองซัพพอร์ต สำหรับการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะได้ค่าเฉลี่ยการเสียรูปเท่ากับ 0.0091 มิลลิเมตร และความเค้นอยู่ในช่วง 26.838 – 0.00058195 MPa

#### 4.3 ผลลัพธ์จากการทดลองวัดระยะการเสียรูปของซีพพอร์ตในการใช้งานจริง

ในการทดลองการวัดระยะการเสียรูปของซีพพอร์ตในการใช้งานจริง จะทำการวัดระยะการเสียรูปโดยกำหนดตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.9 เพื่อวัดพิกัดของตำแหน่ง โดยใช้ dial gauge วัดตำแหน่งที่กำหนดไว้ของ ซีพพอร์ต 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ขณะที่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์ และแบบที่ 2 ไม่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์ หรือหลังจากที่ยกโรเตอร์ออกจากซีพพอร์ต จากนั้นนำค่าพิกัดของตำแหน่งที่กำหนดไว้ของ 2 แบบ มาหาระยะความต่างของค่าพิกัดของตำแหน่งในแนวแกน z ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นค่าการเสียรูปของ ซีพพอร์ต โดยหาได้ดังสมการนี้

$$\Delta Z_{\text{Unload}} = Z_{\text{Unload ที่วัดได้}} - Z_{\text{Unload Origin}} \quad (4.1)$$

$$\Delta Z_{\text{Load}} = Z_{\text{Load ที่วัดได้}} - Z_{\text{Load Origin}} \quad (4.2)$$

$$\Delta Z = \Delta Z_{\text{Unload}} - \Delta Z_{\text{Load}} \quad (4.3)$$

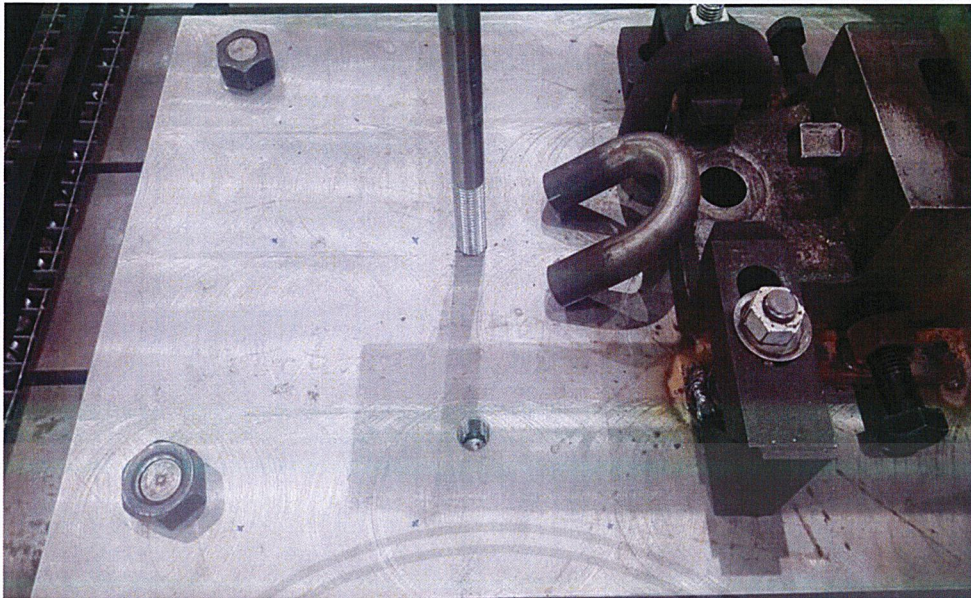
โดยที่  $\Delta Z$  คือ ระยะความต่างของค่าพิกัดของตำแหน่งในแนวแกน z ในหน่วยมิลลิเมตร (mm)

$Z_{\text{Unload ที่วัดได้}}$  คือ ค่าพิกัดของตำแหน่งที่กำหนดไว้ในแนวแกน z ของซีพพอร์ต ขณะที่ไม่มีการระน้ำหนักจากจากโรเตอร์หรือหลังจากที่ยกโรเตอร์

