

การปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของฟิกเจอร์สำหรับยกชิ้นงาน Thrust Reverser ให้แข็งแรงและเบา

นายกัลป์ อิสรานนทกุล

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของฟิกเจอร์สำหรับยกชิ้นงาน Thrust Reverser ให้แข็งแรงและเบา

นายกัลป์ อิสรานนทกุล

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของฟิกเจอร์สำหรับยกชิ้นงาน Thrust Reverser ให้แข็งแรงและเบา

โดย นายกัลป์ อิสรานนทกุล

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา อัศวรุ่งแสงกุล)

..... กรรมการ
(ดร.เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล)

ชื่อ : นายกัลป์ อิสรานนทกุล
ชื่อการค้นคว้าอิสระ : การปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของฟิกเจอร์สำหรับยกชิ้นงาน Thrust Reverser ให้แข็งแรงและเบา
สาขาวิชา : วิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย
ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคานรับแรงของอุปกรณ์ช่วยยก Thrust Reverser ให้สามารถยกชิ้นงานในแนวตั้งได้สะดวกและปลอดภัย พร้อมทั้งลดน้ำหนักคานภายใต้ค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor of Safety; FOS) ที่ไม่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน โดยดำเนินการออกแบบและจำลองด้วยโปรแกรม SolidWorks วิธี Finite Element ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design 2^k ในโปรแกรม Minitab เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่มีต่อความแข็งแรงและน้ำหนัก จากนั้นสร้างสมการถดถอยของมวลและค่า FOS และหาค่าที่เหมาะสมด้วย Excel Solver และ Lingo เพื่อยืนยันผลลัพธ์ ผลการศึกษาพบว่าแบบทดลองที่ประกอบด้วย 7 ปัจจัยให้ผลดีที่สุด โดยได้ค่า FOS $\geq$ 4.025 และน้ำหนัก 3.51 กิโลกรัม ซึ่งเทียบเท่ากับคานต้นแบบแต่มีความแข็งแรงมากกว่า (FOS เดิม = 3.1) การทดสอบจริงบริเวณจุดวิกฤติให้ผลสอดคล้องกับแบบจำลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วย Finite Element ร่วมกับ DOE และการหาค่าที่เหมาะสมเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนาโครงสร้างคานรับแรงของอุปกรณ์ช่วยยก Thrust Reverser ให้มีน้ำหนักเบาและปลอดภัยตามเป้าหมายที่กำหนดไว้.

(มีจำนวนทั้งสิ้น 136 หน้า)

คำสำคัญ : คานรับแรง ไฟไนต์เอลิเมนต์ การออกแบบการทดลอง การหาค่าที่ดีที่สุด ดัชนีความปลอดภัย

_____ อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระหลัก

Name : Mr. Kal Isaranontakul
Independent Study Title : Lightweight and High Strength Structural Design of A Lifting Fixture for Thrust Reverser Using Finite Element Based Optimization
Major Field : Industrial Management Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Independent Study Advisor : Assistant Professor Thanasan Intharakumthonchai, Ph.D.
Academic Year : 2025

ABSTRACT

This research aims to develop and improve the load-bearing beam of the Thrust verser lifting device to enable convenient and safe vertical lifting while reducing the am's weight under a safety factor (FOS) not lower than the standard criterion. The sign and simulation were conducted using SolidWorks Simulation (FEM) in mbination with a Full Factorial Design 2^k in Minitab to investigate the effects of rious parameters on strength and weight. Regression equations for mass and FOS re then formulated, and the optimal values were determined using Excel Solver and ngo to validate the results. The study found that the experimental design involving ven factors provided the best performance, achieving an FOS of ≥ 4.025 and a weight 3.51 kilograms, which is equivalent to the original beam but with greater strength riginal FOS = 3.1). The actual test at the critical loading point showed results nsistent with the simulation and exhibited the same trend. It can be concluded that application of FEM, DOE, and optimization techniques is an effective approach for veloping a lightweight and safe load-bearing beam structure for the Thrust Reverser ting device in accordance with the intended objectives.

(Total 136 Pages)

Keywords: Thrust Reverser, Finite Element Method, Design of Experiment,Optimization

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ ด้วยความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ **ผศ.ดร.ธนสาร อินทรกำธรชัย** อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ แนวทางในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินการวิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งขอขอบพระคุณ **คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์** ทุกท่าน ที่ได้เมตตาให้คำแนะนำเพิ่มเติมอันทรงคุณค่า จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ **เพื่อน พี่ และน้อง** ในฝ่ายออกแบบและฝ่ายซ่อมบำรุงของบริษัทซึ่งเป็นสถานที่ดำเนินการวิจัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และการสนับสนุนการทำวิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ **มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ** ที่เอื้อเฟื้อให้สามารถใช้โปรแกรม **Solid Works** และ **Minitab** ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ท้ายที่สุด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ **บิดาและมารดา** ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกื้อกูลให้สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทั้งนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้ที่ศึกษาและนำไปใช้ต่อไป

กัลป์ อิสรานนทกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ จ

กิตติกรรมประกาศ ฉ

สารบัญตาราง ช

สารบัญภาพ ซ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 5

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 5

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย 6

1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย 6

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 ทฤษฎีกลศาสตร์วัสดุ (Mechanics of Materials) 8

2.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) 14

2.3 ทฤษฎี Full Factorial Design 2^k 22

2.4 ทฤษฎีการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis) 25

2.5 ทฤษฎีการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) 27

2.6 กฎหมายความปลอดภัยการใช้อุปกรณ์การยก ยึด โยง 31

2.7 หลักการทำงานของ Extensometer 33

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 37

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 40

3.1 การศึกษาชิ้นงานต้นแบบ 43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 กำหนดพารามิเตอร์ในการปรับเปลี่ยนต้นแบบ 52

3.3 การออกแบบตารางการทดลอง 56

บทที่ 4 ผลการทดลอง 60

4.1 สร้างรูปร่าง ออกแบบการทดลอง และหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบ ปัจจัย 60

4.2 สร้างรูปร่าง ออกแบบการทดลอง และหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบ 7 ปัจจัย 77

4.3 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างโปรแกรมการหา Optimization 100

4.4 ผลิตชิ้นงานจริงและนำชิ้นงานจริงไปทดสอบ 101

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 114

5.1 สรุปผลการวิจัย 114

5.2 ผลลัพธ์การทดลอง 115

5.3 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ 118

บรรณานุกรม 119

ภาคผนวก ก 120

ตารางการทดลอง 121

ประวัติผู้จัดทำสารนิพนธ์ 136

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	แผนการดำเนินงานวิจัย	7
2-1	การจัดชุดการทดลองในรูปแบบ 2^3 Full Factorial Design	24
2-2	แสดงปัจจัยทั้ง3ปัจจัยและระดับของการทดลอง	26
2-3	แสดงค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการยกแบบต่างๆ	33
3-1	คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม 6061-T4 (SS) ที่ใช้ในการวิเคราะห์	44
3-2	แสดงค่า FOS ตามความละเอียดของ MESH ณ จุดการทำ Mesh Control	48
3-3	แสดงการกำหนดตัวแปรและระยะต่ำสุด-สูงสุดในแต่ละปัจจัย	53
3-4	แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรระหว่างโปรแกรม SolidWorks และ Minitab	58
4-1	ตัวอย่างการสร้างตารางการทดลองจากโปรแกรม Minitab 19	61
4-2	แสดงผลลัพธ์จาก Slover ด้วยวิธี GRG Nonlinear	73
4-3	แสดงผลลัพธ์จาก SolidWorks ด้วยวิธี FEA	73
4-4	แสดงค่าปัจจัย 6 ปัจจัย ค่า FOS และ ค่า Mass ที่อ่านค่าได้จาก Lingo	75
4-5	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Mass และ FOS ระหว่างโปรแกรม Lingo และ Solid Work	77
4-6	ตัวอย่างการสร้างตารางการทดลองจากโปรแกรม Minitab 19 แบบ 7 ปัจจัย	79
4-7	แสดงผลลัพธ์จาก Slover ด้วยวิธี GRG Nonlinear	92
4-8	แสดงผลลัพธ์จาก SolidWorks ด้วยวิธี FEA	93
4-9	เปรียบเทียบเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนผลลัพธ์ FOS ระหว่างโปรแกรม	93
4-10	แสดงค่าปัจจัย 7 ปัจจัย ค่า FOS และ ค่า Mass ที่ได้จาก Lingo	95
4-11	แสดงค่าที่แตกต่างระหว่างโปรแกรม Excel และ Lingo	95
4-12	แสดงตารางพารามิเตอร์ที่ FOS ไม่ต่ำกว่า 4.025 จาก Excel Solver	96
4-13	เปรียบเทียบเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนผลลัพธ์ FOS ที่ 4.025ระหว่างโปรแกรม	98
4-14	แสดงค่าปัจจัย 7 ปัจจัย ค่า FOS และ ค่า Mass ที่ได้จาก Lingo ที่ FOS 4.025	99
4-15	แสดงค่าที่แตกต่างระหว่างโปรแกรม Excel และ Lingo	99
4-16	แสดงค่า Optimization ของโปรแกรม Excel Solver และ Lingo แบบ 6 ปัจจัย	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-17	แสดงค่า Optimization ของโปรแกรม Excel Solver และ Lingo แบบ 7 ปัจจัย ที่ FOS 3.5	100
4-18	แสดงค่า Optimization ของโปรแกรม Excel Solver และ Lingo แบบ 7 ปัจจัย ที่ FOS 4.025	101
4-19	แสดงค่า Stress และ Strain ของชิ้นงาน	110
4-20	แสดงตัวอย่างผลการทดสอบข้อมูลดิบของชิ้นงานก่อนพัฒนา	111
4-21	แสดงตัวอย่างผลการทดสอบข้อมูลดิบของชิ้นงานหลังพัฒนา	111
4-22	แสดงค่า Stress และ Strain ของชิ้นงานในรูปแบบการทดลอง	112
4-23	แสดงค่าStressระหว่างการSimulationและการทดสอบจริง	112
5-1	แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนขนาดของปัจจัยและผลระหว่างชิ้นงานตั้งต้นกับชิ้นงานใหม่แบบ 6 ปัจจัย	116
5-2	แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนขนาดของปัจจัยและผลระหว่างชิ้นงานตั้งต้นกับชิ้นงานใหม่แบบ 7 ปัจจัย	117
5-3	แสดงการเปรียบเทียบค่า Stress และค่าความคลาดเคลื่อนของ 2 ชิ้นงาน	118

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	ตัวกลับแรงดันไอพ่น (Thrust Reverser) ของเครื่องยนต์แบบ CFM56-5B	2
1-2	ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการยกชิ้นงาน	3
1-3	แสดงจุดยกอุปกรณ์ในการยกชิ้นงานในปัจจุบัน	3
1-4	ภาพจำลองการยกชิ้นงานในแนวตั้งฉากชิ้นงานกับพื้น	4
1-5	ภาพชิ้นงานคานรับแรง (ซ้าย) และจุดยึดระหว่างคานรับแรงและชิ้นงาน (ขวา)	4
2-1	ลักษณะทิศทางของความเค้น ณ จุดใดๆบนวัสดุ	11
2-2	แสดงแรงภายนอกและแรงภายในที่กระทำกับวัสดุ	11
2-3	แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ในชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์ Finite Element	14
2-4	ลักษณะของเอลิเมนต์ 1 มิติ	16
2-5	แสดงตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ 1 มิติในการวิเคราะห์ปัญหา (Daryl,2550)	16
2-6	ลักษณะของเอลิเมนต์ 2 มิติ	17
2-7	ตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ 2มิติในการวิเคราะห์ปัญหาพื้นผิว (กชกร,2554)	18
2-8	แสดงลักษณะของเอลิเมนต์ 3 มิติ	20
2-9	แสดงความแตกต่างของโครงสร้าง 2 มิติ และ 3 มิติ	21
2-10	แสดงการเขียนคำสั่งในโปรแกรม Lingo	30
2-11	แสดงค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่ใช้กับปั้นจั่น	32
2-12	Extensometer ติดตั้งกับเครื่องทดสอบแรงดึง	34
2-13	แสดงการติดตั้ง Extensometerบนชิ้นงานตัวอย่าง	35
2-14	แสดงประเภทของ Extensometer ก. Mechanical ข. Electrical ค. Optical	36
3-1	ค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์การใช้งานรอกและเครน	41
3-2	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	42
3-3	ชิ้นงานต้นแบบ CAD MODEL	43
3-4	Dimension ของต้นแบบคานรับแรง	43
3-5	CAD Model จาก โปรแกรม SolidWorks	44
3-6	แสดงรายละเอียดภาพรวมของการจำลองFinite Element Method	45
3-7	แสดงรายละเอียดในโหมด Remote Displacement	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-8	แสดงรายละเอียดในโหมด Remote Load/Mass	46
3-9	แสดงภาพ Mesh ของชิ้นงาน และจุดเฉพาะ Mesh ละเอียด	47
3-10	แสดงรายละเอียดการกำหนด Mesh ของชิ้นงาน	48
3-11	แสดงรายละเอียดการกำหนด Gravity	48
3-12	แสดงน้ำหนักของชิ้นงาน	49
3-13	แสดงค่า Stress ของแบบชิ้นงาน	50
3-14	แสดงค่า Displacement ของแบบชิ้นงาน	50
3-15	แสดงค่า FOS ของแบบชิ้นงาน	51
3-16	แสดงชิ้นงานที่นำมาวิจัย	52
3-17	แสดงระยะของปัจจัยที่ 1 (Dimension 1)	53
3-18	แสดงระยะของปัจจัยที่ 2 (Dimension 2)	54
3-19	แสดงระยะของปัจจัยที่ 3 (Dimension 3)	54
3-20	แสดงระยะของปัจจัยที่ 4 (Dimension 4)	55
3-21	แสดงระยะของปัจจัยที่ 5 (Dimension 5)	55
3-22	แสดงระยะของปัจจัยที่ 6 (Dimension 6)	56
3-23	รายละเอียด Dimension ของ Bolt ขนาด M10	57
3-24	กำหนดความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์และค่าสูงสุดต่ำสุดในโปรแกรม Minitab 19	58
3-25	แสดงแผนผังขั้นตอนการหารูปร่างที่เหมาะสม	59
4-1	นำข้อมูลรูปแบบจากโปรแกรม Minitab ใส่ในโปรแกรม SolidWorks เพื่อสร้าง Cad Model	62
4-2	CAD Model (26) หลังการทดสอบ Finite Element ทราบค่า Factor of Safety	63
4-3	CAD Model (26) หลังการทดสอบ Finite Element ทราบค่า Mass	63
4-4	การนำข้อมูลจาก Finite Element กรอกลงตารางการทดลองใน Minitab	64
4-5	กำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไข	65
4-6	แสดงข้อมูลของสมการเป้าหมาย (Mass) รวมปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-7	แสดงข้อมูลของสมการเงื่อนไข (FOS) รวมปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ	67
4-8	แสดงข้อมูลสมการเป้าหมาย (Mass) หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก	68
4-9	แสดงข้อมูลสมการเงื่อนไข (FOS) หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก	68
4-10	แสดงสมการถดถอยเพื่อเอาไปใช้หาค่าที่ดีที่สุดของสมการเงื่อนไข (FOS)	69
4-11	แสดงสมการถดถอยเพื่อเอาไปใช้หาค่าที่ดีที่สุดของสมการเป้าหมาย (Mass)	69
4-12	แสดงการกำหนดสมการเป้าหมาย (Mass) ใน Excel Solver	70
4-13	แสดงการกำหนดสมการเงื่อนไข (FOS) ใน Excel Solver	70
4-14	ตั้งค่า Solver จาก Microsoft Excel	71
4-15	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ CAD Model ตามการคำนวณของ Excel Solver	72
4-16	แสดงค่า Mass ที่ได้หลังการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver	72
4-17	แสดง ค่า FOS ที่ได้หลังจากการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver	73
4-18	แสดงโค้ด (Syntax) ที่เขียนในโปรแกรม Lingo	74
4-19	แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการ Solver ของโปรแกรม Lingo	75
4-20	แสดงค่า FOS จากการตั้งค่าขนาดตามโปรแกรม Lingo	76
4-21	แสดงค่าน้ำหนักจากการตั้งค่าขนาดตามโปรแกรม Lingo	76
4-22	แสดงระยะพารามิเตอร์ใหม่ของส่วนโค้งรัศมี	77
4-23	แสดงระยะพารามิเตอร์ใหม่ระหว่างชิ้นคานและรัศมี	78
4-24	นำข้อมูลรูปแบบจากโปรแกรม Minitab ใส่ในโปรแกรม SolidWorks และสร้าง Cad Model	80
4-25	CAD Model (26) หลังการทดสอบ Finite Element ทราบค่า Factor of Safety	81
4-26	CAD Model (26) หลังการทดสอบ Finite Element ทราบค่า Mass	81
4-27	การนำข้อมูลจาก Finite Element กรอกลงตารางการทดลองใน Minitab	83
4-28	กำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขด้วยวิธี Regression	84
4-29	แสดงข้อมูลของสมการเป้าหมาย (Mass) รวมปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ	85
4-30	แสดงข้อมูลของสมการเงื่อนไข (FOS) รวมปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ	86
4-31	แสดงข้อมูลสมการเป้าหมาย (Mass) หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-32	แสดงข้อมูลสมการเงื่อนไข (FOS) หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก	87
4-33	แสดงสมการถดถอยเพื่อเอาไปใช้หาค่าที่ดีที่สุดของสมการเงื่อนไข (FOS)	88
4-34	แสดงสมการถดถอยเพื่อเอาไปใช้หาค่าที่ดีที่สุดของสมการเป้าหมาย (Mass)	88
4-35	แสดงการกำหนดสมการเป้าหมาย (Mass) ใน Excel Solver	89
4-36	แสดงการกำหนดสมการเงื่อนไข (FOS) ใน Excel Solver	89
4-37	ตั้งค่า Solver จาก Microsoft Excel	90
4-38	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ CAD Model ตามการคำนวณของ Excel Solver	91
4-39	ค่า Mass ที่ได้หลังการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver	91
4-40	ค่า FOS ที่ได้หลังจากการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver	92
4-41	แสดงโค้ด (Syntax) ที่เขียนในโปรแกรม Lingo	94
4-42	แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการ Solver ของโปรแกรม Lingo	94
4-43	แสดงการเปลี่ยนขอบเขตของค่าดัชนีความปลอดภัย	96
4-44	ค่า Mass ที่ได้หลังการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver	97
4-45	ค่า FOS ที่ได้หลังการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver	97
4-46	แสดงโค้ด (Syntax) ที่เขียนในโปรแกรม Lingo	98
4-47	แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการ Solver ของโปรแกรม Lingo	99
4-48	แสดงชิ้นงานด้วยวัสดุ SS400 เพื่อใช้ในการทดลอง	102
4-49	แสดงการกำหนด Boundary สำหรับชิ้นงานทดสอบ	104
4-50	เครื่อง Tensile Load Test	105
4-51	Extensometer Gauge Range 25 mm	106
4-52	แสดงอุปกรณ์ใช้ในการยึดและดึงชิ้นงาน	106
4-53	แสดงการยึดและการดึงชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Test	107
4-54	แสดงตำแหน่งการวัดระยะยืดของชิ้นงานเพื่อติดตั้ง Extensometer	108
4-55	แสดงการติดตั้ง Extensometer กับชิ้นงาน	108
4-56	แสดงจอปรับตั้งก่อนการทดลอง	109
4-57	แสดงผลการ Simulation ของชิ้นงาน (ก) ก่อนพัฒนา และ (ข) หลังพัฒนา	109

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-58	กราฟเปรียบเทียบ Stress ระหว่างการทดลองและการ Simulation ที่แรง 30 , 90 , 200 , 500 และ 1,250 N	113
5-1	แสดงภาพจำลองชิ้นงานคานรับแรงด้วยค่า Optimization แบบ 7 ปัจจัย	117

บทที่ 1

บทนำ

ในหัวข้อนี้เป็นการเกริ่นนำที่มาของปัญหาที่จะนำมาทำการวิจัย กรอบแนวคิดของการวิจัย กำหนดขอบเขต เพื่อทำการวางแผนงานวิจัยในเบื้องต้น โดยมีหัวข้อดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

รายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ อธิบายได้ดังต่อไปนี้

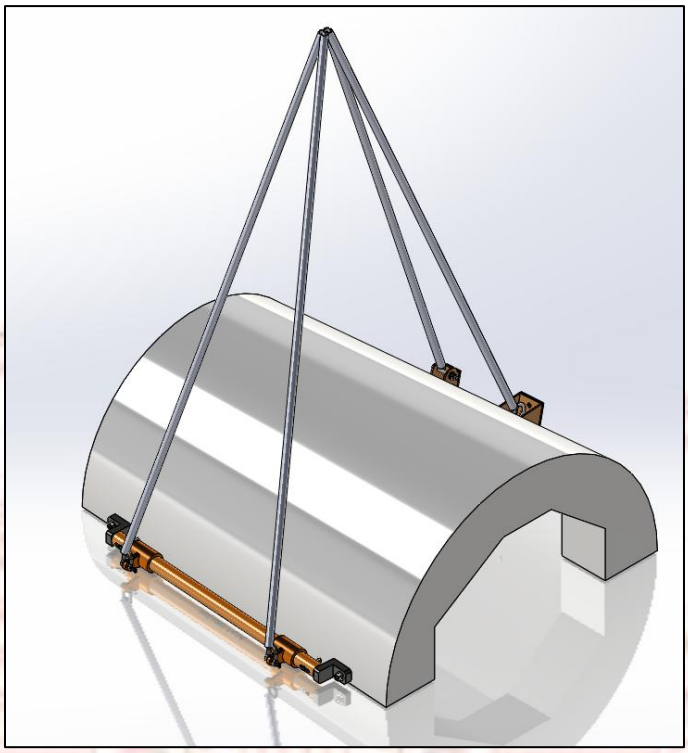
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการบินเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีมาตรฐานด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือสูงที่สุด เนื่องจากทุกชิ้นส่วนของอากาศยานต้องผ่านการตรวจสอบ ซ่อมบำรุง และรับรองตามข้อกำหนดสากลอย่างเข้มงวด หนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อความปลอดภัยในการบิน คือ **Thrust Reverser ดังภาพที่ 1-1** ซึ่งทำหน้าที่ช่วยชะลอความเร็วของเครื่องบินขณะลงจอด อุปกรณ์ดังกล่าวต้องมีการถอดตรวจสอบและซ่อมบำรุงเป็นระยะ เมื่อถึงรอบการ Overhaul จะต้องมีการยกและจัดวาง Thrust Reverser ในท่าทางที่เหมาะสมเพื่อให้ช่างสามารถปฏิบัติงานได้สะดวกและปลอดภัย

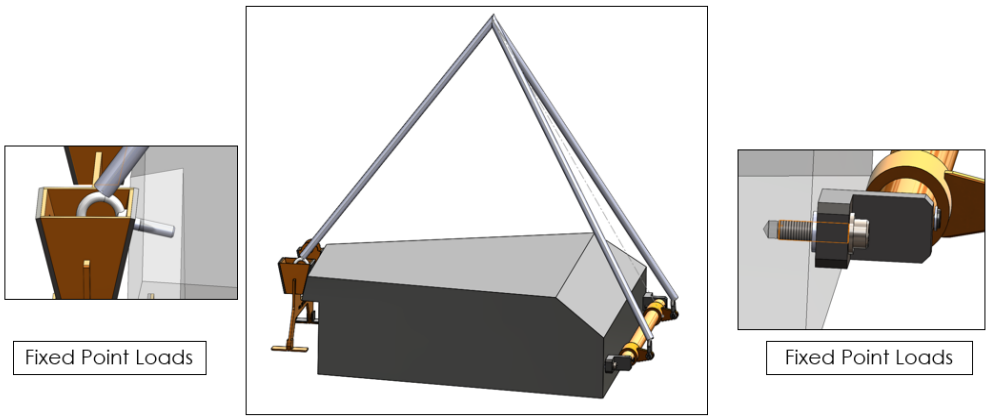


ภาพที่ 1-1 ตัวกลับแรงดันไอพ่น (Thrust Reverser) ของเครื่องยนต์แบบ CFM56-5B

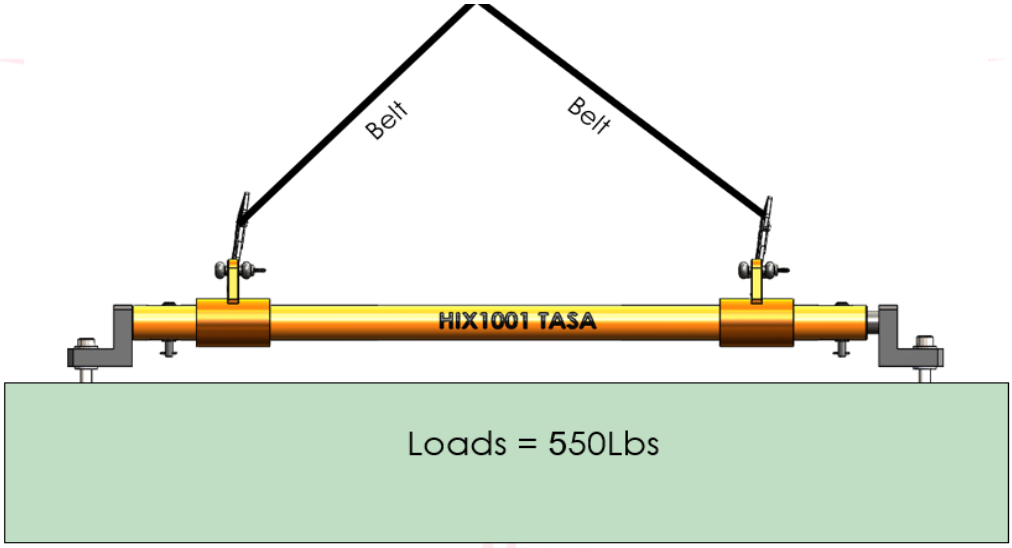
อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ช่วยยกที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกลับมีข้อจำกัด คือสามารถรองรับการยกได้เพียงท่าทางเดียวเท่านั้น ดังภาพที่ 1-2 และ 1-3 ไม่สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้ชิ้นงานสามารถลอยตั้งฉากกับพื้นซึ่งเป็นท่าทางที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมบำรุงจากการสอบถามกับช่างหน้างาน สามารถทำการซ่อมได้หลายงานต่อการยกในท่าทางเดียวเฉพาะในบางกลุ่มงานที่สามารถเข้าซ่อมพร้อมกันในลักษณะชิ้นงานถูกยกอยู่ได้ สามารถประหยัดเวลาได้มากขึ้น ดังภาพที่ 1-4 ซึ่งการที่ชิ้นงานมีข้อจำกัดในท่าทางการยก จะทำให้มีผลกระทบต่อความสะดวกในการทำงานของช่างและอาจเพิ่มต้นทุนในการซ่อมบำรุงอันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านเวลาและวิธีการจัดการชิ้นงาน



ภาพที่ 1-2 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการยกชิ้นงาน



ภาพที่ 1-3 แสดงจุดยกอุปกรณ์ในการยกชิ้นงานในปัจจุบัน



ภาพที่ 1-4 ภาพจำลองการยกชิ้นงานในแนวตั้งฉากชิ้นงานกับพื้น

ด้วยเหตุนี้จึงเกิดความจำเป็นในการ**ออกแบบและปรับปรุงเฉพาะคานรับแรง (Beam) ดังภาพที่ 1-5** ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของอุปกรณ์ช่วยยก โดยต้องคำนึงถึงทั้ง **ความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง น้ำหนักที่เหมาะสม และค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS)** ให้อยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่ามาตรฐานกำหนด เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และเคลื่อนย้ายสะดวกตามความต้องการของหน่วยงานซ่อมบำรุง



ภาพที่ 1-5 ภาพชิ้นงานตัวอย่างคานรับแรง (ซ้าย) และจุดยึดระหว่างคานรับแรงและชิ้นงาน (ขวา)

ในงานวิศวกรรมปัจจุบัน **Finite Element Method (FEM)** ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ความแข็งแรงและการกระจายแรงในชิ้นส่วนเชิงโครงสร้าง ขณะเดียวกัน **Design of Experiment (DOE)** ก็เป็นวิธีที่ช่วยให้สามารถกำหนดปัจจัยและเงื่อนไขในการออกแบบได้อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ การประยุกต์ใช้ FEM ร่วมกับ DOE จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการปรับปรุงรูปแบบของคานรับแรงให้มีความแข็งแรงเพียงพอ น้ำหนักเบาลง และยังคงรักษาความปลอดภัยตามมาตรฐาน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การออกแบบขนาดและรูปร่างของคานรับแรงของอุปกรณ์ช่วยยก Thrust Reverser โดยใช้ระเบียบวิธี Finite Element ร่วมกับการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ได้คานรับแรงที่สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย สะดวก และสอดคล้องต่อความต้องการของช่างซ่อมบำรุงในอุตสาหกรรมการบิน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อให้ชิ้นงานที่ออกแบบมีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้ค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor of Safety, FOS) ไม่ต่ำกว่า 3.5 เท่า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ค่า Load เป็นไปตามน้ำหนักของ Thrust reverser แบบโมเดล CFM 56-5B เท่านั้น

1.3.2 ชิ้นงานที่ผลิตจริงเพื่อใช้ในการทดลองจะผลิตเพียงชิ้นที่เกิดอิทธิพลมากที่สุดเท่านั้น

1.3.3 การศึกษานี้พิจารณาเฉพาะชิ้นส่วนที่รับแรงโดยตรงของโครงสร้างคานรับแรงเท่านั้น ไม่รวมส่วนประกอบอื่นของระบบยก

1.3.4 งานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะสภาวะหยุดนิ่ง (Static Load / Static Equilibrium) โดยไม่รวมแรงกระทำแบบไดนามิก หรือแรงซ้ำ (Dynamic or Fatigue Load)

1.3.5 การทดสอบชิ้นงานจะใช้วัสดุเหล็กSS400ในการผลิตและทดสอบ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบและกำหนดพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ของคานรับแรง

1.4.3 กำหนดปัจจัยและสร้างแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design)

1.4.4 หาน้ำหนักและค่าความปลอดภัยของคานรับแรงในปัจจัยต่าง ๆ โดยการจำลอง Finite Element method

1.4.5 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab สร้างสมการถดถอย (Regression)

1.4.6 หาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ของการทดลองด้วย โปรแกรม Excel Solver และ Lingo

1.4.7 Simulationค่าที่ได้จากการทำOptimization และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโปรแกรม

1.4.8 ผลิตชิ้นงานจริง นำชิ้นงานจริงไปทดสอบ และเก็บข้อมูล

1.4.9 บันทึกผลทั้งหมดของการจำลองทุกสถานการณ์และผลของการทดสอบชิ้นงานจริง

1.4.10 สรุปผลการดำเนินการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

ได้รูปแบบคานรับแรงที่สามารถรับแรงได้และสอดคล้องต่อความต้องการของผู้ใช้โดยมีค่าดัชนีความปลอดภัยที่ไม่ต่ำกว่า 3.5 ตามที่กฎหมายกำหนดภายใต้น้ำหนักของชิ้นงานที่น้อยที่สุด

1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยจะแสดงถึงการบริหารแผนงานวิจัยในภาพรวมตั้งแต่การเก็บรวบรวมข้อมูล วิธีการศึกษา วิธีการทดลองงานวิจัย และการสรุปผลของปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยได้ดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	เดือน1	เดือน2	เดือน3	เดือน4	เดือน5	เดือน6	เดือน7	เดือน8
1. ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	■							
2. ออกแบบและกำหนดพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ของคานรับแรง		■						
3. กำหนดปัจจัยและสร้างแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) ในโปรแกรมMinitab			■					
4. หาน้ำหนักและค่าความปลอดภัยของคานรับแรงในปัจจัยต่างๆโดยการจำลอง Finite Element method			■					
5. วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อให้ได้สมการถดถอย				■				
6. หาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ของการทดลองด้วย โปรแกรม Excel Solver และ Lingo				■				
7. Simulation ค่าที่ได้จากการ Optimizationและเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรม					■			
8. ผลิตชิ้นงานจริง นำชิ้นงานจริงไปทดสอบ และเก็บข้อมูล						■	■	
9. บันทึกผลทั้งหมดของการจำลองทุกสถานการณ์และผลของการทดสอบชิ้นงานจริง							■	
10. สรุปผลการดำเนินการวิจัย								■

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวความคิด ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทางผู้วิจัย นำทฤษฎีต่างๆมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงานวิจัยเพื่อใช้สำหรับการหารูปร่างที่เหมาะสมของคานรับแรงยก Thrust Reverser โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุดภายใต้ค่าความปลอดภัยตามกฎหมายกำหนด ดังนั้นจึงต้องมีการนำทฤษฎีทางด้านต่างๆมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีกลศาสตร์วัสดุ (Mechanics of Materials)

2.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

2.3 ทฤษฎี Full Factorial Design 2^k

2.4 ทฤษฎีการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis)

2.5 ทฤษฎีการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

2.6 กฎหมายความปลอดภัยการใช้อุปกรณ์การยก ยึดโยง

2.7 หลักการทำงานของ Extensometer

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีกลศาสตร์วัสดุ (Mechanics of Materials)

กลศาสตร์ (Mechanics) เป็นแขนงหนึ่งของวิทยาศาสตร์กายภาพที่ศึกษาถึงแรง (Force) และผลกระทบของแรงที่กระทำต่อวัตถุ (Effect of Force on Objects) ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญในการอธิบาย

พฤติกรรมของวัตถุทั้งในสภาวะสมดุลและการเคลื่อนที่ กลศาสตร์สามารถแบ่งออกเป็นหลายสาขาย่อย เช่น กลศาสตร์สถิต (Statics) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับวัตถุที่อยู่ในสมดุล กลศาสตร์พลศาสตร์ (Dynamics) ที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุ และกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) ซึ่งมุ่งเน้นการเคลื่อนที่และพฤติกรรมของของไหล

ความรู้ทางกลศาสตร์มีบทบาทสำคัญในหลายแขนงของวิศวกรรมศาสตร์ เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กลศาสตร์ในสาขาต่างๆ ได้แก่:

1. **วิศวกรรมโครงสร้างและโยธา** – ใช้หลักกลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพ ความแข็งแรง และการเสียรูปของโครงสร้างอาคาร สะพาน และโครงสร้างพื้นฐานอื่นๆ
2. **วิศวกรรมเครื่องกล** – ใช้ในการออกแบบเครื่องจักรกล วัสดุโครงสร้าง องค์ประกอบของเครื่องยนต์ ตลอดจนการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของระบบ
3. **วิศวกรรมยานยนต์และอวกาศ** – ประยุกต์ใช้กลศาสตร์ในการออกแบบระบบควบคุมยานพาหนะ อากาศยาน และยานอวกาศ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการขับเคลื่อน
4. **วิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกลไฟฟ้า** – ศึกษาปฏิกิริยาของแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าและเครื่องจักรกล เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
5. **กลศาสตร์ของไหลและพลศาสตร์ของไหล** – ใช้ในงานด้านวิศวกรรมปิโตรเลียม อุทกพลศาสตร์ การออกแบบระบบท่อส่งของไหล รวมถึงการศึกษาการเคลื่อนที่ของอากาศในอากาศยานและรถยนต์

ด้วยความหลากหลายของการประยุกต์ใช้ กลศาสตร์จึงถือเป็นรากฐานที่สำคัญของวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งช่วยให้สามารถออกแบบ ควบคุม และพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กลศาสตร์ของวัสดุเป็นสาขาหนึ่งของวิชากลศาสตร์ที่ศึกษาผลกระทบภายในส่วนเชิงกลเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุ ความเค้น (Stress) หรือหน่วยแรงมีความเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของวัสดุ ในขณะที่ความเครียด (Strain) เป็นตัวบ่งบอกถึงการเสียรูปของวัสดุ

ก่อนที่จะสามารถวิเคราะห์ค่าความเค้นและความเครียดได้ จำเป็นต้องมีพื้นฐานของการวิเคราะห์ทางด้านสถิตศาสตร์ก่อน โดยค่าความเค้นหมายถึงอัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อพื้นที่ของวัสดุ สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่:

- ความเค้นแนวแกน (Normal Stress)
- ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

ความเค้นแนวแกนเกิดขึ้นเมื่อมีแรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการ: $\sigma = P/A$ โดยที่

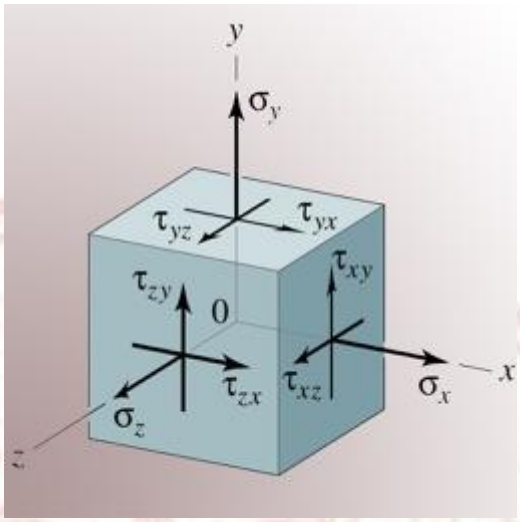
- σ = ความเค้น (N/m)
- P = แรงที่กระทำ (N)
- A = พื้นที่หน้าตัด (m)

ความเค้นเฉือนเกิดขึ้นเมื่อมีแรงที่กระทำขนานกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการ: $\tau = V/A$ โดยที่

- τ = ความเค้นเฉือน (N/m)
- V = แรงเฉือนที่กระทำต่อหน้าตัด (N)
- A= พื้นที่หน้าตัด (m)

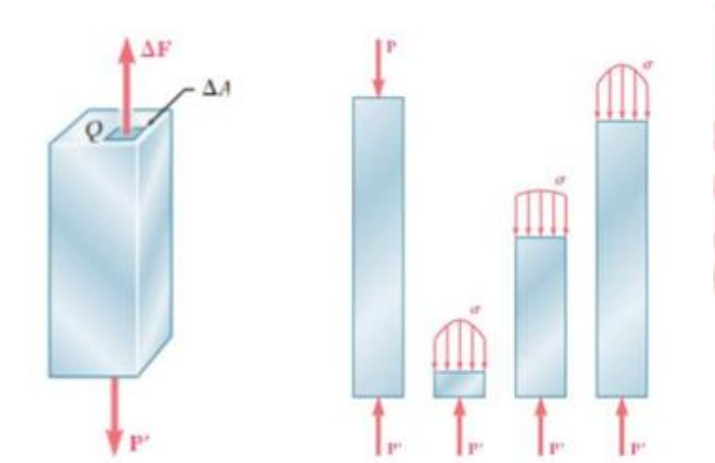
โดยทั่วไป ณ จุดใดๆ ในวัสดุจะมีความเค้นกระทำอยู่ทั้งหมด 6 รูปแบบ ได้แก่:

- ความเค้นปกติในแนวแกน x, y และ z
- ความเค้นเฉือนในระนาบ xy, yz และ zx



ภาพที่ 2-1 ลักษณะทิศทางของความเค้น ณ จุดใดๆบนวัสดุ

เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับชิ้นส่วนเชิงกล ความเค้นในแนวแกนสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ $\sigma = P/A$: โดยค่าความเค้นนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ



ภาพที่ 2-2 แสดงแรงภายนอกและแรงภายในที่กระทำกับวัสดุ

วัสดุที่รองรับความเค้นแบ่งเป็น 3 กลุ่มได้ดังนี้

- วัสดุที่รองรับแรงดึง

วัสดุบางชนิดสามารถทนต่อแรงดึงได้สูง เช่น เหล็กกล้า ไทเทเนียม และโพลิเมอร์บางชนิด ซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสูง

- วัสดุที่รองรับแรงอัด

วัสดุที่รองรับแรงอัดได้ดี เช่น คอนกรีต เซรามิก และโลหะบางชนิด มีโครงสร้างโมเลกุลที่แข็งแกร่ง ช่วยให้ทนต่อการบีบอัด

- วัสดุที่รองรับแรงเฉือน

วัสดุที่รองรับแรงเฉือนได้ดี เช่น เหล็กและวัสดุคอมโพสิต ซึ่งมีความแข็งแรงเชิงกลสูงในทิศทางต่างๆ

การทดสอบความเค้นมี 3 แบบดังนี้

- การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงดึง โดยใช้เครื่องมือวัดความเค้น-ความเครียดเพื่อตรวจสอบค่าความเค้นสูงสุดและจุดครากของวัสดุ

- การทดสอบแรงอัด (Compression Test)

ใช้ในการวัดความสามารถของวัสดุที่ทนต่อแรงอัดนิยมใช้กับคอนกรีตและเซรามิก

- การทดสอบแรงเฉือน (Shear Test)

เป็นการวิเคราะห์ความสามารถของวัสดุในการรับแรงเฉือน โดยใช้เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างวัสดุเมื่อถูกแรงเฉือนกระทำ

ค่าความปลอดภัย

ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: F.S.) เป็นแนวคิดที่ใช้เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นส่วนทางวิศวกรรมสามารถรับภาระได้โดยไม่เกิดความล้มเหลว วิธีการคำนวณค่าความปลอดภัยสามารถใช้สมการ: $F.S. = \sigma max / \sigma Allow$ โดยที่

- F.S. = ค่าคงที่ความปลอดภัย
- σmax = ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้
- $\sigma Allow$ = ค่าความเค้นที่ยอมให้

ความปลอดภัยในอุตสาหกรรมและกฎหมายบังคับ

สำหรับอุปกรณ์ยกของ เช่น รอก คานยก และเครน มีกฎหมายและมาตรฐานที่บังคับใช้เพื่อความปลอดภัย ตัวอย่างเช่น:

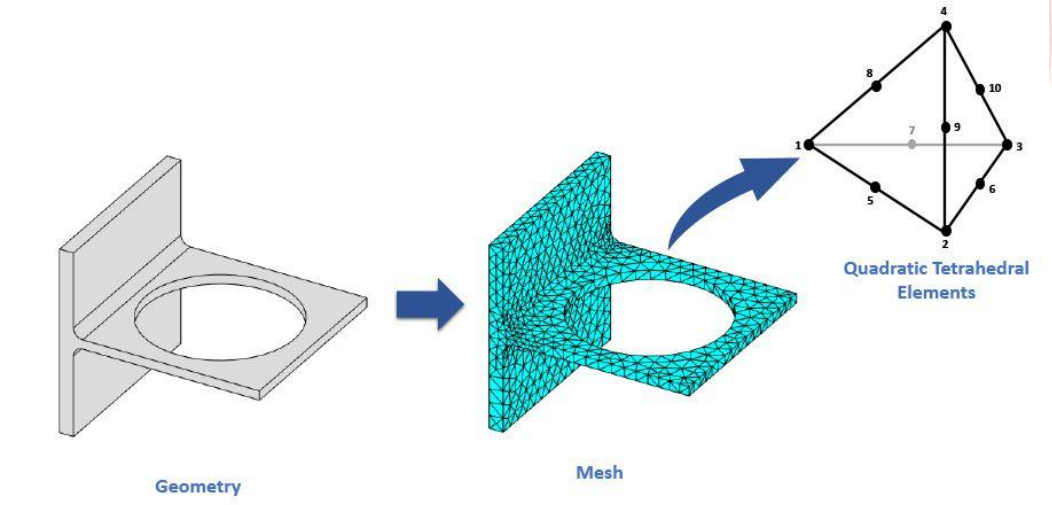
- เครนและรอกไฟฟ้า: ต้องมีค่าความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กำหนด
- คานยก (Beam Lifting): ค่าความปลอดภัยต้องอยู่ในช่วง 3-6 เท่าของแรงที่กระทำขึ้นกับประเภทของวัสดุและการออกแบบ
- สลิงและโซ่ยกของ: ตามมาตรฐานสากล เช่น ASME B30 หรือ ISO 16625 ต้องมีค่าความปลอดภัยอย่างน้อย 5-7 เท่าของภาระสูงสุดที่กำหนด

การกำหนดค่าความปลอดภัยในอุตสาหกรรมต่างๆ

- อุตสาหกรรมก่อสร้าง: ค่า F.S. สำหรับโครงสร้างต้องไม่น้อยกว่า 2-3 เท่า
- อุตสาหกรรมยานยนต์: ค่าความปลอดภัยสำหรับส่วนประกอบของเครื่องยนต์อาจอยู่ที่ 1.5-2 เท่า
- อุตสาหกรรมการบิน: ค่าความปลอดภัยสำหรับเครื่องบินและชิ้นส่วนโครงสร้างอากาศยานมักอยู่ที่ 1.2-1.5 เท่า เพื่อให้มั่นใจในน้ำหนักเบาและปลอดภัย

2.2 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรมเพื่อการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการแปลงให้อยู่ใน รูปแบบสมการเชิงพีชคณิต (Algebraic Equations) หลังจากนั้นนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) มาวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบโดยคำตอบที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของผลเฉลยโดยประมาณทำให้ การจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นิยมนาไปใช้วิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ด้าน กลศาสตร์ของแข็งอย่างกว้างขวางเช่นวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างโครงสร้างของเครื่องบินความเค้นของชิ้นส่วนรถยนต์การจำลองการขึ้นรูปโลหะ เป็นต้น โดยวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในสภาพ ยืดหยุ่น (Elastic) หรือในสภาพยืดตัว (Plastic) ก็ได้นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ปัญหาในด้าน พลศาสตร์ได้อีกด้วยเช่นการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการสั่นสะเทือนของโครงสร้างการ ถ่ายเทความร้อน และการไหลของของไหลเป็นต้นโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีหลักพื้นฐานมาจากวัตถุพยายามรักษาสมดุลของแรงภายในทุกทิศทุกทางที่เกิดจากแรงภายนอกที่มากระทำ โดยแบ่งโครงสร้างที่ซับซ้อนออกเป็นองค์ประกอบเล็กๆ หรือ "เอลิเมนต์" และทำการคำนวณพฤติกรรมขององค์ประกอบแต่ละส่วนเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์พฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้าง



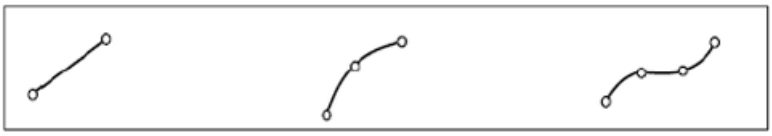
ภาพที่ 2-3 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ในชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์ Finite Element

ข้อดีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นคือมีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีความซับซ้อนไม่มีข้อจากัดในด้านการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายจากการสร้างชุดชิ้นงานมาทำการทดสอบจริง และสามารถจำลองรูปแบบปัญหาได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก โดยให้ความสนใจในส่วนของพฤติกรรมการเสียรูปของชิ้นมากกว่าองค์ประกอบส่วนอื่นๆ ทำให้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามามีบทบาทสำคัญในการจำลองพฤติกรรมการขึ้นรูป ซึ่งการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขการเสียรูปจำนวนมาก (Large Deformation) ที่เกินกว่าจุดเค้นคราก (Yield Point) โดยปกติในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่งนั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกัน และมีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมซึ่งประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่มีความแตกต่างกัน อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งไปตามลักษณะต่าง ๆ ตามรูปร่างของ ปัญหานั้นๆหรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าค่าของผลเฉลยแม่นตรงจะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ทั้งหมดเป็นจำนวนอนันต์ ทำให้ในทางปฏิบัติไม่สามารถหาคำตอบได้ ดังนั้นแทนที่จะทำการหาค่าผลเฉลย แม่นตรงที่ประกอบด้วยค่าจำนวนมากดังกล่าว จึงทำการแปลงค่าผลเฉลยแม่นตรงทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแบ่งรูปร่าง หรือลักษณะของปัญหานั้นออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) ที่มีขนาดต่างกัน

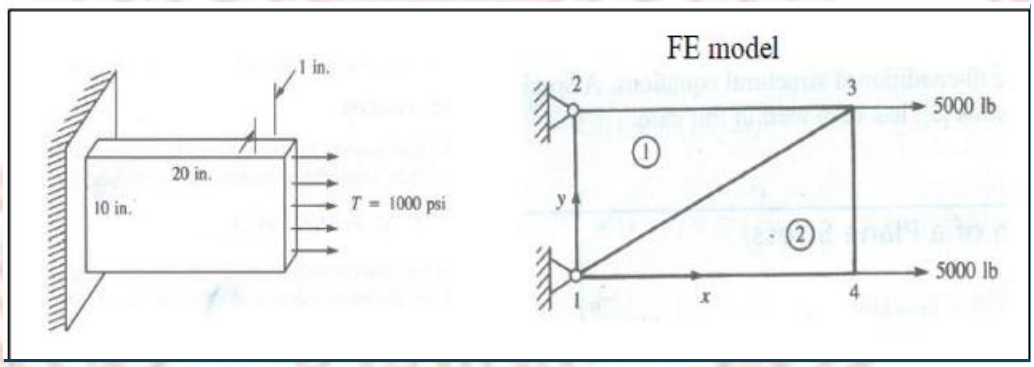
ชนิดของ Element (Element Type)

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนเล็ก ๆ และเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่าง ลักษณะของงาน และการกระทำของภาระโหลดโดยชนิดของเอลิเมนต์อาจจะแบ่งออก ได้ 3 ประเภทตามมิติ คือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหา 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ

เอลิเมนต์ 1 มิติ เป็นรูปแบบง่ายที่สุดและประกอบด้วย 2 จุด ต่อ (Node) ซึ่งเอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับวิเคราะห์ปัญหางานด้านโครงสร้าง หรืองานอื่นๆที่มีการวางตัวตามแนวยาวในลักษณะเป็นท่อนและชิ้นส่วนที่รับแรงบิด ส่วนการวิเคราะห์การโก่งของคานเป็นปัญหาของโครงสร้างที่มีการยืดตัวไม่ตรงซึ่งเหมาะสำหรับเอลิเมนต์แบบ 4 จุดต่อซึ่งคุณสมบัติที่จำเป็นต้องมีการกำหนดเพิ่มให้กับ เอลิเมนต์ 1 มิติ ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานสำ หรับข้อดีของเอลิเมนต์ชนิดนี้ คือการใช้เนื้อที่ของหน่วยความจำเพียงเล็กน้อยรวมทั้งใช้เวลาในการเตรียมข้อมูล และเวลาในการคำนวณไม่มากนัก ส่วน ข้อจำกัดของเอลิเมนต์ชนิดนี้ ได้แก่ ความไม่สมจริงตรงบริเวณจุดต่อของโครงสร้าง และไม่สามารถ แสดงการกระจายตัวของความเค้นบริเวณจุดต่อได้



ภาพที่ 2-4 ลักษณะของเอลิเมนต์ 1 มิติ



ภาพที่ 2-5 แสดงตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ 1 มิติในการวิเคราะห์ปัญหา (Daryl,2550)

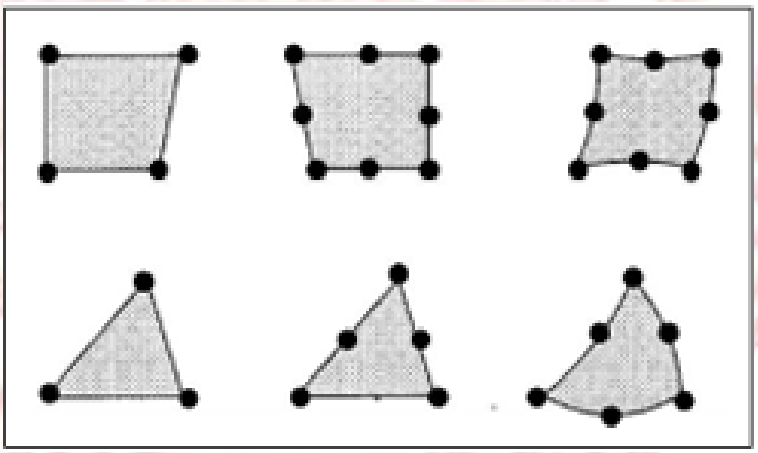
เอลิเมนต์ 2 มิติ ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นองค์ประกอบที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างหรือปัญหาที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง หรือที่สามารถประมาณได้ว่าเป็นปัญหา 2 มิติ เช่น แผ่นโลหะโครงสร้างแผ่น หรือการวิเคราะห์ความเค้น-ความเครียดในระนาบเดียว (Plane Stress/Plane Strain)

1. **เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Triangular Elements)**

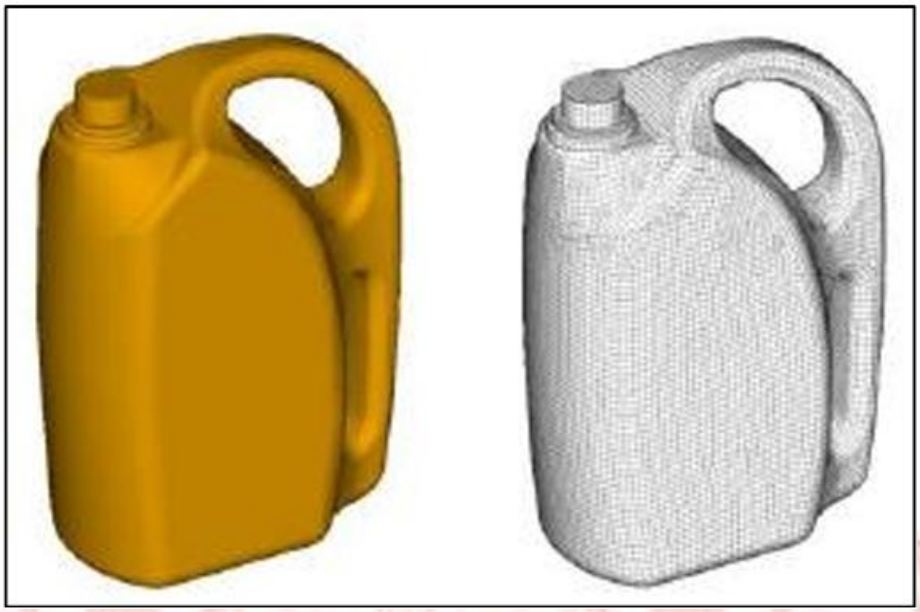
- **Linear Triangle (T3):** มี 3 โหนดที่มุมของสามเหลี่ยม (ใช้ฟังก์ชันอินเตอร์โพลแบบเชิงเส้น)
- **Quadratic Triangle (T6):** มี 6 โหนด (3 ที่มุม + 3 ที่กลางของแต่ละด้าน) เพื่อความแม่นยำสูงขึ้น

2. **เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (Quadrilateral Elements)**

- **Linear Quadrilateral (Q4):** มี 4 โหนดที่มุมของสี่เหลี่ยม
- **Quadratic Quadrilateral (Q8):** มี 8 โหนด (4 ที่มุม + 4 ที่กลางของแต่ละด้าน)
- **Quadrilateral Serendipity (Q9):** มี 9 โหนด (4 ที่มุม + 4 ที่กลางของแต่ละด้าน + 1 จุดกลาง)



ภาพที่ 2-6 ลักษณะของเอลิเมนต์ 2 มิติ



ภาพที่ 2-7 ตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ 2มิติในการวิเคราะห์ปัญหาพื้นผิว (กชกร,2554)

ข้อดีและข้อเสียของเอลิเมนต์ 2 มิติ

ข้อดี:

- ใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์น้อยกว่าการใช้เอลิเมนต์ 3 มิติ
- ง่ายต่อการสร้าง Mesh และคำนวณในปัญหาที่เป็นแผ่นบาง

ข้อเสีย:

- ใช้ไม่ได้กับโครงสร้างที่มีความหนาสูง
- มีข้อผิดพลาดถ้าความละเอียดของ Mesh ไม่เพียงพอ

เอลิเมนต์ 3 มิติ (3D Elements) เป็นองค์ประกอบที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างหรือปัญหาที่มีลักษณะเป็นสามมิติ เช่น ชิ้นส่วนเครื่องจักร โครงสร้างที่มีความหนา การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดในวัสดุหนา หรือการไหลของของไหลแบบสามมิติ

เอลิเมนต์ 3 มิติที่นิยมใช้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

1. เอลิเมนต์สี่หน้า (Tetrahedral Elements)

- **Linear Tetrahedron (T4):** มี 4 โหนดที่มุมของทรงสี่หน้า (ใช้ฟังก์ชันอินเตอร์โพลแบบเชิงเส้น)
- **Quadratic Tetrahedron (T10):** มี 10 โหนด (4 ที่มุม + 6 ที่กลางของแต่ละขอบ) เพื่อความแม่นยำสูงขึ้น

ข้อดี:

- เหมาะกับรูปทรงซับซ้อนที่ต้องใช้การแบ่งตาข่ายแบบอิสระ

ข้อเสีย

- อาจต้องใช้จำนวนองค์ประกอบมากเพื่อความแม่นยำ

2. เอลิเมนต์หกหน้า (Hexahedral Elements)

- **Linear Hexahedron (H8):** มี 8 โหนดที่มุมของทรงหกหน้า
- **Quadratic Hexahedron (H20):** มี 20 โหนด (8 ที่มุม + 12 ที่กลางของแต่ละขอบ)

ข้อดี:

- มีความแม่นยำสูงกว่า Tetrahedral เมื่อใช้จำนวนองค์ประกอบเท่ากัน

ข้อเสีย:

- ต้องการการแบ่ง Mesh อย่างเป็นระบบ อาจใช้เวลานานกว่าการใช้ Tetrahedral

3. เอลิเมนต์ปริซึม (Wedge/Pentahedral Elements) และ ปิรามิด (Pyramidal Elements)

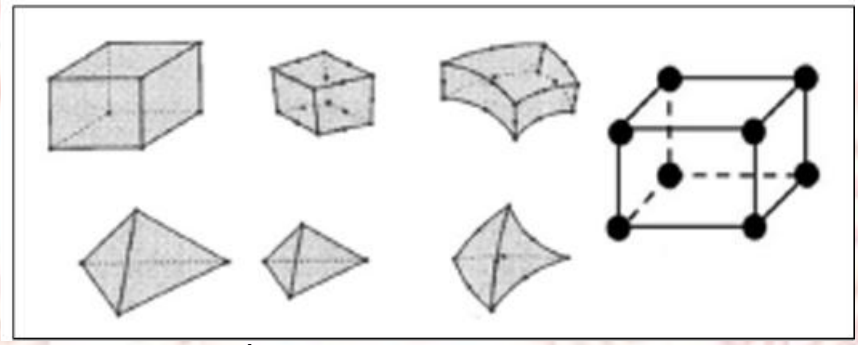
- **Wedge Element (P6, P15):** ใช้ในปัญหาที่ต้องการเปลี่ยนจาก Tetrahedral ไปเป็น Hexahedral
- **Pyramid Element (Py5, Py13):** ใช้เป็นตัวกลางระหว่าง Hexahedral และ Tetrahedral

ข้อดี:

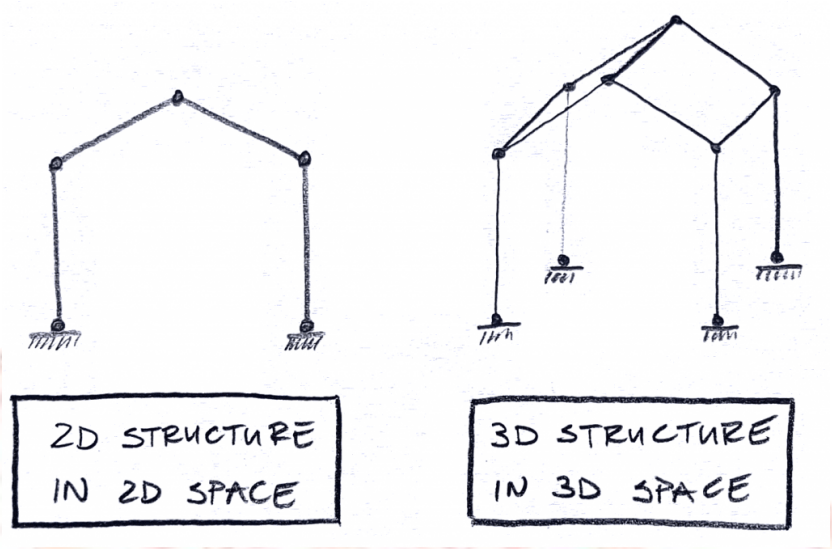
- ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนผ่านของ Mesh ได้ง่ายขึ้น

ข้อเสีย:

- ใช้งานได้เฉพาะบางกรณี และมักมีค่าความแม่นยำต่ำกว่า Hexahedral



ภาพที่ 2-8 แสดงลักษณะของเอลิเมนต์ 3 มิติ



ภาพที่ 2-9 แสดงความแตกต่างของโครงสร้าง 2 มิติ และ 3 มิติ

ข้อดีและข้อเสียของเอลิเมนต์ 3 มิติ

ข้อดี:

- สามารถจำลองปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงได้แม่นยำกว่าการใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ
- เหมาะกับโครงสร้างที่มีความหนาและซับซ้อน

ข้อเสีย:

- ใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์มากกว่าการใช้เอลิเมนต์ 2 มิติ
- การแบ่ง Mesh อาจซับซ้อนและใช้เวลามาก

2.3 ทฤษฎี Full Factorial Design 2^k

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นแนวทางหนึ่งในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต้น (Factors) หลายตัวต่อผลตอบสนอง (Response) โดยการพิจารณาผลของแต่ละตัวแปรทั้งแบบเดี่ยวและแบบปฏิสัมพันธ์ การออกแบบแบบแฟกทอเรียลเต็ม (Full Factorial Design) หมายถึงการออกแบบที่ครอบคลุมการจัดระดับของตัวแปรต้นทั้งหมดทุกความเป็นไปได้ โดยเฉพาะการออกแบบในรูปแบบ 2k2^k2k เป็นรูปแบบพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุดในทางปฏิบัติ

ความหมายของ $\mathbf{2^k}$ Factorial Design

รูปแบบ $\mathbf{2^k}$ Factorial Design หมายถึงการที่ตัวแปรต้นแต่ละตัว (Factor) มี 2 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (Low) และระดับสูง (High) ซึ่งใช้สัญลักษณ์เป็น - และ + ตามลำดับ และมีจำนวนตัวแปรต้นทั้งหมด k ตัว ซึ่งจะส่งผลให้จำนวนการทดลองทั้งหมดมีค่าเท่ากับ$\mathbf{2^k}$ ชุดการทดลอง ตัวอย่างเช่น

- ถ้ามี 2 ตัวแปรต้น (k = 2) จะได้จำนวนชุดการทดลองทั้งหมด $\mathbf{2^2}$=4 ชุด
- ถ้ามี 3 ตัวแปรต้น (k = 3) จะได้จำนวนชุดการทดลองทั้งหมด $\mathbf{2^3}$ =8 ชุด

องค์ประกอบสำคัญของ 2^k Factorial Design

1. **Main Effects (ผลหลัก)**
   คือผลของการเปลี่ยนแปลงระดับของแต่ละตัวแปรต้นที่มีผลต่อผลตอบสนอง โดยไม่ขึ้นกับค่าของตัวแปรต้นอื่น ๆ
   เช่น ตัวแปร A มีผลต่อค่า Y โดยไม่ขึ้นกับ B หรือ C
2. **Interaction Effects (ผลปฏิสัมพันธ์)**
   เป็นผลที่เกิดจากการทำงานร่วมกันของตัวแปรต้นตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ด้วยผลหลักเพียงอย่างเดียว
   เช่น การที่ A และ B มีปฏิสัมพันธ์กัน หมายความว่า ผลของ A ต่อ Y ขึ้นอยู่กับระดับของ B

3. **Run หรือ Trial**

   หมายถึงหนึ่งชุดของการทดลองที่เป็นการรวมระดับของตัวแปรต้นทั้ง kตัว เช่น สำหรับ $\mathbf{2^k}$ จะมี 8 run

4. **Design Matrix**

   ตารางที่ใช้แสดงระดับของตัวแปรต้นในแต่ละชุดการทดลอง โดยใช้สัญลักษณ์ + และ – เพื่อแสดงระดับสูงและต่ำ

การวิเคราะห์ข้อมูลจาก 2^k Factorial Design

หลังจากดำเนินการทดลองตามการออกแบบแล้ว ข้อมูลผลตอบสนองจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินค่าของ Main Effects และ Interaction Effects โดยมักใช้วิธีการคำนวณค่าเฉลี่ย ความแตกต่าง หรือใช้เทคนิคเชิงสถิติเช่น ANOVA (Analysis of Variance) เพื่อหานัยสำคัญของแต่ละปัจจัย

ข้อดีของการออกแบบแบบ 2^k

- สามารถศึกษาผลกระทบของหลายปัจจัยพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- ตรวจสอบได้ทั้งผลหลักและปฏิสัมพันธ์
- มีรูปแบบโครงสร้างที่เป็นระบบ เหมาะกับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึก
- เป็นพื้นฐานของการออกแบบเชิงสถิติอื่น ๆ เช่น Fractional Factorial, Response Surface Methodology (RSM)

ข้อจำกัด

- จำนวนชุดการทดลองเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณตามจำนวนตัวแปรต้น เช่น 25=$\mathbf{2^5}$ =32 ชุด ซึ่งอาจใช้ทรัพยากรมาก
- อาจซับซ้อนเกินไปหากมีปัจจัยจำนวนมาก

การประยุกต์ใช้งาน

การออกแบบการทดลองแบบ 2^k มักถูกนำไปใช้ในงานวิจัยที่ต้องการทราบว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ เช่น

- การควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรม (Industrial Process Optimization)
- การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่
- การศึกษาในสาขาวิศวกรรม การเกษตร เคมีชีวภาพ และเภสัชกรรม
- การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอัลกอริธึมหรือระบบซอฟต์แวร์

ตัวอย่างตารางการออกแบบการทดลองแบบ 2^3

ตัวอย่างนี้เป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็ม 2^3 ซึ่งหมายถึงการทดลองที่มี **3 ตัวแปรต้น (Factors)** ได้แก่ A, B และ C โดยแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ คือ **ระดับต่ำ (-)** และ **ระดับสูง (+)** ดังนั้นจำนวนชุดการทดลองทั้งหมดจะเท่ากับ 2^3=8 ชุดการทดลอง

ตารางที่ 2-1 การจัดชุดการทดลองในรูปแบบ 2^3 Full Factorial Design

ชุดที่(Run)	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

คำอธิบาย:

- คอลัมน์ A, B, และ C คือระดับของตัวแปรต้นในแต่ละชุดการทดลอง

- คอลัมน์ AB, AC, BC, และ ABC คือผลคูณระหว่างระดับของปัจจัย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลปฏิสัมพันธ์
  (เช่น AB = A × B โดยใช้ค่า +1 สำหรับ “+” และ –1 สำหรับ “—”)
- ค่าในคอลัมน์ปฏิสัมพันธ์ได้จากการคูณค่าระดับ (โดย + = +1, — = -1)
  ตัวอย่าง: ชุดที่ 1 ⟶ A = —1, B = —1 ⟶ AB = (—1)×(—1) = +1

2.4 ทฤษฎีการวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression Analysis) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (Independent Variables) กับตัวแปรตาม (Dependent Variable) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อสร้างสมการเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้นที่สามารถใช้ทำนายหรืออธิบายค่าของตัวแปรตามตามการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น

1. สมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)

เป็นกรณีที่มีตัวแปรต้นเพียงตัวเดียว ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสามารถเขียนได้ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

โดยที่:

- Y = ตัวแปรตาม (Dependent Variable)
- X = ตัวแปรต้น (Independent Variable)
- β_0 = ค่าคงที่ (Intercept)
- β_1 = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต้น (Slope)
- ε = ค่าความคลาดเคลื่อน (Error term)

2. สมการถดถอยพหุ (Multiple Linear Regression)

ในกรณีที่มีตัวแปรต้นมากกว่าหนึ่งตัว ความสัมพันธ์สามารถเขียนได้เป็น:

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_3+\cdots+\beta_kX_k+\varepsilon$$

โดยที่ X_1, X_2, X_k คือตัวแปรต้นทั้งหมด k ตัว

3. สมมติฐานเบื้องต้นของการวิเคราะห์ถดถอย

1. ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเชิงเส้น
2. ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์
3. ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนต้องคงที่ (Homoscedasticity)
4. ตัวแปรต้นแต่ละตัวต้องไม่มีความสัมพันธ์กันมากเกินไป (No multicollinearity)

4. ตัวอย่างการวิเคราะห์สมการถดถอย

สมมุติว่ามีการศึกษาผลกระทบของ **อุณหภูมิ (X_1)** และ **เวลาในการผลิต (X_2)** ต่อ **ความแข็งแรงของชิ้นงาน (Y)** ได้ข้อมูลดังตารางที่ 2-2:

ตารางที่ 2-2 แสดงปัจจัยทั้ง3ปัจจัยและระดับของการทดลอง

อุณหภูมิ (X_1, °C)	เวลา (X_2, นาที)	ความแข็งแรง (Y, MPa)
100	10	55
120	10	60
100	20	58
120	20	65

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสถิติหรือการคำนวณด้วยวิธี Least Squares ได้สมการถดถอย:

$$Y=45+0.2X_1+0.5X_2$$

คำอธิบาย:

- ค่าคงที่ 45 หมายถึงค่าเริ่มต้นของความแข็งแรงเมื่อทั้งอุณหภูมิและเวลาเป็น 0 (เชิงทฤษฎี)
- ตัวแปร X_1 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2 MPa
- ตัวแปร X_2: เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น 1 นาที ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5 MPa

สามารถใช้สมการนี้ทำนายค่าความแข็งแรงของชิ้นงานในเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ เช่น หาก X1=110°C ,X2=15 จะได้:

$$Y=45+0.2(110)+0.5(15)=45+22+7.5=74.5 \text{ MPa}$$

5. ค่าประเมินผลการถดถอย

การประเมินคุณภาพของสมการถดถอยสามารถใช้ตัวชี้วัดต่าง ๆ เช่น:

- **ค่า R^2 (R-squared)**: แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนของ Y ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปร Xทั้งหมด
- **ค่า p-value**: ใช้ตรวจสอบนัยสำคัญของตัวแปรในสมการ
- **ค่า Standard Error**: ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าทำนาย

2.5 ทฤษฎีการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) หมายถึง กระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาภายใต้เงื่อนไขหรือข้อจำกัดที่กำหนด โดยทั่วไปจะประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่ต้องการหาค่าสูงสุด (Maximization) หรือค่าต่ำสุด (Minimization) และข้อจำกัด (Constraints) ที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้น ๆ

1. องค์ประกอบพื้นฐานของปัญหาเชิงเหมาะสม (Optimization Problem)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ดังนี้:

- **ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)**
  คือฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุด เช่น ต้นทุนต่ำสุด กำไรสูงสุด ผลผลิตมากที่สุด
- **ตัวแปรการตัดสินใจ (Decision Variables)**
  เป็นตัวแปรที่ต้องกำหนดค่าให้เหมาะสม เช่น ปริมาณการผลิต จำนวนแรงงาน เวลา
- **เงื่อนไขหรือข้อจำกัด (Constraints)**
  เป็นเงื่อนไขที่ต้องปฏิบัติตาม เช่น ขีดจำกัดของทรัพยากร พื้นที่ เวลา งบประมาณ

2. ประเภทของปัญหาเชิงเหมาะสม

- **การหาค่าที่เหมาะสมเชิงเส้น (Linear Programming: LP)**
  เมื่อทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น
- **การหาค่าที่เหมาะสมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Programming: NLP)**
  ฟังก์ชันใดฟังก์ชันหนึ่งไม่เป็นเชิงเส้น เช่น พหุนาม, ฟังก์ชันยกกำลัง, ฟังก์ชันลอการิทึม
- **การหาค่าที่เหมาะสมเชิงจำนวนเต็ม (Integer Programming)**
  ตัวแปรการตัดสินใจต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่านั้น
- **Multi-objective Optimization**
  มีวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่ง เช่น ลดต้นทุนพร้อมกับเพิ่มคุณภาพ

3. โปรแกรม Microsoft Excel Solver

3.1 ความสามารถของ Excel Solver

Microsoft Excel Solver เป็น Add-in ที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาเชิงเหมาะสม โดยสามารถกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวแปร และข้อจำกัดได้อย่างยืดหยุ่น เหมาะสำหรับผู้ใช้ทั่วไปและนักวิจัยที่ต้องการการวิเคราะห์เบื้องต้น

ความสามารถของ Solver ได้แก่:

- หาค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน
- รองรับทั้ง Linear และ Nonlinear Programming
- รองรับ Integer และ Binary Constraints
- มี Algorithm ให้เลือก เช่น GRG Nonlinear, Simplex LP, Evolutionary

3.2 ส่วนประกอบสำคัญใน Solver

- **Set Objective**: ฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าสูงสุด/ต่ำสุด
- **By Changing Variable Cells:** ตัวแปรอิสระที่ Solver จะปรับค่า
- **Subject to the Constraints**: เงื่อนไขหรือข้อจำกัด
- **Solving Method:** วิธีการแก้ เช่น Simplex, GRG Nonlinear

3.3 ตัวอย่างปัญหา Optimization ด้วย Excel Solver

ตัวอย่าง: โรงงานต้องการผลิตสินค้า 2 ชนิด (X และ Y) เพื่อให้ได้กำไรสูงสุด โดยมีข้อจำกัดด้านเวลาและวัตถุดิบ

$$\text{Maximize: } Z = 50X + 40Y$$

Subject to

$$2X + Y \leq 100 \text{ (วัตถุดิบ)}$$

$$X + 2Y \leq 80 \text{ (เวลา)}$$

$$X,Y \geq 0$$

ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าตัวแปร X,Y, ข้อจำกัด และฟังก์ชัน Z ใน Excel และใช้ Solver เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของ X และ Y ที่ให้ค่า Z สูงสุด

4. โปรแกรม LINGO

4.1 ความสามารถของ LINGO

LINGO เป็นโปรแกรมเฉพาะทางสำหรับการแก้ปัญหาเชิงเหมาะสม (Optimization Software) ที่พัฒนาโดยบริษัท LINDO Systems ซึ่งสามารถจัดการกับปัญหาเชิงเส้น ไม่เชิงเส้น และจำนวนเต็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จุดเด่นของ LINGO:

- รองรับปัญหา Linear / Nonlinear / Integer Programming
- รองรับเงื่อนไขเชิงตรรกะ และแบบ Dynamic Constraint
- มี Syntax เฉพาะที่คล้ายการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์
- เหมาะกับปัญหาขนาดใหญ่และซับซ้อน
- เชื่อมต่อกับ Excel, ODBC, และภาษาอื่น ๆ ได้

4.2 โครงสร้างพื้นฐานของโค้ด LINGO

```
lingo                                                    Copy  Edit

MODEL:
MAX = 50*X + 40*Y;
2*X + Y <= 100;
X + 2*Y <= 80;
X >= 0;
Y >= 0;
END
```

ภาพที่ 2-10 แสดงการเขียนคำสั่งในโปรแกรม Lingo

เมื่อรันโปรแกรม จะได้ค่าที่เหมาะสมของตัวแปร X, Y และค่า Z สูงสุด

2.6 กฎหมายความปลอดภัยและค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของอุปกรณ์ยก ยึด โยง

การใช้อุปกรณ์สำหรับการยก ยึด หรือโยงวัตถุในงานก่อสร้างหรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ปั้นจั่น รอก หรือเครน อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของกฎหมายความปลอดภัยในการทำงาน เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุที่อาจส่งผลให้ทรัพย์สินเสียหายหรือบุคลากรได้รับบาดเจ็บ

กฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการใช้งานเครื่องจักรและอุปกรณ์ยกตามกฎหมายหลัก ดังนี้:

- พระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554
- ประกาศกระทรวงแรงงาน เรื่อง มาตรฐานความปลอดภัยเกี่ยวกับเครื่องจักร เครื่องมือ และอุปกรณ์ พ.ศ. 2552
- ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2564 เกี่ยวกับการตรวจสอบและทดสอบเครื่องจักร รอก ปั้นจั่น และอุปกรณ์ประกอบการยก

กฎหมายดังกล่าวกำหนดให้ต้องมีการตรวจสอบอุปกรณ์ก่อนใช้งาน และต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ที่เหมาะสมตามชนิดของอุปกรณ์ เพื่อความปลอดภัยสูงสุด

ค่าความปลอดภัย (Safety Factor: SF)

ค่าความปลอดภัย (SF) หมายถึง อัตราส่วนระหว่าง แรงดึงขาด (Breaking Load) กับ พิกัดน้ำหนักใช้งาน (Working Load Limit: WLL) โดยค่า SF ที่สูงขึ้นหมายถึงความปลอดภัยที่มากขึ้นในการใช้งานจริง

อุปกรณ์ที่ใช้กับปั้นจั่นต้องมีค่า SF ตามประเภทวัสดุและลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน ดัง ภาพที่ 2-11 และตารางที่ 2-3



ภาพที่ 2-11 แสดงค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่ใช้กับปั้นจั่น

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการยกแบบต่างๆ

ประเภทอุปกรณ์	ค่า Safety Factor (SF)	หมายเหตุเพิ่มเติม
ลวดสลิงสำหรับเคลื่อนที่	6:1	ใช้ในระบบรอก/เครนเคลื่อนที่ที่มีแรงกระชาก
ลวดสลิงทั่วไป (แบบสลิงตาห่วง	5:1	ใช้ยกของแนวดิ่งทั่วไป
เชือกโพลีเอสเตอร์ (สลิงผ้า)	5:1	ใช้งานเบา ยืดหยุ่นสูง
โซ่ยกของ	4:1	ต้องเป็นโซ่เกรด G80 หรือสูงกว่า
ห่วง และตะขอ	3.5:1	ใช้เชื่อมต่อกับสายยกหรือลวดสลิง
อุปกรณ์จับยึด มัด หรือติดตั้งพิเศษ	3.5:1	เช่น Eye bolt, Ring bolt ฯลฯ

2.7 หลักการทำงานของ Extensometer

ความหมายและหน้าที่ของExtensometer

Extensometer ดังภาพที่ 2-12 เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดการยืดตัว (Extension) หรือความเครียด (Strain) ของวัสดุโดยตรงเมื่อถูกแรงดึงหรือแรงกด ใช้กันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ โดยเฉพาะในการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เพื่อหาค่า ความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) ของวัสดุ

Extensometer จะถูกติดตั้งบนชิ้นงานทดสอบเพื่อวัดระยะห่างระหว่างจุดสองจุด เมื่อชิ้นงานถูกแรงกระทำและเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาว อุปกรณ์จะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเครียดของวัสดุได้



ภาพที่ 2-12 Extensometer ติดตั้งกับเครื่องทดสอบแรงดึง

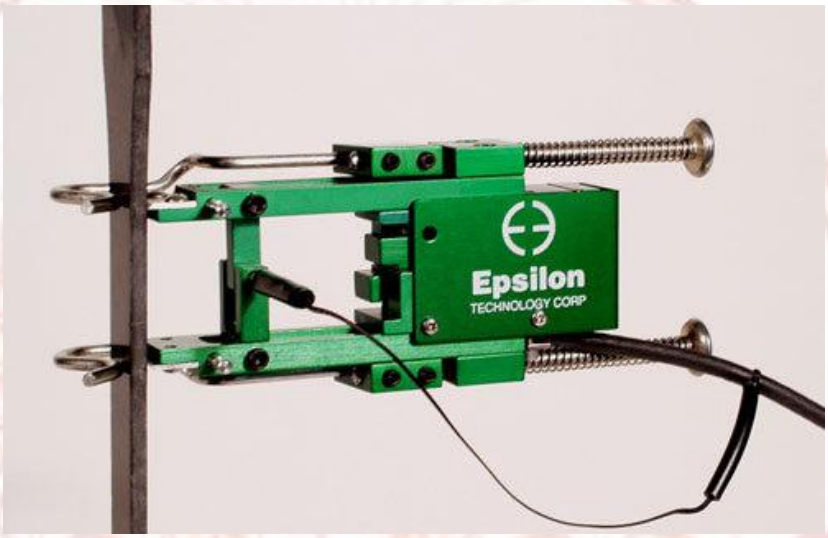
หลักการทำงาน

เมื่อวัสดุถูกแรงดึงหรือแรงกด ความยาวของวัสดุจะเปลี่ยนไป ซึ่ง Extensometer ทำหน้าที่วัด การเปลี่ยนแปลงความยาว นี้ โดยยึดกับชิ้นงานในตำแหน่งที่กำหนดไว้ เรียกว่า **Gauge Length** จากนั้นตรวจจับการยืดหรือหดของวัสดุ แล้วแปลงออกมาเป็นข้อมูลเชิงกลหรือไฟฟ้าเพื่อนำไปวิเคราะห์

ขั้นตอนการทำงานของ Extensometer

- **การยึดกับชิ้นงาน (Mounting on Specimen) ดังภาพที่ 2-13**
  Extensometer จะถูกหนีบหรือยึดติดไว้กับชิ้นงานในช่วงระยะ Gauge Length เช่น 25 mm หรือ 50 mm เพื่อให้มั่นใจว่าการวัดครอบคลุมเฉพาะส่วนที่ต้องการทดสอบ

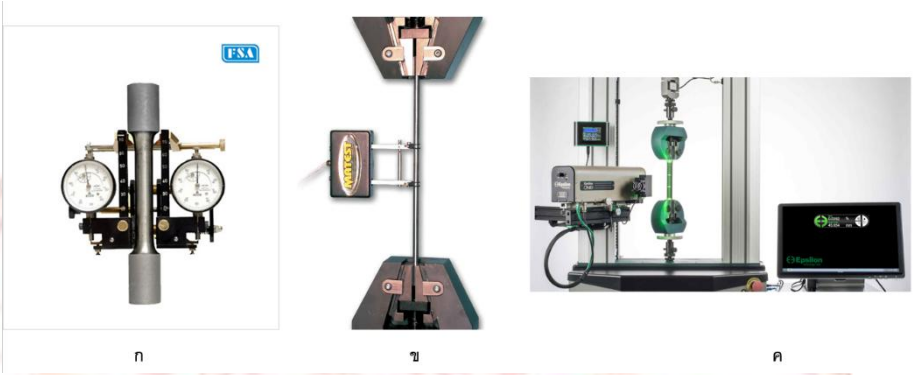
- **การตรวจจับการเปลี่ยนแปลง (Displacement Detection)**
  เมื่อวัสดุถูกแรงดึงหรือแรงกด จุดยึดทั้งสองของ Extensometer จะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน (หรือใกล้กัน) การเคลื่อนที่นี้มีขนาดเล็กมาก ระดับไมครอน (μm) ซึ่งสายตาไม่สามารถเห็นได้ แต่ Extensometer สามารถตรวจจับได้