$Z_{\text{Load ที่วัดได้}}$  คือ ค่าพิกัดของตำแหน่งที่กำหนดไว้ในแนวแกน z ของซีพพอร์ต ขณะที่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์

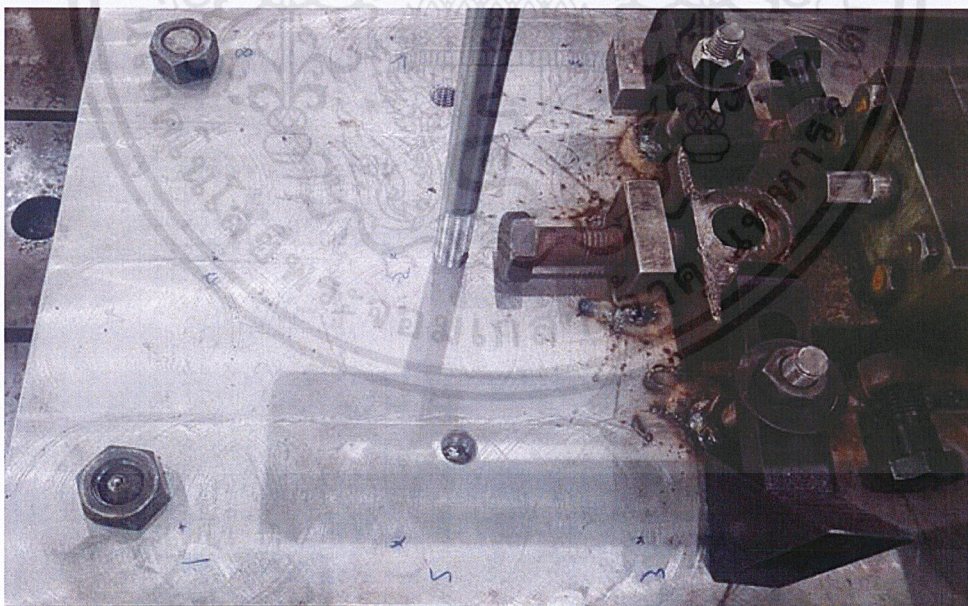
$Z_{\text{Unload Origin}}$  คือ ค่าพิกัดของตำแหน่งเริ่มต้นในแนวแกน z ของซีพพอร์ต ขณะที่ไม่มีการระน้ำหนักจากน้ำหนักจากโรเตอร์หรือหลังจากที่ยกโรเตอร์

$Z_{\text{Load Origin}}$  คือ ค่าพิกัดของตำแหน่งเริ่มต้นในแนวแกน z ของซีพพอร์ต ขณะที่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์