ภาพที่ 2-13 แสดงการติดตั้ง Extensometerบนชิ้นงานตัวอย่าง

- **การขยายและแปลงสัญญาณ (Signal Amplification & Conversion) ดังภาพที่ 2-14**
  - แบบ **Mechanical Extensometer** ⟶ การเคลื่อนที่ถูกขยายด้วยระบบคานและเฟือง จากนั้นอ่านค่าได้บนหน้าปัด
  - แบบ **Electrical Extensometer** ⟶ การเคลื่อนที่ทำให้ Strain Gauge ภายในเปลี่ยนความต้านทาน แล้วแปลงออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า

- แบบ **Optical Extensometer** ⟶ ใช้เลเซอร์หรือกล้องความละเอียดสูงจับการเคลื่อนที่โดยไม่สัมผัสชิ้นงาน



ภาพที่ 2-14 แสดงประเภทของ Extensometer ก. Mechanical ข. Electrical ค. Optical

ทฤษฎีและความสัมพันธ์ของ Stress และ Strain

Extensometerสามารถอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุหลังจากได้รับแรงกระทำได้ โดยสามารถนำค่าการเปลี่ยนแปลงนี้ไปหาค่าStressและStrainได้ จากความสัมพันธ์ดังนี้

เมื่อแรง F กระทำกับพื้นที่หน้าตัด A จะเกิด ความเค้น (Stress, σ)

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

โดยที่

- σ = ค่าความเค้นของวัสดุ (N/m^2 หรือ Pa)
- F = แรงที่กระทำต่อวัสดุ (N)
- A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (m^2)

ความเค้นนี้ก่อให้เกิด**ความเครียด (Strain, ε)** คือการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของความยาว

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- ε = ค่าความเครียด (ไม่มีหน่วย)
- ΔL = การเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุ (m)
- L = ความยาวเดิมของวัสดุ (m)

โดยความสัมพันธ์ของ Stress และ Strain จะขึ้นอยู่กับ **โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E)**

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

- ε = ค่าความเครียด (ไม่มีหน่วย)
- σ = ค่าความเค้นของวัสดุ (N/m^2 หรือ Pa)
- E = Young's modulus (N/m^2 หรือ Pa)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชนินทร์และปิยวรรณ (2558) ทำการปรับปรุงรูปร่างของหัวขาตั้งกล้อง(Gimble Head) ให้มีน้ำหนักที่น้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขค่าความแข็งแรงในด้านการยุบตัว(Displacement) ไม่ต่ำกว่า 0.265 มิลลิเมตร ด้วยภาระแรง 20 กิโลกรัม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis , FEA) ร่วมกับการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment , DOE) โดยผู้วิจัยกำหนดปัจจัย 9 ปัจจัย และสร้างตารางการทดลอง แบบFull Factorial 2^k ได้ผลลัพธ์ออกมาทั้งหมด 512 การทดลอง หลังจากนั้น ไปทำการทดลองเพื่อหาผลลัพธ์ ค่าน้ำหนักและค่าการยุบตัว ด้วยวิธี FEA ต่อจากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยด้วยโปรแกรมMATLAB เพื่อไปใช้การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ด้วยโปรแกรม Excel Solver โดยมีเงื่อนไขค่ายุบตัวต้องไม่เกิน 0.265 ภายใต้น้ำหนักน้อยที่สุด เมื่อได้ค่าที่ดีที่สุดแล้ว นำไปจำลองด้วยFEA อีกครั้ง ได้ผลลัพธ์สามารถลดน้ำหนักได้คิดเป็นร้อยละ 41.26 จากน้ำหนักของชิ้นงานต้นแบบ หลังจากได้ผลลัพธ์ตามเป้าหมายแล้ว ทางผู้วิจัยได้นำไปผลิตชิ้นงานและใช้สเตรนเกจ (Strain Gauge) มาใช้ในการวัดผล พบว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบจริงได้ผลที่ทดสอบและใกล้เคียงกัน

ณัฐพงศ์ (2561) ทำการปรับปรุงแบบต้นแขนหุ่นยนต์ให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด โดยต้องน้อยกว่า 0.924 kg ภายใต้เงื่อนไขค่าความแข็งแรงในการยุบตัว ไม่มากกว่า 0.017 มิลลิเมตร โดยมี ภาระแรง 2 กิโลกรัม โดยใช้ระเบียบวิธไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method , FEM) ร่วมกับการออกแบบการทดลอง(Design Of Experiment , DOE) เพื่อหารูปร่างที่ดีที่สุด(Optimization) ของต้นแขนหุ่นยนต์ด้วยวิธีการใช้ Excel Solver และสร้างชิ้นงานจริงขึ้นมาด้วย Strain Gauge จากการนำชิ้นงานต้นแบบมาวิเคราะห์โดยการกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการสร้างรูปร่างขึ้น 9 ปัจจัยได้ผลการทดลองออกมา 512 รูปร่างโดยได้ค่า Mass 0.828 kg Displacement 0.016 mm และทราบว่ามีตัวแปรที่ไม่ส่งผลกระทบ 2 ตัวแปร ทำให้ผู้วิจัยต้องกำหนดพารามิเตอร์ใหม่เป็น 7 ปัจจัย ได้ผลการทดลองออกมา 128 รูปร่างโดยได้ค่า Mass 0.749 kg Displacement 0.013 mm ซึ่งลดน้ำหนักได้คิดเป็น 19 %ตรงตามวัตถุประสงค์ แต่เนื่องด้วยผู้วิจัยเล็งเห็นถึงมาตรฐานสากลในการผลิตชิ้นงานผู้วิจัยจึงสร้างชิ้นงานขึ้นให้ตรงตามมาตรฐานสากลโดยเปลี่ยนเงื่อนไขใหม่คุมค่าDisplacement ไม่มากกว่า 0.010 mm . แทนและใช้พารามิเตอร์ชุดเดิมกับ 128 รูปร่าง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ Mass 0.884 และ Displacement 0.009 mm ซึ่งผู้วิจัยได้นำพารามิเตอร์ชุดนี้ไปสร้างชิ้นงสานจริงเพื่อทดสอบด้วยstrain Gauge และพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริงกับโปรแกรมอยู่ที่ 10.83 %

อภิชิต,กัลยา,กันต์ธร,ฐิติพงษ์,ธิดาวัลย์,รักษรินและพงษ์ธร(2564) การปรับปรุงแขนกลช่วยยกให้มี คุณภาพมากขึ้นและมีต้นทุนน้อยลง โดยมีภาระโหลด 75 กิโลกรัมมีตุ้มน้ำหนัก 15 กิโลกรัมติดตั้งไว้ที่ด้านหลังเพื่อถ่วงน้ำหนัก โดยที่ผู้ออกแบบสามารถปรับขนาดของแต่ละชิ้นส่วนโดยที่ต้องรักษา รูปร่างโดยรวมเดิมของแขนกลช่วยยกไว้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการออกแบบที่ดีที่สุด (Optimization)แบบสองจุดประสงค์สำหรับแขนกลช่วยยกโดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ร่วมกับการออกแบบทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) และการหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อลดต้นทุนการผลิตรวมให้น้อยที่สุดและมีค่าความปลอดภัย (Factor of Safety , FOS) มากที่สุด ผลการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถลดต้นทุนการผลิตลดลงจากเดิม 34,117.64 บาท เหลือ 25,698.40 บาท และมีค่าความปลอดภัยเพิ่มขึ้นจาก 3.00 เป็น 9.13 เมื่อเทียบกับแขนกลช่วยยกเดิม

Kariminejad , Tormey , Huq , Morrison , Redmond , Souto และ McAfee หาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)ของอุปกรณ์การฉีดขึ้นรูปพลาสติกด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง(Design Of Experiment , DOE)ร่วมกับการจำลอง(Finite Element Method , FEA) โดยใช้วิธีทากูจิ (Taguchi

Method) เพื่อวิเคราะห์ ผลกระทบของตัวแปรต้น4 ตัว ที่มีต่อผลลัพธ์ 2 ด้าน ได้แก่ เวลารอบการผลิต (Cycle Time) และการหดตัว (Shrinkage) และจำลองในโปรแกรม MoldFlow เพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง DOE และค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันอย่างดี โดยการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามแนวทางของทากูจิสามารถลดเวลารอบการผลิตจากเดิม 40 วินาที เหลือประมาณ 23 วินาที

Al-Momani และ Rawabdeh (2008) ศึกษาการประยุกต์ใช้วิธี Finite Element Method (FEM) ร่วมกับ Design of Experiments (DOE) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ blanking ของโลหะแผ่น โดยมีเป้าหมายเพื่อลดความสูงของครีบ (burrs height) และเพิ่มคุณภาพของขอบชิ้นงาน การศึกษานี้เน้นการจำลองกระบวนการ blanking ด้วยซอฟต์แวร์ ABAQUS ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ Factorial Design เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ชนิดวัสดุ ช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์ (clearance), ความหนาแผ่นโลหะ และแรงกดของ blank holder ผลการวิจัยพบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อ burrs height อย่างมีนัยสำคัญคือ clearance และแรงกดของ blank holder โดย Clearance ที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 5% ของความหนาชิ้นงาน ซึ่งช่วยลดครีบและทำให้สามารถใช้แม่พิมพ์เดียวกันกับวัสดุต่างชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 3

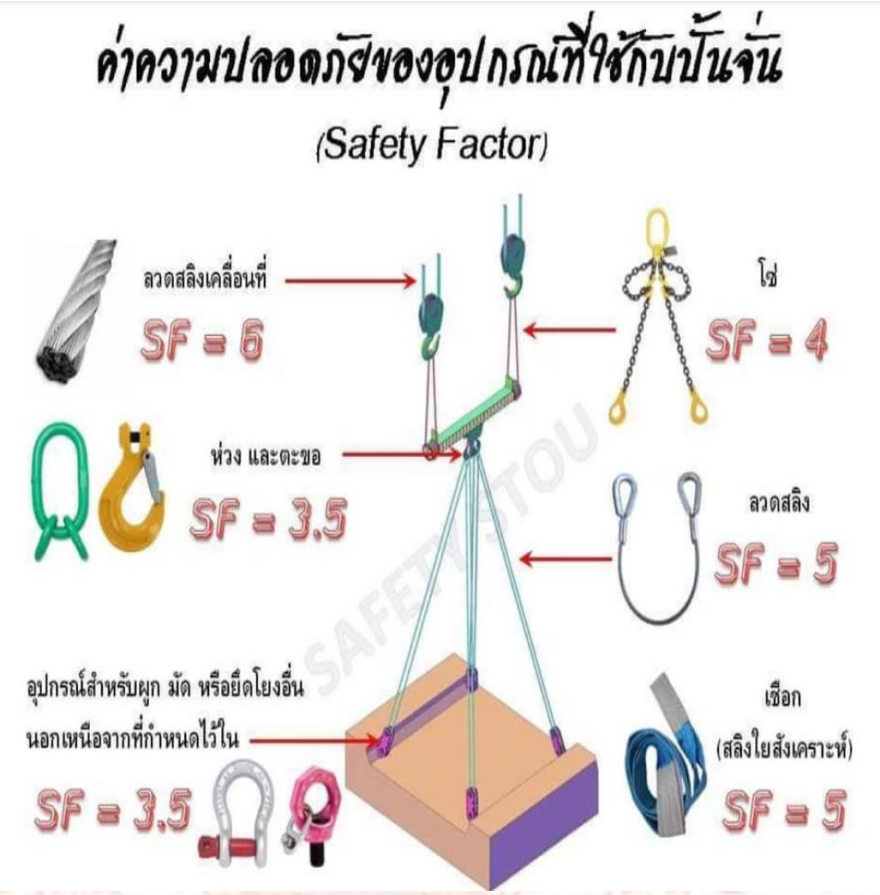
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ผู้วิจัยได้นำแนวคิดและองค์ความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนารูปร่างที่เหมาะสมของชิ้นงาน โดยมีเป้าหมายหลักในการลดมวล (Mass) ของชิ้นงานและกำหนดค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) ให้สอดคล้องกับข้อกำหนดทางกฎหมาย ที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องมือยกสิ่งของร่วมกับแรงงานมนุษย์ ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าดัชนีความปลอดภัยของชิ้นงานไม่ต่ำกว่า 3.5 เท่า อ้างอิงจากกฎหมายการใช้รอกและเครน พ.ศ.2564 หมวดที่2 ข้อที่ 89 เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถรองรับแรงที่กระทำต่อชิ้นงานได้อย่างปลอดภัย ดังภาพที่ 3-1

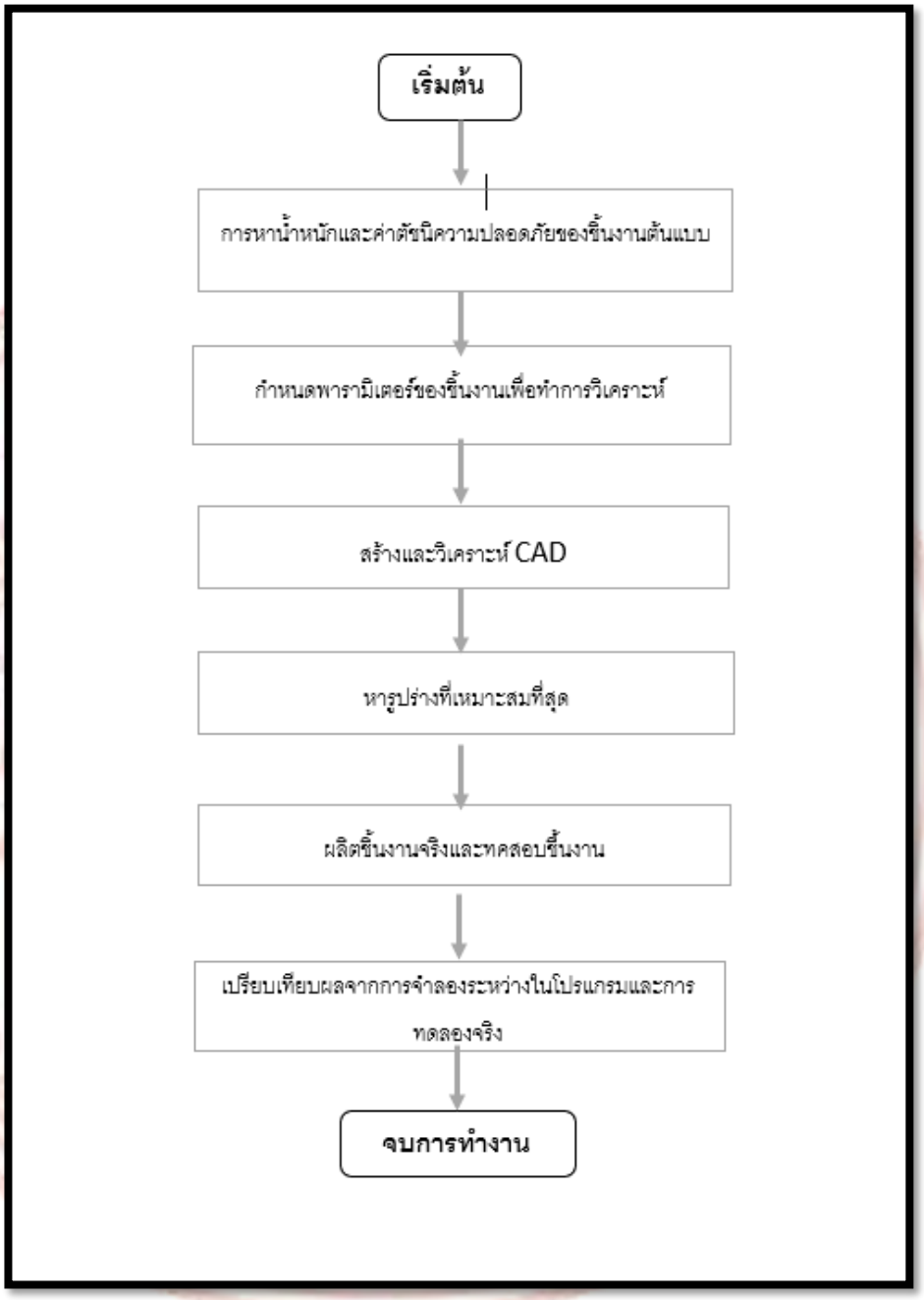
งานวิจัยนี้ดำเนินการสร้าง จำลอง และวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (CAD Model) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) ผ่านโปรแกรม SolidWorks จากนั้นทำการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยโปรแกรม Minitab พร้อมทั้งหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ของมวลชิ้นงานและดัชนีความปลอดภัยด้วยโปรแกรม Lingo และ Excel Solver เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองวิธี เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมแล้ว จึงนำไปผลิตจริงเพื่อทำการทดสอบเชิงปฏิบัติ และเพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมและการทดสอบจริง

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

- การหาน้ำหนักและค่าดัชนีความปลอดภัยของชิ้นงานต้นแบบ
- กำหนดพารามิเตอร์ของชิ้นงานเพื่อทำการวิเคราะห์
- สร้างและวิเคราะห์ CAD
- หารูปร่างที่เหมาะสมที่สุด
- ผลิตชิ้นงานจริงและทดสอบชิ้นงาน
- เปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างในโปรแกรมและการทดลองจริง



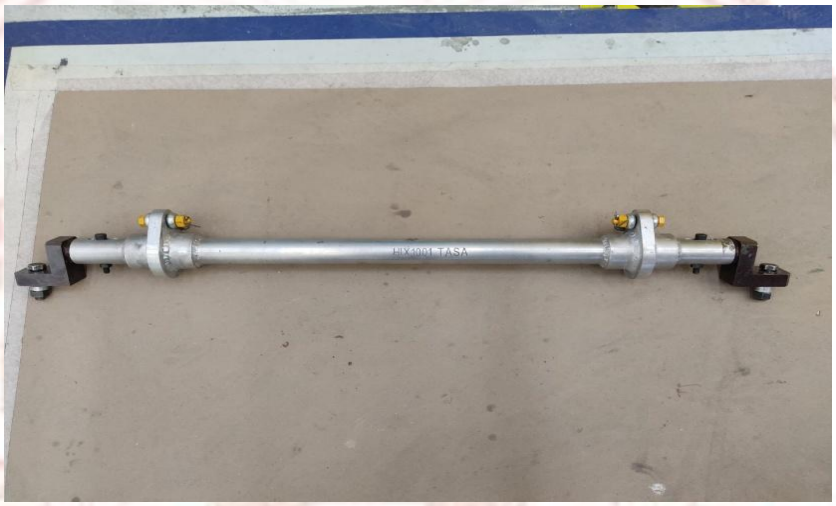
ภาพที่ 3-1 ค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์การใช้งานรอกและเครน



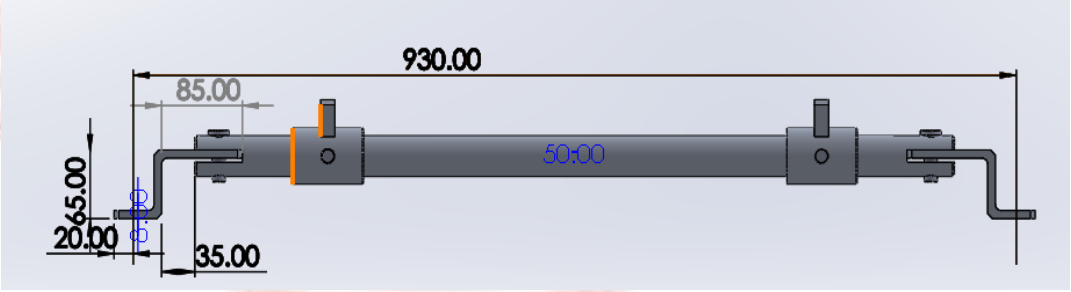
ภาพที่ 3-2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาชิ้นงานต้นแบบ

ในการศึกษาชิ้นงานต้นแบบเบื้องต้นจำเป็นต้องศึกษารายละเอียดของชิ้นงานต้นแบบก่อนที่จะนำมาปรับปรุงในตัวชิ้นงานใหม่ เนื่องจากต้องการให้ชิ้นงานมีน้ำหนักที่น้อยที่สุด และมีค่าดัชนีความปลอดภัย (FOS) ไม่น้อยกว่า 3.5 เท่า ซึ่งมีตัวอย่างลักษณะรูปร่างคล้าย ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ตัวอย่างรูปร่างคานรับแรง

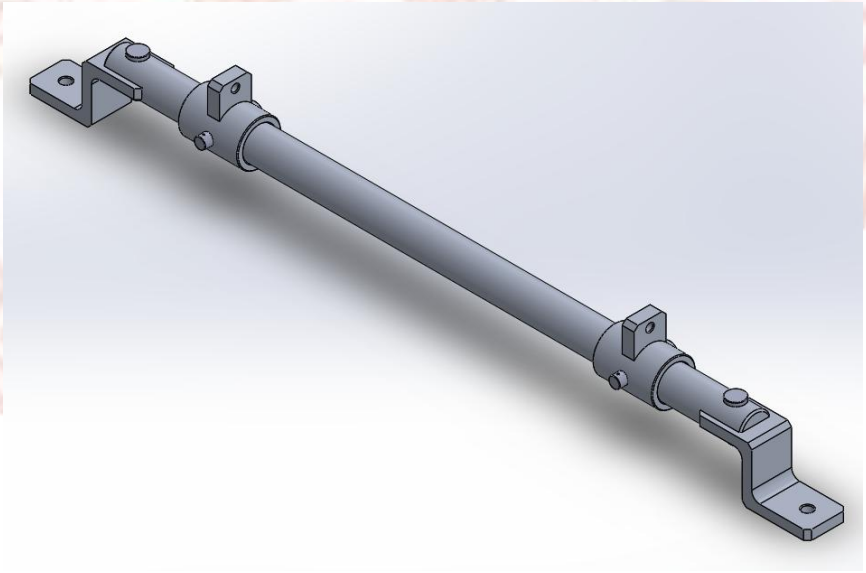


ภาพที่ 3-4 Dimension ของต้นแบบคานรับแรง

ภาพที่ 3-4 เป็นค่าขนาดเริ่มต้นของชิ้นงานต้นแบบคานรับแรงที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยวัสดุ(Raw Material) คือ อลุมิเนียมอัลลอย 6061-T4(SS) ซึ่งเป็นวัสดุเดิมของชิ้นงานต้นแบบ และจะเลือกใช้วัสดุนี้ในการทำการจำลองในงานวิจัย เนื่องจากความเหมาะสมในเรื่องของการสัมผัสเครื่องมือกับชิ้นงาน(Contact surface between two materials) อ้างอิงจากคู่มือ EASA Tools & Equipment UG.CAO.00132-003 และคู่มือการทำToolingของบริษัทที่ทำวิจัย ซึ่งมีคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม 6061-T4(SS) ที่ใช้ในการวิเคราะห์

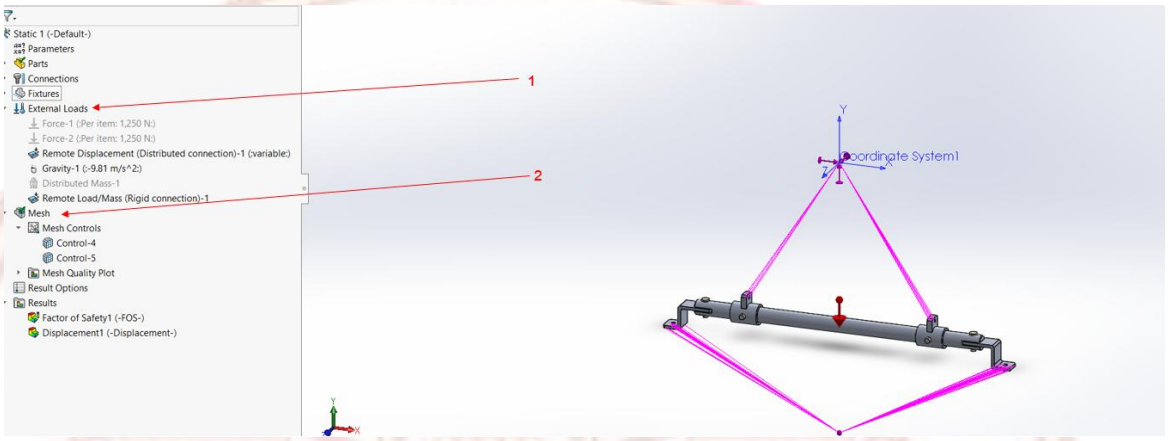
Density	2.700 g/cc
Young Modulus	68.9 GPa
Yield Strength	145 MPa



ภาพที่ 3-5 CAD Model จาก โปรแกรม SolidWorks

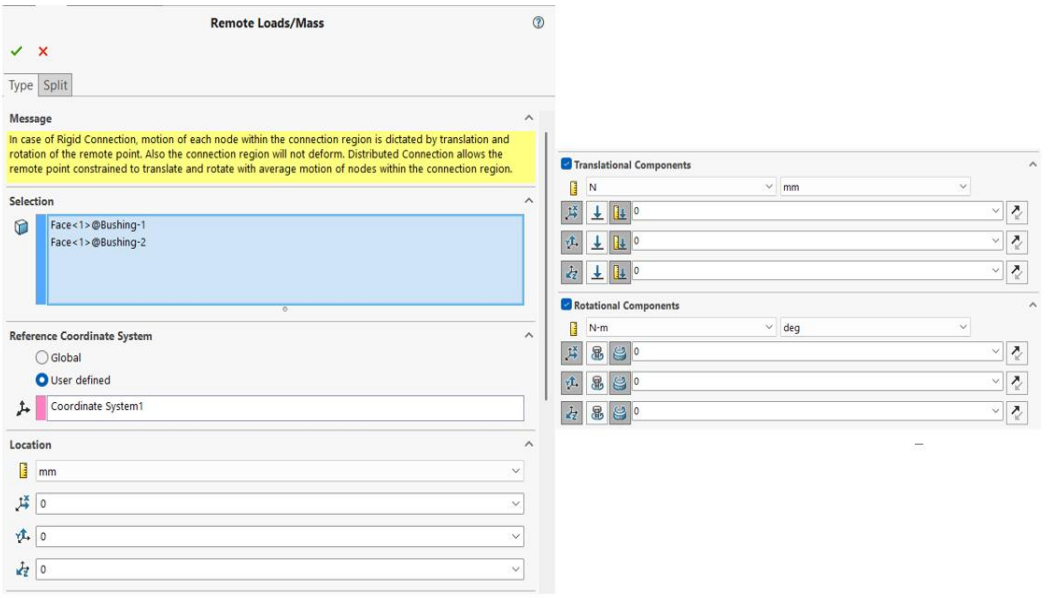
3.1.1 การจำลองต้นแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA)

ทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลอง (CAD MODEL) ด้วยโปรแกรม Solid Works โดยรายละเอียดการใส่ข้อมูลเพื่อใช้ในการจำลองเป็นไปดังภาพที่ 3.6 ซึ่งทั้ง Thrust Reverser และคานรับแรงมีความสมมาตร(Symmetry)



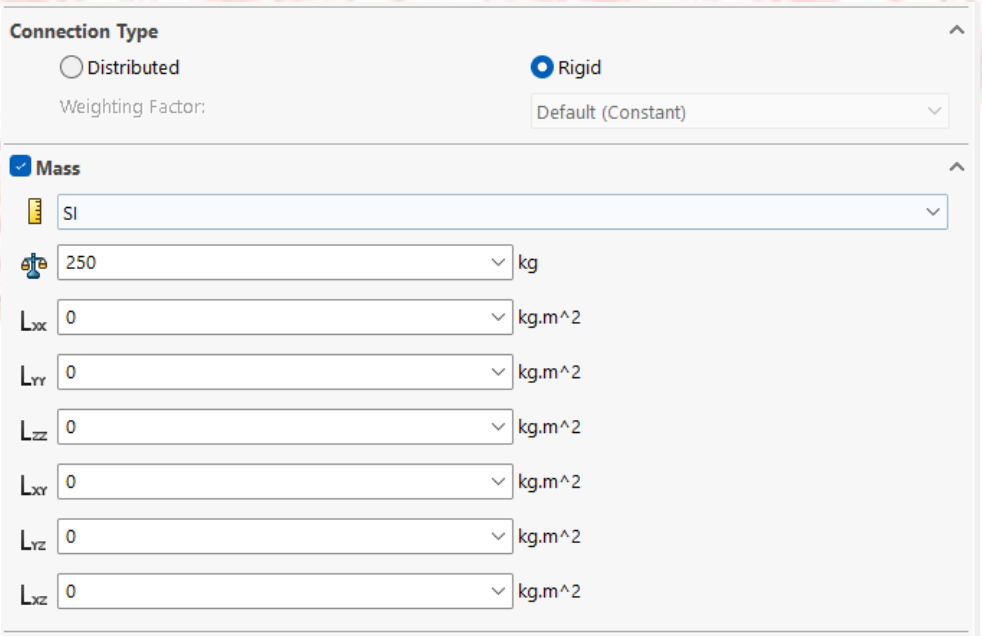
ภาพที่ 3-6 แสดงรายละเอียดภาพรวมของการจำลองFinite Element Method

ภาพที่3-6 การตั้งค่าที่โหมด External Load ผู้วิจัยต้องการที่จะให้การจำลองวิจัยครั้งนี้เสมือนชิ้นงานคานรับแรงมีการรับโหลดของที่ต้องการยกและห้อยจากเครนในโรงงานจริงๆ ผู้วิจัยได้สร้างจุด Coordinate point เพื่อแทนจุดยึดของเครน หลังจากนั้นกำหนดคำสั่ง Remote Displacement (ข้อ 1 ภาพ 3.6) เพื่อจำลองให้เสมือนคานรับแรงยกชิ้นงานในลักษณะลอยและหยุดนิ่งไม่เกิดการหมุน โดยรายละเอียดเป็นดังภาพที่ 3-7



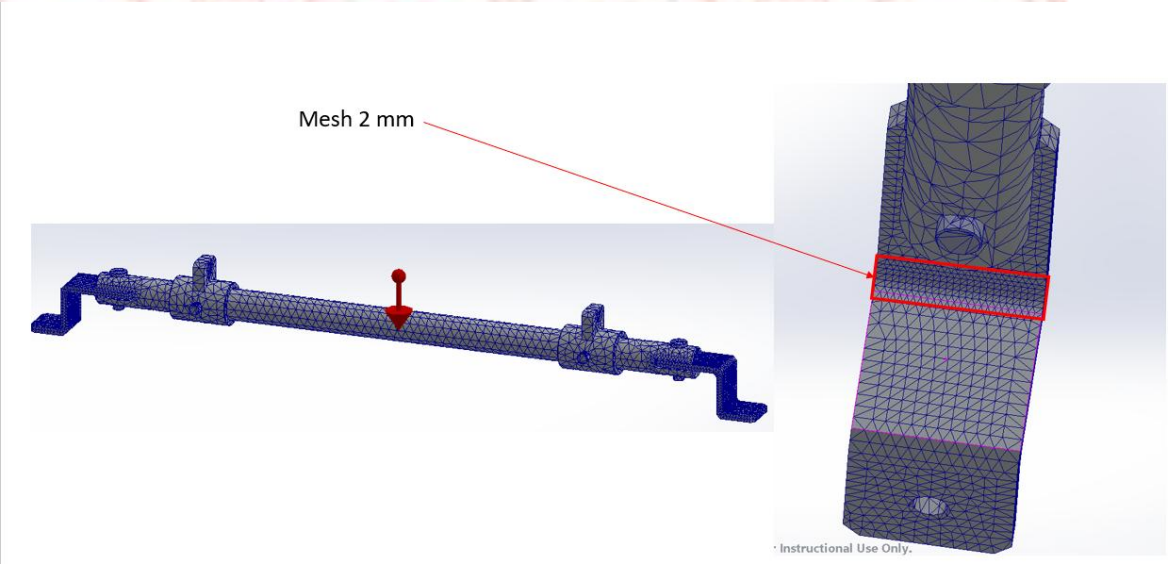
ภาพที่ 3-7 แสดงรายละเอียดในโหมด Remote Displacement

นอกจากนั้นผู้วิจัยต้องการให้โมเดลการจำลองนี้เสมือนการยกชิ้นงานน้ำหนัก 250 กิโลกรัม จึงได้เพิ่มคำสั่ง Remote Load/Mass ดังรายละเอียดดังภาพที่ 3-8

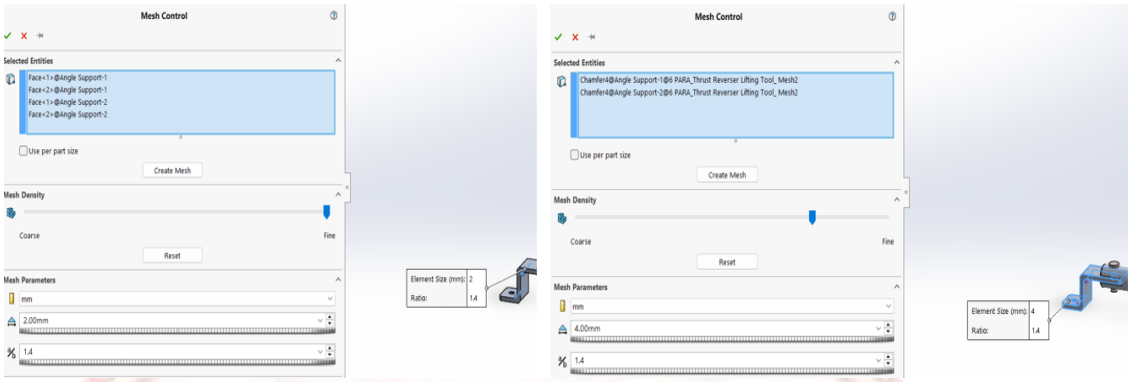


ภาพที่ 3-8 แสดงรายละเอียดในโหมด Remote Load/Mass

ในการจำลองด้วยวิธี Finite Element Methodนี้ ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาความละเอียดของ Mesh (ข้อ 2 ภาพที่ 3.6) โดยวิธี Mesh Sensitivity คือการทดลองลดค่า Mesh ของงานไปเรื่อยๆจนความเปลี่ยนแปลงของค่าที่ทดลองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเมื่อผู้วิจัยทราบว่าจุดที่สำคัญของชิ้นงานที่นำมาใช้ ในการทดลองอยู่ที่จุดผิวโค้งของชิ้นงาน จึงได้ทำ mesh ละเอียดเฉพาะจุด(Apply Mesh Control) เพื่อไม่ต้องการให้การจำลองนานจนเกินไป โดยผู้วิจัยได้กำหนด Mesh ที่ผิวโค้ง 2 มิลลิเมตร และ Mesh ของชิ้นงานเหล็กตัวแอล 4 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3-9 และ 3-10 ซึ่งได้แสดงผลค่าFOS ตามการเปลี่ยนแปลงของMesh ดัง ตารางที่ 3-2



ภาพที่ 3-9 แสดงภาพ Mesh ของชิ้นงาน และจุดเฉพาะ Mesh ละเอียด

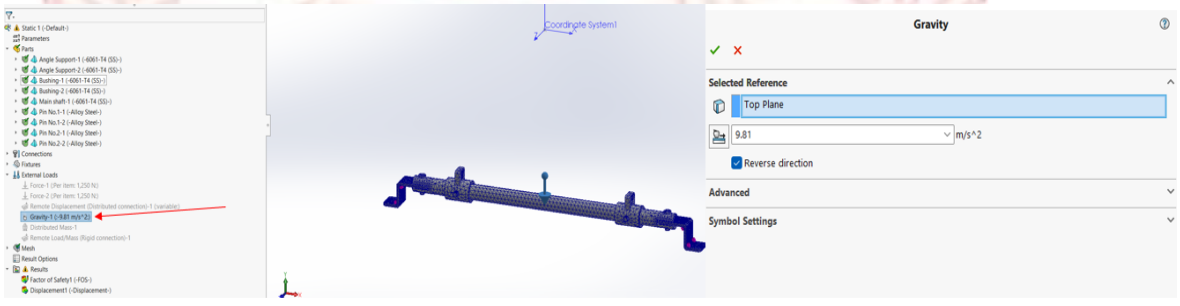


ภาพที่ 3-10 แสดงรายละเอียดการกำหนด Mesh ของชิ้นงาน

ตารางที่ 3-2 แสดงค่า FOS ตามความละเอียดของ MESH ณ จุดการทำ Mesh Control

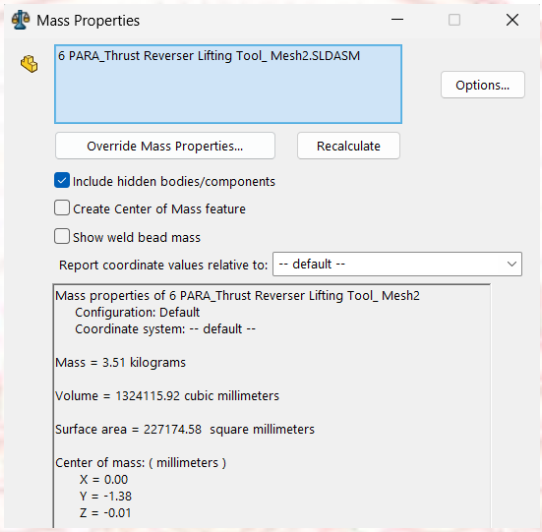
MESH	FOS
4	3.226
3	3.193
2	3.174
1	3.162

ผู้วิจัยได้กำหนดน้ำหนักของคานรับแรงให้มีผลต่องานวิจัยในครั้งนี้ด้วย ดังภาพที่ 3-11

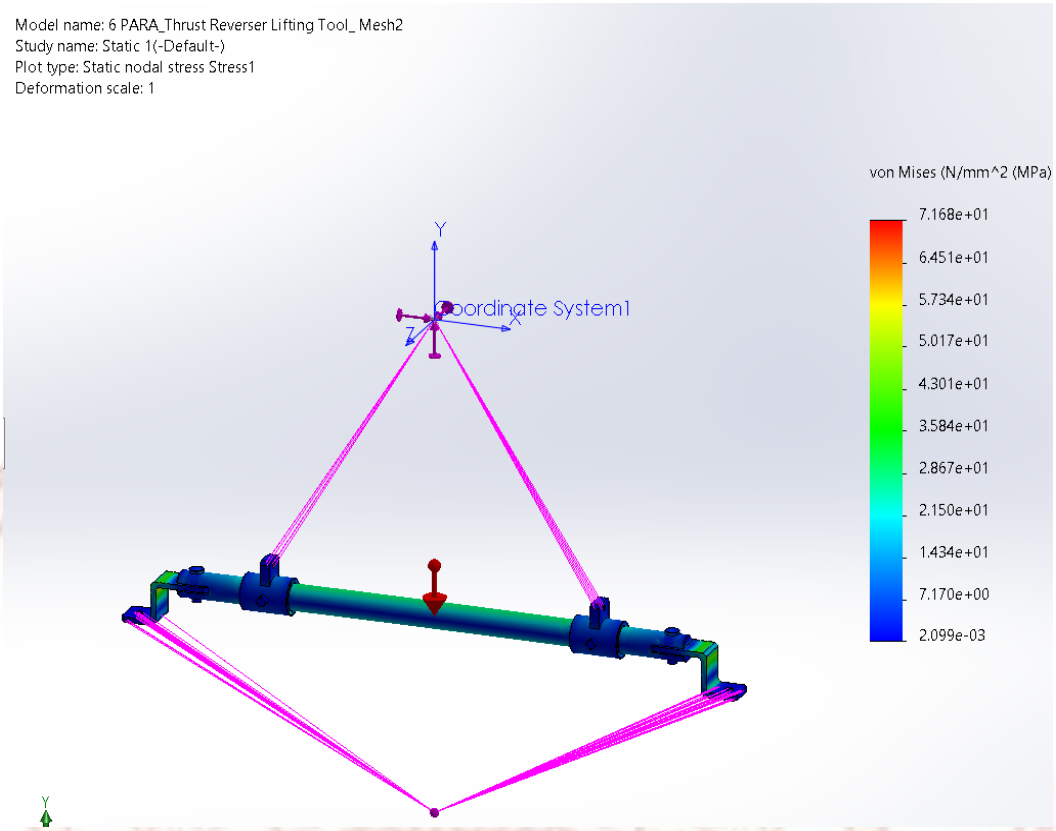


ภาพที่ 3-11 แสดงรายละเอียดการกำหนด Gravity

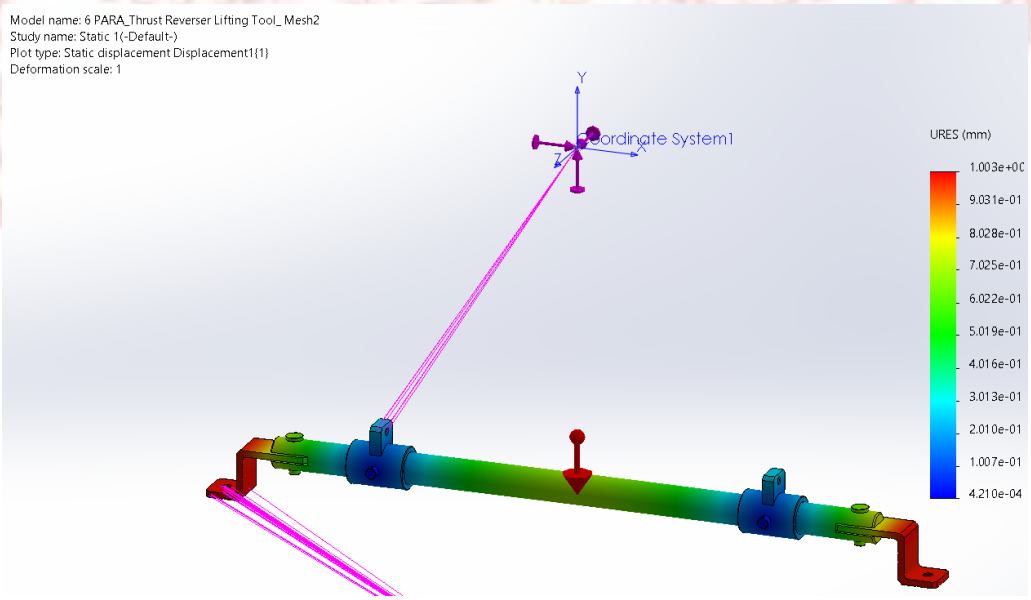
จากการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element analysis , FEA) จากโปรแกรม Solidworks ชิ้นงาน มีน้ำหนัก 3.51 kg ดังภาพที่ 3-12 มีค่า stress สูงสุด 71.68 Mpa ดังภาพที่ 3-13 มีค่า Displacement สูงสุด 1.003 มิลมิเมตร ดังภาพที่ 3-14 และ มีค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor Of Safety , FOS) ต่ำที่สุดที่ 3.17 เท่า ดังภาพที่ 3-15



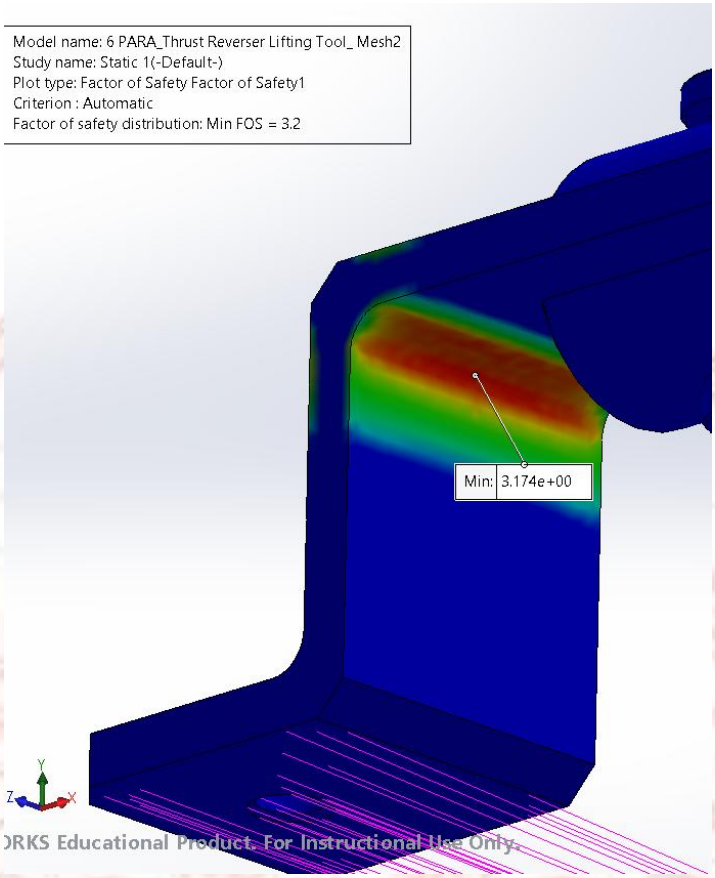
ภาพที่ 3-12 แสดงน้ำหนักของชิ้นงาน



ภาพที่ 3-13 แสดงค่า Stress ของแบบชิ้นงาน



ภาพที่ 3-14 แสดงค่า Displacement ของแบบชิ้นงาน



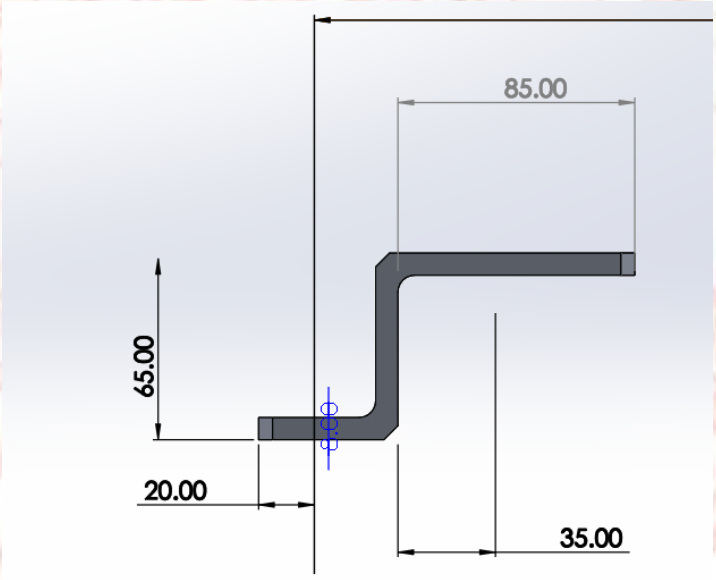
ภาพที่ 3-15 แสดงค่า FOS ของแบบชิ้นงาน

3.1.2 การสรุปผลชิ้นงานต้นแบบจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการออกแบบรูปร่างชิ้นงานใหม่ต้องทำการศึกษาชิ้นงานต้นแบบก่อน ซึ่งจากการวิเคราะห์ชิ้นงานต้นแบบ เห็นว่า ค่า Displacement ของชิ้นงานมีค่าน้อยมากและไม่มีผลกระทบต่อการใช้งาน แต่ค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor Of Safty , FOS) ของชิ้นงานมีค่าต่ำสุดที่ 3.17 เท่า ซึ่งขัดกับกฎหมายว่าด้วยค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor Of Safty , FOS) ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 3.5 เท่า ในกรณีที่เครื่องมือนั้น ๆ ใช้งานโดยมีความปลอดภัยกับคนเข้ามาเกี่ยวข้องหรือยิ่งสูงยิ่งดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะทำการออกแบบชิ้นงานใหม่โดยจะทำการสร้างเงื่อนไขโดยมีค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor Of Safty , FOS) สูงกว่า 3.5 เท่า ภายใต้น้ำหนักรวมของชิ้นงานทั้งหมดมีค่าน้อยที่สุด

3.2 กำหนดพารามิเตอร์ในการปรับเปลี่ยนต้นแบบ

ในการทำงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการให้ชิ้นงานมีน้ำหนักที่เบาที่สุดภายใต้ค่าดัชนีความปลอดภัย (Safety Of Factor , FOS) ไม่ต่ำกว่า 3.5 เท่า หรือยิ่งสูงยิ่งดี หลังจากที่ผู้วิจัยได้ประชุมปรึกษากับทีมวิศวกรของโรงงาน โดยหลังจากทำการจำลองแรงที่เกิดขึ้นกับคานช่วยยกด้วยวิธี Finite Element ผ่านโปรแกรม Solid Work แล้วนั้นจะเห็นว่าชิ้นงานที่ควรนำมาปรับปรุง คือชิ้นฟิกเจอร์จับยึดเชื่อมต่อระหว่างคาน (Angle Support) ดังภาพที่ 3-16 เนื่องจากค่าดัชนีความปลอดภัยต่ำสุด (Minimum Safety of Factor) อยู่ที่ชิ้นงานนี้ ส่วนชิ้นงานที่เหลือเมื่อพิจารณาดูแล้วนั้นมีค่าดัชนีความปลอดภัยค่อนข้างสูงมีค่าเกินกว่า 3.5 เท่า จึงจะไม่นำมาพิจารณา ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้กำหนดแนวทางการปรับปรุงคานรับแรงยกโดยการทดลองจะกำหนดพารามิเตอร์เป็น 6 ปัจจัย ดังตารางที่ 3-3

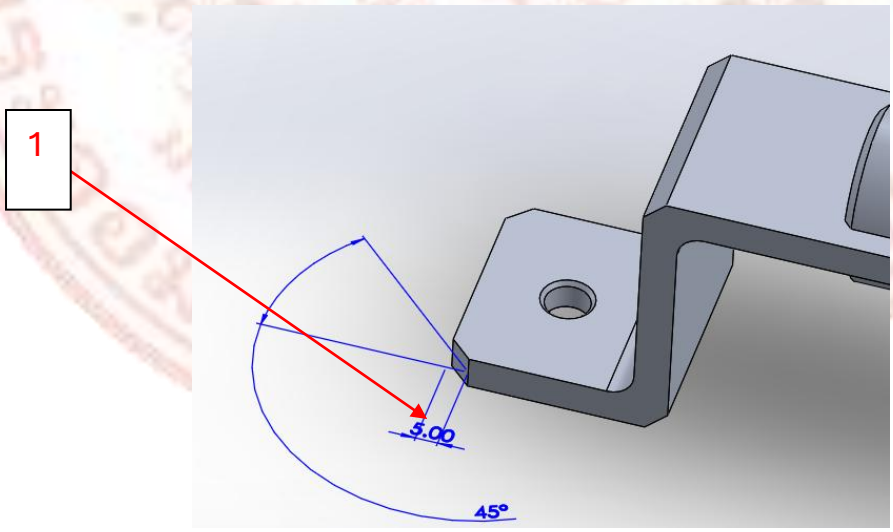


ภาพที่ 3-16 แสดงชิ้นงานที่นำมาวิจัย

ตารางที่ 3-3 แสดงการกำหนดตัวแปรและระยะต่ำสุด-สูงสุดในแต่ละปัจจัย

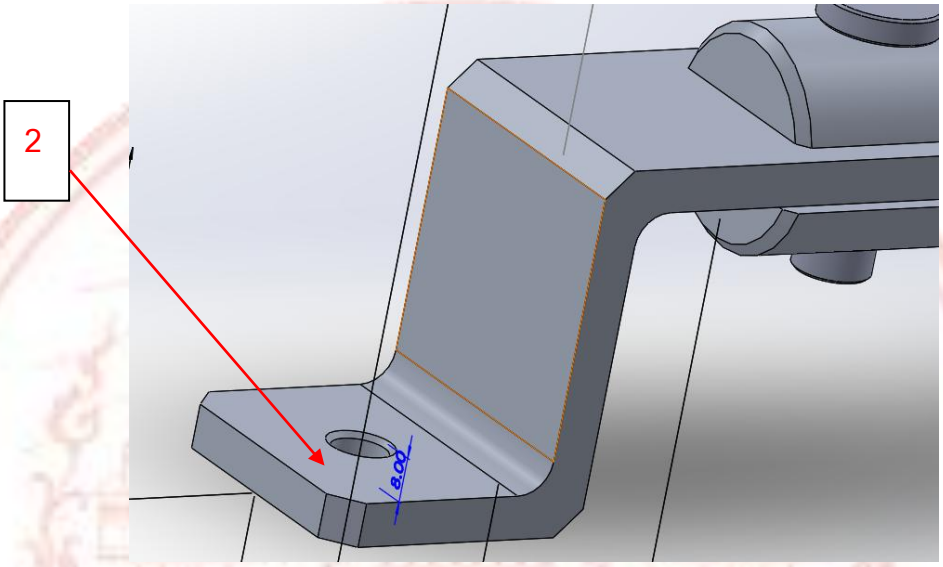
ปัจจัย	ตัวแปร	ระยะต่ำสุด (มม.)	ระยะสูงสุด (มม.)
1	Dimension 1 (D1)	5	20
2	Dimension 2 (D2)	8	10
3	Dimension 3 (D3)	10	60
4	Dimension 4 (D4)	65	100
5	Dimension 5 (D5)	12	50
6	Dimension 6 (D6)	10.25	12

ปัจจัยที่ 1 (Dimension 1) คือ ระยะดังภาพที่ 3-17 ระยะต่ำสุดคือ 5 มิลลิเมตร เพราะต้องเป็นไปตามกฎของ Safety บริษัทว่าด้วยเรื่องการลบคมของชิ้นงาน และค่าสูงสุดคือ 20 มิลลิเมตร เพราะถ้าค่าสูงกว่านี้จะทำให้ชิ้นงานมีความคมจนเกินไป



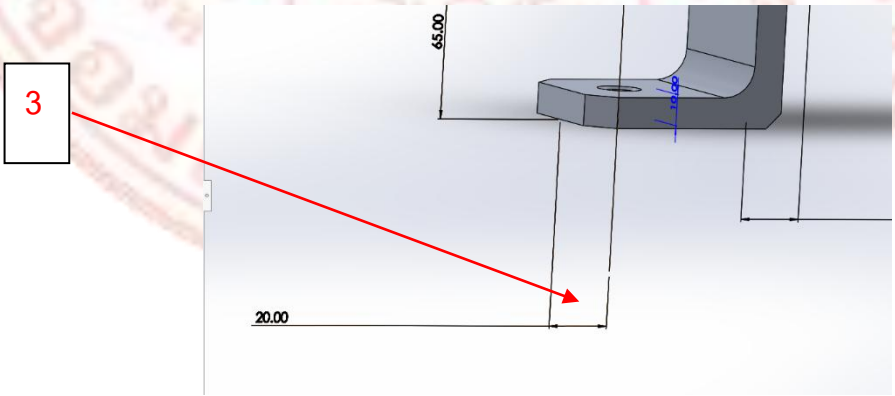
ภาพที่ 3-17 แสดงระยะของปัจจัยที่ 1 (Dimension 1)

ปัจจัยที่ 2 (Dimension 2) คือ ระยะดังภาพที่ 3-18 ต่ำสุดคือ 8 มิลลิเมตร เพราะถ้าความหนาของชิ้นงานต่ำกว่านี้ ความแข็งแรงของชิ้นงานจะน้อยเกินไป และค่าสูงสุดคือ 10 มิลลิเมตร เพราะถ้าเกินค่านี้ น้ำหนักของชิ้นงานจะมากเกินไปเมื่อเทียบกับความแข็งแรง



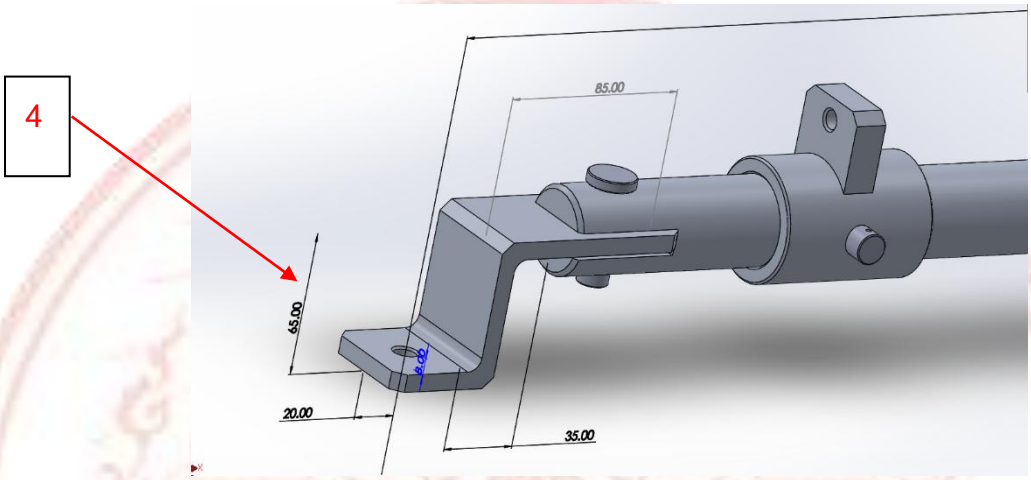
ภาพที่ 3-18 แสดงระยะของปัจจัยที่ 2 (Dimension 2)

ปัจจัยที่ 3 (Dimension 3) คือระยะดังภาพที่ 3-19 ต่ำสุดคือ 10 มิลลิเมตร เพราะจะชนกับรูยึด screw กับชิ้นงานและสูงสุดที่ 60 มิลลิเมตร เพราะจะไปชนกับขอบชิ้นงานในส่วนของรังผึ้ง (Honeycomb)



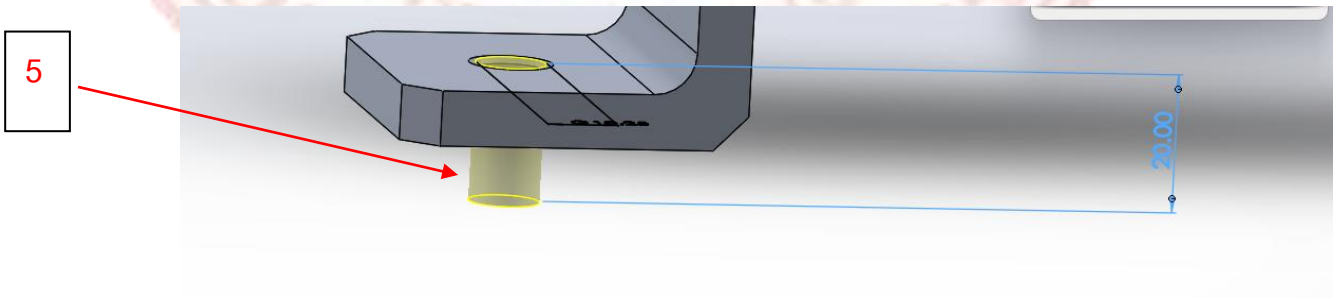
ภาพที่ 3-19 แสดงระยะของปัจจัยที่ 3 (Dimension 3)

ปัจจัยที่ 4 (Dimension 4) คือระยะดังภาพที่ 3-20 ต่ำสุดคือ 65 มิลลิเมตร เพราะถ้าระยะน้อยกว่านี้ตัวเพลา (Shaft) จะชนกับชิ้นงาน และสูงสุดที่ 100 มิลลิเมตร เพราะจะส่งผลต่อความปลอดภัยตามข้อกำหนดของแผนกความปลอดภัยที่โรงงานว่าด้วยระยะข้อต่อชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่ติดกับงานมีระยะห่างจากชิ้นงานไม่เกิน 100 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3-20 แสดงระยะของปัจจัยที่ 4 (Dimension 4)

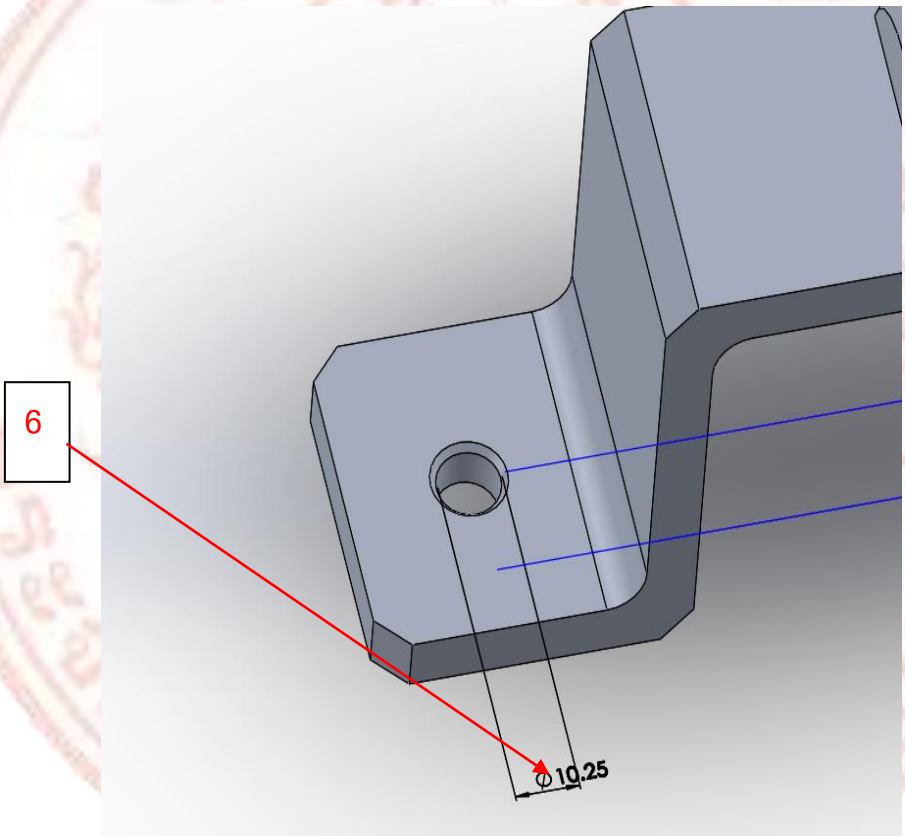
ปัจจัยที่ 5 (Dimension 5) คือระยะดังภาพ ที่ 3-21 ต่ำสุดคือ 12 มิลลิเมตร เพราะถ้าระยะต่ำกว่านี้จะทำให้เกลียวนอกและในสัมผัสกันเพียงไม่กี่เกลียว อาจทำให้ชิ้นงานอาจหลุดจากอุปกรณ์ยกได้ และสูงสุด คือ 50 มิลลิเมตร เพราะถ้ายาวเกินจะทำให้อุปกรณ์ไม่สามารถยึดติดกับชิ้นงานทำให้ไม่ปลอดภัย



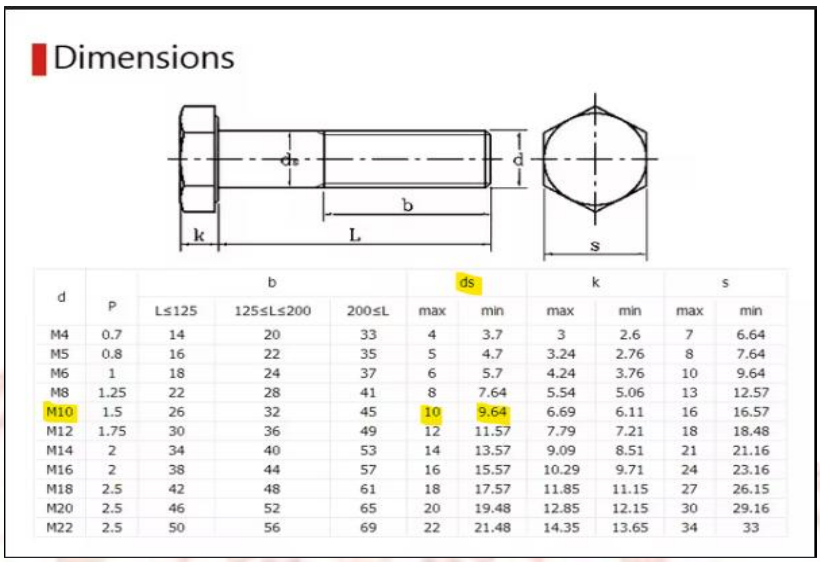
ภาพที่ 3-21 แสดงระยะของปัจจัยที่ 5 (Dimension 5)

ปัจจัยที่ 6 (Dimension 6) คือระยะดังภาพ ที่ 3-22 ค่าต่ำสุด ที่ 10.25 มิลลิเมตร และสูงสุดที่ 12 มิลลิเมตร เนื่องจากว่าชิ้นงานและงานที่จับยึดติดกันนั้นใช้ Bolt ขนาด M10 ในการจับยึดจึงสามารถมีค่าต่ำสุดและสุงสุดของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตามรายละเอียดของ Diameter ขนาด Bolt M10 ดังภาพที่

3-23



ภาพที่ 3-22 แสดงระยะของปัจจัยที่ 6 (Dimension 6)



d	P	b			ds		k		s	
		L≤125	125≤L≤200	200≤L	max	min	max	min	max	min
M4	0.7	14	20	33	4	3.7	3	2.6	7	6.64
M5	0.8	16	22	35	5	4.7	3.24	2.76	8	7.64
M6	1	18	24	37	6	5.7	4.24	3.76	10	9.64
M8	1.25	22	28	41	8	7.64	5.54	5.06	13	12.57
M10	1.5	26	32	45	10	9.64	6.69	6.11	16	16.57
M12	1.75	30	36	49	12	11.57	7.79	7.21	18	18.48
M14	2	34	40	53	14	13.57	9.09	8.51	21	21.16
M16	2	38	44	57	16	15.57	10.29	9.71	24	23.16
M18	2.5	42	48	61	18	17.57	11.85	11.15	27	26.15
M20	2.5	46	52	65	20	19.48	12.85	12.15	30	29.16
M22	2.5	50	56	69	22	21.48	14.35	13.65	34	33

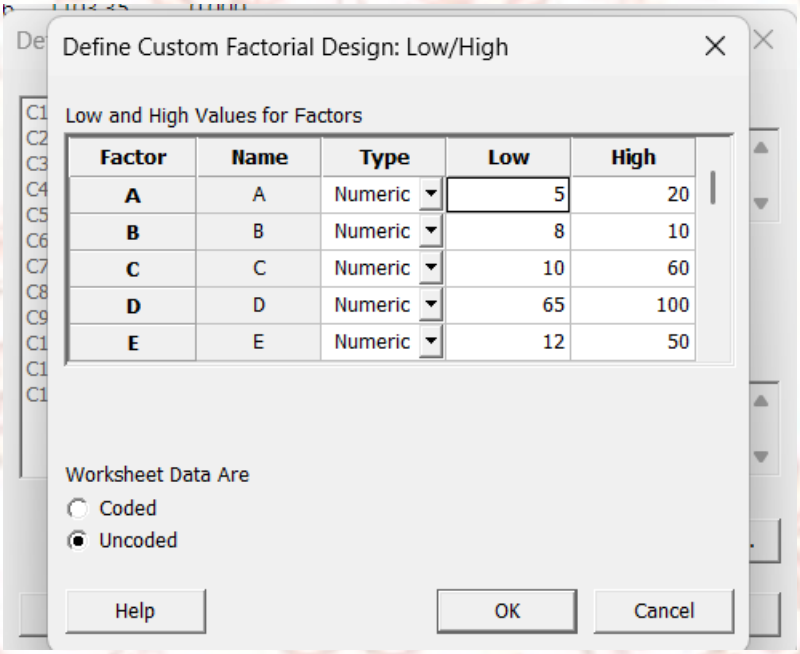
ภาพที่ 3-23 รายละเอียด Dimension ของ Bolt ขนาด M10

3.3 การออกแบบตารางการทดลอง

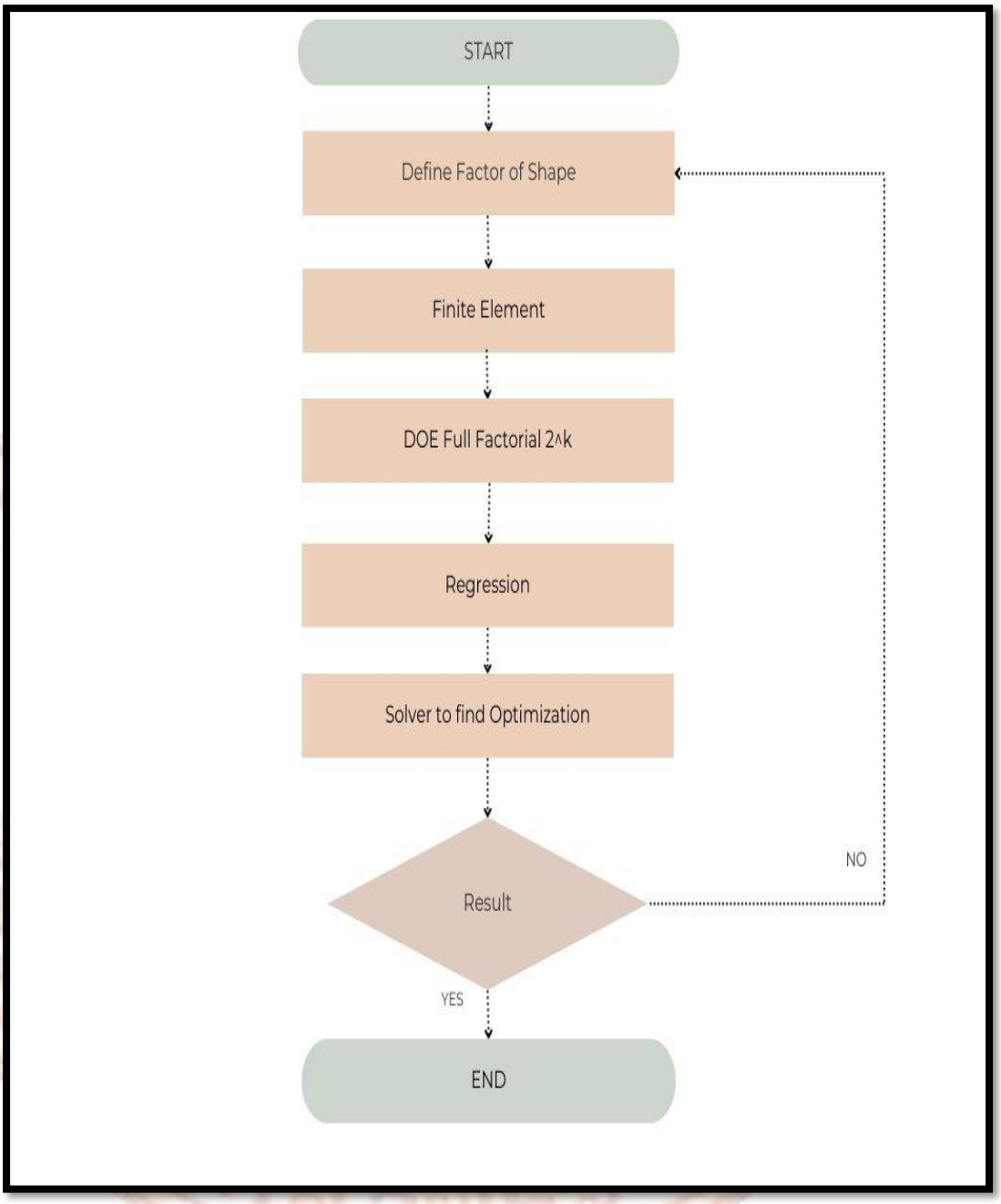
จากรายละเอียดที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.2 แสดงพารามิเตอร์เพื่อใช้ในการออกแบบฟิกเจอร์ของคานรับแรงทั้ง 6 ปัจจัย แสดงค่าสูงสุด-ต่ำสุดของแต่ละปัจจัย (Factor) เพื่อใช้สำหรับคำนวณหาสมการเป้าหมายคือ น้ำหนัก(Mass) และเงื่อนไข คือ Factor Of Safety (FOS) โดยในการออกแบบการทดลองผู้วิจัยได้สร้างตารางการทดลองโดยวิเคราะห์แบบ Full Factorial Design 2^k เพื่อใช้ในการหารูปร่างของชิ้นงาน โดยมีการออกแบบการทดลอง 6 ปัจจัย 64 การทดลอง หลังจากนั้นทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ด้วยโปรแกรม Solid work เพื่อที่จะทราบค่าน้ำหนัก (Mass) รวมของชิ้นงานและค่าดัชนีความปลอดภัย (FOS) จากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อช่วยหาสมการถดถอยของสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขด้วยโปรแกรม Minitab หลังจากนั้นนำข้อมูลไปหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ด้วยโปรแกรม Excel Solver และโปรแกรม Lingo โดยผลลัพธ์และขั้นตอนการวิจัยด้วยวิธีต่างๆจะแสดงในบทที่ 4 ต่อไป

ตารางที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรระหว่างโปรแกรม SolidWorks และ Minitab

SolidWorks	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Minitab	A	B	C	D	E	F



ภาพที่ 3-24 กำหนดความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์และค่าสูงสุดต่ำสุดในโปรแกรม Minitab 19



ภาพที่ 3-25 แสดงแผนผังขั้นตอนการหารูปร่างที่เหมาะสม

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากวิธีการดำเนินการวิจัยที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 จากโปรแกรม Solidwork ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) นั้น ผู้วิจัยได้กำหนดพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบในการสร้างรูปร่างไว้ 2 รูปแบบการทดลอง โดยรูปแบบแรกเป็นการทดลองแบบ 6 ปัจจัย อย่างไรก็ตามผลการทดลองยังไม่เป็นไปตามเป้าหมาย ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้วางแผนและกำหนดพารามิเตอร์ใหม่เป็นการทดลองในรูปแบบที่สอง แบบ 7 ปัจจัย เพื่อให้สามารถเป็นไปตามวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาของชิ้นงานคานรับแรง โดยกำหนดเป้าหมายคือ น้ำหนักรวมน้อยที่สุด (Minimize Mass) ภายใต้เงื่อนไขคือ ดัชนีความปลอดภัย (Safety of Factor) ไม่ต่ำกว่า 3.5 ซึ่งมีขั้นตอนการหาผลลัพธ์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 สร้างรูปร่าง ออกแบบการทดลอง และหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบ 6 ปัจจัย

4.2 สร้างรูปร่าง ออกแบบการทดลอง และหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบ 7 ปัจจัย

4.3 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างโปรแกรมการหา Optimization

4.4 ผลิตชิ้นงานจริงและนำชิ้นงานจริงไปทดสอบ

4.1 สร้างรูปร่างออกแบบการทดลอง และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ 6 ปัจจัย

จากข้อมูลในบทที่ 3 ได้นำข้อมูลพารามิเตอร์ทั้ง 6 ตัวมาออกแบบการทดลองด้วยวิธี Full Factorial Design 2^k เพื่อหาจำนวนรูปร่างและนำไปใช้สร้าง CAD Model เพื่อหาค่าน้ำหนัก (Mass) และค่าดัชนีความปลอดภัย (Safety Of Factor , FOS) เพื่อนำไปสู่การหาสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขในโปรแกรมที่ผู้วิจัยได้เลือกมาออกแบบการทดลองและหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

4.1.1 การออกแบบตารางการทดลอง

การออกแบบตารางการทดลองในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบตารางการทดลองโดยวิธี Full Factorial Design 2^k โดยการนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 6 ตัวมาระบุจำนวนปัจจัยและระดับการทดลองซึ่งได้จำนวนการ Run ออกมาทั้งหมด 64 Case โดยตัวอย่างรูปแบบการสร้างตารางการออกแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 4-1 (ตารางการออกแบบการทดลองดังแสดงในภาคผนวก ก-1)

ตารางที่ 4-1 ตัวอย่างการสร้างตารางการทดลองจากโปรแกรม Minitab 19

Case	D1	D2	D3	D4	D5	D6	FOS	MASS
1	5	8	10	65	12	10.25		
2	20	8	10	65	12	10.25		
3	5	10	10	65	12	10.25		
4	20	10	10	65	12	10.25		
5	5	8	60	65	12	10.25		
6	20	8	60	65	12	10.25		
7	5	10	60	65	12	10.25		
8	20	10	60	65	12	10.25		
9	5	8	10	100	12	10.25		
10	20	8	10	100	12	10.25		
11	5	10	10	100	12	10.25		
12	20	10	10	100	12	10.25		
13	5	8	60	100	12	10.25		
14	20	8	60	100	12	10.25		
…	…	…	…	…	…	…	…	…
64	20	10	60	100	50	12		

4.1.2 การหารูปร่างด้วยโปรแกรม Solidworks

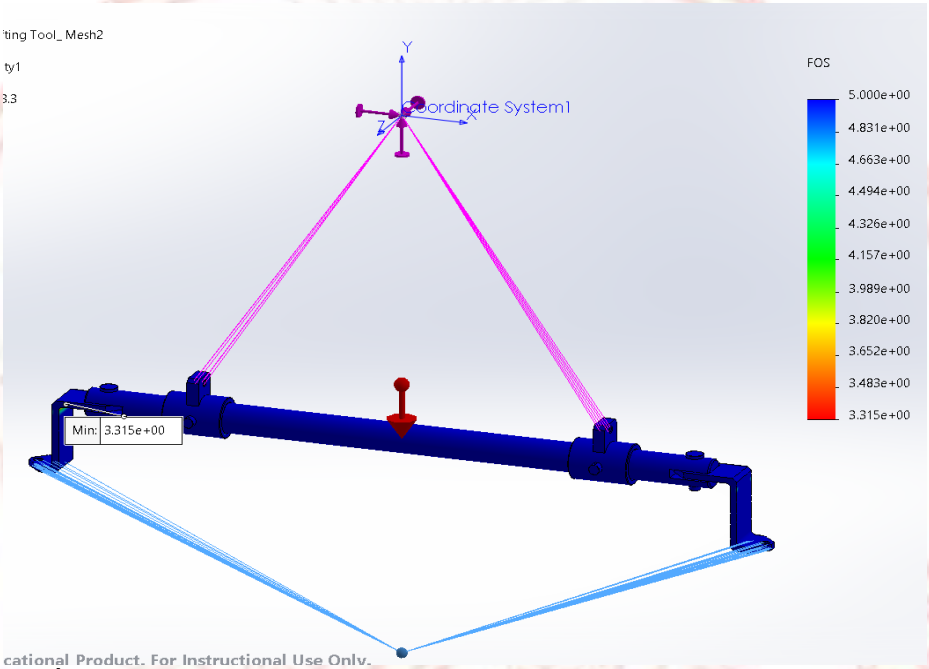
จากข้อมูลที่ได้ในการสร้างตารางการทดลองด้วยวิธี Full Factorial Design โดยปัจจัยมีค่าสูงสุดต่ำสุด ที่มีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อน้ำหนักและค่าดัชนีความปลอดภัยในการสร้างรูปแบบของคานรับแรง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงนำขนาดของรูปแบบทั้ง 64 รูปแบบนี้ไปสร้าง CAD Model ด้วยโปรแกรม SolidWorks เพื่อจะวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของรูปแบบต่างๆต่อไปโดยการสร้าง CAD Model ทั้ง 64 รูปแบบนั้น ดังแสดงในภาพที่ 4-1

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	5	8	10	65	12	10.25
2	2	2	1	1	20	8	10	65	12	10.25
3	3	3	1	1	5	10	10	65	12	10.25
4	4	4	1	1	20	10	10	65	12	10.25
5	5	5	1	1	5	8	60	65	12	10.25
6	6	6	1	1	20	8	60	65	12	10.25
7	7	7	1	1	5	10	60	65	12	10.25
8	8	8	1	1	20	10	60	65	12	10.25
9	9	9	1	1	5	8	10	100	12	10.25
10	10	10	1	1	20	8	10	100	12	10.25
11	11	11	1	1	5	10	10	100	12	10.25
12	12	12	1	1	20	10	10	100	12	10.25
13	13	13	1	1	5	8	60	100	12	10.25
14	14	14	1	1	20	8	60	100	12	10.25
15	15	15	1	1	5	10	60	100	12	10.25
16	16	16	1	1	20	10	60	100	12	10.25
17	17	17	1	1	5	8	10	65	50	10.25
18	18	18	1	1	20	8	10	65	50	10.25
19	19	19	1	1	5	10	10	65	50	10.25
20	20	20	1	1	20	10	10	65	50	10.25
21	21	21	1	1	5	8	60	65	50	10.25
22	22	22	1	1	20	8	60	65	50	10.25

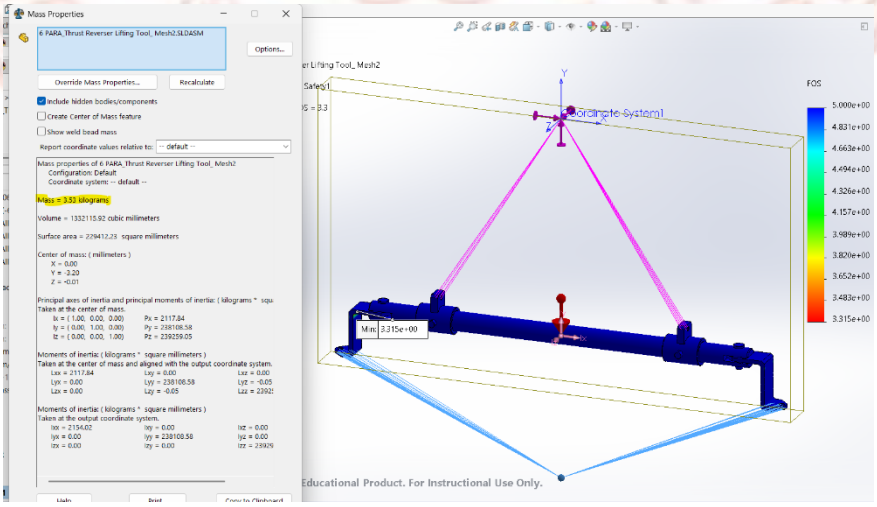
ภาพที่ 4-1 นำข้อมูลรูปแบบจากโปรแกรม Minitab ใส่ในโปรแกรม SolidWorks เพื่อสร้าง Cad Model

4.1.3 การหาผลลัพธ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากได้รูปแบบ CAD Model ทั้งหมด 64 รูปแบบแล้วทางผู้วิจัยได้วิเคราะห์รูปแบบทั้งหมด64รูปแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อต้องการทราบข้อมูลของค่าดัชนีความปลอดภัย(FOS) และมวลน้ำหนัก (Mass) ของแต่ละรูปแบบโดยผลที่ได้ดังแสดงในตัวอย่างภาพที่ 4-2 และภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-2 CAD Model (26) หลังการทดสอบ Finite Element ทราบค่า Factor of Safety



ภาพที่ 4-3 CAD Model (26) หลังการทดสอบ Finite Element ทราบค่า Mass

4.1.4 การหาสมการถดถอย (Regression Equation)

4.1.4.1 การกำหนดรูปแบบการใช้งานในโปรแกรม Minitab และ Excel Solver

การกำหนดรูปแบบการใช้งานในโปรแกรม Minitab ผู้วิจัยได้เลือกใช้ แบบ Factorial regression และมีอิทธิพลร่วมแบบ 2 ปัจจัย (2 way interaction) เนื่องจากข้อมูลเป็นแบบการออกแบบการทดลอง (DOE) และเมื่อพิจารณาข้อมูลแล้วปรากฏว่า ปัจจัยบางปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน

การกำหนดรูปแบบการใช้งาน Excel Solver ผู้วิจัยเลือกใช้โหมด GRG Nonlinear ในการหาผลลัพธ์ที่สุด (Optimization)