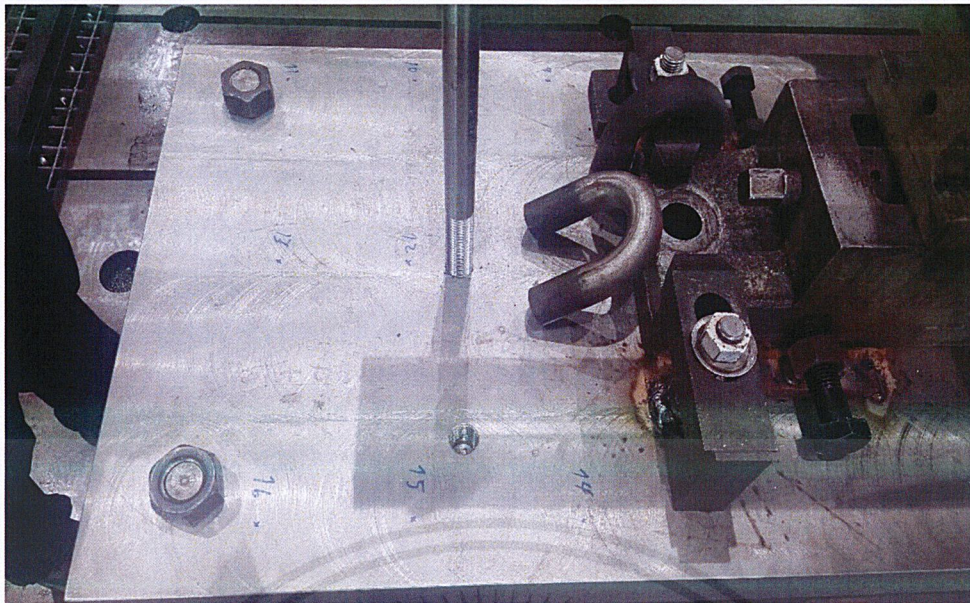


รูปที่ 4.13 ตำแหน่งสำหรับวัดระยะการเสียรูปของซีพพอร์ด

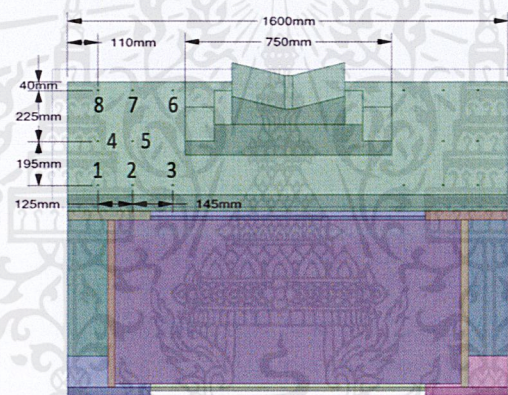
ในการกำหนดตำแหน่ง จะกำหนดตำแหน่งบนพื้นผิวบนของแผ่นเหล็กที่เป็นแผ่นรองและยึดส่วน V block เนื่องจากการใช้งานจริง ได้ทำการยึดซีพพอร์ดกับแผ่นรอง จึงทำให้ไม่สามารถวัดและกำหนดตำแหน่งที่พื้นผิวบนของซีพพอร์ดได้ โดยจะทำการกำหนดตำแหน่ง 8 จุด สำหรับซีพพอร์ด 1 ตัว และทำการกำหนดตำแหน่งของซีพพอร์ดทั้ง 2 ตัว ดังรูปด้านล่าง



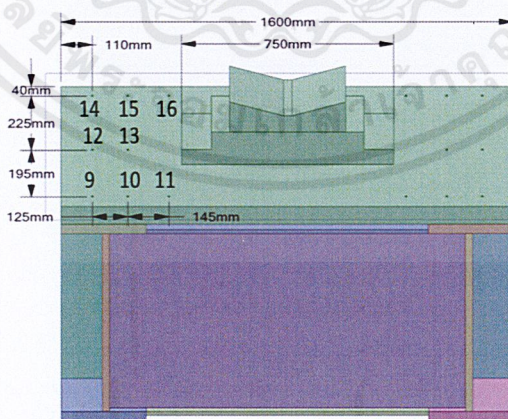
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งสำหรับวัดระยะการเสียรูปของซีพพอร์ดตัวที่ 1



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งสำหรับวัดระยะการเสีรูปของซัพพอร์ตตัวที่ 2



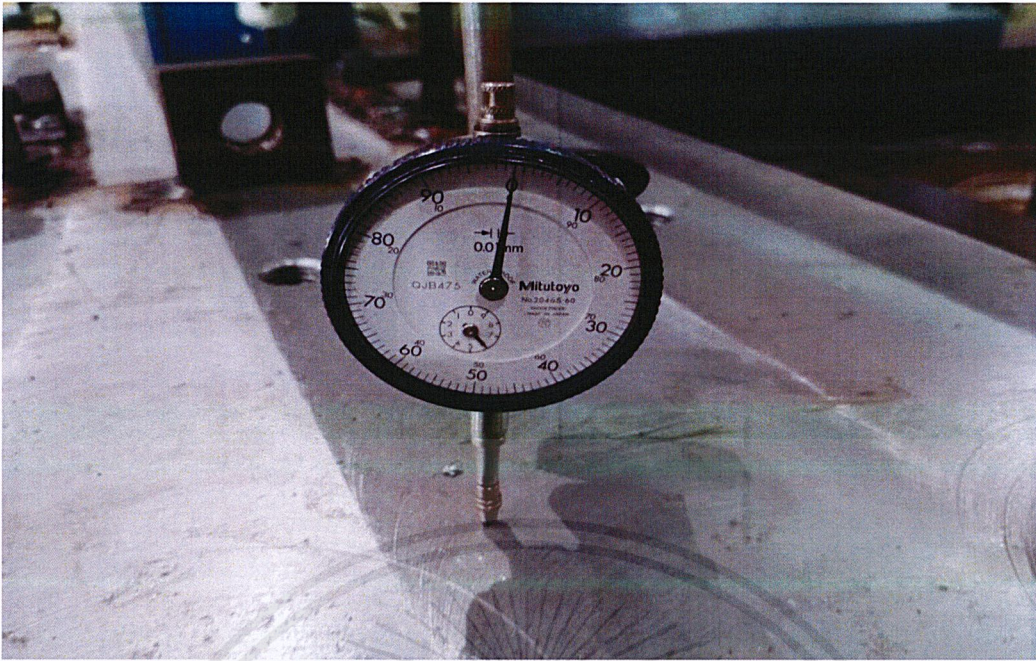
(ก)