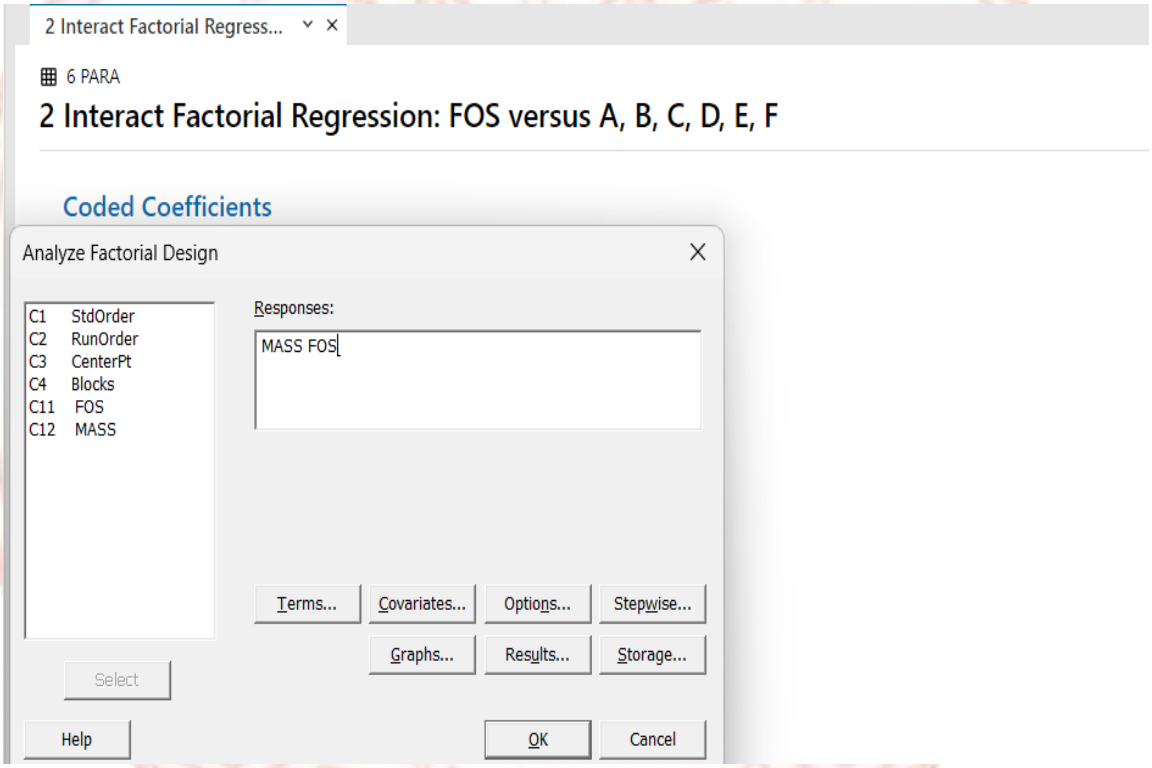
4.1.4.2 การหาสมการถดถอย

ข้อมูลทั้งที่นำมาออกแบบการทดลองนั้น มี 64 รูปแบบการทดลอง ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Minitab 19 ในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์หาสมการถดถอย (Regression Analysis) ของสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) โดยนำผลข้อมูลจากการทำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ด้วยโปรแกรม Solidwork ลงไปในตารางการออกแบบการทดลอง ดังภาพที่ 4-4 เป็นการแสดงตัวอย่างลักษณะการกรอกข้อมูล FOS และ Mass ลงในตารางการทดลองที่ได้เตรียมไว้ทั้งหมด 64 รูปแบบ

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	FOS	MASS
1	1	1	1	1	5	8	10	65	12	10.25	3.19	3.48
2	2	2	1	1	20	8	10	65	12	10.25	3.18	3.45
3	3	3	1	1	5	10	10	65	12	10.25	3.38	3.58
4	4	4	1	1	20	10	10	65	12	10.25	3.32	3.54
5	5	5	1	1	5	8	60	65	12	10.25	3.18	3.59
6	6	6	1	1	20	8	60	65	12	10.25	3.19	3.56
7	7	7	1	1	5	10	60	65	12	10.25	3.33	3.71
8	8	8	1	1	20	10	60	65	12	10.25	3.35	3.67
9	9	9	1	1	5	8	10	100	12	10.25	3.30	3.56
10	10	10	1	1	20	8	10	100	12	10.25	3.33	3.53
11	11	11	1	1	5	10	10	100	12	10.25	3.48	3.67
12	12	12	1	1	20	10	10	100	12	10.25	3.49	3.63
13	13	13	1	1	5	8	60	100	12	10.25	3.35	3.67
14	14	14	1	1	20	8	60	100	12	10.25	3.30	3.63
15	15	15	1	1	5	10	60	100	12	10.25	3.50	3.81
16	16	16	1	1	20	10	60	100	12	10.25	3.44	3.77
17	17	17	1	1	5	8	10	65	50	10.25	3.18	3.48
18	18	18	1	1	20	8	10	65	50	10.25	3.18	3.45
19	19	19	1	1	5	10	10	65	50	10.25	3.38	3.58
20	20	20	1	1	20	10	10	65	50	10.25	3.30	3.54
21	21	21	1	1	5	8	60	65	50	10.25	3.17	3.59
22	22	22	1	1	20	8	60	65	50	10.25	3.19	3.56

ภาพที่ 4-4 การนำข้อมูลจาก Finite Element กรอกลงตารางการทดลองใน Minitab

หลังจากทำการทดลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ด้วยโปรแกรม Solid Work และกรอกผลลงไปในตารางการออกแบบการทดลองเสร็จสมบูรณ์แล้ว จากนั้นทำการกำหนดและวิเคราะห์ผลเพื่อหาสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขด้วยวิธี Factorial Regression ในโปรแกรม Minitab ดังภาพที่ 4-5 แสดงการกำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไข ดังภาพที่ 4-6 แสดงข้อมูลของสมการเป้าหมาย (Mass) และดังภาพที่ 4-7 แสดงข้อมูลของสมการเงื่อนไข (FOS)



ภาพที่ 4-5 กำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไข

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0027817	99.94%	99.92%	99.87%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	21	0.586850	0.027945	3611.38	0.000
Linear	6	0.582300	0.097050	12541.85	0.000
A	1	0.021025	0.021025	2717.08	0.000
B	1	0.207025	0.207025	26754.00	0.000
C	1	0.235225	0.235225	30398.31	0.000
D	1	0.119025	0.119025	15381.69	0.000
E	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
F	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
2-Way Interactions	15	0.004550	0.000303	39.20	0.000
A*B	1	0.000225	0.000225	29.08	0.000
A*C	1	0.000025	0.000025	3.23	0.079
A*D	1	0.000025	0.000025	3.23	0.079
A*E	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
A*F	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
B*C	1	0.003025	0.003025	390.92	0.000
B*D	1	0.001225	0.001225	158.31	0.000
B*E	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
B*F	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
C*D	1	0.000025	0.000025	3.23	0.079
C*E	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
C*F	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
D*E	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
D*F	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
E*F	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
Error	42	0.000325	0.000008		
Total	63	0.587175			

ภาพที่ 4-6 แสดงข้อมูลของสมการเป้าหมาย (Mass) รวมปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ

Model Summary

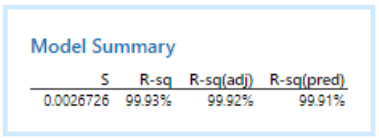
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0193649	97.80%	96.70%	94.90%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	21	0.700825	0.033373	88.99	0.000
Linear	6	0.694844	0.115807	308.82	0.000
A	1	0.000225	0.000225	0.60	0.443
B	1	0.375156	0.375156	1000.42	0.000
C	1	0.000025	0.000025	0.07	0.798
D	1	0.319225	0.319225	851.27	0.000
E	1	0.000156	0.000156	0.42	0.522
F	1	0.000056	0.000056	0.15	0.700
2-Way Interactions	15	0.005981	0.000399	1.06	0.416
A*B	1	0.000056	0.000056	0.15	0.700
A*C	1	0.000000	0.000000	0.00	1.000
A*D	1	0.000025	0.000025	0.07	0.798
A*E	1	0.000006	0.000006	0.02	0.898
A*F	1	0.002256	0.002256	6.02	0.018
B*C	1	0.000006	0.000006	0.02	0.898
B*D	1	0.000006	0.000006	0.02	0.898
B*E	1	0.000025	0.000025	0.07	0.798
B*F	1	0.000100	0.000100	0.27	0.608
C*D	1	0.000400	0.000400	1.07	0.308
C*E	1	0.000306	0.000306	0.82	0.371
C*F	1	0.000756	0.000756	2.02	0.163
D*E	1	0.001806	0.001806	4.82	0.034
D*F	1	0.000006	0.000006	0.02	0.898
E*F	1	0.000225	0.000225	0.60	0.443
Error	42	0.015750	0.000375		
Total	63	0.716575			

ภาพที่ 4-7 แสดงข้อมูลของสมการเงื่อนไข (FOS) รวมปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ

ในวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดความน่าเชื่อถือที่ 95 % หรือหมายความว่า P value < 0.05 ถือว่าปัจจัยนั้นมีนัยสำคัญหลังจากการวิเคราะห์ภาพที่ 4-6 และ ภาพที่ 4-7 แสดงข้อมูลของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมจากสมการเป้าหมาย (Mass) และเงื่อนไข (FOS) นั้นได้แสดงว่ามีปัจจัยที่ค่า P value > 0.05 ซึ่งบ่งบอกว่าปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมนั้นไม่มีนัยสำคัญสามารถตัดปัจจัยเหล่านั้นออกจากชุดข้อมูลการทดลองเพื่อเพิ่มศักยภาพของสมการถดถอยให้มีศักยภาพมากขึ้น ดังแสดงดังภาพที่ 4-8 และ 4-9



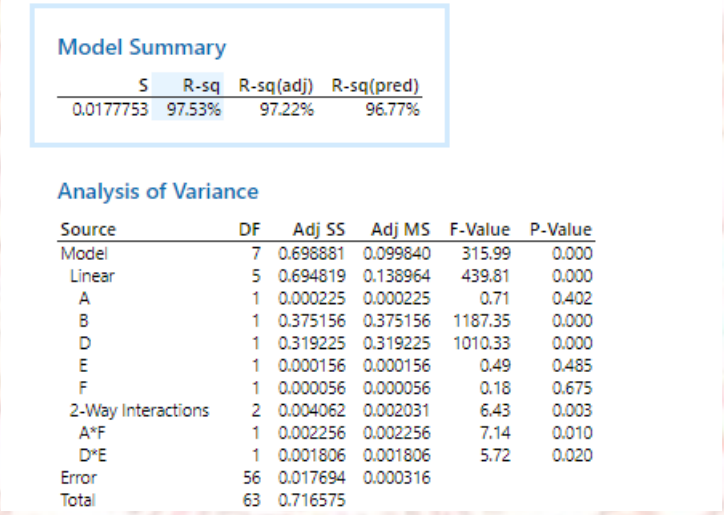
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0026726	99.93%	99.92%	99.91%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.586775	0.083825	11735.50	0.000
Linear	4	0.582300	0.145575	20380.50	0.000
A	1	0.021025	0.021025	2943.50	0.000
B	1	0.207025	0.207025	28983.50	0.000
C	1	0.235225	0.235225	32931.50	0.000
D	1	0.119025	0.119025	16663.50	0.000
2-Way Interactions	3	0.004475	0.001492	208.83	0.000
A*B	1	0.000225	0.000225	31.50	0.000
B*C	1	0.003025	0.003025	423.50	0.000
B*D	1	0.001225	0.001225	171.50	0.000
Error	56	0.000400	0.000007		
Total	63	0.587175			

ภาพที่ 4-8 แสดงข้อมูลสมการเป้าหมาย (Mass) หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก



Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0177753	97.53%	97.22%	96.77%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.698881	0.099840	315.99	0.000
Linear	5	0.694819	0.138964	439.81	0.000
A	1	0.000225	0.000225	0.71	0.402
B	1	0.375156	0.375156	1187.35	0.000
D	1	0.319225	0.319225	1010.33	0.000
E	1	0.000156	0.000156	0.49	0.485
F	1	0.000056	0.000056	0.18	0.675
2-Way Interactions	2	0.004062	0.002031	6.43	0.003
A*F	1	0.002256	0.002256	7.14	0.010
D*E	1	0.001806	0.001806	5.72	0.020
Error	56	0.017694	0.000316		
Total	63	0.716575			

ภาพที่ 4-9 แสดงข้อมูลสมการเงื่อนไข (FOS) หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก

จากภาพที่ 4-8 และ 4-9 แสดงข้อมูลปัจจัยของสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) ที่ตัดปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลกระทบต่อการทดลอง นอกจากนั้นสมการ FOS ยังมีค่า R-sq (adj) ที่บ่งบอกถึงความแปรปรวนของข้อมูลที่สูงขึ้นโดย ค่า R-sq(adj) จาก 96.7% เป็น 97.22%

เมื่อชุดข้อมูลและปัจจัยของชุดข้อมูลมีความเหมาะสมสามารถนำสมการถดถอย (Regression Equation) ของทั้งสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) ไปใช้หาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ด้วย Excel Solver ต่อไปได้ ดังภาพที่ 4-10 และ 4-11 แสดงสมการถดถอย (Regression equation) ของทั้ง 2 สมการ

$$FOS = 2.4878 - 0.01032\,A + 0.07656\,B + 0.003540\,D - 0.001236\,E - 0.01238\,F + 0.000905\,A*F + 0.000016\,D*E$$

ภาพที่ 4-10 แสดงสมการถดถอยเพื่อเอาไปใช้หาค่าที่ดีที่สุดของสมการเงื่อนไข (FOS)

$$MASS = 3.0899 - 0.000167\,A + 0.02975\,B - 0.000050\,C + 0.000214\,D - 0.000250\,A*B + 0.000275\,B*C + 0.000250\,B*D$$

ภาพที่ 4-11 แสดงสมการถดถอยเพื่อเอาไปใช้หาค่าที่ดีที่สุดของสมการเป้าหมาย (Mass)

4.1.5 การวิเคราะห์หารูปร่างที่เหมาะสม ด้วย Excel Solver

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะนำ Microsoft Excel มาใช้ในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยใช้การ Solver ของโปรแกรมด้วยวิธี GRG Nonlinear

ทางผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการช่วยหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยใช้การ Solver ของโปรแกรมด้วยวิธี GRG Nonlinear โดยจะตั้งเป้าหมาย (Mass) ให้มีค่าน้อยที่สุด โดยเงื่อนไข (FOS) มีค่ามากกว่าหรือเทียบเท่า 3.5 เท่า เพื่อให้เป็นไปตามข้อกฎหมายค่าความปลอดภัยการใช้งานอุปกรณ์ในการยกดังต่อไปนี้

- เป้าหมาย (Objective) : น้ำหนักที่น้อยที่สุด (Minimize Mass)
- เงื่อนไข (Constraints) : ค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor Of Safety) => 3.5

โดยการกำหนดและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อหาผลลัพธ์จากสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขที่ได้มาจากโปรแกรม Minitab มาใช้ในโปรแกรม Microsoft Excel ตามภาพที่ 4-12 4-13 และ4-14

D1 >= 5 และ D1<= 20

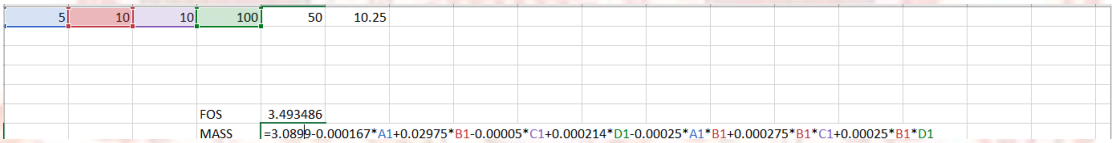
D2 >= 8 และ D2<= 10

D3 >= 10 และ D3<= 60

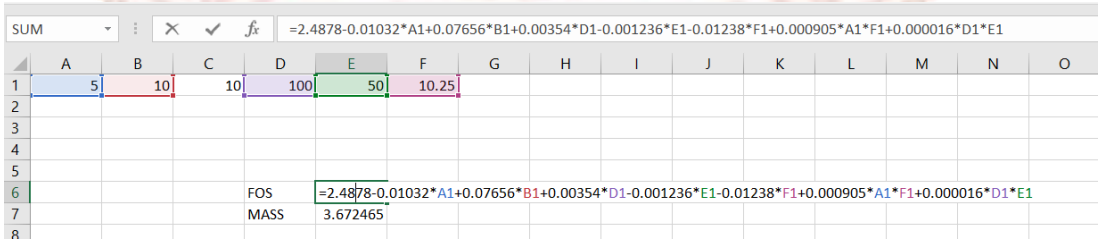
D4 >= 65 และ D4<= 100

D5 >= 12 และ D5<= 50

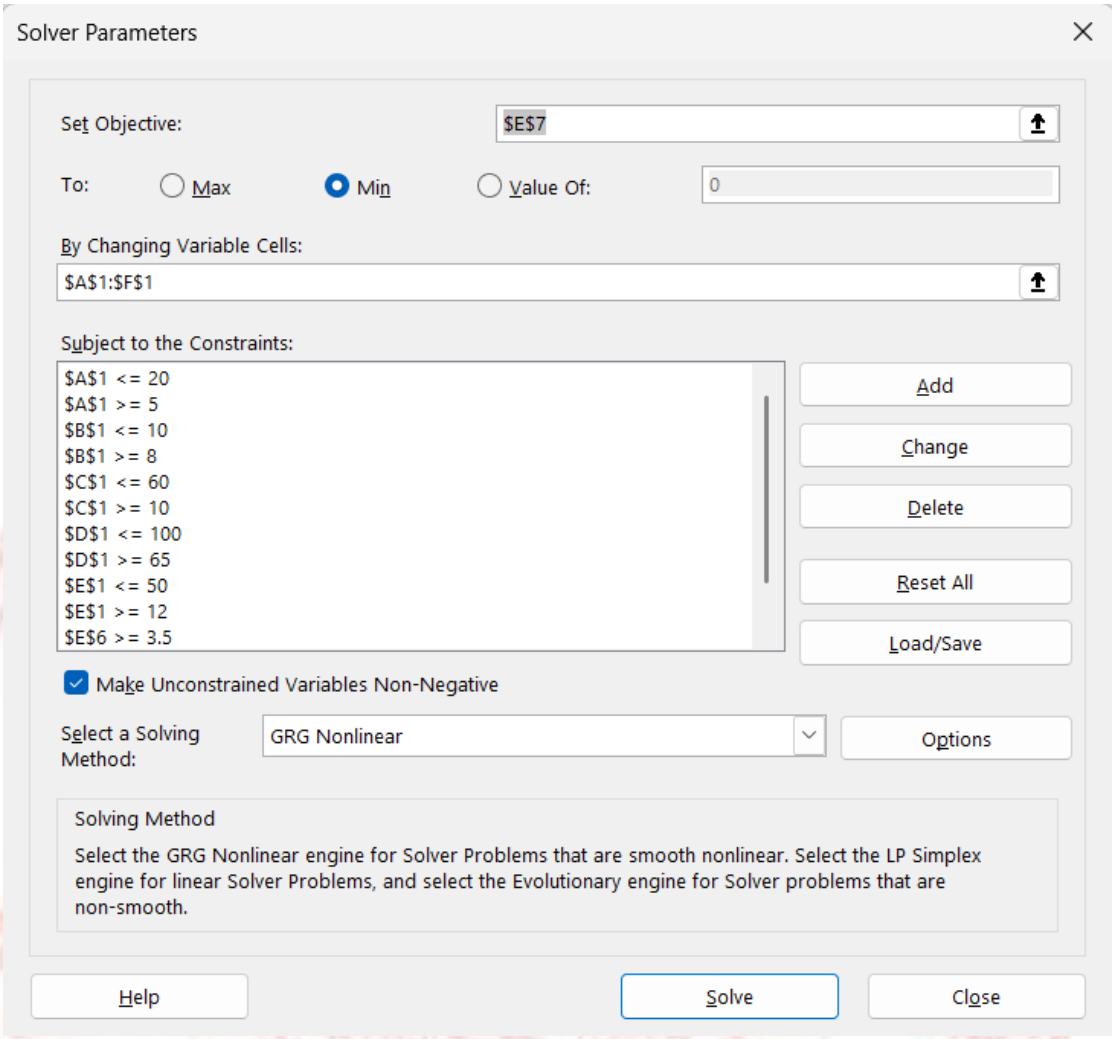
D6 >= 10.25 และ D6<= 12



ภาพที่ 4-12 แสดงการกำหนดสมการเป้าหมาย (Mass) ใน Excel Solver



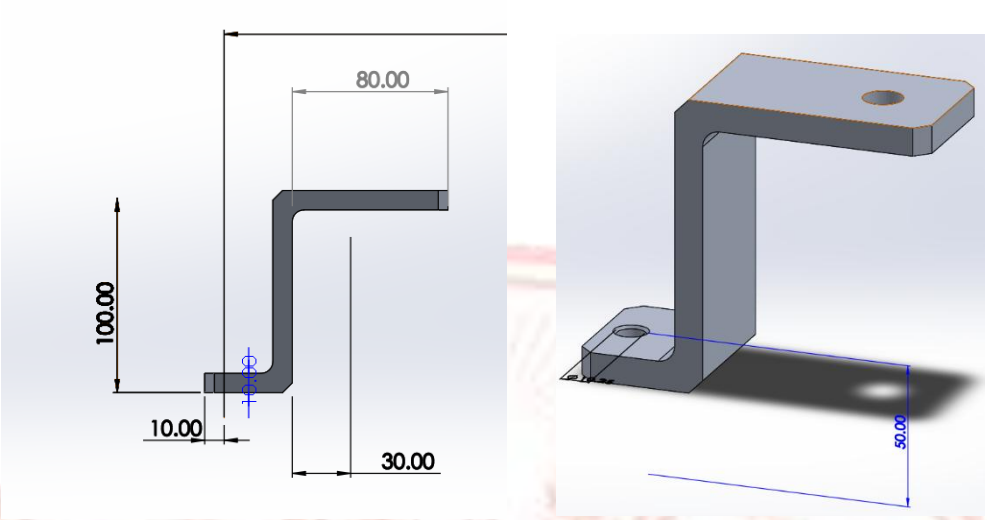
ภาพที่ 4-13 แสดงการกำหนดสมการเงื่อนไข (FOS) ใน Excel Solver



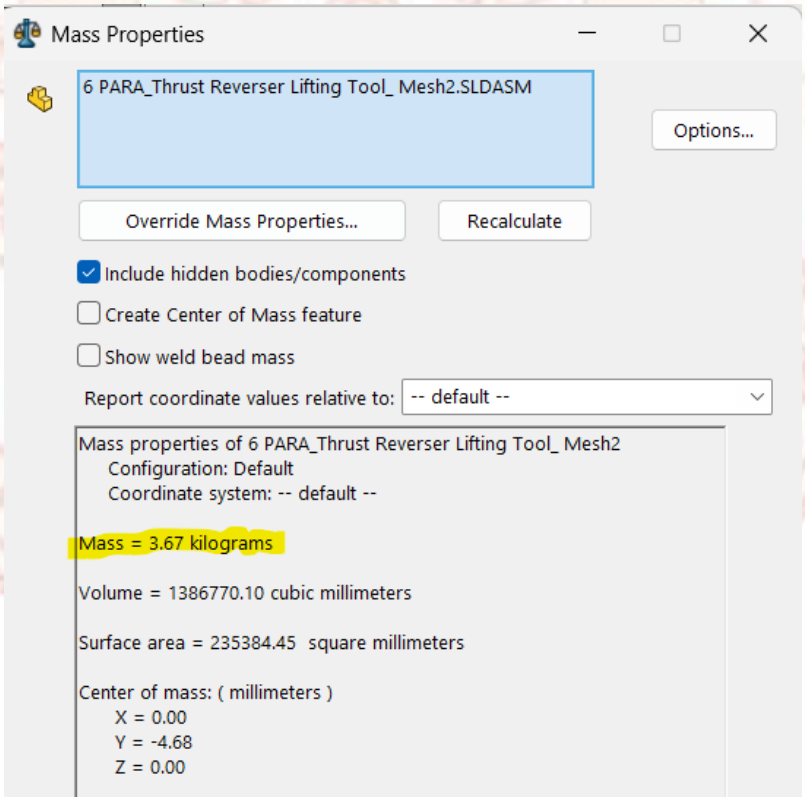
ภาพที่ 4-14 ตั้งค่า Solver จาก Microsoft Excel

4.1.5.1 การวิเคราะห์หารูปร่างที่เหมาะสมจากผลลัพธ์ Excel Solver ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

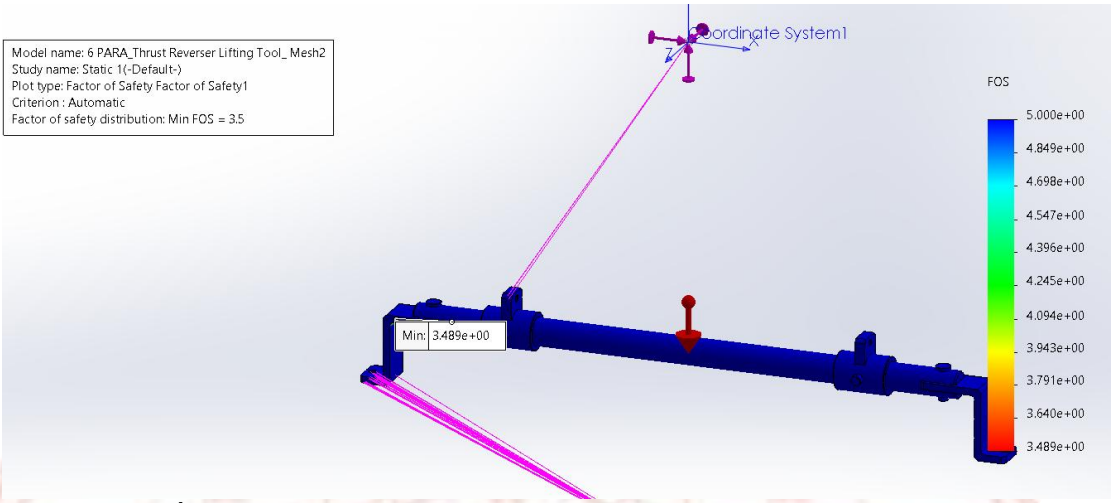
ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ Solver ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel นั้นซึ่ง Solver นี้ทำงานด้วยวิธี GRG Nonlinear เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีเป้าหมาย (Minimize Mass) ได้ผลลัพธ์ออกมาที่ 3.672 kg และเงื่อนไข (FOS) ได้ 3.493 เท่า จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Solver ไปทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method Analysis) เพื่อตรวจสอบค่าทั้ง 2 อีกครั้งเพื่อนำมาเปรียบเทียบและสรุปผล ดังภาพที่ 4-15 4-16 และ 4-17



ภาพที่ 4-15 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ CAD Model ตามการคำนวณของ Excel Solver



ภาพที่ 4-16 แสดงค่า Mass ที่ได้หลังการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver



ภาพที่ 4-17 แสดง ค่า FOS ที่ได้หลังจากการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver

4.1.5.2 เปรียบเทียบผลการปรับปรุงรูปร่างระหว่าง Excel Solver และ Solidworks หลังจากได้ทราบผลลัพธ์ของค่าเป้าหมาย (Mass) และเงื่อนไขจากการใช้โปรแกรมทั้ง 2 ค่าแล้ว ผู้วิจัยได้นำค่าทั้ง 2 จากทั้ง 2 โปรแกรมออกมาเพื่อเปรียบเทียบดูค่า % ความผิดพลาด

ตารางที่ 4-2 แสดงผลลัพธ์จาก Slover ด้วยวิธี GRG Nonlinear

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	FOS	Mass
Optimal	5	10	10	100	50	10.25	3.49	3.67

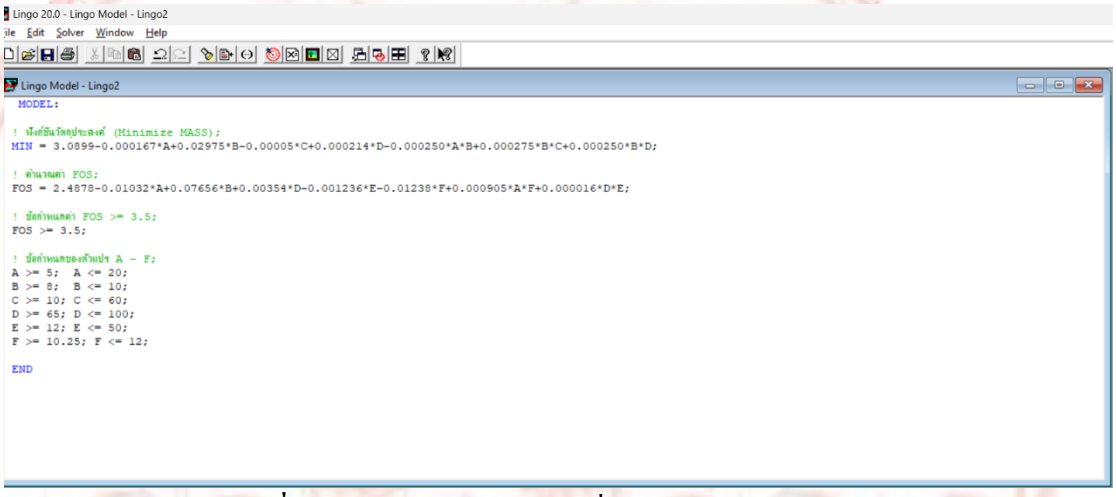
ตารางที่ 4-3 แสดงผลลัพธ์จาก SolidWorks ด้วยวิธี FEA

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	FOS	Mass
Optimal	5	10	10	100	50	10.25	3.49	3.67

จากตารางที่ 4-2 และ 4-3 เป็นการนำพารามิเตอร์ที่ได้จาก Solver นั้นมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ด้วยโปรแกรม Solidworks โดยมีเป้าหมาย (Minimize Mass) น้อยที่สุด และเงื่อนไข (FOS) => 3.5 ผลลัพธ์ที่ออกมาของทั้ง 2 โปรแกรมมีค่าไม่ต่างกัน

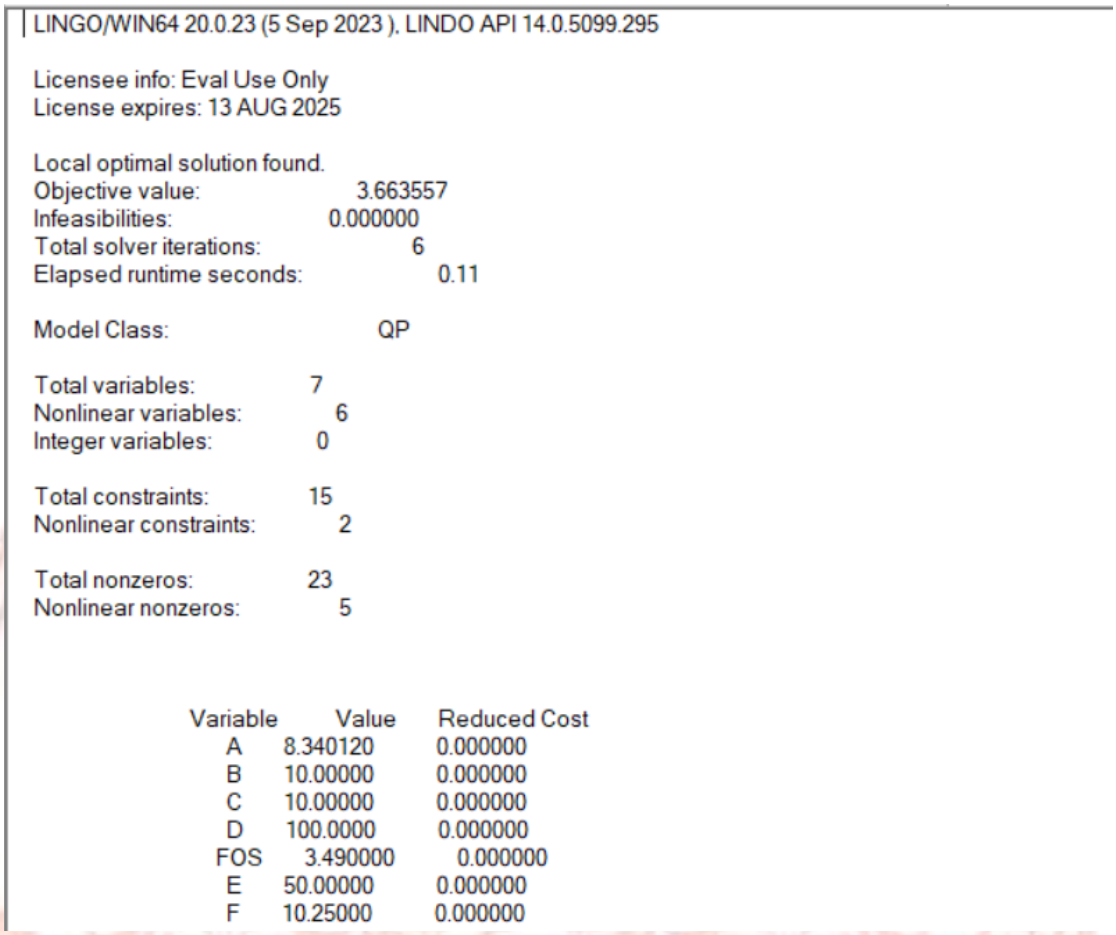
4.1.6 การวิเคราะห์หาผลลัพที่เหมาะสมด้วย Lingo

หลังจากได้ค่า Optimization จาก Excel Solver แล้ว ผู้วิจัยต้องการหาค่า Optimization จากโปรแกรม Lingo ซึ่งโปรแกรม Lingo เป็นโปรแกรมรูปแบบการเขียนโค้ด (Syntax) สามารถใช้หาค่า Optimization ได้เช่นกันเพื่อเปรียบเทียบการหาค่าของแต่ละปัจจัย ซึ่งผู้วิจัยได้เขียนโค้ด (Syntax) จากสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) ที่โปรแกรม Minitab คำนวณได้เช่นเดียวกับโปรแกรม Excel Solver ดังภาพที่ 4-18 โดยผู้วิจัยได้เขียนอธิบายการเขียนโค้ดต่าง ๆ ในภาพ



ภาพที่ 4-18 แสดงโค้ด (Syntax) ที่เขียนในโปรแกรม Lingo

หลังจากเขียนโค้ดเสร็จเรียบร้อยทำการ Solver เพื่อให้โปรแกรมหาค่า Optimization ของแต่ละปัจจัยสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) ดังแสดงในภาพที่ 4-19 และตารางที่ 4-4



```
LINGO/WIN64 20.0.23 (5 Sep 2023 ), LINDO API 14.0.5099.295

Licensee info: Eval Use Only
License expires: 13 AUG 2025

Local optimal solution found.
Objective value:                              3.663557
Infeasibilities:                              0.000000
Total solver iterations:                             6
Elapsed runtime seconds:                          0.11

Model Class:                                        QP

Total variables:                     7
Nonlinear variables:                 6
Integer variables:                   0

Total constraints:                  15
Nonlinear constraints:               2

Total nonzeros:                     23
Nonlinear nonzeros:                  5

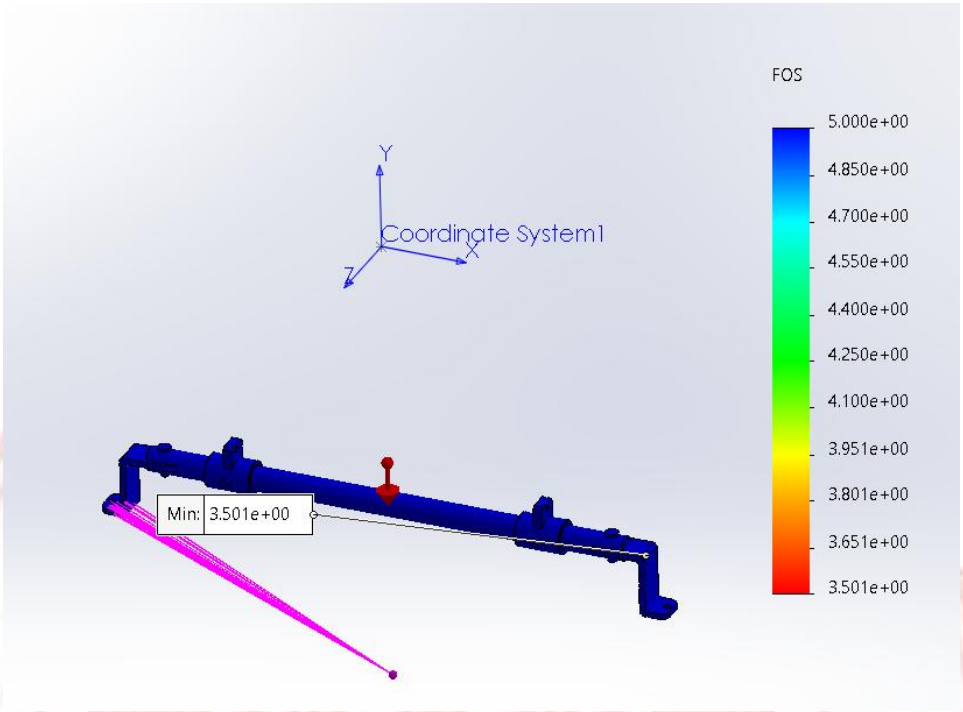
                     Variable           Value        Reduced Cost
                            A        8.340120            0.000000
                            B        10.00000            0.000000
                            C        10.00000            0.000000
                            D        100.0000            0.000000
                          FOS        3.490000            0.000000
                            E        50.00000            0.000000
                            F        10.25000            0.000000
```

ภาพที่ 4-19 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการ Solver ของโปรแกรม Lingo

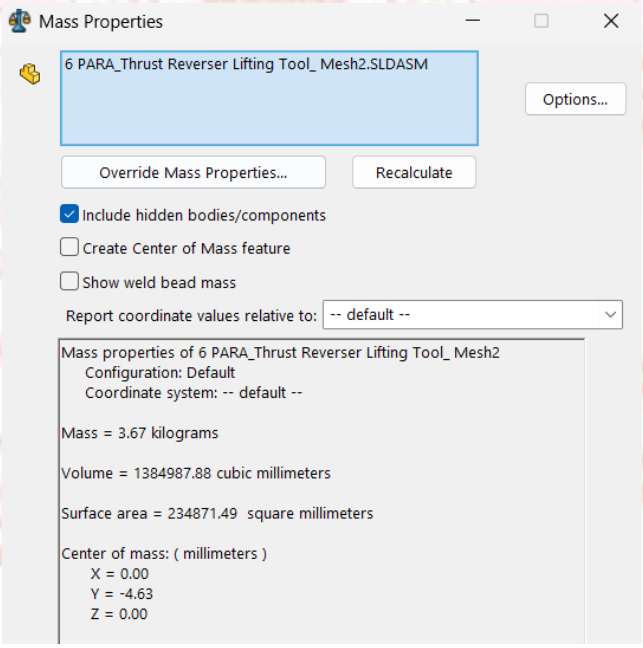
ตารางที่ 4-4 แสดงค่าปัจจัย 6 ปัจจัย ค่า FOS และ ค่า Mass ที่อ่านค่าได้จาก Lingo

D1	D2	D3	D4	D5	D6	FOS	Mass
8.34	10	10	100	50	10.25	3.49	3.66

หลังจากได้ผลลัพธ์จากโปรแกรม Lingo จะเห็นว่า D1 ของการหาค่า Optimization ของโปรแกรม Lingo และโปรแกรม Excel Solver ใช้ระยะไม่เท่ากัน ผู้วิจัยจึงได้ นำค่าระยะต่างๆที่โปรแกรม Lingo รันโปรแกรมออกมา ไปทำการจำลองใน Solidwork ได้ค่าMass และ FOS ดังภาพที่ 4-20 และ 4-21



ภาพที่ 4-20 แสดงค่า FOS จากการตั้งค่าขนาดตามโปรแกรม Lingo



ภาพที่ 4-21 แสดงค่าน้ำหนักจากการตั้งค่าขนาดตามโปรแกรม Lingo

จากผลการจำลองในโปรแกรม Solidworks พบว่าค่า FOS และค่า Mass มีค่าคลาดเคลื่อนกันเล็กน้อย โดยมีค่าคลาดเคลื่อนดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Mass และ FOS ระหว่างโปรแกรม Lingo และโปรแกรมSolid Work

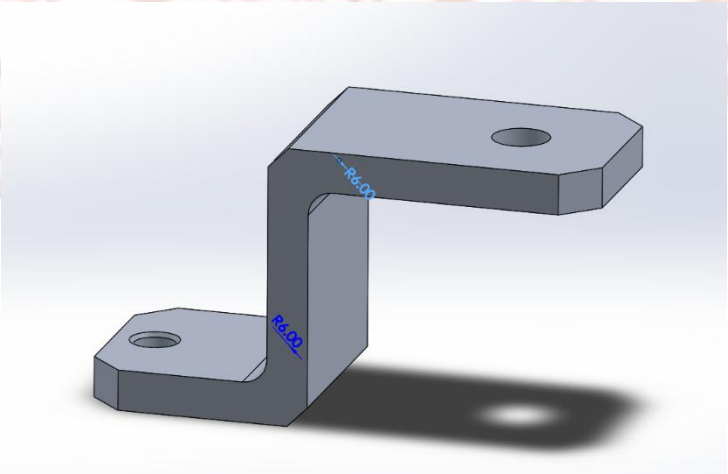
Mass (Kg)		FOS	
Lingo	Solid	Lingo	Solid
3.66	3.67	3.49	3.5

4.2 สร้างรูปร่างออกแบบการทดลองและหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบ 7 ปัจจัย

หลังจากได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองแบบ 6 ปัจจัยแล้วนั้น จะสามารถหาค่า Mass ที่ดีที่สุดได้ที่ FOS มีค่าประมาณ 3.5 เท่า ซึ่งหลังจากวิเคราะห์แบบ 6 ปัจจัยเสร็จนั้น ได้ปรึกษากับทีมวิศวกรออกแบบได้คำแนะนำว่าที่โรงงานจะเพิ่มค่าความปลอดภัย 15 เปอร์เซนต์ จากค่าที่กฎหมายบังคับเพื่อเพิ่มศักยภาพด้านความปลอดภัยมากขึ้น ดังนั้นค่าความปลอดภัยที่ควรนำมาใช้ในการออกแบบคานรับแรงคือ 4.025 เท่า เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ของขนาดคานรับแรงใหม่

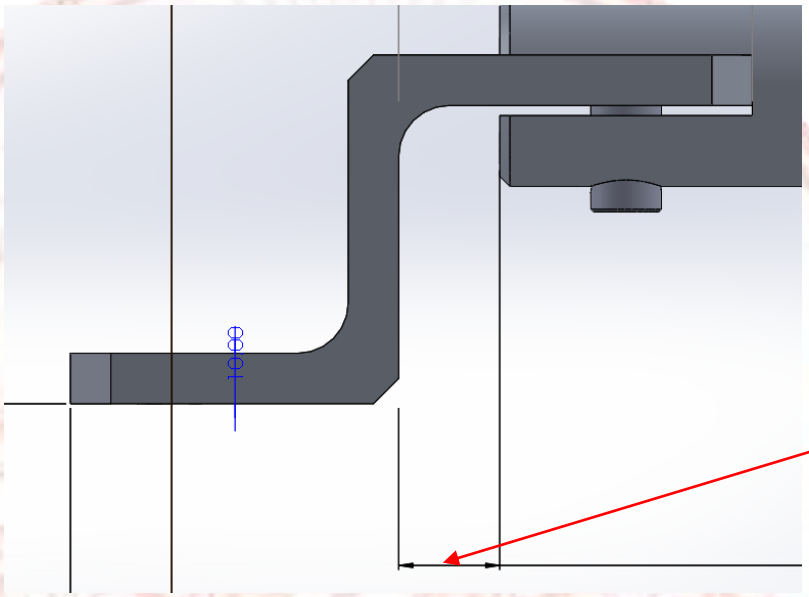
4.2.1 การกำหนดปัจจัยใหม่แบบ 7 ปัจจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยเพิ่มเติมมาอีก 2 ปัจจัยโดยปัจจัยที่เพิ่มเติมคือระยะตรงส่วนโค้งรัศมีหรือ R ของชิ้นงานดังภาพที่ 4-22 และระยะระหว่างชิ้นคานกับตัวยึดดังภาพที่ 4-23 และตัดปัจจัยที่ 5(D5) ในการทดลองแบบ 6 ปัจจัย ออกและกำหนดเป็นค่าคงที่ที่ 20 มิลลิเมตร เนื่องจากจะใช้ SPEC ของ BOLT ขนาด M10 เดียวกับคานรับแรงในแบบเดิมเพื่อง่ายต่อการจัดหา



ภาพที่ 4-22 แสดงระยะพารามิเตอร์ใหม่ของส่วนโค้งรัศมี

โดยระยะของปัจจัยส่วนโค้งรัศมีมีค่าต่ำสุดที่ 6 มิลลิเมตร เนื่องจากถ้าค่าต่ำกว่านี้จะทำให้ส่วนโค้งกลายเป็นลักษณะทรงสามเหลี่ยมซึ่งไม่เหมาะสมในทางวิศวกรรม และค่าสูงสุดที่ 15 มิลลิเมตร เพื่อให้มีความเหมาะสมของผิวโค้งและรัศมีและเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบระหว่างระยะห่างของรัศมีและชิ้นคาน



ภาพที่ 4-23 แสดงระยะพารามิเตอร์ใหม่ระหว่างชิ้นคานและรัศมี

ระยะปัจจัยใหม่ดังภาพที่ 4-23 มีค่าต่ำสุดที่ 20 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานคานจะชนกับส่วนโค้งรัศมี และมีค่าสูงสุดที่ 35 มิลลิเมตร เพราะจะชนกับรูที่ยึดกับชิ้นงาน

4.2.2 การออกแบบตารางการทดลอง

การออกแบบตารางการทดลองในการวิจัยครั้งที่ 2 นี้ผู้วิจัยได้ออกแบบตารางการทดลองโดยวิธี Full Factorial Design 2^k โดยการนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 7 ตัว มาระบุจำนวนปัจจัยและระดับการทดลองซึ่งได้จำนวนการ Run ออกมาทั้งหมด 128 Case โดยตัวอย่างรูปแบบการสร้างตารางการออกแบบการทดลองแสดงในตารางที่ 4-6 (ตารางการออกแบบการทดลองดังแสดงใน ภาคผนวก ก-2)

ตารางที่ 4-6 ตัวอย่างการสร้างตารางการทดลองจากโปรแกรม Minitab 19 แบบ 7 ปัจจัย

Case	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	MASS
1	20	5	8	10	65	10.25	6		
2	35	5	8	10	65	10.25	6		
3	20	20	8	10	65	10.25	6		
4	35	20	8	10	65	10.25	6		
5	20	5	10	10	65	10.25	6		
6	35	5	10	10	65	10.25	6		
7	20	20	10	10	65	10.25	6		
8	35	20	10	10	65	10.25	6		
9	20	5	8	60	65	10.25	6		
10	35	5	8	60	65	10.25	6		
11	20	20	8	60	65	10.25	6		
12	35	20	8	60	65	10.25	6		
13	20	5	10	60	65	10.25	6		
14	35	5	10	60	65	10.25	6		
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
128	35	20	10	60	100	12	15		

4.2.3 การหารูปร่างด้วยโปรแกรม SolidWorks

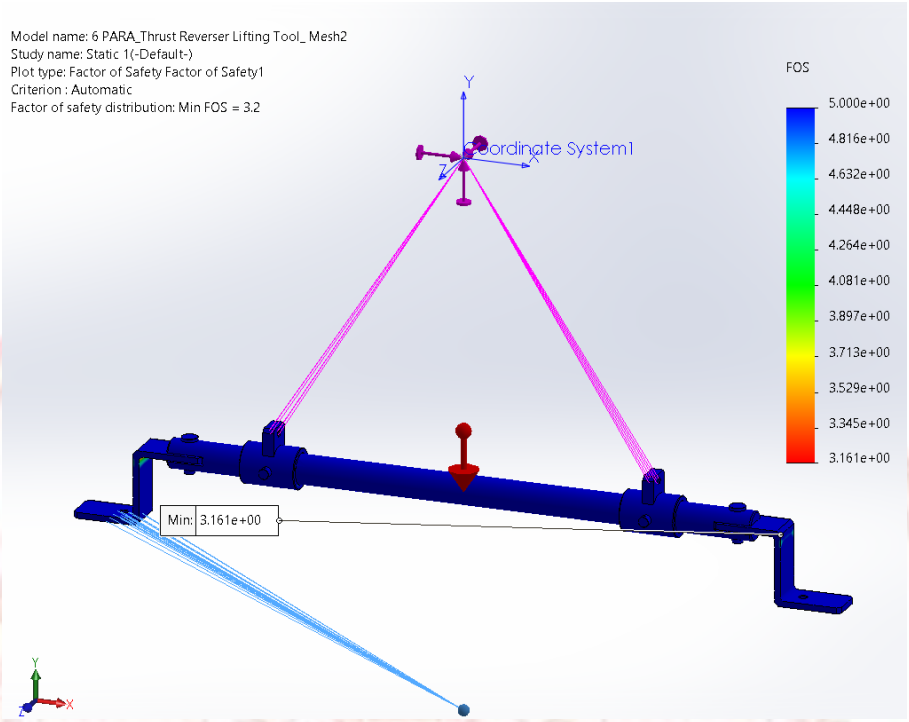
จากข้อมูลที่ได้ในการสร้างตารางการทดลองด้วยวิธี Full Factorial Design โดยปัจจัยมีค่าสูงสุดต่ำสุดที่มีอิทธิพลส่งผลกระทบต่อน้ำหนักและค่าดัชนีความปลอดภัยในการสร้างรูปแบบของคานรับแรง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงนำขนาดของรูปแบบทั้ง 128 รูปแบบนี้ไปสร้าง CAD Model ด้วยโปรแกรม SolidWorks เพื่อจะวิเคราะห์หาผลลัพธ์ของรูปแบบต่าง ๆ ต่อไปโดยการสร้าง CAD Model ทั้ง 128 รูปแบบนั้นดังภาพที่ 4-24

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	20	5	8	10	65	10.25	6
2	2	2	1	1	35	5	8	10	65	10.25	6
3	3	3	1	1	20	20	8	10	65	10.25	6
4	4	4	1	1	35	20	8	10	65	10.25	6
5	5	5	1	1	20	5	10	10	65	10.25	6
6	6	6	1	1	35	5	10	10	65	10.25	6
7	7	7	1	1	20	20	10	10	65	10.25	6
8	8	8	1	1	35	20	10	10	65	10.25	6
9	9	9	1	1	20	5	8	60	65	10.25	6
10	10	10	1	1	35	5	8	60	65	10.25	6
11	11	11	1	1	20	20	8	60	65	10.25	6
12	12	12	1	1	35	20	8	60	65	10.25	6
13	13	13	1	1	20	5	10	60	65	10.25	6
14	14	14	1	1	35	5	10	60	65	10.25	6
15	15	15	1	1	20	20	10	60	65	10.25	6
16	16	16	1	1	35	20	10	60	65	10.25	6
17	17	17	1	1	20	5	8	10	100	10.25	6
18	18	18	1	1	35	5	8	10	100	10.25	6
19	19	19	1	1	20	20	8	10	100	10.25	6
20	20	20	1	1	35	20	8	10	100	10.25	6
21	21	21	1	1	20	5	10	10	100	10.25	6
22	22	22	1	1	35	5	10	10	100	10.25	6
23	23	23	1	1	20	20	10	10	100	10.25	6
24	24	24	1	1	35	20	10	10	100	10.25	6
25	25	25	1	1	20	5	8	60	100	10.25	6
26	26	26	1	1	35	5	8	60	100	10.25	6
27	27	27	1	1	20	20	8	60	100	10.25	6
28	28	28	1	1	35	20	8	60	100	10.25	6

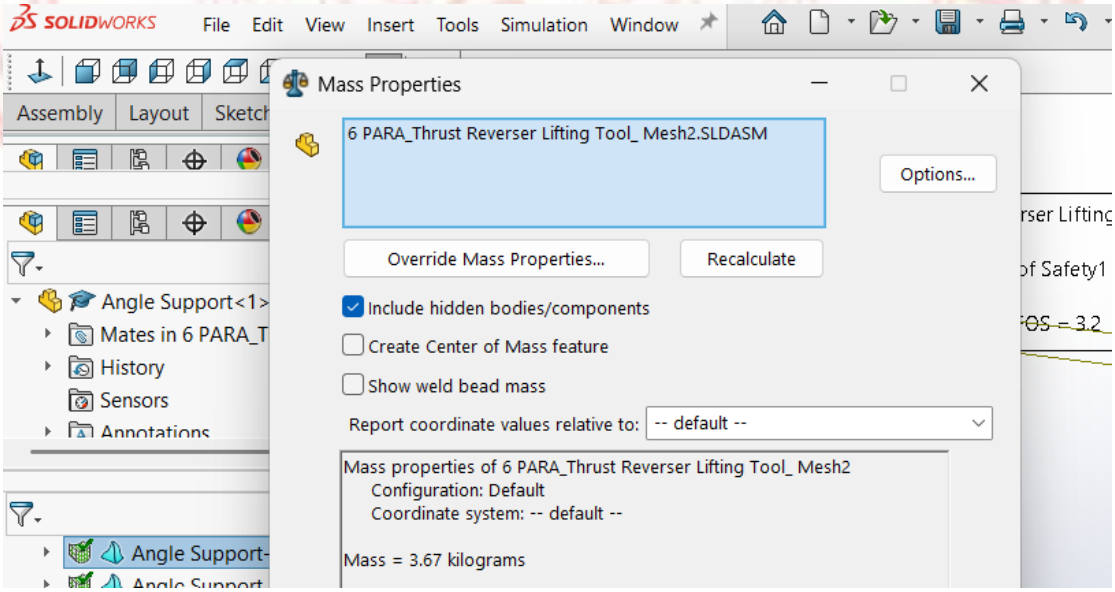
ภาพที่ 4-24 นำข้อมูลรูปแบบจากโปรแกรม Minitab ใส่ในโปรแกรม SolidWorks และสร้าง Cad Model

4.2.4 การหาผลลัพธ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากได้รูปแบบ CAD Model ทั้งหมด 128 รูปแบบ แล้วทางผู้วิจัยได้วิเคราะห์รูปแบบทั้งหมด 128 รูปแบบ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อต้องการทราบข้อมูลของค่าดัชนีความปลอดภัย (FOS) และมวลน้ำหนัก (Mass) ของแต่ละรูปแบบโดยผลที่ได้ดังแสดงในตัวอย่างภาพที่ 4-25 และภาพที่ 4-26



ภาพที่ 4-25 CAD Model (26) หลังการทดสอบ Finite Element ทราบค่า Factor of Safety



ภาพที่ 4-26 CAD Model (26) หลังการทดสอบ Finite Element ทราบค่า Mass

4.2.5 การหาสมการถดถอย (Regression Equation)

4.2.5.1 การกำหนดรูปแบบการใช้งานในโปรแกรม Minitab และ Excel Solver การกำหนดรูปแบบการใช้งานในโปรแกรม Minitab ผู้วิจัยได้เลือกใช้ แบบ Factorial regression และมีอิทธิพลร่วมแบบ 2 ปัจจัย (2 way interaction) เนื่องจากข้อมูลเป็นแบบการออกแบบการทดลอง (DOE) และเมื่อพิจารณาข้อมูลแล้วปรากฏว่าปัจจัยบางปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกันการกำหนดรูปแบบการใช้งาน Excel Solver ผู้วิจัยเลือกใช้โหมด GRG Nonlinear ในการหาผลลัพธ์ที่สุด (Optimization)

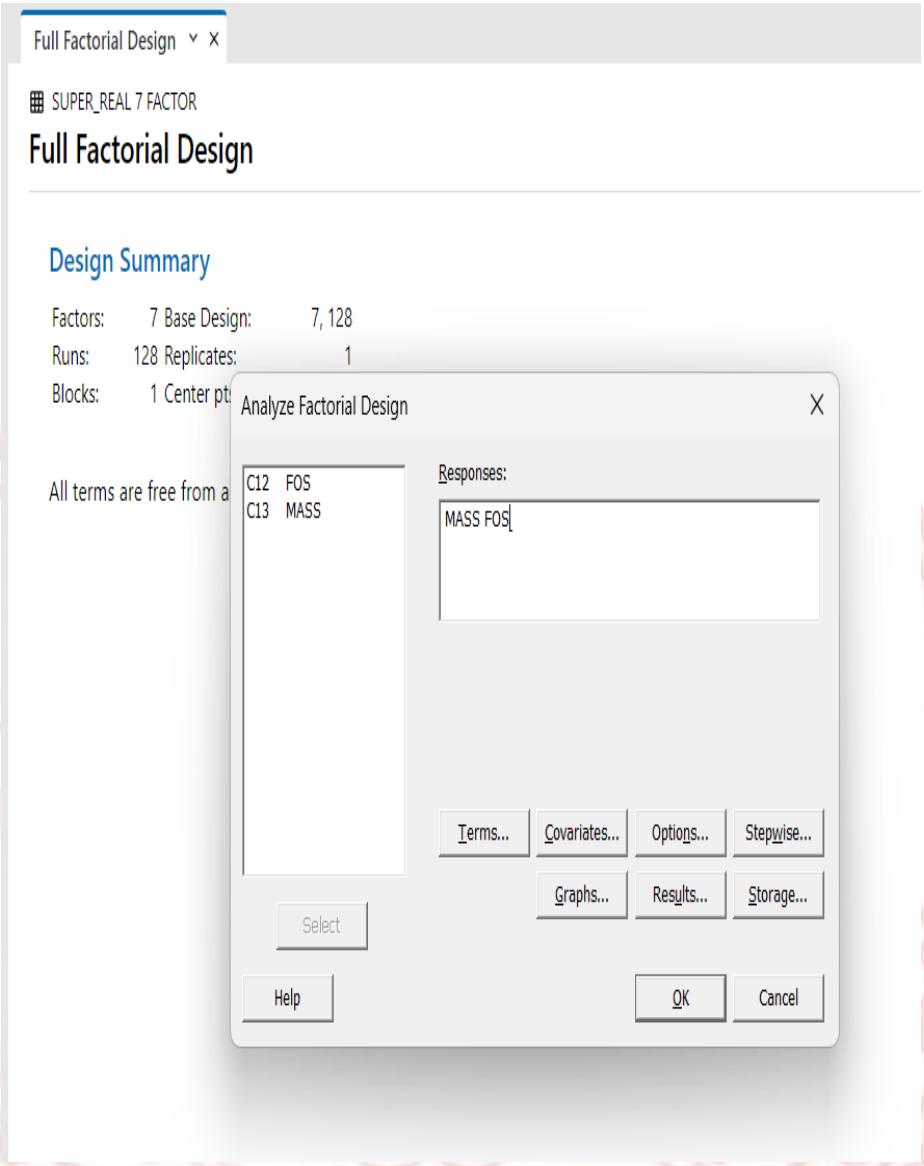
4.2.5.2 การหาสมการถดถอย

ข้อมูลที่นำมาออกแบบการทดลองนั้นมี 128 รูปแบบการทดลอง ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Minitab 19 ในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์หาสมการถดถอย (Regression Analysis)ของสมการเป้าหมาย (Mass) และ สมการเงื่อนไข (FOS) โดยนำผลข้อมูลจากการทำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ด้วยโปรแกรม Solid work กรอกลงไปในตารางการออกแบบการทดลองดังภาพที่ 4-27แสดงตัวอย่างลักษณะการกรอกข้อมูล FOS และ Mass ลงในตารางการทดลองที่ได้เตรียมไว้ทั้งหมด 128 รูปแบบ

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
	StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	A	B	C	D	E	F	G	FOS	MASS
1	1	1	1	1	20	5	8	10	65	10.25	6	3.42	3.48
2	2	2	1	1	35	5	8	10	65	10.25	6	3.08	3.48
3	3	3	1	1	20	20	8	10	65	10.25	6	3.42	3.45
4	4	4	1	1	35	20	8	10	65	10.25	6	3.04	3.45
5	5	5	1	1	20	5	10	10	65	10.25	6	3.45	3.58
6	6	6	1	1	35	5	10	10	65	10.25	6	3.23	3.58
7	7	7	1	1	20	20	10	10	65	10.25	6	3.44	3.54
8	8	8	1	1	35	20	10	10	65	10.25	6	3.23	3.54
9	9	9	1	1	20	5	8	60	65	10.25	6	3.42	3.59
10	10	10	1	1	35	5	8	60	65	10.25	6	3.04	3.59
11	11	11	1	1	20	20	8	60	65	10.25	6	3.41	3.56
12	12	12	1	1	35	20	8	60	65	10.25	6	3.04	3.56
13	13	13	1	1	20	5	10	60	65	10.25	6	3.42	3.71
14	14	14	1	1	35	5	10	60	65	10.25	6	3.23	3.71
15	15	15	1	1	20	20	10	60	65	10.25	6	3.49	3.67
16	16	16	1	1	35	20	10	60	65	10.25	6	3.22	3.67
17	17	17	1	1	20	5	8	10	100	10.25	6	3.65	3.56
18	18	18	1	1	35	5	8	10	100	10.25	6	3.13	3.56
19	19	19	1	1	20	20	8	10	100	10.25	6	3.65	3.53
20	20	20	1	1	35	20	8	10	100	10.25	6	3.09	3.53
21	21	21	1	1	20	5	10	10	100	10.25	6	3.60	3.67
22	22	22	1	1	35	5	10	10	100	10.25	6	3.38	3.67
23	23	23	1	1	20	20	10	10	100	10.25	6	3.59	3.63
24	24	24	1	1	35	20	10	10	100	10.25	6	3.38	3.63
25	25	25	1	1	20	5	8	60	100	10.25	6	3.65	3.67
26	26	26	1	1	35	5	8	60	100	10.25	6	3.16	3.67
27	27	27	1	1	20	20	8	60	100	10.25	6	3.65	3.63
28	28	28	1	1	35	20	8	60	100	10.25	6	3.18	3.63

ภาพที่ 4-27 การนำข้อมูลจาก Finite Element กรอกลงตารางการทดลองใน Minitab

หลังจากทำการทดลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ด้วยโปรแกรม Solid Work และกรอกผลลงไปในตารางการออกแบบการทดลองเสร็จสมบูรณ์แล้ว จากนั้นทำการกำหนดและวิเคราะห์ผลเพื่อหาสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขด้วยวิธี Factorial Regression ในโปรแกรม Minitab ดังภาพที่ 4-28 แสดงการกำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไข ดังภาพที่ 4-29 แสดงข้อมูลของสมการเป้าหมาย (Mass) และภาพที่ 4-30 แสดงข้อมูลของสมการเงื่อนไข (FOS)



ภาพที่ 4-28 กำหนดสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขด้วยวิธี Regression

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0028092	99.93%	99.91%	99.89%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	28	1.17197	0.041856	5303.98	0.000
Linear	7	1.16237	0.166053	21042.20	0.000
A	1	0.00000	0.000000	0.00	1.000
B	1	0.04278	0.042778	5420.84	0.000
C	1	0.42090	0.420903	53336.84	0.000
D	1	0.46803	0.468028	59308.52	0.000
E	1	0.22950	0.229503	29082.64	0.000
F	1	0.00003	0.000028	3.56	0.062
G	1	0.00113	0.001128	142.96	0.000
2-Way Interactions	21	0.00960	0.000457	57.91	0.000
A*B	1	0.00000	0.000000	0.00	1.000
A*C	1	0.00000	0.000000	0.00	1.000
A*D	1	0.00000	0.000000	0.00	1.000
A*E	1	0.00000	0.000000	0.00	1.000
A*F	1	0.00000	0.000000	0.00	1.000
A*G	1	0.00000	0.000000	0.00	1.000
B*C	1	0.00053	0.000528	66.92	0.000
B*D	1	0.00008	0.000078	9.90	0.002
B*E	1	0.00000	0.000003	0.40	0.531
B*F	1	0.00000	0.000003	0.40	0.531
B*G	1	0.00000	0.000003	0.40	0.531
C*D	1	0.00578	0.005778	732.20	0.000
C*E	1	0.00300	0.003003	380.56	0.000
C*F	1	0.00003	0.000028	3.56	0.062
C*G	1	0.00003	0.000028	3.56	0.062
D*E	1	0.00003	0.000028	3.56	0.062
D*F	1	0.00000	0.000003	0.40	0.531
D*G	1	0.00000	0.000003	0.40	0.531
E*F	1	0.00000	0.000003	0.40	0.531
E*G	1	0.00008	0.000078	9.90	0.002
F*G	1	0.00003	0.000028	3.56	0.062
Error	99	0.00078	0.000008		
Total	127	1.17275			

ภาพที่ 4-29 แสดงข้อมูลของสมการเป้าหมาย (Mass) รวมปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ

Factorial Regression: FOS v...

SUPER_REAL 7 FACTOR

Factorial Regression: FOS versus A, B, C, D, E, F, G

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0346743	99.21%	98.99%	98.68%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	28	14.9689	0.53460	444.65	0.000
Linear	7	14.1839	2.02628	1685.33	0.000
A	1	3.1689	3.16890	2635.69	0.000
B	1	0.0003	0.00031	0.26	0.611
C	1	1.0622	1.06215	883.43	0.000
D	1	0.0005	0.00053	0.44	0.509
E	1	0.3140	0.31403	261.19	0.000
F	1	0.0020	0.00195	1.62	0.205
G	1	9.6360	9.63605	8014.65	0.000
2-Way Interactions	21	0.7849	0.03738	31.09	0.000
A*B	1	0.0003	0.00025	0.21	0.647
A*C	1	0.2556	0.25561	212.60	0.000
A*D	1	0.0006	0.00061	0.51	0.477
A*E	1	0.1012	0.10125	84.21	0.000
A*F	1	0.0000	0.00001	0.01	0.919
A*G	1	0.0358	0.03578	29.76	0.000
B*C	1	0.0002	0.00015	0.13	0.722
B*D	1	0.0003	0.00025	0.21	0.647
B*E	1	0.0003	0.00025	0.21	0.647
B*F	1	0.0000	0.00000	0.00	0.959
B*G	1	0.0008	0.00080	0.67	0.417
C*D	1	0.0005	0.00045	0.37	0.542
C*E	1	0.0722	0.07220	60.05	0.000
C*F	1	0.0015	0.00151	1.26	0.265
C*G	1	0.1697	0.16965	141.11	0.000
D*E	1	0.0000	0.00001	0.01	0.919
D*F	1	0.0006	0.00061	0.51	0.477
D*G	1	0.0005	0.00053	0.44	0.509
E*F	1	0.0005	0.00045	0.37	0.542
E*G	1	0.1445	0.14445	120.15	0.000
F*G	1	0.0001	0.00008	0.06	0.799
Error	99	0.1190	0.00120		
Total	127	15.0879			

ภาพที่ 4-30 แสดงข้อมูลของสมการเงื่อนไข (FOS) รวมปัจจัยที่ไม่มีผลกระทบ

ในวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดความน่าเชื่อถือที่ 95 % หรือหมายความว่า P value < 0.05 ถือว่าปัจจัยนั้นมีนัยสำคัญหลังจากการวิเคราะห์ภาพที่ 4-29 และ 4-30 ภาพแสดงข้อมูลของแต่ละปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมจากสมการเป้าหมาย (Mass) และเงื่อนไข (FOS) นั้น ได้แสดงว่ามีปัจจัยที่ค่า P value > 0.05 ซึ่งบ่งบอกว่าปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมนั้นไม่มีนัยสำคัญสามารถตัดปัจจัยเหล่านั้นออกจากชุดข้อมูลการทดลองของเราเพื่อเพิ่มศักยภาพของสมการถดถอยให้มีศักยภาพมากขึ้นดังแสดงดังภาพที่ 4-31 และ 4-32

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0028354	99.92%	99.91%	99.90%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	1.17181	0.117181	14575.56	0.000
Linear	5	1.16234	0.232468	28915.64	0.000
B	1	0.04278	0.042778	5320.97	0.000
C	1	0.42090	0.420903	52354.20	0.000
D	1	0.46803	0.468028	58215.86	0.000
E	1	0.22950	0.229503	28546.83	0.000
G	1	0.00113	0.001128	140.32	0.000
2-Way Interactions	5	0.00947	0.001893	235.48	0.000
B*C	1	0.00053	0.000528	65.69	0.000
B*D	1	0.00008	0.000078	9.72	0.002
C*D	1	0.00578	0.005778	718.71	0.000
C*E	1	0.00300	0.003003	373.54	0.000
E*G	1	0.00008	0.000078	9.72	0.002
Error	117	0.00094	0.000008		
Total	127	1.17275			

ภาพที่ 4-31 แสดงข้อมูลสมการเป้าหมาย (Mass) หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0330509	99.15%	99.08%	98.99%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	14.9601	1.49601	1369.52	0.000
Linear	4	14.1811	3.54528	3245.52	0.000
A	1	3.1689	3.16890	2900.97	0.000
C	1	1.0622	1.06215	972.35	0.000
E	1	0.3140	0.31403	287.48	0.000
G	1	9.6361	9.63605	8821.30	0.000
2-Way Interactions	6	0.7789	0.12982	118.85	0.000
A*C	1	0.2556	0.25561	234.00	0.000
A*E	1	0.1012	0.10125	92.69	0.000
A*G	1	0.0358	0.03578	32.75	0.000
C*E	1	0.0722	0.07220	66.10	0.000
C*G	1	0.1697	0.16965	155.31	0.000
E*G	1	0.1445	0.14445	132.24	0.000
Error	117	0.1278	0.00109		
Total	127	15.0879			

ภาพที่ 4-32 แสดงข้อมูลสมการเงื่อนไข (FOS) หลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก

จากภาพที่ 4-31 และ 4-32 แสดงข้อมูลปัจจัยของสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) ที่ตัดปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่ไม่มีผลกระทบต่อการทดลอง นอกจากนั้นสมการเงื่อนไข(FOS)ยังมีค่า R-sq(adj) ที่บ่งบอกถึงความแปรปรวนของข้อมูลที่สูงโดยสมการเงื่อนไข (FOS) มีค่า R-sq(adj) ที่สูงขึ้นหลังจากปรับแก้เอาปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีค่า P value > 0.05 ออกจาก 98.99 % เป็น 99.08 %

เมื่อชุดข้อมูลและปัจจัยของชุดข้อมูลมีความเหมาะสมสามารถนำสมการถดถอย (Regression Equation) ของทั้งสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) ไปใช้หาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ด้วย Excel Solover ต่อไปได้ ดังภาพที่ 4-33 และ 4-34 แสดงสมการถดถอย (Regression equation) ของทั้ง 2 สมการ

Regression Equation in Uncoded Units

FOS = 5.061 - 0.06213 A - 0.2697 C + 0.00099 E + 0.00973 G + 0.005958 A*C - 0.000214 A*E
+ 0.000495 A*G + 0.001357 C*E + 0.008090 C*G - 0.000427 E*G

ภาพที่ 4-33 แสดงสมการถดถอยเพื่อเอาไปใช้หาค่าที่ดีที่สุดของสมการเงื่อนไข (FOS)

Regression Equation in Uncoded Units

MASS = 3.0910 + 0.000146 B + 0.02849 C + 0.000052 D + 0.000033 E + 0.001478 G - 0.000271 B*C
- 0.000004 B*D + 0.000269 C*D + 0.000277 C*E - 0.000010 E*G

ภาพที่ 4-34 แสดงสมการถดถอยเพื่อเอาไปใช้หาค่าที่ดีที่สุดของสมการเป้าหมาย (Mass)

4.2.6 การวิเคราะห์หารูปร่างที่เหมาะสมด้วย Excel Solver

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะนำ Microsoft Excel มาใช้ในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยใช้การSolver ของโปรแกรมด้วยวิธี GRG Nonlinear

ทางผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการช่วยหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยใช้การ Solver ของโปรแกรมด้วยวิธี GRG Nonlinear โดยจะตั้งเป้าหมาย (Mass) ให้มีค่าน้อยที่สุด โดยเงื่อนไข (FOS) มีค่ามากกว่าหรือเทียบเท่า 3.5 เท่า โดยจะมีข้อกำหนดของแต่ละเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- เป้าหมาย (Objective) : น้ำหนักที่น้อยที่สุด (Minimize Mass)
- เงื่อนไข (Constraints) : ค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor Of Safety) => 3.5

โดยการกำหนดและตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อหาผลลัพธ์จากสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขที่ได้มาจากโปรแกรม Minitab มาใช้ในโปรแกรม Microsoft Excel ดังภาพที่ 4-35 4-36 และ 4-37

D1 >= 20 และ D1 < =35

D2 >= 5 และ D2<= 20

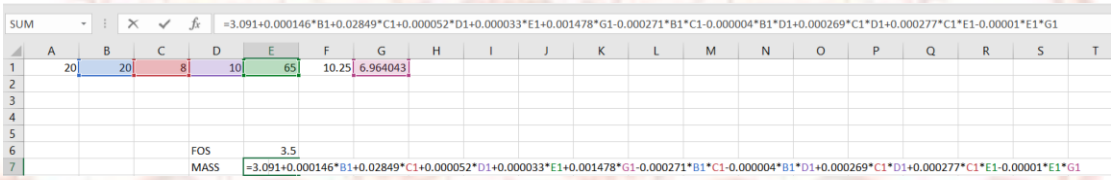
D3 >= 8 และ D3<= 10

D4 >= 10 และ D4<= 60

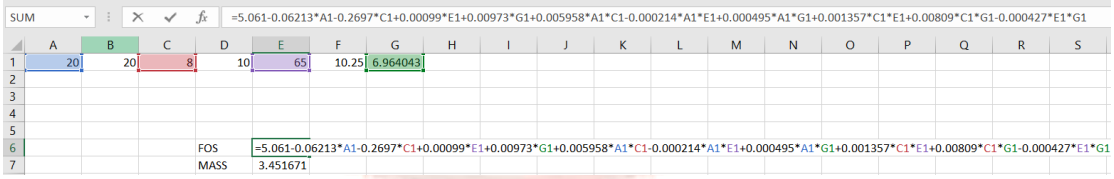
D5 >= 65 และ D5<= 100

D6 >= 10.25 และ D6<= 12

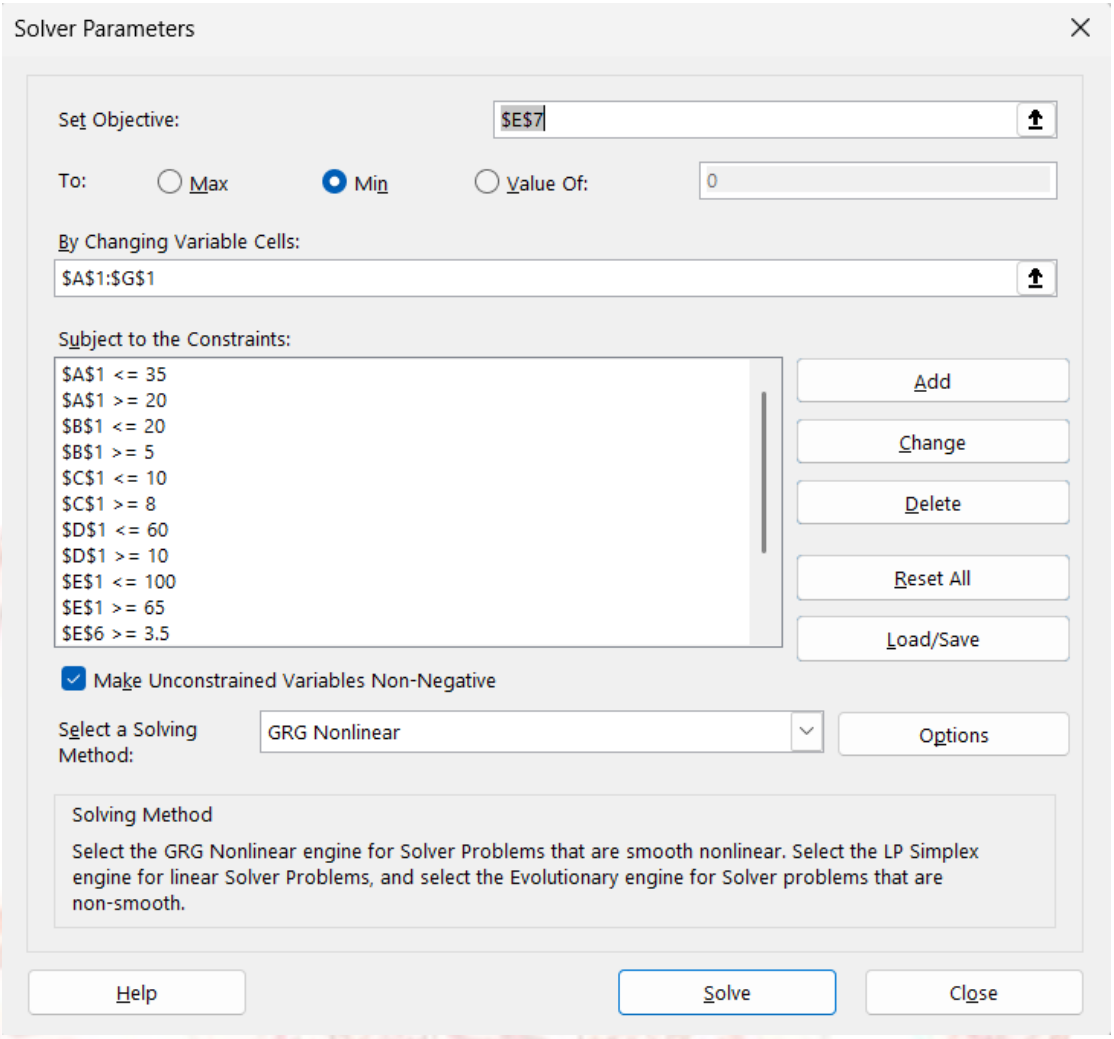
D7 >= 6 และ D7<= 15



ภาพที่ 4-35 แสดงการกำหนดสมการเป้าหมาย (Mass) ใน Excel Solver



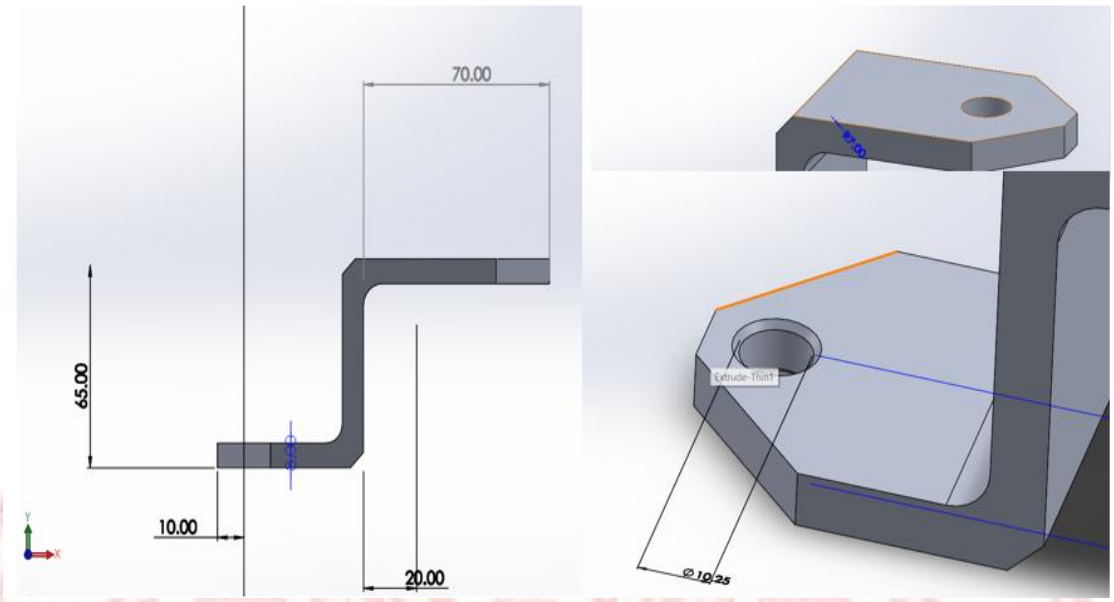
ภาพที่ 4-36 แสดงการกำหนดสมการเงื่อนไข (FOS) ใน Excel Solver



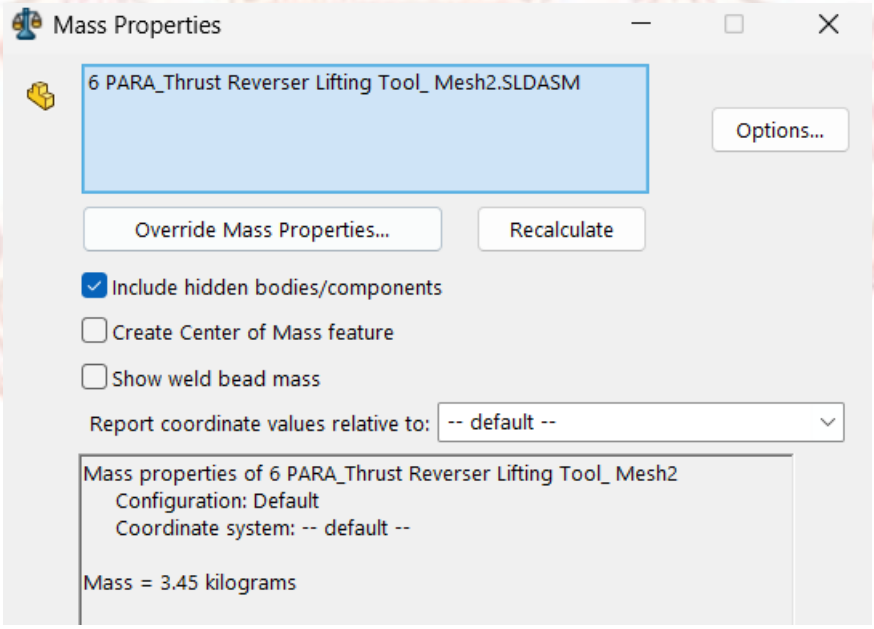
ภาพที่ 4-37 ตั้งค่า Solver จาก Microsoft Excel

4.2.6.1 การวิเคราะห์หารูปร่างที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