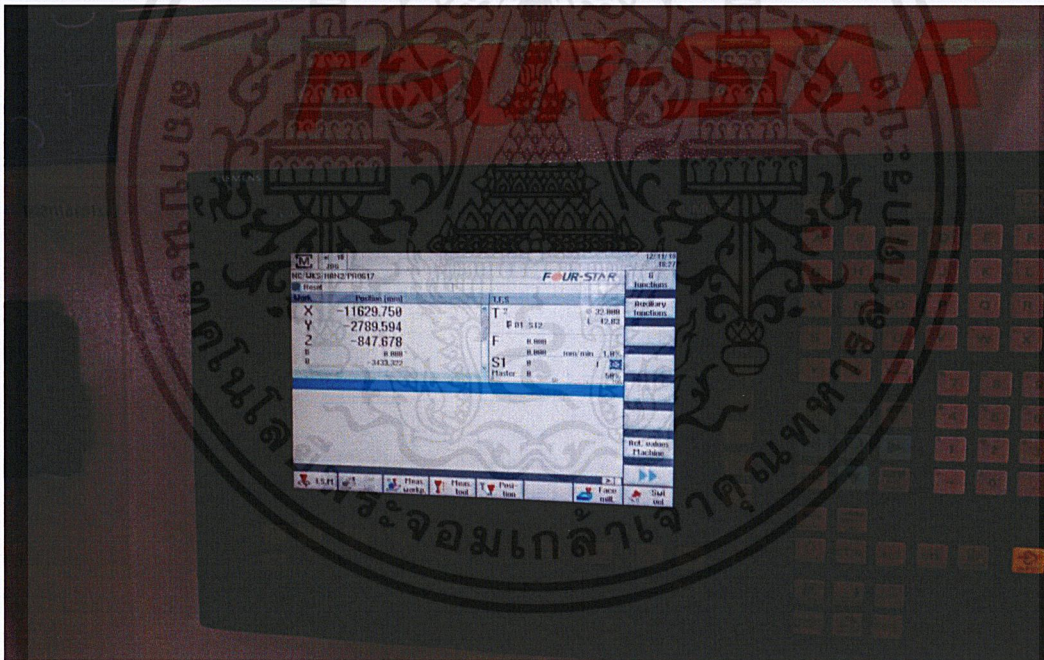
(ข)

รูปที่ 4.16 แบบจำลองตำแหน่งสำหรับวัดระยะการเสีรูปของซัพพอร์ต (ก) ซัพพอร์ตตัวที่ 1 และ (ข) ซัพพอร์ตตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 วัดค่าพิกัดของตำแหน่ง โดยใช้ Dial gauge



รูปที่ 4.18 ค่าพิกัดของตำแหน่งที่กำหนดไว้บนซีฟพอร์ด

ค่าพิกัดของตำแหน่งที่ใช้ Dial gauge วัดจะออกมาดังรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นค่าพิกัดในแนวแกน x, y และ z แต่เราจะสนใจค่าพิกัดในแนวแกน z เท่านั้น โดยจะได้ค่าพิกัดในแนวแกน z ของตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดไว้บนซีฟพอร์ดตามตารางด้านล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงพิกัดตำแหน่งในแนวแกน z ของซัพพอร์ตแบบมีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์

โดยค่าพิกัดของ Load Origin คือ 2731.937, -1078.255, -248.321

ซัพพอร์ตตัวที่ 1			ซัพพอร์ตตัวที่ 2		
ตำแหน่ง	พิกัดในแกน z ( $Z_{Load}$ ที่วัดได้)	$\Delta Z_{Load}$ (มิลลิเมตร)	ตำแหน่ง	พิกัดในแกน z ( $Z_{Load}$ ที่วัดได้)	$\Delta Z_{Load}$ (มิลลิเมตร)
1	-56.316	192.005	9	-55.976	192.345
2	-56.406	191.915	10	-55.946	192.375
3	-56.548	191.773	11	-55.956	192.365
4	-56.238	192.083	12	-55.905	192.416
5	-56.328	191.993	13	-55.865	192.456
6	-56.388	191.933	14	-55.755	192.566
7	-56.198	192.123	15	-55.735	192.586
8	-56.298	192.023	16	-55.775	192.546

ตารางที่ 4.3 แสดงพิกัดตำแหน่งในแนวแกน z ของซัพพอร์ตแบบไม่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์หรือหลังจากที่ยกโรเตอร์ออกจากซัพพอร์ต

โดยค่าพิกัดของ Unload Origin คือ -3717.845, -2592.317, -1056.653

ซัพพอร์ตตัวที่ 1			ซัพพอร์ตตัวที่ 2		
ตำแหน่ง	พิกัดในแกน z ( $Z_{Unload}$ ที่วัดได้)	$\Delta Z_{Unload}$ (มิลลิเมตร)	ตำแหน่ง	พิกัดในแกน z ( $Z_{Unload}$ ที่วัดได้)	$\Delta Z_{Unload}$ (มิลลิเมตร)
1	-863.308	192.755	9	-863.502	193.151
2	-863.898	192.665	10	-863.388	193.265
3	-863.988	192.905	11	-863.278	193.375
4	-863.748	192.725	12	-863.458	193.195
5	-863.928	193.565	13	-863.298	193.355
6	-863.088	192.799	14	-863.338	193.315
7	-863.854	192.998	15	-863.208	193.445
8	-863.655	192.755	16	-863.088	193.565

จากที่ได้ทำการวัดพิกัดในแนวแกน z ของตำแหน่งที่กำหนดไว้บนซัพพอร์ตทั้ง 2 แบบแล้ว จนได้ค่า  $\Delta Z_{Unload}$  และ  $\Delta Z_{Load}$  เพื่อนำไปหาระยะความต่างของค่าพิกัดของตำแหน่งในแนวแกน z ตามตารางด้านล่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงระยะความต่างของค่าพิกัดของตำแหน่งในแนวแกน z ของซีพอร์ต

ซีพอร์ตตัวที่ 1			ซีพอร์ตตัวที่ 2				
ตำแหน่ง	$\Delta Z_{\text{Unload}}$ (มิลลิเมตร)	$\Delta Z_{\text{Load}}$ (มิลลิเมตร)	$\Delta Z$ (มิลลิเมตร)	ตำแหน่ง	$\Delta Z_{\text{Unload}}$ (มิลลิเมตร)	$\Delta Z_{\text{Load}}$ (มิลลิเมตร)	$\Delta Z$ (มิลลิเมตร)
1	192.755	192.005	1.34	9	193.151	192.345	0.806
2	192.665	191.915	0.84	10	193.265	192.375	0.89
3	192.905	191.773	0.892	11	193.375	192.365	1.01
4	192.725	192.083	0.822	12	193.195	192.416	0.779
5	193.565	191.993	0.732	13	193.355	192.456	0.899
6	192.799	191.933	1.632	14	193.315	192.566	0.749
7	192.998	192.123	0.676	15	193.445	192.586	0.859
8	192.755	192.023	0.975	16	193.565	192.546	1.019

จากนั้นนำระยะความต่างของค่าพิกัดของตำแหน่งในแนวแกน z ของซีพอร์ตทั้ง 2 ตัว นำไปหาค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าเฉลี่ยของระยะความต่างของค่าพิกัดของตำแหน่งในแนวแกน z หรือค่าเฉลี่ยการเสียรูปได้ ซีพอร์ตตัวที่ 1 เท่ากับ 0.9149 มิลลิเมตร และ ซีพอร์ตตัวที่ 2 เท่ากับ 0.8763 มิลลิเมตร

#### 4.4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณกับการทดลอง

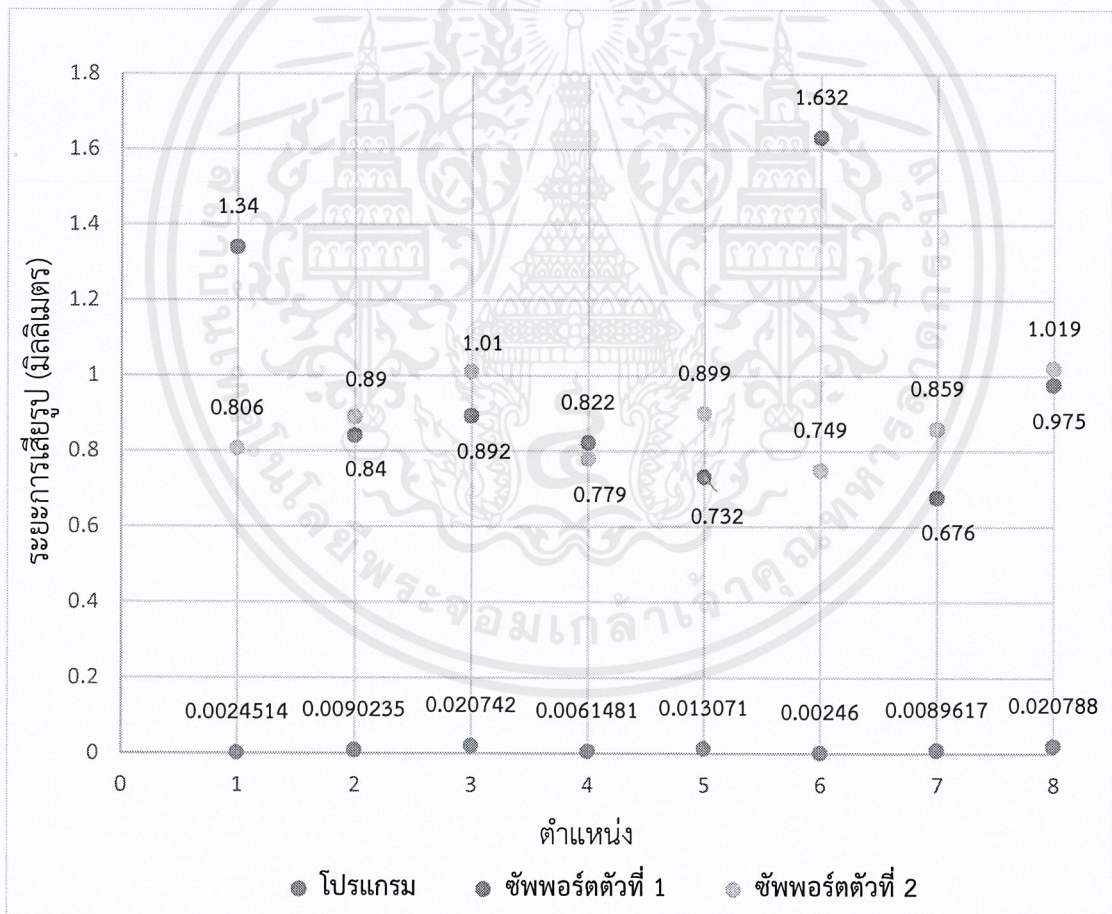
การศึกษาการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยโปรแกรมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาค่าการเสียรูปของซีพอร์ต กับค่าที่ได้การทดลอง โดยทำการวัดตำแหน่งเพื่อหาค่าของระยะความต่างของค่าพิกัดของตำแหน่งในแนวแกน z ของซีพอร์ตที่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์ และซีพอร์ตที่ไม่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์ ซึ่งได้ผลเป็นไปตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการเสียรูปจากการคำนวณกับการทดลอง

ค่าเฉลี่ยการเสียรูปจากการคำนวณ (มิลลิเมตร)	ค่าเฉลี่ยการเสียรูปจากการทดลอง (มิลลิเมตร)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (เปอร์เซ็นต์)
0.0091	ซีพอร์ตตัวที่ 1: 0.9149 ซีพอร์ตตัวที่ 2: 0.8763	ซีพอร์ตตัวที่ 1: 99.01 ซีพอร์ตตัวที่ 2: 98.96

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งที่ทำการวัดค่าการเสีรूपจากการคำนวณกับการทดลอง

ตำแหน่ง	ผลลัพธ์จากโปรแกรม	ผลลัพธ์จากการทดลอง	
		ซัพพอร์ตตัวที่ 1	ซัพพอร์ตตัวที่ 2
1	0.0024514	1.34	0.806
2	0.0090235	0.84	0.89
3	0.020742	0.892	1.01
4	0.0061481	0.822	0.779
5	0.013071	0.732	0.899
6	0.00246	1.632	0.749
7	0.0089617	0.676	0.859
8	0.020788	0.975	1.019



กราฟที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งที่ทำการวัดค่าการเสีรूपจากการคำนวณกับการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและสร้างซัพพอร์ตของการออกแบบและสร้างซัพพอร์ตของเครื่องกลึงสำหรับการซ่อมโรเตอร์ที่หน้างาน โดยในการออกแบบซัพพอร์ต ได้นำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมมาช่วยในการออกแบบ เพื่อหาแบบซัพพอร์ตที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปสร้างจริง โดยทำการวิเคราะห์ความแข็งแรง เพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของค่าการเสียรูป โดยทำการหาค่าเฉลี่ยการเสียรูปเพื่อไปหาค่าความแรงแ้งที่มีค่าสูงที่สุด และค่าความเค้นจะพิจารณาถึงค่าความเค้นที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นเมื่อซัพพอร์ตมีภาระจากน้ำหนักของโรเตอร์มากระทำ โดยที่ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นต้องมีค่าไม่เกิน Yield Strength ของวัสดุ เนื่องจากถ้าความเค้นมีค่าเกินกว่า Yield Strength ของวัสดุแล้วนั้น วัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร โดยไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

จากที่ได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง เพื่อหาแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสร้างซัพพอร์ต ซึ่งแบบที่เหมาะสมที่สุดในการวิเคราะห์ คือ แบบซัพพอร์ตที่มี Stiffener ขนาดความหนา 10 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากทางโรงงานมีวัสดุที่ขนาดความหนาไม่ตรงตามแบบที่ทำการออกแบบมา ทำให้ต้องปรับแก้ไขแบบให้เป็นไปตามวัสดุที่ทางโรงงานมีสำหรับในการสร้างจริง ดังนั้นจึงต้องทำแบบจำลองใหม่เพื่อนำไปวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง จากนั้นทำการสร้างซัพพอร์ต แล้วทำการตรวจสอบ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าการเสียรูปที่ได้จากการคำนวณของการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง ด้วยโปรแกรมกับการทดลองหาค่าการเสียรูปด้วยการวัดระยะความต่างของตำแหน่งของซัพพอร์ต ขณะที่มีการน้ำหนักจากโรเตอร์ กับ ไม่มีภาระน้ำหนักจากโรเตอร์

ผลจากการเปรียบเทียบค่าการเสียรูปที่ได้จากการคำนวณกับการทดลองด้วยการวัดจากซัพพอร์ตจริง นั้น ได้ค่าที่ต่างกันเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงทำการทดสอบว่าโปรแกรมให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องหรือไม่ โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรมกับคำนวณจากทฤษฎี พบว่ามีความคลาดเคลื่อนที่น้อย ซึ่งยอมรับได้ ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมมีความถูกต้อง และผลการเปรียบเทียบค่าการเสียรูปที่ได้จากการคำนวณกับการทดลองด้วยการวัดจากซัพพอร์ตจริง ที่มีความคลาดเคลื่อนสูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ค่าความเสียรูปจากการคำนวณมีค่าแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดลองด้วยการวัดจากซัพพอร์ตจริงอย่างมาก มาจาก

1. แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่าการเสียรูป เป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่จำลองมาจากการใช้งานจริงของซัพพอร์ต โดยแบบจำลองไม่ได้ใส่รายละเอียดตรงตามที่ได้ใช้งานจริง เช่น มีสลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลียว (Bolt) และ แป้นเกลียว (Nut) ที่ยึดแผ่นรอง V block กับ ชัฟพอร์ด และโครงเหล็กที่ทำการยึด V block กับแผ่นรอง V block

2. มีการผันแปร (Variation) จากการวัดชิ้นงาน เนื่องจากมีชิ้นส่วนที่มาประกอบกัน เช่น ชัฟพอร์ด กับ แผ่นรอง V block

3. การขยับของโรเตอร์ ในขณะที่ทำงานจริง ทำให้ชัฟพอร์ดเคลื่อน

4. การเชื่อม ทำให้เกิดการบิดตัว ซึ่งทำให้ผิวที่ทำการวัดบิดมากกว่าปกติ

5. แรงที่มากกระทำกับชัฟพอร์ด สำหรับที่ใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรมมีเพียงแรงจากน้ำหนักของโรเตอร์แต่ในการใช้งานจริงอาจมีแรงนอกจากน้ำหนักของโรเตอร์เช่น แรงจากเครื่องจักรขณะที่ทำการซ่อมบำรุงโรเตอร์

ซึ่งสาเหตุต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมานั้นทำให้ค่าการเสียรูปจากการทดลองด้วยการวัดจากชัฟพอร์ดจริง มีค่าสูงกว่าค่าการเสียรูปที่ได้จากการคำนวณอย่างมาก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 แบบจำลองชัฟพอร์ด ควรคำนึงถึงอิทธิพลรอยเชื่อม ความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งอาจมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างชัฟพอร์ด

5.2.2 แรงที่กระทำกับชัฟพอร์ด ควรพิจารณาแรงที่มากกระทำกับชัฟพอร์ดทั้งหมดสำหรับการใช้งานจริงของเครื่องจักรเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้มาจากการคำนวณของการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่ถูกต้องแม่นยำ

5.2.3 ในการวัดพิคัดของตำแหน่ง เพื่อหาระยะความต่างของค่าพิคัดของตำแหน่งในแนวแกน z ของชัฟพอร์ดในการใช้งานจริง ควรวัดพิคัดของตำแหน่งที่บริเวณพื้นผิวของชัฟพอร์ด เพื่อให้ได้ค่าพิคัดที่ถูกต้อง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เดช พุทธเจริญทอง. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2541
- [2] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2555
- [3] มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 1479-2541 และมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น JIS G 3101-2004 ของเหล็ก SS400. สืบค้นจาก. <http://www.ssi-steel.com/index.php/homepage/258-english-categories/service-center/faqs/>
- [4] วิธี Topology Optimization. สืบค้นจาก <https://metrosystems-des.com/solidworks-topology-optimization/>
- [5] อ.สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ, ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, ดร.ธำชยา เหลืองวรานันท์, ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา, ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล. วัสดุศาสตร์ และ วิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด. 2548
- [5] Difference Between Strength and Stiffness. Retrieved from <https://pediaa.com/difference-between-strength-and-stiffness/>
- [6] Jorge Nocedal, Stephen J. Wright. **Numerical optimization**. New York : Springer-Verlag, Inc. 1999
- [7] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke and Richard G. Budynas. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. Edition 9. McGrawHill. 2011
- [8] Structures and Stiffness. Retrieved from [https://engineering.sjsu.edu/e10/wp-content/uploads/Structure\\_Stiffness\\_S13.pdf](https://engineering.sjsu.edu/e10/wp-content/uploads/Structure_Stiffness_S13.pdf)
- [9] SS400 Steel Plate. Retrieved from <http://www.steelplatesforsale.com/blog/SS400-steel-plate.html>
- [10] Universal Horizontal Lathes. Retrieved from <https://skodamt.com/en/products/universal-horizontal-lathes/skoda-sr-1-5-series>