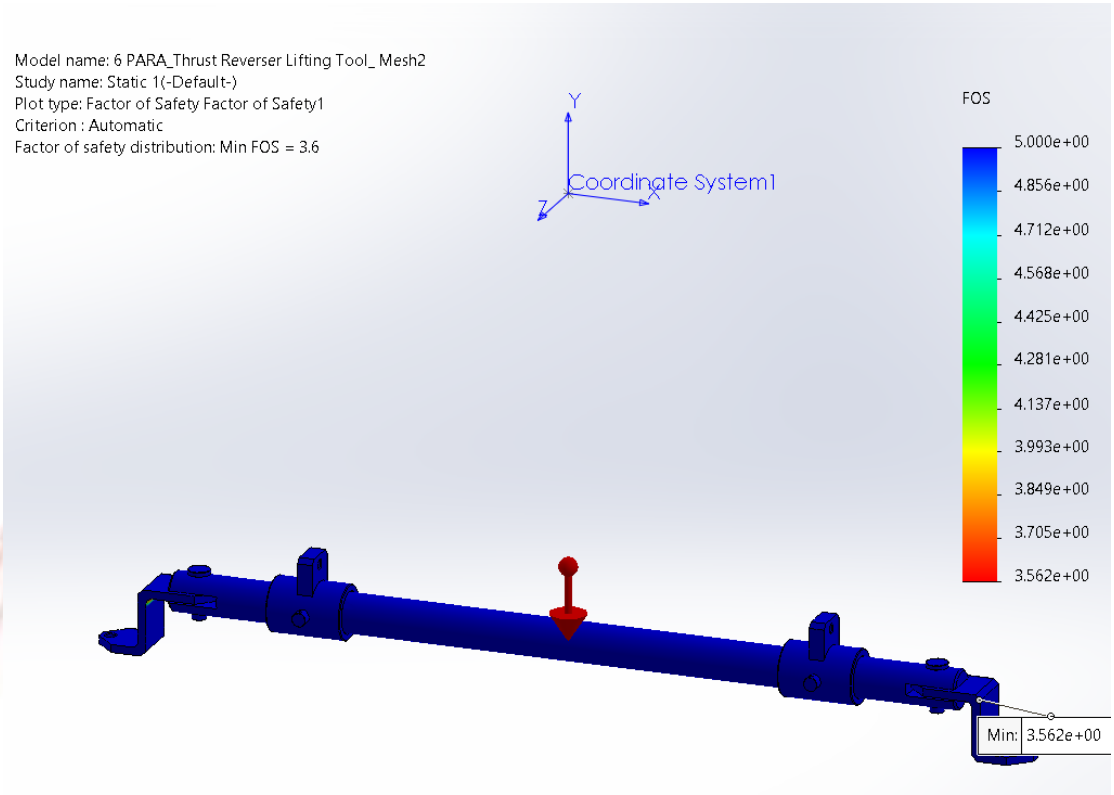
ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ Solver ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel นั้นซึ่ง Solver นี้ทำงานด้วยวิธี GRG Nonlinear เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีเป้าหมาย (Minimize Mass) ได้ผลลัพธ์ออกมาที่ 3.45 kg และเงื่อนไข (FOS) เกินกว่าค่ามาตรฐานตามกฎหมายกำหนด คือ 3.5 เท่า จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Solver ไปทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method Analysis) เพื่อตรวจสอบค่าทั้ง 2 อีกครั้งเพื่อนำมาเปรียบเทียบและสรุปผลดังภาพที่ 4-38 4-39 และ4-40



ภาพที่ 4-38 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ CAD Model ตามการคำนวณของ Excel Solver



ภาพที่ 4-39 ค่า Mass ที่ได้หลังการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver



ภาพที่ 4-40 ค่า FOS ที่ได้หลังจากการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver

4.2.6.2 เปรียบเทียบผลการปรับปรุงรูปร่าง

หลังจากได้ทราบผลลัพธ์ของค่าเป้าหมาย (Mass) และเงื่อนไขจากการใช้โปรแกรมทั้ง 2 ค่า แล้ว ผู้วิจัยได้นำค่าทั้ง 2 จากทั้ง 2 โปรแกรมออกมาเพื่อเปรียบเทียบดูค่า % ความผิดพลาด

ตารางที่ 4-7 แสดงผลลัพธ์จาก Slover ด้วยวิธี GRG Nonlinear

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	Mass
Optimal	20	20	8	10	65	10.25	7	3.5	3.45

ตารางที่ 4-8 แสดงผลลัพธ์จาก SolidWorks ด้วยวิธี FEA

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	Mass
Optimal	20	20	8	10	65	10.25	7	3.56	3.45

จากตารางที่ 4-7 และ 4-8 เป็นการนำพารามิเตอร์ที่ได้จาก Solver นั้นมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ด้วยโปรแกรม Solidworks โดยมีเป้าหมาย (Minimize Mass) น้อยที่สุด และเงื่อนไข (FOS) => 3.5 ผลลัพธ์ที่ออกมาของสมการเป้าหมาย (Mass) มีค่าเท่ากันที่เลขนัยสำคัญที่2ทศนิยม ส่วนสมการเงื่อนไข (FOS) มีค่าไม่ตรงกันเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องมีการเปรียบเทียบหาค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดของข้อมูลดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 เปรียบเทียบเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนผลลัพธ์ FOS ระหว่างโปรแกรม

	FOS		Error Value
	Excel	Solid	
Optimize	3.5	3.56	1.69%

จากตารางที่ 4-9 นำข้อมูลจาก Excel Solver และ SolidWorks มาเปรียบเทียบดูเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะสมการเงื่อนไข (FOS) ได้ข้อสรุปว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของเงื่อนไข (FOS) ระหว่าง Excel Solver และโปรแกรม SolidWorks คือ 1.69 %

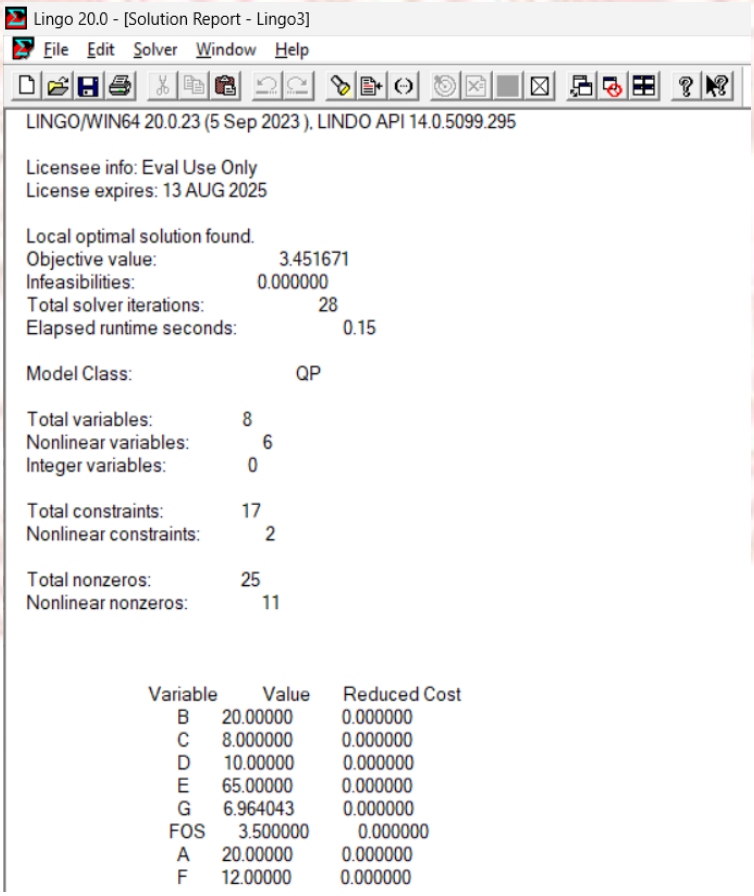
4.2.7 การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เหมาะสมด้วย Lingo

หลังจากได้ค่า Optimization จาก Excel Solver แล้ว ผู้วิจัยต้องการหาค่า Optimization จากโปรแกรม Lingo ซึ่งโปรแกรม Lingo เป็นโปรแกรมรูปแบบการเขียนโค้ด (Syntax) สามารถใช้หาค่า Optimization ได้เช่นกัน เพื่อเปรียบเทียบการหาค่าของแต่ละปัจจัย ซึ่งผู้วิจัยได้เขียนโค้ด (Syntax) จากสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) ที่โปรแกรม Minitab คำนวณได้เช่นเดียวกับโปรแกรม Excel Solver ดังภาพที่ 4-41 โดยผู้วิจัยได้เขียนอธิบายการเขียนโค้ดต่าง ๆ ในภาพ



ภาพที่ 4-41 แสดงโค้ด (Syntax) ที่เขียนในโปรแกรม Lingo

หลังจากเขียนโค้ดเสร็จเรียบร้อยทำการ Solver เพื่อให้โปรแกรมหาค่า Optimization ของแต่ละปัจจัยสมการเป้าหมาย (Mass) และสมการเงื่อนไข (FOS) ดังแสดงในภาพที่ 4-42 และตารางที่ 4-10



ภาพที่ 4-42 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการ Solver ของโปรแกรม Lingo

ตารางที่ 4-10 แสดงค่าปัจจัย 7 ปัจจัย ค่า FOS และ ค่า Mass ที่ได้จาก Lingo

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	Mass
20	20	8	10	65	12	7	3.5	3.45

หลังจากได้ผลลัพธ์จากโปรแกรม Lingo ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการรันกับค่าที่ Excel Solver คำนวณได้ พบว่ามีค่าที่มีผลคลาดเคลื่อนกันดังตารางที่ 4-11

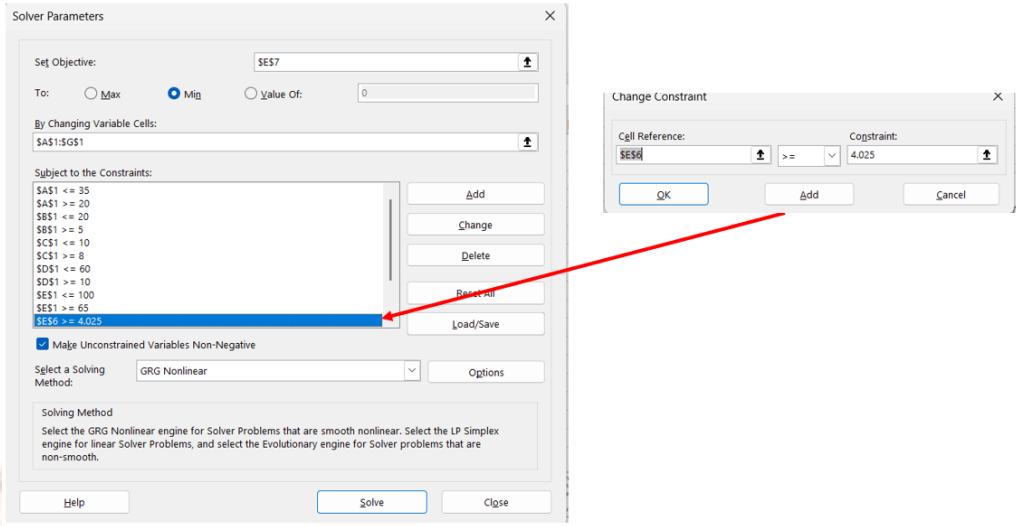
ตารางที่ 4-11 แสดงค่าที่แตกต่างระหว่างโปรแกรม Excel และ Lingo

	D6
Excel	10.25
Lingo	12

จากตารางที่ 4-11 ทั้ง 2 โปรแกรมใช้ปัจจัยที่ 6 ที่คนละขนาดแต่เมื่อดูที่สมการถดถอยแล้ว ค่า D6 ไม่ได้เอาไปใช้ในการหาค่า Optimization ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูล

4.2.8 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าดัชนีความปลอดภัยใหม่

ทางโรงงานที่ผู้จัดทำได้ใช้ในการทำวิจัยนั้น ได้เพิ่มค่าความปลอดภัยอีก 15 เปอร์เซนต์เพื่อศักยภาพที่สูงขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยเปลี่ยนขอบเขตของดัชนีความปลอดภัยจาก 3.5เป็น 4.025 เท่าใน Excel Solver เป็นไปตามรายละเอียดดังภาพที่ 4-43 และ ผลลัพธ์ที่ได้จาก Excel Solver เป็นไปดังตารางที่ 4-12

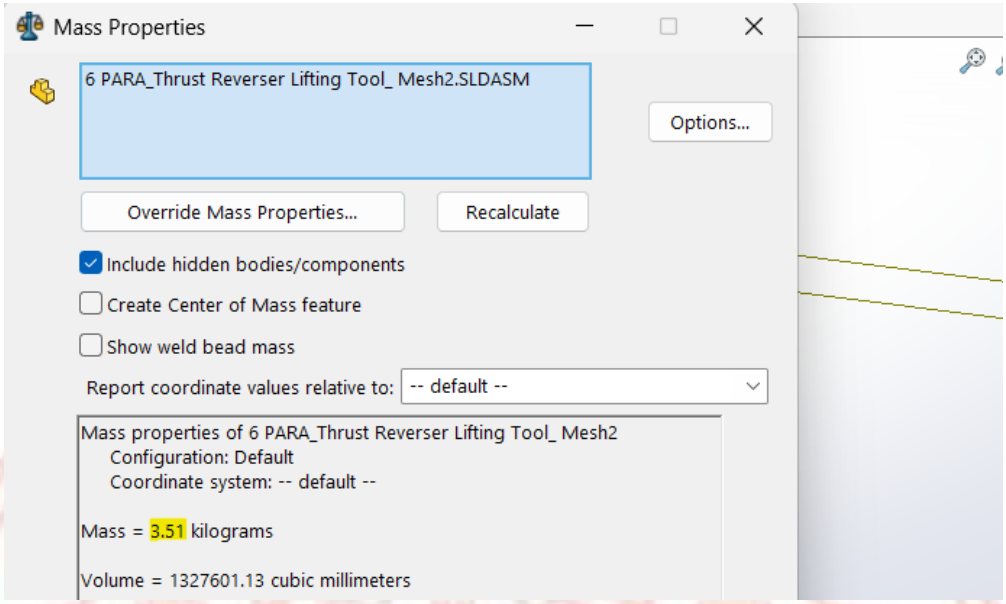


ภาพที่ 4-43 แสดงการเปลี่ยนขอบเขตของค่าดัชนีความปลอดภัย

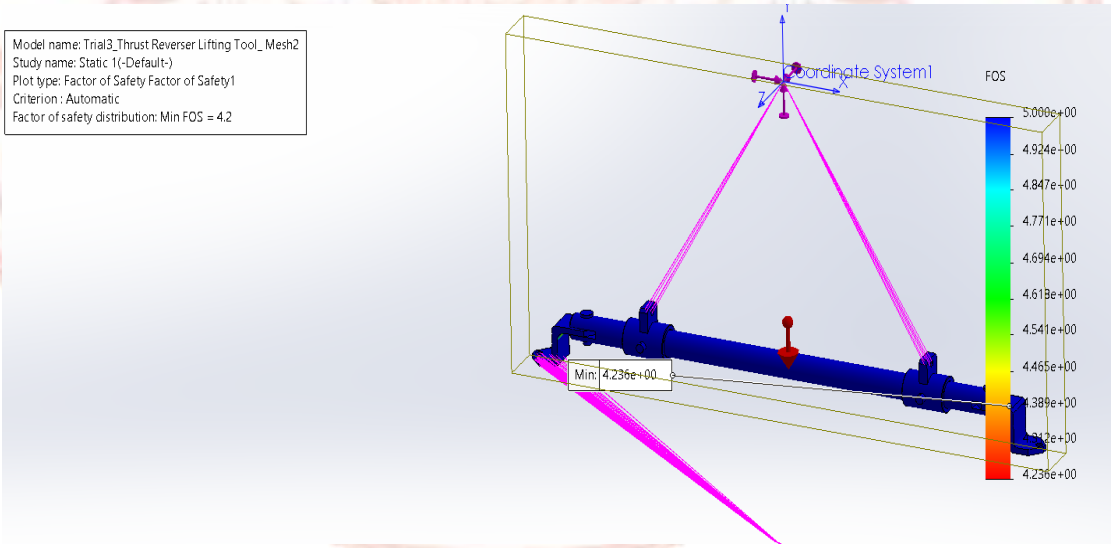
ตารางที่ 4-12 แสดงตารางพารามิเตอร์ที่ FOS ไม่ต่ำกว่า 4.025 จาก Excel Solver

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	Mass
20	20	9.19	10	65	10.25	15	4.025	3.51

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จาก Excel Solver ไปจำลองใน Solidwork ได้ค่าน้ำหนักและค่า FOS เป็นไปตามภาพที่ 4-44 และ 4-45 จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของทั้ง 2 โปรแกรมเป็นไปดังตารางที่ 4-13



ภาพที่ 4-44 ค่า Mass ที่ได้หลังการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver



ภาพที่ 4-45 ค่า FOS ที่ได้หลังการปรับพารามิเตอร์ตาม Excel Solver

ตารางที่ 4-13 เปรียบเทียบเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนผลลัพธ์ FOS ที่ 4.025ระหว่างโปรแกรม

	Mass (mm)		Error Value	FOS		Error Value
	Excel	Solid		Excel	Solid	
Optimize	3.51	3.51	0%	4.025	4.236	4.98%

เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย Excel Solver เสร็จแล้วผู้วิจัยได้นำสมการถดถอยไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Lingo เพิ่มเติมเพื่อนำมาเปรียบเทียบการหา Optimization ระหว่างโปรแกรม Excel Solver และ Lingo โดยใช้ชุดคำสั่งเดิมแต่เปลี่ยนขอบเขตจาก 3.5 เป็น 4.025 ดังภาพที่ 4-46 และ 4-47 โดยผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามสรุปในตารางที่ 4-14

```
MODEL:

! ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Minimize MASS);
MIN = 3.091+0.000146*B+0.02849*C+0.000052*D+0.000033*E+0.001478*G-0.000271*B*C-0.000004*B*D+0.000269*C*D+0.000277*C*E-0.00001*E*G;

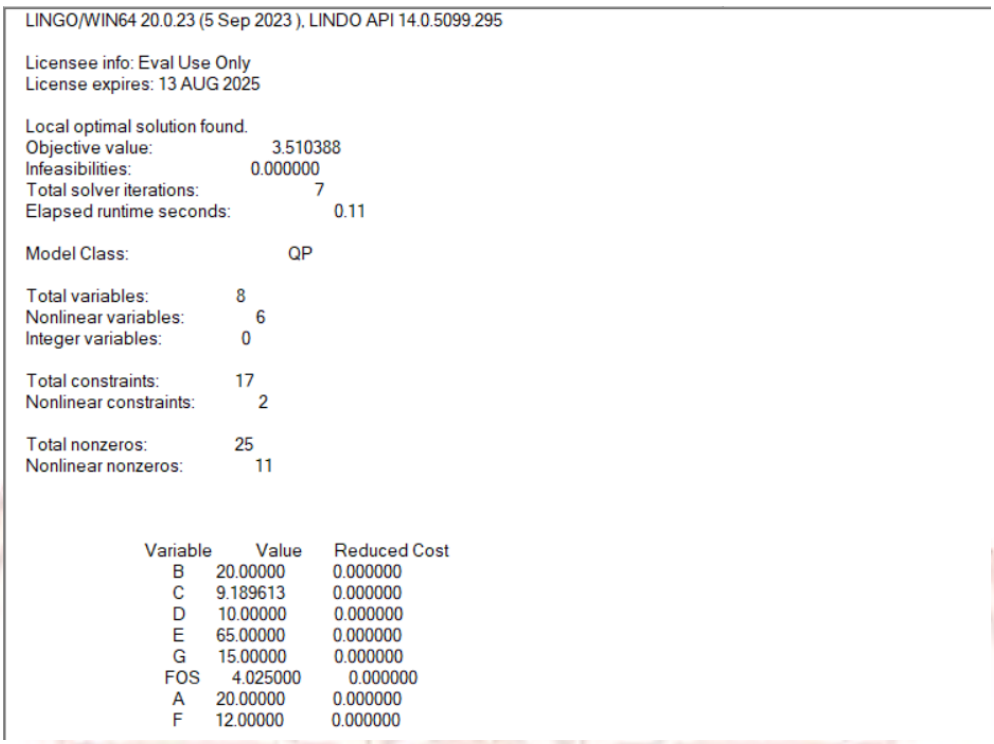
! คำนวณค่า FOS;
FOS = 5.061-0.06213*A-0.2697*C+0.00099*E+0.00973*G+0.005958*A*C-0.000214*A*E+0.000495*A*G+0.001357*C*E+0.00809*C*G-0.000427*E*G;

! บังคับให้ FOS >= 4.025;
FOS >= 4.025;

! บังคับขอบเขตของตัวแปร A - F;
A >= 20;  A <= 35;
B >= 5; B <= 20;
C >= 8;  C <= 10;
D >= 10;  D <= 60;
E >= 65; E <= 100;
F >= 10.25; F <= 12;
G >= 6;   G <= 15;

END
```

ภาพที่ 4-46 แสดงโค้ด (Syntax) ที่เขียนในโปรแกรม Lingo



```
LINGO/WIN64 20.0.23 (5 Sep 2023 ), LINDO API 14.0.5099.295

Licensee info: Eval Use Only
License expires: 13 AUG 2025

Local optimal solution found.
Objective value:                              3.510388
Infeasibilities:                              0.000000
Total solver iterations:                             7
Elapsed runtime seconds:                          0.11

Model Class:                                        QP

Total variables:                     8
Nonlinear variables:                 6
Integer variables:                   0

Total constraints:                  17
Nonlinear constraints:               2

Total nonzeros:                     25
Nonlinear nonzeros:                 11


                     Variable           Value        Reduced Cost
                            B        20.00000            0.000000
                            C        9.189613            0.000000
                            D        10.00000            0.000000
                            E        65.00000            0.000000
                            G        15.00000            0.000000
                          FOS        4.025000            0.000000
                            A        20.00000            0.000000
                            F        12.00000            0.000000
```

ภาพที่ 4-47 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการ Solver ของโปรแกรม Lingo

ตารางที่ 4-14 แสดงค่าปัจจัย 7 ปัจจัย ค่า FOS และ ค่า Mass ที่ได้จาก Lingo ที่ FOS 4.025

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	Mass
20	20	9.19	10	65	12	15	4.025	3.51

หลังจากได้ผลลัพธ์จากโปรแกรม Lingo ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการรันกับค่าที่ Excel Solver คำนวณได้ พบว่ามีค่าที่มีผลคลาดเคลื่อนกันดังตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 แสดงค่าที่แตกต่างระหว่างโปรแกรม Excel และ Lingo

	D6
Excel	10.25
Lingo	12

จากตารางที่ 4-15 ทั้ง 2 โปรแกรม ใช้ปัจจัยที่ 6 ที่คนละขนาด แต่เมื่อดูที่สมการถดถอยแล้ว ค่า D6 ไม่ได้เอาไปใช้ในการหาค่า Optimization ดังนั้นจึงไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูล

4.3 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างโปรแกรมการหา Optimization

หลังจากผู้วิจัยได้ทำการทดลองรูปแบบทั้ง 6 ปัจจัย และ 7 ปัจจัย โดยออกแบบการทดลอง (DOE) ด้วยโปรแกรม Minitab ทำการจำลอง (Simulation) ด้วยโปรแกรม Solid Work วิธี Finite Element Method และหาค่า Optimization ด้วยโปรแกรม Excel Solver และ Lingo ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนค่าน้ำหนัก (Mass) และค่าดัชนีความปลอดภัย (FOS) ของทั้ง 2 รูปแบบ ดังตาราง ที่ 4-16 4-17 และ 4-18

ตาราง ที่ 4-16 แสดงค่า Optimization ของโปรแกรม Excel Solver และ Lingo แบบ 6 ปัจจัย

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	FOS	Mass
Excel	5	10	10	100	50	10.25	3.49	3.67
Lingo	8.34	10	10	100	50	10.25	3.49	3.66
%Error	40%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.27%

ตาราง ที่ 4-17 แสดงค่า Optimization ของโปรแกรม Excel Solver และ Lingo แบบ 7 ปัจจัย ที่ FOS 3.5

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	Mass
Excel	20	20	8	10	65	10.25	7	3.5	3.45
Lingo	20	20	8	10	65	12	7	3.5	3.46
%Error	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0.29%

ตาราง ที่ 4-18 แสดงค่า Optimization ของโปรแกรม Excel Solver และ Lingo แบบ 7 ปัจจัย ที่ FOS 4.025

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	Mass
Excel	20	20	9.19	10	65	10.25	15	4.025	3.51
Lingo	20	20	9.19	10	65	12	15	4.025	3.51
%Error	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

4.4 ผลิตชิ้นงานจริงและนำชิ้นงานจริงไปทดสอบ

จากข้อมูลทั้งหมดที่ผ่านมา ผู้วิจัยสามารถสร้างชิ้นงานได้ตามวัตถุประสงค์ โดยได้ค่าดัชนีความปลอดภัย (Safety Factor) ที่ไม่ต่ำกว่ามาตรฐานที่กฎหมายและบริษัทกำหนด ภายใต้การออกแบบที่มีน้ำหนักของชิ้นงานน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการวิจัย การทดสอบกับชิ้นงานจริงจึงมีความจำเป็น ผู้วิจัยจึงได้ผลิตชิ้นงานจริงขึ้นเพื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Simulation) ในโปรแกรม SolidWorks

อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการลดต้นทุนการวิจัย ผู้วิจัยได้เลือกผลิตและทดสอบเฉพาะชิ้นงานที่มีค่า Safety Factor ต่ำที่สุดจากองค์ประกอบทั้งหมดของชิ้นงาน ได้แก่ ชิ้นส่วนฟิกเจอร์ยึดชิ้นงาน (Angle Support) พร้อมทั้งกำหนดขั้นตอนการจำลอง (Simulation) และการทดสอบจริงในชิ้นส่วน Angle Support ดังกล่าว เพื่อให้สามารถดำเนินการทดลองได้อย่างถูกต้อง สามารถชี้วัดการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.4.1 การผลิตชิ้นงานและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ผู้วิจัยได้ผลิตชิ้นงาน 2 ชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง โดยชิ้นงานแรกเป็นขนาดชิ้นงานตามต้นแบบก่อนการพัฒนา และชิ้นงานที่ 2 เป็นชิ้นงานหลังการพัฒนาโดยรายละเอียดของชิ้นงานเป็นไปตามเงื่อนไขการหา Optimization แบบ 7 ปัจจัย ที่ค่าดัชนีความปลอดภัยมากกว่า 4.025 โดยผู้วิจัยได้ผลิตชิ้นงานทั้ง2ชิ้นด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC แบบ 3 แกน โดยรูปภาพของชิ้นงานทั้ง 2 รูปแบบ เป็นไปดัง ภาพที่ 4-48 นอกจากนั้นผู้วิจัยได้เปลี่ยน Material ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานเป็น วัสดุเหล็ก SS400 เนื่องจากการวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การปรับเปลี่ยนขนาดรูปร่าง เพื่อพัฒนาความแข็งแรงให้มากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวัสดุที่หาง่ายและมีราคาที่ถูกมาใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 4-48 แสดงชิ้นงานด้วยวัสดุ SS400 เพื่อใช้ในการทดลอง

4.4.2 แนวคิดและทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง

ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นงาน แนวคิดแรกเริ่มจะใช้ Factor of Safety (FOS) เป็นตัวชี้วัด โดยทั่วไป FOS คำนวณจากอัตราส่วนระหว่าง ค่าความเค้นที่วัสดุสามารถรับได้ (เช่น Yield strength) ต่อกับ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริง (Applied stress) ดังสมการ

$$FOS = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{applied}}$$

ซึ่งจากสมการจะเห็นว่า ตัวแปรสำคัญในการหาค่า FOS คือ ค่า Yield strength ของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุโดยตรง ดังนั้นหากทำการทดสอบโดยใช้วัสดุที่ต่างชนิดกัน จะไม่สามารถเปรียบเทียบค่า FOS ระหว่างชิ้นงานได้ เนื่องจากผลจะถูกผลกระทบจากสมบัติของวัสดุ มากกว่ารูปร่างหรือลักษณะการออกแบบของชิ้นงาน

เพื่อให้การเปรียบเทียบเน้นไปที่ ผลของการออกแบบ (Geometry/Shape effect) ในการทดลองครั้งนี้จึงเลือกใช้วิธีการวัดค่า Strain ที่ตำแหน่งเดียวกันของชิ้นงานแต่ละแบบแล้วนำมาแปลงเป็น Stress ผ่านความสัมพันธ์เชิงเส้น (Hooke's Law)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

โดย ε ได้จากการวัดการยืดตัว (displacement) ของ extensometer และ E คือค่าคงที่โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุโดยจะใช้ค่าEประมาณตามมาตรฐานของ SS400ทั่วไป ดังนั้นค่าความเค้น (Stress) ที่คำนวณได้จากการทดลองจึงถูกใช้เป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบความแข็งแรงของชิ้นงานทั้ง 2 รูปแบบแทนการใช้ FOS โดยตรง

การเลือกใช้ Stress แทน FOS มีเหตุผลดังนี้:

- ตัดอิทธิพลของวัสดุออกไป ⟶ ทำให้เปรียบเทียบได้ว่า "รูปทรง/การออกแบบ" แบบใดให้การต้านทานต่อการเสียรูปได้ดีกว่า
- Stress มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดและรูปทรงของชิ้นงาน จึงสะท้อนผลของการออกแบบได้ชัดเจน
- วัดที่ตำแหน่งเดียวกันของชิ้นงาน ทำให้สามารถเปรียบเทียบระหว่าง แบบเดิม และแบบที่ออกแบบใหม่ได้

4.4.2.1 การกำหนด Boundary สำหรับชิ้นงานในการทดสอบ

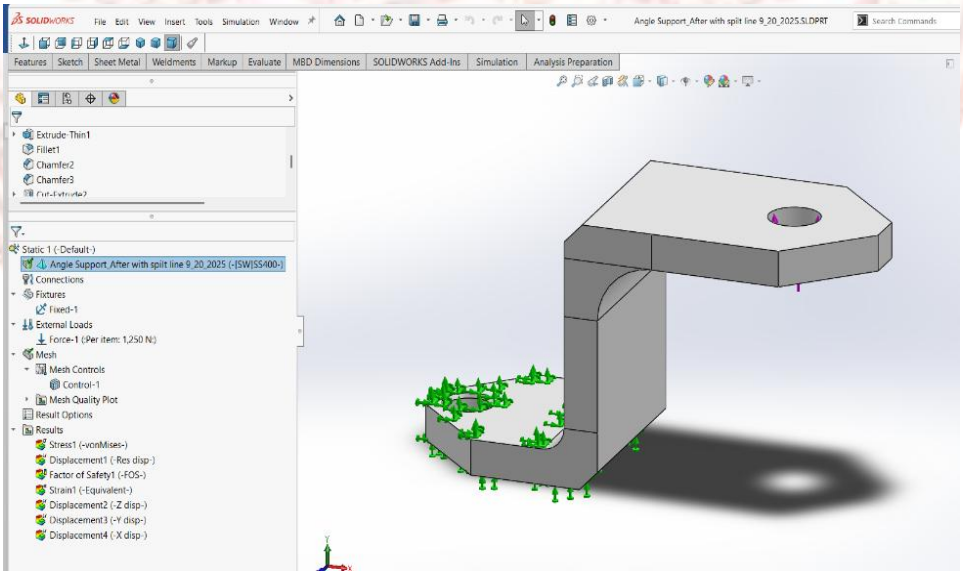
เนื่องจากการทดสอบชิ้นงานมุ่งศึกษาชิ้นส่วนฟิกเจอร์ Angle Support เท่านั้น จึงต้องกำหนดขอบเขต (Boundary Condition) ของชิ้นงานในโปรแกรม SolidWorks ให้สอดคล้องกับสภาวะการทดสอบจริง โดยการ Fixed ฐานของชิ้นงานและดึงชิ้นงานด้านบนดังภาพที่ 4-49

แรงที่ใช้ในการทดสอบของชิ้นงานคือ 1,250 Nเป็นค่าประมาณ ซึ่งได้มาจากการยกน้ำหนักรวมประมาณ250 Kg แล้วหารสอง เนื่องจากคานยกมีลักษณะสมมาตร ทำให้แรงในแนวดิ่งที่ถ่ายมา

ที่ปลายคานแต่ละข้างมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของน้ำหนักรวม ทั้งนี้การคำนวณดังกล่าวพิจารณาภายใต้สภาวะสถิตย์ (Static Equilibrium) กล่าวคือเป็นช่วงที่วัตถุถูกยกขึ้นจากพื้นและอยู่ในสมดุลโดยไม่หมุนหรือเคลื่อนที่ นอกจากนั้นMesh ที่ใช้ในการทดสอบนี้จะใช้ค่าMeshรายละเอียดเดียวกันกับที่จำลองในบทที่3

ในการยกจริง แรงจะมากระทำที่สลิงซึ่งยึดกับชิ้นส่วนโครงสร้างหลักของชุดยก (Assembly) ไม่ได้มากระทำที่ Angle Support โดยตรง แต่เมื่อแรงดังกล่าวถูกถ่ายผ่านคานและพินแล้วจะถูกส่งต่อมายัง Angle Support ในลักษณะเป็นแรงแนวดิ่ง เนื่องจากแรงด้านข้างที่เกิดจากมุมเอียงของสลิงมีค่าเท่ากันและทิศตรงข้ามกันทั้ง 2 ฝั่ง จึงหักล้างกันในภาพรวมของคาน

ดังนั้นจึงสามารถแทนการจำลองด้วยแรงตรงในแนวแกน Y ขนาดประมาณ 1,250 N บน Angle Support ได้อย่างเหมาะสมเพื่อใช้ในการประเมินพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของชิ้นงาน ในการวิเคราะห์นี้ค่าแรง 1,250 N ถูกกำหนดให้เป็น**ค่าอ้างอิงสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานภายใต้สภาวะสมดุลนิ่ง** ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานต้นแบบและชิ้นงานที่ได้รับการพัฒนา หากชิ้นงานสามารถรับแรงดังกล่าวได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ก็สามารถสรุปได้ว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงและความปลอดภัยเพียงพอสำหรับการใช้งานจริง



ภาพที่ 4-49 แสดงการกำหนด Boundary สำหรับชิ้นงานทดสอบ

4.4.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้มีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการจำลองให้เสมือนการ Simulation ในโปรแกรมรวมไปถึงเครื่องมือวัดที่ใช้ในการหาค่าการยืดหรือหดตัวของชิ้นงานดังต่อไปนี้

- เครื่อง Tensile Load ดังภาพที่ 4-50 ใช้ในการดึงชิ้นงานด้านบนในแนวดิ่ง โดยแรงดึงสูงสุดที่เครื่องสามารถดึงได้คือ 50kN
- Extensometer Gage Range 25 mm ดังภาพที่ 4-51 ใช้ในการวัดระยะยืดหรือหดของชิ้นงาน
- Jig fixture & Pin ดังภาพ ที่ 4-52 เพื่อใช้ในการยึดและดึงชิ้นงานตามการ simulation



ภาพที่ 4-50 เครื่อง Tensile Load Test



ภาพที่ 4-51 Extensometer Gauge Range 25 mm

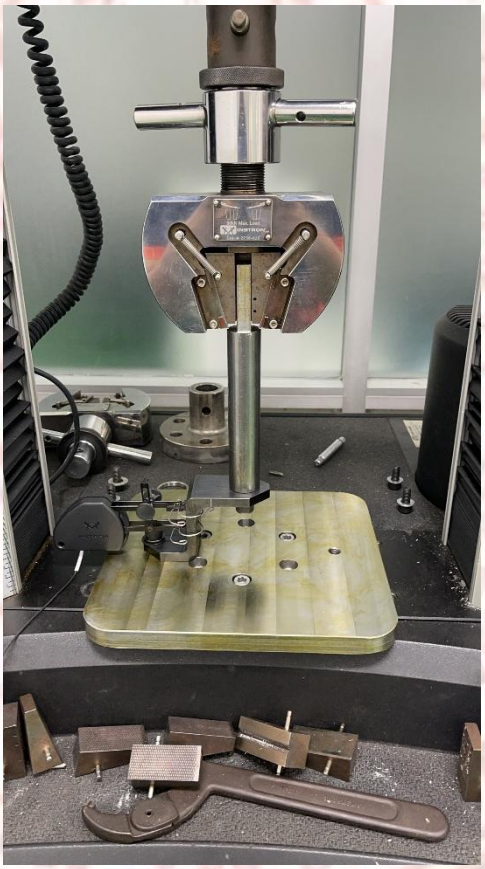


ภาพที่ 4-52 แสดงอุปกรณ์ใช้ในการยึดและดึงชิ้นงาน

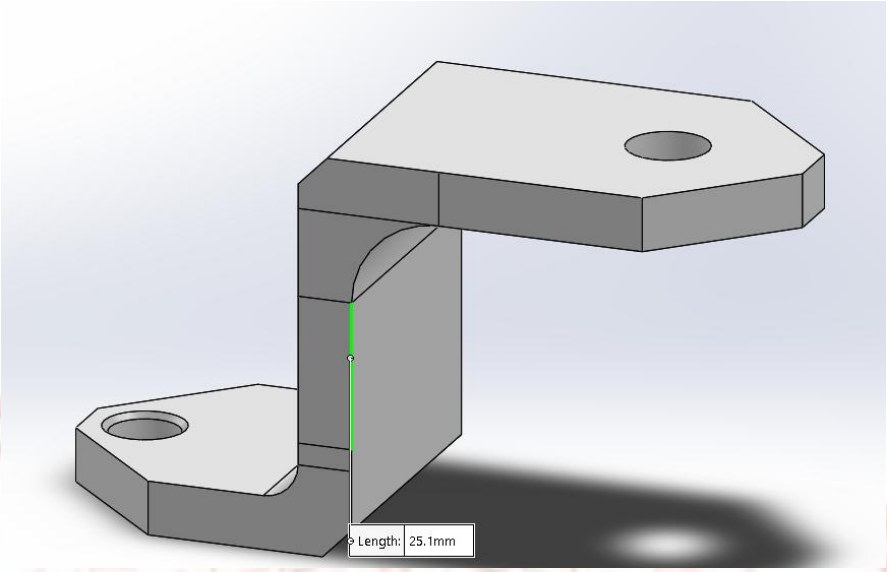
4.4.3 วิธีการทดลอง

- ติดตั้งอุปกรณ์ ดังภาพที่ 4-53 โดยเปลี่ยน Fixture ให้สามารถจับยึดชิ้นงาน มี Pin เสียบอยู่ด้านบนเพื่อให้ Load cell สามารถจับและดึงตาม Load ที่ต้องการได้

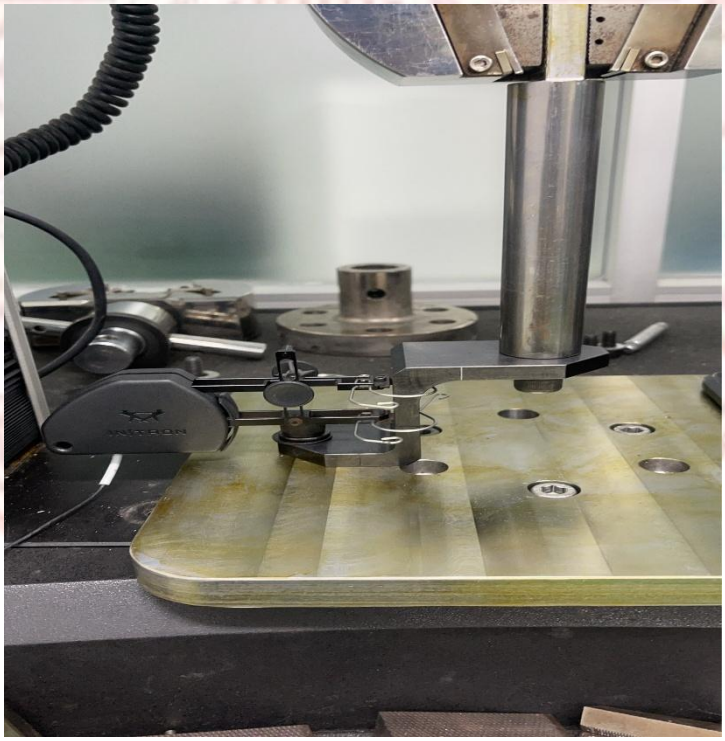
- ตั้งค่าระยะที่ให้ความสนใจในโปรแกรม Solidwork โดยจะวัดระยะในแนวแกน Y ตามภาพที่ 4-54 โดยมีความยาว Lo เท่ากับความยาว Gauge range ของเครื่อง Extensometer ที่ 25 มิลลิเมตร
- ติดตั้งอุปกรณ์เพื่อให้ทราบความยาวที่เปลี่ยนไปนำไปสู่การหา Strain และ stress ของระยะตามแกนที่สนใจตรงตำแหน่งเดียวกับที่ระบุในโปรแกรม Solidwork โดยการวัดระยะในแนวแกน Y จะใช้อุปกรณ์ Extensometer ในการวัดระยะที่เปลี่ยนไป ดังภาพที่ 4-55
- Setup ค่าเริ่มต้นให้กับชุดการทดลองโดยการควบคุมผ่านจอ monitor ดังภาพที่ 4-56



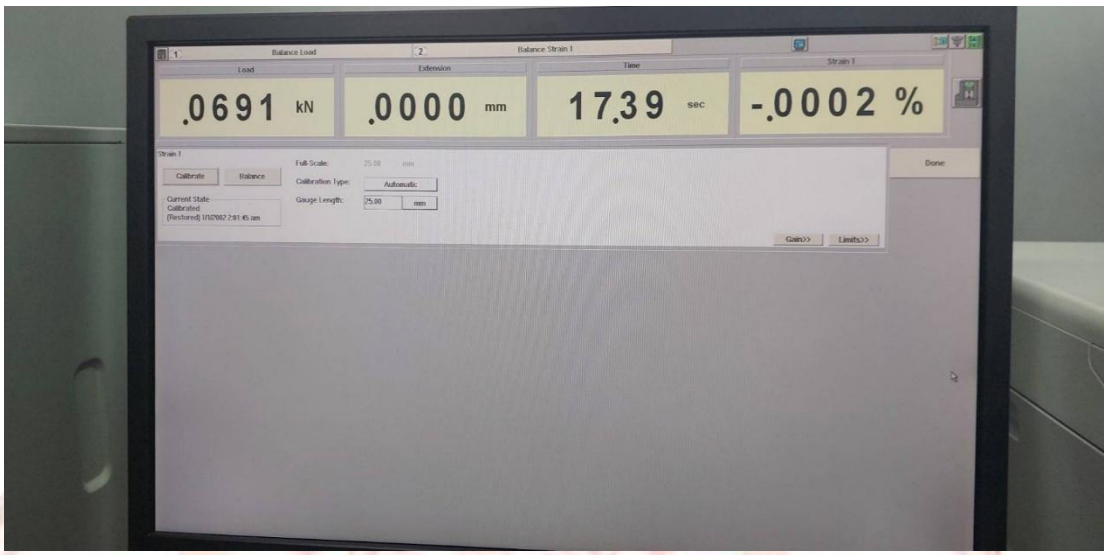
ภาพที่ 4-53 แสดงการยึดและการดึงชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Tensile Test



ภาพที่ 4-54 แสดงตำแหน่งการวัดระยะยืดของชิ้นงานเพื่อติดตั้ง Extensometer



ภาพที่ 4-55 แสดงการติดตั้ง Extensometer กับชิ้นงาน



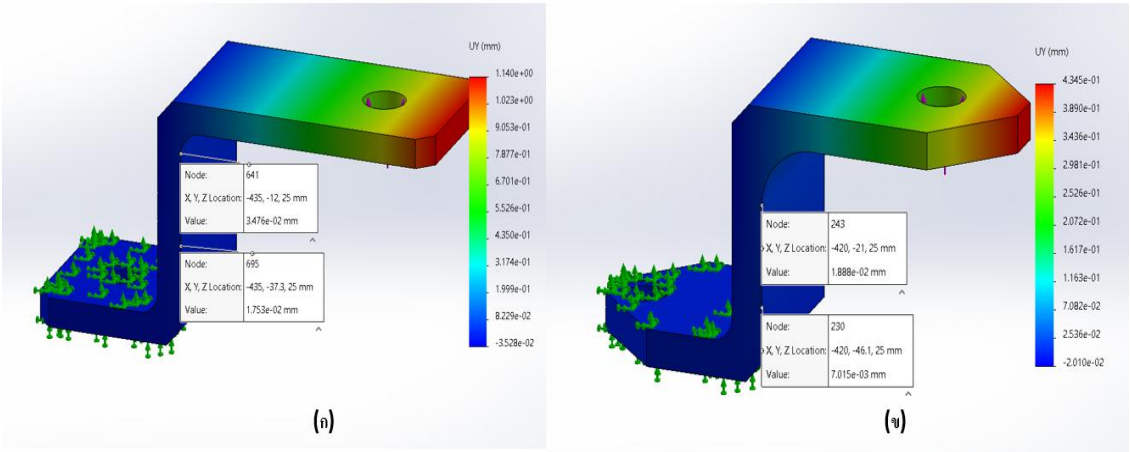
ภาพที่ 4-56 แสดงจอปรับตั้งก่อนการทดลอง

4.4.4 ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลองโดยการดึงชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้นที่ Load 1,250 N สามารถหาค่า Stress และ Strain ของชิ้นงานนำไปสู่การยืนยันผลว่าชิ้นงานหลังการวิจัยมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานต้นแบบหรือไม่ โดยการเปรียบเทียบการทดลองระหว่างการจำลอง Simulation และการทดสอบชิ้นงานจริง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.4.1 ผลการทดลองจาก Finite Element

ผลการ Simulation ของชิ้นงานทั้ง 2 ชิ้น จะดูผลการเคลื่อนที่ของ Node ที่จุดต้นและปลายของระยะ 25 มิลลิเมตร สอดคล้องตามการติดตั้ง Extensometer ของการทดสอบจริงดังภาพที่ 4-57



ภาพที่ 4-57 แสดงผลการ Simulationการเคลื่อนที่ในแนวแกนY ของชิ้นงาน (ก) ก่อนพัฒนา และ (ข) หลังพัฒนา

คำนวณหาค่า strain ของทั้ง2ชิ้นงานจาก

$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ โดย $\Delta L = Node_{บน} - Node_{ล่าง}$ และ L คือ ค่าความยาวตั้งต้นนั้นคือค่าของ Gauge Length 25 มิลลิเมตร

เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาค่า ε จากความสัมพันธ์ ที่ได้กล่าวไปข้าวต้น โดย ε ของชิ้นงานก่อนพัฒนา คือ 0.0006892 และชิ้นงานหลังพัฒนา คือ 0.0004746

เมื่อได้ค่า ε ของทั้ง 2ชิ้นงาน แล้วสามารถหา ค่าstress เพื่อให้สามารถทราบได้ว่าชิ้นงานไหนแข็งแรงในเชิงโครงสร้างมากกว่า จากความสัมพันธ์ $\sigma = E \cdot \varepsilon$ โดยค่า Young's Modulus (E) ของ SS400ในการทดสอบนี้จะใช้ค่ากลางเฉลี่ยคือ 200 GPa ดังนั้น ค่า Stress ของทั้ง2 ชิ้นงานเป็นดังตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-19 แสดงค่า Stress และ Strain ของชิ้นงาน

ชิ้นงาน	Strain	Stress (MPa)
ก่อนพัฒนา	0.0006892	137.84
หลังพัฒนา	0.0004746	94.92

4.4.4.2 ผลการทดลองจากการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบวัสุดจากเครื่อง Tensile Test ผ่านอุปกรณ์วัดความยืดหรือหดของชิ้นงานด้วย Extensometer ดังภาพที่ 4-55 จะได้ข้อมูลเป็น Raw Data ออกมา ดังตารางที่ 4-20 ตารางแสดงตัวอย่างค่าข้อมูลดิบของชิ้นงานก่อนพัฒนา (ตารางข้อมูลดิบจากการทดลองชิ้นต้นแบบแสดงในภาคผนวก ก-3) และตารางที่ 4-21 แสดงตัวอย่างค่าข้อมูลดิบของชิ้นงานหลังพัฒนา (ตารางข้อมูลดิบจากการทดลองชิ้นพัฒนาแสดงในภาคผนวก ก-4)

ตารางที่ 4-20 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบข้อมูลดิบของชิ้นงานก่อนพัฒนา

Time(s)	Load(N)	Strain
0.578	30.60877	2.16308E-05
1.202	60.28183	4.28665E-05
1.83	89.50116	6.30979E-05
2.402	116.0029	8.32362E-05
3.036	142.3758	0.000103876
3.648	170.0835	0.000124243
….	….	….
31.014	1250.106	0.00083283

ตารางที่ 4-21 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบข้อมูลดิบของชิ้นงานหลังพัฒนา

Time(s)	Load(N)	Strain
*0.*106	31.50523	1.17815E-05
0.142	61.10237	2.53613E-05
0.182	90.54677	4.20931E-05
0.226	117.0887	6.01891E-05
0.272	142.8722	7.4898E-05
0.32	171.6208	8.97324E-05
....	....	....
3.096	1250.*019*	0.00061022

การคำนวณเปรียบเทียบระหว่างผล Simulation กับการทดลองจริงเปรียบเทียบที่ Load 1,250 N ดังนั้น ค่า Stress และStrain ของชิ้นงานทั้ง 2 ในรูปแบบการทดลองจะเป็นไปตามตารางที่ 4-22 โดยจะใช้ค่า Young's Modulus (E) ของ SS400 เดียวกันกับการ Simulation คือ 200 GPa

ตารางที่ 4-22 แสดงค่า Stress และ Strain ของชิ้นงานในรูปแบบการทดลอง

ชิ้นงาน	Load (N)	Strain	Stress (MPa)
ก่อนพัฒนา	1250.106	0.00083283	166.57
หลังพัฒนา	1250.019	0.00061022	122.04

4.4.4.3 สรุปผลการทดลอง

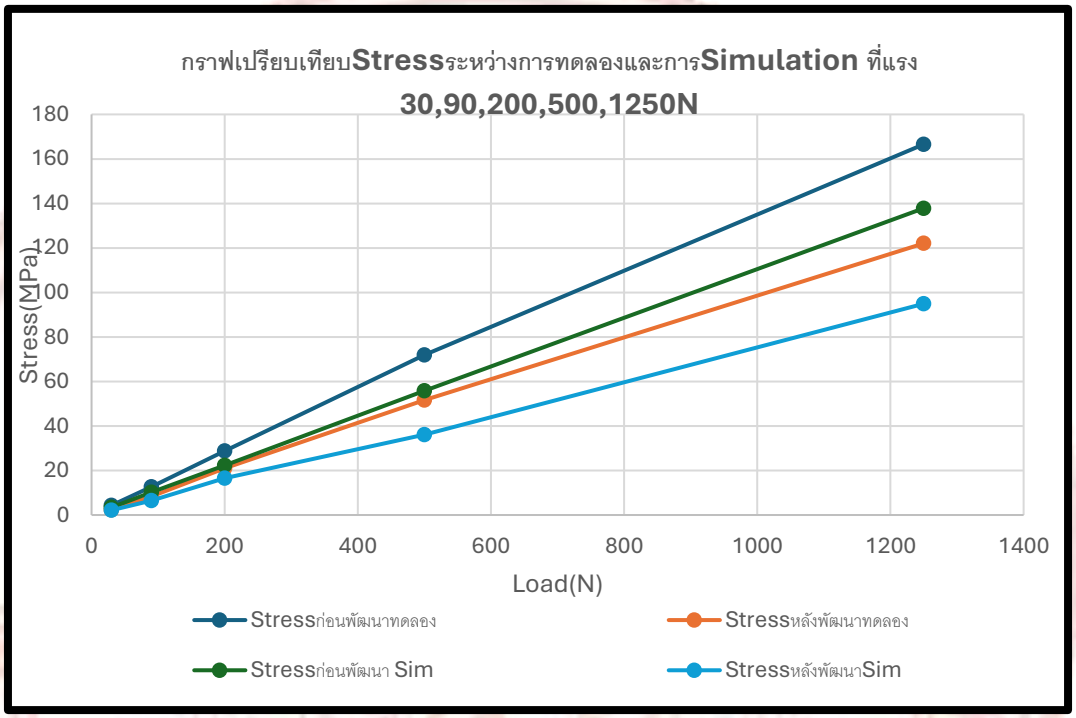
ตารางที่ 4-23 แสดงค่า Stress ระหว่างการ Simulation และการทดสอบจริง

ชิ้นงาน	Simulation (MPa)	ทดสอบจริง (MPa)
ก่อนพัฒนา	137.84	166.57
หลังพัฒนา	94.92	122.04

จากตารางที่ 4-23 แสดงค่าความเค้น (Stress) ที่ได้จากการทดสอบจริงโดยใช้ Extensometer เปรียบเทียบกับผลจากการจำลองด้วยวิธี Finite Element Simulation จะเห็นได้ว่ามีความคลาดเคลื่อนกันของทั้ง2วิธีของค่า Stress อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยสาเหตุหลักเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น การคลาดเคลื่อนของการติดตั้งตำแหน่งระหว่างเครื่อง Extensometer กับระยะ Node ในโปรแกรม SolidWorks ความฝืดสะสมของเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Load Test), ความคลาดเคลื่อนในการยึดศูนย์ของ Pin กับ Crosshead การยึดชิ้นงานกับ Jig Fixture เป็นต้น แต่ในการทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อต้องการดูแนวโน้มเพื่อต้องการทราบว่าชิ้นงานหลังพัฒนาจะมีความแข็งแรงมากกว่าก่อนพัฒนาหรือไม่ ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่า ชิ้นงานหลังพัฒนามีค่าStress น้อยกว่าชิ้นงานก่อนพัฒนาทั้งการจำลองและการทดสอบ จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานหลังพัฒนามีความแข็งแรงกว่าในเชิงโครงสร้าง

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาภาพที่ 4-58 ซึ่งแสดงกราฟเปรียบเทียบค่า Stress ระหว่างการทดลองจริงและการ Simulation ในช่วงแรง 30, 90, 200, 500 และ 1,250 N จะพบว่าแนวโน้มของกราฟทั้งสี่เส้นมีทิศทางและความชันใกล้เคียงกัน กล่าวคือ เมื่อแรงที่กระทำเพิ่มขึ้นค่า Stress ของทั้งชิ้นงานก่อนและหลังการพัฒนา จากผลการ Simulation และการทดลองต่างเพิ่มขึ้นตามแนวโน้มเดียวกัน แม้ว่าผลการจำลองจะให้ค่าต่ำกว่าผลการทดลองจริง แต่สัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงของ

Stress ระหว่างชิ้นงานก่อนและหลังการพัฒนายังคงสอดคล้องกันในทิศทางเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Finite Element ที่ใช้สามารถทำนายพฤติกรรมของชิ้นงานได้อย่างสมเหตุสมผลในเชิงแนวโน้ม และสามารถใช้ผลการ Simulation เป็นข้อมูลประกอบการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพการพัฒนาได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ



ภาพที่ 4-58 กราฟเปรียบเทียบ Stress ระหว่างการทดลองและการ Simulation ที่แรง 30 , 90 , 200 , 500 และ 1,250 N

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การซ่อมบำรุงตัวกลับแรงดันไอพ่น (Thrust Reverser) ประกอบด้วยขั้นตอนการซ่อมบำรุงหลายขั้นตอน โดยได้รับความต้องการจากฝ่ายช่างปฏิบัติงานให้ Thrust Reverser อยู่ในลักษณะของชิ้นงานตั้งฉากกับพื้นเพื่อสะดวกต่อการทำงานของช่างซ่อมบำรุงในกรณีที่สามารถซ่อมชิ้นงานในลักษณะยกชิ้นงานได้ ซึ่งในปัจจุบันคานยกชิ้นงานถูกออกแบบให้ยกชิ้นงานในท่าทางขนานกับพื้นได้รูปแบบเดียว ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าหากสามารถพัฒนาคานรับแรงแบบเดิมซึ่งถูกให้มีข้อจำกัดความสามารถในการยกได้เพียงรูปแบบเดียว ให้สามารถยกในท่าทางตามความต้องการของทีมช่างซ่อมบำรุงได้ จะเป็นประโยชน์และเพิ่มศักยภาพในการทำงาน ทั้งนี้ต้องสอดคล้องต่อกฎหมายและกฎระเบียบของบริษัทว่าด้วยเรื่องค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์ยกชิ้นงานและคำนึงถึงการลดน้ำหนักของชิ้นงานเพื่อให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายคานรับแรงเพื่อไปใช้ตามจุดต่างๆในบริษัท

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและน้ำหนักของคานรับแรงและแสดงผลการทดลองในรูปแบบต่างๆในบทที่4 ดังนั้นในบทนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการสรุปผลการวิจัยรวมถึงข้อจำกัดและข้อเสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตจริง

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคานรับแรงของอุปกรณ์ช่วยยก Thrust Reverser ให้สามารถตั้งฉากกับพื้นได้ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการซ่อมบำรุงของช่าง โดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยของขนาดชิ้นงานที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าดัชนีความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) และน้ำหนัก (Mass) จำนวน 2 แบบการทดลอง ได้แก่ แบบ 6 ปัจจัย และ 7 ปัจจัย

ได้ดำเนินการออกแบบการทดลองตามหลัก Full Factorial Design (2k) โดยใช้โปรแกรม Minitab

- แบบ 6 ปัจจัย มีข้อมูลการทดลองทั้งหมด 64 ชุด
- แบบ 7 ปัจจัย มีข้อมูลการทดลองทั้งหมด 128 ชุด

จากนั้นทำการจำลองการรับแรงของคานในโปรแกรม SolidWorks Simulation โดยใช้ระเบียบวิธี Finite Element Method (FEM) เพื่อหาค่าน้ำหนักและ FOS ของแต่ละกรณี แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างสมการถดถอย (Regression Equation) ของสมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไข เพื่อนำไปสู่การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)

กระบวนการ Optimization ใช้ทั้ง Excel Solver และ Lingo เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ ซึ่งผลการคำนวณทั้งสองวิธีให้ค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงถึงความน่าเชื่อถือและความแม่นยำของแบบจำลองการออกแบบที่ใช้

5.2 ผลลัพธ์การทดลอง

ผู้วิจัยแบ่งการพิจารณาผลลัพธ์ออกเป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีที่มีค่า FOS ไม่ต่ำกว่า 3.5
2. กรณีที่มีค่า FOS ไม่ต่ำกว่า 4.025

โดยในทั้งสองกรณีได้คัดเลือกแบบที่มีน้ำหนักชิ้นงานน้อยที่สุดแต่ยังคงค่า FOS อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด พบว่าแบบการทดลอง 7 ปัจจัย ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับเป้าหมายมากที่สุด

- ที่ค่า FOS = 3.5 ได้มวล 3.45 กิโลกรัม
- ที่ค่า FOS = 4.025 ได้มวล 3.51 กิโลกรัม

เมื่อเทียบกับคานต้นแบบที่มีมวล 3.51 กิโลกรัม และค่า FOS เพียง 3.17 เท่า แสดงให้เห็นว่าแบบที่พัฒนาใหม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ชัดเจน โดยยังคงน้ำหนักอยู่ในระดับใกล้เคียงเดิมซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลเปรียบเทียบของแบบ6ปัจจัยและ 7 ปัจจัย ของแต่ละเหตุการณ์เป็นไปตามตาราง ที่ 5-1และ 5-2

เพื่อยืนยันผลจากการจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจริงในส่วนของฟิกเจอร์ Angle Support ซึ่งเป็นจุดที่รับแรงสูงสุด โดยผลิตชิ้นงาน 2 แบบ ได้แก่

- แบบต้นฉบับ (ก่อนพัฒนา)
- แบบที่ปรับปรุงแล้ว (ตามผลการออกแบบ 7 ปัจจัย ที่ FOS = 4.025)

โดยใช้วัสดุคือSS400เนื่องจากมีราคาถูกและหาง่าย โดยใช้ค่าความเค้น (Stress) เป็นตัวชี้วัดหลักแทน FOS ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 5-3 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงมีค่า Stress ต่ำกว่าชิ้นงานต้นฉบับทั้งการจำลองและการทดสอบ ซึ่งหมายถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นในเชิงโครงสร้าง

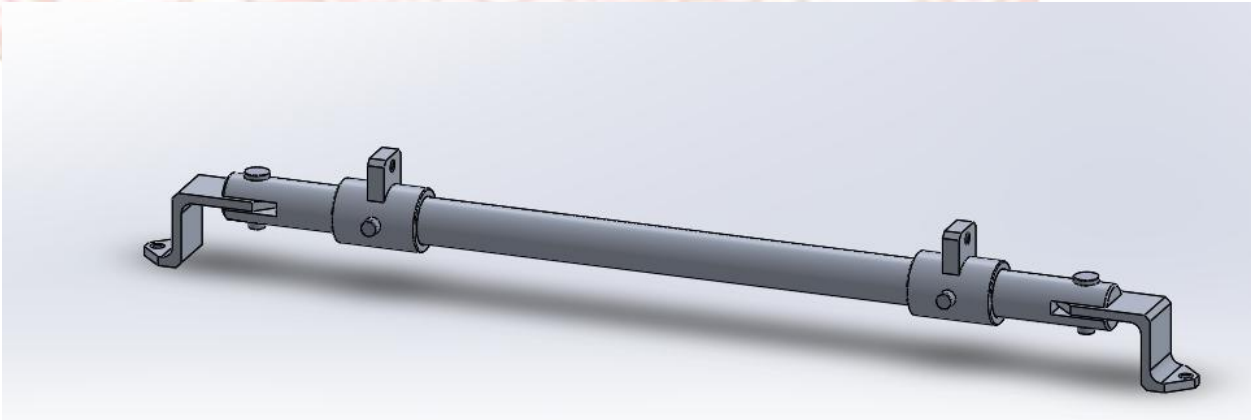
ตารางที่ 5-1 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนขนาดของปัจจัยและผลระหว่างชิ้นงานตั้งต้นกับชิ้นงานใหม่แบบ 6 ปัจจัย

Factor	D1	D2	D3	D4	D5	D6	FOS	Mass
Original	5	8	20	65	20	10.25	3.17	3.51
Optimal 6 Factor at FOS 3.5 (FEM Simulation)	5	10	10	100	50	10.25	3.49	3.67

ตารางที่ 5-2 แสดงการเปรียบเทียบการปรับเปลี่ยนขนาดของปัจจัยและผลระหว่างชิ้นงานตั้งต้นกับชิ้นงานใหม่แบบ 7 ปัจจัย

Factor	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	FOS	Mass
Original	35	5	8	20	65	10.25	6	3.17	3.51
Optimal 7 Factor at FOS 3.5 (FEM Simulation)	20	20	8	10	65	10.25	7	3.56	3.45
Optimal 7 Factor at FOS 4.025 (FEM Simulation)	20	20	9.19	10	65	10.25	15	4.236	3.51

เพราะฉะนั้นสามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่าการออกแบบที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขการวิจัยนี้คือการออกแบบชิ้นงานคานรับแรงแบบ 7 ปัจจัย โดยมีค่า FOS มากกว่าหรือเท่ากับ 4.025 ภายใต้น้ำหนักของชิ้นงานที่น้อยที่สุดที่ 3.51 Kg ดังภาพที่ 5-1 ทั้งนี้ ผลการจำลอง(Simulation)มีความน่าเชื่อถือ และอาจจะเผื่อค่าความปลอดภัยเพิ่มเติมจากผลการจำลอง เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการออกแบบชิ้นงานให้เหมาะสมยิ่งขึ้น



ภาพที่ 5-1 แสดงภาพจำลองชิ้นงานคานรับแรงด้วยค่า Optimization แบบ 7 ปัจจัย

ตารางที่ 5-3 แสดงการเปรียบเทียบค่า Stress และค่าความคลาดเคลื่อนของ 2 ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	Simulation (MPa)	ทดสอบจริง (MPa)
ก่อนพัฒนา	137.84	166.57
หลังพัฒนา	94.92	122.04

5.3 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ไม่ได้กล่าวถึงปัญหาที่เกิดจากการหมุนของวัสดุเมื่อตอนขณะวัสดุเกิดการลอยตัวจนถึงจุดสมดุล
2. การทดสอบจริงทำเฉพาะชิ้นส่วน **Angle Support** ซึ่งเป็นจุดอ่อนหลักของคานยังไม่ได้ทดสอบทั้งระบบการยก
3. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการหาค่า Stress ได้ด้วยการใช้เครื่องมือที่แม่นยำมากขึ้นเช่น Strain Gauge แบบแผ่น หรือ Video Extensometer
4. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโปรแกรมจำลองในการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการลองใช้โปรแกรมชนิดอื่นและเปรียบเทียบ

บรรณานุกรม

ชนินทร์ ทวิชัยยุทธ และ ปิยวรรณ มั่งมี. **การปรับปรุงแบบหัวขาตั้งกล้องด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับการออกแบบการทดลอง**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนดลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2558.

ณัฐพงศ์ ถนอมเงิน. **การปรับปรุงแบบแขนหุ่นยนต์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับการออกแบบการทดลอง**. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือม 2561.

อภิชัต. **การออกแบบที่ดีที่สุดแบบสองจุดประสงค์ของแขนกลช่วยยก**.วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. Volume 17,issue 3. 2021

ญาณทัศน์ รัตนสุวรรณกุล. **การศึกษาปัจจัยในกระบวนการกดกขึ้นรูปลึกเพื่อลดของเสียชิ้นงานโดยวิธีการออกแบบการทดลอง**. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,2558.

Kariminejad , M. **Optimization of a Commercial Injection-Moulded component by Using DOE and Simulation**. arXiv preprint, 2023.

Momani, **An Application of Finite Element Method and Design of Experiments in the Optimization of Sheet Metal Blanking Process**. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Industrial Engineering Department, University of Jordan,2008.

กฤษฎางค์ ศุกระมูล.**การตรวจสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการออกแบบแชสซีสำหรับยานพาหนะการเกษตร**. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา, ปีที่ 11 ฉบับที่ 1, 2566.

วีรพงษ์ นิจโรจน์กุล. **การใช้วิศวกรรมย้อนรอยและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของพระพุทธรูป**. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ปีที่ 23 ฉบับที่ 72, หน้า 95–108, 2553.

ภาคผนวก ก

ตารางการทดลอง

ตารางที่ ก-1 การทดลองจากวิธี Design of Experiment Full Factorial Design 2^kแบบ 6 ปัจจัย

Case	A	B	C	D	E	F	FOS	MASS
1	5	8	10	65	12	10.25	3.19	3.48
2	20	8	10	65	12	10.25	3.18	3.45
3	5	10	10	65	12	10.25	3.38	3.58
4	20	10	10	65	12	10.25	3.32	3.54
5	5	8	60	65	12	10.25	3.18	3.59
6	20	8	60	65	12	10.25	3.19	3.56
7	5	10	60	65	12	10.25	3.33	3.71
8	20	10	60	65	12	10.25	3.35	3.67
9	5	8	10	100	12	10.25	3.3	3.56
10	20	8	10	100	12	10.25	3.33	3.53
11	5	10	10	100	12	10.25	3.48	3.67
12	20	10	10	100	12	10.25	3.49	3.63
13	5	8	60	100	12	10.25	3.35	3.67
14	20	8	60	100	12	10.25	3.3	3.63
15	5	10	60	100	12	10.25	3.5	3.81
16	20	10	60	100	12	10.25	3.44	3.77
17	5	8	10	65	50	10.25	3.18	3.48
18	20	8	10	65	50	10.25	3.18	3.45
19	5	10	10	65	50	10.25	3.38	3.58
20	20	10	10	65	50	10.25	3.3	3.54
21	5	8	60	65	50	10.25	3.17	3.59
22	20	8	60	65	50	10.25	3.19	3.56
23	5	10	60	65	50	10.25	3.33	3.71
24	20	10	60	65	50	10.25	3.33	3.67
25	5	8	10	100	50	10.25	3.35	3.56

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

Case	A	B	C	D	E	F	FOS	MASS
26	20	8	10	100	50	10.25	3.32	3.53
27	5	10	10	100	50	10.25	3.49	3.67
28	20	10	10	100	50	10.25	3.48	3.63
29	5	8	60	100	50	10.25	3.34	3.67
30	20	8	60	100	50	10.25	3.31	3.63
31	5	10	60	100	50	10.25	3.48	3.81
32	20	10	60	100	50	10.25	3.47	3.77
33	5	8	10	65	12	12	3.19	3.48
34	20	8	10	65	12	12	3.19	3.45
35	5	10	10	65	12	12	3.34	3.58
36	20	10	10	65	12	12	3.34	3.54
37	5	8	60	65	12	12	3.17	3.59
38	20	8	60	65	12	12	3.19	3.56
39	5	10	60	65	12	12	3.36	3.71
40	20	10	60	65	12	12	3.32	3.67
41	5	8	10	100	12	12	3.3	3.56
42	20	8	10	100	12	12	3.3	3.53
43	5	10	10	100	12	12	3.41	3.67
44	20	10	10	100	12	12	3.48	3.63
45	5	8	60	100	12	12	3.33	3.67
46	20	8	60	100	12	12	3.34	3.63
47	5	10	60	100	12	12	3.48	3.81
48	20	10	60	100	12	12	3.48	3.77
49	5	8	10	65	50	12	3.18	3.48
50	20	8	10	65	50	12	3.19	3.45

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

Case	A	B	C	D	E	F	FOS	MASS
51	5	10	10	65	50	12	3.32	3.58
52	20	10	10	65	50	12	3.33	3.54
53	5	8	60	65	50	12	3.18	3.59
54	20	8	60	65	50	12	3.18	3.56
55	5	10	60	65	50	12	3.3	3.71
56	20	10	60	65	50	12	3.36	3.67
57	5	8	10	100	50	12	3.33	3.56
58	20	8	10	100	50	12	3.34	3.53
59	5	10	10	100	50	12	3.49	3.67
60	20	10	10	100	50	12	3.48	3.63
61	5	8	60	100	50	12	3.34	3.67
62	20	8	60	100	50	12	3.32	3.63
63	5	10	60	100	50	12	3.49	3.81
64	20	10	60	100	50	12	3.5	3.77

ตารางที่ ก-2 การทดลองจากวิธี Design of Experiment Full Factorial Design 2k แบบ 7 ปัจจัย

Case	A	B	C	D	E	F	G	FOS	MASS
1	20	5	8	10	65	10.25	6	3.42	3.48
2	35	5	8	10	65	10.25	6	3.08	3.48
3	20	20	8	10	65	10.25	6	3.42	3.45
4	35	20	8	10	65	10.25	6	3.04	3.45
5	20	5	10	10	65	10.25	6	3.45	3.58
6	35	5	10	10	65	10.25	6	3.23	3.58
7	20	20	10	10	65	10.25	6	3.44	3.54
8	35	20	10	10	65	10.25	6	3.23	3.54
9	20	5	8	60	65	10.25	6	3.42	3.59
10	35	5	8	60	65	10.25	6	3.04	3.59
11	20	20	8	60	65	10.25	6	3.41	3.56
12	35	20	8	60	65	10.25	6	3.04	3.56
13	20	5	10	60	65	10.25	6	3.42	3.71
14	35	5	10	60	65	10.25	6	3.23	3.71
15	20	20	10	60	65	10.25	6	3.49	3.67
16	35	20	10	60	65	10.25	6	3.22	3.67
17	20	5	8	10	100	10.25	6	3.65	3.56
18	35	5	8	10	100	10.25	6	3.13	3.56
19	20	20	8	10	100	10.25	6	3.65	3.53
20	35	20	8	10	100	10.25	6	3.09	3.53
21	20	5	10	10	100	10.25	6	3.6	3.67
22	35	5	10	10	100	10.25	6	3.38	3.67
23	20	20	10	10	100	10.25	6	3.59	3.63
24	35	20	10	10	100	10.25	6	3.38	3.63
25	20	5	8	60	100	10.25	6	3.65	3.67

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

Case	A	B	C	D	E	F	G	FOS	MASS
26	35	5	8	60	100	10.25	6	3.16	3.67
27	20	20	8	60	100	10.25	6	3.65	3.63
28	35	20	8	60	100	10.25	6	3.18	3.63
29	20	5	10	60	100	10.25	6	3.67	3.81
30	35	5	10	60	100	10.25	6	3.32	3.81
31	20	20	10	60	100	10.25	6	3.67	3.77
32	35	20	10	60	100	10.25	6	3.31	3.77
33	20	5	8	10	65	12	6	3.42	3.48
34	35	5	8	10	65	12	6	3.05	3.48
35	20	20	8	10	65	12	6	3.42	3.45
36	35	20	8	10	65	12	6	3.05	3.45
37	20	5	10	10	65	12	6	3.46	3.58
38	35	5	10	10	65	12	6	3.24	3.58
39	20	20	10	10	65	12	6	3.4	3.54
40	35	20	10	10	65	12	6	3.23	3.54
41	20	5	8	60	65	12	6	3.42	3.59
42	35	5	8	60	65	12	6	3.04	3.59
43	20	20	8	60	65	12	6	3.42	3.56
44	35	20	8	60	65	12	6	3.05	3.56
45	20	5	10	60	65	12	6	3.41	3.71
46	35	5	10	60	65	12	6	3.23	3.71
47	20	20	10	60	65	12	6	3.51	3.67
48	35	20	10	60	65	12	6	3.22	3.67
49	20	5	8	10	100	12	6	3.68	3.56
50	35	5	8	10	100	12	6	3.16	3.56

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

Case	A	B	C	D	E	F	G	FOS	MASS
51	20	20	8	10	100	12	6	3.66	3.53
52	35	20	8	10	100	12	6	3.15	3.53
53	20	5	10	10	100	12	6	3.66	3.67
54	35	5	10	10	100	12	6	3.38	3.67
55	20	20	10	10	100	12	6	3.68	3.63
56	35	20	10	10	100	12	6	3.39	3.63
57	20	5	8	60	100	12	6	3.66	3.67
58	35	5	8	60	100	12	6	3.07	3.67
59	20	20	8	60	100	12	6	3.64	3.63
60	35	20	8	60	100	12	6	3.14	3.63
61	20	5	10	60	100	12	6	3.67	3.81
62	35	5	10	60	100	12	6	3.38	3.81
63	20	20	10	60	100	12	6	3.67	3.77
64	35	20	10	60	100	12	6	3.4	3.77
65	20	5	8	10	65	10.25	15	3.95	3.49
66	35	5	8	10	65	10.25	15	3.68	3.49
67	20	20	8	10	65	10.25	15	3.98	3.46
68	35	20	8	10	65	10.25	15	3.66	3.46
69	20	5	10	10	65	10.25	15	4.08	3.59
70	35	5	10	10	65	10.25	15	3.93	3.59
71	20	20	10	10	65	10.25	15	4.04	3.55
72	35	20	10	10	65	10.25	15	3.89	3.55
73	20	5	8	60	65	10.25	15	3.95	3.6
74	35	5	8	60	65	10.25	15	3.67	3.6
75	20	20	8	60	65	10.25	15	3.98	3.56

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

Case	A	B	C	D	E	F	G	FOS	MASS
76	35	20	8	60	65	10.25	15	3.65	3.56
77	20	5	10	60	65	10.25	15	4.03	3.72
78	35	5	10	60	65	10.25	15	3.93	3.72
79	20	20	10	60	65	10.25	15	4.07	3.68
80	35	20	10	60	65	10.25	15	3.87	3.68
81	20	5	8	10	100	10.25	15	3.98	3.56
82	35	5	8	10	100	10.25	15	3.55	3.56
83	20	20	8	10	100	10.25	15	3.99	3.53
84	35	20	8	10	100	10.25	15	3.55	3.53
85	20	5	10	10	100	10.25	15	4.22	3.68
86	35	5	10	10	100	10.25	15	3.98	3.68
87	20	20	10	10	100	10.25	15	4.22	3.64
88	35	20	10	10	100	10.25	15	3.98	3.64
89	20	5	8	60	100	10.25	15	3.98	3.67
90	35	5	8	60	100	10.25	15	3.53	3.67
91	20	20	8	60	100	10.25	15	3.99	3.64
92	35	20	8	60	100	10.25	15	3.54	3.64
93	20	5	10	60	100	10.25	15	4.24	3.82
94	35	5	10	60	100	10.25	15	3.97	3.82
95	20	20	10	60	100	10.25	15	4.21	3.77
96	35	20	10	60	100	10.25	15	3.98	3.77
97	20	5	8	10	65	12	15	3.97	3.49
98	35	5	8	10	65	12	15	3.68	3.49
99	20	20	8	10	65	12	15	3.97	3.46
100	35	20	8	10	65	12	15	3.69	3.46

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

Case	A	B	C	D	E	F	G	FOS	MASS
101	20	5	10	10	65	12	15	4.08	3.58
102	35	5	10	10	65	12	15	3.92	3.58
103	20	20	10	10	65	12	15	4.09	3.54
104	35	20	10	10	65	12	15	3.89	3.54
105	20	5	8	60	65	12	15	3.97	3.6
106	35	5	8	60	65	12	15	3.68	3.6
107	20	20	8	60	65	12	15	3.94	3.56
108	35	20	8	60	65	12	15	3.69	3.56
109	20	5	10	60	65	12	15	4.08	3.72
110	35	5	10	60	65	12	15	3.94	3.72
111	20	20	10	60	65	12	15	4.03	3.68
112	35	20	10	60	65	12	15	3.88	3.68
113	20	5	8	10	100	12	15	3.99	3.56
114	35	5	8	10	100	12	15	3.55	3.56
115	20	20	8	10	100	12	15	3.99	3.53
116	35	20	8	10	100	12	15	3.55	3.53
117	20	5	10	10	100	12	15	4.23	3.68
118	35	5	10	10	100	12	15	3.97	3.68
119	20	20	10	10	100	12	15	4.24	3.64
120	35	20	10	10	100	12	15	4.01	3.64
121	20	5	8	60	100	12	15	3.97	3.67
122	35	5	8	60	100	12	15	3.54	3.67
123	20	20	8	60	100	12	15	3.95	3.64
124	35	20	8	60	100	12	15	3.53	3.64
125	20	5	10	60	100	12	15	4.25	3.81

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

Case	A	B	C	D	E	F	G	FOS	MASS
126	35	5	10	60	100	12	15	4.01	3.81
127	20	20	10	60	100	12	15	4.21	3.77
128	35	20	10	60	100	12	15	3.98	3.77

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองชิ้นงานต้นแบบด้วยเครื่อง Tensile Test และ Extensometer

Time(s)	Strain	Load(N)
0	-8.21003E-06	0.3046101
0.578	2.16308E-05	30.60877
1.202	4.28665E-05	60.28183
1.83	6.30979E-05	89.50116
2.402	8.32362E-05	116.0029
3.036	0.000103876	142.3758
3.648	0.000124243	170.0835
4.216	0.000143831	196.9823
4.808	0.000161874	222.1809
5.446	0.000181266	248.6784
6.01	0.00019927	273.5229
6.64	0.000220183	297.9459
7.266	0.000235995	323.1879
7.852	0.000254226	349.3398
8.416	0.000275455	374.8259
9.048	0.000289944	398.5525
9.656	0.000309139	423.7955
10.238	0.000324598	447.194
10.864	0.000343111	472.5507
11.47	0.00035948	496.8618
12.028	0.000374699	520.2005
12.642	0.000390585	542.9064
13.268	0.000407275	567.1869
13.83	0.000422863	590.2927
14.466	0.000439591	614.1843

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

Time(s)	Strain	Load(N)
15.08	0.00045509	638.1743
15.648	0.000472625	662.5102
16.232	0.00048671	685.3934
16.88	0.00050275	708.392
17.444	0.000517173	732.1303
18.072	0.000532185	755.3322
18.694	0.000547251	779.352
19.286	0.000564217	803.3045
19.848	0.000577815	826.3124
20.478	0.000593204	848.5345
21.084	0.000608884	872.798
21.666	0.000623549	894.9613
22.3	0.000637968	918.1327
22.908	0.000651938	941.1261
23.474	0.000666279	964.3925
24.078	0.000678647	986.1797
24.712	0.000692311	1009.595
25.27	0.000705377	1031.672
25.9	0.000719306	1054.444
26.516	0.00073407	1077.545
27.084	0.000744971	1101.279
27.668	0.000757062	1122.654
28.308	0.000769369	1145.601
28.87	0.000780452	1169.475
29.5	0.000794426	1191.346

ตารางที่ ก-3 (ต่อ)

Time(s)	Strain	Load(N)
30.126	0.000810341	1214.505
30.71	0.000824267	1237.299
31.014	0.00083283	1250.106



ตารางที่ ก-4 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองชิ้นงานหลังพัฒนาด้วยเครื่อง Tensile Test และ Extensometer

Time	Strain	Load(N)
0.036	-1.3E-05	0.3391353
0.104	1.19E-05	29.91178
0.142	2.54E-05	61.10237
0.18	4.08E-05	89.29189
0.224	5.97E-05	115.9408
0.272	7.49E-05	142.8722
0.318	8.89E-05	170.4152
0.364	0.000105	197.5411
0.41	0.000116	222.146
0.46	0.000133	248.2959
0.508	0.000146	273.0907
0.556	0.000162	298.1415
0.604	0.000175	323.1738
0.656	0.000185	349.2973
0.71	0.000202	375.0584
0.76	0.000213	398.1264
0.816	0.000227	424.1635
0.866	0.000233	447.0786
0.922	0.000244	472.8631
0.978	0.000256	496.8978
1.032	0.000264	519.7907
1.09	0.00028	543.2383

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

Time	Strain	Load(N)
1.152	0.00029	567.0646
1.21	0.000307	590.6044
1.268	0.000318	613.9508
1.332	0.000326	638.2296
1.396	0.000342	662.6558
1.456	0.000352	685.6853
1.514	0.000361	708.0713
1.58	0.000371	732.3665
1.642	0.000387	755.1128
1.708	0.0004	778.9706
1.774	0.000407	803.466
1.838	0.000415	826.2146
1.902	0.000432	848.7664
1.968	0.000446	872.6733
2.032	0.000459	895.0643
2.1	0.000465	918.2973
2.166	0.000474	941.0536
2.234	0.00049	964.1881
2.3	0.000502	986.4661
2.366	0.000504	1009.579
2.43	0.00052	1031.398
2.502	0.000532	1054.575

ตารางที่ ก-4 (ต่อ)

Time	Strain	Load(N)
2.572	0.000543	1077.817
2.644	0.000551	1101.069
2.706	0.000555	1122.618
2.776	0.000576	1145.868
2.85	0.000586	1169.556
2.918	0.00059	1191.278
2.988	0.000605	1214.258
3.058	0.000612	1237.364
3.096	0.00061	1250.019

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย กัลป์ อิสรานนทกุล
ชื่อการค้นคว้าอิสระ	การปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของฟิกเจอร์สำหรับยกชิ้นงาน Thrust Reverser ให้แข็งแรงและเบา
สาขาวิชา	การจัดการอุตสาหกรรม
ประวัติ	พ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประวัติการทำงาน พ.ศ. 2558 -พ.ศ.2564 ตำแหน่ง วิศวกรอากาศยาน บริษัท นกแอร์ จำกัด มหาชน พ.ศ. 2564 - พ.ศ. 2565 ตำแหน่ง อาจารย์ คณะวิศวกรรมอากาศยาน มหาวิทยาลัยกรุงเทพ ธนบุรี พ.ศ. 2565 - พ.ศ. 2567 ตำแหน่ง วิศวกรผลิตภัณฑ์ใหม่ บริษัท เอ เออาร์ คอมโพเนนต์ เซอร์วิสเซส (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ.2567 – ปัจจุบัน ตำแหน่ง วิศวกรอากาศยาน บริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด