

การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อการออกแบบ
ขาองตั้งชุดคอยล์ร้อนของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**APPLICATION OF OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR
CONDENSING UNIT SUPPORTING LEG DESIGN OF
SPLIT TYPE AIR CONDITIONER**



Witchakorn Wongchanasit

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อการออกแบบ
ขาของตั้งชุดคอยล์ร้อนของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. กীরติ สุตักขณ์)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร. ชีตัต คลวิชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. สุภกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ



(อ. ดร. ธวัชชัย จารุงศ์วิทยา)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วิชกร วงษ์ชนะสิทธิ์ : การประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อการออกแบบขา
รองตั้งชุดคอยล์ร้อนของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (APPLICATION OF
OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR CONDENSING UNIT SUPPORTING LEG
DESIGN OF SPLIT TYPE AIR CONDITIONER) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ชิตต์
คลวิชัย, 158 หน้า.

เนื่องจากสภาพอากาศของประเทศไทยเป็นแบบร้อนชื้น ส่งผลให้มีสภาพอากาศร้อน
มากกว่าสภาพอากาศเย็น ทำให้มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศเป็นจำนวนมาก การติดตั้ง
เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน โดยทั่วไป มักติดตั้งชุดคอยล์ร้อนด้านนอกตัวอาคาร เพื่อให้สามารถ
ระบายความร้อนได้ดี อีกทั้งยังคงความสวยงามของอาคาร รูปแบบการติดตั้งชุดคอยล์ร้อนในกรณี
ติดตั้งสูงกว่าพื้นระดับต้องใช้เวลาตั้งแบบคานรองรับน้ำหนัก โดยทั่วไปคานรองรับน้ำหนักมีรูปแบบ
หน้าตัดที่หลากหลาย เช่น หน้าตัดรูปตัว C หรือ หน้าตัดรูปตัว T เป็นต้น โดยหน้าตัดและการเจาะรู
บนคานจะมีผลต่อความแข็งแรง ฉะนั้นผู้วิจัยต้องการทราบรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของขารองตั้งชุด
คอยล์ร้อนที่เป็นปัญหาแบบสองเป้าหมาย คือ ปริมาตรและระยะการโก่งตัวของขารองตั้งน้อยที่สุด
ภายใต้เงื่อนไขบังคับ คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นจะต้องไม่เกินค่าความแข็งแรงของวัสดุ เพื่อประโยชน์
ต่อการพัฒนาและออกแบบขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน ให้มีปริมาตรต่ำที่สุดแต่ยังคงความแข็งแรง
สามารถรองรับน้ำหนักของชุดคอยล์ร้อนได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การหารูปร่างที่เหมาะสม
ที่สุดของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน ในปัจจุบันระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้
แก้ปัญหาทางวิศวกรรมมากมายและยังมีการประยุกต์ร่วมกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อการ
แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดอีกด้วย งานวิจัยนี้เป็นการแก้ปัญหาแบบสองเป้าหมายซึ่งจะต้อง
ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบขั้นตอนวิธีการเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูก
ครอบงำ เพื่อการประเมินผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาผลของรูปร่าง 4 กรณีศึกษา คือ กรณี
ชิ้นงานไม่มีรูเจาะ, ชิ้นงานมี 1 รูเจาะ, ชิ้นงานมี 2 รูเจาะ และชิ้นงานมี 3 รูเจาะ ในแต่ละกรณีจะมีการ
กำหนดตัวแปรออกแบบที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จากการคำนวณจะได้ขอบหน้าพาเรโตที่เหมาะสม
ที่สุดของแต่ละกรณี ซึ่งผลจากการคำนวณได้แสดงในรูปแบบร้อยละของความแตกต่างระหว่าง
ปริมาตรของขารองตั้งที่สูงสุดและต่ำสุดโดยจะได้ผลดังนี้ กรณีแรกแตกต่างร้อยละ 50 กรณีที่สอง
แตกต่างร้อยละ 51 กรณีที่สามแตกต่างร้อยละ 49 และกรณีสุดท้ายแตกต่างร้อยละ 53 โดยกรณี
สุดท้ายได้ถูกเลือกมาใช้ในการสร้างชิ้นงานจริง เพื่อติดตั้งแถววัดความเครียด ซึ่งได้ทำการวัดค่า

ความเครียดในชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ค่าความเครียดในทิศทางเดียวกันกับภาระกระทำจะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 6.



สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา วิภากร วรรณพิทักษ์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [ลายมือ]

WITCHAKORN WONGCHANASIT : APPLICATION OF
OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR CONDENSING UNIT SUPPORTING
LEG DESIGN OF SPLIT TYPE AIR CONDITIONER. THESIS ADVISOR :
TEETUT DOLWICHAI, Ph.D., 158 PP.

GENETIC ALGORITHMS/SHAPE OPTIMIZATION/SUPPORTING LEG

Thailand air climate are hot and humid, so that the weather is hot more than cold. It effect to more use the air conditioner. The installation of split type air conditioner in general, its condensing unit is installed at the external part of building that's good for heat rejected and view point. The condensing unit in the case of installation over the ground, it must be used the supporting leg to support its weight. Generally, the beam cross-sectional area shape have been various such as C-section, T-section and so on. The cross-sectional area shape and the hole on the beam are effect to strength. Therefore the researcher want to know the optimal shape that describe two objective points. The first is minimization of build up materials and the second, its can be supported with minimum deflection while the constraint condition is stress does not exceed the strength of materials. So that, the work objective is finding the optimal shape of split type air conditioner supporting leg. Now a day, Finite element method (FEM) is applied in various of engineering problem and it also use genetic algorithms (GA) to combine with in optimization problem. This work is bi-objective optimization that use non-dominated sorting genetic algorithms II (NSGAI) for evaluate the optimal solution. The work considerate 4 cases study which consist of the shape without hole, 1 hole, 2 holes and 3 holes case study. Each cases are defined by different design variables. The optimal results are collected in the optimal set of Pareto frontier. The

results are shown the different percentage of minimum and maximum volume of the supporting leg as follow ; the first case is 50%, the second case is 51%, the third case is 49% and the last case is 53%. The 3 holes case is selected to build up for install the strain gauge which its measure strain deformation to verify to the optimal shape that has percentage error of the strain in same of load direction is not over 6%.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature Witchalorn Wongchansit

Advisor's Signature Tantat Doluschai

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้โอกาสในการเข้ารับการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

อาจารย์ ดร.ธีทัต คลวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาเสมอ ตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้วิจัย ในด้านการดำเนินชีวิต และการอุทิศตนต่อคนรุ่นหลัง โดยไม่เห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยส่วนตัวตน ซึ่งผู้วิจัยจะจดจำช่วงเวลาดังกล่าวไว้เป็นคติสอนใจที่ดั่งงามตลอดไป

คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยด้วยความเมตตากรุณาทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

คุณศิริพรภรณ์ ศรีอ่อน ที่ให้การสนับสนุนในส่วนของเครื่องมือสำหรับงานวิจัย

คุณเจษฎา มีเรือง คุณอรนิช ไตรศักดิ์ คุณสิทธิพงศ์ พรหมแดน ซึ่งเป็นพี่น้องบัณฑิตที่คอยให้คำปรึกษาในส่วนวิชาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย และการดำเนินชีวิต

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อมานิตย์ วงษ์ชนะสิทธิ์ และคุณแม่วณิชยา วงษ์ชนะสิทธิ์ รวมถึงครอบครัวที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และให้โอกาสทางด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมา โดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

วิศวกร วงษ์ชนะสิทธิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	5
2.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	6
2.3.1 การคัดเลือก.....	6
2.3.2 การดำเนินการครอสโอเวอร์.....	8
2.3.3 การดำเนินการมิวเทชัน.....	9
2.3.4 ขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย.....	11
2.4 ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1	การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	18
2.4.1.1	การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและ การเลือกชนิดของเอลิเมนต์.....	18
2.4.1.2	การเลือกฟังก์ชันที่ใช้ประมาณค่าแบบจำลอง.....	21
2.4.1.3	ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงเดียว.....	23
2.4.1.4	ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อน.....	23
2.4.1.5	ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซับซ้อน.....	25
2.4.1.6	การหาสมการของเอลิเมนต์.....	26
2.4.1.7	การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต....	28
2.4.1.8	การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าตัวแปรเบื้องต้น.....	28
2.4.1.9	การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าตัวแปรลำดับที่สอง.....	29
2.4.1.10	การแปลความหมายของผลสรุป.....	29
2.5	การวิเคราะห์ความแข็งแรงบน โครงสร้าง.....	29
2.5.1	การวิเคราะห์ปัญหาของแข็ง.....	29
2.5.1.1	สมการเชิงอนุพันธ์.....	30
2.5.1.2	สมการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	32
2.6	ทฤษฎีความเสียหาย.....	34
2.7	แถวัดความเครียด.....	38
2.7.1	การหาค่าความเค้น.....	38
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.9	สรุป.....	41
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1	การหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของขาของตั่งชุดคอยล์ร้อน.....	42
3.1.1	ฟังก์ชันเป้าหมาย.....	44
3.1.2	ตัวแปรออกแบบ.....	44

สารบัญ (ต่อ)

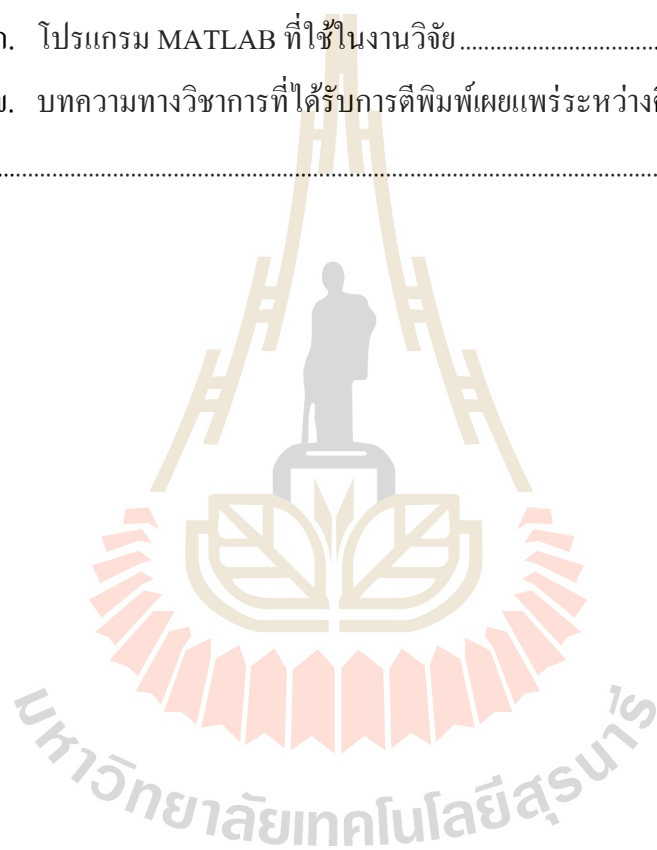
หน้า

3.1.2.1	กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	45
3.1.2.2	กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ	45
3.1.2.3	กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ	46
3.1.2.4	กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ	46
3.1.3	เงื่อนไขบังคับ	47
3.2	การทำงานของโปรแกรม	48
3.3	การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	52
3.4	การแสดงผลการคำนวณ	54
3.4.1	การเลือกขอบหน้าพาเรโตแต่ละกรณีศึกษา	55
3.4.1.1	ขอบหน้าพาเรโต กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	56
3.4.1.2	ขอบหน้าพาเรโต กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ	58
3.4.1.3	ขอบหน้าพาเรโต กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ	59
3.4.1.4	ขอบหน้าพาเรโต กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ	60
3.5	การทดสอบชิ้นงาน	61
3.6	สถานที่ทำการวิจัย	66
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	67
4.1	ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด	67
4.1.1	กรณีไม่มีรูเจาะ	67
4.1.2	กรณีมี 1 รูเจาะ	77
4.1.3	กรณีมี 2 รูเจาะ	87
4.1.4	กรณีมี 3 รูเจาะ	98
4.2	เปรียบเทียบผลการทดสอบ	109
4.3	สรุป	130
5	สรุปและข้อเสนอแนะ	132
5.1	สรุปผลวิจัย	132

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ	133
รายการอ้างอิง.....	135
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในงานวิจัย.....	137
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระหว่างศึกษา	151
ประวัติผู้เขียน	158



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	การกำหนดค่าความปลอดภัย..... 48
3.2	คุณสมบัติของวัสดุ..... 52
3.3	ค่า Hyper volume และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงาน ไม่มีรูเจาะ..... 57
3.4	ค่า Hyper volume และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ 58
3.5	ค่า Hyper volume และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ..... 60
3.6	ค่า Hyper volume และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ..... 61
4.1	ค่าตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงาน ไม่มีรูเจาะ..... 68
4.2	การเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับกรณีชิ้นงาน ไม่มีรูเจาะ..... 74
4.3	ค่าตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ 78
4.4	การเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ 84
4.5	ค่าตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ 89
4.6	การเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ 95
4.7	ค่าตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ 100
4.8	การเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ 106
4.9	การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 1..... 114
4.10	การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 2..... 117
4.11	การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 3..... 120
4.12	การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 4..... 123
4.13	การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 5..... 126
4.14	การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 6..... 129
4.15	ความคลาดเคลื่อนของความเครียดและความเค้น..... 129

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วงล้อมรูปเลขที่สำหรับการคัดเลือกขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	7
2.2	วงล้อมรูปเลขที่สำหรับการคัดเลือกขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	8
2.3	การครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด.....	9
2.4	การครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด.....	9
2.5	การครอสโอเวอร์หลายจุด.....	9
2.6	การดำเนินการมิวเทชัน	10
2.7	แผนผังกระบวนการคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	10
2.8	ขอบหน้าพาเรโตสำหรับปัญหาการออกแบบสองเป้าหมาย.....	12
2.9	พื้นที่ครอบงำของผลเฉลย x_1	13
2.10	การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ.....	13
2.11	ระดับของการถูกครอบงำ.....	14
2.12	แผนผังกระบวนการคำนวณขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย	15
2.13	แผนผังกระบวนการคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกครอบงำ	16
2.14	การแบ่งเอลิเมนต์ย่อย	17
2.15	การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	19
2.16	รูปร่างของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม	19
2.17	การแบ่งเอลิเมนต์บริเวณผิวโค้ง	20
2.18	การยึดจุดต่อ	21
2.19	เอลิเมนต์เชิงซ้อนมิติเดียว.....	24
2.20	เอลิเมนต์เชิงซ้อนสามเหลี่ยมสองมิติ	24
2.21	เอลิเมนต์เชิงซ้อนสามเหลี่ยมสามมิติ	25
2.22	เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติ.....	25
2.23	เอลิเมนต์สำหรับปัญหาสามมิติ	26
2.24	โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นระนาบ.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.25	เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อ.....	32
2.26	State of Stress	34
2.27	การพิจารณา Strain Energy Per Unit Volume	35
2.28	ส่วนประกอบของเกจวัดความเครียด	38
3.1	ลักษณะการทำงานของขารองตั้งเครื่องอัดไอ.....	42
3.2	ลักษณะภาระกระทำบนขารองตั้งเครื่องอัดไอ	43
3.3	รูปร่างหน้าตัดของโครงสร้างทั่วไป	43
3.4	ตัวแปรรอบแบบกรณีชิ้นงาน ไม่มีรูเจาะ	45
3.5	ตัวแปรรอบแบบกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ	45
3.6	ตัวแปรรอบแบบกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ	46
3.7	ตัวแปรรอบแบบกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ	47
3.8	ตัวอย่างการสร้างชิ้นงาน โดยโปรแกรม Ansys 10	49
3.9	ตัวอย่าง Log file ที่ได้จากการสร้างชิ้นงาน.....	49
3.10	ไฟล์ของ M-file function ในการคำนวณ	50
3.11	Flow chart ของการคำนวณ.....	51
3.12	เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา.....	52
3.13	รูปร่างของเอลิเมนต์ชนิด Solid185.....	53
3.14	การ meshing ชิ้นงาน.....	53
3.15	ขอบหน้าพารโโต	54
3.16	ข้อมูลต่างๆ ที่ถูกบันทึก ในรูปแบบของ Mat file.....	55
3.17	หลักการหา Hyper volume.....	56
3.18	การเปรียบเทียบขอบหน้าพารโโตของกรณี ไม่มีรูเจาะ	57
3.19	การเปรียบเทียบขอบหน้าพารโโตของกรณีมี 1 รูเจาะ	58
3.20	การเปรียบเทียบขอบหน้าพารโโตของกรณีมี 2 รูเจาะ	59
3.21	การเปรียบเทียบขอบหน้าพารโโตของกรณีมี 3 รูเจาะ	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.22	เกจวัดความเครียดที่ใช้ในการทดสอบ	62
3.23	เครื่องมือวัดสัญญาณความเครียด KYOWA EDX-10B	62
3.24	การติดตั้งชิ้นงาน	63
3.25	การติดตั้งเกจวัดความเครียดบนชิ้นงาน	63
3.26	การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณความเครียด KYOWA EDX-10B	64
3.27	น้ำหนักของภาระกระทำ	64
3.28	ใส่ภาระกระทำ.....	65
3.29	การอ่านค่าความเครียด	65
4.1	ขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ.....	68
4.2	ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	69
4.3	ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	69
4.4	ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	70
4.5	ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	70
4.6	ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	71
4.7	ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	71
4.8	ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	72
4.9	ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	72
4.10	ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	73
4.11	ผลเฉลยจุดที่ 10 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	73
4.12	แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 1 กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	75
4.13	แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 2 กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	75
4.14	ความไวของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ	76
4.15	ขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ	77
4.16	ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ.....	79
4.17	ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ.....	79
4.18	ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ.....	80
4.19	ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอใบนำพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.47	ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพารโธของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ..... 102
4.48	ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพารโธของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ..... 103
4.49	ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพารโธของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ..... 103
4.50	ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพารโธของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ..... 104
4.51	ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพารโธของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ..... 104
4.52	ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอบหน้าพารโธของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ..... 105
4.53	ผลเฉลยจุดที่ 10 บนขอบหน้าพารโธของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ..... 105
4.54	แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 1 กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ 107
4.55	แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 2 กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ 108
4.56	ความไวของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ 109
4.57	ชิ้นงานที่สร้างเพื่อการทดสอบ..... 110
4.58	การติดตั้งเกจวัดความเครียดทั้ง 6 จุดบนชิ้นงาน 111
4.59	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 1..... 111
4.60	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 1 ในการจำลอง 112
4.61	บริเวณที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด โหนดที่ 506..... 112
4.62	การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 1 จากโปรแกรม Ansys 10..... 113
4.63	การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 1 จากโปรแกรม Ansys 10..... 113
4.64	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 2..... 114
4.65	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 2 ในการจำลอง 115
4.66	บริเวณที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด โหนดที่ 354..... 115
4.67	การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 2 จากโปรแกรม Ansys 10..... 116
4.68	การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 2 จากโปรแกรม Ansys 10..... 116
4.69	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 3..... 117
4.70	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 3 ในการจำลอง 118
4.71	บริเวณที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด โหนดที่ 351 118
4.72	การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 3 จากโปรแกรม Ansys 10..... 119
4.73	การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 3 จากโปรแกรม Ansys 10..... 119

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.74	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 4 120
4.75	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 4 ในการจำลอง 121
4.76	บริเวณที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด โหนดที่ 347 121
4.77	การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 4 จากโปรแกรม Ansys 10 122
4.78	การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 4 จากโปรแกรม Ansys 10 122
4.79	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 5 123
4.80	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 5 ในการจำลอง 124
4.81	บริเวณที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด โหนดที่ 601 124
4.82	การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 5 จากโปรแกรม Ansys 10 125
4.83	การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 5 จากโปรแกรม Ansys 10 125
4.84	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 6 126
4.85	บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 6 ในการจำลอง 127
4.86	บริเวณที่ติดตั้งเกจวัดความเครียด โหนดที่ 654 127
4.87	การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 6 จากโปรแกรม Ansys 10 128
4.88	การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 6 จากโปรแกรม Ansys 10 128

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

f	=	ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)
x	=	เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ (Design variable vector)
L	=	ขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ (Lower bound constraints)
U	=	ขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบ (Upper bound constraints)
N	=	ขนาดของประชากร)
r_s	=	อันดับของสมาชิกตัวที่ s -th
g_i	=	เงื่อนไขบังคับสมการ
h_i	=	เงื่อนไขบังคับสมการ
u	=	การกระจัดในทิศทาง x
v	=	การกระจัดในทิศทาง y
w	=	การกระจัดในทิศทาง z
H	=	พลังงานศักย์รวม
U	=	พลังงานความเครียด
W	=	งานจากภายนอก
R	=	ค่าเรซีคิว
N_i	=	ฟังก์ชันรูปร่าง
$[K]$	=	สติฟเนสเมทริกซ์รวมของระบบ
$\{r\}$	=	เมทริกซ์รวมของปริมาณและทิศทางที่ไม่ทราบค่าที่จุดต่อ
$\{R\}$	=	เมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ
σ_x	=	ความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) ในแนวแกน x
σ_y	=	ความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) ในแนวแกน y
τ_{xy}	=	ความเค้นเฉือน (Shearing stress)
E	=	ค่าโมดูลัสของยังส์ (Young's Modulus)
ν	=	อัตราส่วนของปัวส์ซอง (Poisson's ratio)
ϵ_x	=	ความเครียด (Strain) ในแนวแกน x
ϵ_y	=	ความเครียด (Strain) ในแนวแกน y
γ_{xy}	=	ความเครียดเฉือน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\{F\}$	=	ภาระกระทำซึ่งเกิดขึ้นจากแรงค้ำที่กำหนดให้ตามขอบ
$[B]$	=	เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเสียรูป
$[C]$	=	เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
$f_1(V)$	=	ฟังก์ชันเป้าหมายของของปริมาตรชิ้นงาน
$f_2(\delta)$	=	ฟังก์ชันเป้าหมายของการโก่งตัวของชิ้นงาน
σ_{max}	=	ความเค้นค้ำสูงสุดบนชิ้นงาน
σ_{allow}	=	ความเค้นที่ยอมได้
$\sigma_{ultimate}$	=	ความเค้นที่จุดคราก
$F.S.$	=	ค่าความปลอดภัย
σ_{test}	=	ความเค้นที่ได้จากการคำนวณจากการทดสอบ
ϵ_{test}	=	ความเครียดที่วัดจากการทดสอบ
σ_{av}	=	ความเค้นเฉลี่ย
u	=	Strain Energy Per Unit Volume
u_v	=	Hydrostatic stress component
u_d	=	Distortion energy
S_y	=	Yield Strength
σ'	=	Von Mises Stress

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเครื่องปรับอากาศมีความสำคัญและมีความนิยมอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากมนุษย์ต้องการอุณหภูมิที่ตอบสนองต่อความสบายของร่างกายในสภาวะอากาศแบบต่างๆ ซึ่งในการติดตั้งเครื่องปรับอากาศแต่ละครั้งนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์หลายอย่างในการติดตั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความกว้างของพื้นที่ติดตั้ง โดยอุปกรณ์ติดตั้งที่มีความสำคัญสำหรับอาคารที่มีพื้นที่จำกัด คือ ขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน โดยขารองตั้งชุดคอยล์ร้อนจะนิยมใช้ติดตั้งในอาคารหลายชั้น เช่น โรงแรม อพาร์ทเมนต์ คอนโดมิเนียม

การพิจารณาปัญหาของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อนนั้น จำเป็นจะต้องประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมมาช่วยในการวิเคราะห์ โดยจะต้องมีการศึกษาเนื้อหาเกี่ยวกับปัญหานี้ เช่น ขนาดที่นิยมใช้ วัสดุที่ใช้ผลิต รูปร่างลักษณะของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน รวมถึงการศึกษาถึงวิธีการที่จะนำมาใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ดังกล่าว

ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับปัญหานี้ คือ เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงเงื่อนไขต่างๆของปัญหา เช่น ภาระแรงที่ขารองตั้งชุดคอยล์ร้อนได้รับ รูปร่างที่เหมาะสม การเพิ่มหรือลดรูเงาบนพื้นผิวขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน แม้กระทั่งรูปร่างที่เหมาะสมของรูเงาบนพื้นผิวขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการคำนวณและวิเคราะห์ที่ถูกต้องที่สุด

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ต้องนำความรู้และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการงานวิจัย ซึ่งวิธีการหาค่าเหมาะสมมีมากมายหลายวิธี ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการก็เป็นหนึ่งในนั้น ซึ่งขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการที่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้มากที่สุด คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยเลียนแบบหลักการวิวัฒนาการและการคัดเลือกทางธรรมชาติของกลุ่มสิ่งมีชีวิต เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งงานออกแบบโครงสร้างต่างๆ งานออกแบบไฟฟ้า กระทั่งงานระบบท่อประปา โดยวิธีดังกล่าวนี้มีข้อดี คือ ใช้งานง่าย ไม่ต้องคำนวณค่าอนุพันธ์ฟังก์ชันของผลเฉลยสามารถหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของทั้งหมดได้ มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และที่สำคัญคือวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาการออกแบบได้ทุกรูปแบบ (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556) หากนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ใช้หารูปร่างที่เหมาะสมของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อนน่าจะมี

ประโยชน์ต่อการพัฒนารูปร่างของขาของตั๊กแตนคอกยี่ร้อนได้ ทั้งนี้เพื่อที่จะได้นำผลการคำนวณและวิเคราะห์รูปร่างที่เหมาะสมนี้ไปสร้างชิ้นงานจริงเพื่อการทดสอบและเปรียบเทียบค่าความเครียดกับผลจากการคำนวณผ่านโปรแกรม Matlab r2010b และ Ansys 10

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหารูปร่างที่เหมาะสมของขาของตั๊กแตนคอกยี่ร้อน
2. เพื่อศึกษาการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithms)
3. เพื่อเปรียบเทียบผลจากการคำนวณและชิ้นงานที่สร้างจริง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ขาของตั๊กแตนคอกยี่ร้อนเป็นหน้าตัดรูปตัว C
2. ขนาดของพื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของชิ้นงาน
3. พิจารณา 4 กรณี คือ กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ, มี 1 รูเจาะ, มี 2 รูเจาะ และมี 3 รูเจาะ
4. วัสดุที่ใช้พิจารณา คือ เหล็ก SS400
5. ภาระที่กระทำเป็นแรงแบบสถิต (Static force) และกระจายทั่วขาของตั๊กแตนคอกยี่ร้อนแบบเท่ากัน
6. ภาระกระทำไม่เกิน 30 กิโลกรัม สำหรับเครื่องปรับอากาศขนาด 9,000 BTU/hr
7. ความหนาของขาของตั๊กแตนคอกยี่ร้อน คือ 3 มิลลิเมตร
8. ระยะห่างระหว่างรูเจาะกรณี 2 รูเจาะ คือ 15 เซนติเมตร และกรณี 3 รูเจาะ คือ 10 เซนติเมตร
9. ตำแหน่งในแนวตั้งของรูเจาะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรออกแบบ x_4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจและสามารถนำความรู้ไปใช้ต่อยอดและพัฒนาในด้านอื่นๆได้

1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

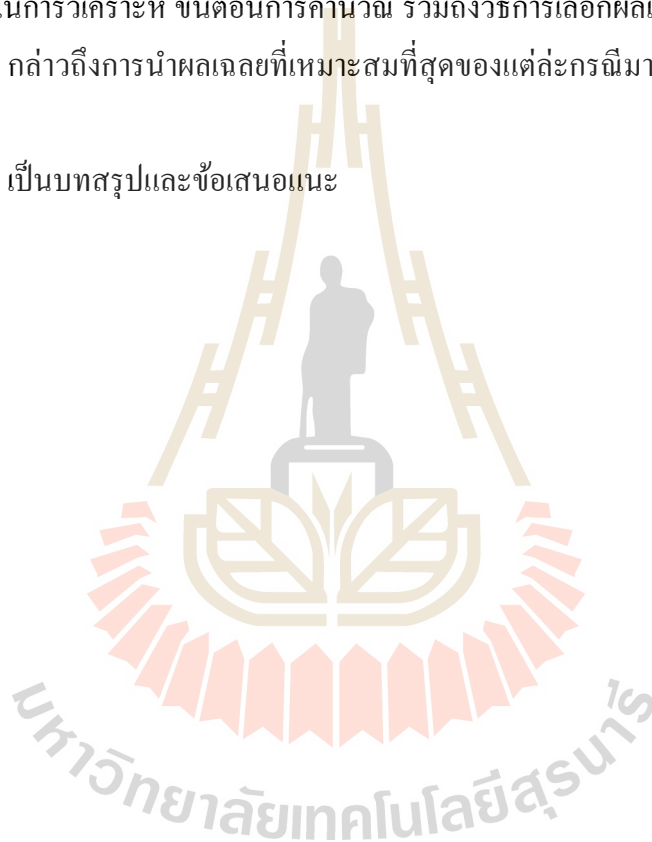
บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ตลอดจนข้อตกลง ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ฟังก์ชันเอลิเมนต์ รวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการกำหนดตัวแปรออกแบบของปัญหาในแต่ละกรณี การทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ขั้นตอนการคำนวณ รวมถึงวิธีการเลือกผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 4 กล่าวถึงการนำผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละกรณีมาสร้างเป็นรูปร่าง และการวิเคราะห์ผล

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบชุดคอยล์ร้อนมีหน้าที่รองรับภาระแรงที่กระทำโดยชุดคอยล์ร้อน โดยการออกแบบชุดคอยล์ร้อนที่มีอยู่ทั่วไปนั้นสามารถรองรับกับภาระแรงที่กระทำได้เป็นอย่างดี ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาว่าถ้าทำการเปลี่ยนรูปร่างของการออกแบบชุดคอยล์ร้อนแล้วจะสามารถรองรับภาระแรงที่กระทำได้ดีเหมือนเดิมหรือไม่ ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาหลักการด้านความแข็งแรงของวัสดุ, วิธีการหารูปร่างที่เหมาะสมและไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สุดมาช่วยในการออกแบบชุดคอยล์ร้อน

2.1 บทนำ

การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) เป็นปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ในการใช้ชีวิตประจำวันทั่วไป เช่น การเดินทางไปยังจุดหมาย เราต้องการประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินทางให้มากที่สุด ส่งผลให้ต้องคิดค้นระยะทางที่สั้นที่สุด ปัญหาเหล่านี้จัดว่าเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดรูปแบบหนึ่ง ปัญหาของการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะมีสองแบบ คือ การหาค่าน้อยที่สุด (Minimization) ดังตัวอย่างที่กล่าวไปข้างต้น ปัญหาอีกแบบ คือ การหาค่ามากที่สุด (Maximization) ยกตัวอย่างเช่น การทำให้ความเชื่อถือได้ (Reliability) ของโครงข่ายท่อประปาสูงสุด เพื่อรองรับการขยายโครงข่ายเพิ่มเติมเมื่อมีชุมชนใหม่หรือกลุ่มผู้ใช้น้ำประปาใหม่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่กล่าวมานั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ยังมีการประยุกต์ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดในงานออกแบบปัญหาในระบบทางวิศวกรรมอีกมากมาย

ลักษณะค่ากระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด คือ จะมีรูปแบบของปัญหาจะถูกกำหนดผ่านปริมาณใดๆ ที่ต้องการหาค่าน้อยที่สุดหรือมากที่สุด ปริมาณดังกล่าวเรียกว่าฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function) ซึ่งจะมีตัวแปรหรือพารามิเตอร์ในการปรับค่าเรียกว่าตัวแปรออกแบบ (Design variable) นอกจากนี้ตัวแปรออกแบบยังส่งผลต่อฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับ ทั้งเงื่อนไขบังคับในรูปแบบสมการ (Equality constraint) และเงื่อนไขบังคับในรูปแบบอสมการ (Inequality constraint) ซึ่งเงื่อนไขบังคับคือตัวบ่งชี้ว่าผลเฉลยของตัวแปรออกแบบคือค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือไม่

วิธีการหาค่าเหมาะสมมีมากมายหลายวิธี แต่ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ (Evolutionary algorithm, EA) คือ วิธีการหาค่าเหมาะสมที่เลียนแบบหรือคล้ายคลึงกับพฤติกรรม

วิวัฒนาการของระบบบางอย่างในธรรมชาติ มีข้อดี คือ ใช้งานง่าย ไม่ต้องคำนวณค่าอนุพันธ์ ฟังก์ชันของผลเฉลย สามารถหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของทั้งหมด (Global optimum) ได้ เป็นวิธีที่ทนทาน (Robust) คือ มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนหรือหยุดการคำนวณระหว่างกระบวนการน้อยมาก และที่สำคัญคือวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาการออกแบบได้ทุกรูปแบบค่าพารามิเตอร์ย่อยของวิธีการเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนได้ง่าย อย่างไรก็ตามวิธีวิวัฒนาการนี้มีข้อด้อยคือ เนื่องจากทำการประยุกต์ใช้กระบวนการสุ่มในการหาค่าเหมาะสมที่สุดทำให้วิธีการนี้มีสมรรถนะในการหาผลเฉลยต่ำ นั่นคือมีอัตราการลู่เข้า (Convergence rate) ต่ำ และการหาคำตอบของปัญหาการออกแบบเดิมหลายครั้ง ผลเฉลยที่ได้จะไม่เหมือนเดิม เนื่องจากไม่มีค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันจึงไม่สามารถตรวจสอบเงื่อนไขความเหมาะสมที่สุดได้ และไม่สามารถรับประกันได้ว่าผลที่ได้เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดจริง จึงมักเรียกคำตอบที่ได้จากวิธีนี้ว่า ผลเฉลยใกล้เคียงความเหมาะสมที่สุด (Near optimum)

2.2 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ปัญหาการออกแบบที่จะทำการประยุกต์ขั้นตอนวิวัฒนาการเพื่อหาผลเฉลย คือ ปัญหาการออกแบบที่มีเฉพาะเงื่อนไขบังคับหรือขอบเขตของตัวแปรออกแบบ หรือที่เรียกว่าเงื่อนไขบังคับแบบกล่อง (Box constraints) ปัญหาการออกแบบชนิดนี้ เรียกว่า การหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีเงื่อนไขบังคับแบบกล่อง (Box constrained optimization) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\min_x f(x) \quad (2.1)$$

โดยที่

$$L \leq x \leq U \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- f คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)
 - x คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ (Design variable vector)
 - L คือ ขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ (Lower bound constraints)
 - U คือ ขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบ (Upper bound constraints)

ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ โดยทั่วไปสามารถหาผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดนี้ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามเมื่อมีเงื่อนไขบังคับชนิดอื่น จำเป็นต้องเพิ่มกระบวนการเชิงตัวเลขเข้ามาเพื่อสามารถตัดแปลงปัญหาการออกแบบ เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิคฟังก์ชันปรับแก้ (Penalty function techniques)

กระบวนการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของวิธีการที่นำเสนอ ส่วนมากจะใช้กลุ่มของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบซึ่งนิยมเรียกว่าประชากร (Population) ในการหาคำตอบ ในกรณีของตัวแปรออกแบบจำนวนจริง ประชากรของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบสามารถเขียนแทนด้วย

$$\text{Population} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (2.3)$$

เมื่อ N คือ ขนาดของประชากรหรือจำนวนเวกเตอร์ตัวแปรที่เป็นสมาชิกของประชากร

2.3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการที่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้มากที่สุด คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นเป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยเลียนแบบหลักการวิวัฒนาการและการคัดเลือกทางธรรมชาติของกลุ่มสิ่งมีชีวิต ตามทฤษฎีวิวัฒนาการของชาร์ล ดาร์วิน กระบวนการค้นหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นจะเริ่มต้นด้วยประชากรตั้งต้น จากนั้นทำการผลิตประชากรลูกโดยการคัดเลือกคู่ของพ่อแม่ (Parent) จากสมาชิกของประชากรรุ่นปัจจุบัน (Current generation) ทั้งนี้สมาชิกผลเฉลยของตัวแปรออกแบบที่ให้ค่าฟังก์ชันเป้าหมายดีกว่าจะมีโอกาสถูกคัดเลือกมากกว่า การผลิตประชากรลูกทำได้โดยตัวดำเนินการครอสโอเวอร์ (Crossover) และการมิวเทชัน (Mutation) เมื่อได้ประชากรลูก ทำการคัดเลือกประชากรสำหรับรุ่นหรือวงวนถัดไป ดำเนินการแบบทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนครบเงื่อนไขการหยุดค้นหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด รายละเอียดของตัวดำเนินการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม มีดังนี้

2.3.1 การคัดเลือก

การดำเนินการคัดเลือก (Selection) ในที่นี้เป็นการคัดเลือกโดยใช้วงล้อรูเลทท์ (Roulette) ซึ่งแบ่งพื้นที่วงกลมแบ่งเซกเตอร์ย่อยจำนวนเท่ากับจำนวนผลเฉลยที่จะถูกเลือก ขนาดของเซกเตอร์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโอกาสในการถูกเลือกของผลเฉลยต่างๆในประชากรปัจจุบัน ในรูปแบบที่ง่ายที่สุด ค่าโอกาสในการถูกเลือกสามารถคำนวณได้จากค่าความเหมาะสมของสมาชิกในประชากร กำหนดให้ค่าความเหมาะสมที่มีค่ามากกว่าหมายถึงผลเฉลยที่ดีกว่าและควรมีโอกาสถูกเลือกมากกว่า ดังนั้นโอกาสในการถูกเลือกของผลเฉลยที่ s -th สามารถคำนวณได้จาก

$$w_s = \frac{f_s}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (2.4)$$

เมื่อ f คือ ค่าความเหมาะสม (Fitness) ของยีน (Gene) ตัวที่ i_h
 N คือ ขนาดของประชากร

กระบวนการคัดเลือกสามารถทำได้โดยการตั้งเข็มชี้ตำแหน่งที่ด้านใดด้านหนึ่งของวงล้อ จากนั้นทำการหมุนวงล้อโดยใช้แรงที่ไม่เฉพาะเจาะจงหรือแบบสุ่ม เมื่อวงล้อหยุด เซกเมนต์ที่อยู่ตรงที่เข็มชี้จะได้รับการคัดเลือก จากหลักการนี้สามารถกล่าวได้ว่า สมาชิกในประชากรที่มีค่าความเหมาะสมมากกว่า ย่อมมีโอกาสจะถูกเลือกมากกว่าเพราะมีแถบเซกเมนต์บนวงล้อใหญ่กว่าสมาชิกตัวอื่น ดังรูปที่ 2.1 แถบเซกเมนต์ g_5 มีโอกาสจะถูกเลือกมากกว่าแถบเซกเมนต์อื่นๆ เนื่องจากเป็นแถบเซกเมนต์บนวงล้อที่ใหญ่ที่สุด

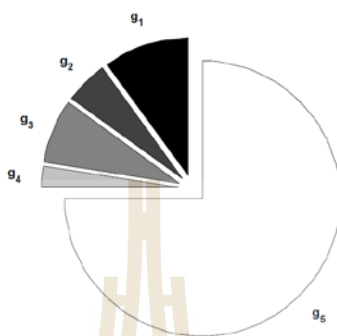


รูปที่ 2.1 วงล้อรูเล็ตท์สำหรับการคัดเลือกขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

ข้อดีของการสร้างวงล้อด้วยสมการที่ (2.4) คือ เมื่อมีสมาชิกตัวใดตัวหนึ่งในประชากรมีค่าความเหมาะสมมากกว่าสมาชิกตัวอื่นอย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจเรียกว่าเป็นสมาชิกที่ครอบงำ (dominate) เหนือตัวอื่น ดังรูปที่ 2.2 ในการหมุนวงล้อเพื่อคัดเลือกผลเฉลย g_5 มีโอกาสถูกเลือกซ้ำแล้วซ้ำอีก จะทำให้ขั้นตอนวิธีนี้ลู่เข้าสู่ผลเฉลยก่อนเวลาอันควร (Premature convergence) การแก้ข้อดีนี้สามารถทำได้โดยประยุกต์ใช้หลักการคำนวณ โอกาสของการถูกเลือกรูปแบบใหม่ ดังนี้

$$w_s = \frac{2r_s}{N(N+1)} \quad (2.5)$$

เมื่อ r_s คือ อันดับของสมาชิกตัวที่ s -th

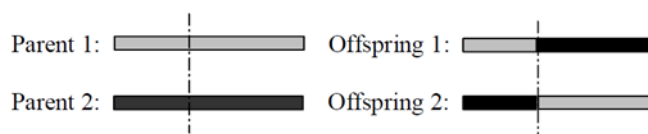


รูปที่ 2.2 วงล้อรูเลตสำหรับการคัดเลือกขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กระบวนการคัดเลือกแบบการแข่งขัน (Tournament selection) การคัดเลือกแบบนี้สามารถทำได้โดยกำหนดการแข่งขันขึ้นมาหลายๆครั้ง ในการแข่งขันแต่ละครั้งสมาชิกในประชากร n_T ตัวจะถูกคัดเลือกแบบสุ่มเพื่อมาแข่งขัน ผู้ชนะหรือผลเฉลี่ยที่อยู่ในการแข่งขันที่ให้ค่าความเหมาะสมหรือฟังก์ชันเป้าหมายที่ดีที่สุดคือผู้ถูกเลือกเข้าสู่กระบวนการครอสโอเวอร์ต่อไป การดำเนินการคัดเลือกแบบนี้เป็นกระบวนการที่ง่ายกว่าการใช้วงล้อรูเลต ถ้าค่า n_T ต่ำโอกาสในการถูกเลือกของผลเฉลี่ยที่มีค่าความเหมาะสมต่ำจะมีสูง ในทางกลับกันถ้าค่า n_T สูง โอกาสในการถูกเลือกของผลเฉลี่ยที่มีค่าความเหมาะสมต่ำจะมีน้อย

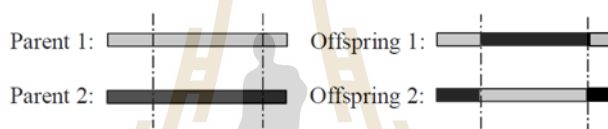
2.3.2 การดำเนินการครอสโอเวอร์

ครอสโอเวอร์ (Crossover) เป็นตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรมหลักของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เมื่อเลือกคู่ของผลเฉลี่ยพ่อ-แม่ (Parent) ได้ตามจำนวนที่ต้องการแล้ว จากนั้นทำการดำเนินการแบบครอสโอเวอร์ การดำเนินการเชิงตัวเลขนี้มีรูปแบบคล้ายกับการผสมพันธุ์ของคู่พ่อแม่ของสิ่งมีชีวิต โดยการดำเนินการครอสโอเวอร์คือการเลือกจุดตัด โครโมโซมของคู่ผลเฉลี่ยพ่อแม่โดยการสุ่ม เพื่อแยกโครโมโซมเหล่านั้นออกเป็นสองส่วนเพื่อให้กำเนิดผลเฉลี่ยลูก (Offspring) เป็นคู่ การดำเนินการครอสโอเวอร์นี้เรียกว่าการครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด (One-point crossover) ดังรูปที่ 2.3

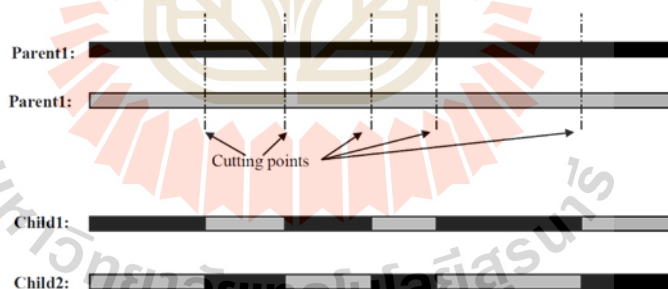


รูปที่ 2.3 การครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

จากรูปที่ 2.3 ผลเฉลยลูกชุดที่ 1 คือผลเฉลยที่มีส่วนแรกของโครโมโซมของผลเฉลยพ่อแม่ชุดที่ 1 และมีส่วนหลังของผลเฉลยพ่อแม่ชุดที่ 2 เช่นเดียวกัน ผลเฉลยลูกชุดที่ 2 จะมีผลเฉลยที่มีส่วนแรกของโครโมโซมของผลเฉลยพ่อแม่ชุดที่ 2 และมีส่วนหลังของผลเฉลยพ่อแม่ชุดที่ 1 แนวคิดแบบเดียวกันนี้สามารถดำเนินการ ครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด (Two-point crossover) ดังรูปที่ 2.4 และการครอสโอเวอร์หลายจุด (Multiple point crossover) ดังรูปที่ 2.5 ได้เช่นกัน



รูปที่ 2.4 การครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

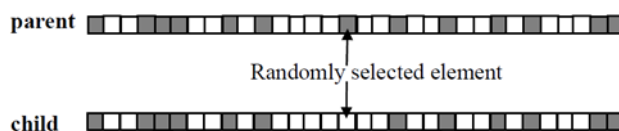


รูปที่ 2.5 การครอสโอเวอร์หลายจุด (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

2.3.3 การดำเนินการมิวเทชัน

การดำเนินการมิวเทชัน (Mutation) หรือการกลายพันธุ์ เป็นตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรมที่เลียนแบบธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต กล่าวคือ เมื่อมีการผสมพันธุ์ระหว่างคู่ของพ่อแม่ จะมีโอกาสที่ผลผลิตที่ได้คือประชากรลูกจะมีบางส่วนมีความแตกต่างไปจากอินทรีย์ของพ่อแม่ ในทางการคำนวณเชิงตัวเลข การดำเนินการนี้ถูกใช้เพื่อป้องกันการลู่เข้าสู่คำตอบก่อนเวลาอันควรที่เกิดจากการประยุกต์ใช้ตัวดำเนินการครอสโอเวอร์เพียงอย่างเดียว การเกิดมิวเทชันในผลเฉลยแบบ

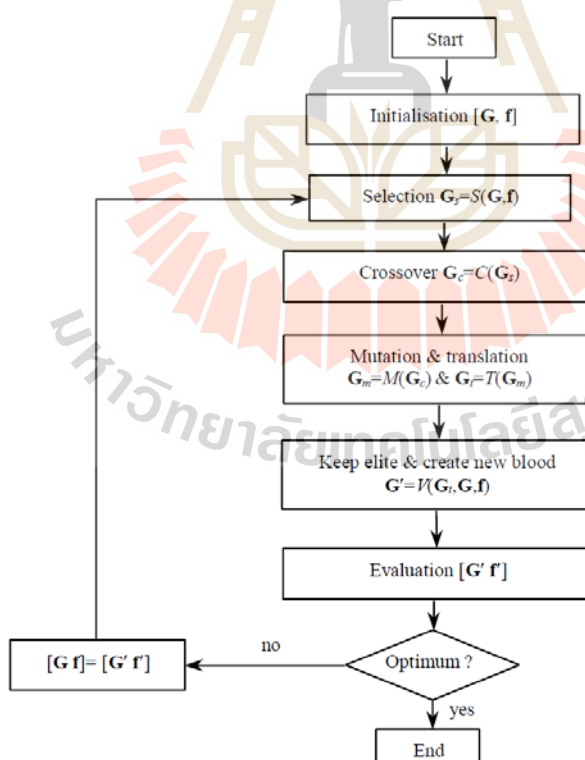
เลขฐานสอง ทำได้โดยเลือกตำแหน่งที่ต้องการเปลี่ยนแปลงยีนโดยการสุ่ม จากนั้นทำการเปลี่ยนเอลิเมนต์ที่เลือก จาก 1 เป็น 0 หรือ 0 เป็น 1 ตัวอย่างการดำเนินการมิวเทชันแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การดำเนินการมิวเทชัน (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

การดำเนินการเชิงพันธุกรรมครอสโอเวอร์และมิวเทชันจะได้รับอนุญาตด้วยค่าความน่าจะเป็นหรือเรียกว่าอัตราการครอสโอเวอร์และมิวเทชันตามลำดับ สำหรับวิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมโดยทั่วไปจะมีอัตราการครอสโอเวอร์สูงและอัตราการมิวเทชันต่ำ

กระบวนการคำนวณของขั้นตอนวิธีพันธุกรรม แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนผังกระบวนการคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

กระบวนการที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นการนำเสนอการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันเป้าหมายเพียงเป้าหมายเดียว ซึ่งวิธีนี้จะหาค่าเหมาะสมที่สุดได้กับบางปัญหา แต่ในบางปัญหาต้องการฟังก์ชันเป้าหมายเพียงมากกว่าหนึ่งฟังก์ชัน ยกตัวอย่างเช่น ผู้ออกแบบต้องการหาน้ำหนักโครงสร้างน้อยที่สุด และในขณะเดียวกันยังต้องการให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากที่สุดด้วย ปัญหาลักษณะนี้เรียกว่า การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายเป้าหมาย (Multi-objective optimization) ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งในการออกแบบระบบทางวิศวกรรม ได้มีการพัฒนาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายเป้าหมาย โดยการนำเอาองค์ความรู้มาพัฒนาเป็นขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย (Multi-objective evolutionary algorithm, MOEAs) เพื่อใช้ในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาแบบหลายเป้าหมาย ข้อดีของวิธีการนี้คือ ใช้งานง่าย สามารถหาผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้เกือบทุกรูปแบบ สามารถรันโดยไม่มีภาระการคำนวณหรือเกิดข้อผิดพลาดระหว่างกระบวนการคำนวณ และที่สำคัญที่สุด ขั้นตอนวิธีการนี้สามารถหา กลุ่มของผลเฉลยพาเรโตได้ในการรันเพียงครั้งเดียว ซึ่งความสามารถตรงนี้ทำให้วิธีการนี้ได้รับความนิยมสูง อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ก็มีข้อเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือ มีอัตราการลู่เข้าต่ำ และไม่มี ความต้องการกัน (Consistency) ในการหาผลเฉลย ทั้งนี้เพราะว่า วิธีการเหล่านี้ใช้การสุ่มเป็นหลักในกระบวนการคำนวณ

2.3.4 ขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย

ปัญหาคณิตศาสตร์สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายเป้าหมายสามารถแสดงได้ดังนี้

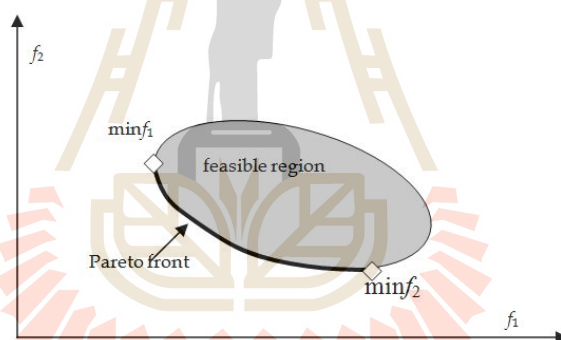
$$f = \{f_1(x), \dots, f_p(x)\} \quad (2.6)$$

โดยมีเงื่อนไขบังคับ

$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq 0 \\ h_i(x) &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

- เมื่อ
- f คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย p ค่า
 - x คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ
 - g_i คือ เงื่อนไขบังคับอสมการ
 - h_i คือ เงื่อนไขบังคับสมการ

รูปที่ 2.8 แสดงปัญหาการออกแบบเหมาะสมที่สุดที่มีสองฟังก์ชันเป้าหมาย จากรูปเป็นการพล็อตผลเฉลยทั้งหมดลงบนโดเมนของฟังก์ชันเป้าหมาย เนื่องจากผลเฉลย x ใดๆ จะให้ค่าฟังก์ชันเป้าหมาย $\{f_1, f_2\}$ ดังนั้นตำแหน่งของผลเฉลยใดๆ จะให้พิกัด (f_1, f_2) หรือจุดใดๆ บนระบบพิกัด $f_1 - f_2$ จากรูปแสดงกลุ่มของผลเฉลยที่เป็นไปได้ (Feasible solution) หรือผลเฉลยที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับทั้งหมด ด้วยพื้นที่แรเงา ดังนั้น ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองเป้าหมายนี้จะอยู่ในพื้นที่แรเงานี้ ซึ่งเรียกว่าบริเวณหาคำตอบได้ (Feasible region) เมื่อพิจารณาการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองพร้อมกันพบว่าผลเฉลยที่อยู่ที่ยอบของบริเวณคำตอบได้และอยู่บนเส้นโค้งที่ลากเชื่อมระหว่างจุด $\min f_1$ และจุด $\min f_2$ เป็นผลเฉลยที่ดีกว่าผลเฉลยอื่นๆ ในบริเวณหาคำตอบได้ และกลุ่มของผลเฉลยเหล่านี้จัดว่าเป็นผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองเป้าหมาย เรียกเซตของจุดผลเฉลยที่อยู่บนเส้นโค้งทึบในรูปนี้ว่าขอบหน้าพาเรโต (Pareto front) ส่วนเซตของผลเฉลยที่ให้ขอบหน้าพาเรโตนี้เรียกว่า เซตของผลเฉลยเหมาะสมที่สุดแบบพาเรโต (Pareto optimal set)



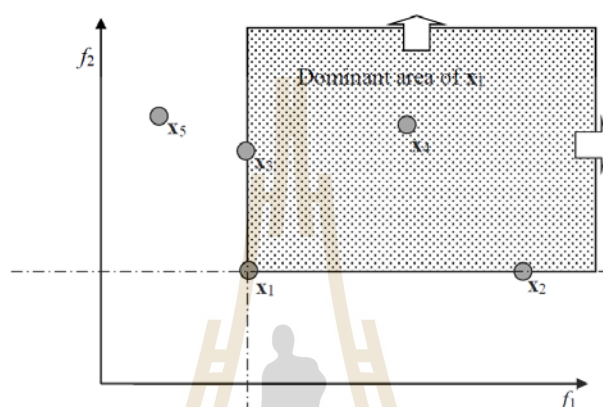
รูปที่ 2.8 ขอบหน้าพาเรโตสำหรับปัญหาการออกแบบสองเป้าหมาย (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

ขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมายมีจุดเด่นที่สุด คือ สามารถหาขอบหน้าพาเรโตของปัญหาการออกแบบได้ภายในการรันเพียงครั้งเดียว ความสามารถนี้มีขั้นตอนวิวัฒนาการและวิธีศึกษาสำนึกขั้นสูงอื่นๆ ที่ใช้กลุ่มของผลเฉลยหรือประชากรในการหาค่าเหมาะสมที่สุด เมื่อมีกลุ่มเวกเตอร์ผลเฉลย สิ่งที่เราเรียกว่าผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (non-dominated solutions) สามารถหาได้จากกลุ่มผลเฉลยนี้ เมื่อขั้นตอนวิวัฒนาการดำเนินไป เซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำจะได้รับการปรับปรุงแบบทำซ้ำจนกระทั่งได้ขอบหน้าพาเรโต

นิยามสำคัญสำหรับการค้นหาคำตอบด้วยหลักการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (non-dominated sorting) ในกรณีของการหาค่าต่ำสุดมีดังนี้ นิยาม 1 การครอบงำ (Dominance)

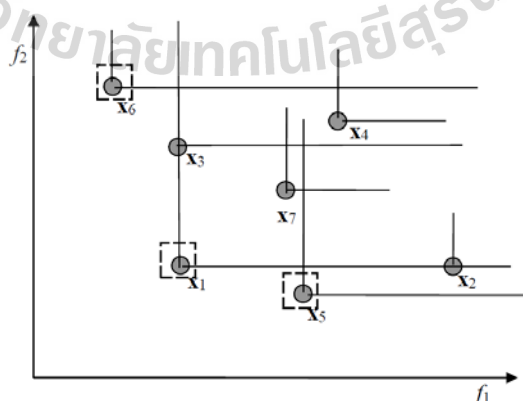
กำหนดให้ $f_i(x); i=1, \dots, p$ คือฟังก์ชันเป้าหมายถ้า $f_i(x_1) \leq f_i(x_2)$ สำหรับทุกดัชนี $i \in \{1, \dots, p\}$ และมี j อย่างน้อยหนึ่งค่าโดย $f_j(x_1) < f_j(x_2)$ สามารถสรุปได้ว่า x_1 ครอบงำ x_2

รูปที่ 2.9 แสดงผลเฉลยในโดเมนของฟังก์ชันเป้าหมายสองฟังก์ชัน แสดงให้เห็นว่าผลเฉลย x_1 ครอบงำผลเฉลย x_2, x_3, x_4 ในขณะที่ x_5 ไม่ถูกครอบงำโดย x_1



รูปที่ 2.9 พื้นที่ครอบงำของผลเฉลย x_1 (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

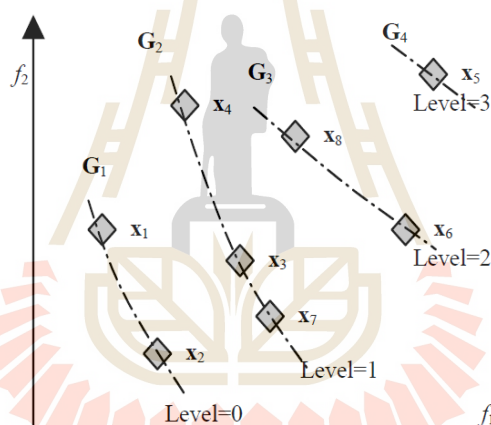
นิยาม 2 ผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ กำหนดให้ G คือเซตของผลเฉลยขนาด N , ผลเฉลย $x_c \in G$ เรียกว่าผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำใน G ถ้าไม่มีผลเฉลย $x \in G$ ใดๆ ที่ครอบงำ x_c ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ คือ x_1, x_5 และ x_6



รูปที่ 2.10 การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

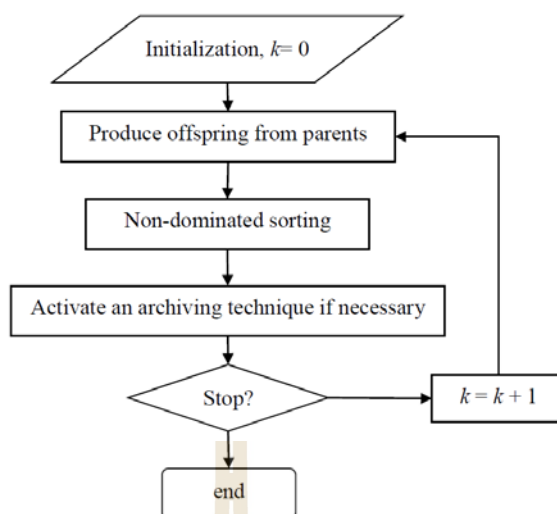
นิยาม 3 ระดับของการถูกครอบงำ (Level of being dominated) กำหนดให้ G_1 คือ เซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำของ G และ G_2 คือเซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำของ $G - G_1$ และ G_n คือเซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำของ $G - \bigcup_{i=1}^{n-1} G_i$ เราได้กล่าวว่า G_n มีระดับการถูกครอบงำเป็น $n-1$

รูปที่ 2.11 แสดงการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำของกลุ่มประชากร $G = \{x_1, \dots, x_8\} = \{G_1, G_2, G_3, G_4\}$ เมื่อ $G_1 = \{x_1, x_2\}$ มีระดับของการถูกครอบงำเป็น 0 $G_2 = \{x_3, x_4, x_7\}$ มีระดับของการถูกครอบงำเป็น 1 $G_3 = \{x_6, x_8\}$ มีระดับของการถูกครอบงำเป็น 2 และ $G_4 = \{x_5\}$ มีระดับของการถูกครอบงำเป็น 3 โดยนิยามแล้ว ถ้าลบเซตของผลเฉลย G_1, \dots, G_n ออกจากประชากร เซตของผลเฉลย G_{n+1} จะเป็นผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำของประชากรที่เหลืออยู่นั่นเอง



รูปที่ 2.11 ระดับของการถูกครอบงำ (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

กระบวนการค้นหาขอบหน้าพาเรโตของขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย ในรูปแบบต่างๆไป กระบวนการคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.12



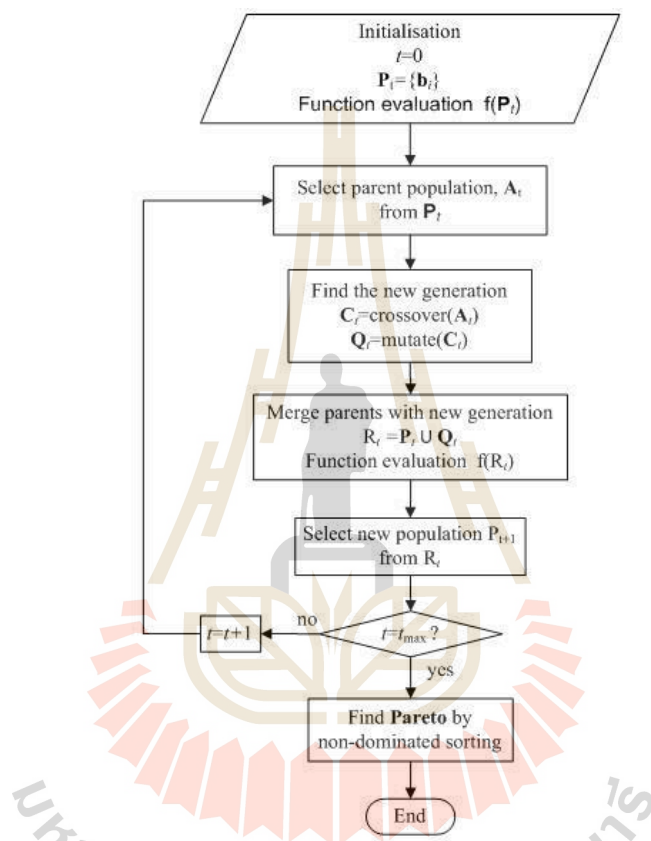
รูปที่ 2.12 แผนผังกระบวนการคำนวณขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย
(สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

ซึ่งผลเฉลยพारेโตจากการใช้วิธีนี้คือสมาชิกในหน่วยเก็บผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ ผลเฉลยนี้เรียกว่า ค่าประมาณของขอบหน้าพारेโต (Approximate Pareto front) เท่านั้น เพราะไม่มีการรับประกันว่าวิธีวิวัฒนาการจะหาขอบหน้าพारेโตที่แม่นยำได้

ในกระบวนการคำนวณของขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมาย สิ่งที่เกิดขึ้นบ่อยคือ จำนวนของผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำที่เก็บในหน่วยเก็บผลเฉลยพारेโตจะมีจำนวนมากขึ้นไป เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลขเพื่อคัดกรองผลเฉลยบางส่วนทิ้ง โดยการคัดกรองนี้อยู่ภายใต้แนวคิดที่ว่า ผลเฉลยที่ยังคงอยู่ในหน่วยเก็บผลเฉลยต้องมีความหลากหลายมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้จากกระบวนการคำนวณ เราสามารถพัฒนาขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมายขึ้นมาใหม่หรือปรับปรุงวิธีการเดิมที่มีอยู่แล้วให้ดีขึ้น โดยสามารถปรับเปลี่ยนหรือนำแนวคิดใหม่มาใช้ในขั้นตอนที่ 2. และ 4. ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงมีขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมายที่พัฒนาขึ้นมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีทั้งที่ใช้แนวคิดหรือปรัชญาใหม่ การปรับปรุงของเดิมที่มีมาก่อน และการผสมแนวคิดที่แตกต่างกันหลายแนวคิดเพื่อให้ได้สิ่งที่ดีกว่า โดยจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันเป้าหมายเพียงเป้าหมายเดียวที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ ได้อธิบายถึงวิธีที่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้มากที่สุด คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมายก็จะมีวิธีแบบเดียวกันนี้เช่นเดียวกัน เรียกว่า ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกรอบงำ (non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกครอบงำ เป็นขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมายที่นิยมใช้มากที่สุดในงานวิจัย โดยรูปแบบการค้นหาขอบหน้าพาเรโตของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกครอบงำจะไม่มีหน่วยเก็บผลเฉลยพาเรโต แต่จะเก็บผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำไว้ในเมตริกซ์ประชากร กระบวนการคำนวณแสดงดังรูปที่

2.13



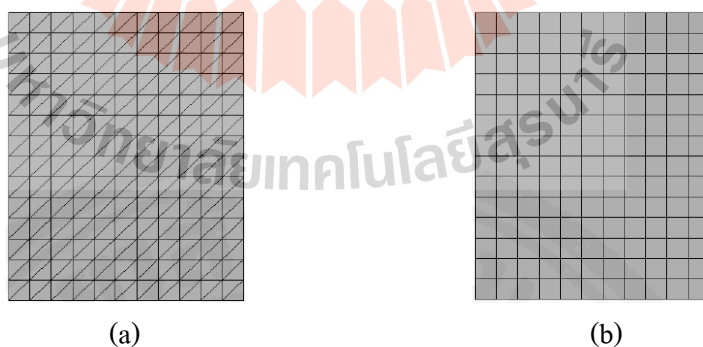
รูปที่ 2.13 แผนผังกระบวนการคำนวณขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกครอบงำ (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

2.4 ไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) และความเค้น (Stress) ของโครงสร้างอาคาร โครงสร้างสะพาน โครงสร้างอื่นๆ โครงสร้างชิ้นส่วนเครื่องจักร ที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าวัสดุที่ทำการวิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น

(Elastic) หรือสภาพยืดตัว (Plastic) นอกจากนี้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ได้อีกด้วย เช่น การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักร รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวลได้อีกด้วย

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรทั่วไปที่รูปร่างไม่ซับซ้อน สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับ คือ ผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact Solution) แต่จะมีโครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีรูปร่างซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้ง ซึ่งจะทำให้หน้าตัดของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจจะเป็นผลทำให้บางบริเวณมีการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำอย่างฉับพลัน จึงทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาคด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน เช่น รูปที่ 2.14 แสดงชิ้นส่วนย่อยเรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (Node) ของแต่ละเอลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะไม่วิเคราะห์ปัญหาที่เดียวทั้งระบบเหมือนกับวิธีทั่วไป แต่จะเป็นการวิเคราะห์หาค่าที่แต่ละเอลิเมนต์นำมารวมเข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ เช่น ในระบบโครงสร้าง จะวิเคราะห์หาการกระจัดและความเค้นของแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างของระบบ



รูปที่ 2.14 การแบ่งเอลิเมนต์ย่อย (a) เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม
(b) เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม (เดช พุทธเจริญทอง, 2548)

2.4.1 การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้าง เช่น หากการกระจัด ความเค้น การถ่ายเทความร้อน และการไหล สำหรับงานวิจัยนี้จะเน้นการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างทางกล ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยจากวิธีธรรมดาได้

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธี คือ วิธีแรง หรือวิธียืดหยุ่น (Force or Flexibility Method) และวิธีการกระจัดหรือวิธีสติฟเนส (Displacement or Stiffness Method) วิธีแรกสามารถหาแรงภายในและแรงปฏิกิริยาโดยอาศัยสมการสมดุลของแรง และสมการเงื่อนไขการกระจัด (Compatibility Equation) ส่วนวิธีที่สองจะสามารถหาการกระจัดที่สมมุติขึ้น โดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์แต่ละจุดต่อหรือที่ขอบบริเวณที่สัมผัสกัน ไม่ว่าจะก่อนหรือหลังที่ภาระกระทำก็ยังคงมีความต่อเนื่องเช่นเดิม ดังนั้นสมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการกระจัดของแต่ละจุดต่อ และค่าของการกระจัดก็สามารถจะหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการกระจัด

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น นิยมใช้วิธีการกระจัดหรือวิธีสติฟเนสหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า เนื่องจากสามารถหาสมการสมดุลและหาผลเฉลยได้สะดวกกว่า ซึ่ง โปรแกรมหรือซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้การวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวก็นิยมใช้วิธีการนี้ด้วยเช่นกัน

หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ จะแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ ซึ่งเรียกว่า ไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (Displacement Function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงกันด้วยจุดต่อ หรือเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกันและโดยอาศัยคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นส่วน สามารถหาการกระจัด ความเค้น ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆ ของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างหรือชิ้นส่วน

การสร้างและการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ดังจะกล่าวถึงต่อไปนี้

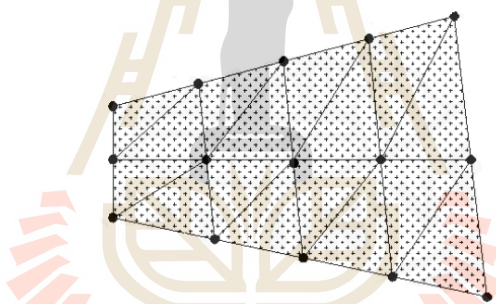
2.4.1.1 การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อยและการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อย จะต้องคำนึงถึงลักษณะของโครงสร้างเดิม คือ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือ บริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วน โคน บริเวณที่มีรู หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างเฉียบพลันก็จำเป็นที่จะต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะทำให้ผลการวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำที่สุด ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนัก ก็

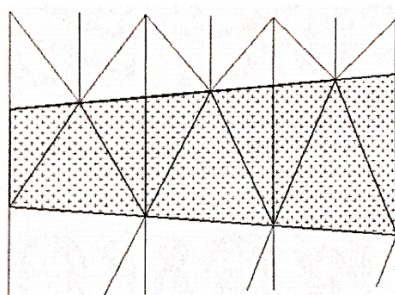
จะต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น บริเวณจุดตัดของขอบเอลิเมนต์นี้เรียกว่า จุดต่อหรือ โหนด (Nodes)

การแบ่งชิ้นส่วนอาจเริ่มแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมหรือ สามเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ๆ ก่อน แล้วจึงแบ่งออกเป็นสามเหลี่ยมย่อยอีกครั้ง ตำแหน่งของจุดต่อ ภายนอกของเอลิเมนต์ย่อยควรจะอยู่ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วนหรือ ตำแหน่งที่มีการกระแทกหรือตำแหน่งที่มีการใช้วัสดุที่ต่างกัน

การแบ่งเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมทำได้โดยการลากเส้นระหว่างจุดต่อที่ตรงข้าม ซึ่ง จุดที่เส้นตัดกันนั้นจะเป็นจุดต่อภายในของชิ้นส่วน ดังรูปที่ 2.15 และควรที่จะเลือกเส้นทแยงมุมที่สั้น ที่สุด เพราะจะทำให้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมมีสัดส่วนใกล้เคียงสามเหลี่ยมด้านเท่ามากขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 2.16 แสดงถึงรูปร่างของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่มีสัดส่วนด้านยาวที่สุดต่อด้านสั้นที่สุดมีค่า ใกล้เคียง 1 ทำให้เอลิเมนต์ที่แบ่งย่อยอีกครั้งมีรูปร่างใกล้เคียงสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งจะมีผลทำให้ผลเฉลยมีค่าใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากขึ้น

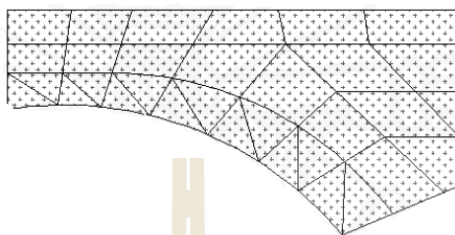


รูปที่ 2.15 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม
(เดช พุทธเจริญทอง, 2548)



รูปที่ 2.16 รูปร่างของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม (เดช พุทธเจริญทอง, 2548)

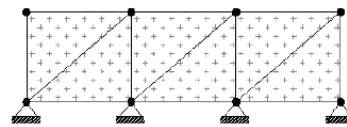
รูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงการแบ่งเอลิเมนต์บนชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน ซึ่งระยะระหว่างจุดต่อบนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม เนื่องจากการแบ่งเอลิเมนต์บริเวณผิวโค้งมีขนาดเล็ก ทั้งนี้เพราะบริเวณผิวโค้งนี้เป็นบริเวณที่มีความเค้นสูง ส่วนบริเวณที่ไกลออกไปจะแบ่งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น



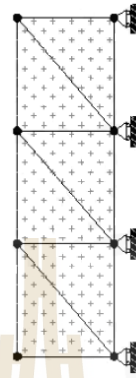
รูปที่ 2.17 การแบ่งเอลิเมนต์บริเวณผิวโค้ง (เดช พุทธเจริญทอง, 2548)

แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีจำนวนเอลิเมนต์มากเกินไป จะทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการคำนวณมากและอาจจะหาผลเฉลยของปัญหาไม่ได้ ดังนั้น จะต้องคำนึงถึงรูปร่างของโครงสร้างหรือชิ้นส่วน และภาระแรงที่กระทำก่อนที่จะทำการกำหนดการแบ่งเอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง จำเป็นจะต้องมีการกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของจุดต่อด้วย โดยทั่วไปจุดต่อที่ไม่มีเคลื่อนที่นั้นจะแทนที่ด้วยการยึดแบบสลัก (Pin connection) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (a) แต่ถ้าจุดต่อมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวจะแทนที่ด้วยการยึดแบบล้อหมุน (Roller connection) ดังแสดงในรูป 2.18 (b) ทั้งนี้การกำหนดจุดต่อให้มีการเคลื่อนที่อย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหา



(a)



(b)

รูปที่ 2.18 การยึดจุดต่อ (a) แบบสลัก (b) แบบล้อยหมุน (เดช พุทธเจริญทอง, 2548)

2.4.1.2 การเลือกฟังก์ชันที่ใช้ประมาณค่าแบบจำลอง

ขั้นตอนนี้ จะเลือกรูปร่างสำหรับการกระจายของปริมาณที่ไม่ทราบค่า คือ การเคลื่อนที่ (Displacement) หรือหน่วยแรงสำหรับการเสียรูปเนื่องจากความเค้น (Stress Deformation Problems) สำหรับฟังก์ชันการกระจายตัวภาพในเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจายที่นิยมใช้ คือ ฟังก์ชันพอลิโนเมียล (Polynomials Function) ซึ่งอาจจะเป็นกำลังหนึ่ง กำลังสอง หรือกำลังสาม ส่วนฟังก์ชันที่เป็นอนุกรมทางเรขาคณิตนั้นจะไม่นิยมใช้ เนื่องจากไม่สะดวกเท่าฟังก์ชันพอลิโนเมียล

ฟังก์ชันการกระจายที่นิยมใช้กันทั่วไป จะเป็นฟังก์ชันพอลิโนเมียลในกรณีปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันพอลิโนเมียล คือ

$$u(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n+1}x^n \quad (2.8)$$

เมื่อ $u(x)$ คือ การกระจายในทิศทาง x

a คือ สัมประสิทธิ์พอลิโนเมียล

ในกรณีปัญหาสองมิติ ฟังก์ชันนอเมียด สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \dots + a_{n+1}x^n \quad (2.9)$$

$$v(x, y) = a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}x^2 + a_{m+5}xy + a_{m+6}y^2 \dots + a_{2m}y^n \quad (2.10)$$

เมื่อ u คือ การกระจัดในทิศทาง x
 v คือ การกระจัดในทิศทาง y
 a คือ สัมประสิทธิ์พอลิโนเมียล

และ $m = \sum_{i=1}^{n+1} i$

ส่วนในกรณีปัญหาสามมิติ ฟังก์ชันพอลิโนเมียล สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5zx \dots + a_mx^n \quad (2.11)$$

$$v(x, y, z) = a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}z + a_{m+5}zx + \dots + a_{2m}z^n \quad (2.12)$$

$$w(x, y, z) = a_{2m+1} + a_{2m+2}x + a_{2m+3}y + a_{2m+4}z + a_{2m+5}zx + \dots + a_{3m}z^n \quad (2.13)$$

เมื่อ u คือ การกระจัดในทิศทาง x
 v คือ การกระจัดในทิศทาง y
 w คือ การกระจัดในทิศทาง z
 a คือ สัมประสิทธิ์พอลิโนเมียล

และ $m = \sum_{i=1}^{n+1} i(n+2-i)$

พอลิโนเมียลที่มีเทอมสูงๆ จะให้การกระจัดมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแน่นอน ตรง แต่การแก้สมการทำได้ยาก การเลือกฟังก์ชันพอลิโนเมียลจะขึ้นอยู่กับปัญหาและความละเอียดของผลเฉลยที่ต้องการ

2.4.1.3 ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงเดียว

ในกรณีของปัญหามิติเดียว เช่น ท่อนโลหะ เพลลา โครงข้อหมุน และโครงข้อแข็ง เอลิเมนต์เชิงเดียวของปัญหาเหล่านี้จะประกอบไปด้วยสองจุดต่อภายนอก ซึ่งจะสามารถแทนด้วยพอลิโนเมียลสองเทอม คือ เทอมที่เป็นค่าคงตัวและเทอมที่เป็นเชิงเส้นตรง ดังนี้

$$u(x) = a_1 + a_2x \quad (2.14)$$

ในกรณีของปัญหาสองมิติ เช่น ปัญหาความเค้น ความเครียด และปัญหา Axisymmetric เอลิเมนต์ของปัญหาเหล่านี้จะเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยสามจุดต่อที่มุมสามเหลี่ยม แต่ละจุดจะประกอบด้วยการกระจัด u และ v พอลิโนเมียลของปัญหาเหล่านี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (2.15)$$

$$v(x, y) = a_4 + a_5x + a_6y \quad (2.16)$$

สำหรับกรณีปัญหาสามมิติ เอลิเมนต์เชิงเดียว คือ เอลิเมนต์ชุนดกรวยที่ประกอบด้วยสี่จุดต่อภายนอก แต่ละจุดจะประกอบด้วยการกระจัด u , v และ w ซึ่งพอลิโนเมียลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$u(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \quad (2.17)$$

$$v(x, y, z) = a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \quad (2.18)$$

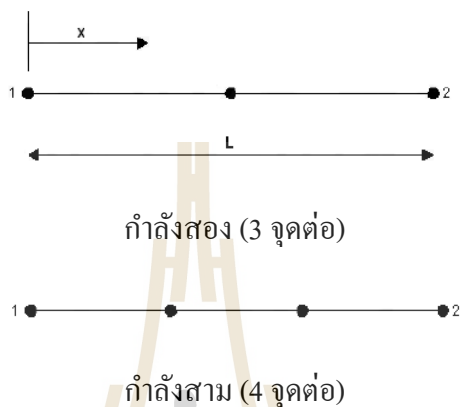
$$w(x, y, z) = a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z \quad (2.19)$$

2.4.1.4 ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อน

ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อน จะประกอบด้วยพอลิโนเมียลที่มีเทอมค่าคงตัว เทอมเชิงเส้นตรง และเทอมยกกำลัง ซึ่งเทอมยกกำลังนี้จะมีมากน้อยจะขึ้นอยู่กับ

ความซับซ้อนของปัญหา ความแตกต่างกับเอลิเมนต์เชิงเดียว คือ มีจุดต่อภายในเพิ่มขึ้นและจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์เชิงซ้อนจะมากกว่ามิติของเอลิเมนต์อย่างน้อย 1 จุดต่อ

ในกรณีปัญหามิติเดียว เอลิเมนต์เชิงซ้อนจะเป็นเอลิเมนต์ที่ประกอบไปด้วยจุดต่อภายในอย่างน้อย 1 จุดต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 เอลิเมนต์เชิงซ้อนมิติเดียว (เคช พุทธเจริญทอง, 2548)

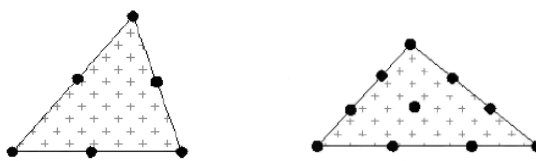
ดังนั้น ฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์เชิงซ้อนกำลังสอง (3 จุดต่อ) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \quad (2.20)$$

ในกรณีปัญหาสองมิติ เอลิเมนต์เชิงซ้อน จะแสดงในรูปที่ 2.20 และฟังก์ชันพอลิโนเมียล สามารถเขียนได้ดังนี้

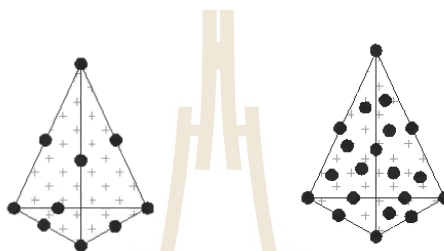
$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 \quad (2.21)$$

$$v(x, y) = a_7 + a_8x + a_9y + a_{10}x^2 + a_{11}xy + a_{12}y^2 \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.20 เอลิเมนต์เชิงซ้อนสามเหลี่ยมสองมิติ (เดช พุทธเจริญทอง, 2548)

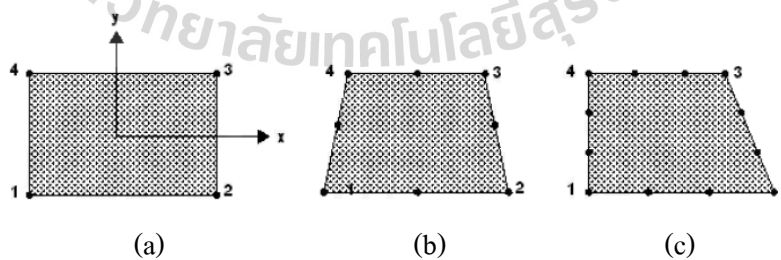
สำหรับกรณีปัญหาสามมิติ เอลิเมนต์เชิงซ้อน จะแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 เอลิเมนต์เชิงซ้อนสามเหลี่ยมสามมิติ (เดช พุทธเจริญทอง, 2548)

2.4.1.5 ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซับซ้อน

ฟังก์ชันการกระจัดสำหรับเอลิเมนต์เชิงซับซ้อน (Multiplex) จะประกอบด้วยพอลิโนเมียลที่มีกำลังสูงเช่นเดียวกับฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์เชิงซ้อน แต่ขอบเขตของเอลิเมนต์จะต้องขนานกับแกนของพิกัดรวมของระบบ ทั้งนี้เพื่อให้การกระจัดระหว่างขอบของเอลิเมนต์มีความต่อเนื่องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.22 คือเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมมุมฉาก



รูปที่ 2.22 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมสองมิติ (a) เอลิเมนต์สองมิติ (b) เอลิเมนต์กำลังสอง และ (c) เอลิเมนต์กำลังสาม (เดช พุทธเจริญทอง, 2548)

ฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์เชิงซบซ้อนเชิงเส้น สามารถเขียนได้
ดังนี้

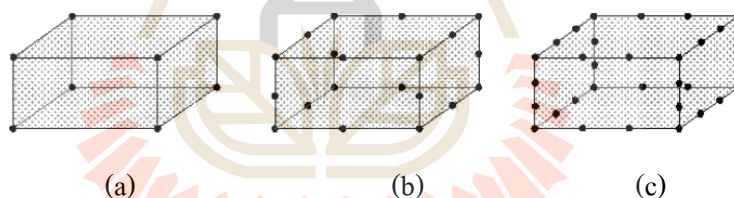
$$u(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy \quad (2.23)$$

$$v(x, y) = a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy \quad (2.24)$$

เหตุผลที่เลือกพอลิโนเมียลเทอม xy เนื่องจาก เทอม xy จะทำให้การกระจาย
ในด้าน x หรือ y มีค่าคงตัวแปรตามเชิงเส้น

สำหรับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมเชิงซบซ้อนกำลังสองสามารถแทนด้วยฟังก์ชันพอลิโนเมียลของ u และ v จำนวน 8 เทอม และกำลังสามแทนด้วยฟังก์ชันพอลิโนเมียลของ u และ v จำนวน 12 เทอม

นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์เชิงซบซ้อนที่ใช้สำหรับปัญหาสามมิติอีกด้วย ซึ่งจะมี
ความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 เอลิเมนต์สำหรับปัญหาสามมิติ (a) เอลิเมนต์เชิงเส้น
(b) เอลิเมนต์กำลังสอง และ (c) เอลิเมนต์กำลังสาม (เดช พุทธเจริญทอง, 2548)

การเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีกำลังสูง จะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำ
ยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่คาดว่าจะมีความเค้นสูง การกระจายของความเค้นไม่คงที่ ควร
จะต้องเลือกใช้เอลิเมนต์ที่มีกำลังสูงตรงบริเวณดังกล่าว

2.4.1.6 การหาสมการของเอลิเมนต์

สมการที่ครอบคลุมถึงพฤติกรรมของเอลิเมนต์ หาได้จากเทอมทั่วไป
สามารถใช้สำหรับเอลิเมนต์ทั้งหมดในโครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่สร้างขึ้น โดยหลายๆทางเลือกที่
เป็นไปได้สำหรับแหล่งที่มาของสมการของเอลิเมนต์ ส่วนมากมี 2 ทางเลือก คือ วิธีพลังงาน
(Energy Method) และวิธีเรซิดิว (Residual Method)

1) วิธีพลังงาน (Energy Method) คือ วิธีที่อาศัยหลักของงานสมมุติ (Principle of Virtual Work) หลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (Principle of Minimum Potential Energy) และทฤษฎีของแคสติเลียโน (Castigliano's Theorem) เพื่อหาสมการและสตีเฟนของเอลิเมนต์

เนื่องจากหลักการของพลังงานต่ำสุดที่สุดนั้น จะใช้หาสตีเฟนสมเมทริกซ์ได้เฉพาะปัญหาของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) เท่านั้น กล่าวคือ ถ้าการกระจัดของระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขต่อเนื่อง (Continuity) และเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของระบบและระบบอยู่ในสภาพสมดุลเสถียรภาพ (Stable equilibrium) แล้ว พลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นย่อมมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากพลังงานศักย์รวมของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น คือ ผลรวมของพลังงานความเครียดและพลังงานศักย์จากแรงภายนอกหรืองานจากภายนอก ดังสมการ

$$II = U + W \quad (2.25)$$

เมื่อ II คือ พลังงานศักย์รวม
 U คือ พลังงานความเครียด
 W คือ งานจากภายนอก

2) วิธีเรซิดิว (Residual Method) ที่นิยมใช้ทั่วไป คือ วิธีของกาเลอร์คิน (Galerkin's Method) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการหาสมการของเอลิเมนต์ และให้ผลเช่นเดียวกับวิธีพลังงาน จะนิยมใช้ในกรณีที่วิธีพลังงานไม่สะดวกใช้งาน เช่น ปัญหาการไหลของของไหล การถ่ายเทความร้อน การเคลื่อนที่มวล เป็นต้น

โดยทั่วไปฟังก์ชันโดยประมาณจะไม่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ จึงทำให้มีเรซิดิวหรือเศษเหลือเกิดขึ้น สมมุติให้สมการของระบบ คือ

$$\int R dV = \text{ค่าน้อยที่สุด} \quad (2.26)$$

เมื่อ R คือ ค่าเรซิดิว

หลักการของวิธีการนี้ คือ ทำให้เศษเหลือมีค่าน้อยที่สุด เช่น ถ้าสมมุติให้เวทฟังก์ชัน ทำให้เศษเหลือเท่ากับศูนย์ ดังเช่นสมการ

$$\int_V RWdV = 0 \quad (2.27)$$

เมื่อ W คือ ฟังก์ชันเวท

ในกรณีของเกาเลอร์คิน จะให้เวทเรชิดิวเป็นฟังก์ชันประมาณภายใน (Interpolation Functions) หรือฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Functions) ของเอลิเมนต์ สามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\int_V RN_i dV = 0 ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.28)$$

เมื่อ N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่าง

2.4.1.7 การหาสมการรวมของระบบและการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

สมการรวมของระบบ โครงสร้างสามารถหาได้จากการรวมสมการแต่ละเอลิเมนต์ ด้วยวิธีพลังงาน และวิธีเรชิดิว โดยอาศัยหลักการของการสมดุลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์และการต่อเนื่องของโครงสร้าง สามารถหาสมการรวมของระบบ โครงสร้างในรูปแบบเมทริกซ์ ดังนี้

$$[K]\{r\} = \{R\} \quad (2.29)$$

เมื่อ $[K]$ คือ สติเฟเนสเมทริกซ์รวมของระบบ

$\{r\}$ คือ เมทริกซ์รวมของปริมาณและทิศทางที่ไม่ทราบค่าที่จุดต่อ

$\{R\}$ คือ เมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ

2.4.1.8 การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าตัวแปรเบื้องต้น

การจัดสมการ algebraic ที่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปสามารถจัดได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 K_{11}r_1 + K_{12}r_2 + \dots + K_{1n}r_n &= R_1 \\
 K_{21}r_1 + K_{22}r_2 + \dots + K_{2n}r_n &= R_2 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 K_{n1}r_1 + K_{n2}r_2 + \dots + K_{nn}r_n &= R_n
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

สมการเหล่านี้สามารถเป็นการแก้ปัญหาโดยใช้วิธี Well-known Gaussian Elimination หรือ วิธีกระทำซ้ำ (Iterative Method) ตอนจบของขั้นตอนนี้ เรียกว่า ตัวแปรเบื้องต้น (Primary Unknowns) เนื่องจากปรากฏขึ้นในการวิเคราะห์เชิงปริมาณลำดับที่หนึ่ง หากนำปัญหาที่เป็นการสร้างขึ้นโดยใช้ความเค้น (Stress) ที่ไม่ทราบค่าความเค้นนี้ว่า Primary Quantities

2.4.1.9 การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าตัวแปรลำดับที่สอง

หลายๆ ครั้งที่การวิเคราะห์เชิงปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นและการวิเคราะห์เชิงปริมาณในลำดับ Secondary Unknowns จำเป็นต้องใช้การคำนวณจากการวิเคราะห์เชิงปริมาณลำดับ Primary Unknowns ในกรณีปัญหาการเสียรูปเนื่องจากความเค้น (Stress deformation) ปัญหาเช่นนี้สามารถกลายเป็นความเครียด (Strain) ความเค้น (Stress) โมเมนต์ (Moment) และแรงเฉือน (Shear force)

2.4.1.10 การแปลความหมายของผลสรุป

ขั้นตอนสุดท้ายและเป้าหมายที่สำคัญเป็นการลดลงของผลลัพธ์จากการใช้กระบวนการวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลลัพธ์ที่เป็นปกติสามารถหาได้ในการแสดงผลลัพธ์ทางคอมพิวเตอร์ โดยสามารถเลือกขอบเขตช่วงวิกฤตของชิ้นส่วนหรือโครงสร้างที่เป็นจุดสนใจ และสั่งให้เขียนแผนภาพการเคลื่อนที่ (Displacement) และความเค้น (Stress) ได้ ทั้งนี้เมื่อผลลัพธ์แสดงออกมาแล้วไม่ถูกต้อง สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือมิติของโครงสร้างให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

2.5 การวิเคราะห์ความแข็งแรงบนโครงสร้าง

2.5.1 การวิเคราะห์ปัญหาของแข็ง

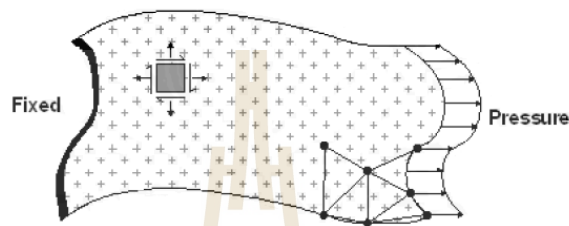
ปัญหาของแข็งแบบยืดหยุ่นได้ (Elasticity problems) นับได้ว่าเป็นปัญหาแรกๆ ที่ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากสาเหตุที่ว่า งานออกแบบเพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ในยุคก่อนล้วนเกี่ยวกับ โครงสร้างที่มีรูปร่างซับซ้อน

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการแก้ปัญหาของแข็งแบบยืดหยุ่นได้ในสองมิติ จะเริ่มจากการแสดงสมการเชิงอนุพันธ์ของความสมดุลในแผ่นระนาบรูปลักษณะใดๆ การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตชนิดต่างๆ การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกัน พร้อมกับไฟไนต์เอลิ

เมตริกซ์ซึ่งเป็นการนำไปใช้สร้างเป็นสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ปัญหาที่อาจมีรูปร่างลักษณะซับซ้อนเช่นใดก็ได้

2.5.1.1 สมการเชิงอนุพันธ์

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งแสดงความสมดุลของแรงในแนวแกน x และ y บนแผ่นระนาบ เมื่อไม่คิดน้ำหนักดังรูปที่ 2.24 คือ



รูปที่ 2.24 โดเมนและเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นระนาบ (สุดตะนันท์ โสวานิตย์, 2553)

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (2.32)$$

เมื่อ σ_x คือ ความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) ในแนวแกน x
 σ_y คือ ความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) ในแนวแกน y
 τ_{xy} คือ ความเค้นเฉือน (Shearing stress)

ในกรณีของแผ่นบางซึ่งเป็นปัญหาความเค้นในระนาบ (Plane stress) ค่าความเค้นในแนวแกน z หรือ σ_z ในแนวตั้งฉากถูกสมมติให้เป็นศูนย์ ส่วนค่าความเค้นย่อยต่างๆ สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของค่าความเครียดย่อย (Strain components) ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

- เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus)
 ν คือ อัตราส่วนของปัวส์ซอง (Poisson's ratio)
 ε_x คือ ความเครียด (Strain) ในแนวแกน x
 ε_y คือ ความเครียด (Strain) ในแนวแกน y
 γ_{xy} คือ ความเครียดเฉือน

ค่าความเครียดย่อยเหล่านี้สามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบของการเสีรูป u และ v ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ได้ดังนี้

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.34)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.35)$$

และ $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.36)$

สำหรับปัญหาที่มีค่าความเครียดในแนวแกน z ถูกสมมติให้มีค่าเป็นศูนย์ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (2.31), (2.32), (2.34), (2.35) และ (2.36) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดย่อยและค่าการเสีรูป ยังคงใช้ได้เช่นเดิม ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นย่อยและค่าความเครียดย่อย ดังแสดงในสมการ (2.33) ต้องเปลี่ยนสมการดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.37)$$

ดังนั้น หากเป็นการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องตระหนักถึงชนิดของปัญหาก่อนทำการวิเคราะห์ว่าเป็นแบบ Plane stress หรือ Plane strain ก่อน รวมถึงเงื่อนไขขอบเขต ดังภาพที่ 2.24 ประกอบด้วยการยึดแน่น (Fixed support) หรือปล่อยอิสระ (Free end) รวมทั้งอาจกำหนดแรงดัน (Pressure) ซึ่งแทนแรงที่กระทำต่อพื้นที่ตลอดขอบเขตนั้นๆ

2.5.1.2 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Equations) สามารถสร้างขึ้นจากสมการ (2.31) และ (2.32) โดยประยุกต์ระเบียบวิธีเรซิดิว (Method of Weighted Residuals) ก่อให้เกิดสมการในรูปแบบของอินทิเกรต (Integral Form) บนพื้นที่ของเอลิเมนต์ การเลือกใช้เอลิเมนต์ต่างกันจะนำไปสู่ไฟไนต์เอลิเมนต์เมทริกซ์ในรูปแบบที่ต่างกันไป เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมประกอบด้วย 3 จุดต่อ ดังรูปที่ 2.25 จัดได้ว่าเป็นเอลิเมนต์พื้นฐานที่สะดวกในการสร้างไฟไนต์เอลิเมนต์

ลักษณะการกระจายของค่าการเสียรูป u และ v บนเอลิเมนต์ถูกสมมติให้อยู่ในรูปแบบแผ่นเรียบ (Flat plate) ดังสมการ

$$u(x, y) = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 \quad (2.38)$$

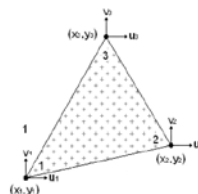
$$v(x, y) = N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 \quad (2.39)$$

ค่า N_i , $i = 1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันการประมาณค่าภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Functions) ซึ่งก็คือ

$$N_i(x, y) = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (2.40)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม
 a_i , b_i และ c_i นั้นขึ้นอยู่กับพิกัด (Coordinate) x_i และ y_i ที่จุดต่อ i

ค่าพื้นที่และสัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถคำนวณได้โดยตรงจากตำแหน่งของจุดต่อ ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากสร้างรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว



รูปที่ 2.25 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อ (สุตตะนนท์ โสวณิชย์, 2553)

หลังจากประยุกต์ระเบียบวิธีเรขาคณิตเข้ากับสมการเชิงอนุพันธ์ (2.31) และ (2.32) และใช้การกระจายของการเสียรูปสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ตามสมการ (2.38) , (2.39) และ (2.40) ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนี้

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (2.41)$$

เมื่อ $[K]$ คือ เมตริกซ์ของความแข็งแกร่ง
 $\{F\}$ คือ ภาระกระทำซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดันที่กำหนดให้ตามขอบ

โดยที่ $[K] = [B]^T [C] [B] tA$ (2.42)

เมื่อ $[B]$ คือ เมตริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเสียรูป
 $[C]$ คือ เมตริกซ์ขนาด 3x3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
 สำหรับกรณี Plane stress หรือ Plane strain ตามลำดับ
 t คือ ความหนาของแผ่นระนาบ

โดยที่ $[B] = \frac{1}{2A} \begin{pmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{pmatrix}$ (2.43)

เวกเตอร์ $\{\delta\}$ ในสมการ (2.41) ประกอบด้วยค่าการเสียรูป u และ v ที่จุดต่อทั้งสาม ดังสมการที่ (2.44)

$$\{\delta\} = [u_1 v_1 \quad u_2 v_2 \quad u_3 v_3] \quad (2.44)$$

หลังจากสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ได้ถูกสร้างขึ้นแล้ว จึงนำสมการเหล่านี้มารวมกัน เพื่อให้เกิดระบบสมการรวม จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้น ลงในระบบสมการรวมดังกล่าว ก่อนทำการแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าการเสียรูป u และ v

เมื่อทราบค่าการเสียรูป u และ v ของทุกๆ จุดต่อแล้ว จึงหาความเครียดย่อย ϵ_x , ϵ_y และ γ_{xy} โดยใช้สมการ (2.37) และ (2.40) แล้วจึงหาความเค้นย่อย σ_x , σ_y และ τ_{xy}

โดยใช้สมการ (2.34), (2.35) และ (2.36) หรือ (2.38) และ (2.39) สำหรับกรณี Plane stress หรือ Plane strain ตามลำดับ ซึ่งความเค้นย่อยสามารถจัดเป็นสมการสั้นๆได้ ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [C][B]\{\delta\} \quad (2.45)$$

2.6 ทฤษฎีความเสียหาย

ในงานวิจัยจะเลือกใช้ทฤษฎีความเสียหาย Maximum Distortion Energy หรือ Von Mises Yield Condition ทฤษฎีนี้จะพิจารณาความเค้นเฉือน แต่มองลึกลงไปที่ Total Elastic Energy ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Dilatational Elastic Energy) และส่วนที่ทำให้เกิดการผิดรูปจากความเค้นเฉือน (Distortion Elastic Energy) ทฤษฎีนี้ใช้หลักการ superposition ในการพิจารณาความเค้น พิจารณาเอาลิเมนต์ที่ได้รับความเค้นหลักทั้งสามแกนและกำหนดให้ (ปิยวัฒน์ วัชรวัฒนากุล , 2554)

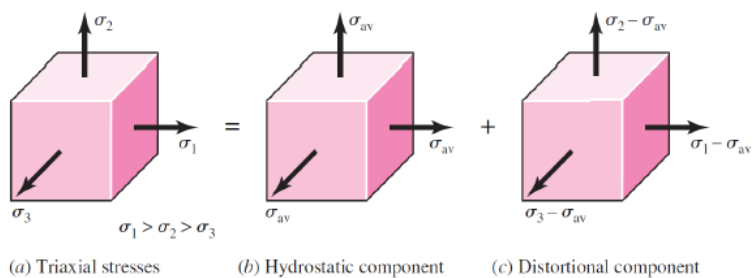
$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.46)$$

เมื่อ σ_{av} คือ ความเค้นเฉลี่ย
 σ_1 คือ ความเค้นในทิศทางแกน x
 σ_2 คือ ความเค้นในทิศทางแกน y
 σ_3 คือ ความเค้นในทิศทางแกน z

พิจารณาความเค้นหลักในรูปแบบเวกเตอร์

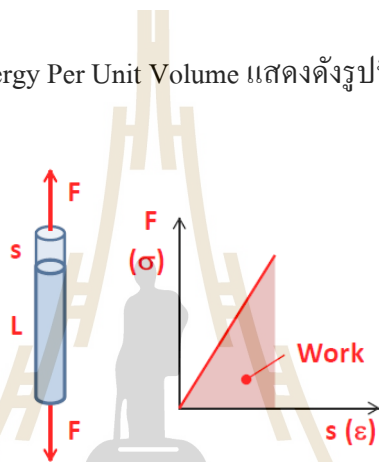
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{av} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{av} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{av} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_{av} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - \sigma_{av} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - \sigma_{av} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

สมการที่ (2.47) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 State of stress (Richard G. Budynas , 2011)

การพิจารณา Strain Energy Per Unit Volume แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การพิจารณา Strain Energy Per Unit Volume

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.27 จะได้อันนี้

$$u = \int F ds = \int \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma \tag{2.48}$$

พิจารณา Strain Energy Per Unit Volume ของเอลิเมนต์ หรือสมการที่ (2.47) เทอมแรก โดยวิธี Superposition จะได้

$$u = \frac{1}{2} [\varepsilon_1 \sigma_1 + \varepsilon_2 \sigma_2 + \varepsilon_3 \sigma_3] \tag{2.49}$$

เมื่อ	u	คือ Strain Energy Per Unit Volume
	ε_1	คือ ความเครียดในทิศทางแกน x
	ε_2	คือ ความเครียดในทิศทางแกน y
	ε_3	คือ ความเครียดในทิศทางแกน z

จากกฎของฮุก (Hooke's Law)

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}\quad (2.50)$$

เมื่อประยุกต์กฎของฮุก จะได้

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2.51)$$

เมื่อพิจารณา Hydrostatic stress component หรือสมการที่ (2.47) เทอมที่สอง จะได้

$$u_v = \frac{3\sigma_{av}^2}{2E} (1 - 2\nu) \quad (2.52)$$

เมื่อ	u_v	คือ Hydrostatic stress component
-------	-------	----------------------------------

แทนค่าจากสมการ (2.46) จะได้

$$u_v = \frac{1 - 2\nu}{2E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_3\sigma_1) \quad (2.53)$$

เมื่อพิจารณา Distortion energy หรือสมการที่ (2.47) เทอมที่สามจะได้

$$u_d = u - u_v = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (2.54)$$

เมื่อ u_d คือ Distortion energy

จากการทดสอบการทดสอบ Tension ที่จุดคราก เมื่อ $\sigma_1 = S_y$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ดังนั้น

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (2.55)$$

เมื่อ S_y คือ Yield Strength

ดังนั้น ชิ้นงานจะถึงจุดครากเมื่อ

$$\frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \geq \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (2.56)$$

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y \quad (2.57)$$

ซึ่ง Von Mises Stress คือ

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.58)$$

ดังนั้น ชิ้นงานจะถึงจุดครากเมื่อ

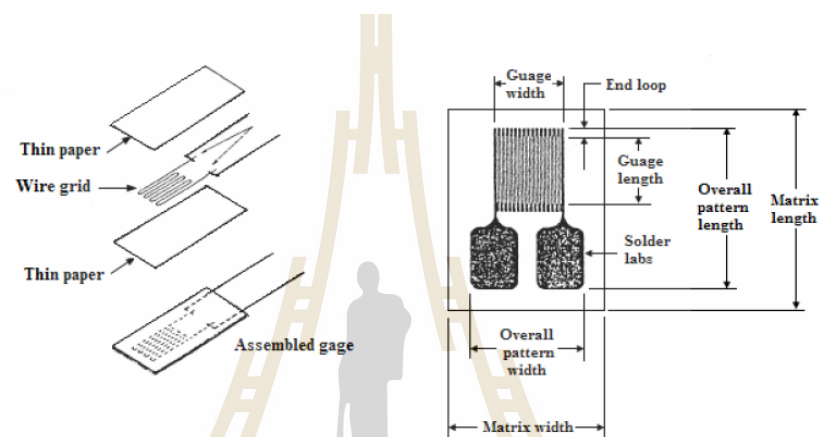
$$\sigma' \geq S_y \quad (2.59)$$

เมื่อ σ' คือ Von Mises Stress

ดังนั้นในงานออกแบบต้องออกแบบให้ค่า Von Mises Stress ต่ำกว่าค่า Yield Strength เพื่อป้องกันการวิบัติของชิ้นงาน

2.7 เกจวัดความเครียด

เกจวัดความเครียด (Strain gauge) เป็นอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าพฤติกรรมของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด โดยส่วนประกอบของเกจวัดความเครียดแสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ส่วนประกอบของเกจวัดความเครียด (รศ. ร. อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์, 2555)

2.7.1 การหาค่าความเค้น

การหาค่าความเค้นจากความเครียดที่อ่านค่าจากเกจวัดความเครียดนั้น จะต้องมีการทบทวนเป็นไปตามการติดตั้งเกจวัดความเครียด ซึ่งสามารถหาได้จากกฎของฮุก (Hooke's law) ดังสมการ

$$\sigma_{test} = E\varepsilon_{test} \quad (2.60)$$

เมื่อ σ_{test} คือ ความเค้นที่ได้จากการคำนวณจากการทดสอบ
 ε_{test} คือ ความเครียดที่วัดจากการทดสอบ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นอกจากงานวิจัยด้านการหารูปร่างที่เหมาะสม โครงสร้างคานจะใช้ขั้นตอนวิธีคำนวณเชิงพันธุกรรมในการคำนวณแล้ว ยังได้มีการนำขั้นตอนวิธีคำนวณเชิงพันธุกรรมประยุกต์ร่วมกับเทคนิคหรือวิธีอื่นๆ และยังสามารถใช้คำนวณกับโครงสร้างอื่นๆ ได้ ดังเช่น งานวิจัยที่จะเสนอต่อไปนี้

Sujin Bureerat and Jumlong Limtragool (2006) ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหาทอพอโลยีโครงสร้าง (Structural Topology) ที่เหมาะสมที่สุด 4 โครงสร้าง คือ Cantilever plate, Michell-type plate, 2D bridge และ Plate with the hole โดยใช้ขั้นตอนวิธีการแบบวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm, EA) 4 วิธี คือ Genetic Algorithm, GA , Stud-Genetic Algorithm, Stud-GA , Population-Based Incremental Learning, PBIL และ Simulated Annealing, SA ร่วมกับเทคนิค 1-0 Binary Variables กำหนดเป็น DSV1 และ Approximate Density Distribution, ADD กำหนดเป็น DSV2 เป้าหมาย คือ ความหนาแน่นของโครงสร้างน้อยที่สุด และป้องกันการ Checkerboard โครงสร้าง การคำนวณแบ่งเป็น 4 กรณี 4 การคำนวณ กรณีแรก คือ การคำนวณบนโครงสร้าง Cantilever plate คำนวณชุดแรกด้วย GA และ PBIL โดยใช้ DSV1 คำนวณชุดสองด้วย GA และ PBIL โดยใช้ DSV2 คำนวณชุดสามด้วย Stud-GA และ SA โดยใช้ DSV1 และคำนวณชุดที่สี่ด้วย Stud-GA และ SA โดยใช้ DSV2 กรณีถัดมานั้นทำการคำนวณเช่นเดียวกันเพียงแต่เปลี่ยนโครงสร้างที่ใช้คำนวณเป็น Michell-type plate, 2D bridge และ Plate with the hole ตามลำดับ ผลจากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าวิธี SA โดยใช้ DSV2 จะลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ ยกเว้นกรณีแรกที่วิธี SA โดยใช้ DSV1 จะลู่เข้าหาคำตอบได้ดีกว่า และการหาคำตอบของปัญหาทอพอโลยีนั้น การใช้ Mutation เป็นตัวหลักจะดีกว่าการใช้ Crossover เป็นตัวหลักโดย GA แต่การลด Population และเพิ่มรอบการคำนวณทำให้วิธี GA ได้คำตอบที่ดีขึ้น

Tadeusz Burczynski and Grzegorz Kokot (2003) ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหารูปร่างของโครงสร้างทางกลที่เหมาะสมที่สุด 3 แบบ คือ Cantilever Beam, Support และ Rectangular Plate โดยใช้ขั้นตอนวิธีการแบบวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm, EA) คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ร่วมกับวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ (Boundary Element Method, BEM) การคำนวณของ Cantilever Beam มีฟังก์ชันเป้าหมาย คือ Complementary energy น้อยที่สุด เงื่อนไขบังคับ คือ ปริมาตรของโครงสร้างจะต้องเป็นไปตามที่กำหนด การคำนวณของ Support มีฟังก์ชันเป้าหมาย คือ พื้นที่ต่อน้อยที่สุด เงื่อนไขบังคับ คือ ระยะเวลาการจัดเนื่องจากภาระแรงต้องไม่เกินที่กำหนด และการคำนวณของ Rectangular Plate มีฟังก์ชันเป้าหมาย คือ Complementary energy น้อยที่สุด เงื่อนไขบังคับ คือ ปริมาตรของโครงสร้างต้องคงที่ การคำนวณของ Cantilever

Beam เมื่อทำการเพิ่มช่องว่างในโครงสร้างจะทำให้ Complementary energy ลดลงและคำตอบที่ได้เหมาะสมกว่ากรณีที่ไม่เพิ่มช่องว่างในโครงสร้าง แต่จำนวนรอบในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน การคำนวณของ Support และ Rectangular Plate เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการคำนวณของ Cantilever Beam คือ เมื่อเพิ่มช่องว่างในโครงสร้างจะทำให้พื้นที่และ Complementary energy ลดลง และได้คำตอบที่เหมาะสมกว่าในกรณีที่ไม่เพิ่มช่องว่างในโครงสร้าง

Faez Ahmed, Bishakh Bhattacharya and Kalyanmoy Deb (2012) ได้เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหาทอพอโลยี (Topology) ที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ขั้นตอนวิธีการแบบวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm, EA) คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ร่วมกับเทคนิค Constructive Solid Geometry, CSG โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 2 กรณี กรณีแรกคือการศึกษาเกี่ยวกับ Cantilever system มีภาระแรงกระทำปลายคาน กรณีที่สองคือการศึกษาเกี่ยวกับ Supported system มีภาระแรงกระทำกลางคาน ทั้งสองกรณีใช้ฟังก์ชันเป้าหมายคือ ค่าความยืดหยุ่น (Compliance) น้อยที่สุดและเงื่อนไขบังคับคือปริมาตรต้องไม่เกินร้อยละ 50 จากปริมาตรเริ่มต้น ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB และ ABAQUS ในการคำนวณ โดยการคำนวณจะได้ผลที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข คือ มีปริมาตรเกินร้อยละ 50 จากปริมาตรเริ่มต้น ผู้วิจัยได้ใช้วิธี Constructive Geometry Topology Optimization Method, CG-TOM ผลแสดงให้เห็นว่าทอพอโลยีของ Cantilever system และ Supported system มีความเหมาะสมและเป็นไปตามเงื่อนไขบังคับ

Eisuke Kita and Hisashi Tanie (1997) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง ซึ่งผู้วิจัยยกตัวอย่างโครงสร้างคานยื่น (Cantilever Beam) ที่มีภาระแรงกระจายตลอดความยาวของคาน โดยผู้วิจัยเลือกใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) และวิธีบาวนด์ารีเอลิเมนต์ (Boundary Element Method, BEM) ร่วมกับเทคนิค Free-form Deformation, FFD ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดฟังก์ชันเป้าหมายคือ พื้นที่น้อยที่สุด และกำหนดเงื่อนไขบังคับคือ ความเค้นสูงสุด (Maximum Stress) จะต้องไม่เกินความเค้นที่โครงสร้างสามารถรับได้ (Allowable Stress) และไม่เกิดการตัดกันของรูปร่างหน้าตัดขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนา GA ขึ้นมาเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีพื้นฐาน 4 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกใช้วิธีพื้นฐานคือ วิธีครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด (one-point Crossover) ขั้นตอนที่สองคือการปรับเปลี่ยนขั้นตอนการคำนวณของขั้นตอนแรก ซึ่งได้แนวโน้มคำตอบดีกว่าวิธีแรกแต่ใช้จำนวนรอบการคำนวณ BEM ที่มากกว่า ขั้นตอนที่สามคือ การนำวิธีครอสโอเวอร์แบบอื่นมาใช้เพิ่มเติมคือ วิธีครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด (two-point Crossover) และ Uniform Crossover โดยวิธี Uniform Crossover มีแนวโน้มคำตอบที่ดีกว่าแบบวิธีครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด และ 2 จุด ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำ Directed Mutation มาแทนที่ Mutation แบบเดิมจาก 3 ขั้นตอนแรก พบว่าขั้นตอนที่ 4 สามารถให้คำตอบที่ดีกว่าขั้นตอนที่ 1 ซึ่งเป็นวิธีพื้นฐานอย่างชัดเจน

Wei Lu and Pentti Mäkeläinen (2007) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของ Hat-Shaped Cold-Formed โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ร่วมกับ Augment Lagrange multiplier method , ALM โดยพิจารณาตัวแปรออกแบบ คือ ตัวแปรที่กำหนดขนาด ความหนา และมุมของหน้าตัดขวางของ Hat-Shaped Cold-Formed และมีภาระแรงกระจายกระทำตลอดความยาว โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายคือ น้ำหนักของ Hat-Shaped Cold-Formed น้อยที่สุด พิจารณาเงื่อนไขบังคับที่อ้างอิงจากมาตรฐาน Eurocode 3 Part 1.3 โดยมาตรฐานดังกล่าวจะเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างเหล็กของโซนยุโรป ซึ่งเงื่อนไขที่กำหนดจะมีสองกลุ่มคือ กลุ่มเงื่อนไขรูปทรง (Geometrical constraints) และกลุ่มเงื่อนไขความแข็งแรง (Strength constraints) โดยเปรียบเทียบ 2 กรณี คือ แบบไม่วิเคราะห์และวิเคราะห์ Fabrication constraint กรณีแรกจะกำหนดค่า penalty factor เท่ากับ 10 , 50 และ 100 ค่าตอบจะผันผวนในช่วงแรกจากนั้นลู่เข้าค่าที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาจะได้ค่าความกว้างที่เหมาะสม คือ 862.9 mm แต่กรณีที่ 2 จะกำหนดความกว้าง คือ 1000 mm ค่า penalty factor เท่ากับ 50 เป็น inequality constraint ค่า penalty factor เท่ากับ 100 เป็น equality constraint โดยกรณีที่ 2 นี้ ค่าตอบจะลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมช้ากว่ากรณีแรก แต่ได้คำตอบที่เป็นไปตาม Fabrication constraint

2.8 สรุป

การจากเหตุผลต่างๆ ที่ได้กล่าวมา เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นขั้นตอนวิวัฒนาการที่เป็นที่รู้จักมากที่สุดและนิยมใช้มากที่สุด รวมถึงในงานวิจัยต่างๆเกี่ยวกับการหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของ โครงสร้างคานที่ผ่านมา พบว่าโดยส่วนใหญ่จะใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นขั้นตอนวิธีหลักในการวิเคราะห์และคำนวณ ในงานศึกษาวิจัยนี้จึงมีแนวคิดว่า หากนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้หารูปร่างที่เหมาะสมของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อนน่าจะมีประโยชน์ต่อการพัฒนารูปร่างของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อนได้เป็นอย่างดี

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

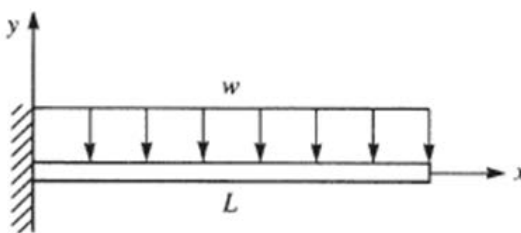
ในบทนี้ได้นำเสนอการหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของขาโครงตั้งชุดคอยล์ร้อนด้วยวิธีการขั้นตอนวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมายที่ใช้วิธีการค้นหาคำตอบด้วยหลักการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ โดยใช้โปรแกรม MATLAB Version R2010a และ Ansys 10 เป็นเครื่องมือในการออกแบบ วิเคราะห์ และคำนวณผลของค่าฟังก์ชันเป้าหมายของรูปร่างขาโครงตั้งชุดคอยล์ร้อนเพื่อให้ได้รูปร่างที่เหมาะสมที่สุด และผลลัพธ์จากการคำนวณดังกล่าวไปสร้างชิ้นงานจริงเพื่อการทดสอบ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 การหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของขาโครงตั้งชุดคอยล์ร้อน

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหา ต้องเริ่มจากสังเกตจากรูปร่างและลักษณะการใช้งานของขาโครงตั้งชุดคอยล์ร้อนดังรูปที่ 3.1 ทำให้ทราบว่าชนิดของคานที่จะใช้ในการพิจารณา คือ คานยื่น (Cantilever beam) ที่มีภาระแรงกระทำแบบกระจายสม่ำเสมอ (Uniform distributed load) ดังแสดงในรูป 3.2

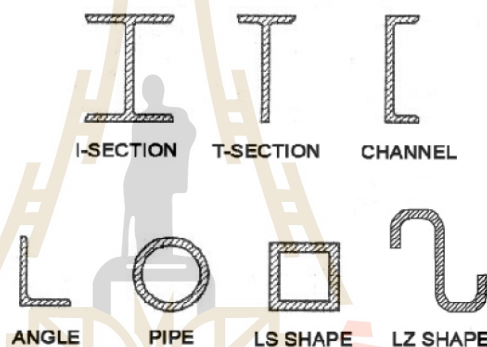


รูปที่ 3.1 ลักษณะการทำงาน of ขาโครงตั้งชุดคอยล์ร้อน



รูปที่ 3.2 ลักษณะภาระกระทำบนขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน

การพิจารณาปัญหาจำเป็นจะต้องกำหนดรูปร่างหน้าตัดของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน โดยรูปร่างหน้าตัดทั่วไปของโครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปร่างหน้าตัดของโครงสร้างทั่วไป (Federico M. Nadela and Jose Ernie C. Lope, 2009)

โดย (Federico M. Nadela and Jose Ernie C. Lope, 2009) ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการเปรียบเทียบรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างคานหน้าตัดสามแบบ คือ คานหน้าตัดรูปตัว C คานหน้าตัดรูปตัว T และคานหน้าตัดรูปตัว I ใช้ขั้นตอนวิธีคำนวณแบบวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm, EA) วิธีขั้นตอนวิธีคำนวณเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า คานหน้าตัดรูปตัว C ได้ขนาดหน้าตัดที่น้อยกว่าคานหน้าตัดรูปตัว T และ คานหน้าตัดรูปตัว I เป็นผลให้คานหน้าตัดรูปตัว C มีน้ำหนักของวัสดุโครงสร้างน้อยกว่า

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้หน้าตัดแบบ Channel หรือหน้าตัดรูปตัว C ในการวิเคราะห์ปัญหา

3.1.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย

การพิจารณาารองตั้งเครื่องอัดไอน้ำสำหรับการคำนวณสมบัติทางกลของารองตั้งชุดคอยล์ร้อนนั้น จะใช้การหลักการคำนวณแบบเดียวกับการคำนวณของคาน ซึ่งสมบัติทางกลที่สามารถใช้การคำนวณรูปร่างที่เหมาะสมของคานนั้น จะประกอบไปด้วย ความเค้นดัด (Bending stress) และ ระยะโก่งตัว (Deflection) ของคาน (Ali Khazae and Hossein Miar Naimi, 2011) ได้กำหนดฟังก์ชันเป้าหมายเป็นแบบสองเป้าหมาย (Bi objective function) คือ พื้นที่หน้าตัดและระยะการโก่งของคานน้อยที่สุด พิจารณาเงื่อนไขบังคับ คือ ความเค้นดัดบนคานไม่เกินกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ พิจารณาตัวแปรออกแบบ คือ ตัวแปรที่กำหนดขนาดของหน้าตัดขวางของคานรูปตัว I และมีภาระแรงกระทำบนคานทั้งแนวตั้งและแนวขวางหน้าตัด และเลือกใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกครอบงำรุ่นที่สอง (non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA II) ผลการศึกษาทำให้ได้ขอบหน้าพาเรโตที่เป็นชุดคำตอบที่เหมาะสมจำนวน 3 ชุด ซึ่งผลจากชุดคำตอบทั้งสามชุดนั้นแสดงให้เห็นว่าพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นทำให้ระยะการโก่งและความเค้นดัดบนคานน้อยลง ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขบังคับของงานวิจัยข้างต้นมาประยุกต์เข้ากับการหารูปร่างที่เหมาะสมของารองตั้งชุดคอยล์ร้อนได้ สามารถเขียนฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับงานวิจัยได้ดังนี้

$$\min_x f(x) = \min_x (f_1(V), f_2(\delta)) \quad (3.1)$$

เมื่อ x คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ

$f_1(V)$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมายของปริมาณชิ้นงาน

$f_2(\delta)$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมายของการโก่งตัวของชิ้นงาน

3.1.2 ตัวแปรออกแบบ

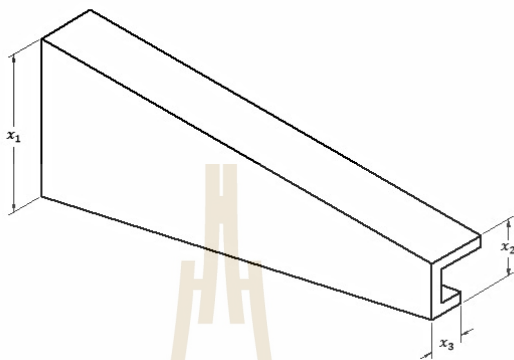
ตัวแปรออกแบบ คือ กลุ่มของตัวแปรตั้งต้นของปัญหาหรืออาจเรียกได้ว่า เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ ดังแสดงในสมการที่ (3.2)

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T \quad (3.2)$$

ในการคำนวณหารูปร่างที่เหมาะสมนั้นตัวแปรออกแบบที่กำหนด คือ ระยะต่างๆ บนชิ้นงาน ซึ่งการกำหนดตัวแปรออกแบบสำหรับงานวิจัย จะเป็น 4 แบ่งกรณี ดังนี้

3.1.2.1 กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

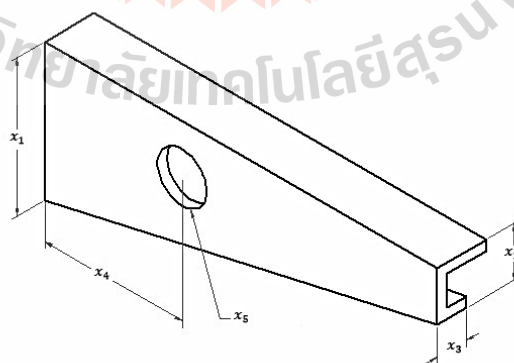
สำหรับตัวแปรอกแบบในกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะนั้น จะกำหนดทั้งหมด 3 ตัวแปร ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร คือ ตัวแปรของระยะความยาวของขนาดชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวแปรอกแบบกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

3.1.2.2 กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

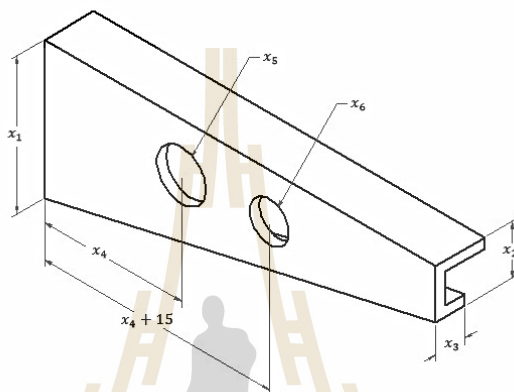
สำหรับกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะนั้น การกำหนดตัวแปรอกแบบจะคล้ายกับกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ แต่จะมีการเพิ่มตัวแปรอกแบบที่บอกขนาดและตำแหน่งของรูเจาะเพิ่มขึ้น ทำให้กรณีนี้จะมีตัวแปรอกแบบทั้งหมด 5 ตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวแปรอกแบบกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

3.1.2.3 กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

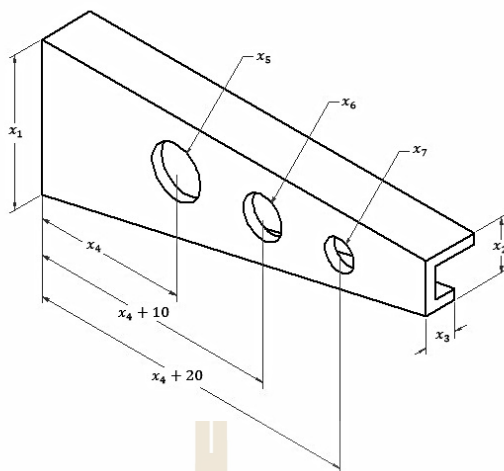
สำหรับกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะนั้น การกำหนดตัวแปรออกแบบก็จะคล้ายกับสองกรณีก่อนหน้านี้ แต่จะมีการเพิ่มตัวแปรออกแบบที่บอกขนาดของรูเจาะที่ 2 และการกำหนดระยะห่างระหว่างรูเจาะทั้งสองเท่ากับ 15 เซนติเมตร ซึ่งทำให้กรณีนี้จะมีตัวแปรออกแบบเพิ่มขึ้นมาจากกรณี 1 รูเจาะ 1 ตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวแปรออกแบบกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

3.1.2.4 กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

สำหรับในกรณีสุดท้าย คือ กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ การกำหนดตัวแปรออกแบบก็จะคล้ายกับสามกรณีที่ผ่านมา แต่จะมีการเพิ่มตัวแปรออกแบบที่บอกขนาดของรูเจาะที่ 3 และการกำหนดระยะห่างระหว่างรูเจาะทั้ง 3 เท่ากับ 10 เซนติเมตร ทำให้ในกรณีสุดท้ายนี้จะมีตัวแปรออกแบบทั้งสิ้น 7 ตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวแปรรอกแบบกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

3.1.3 เงื่อนไขบังคับ

เงื่อนไขบังคับสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ความเค้นดัดบนชิ้นงานไม่เกินกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$g(x) = \sigma' = \sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{allow}} \quad (3.3)$$

เมื่อ σ_{\max} คือ ความเค้นดัดสูงสุดบนชิ้นงาน

σ_{allow} คือ ความเค้นที่ยอมได้

ซึ่งหาคำนิยามค่าความเค้นที่ยอมได้ (Allowable stress) นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.4)

$$\sigma_{\text{allow}} = \frac{\sigma_{\text{ultimate}}}{F.S.} \quad (3.4)$$

เมื่อ σ_{ultimate} คือ ความเค้นที่จุดคราก

$F.S.$ คือ ค่าความปลอดภัย

โดยการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบถึงการกำหนดค่าความปลอดภัยตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าความปลอดภัย

ชนิดของแรงที่กระทำ	ค่าความปลอดภัย	
	เหล็กเหนียว	เหล็กหล่อ
แรงอยู่นิ่ง	3-4	5-6
แรงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา	8	10
แรงกระแทกอย่างหนัก	10-15	15-20

ที่มา: วุฒิชัย เครื่องถมยา (2011)

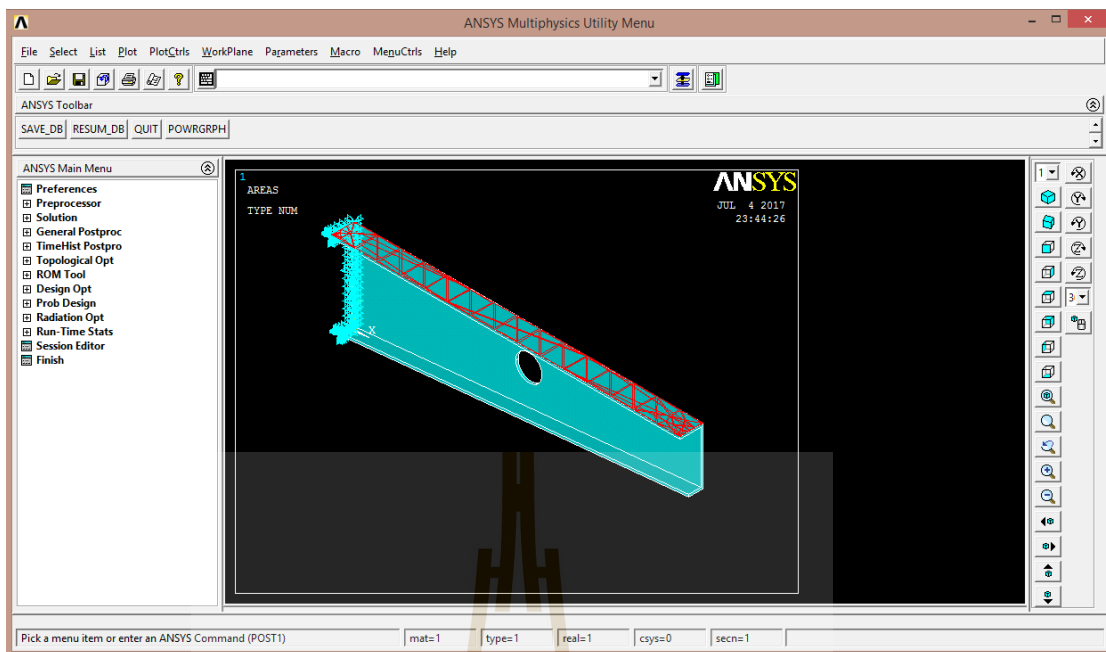
จากขอบเขตของงานวิจัย แรงที่กระทำเป็นแรงแบบสถิตหรือแรงอยู่นิ่งและวัสดุที่ใช้ คือ เหล็ก SS400 ซึ่งเป็นเหล็กเหนียว ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3 มาใช้ในการคำนวณหาความเค้นที่ยอมได้ ซึ่งจากสมการที่ (3.4) จะได้

$$\sigma_{\text{allow}} = \frac{245(10^6)}{3} = 81.67 \text{MPa}$$

ซึ่งความเค้นตัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในการคำนวณ โครงสร้างชิ้นงานจะถูกจำกัดไม่ให้เกินค่าความเค้นที่ยอมได้

3.2 การทำงานของโปรแกรม

ในงานวิจัยจะใช้การทำงานร่วมกันสองโปรแกรม คือ โปรแกรม Ansys 10 และโปรแกรม MATLAB R2010b ซึ่งกระบวนการทำงานทำได้โดยการสร้างชิ้นงานและใส่ภาระกระทำขึ้นโดยโปรแกรม Ansys 10 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 หลังจากนั้นทำการใช้ Log file ที่เกิดจากชิ้นงานที่สร้างขึ้นผ่านโปรแกรม Ansys 10 ดังแสดงในรูป 3.9 นำไปประยุกต์เข้ากับโปรแกรม MATLAB R2010b ทั้งนี้เพื่อให้โปรแกรม MATLAB R2010b สามารถนำค่าที่กำหนดเป็นตัวแปรออกแบบนำมาคำนวณหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดได้



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการสร้างชิ้นงาน โดยโปรแกรม Ansys 10

จากรูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างการสร้างชิ้นงาน โดยโปรแกรม Ansys 10 สำหรับกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ ซึ่งตัวแปรรอกที่กำหนดคนั้นได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.2.2 แล้ว โดยบริเวณเส้นสีแดงด้านบน ชิ้นงาน คือ บริเวณที่เกิดภาวะกระทำเนื่องจากน้ำหนักของเครื่องอัดไอ ซึ่งได้กำหนดให้เท่ากับ 30 กิโลกรัม ตามขอบเขตของงานวิจัย และบริเวณจุดสี่ฟ้าด้านซ้ายสุดของชิ้นงาน คือ บริเวณที่เป็นจุดยึดของชิ้นงานกับผนัง

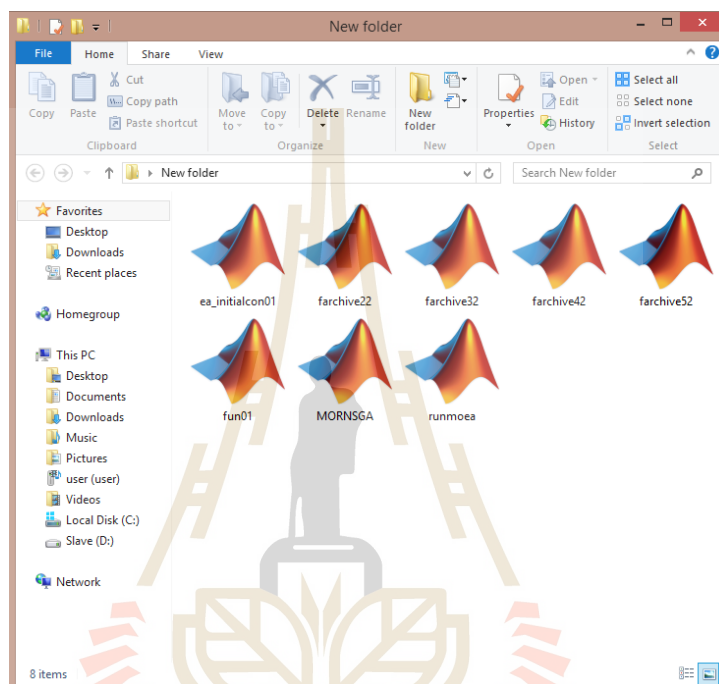
```

File Edit Format View Help
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural
!*
/PREP7
!*
ET,1,SOLID185
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,200E9
MPDATA,PRXY,1,,0.26
K,1,0,0,0,
K,2,0.45,0.05,0,
K,3,0.45,0.12,0,
K,4,0,0.12,0,
FLST,2,4,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
A,P51X
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1

```

รูปที่ 3.9 ตัวอย่าง Log file ที่ได้จากการสร้างชิ้นงาน

จากรูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่าง Log file ที่ได้จากการสร้างชิ้นงาน โดยโปรแกรม Ansys 10 ซึ่งเนื้อหาภายใน Log file จะระบุวิธีการที่ใช้สร้างชิ้นงานจากเริ่มกระบวนการจนจบกระบวนการสร้างชิ้นงาน โดยจะต้องนำ Code จาก Log file นี้ไปประยุกต์เข้ากับโปรแกรม MATLAB เพื่อให้โปรแกรม MATLAB คำนวณค่าตัวแปรออกแบบเพื่อหาค่าฟังก์ชันเป้าหมายของปัญหาโดยการ ใช้ M-file function ดังแสดงในรูป 3.10



รูปที่ 3.10 ไฟล์ของ M-file function ในการคำนวณ

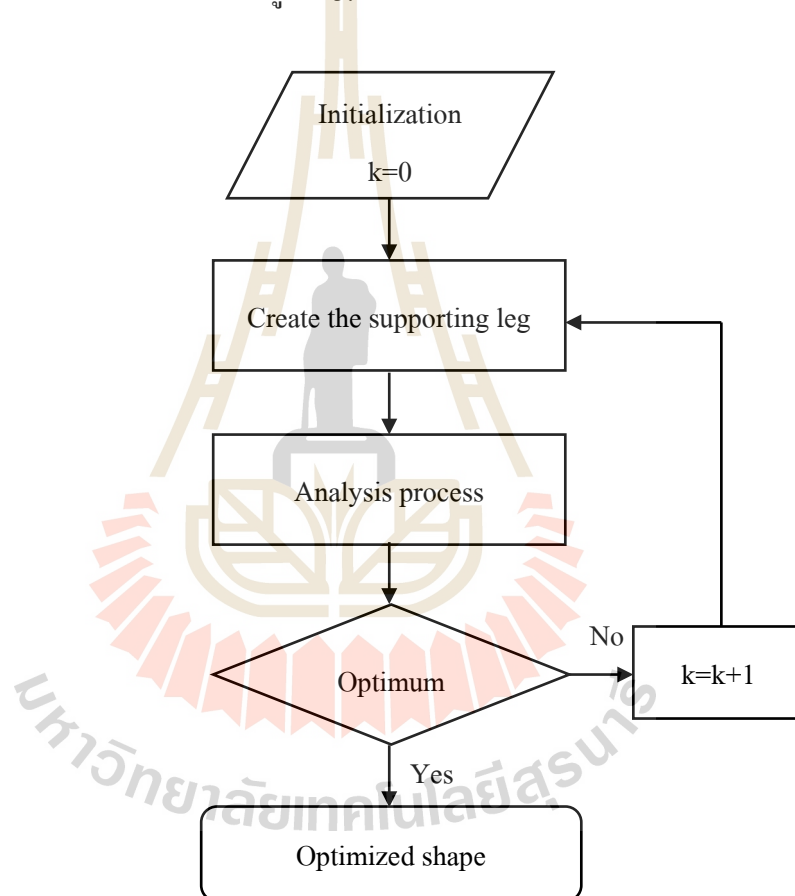
จากรูปที่ 3.10 แสดงไฟล์ของ M-file function ซึ่งแต่ละไฟล์ถูกเขียนให้มีหน้าที่การทำงานแตกต่างกันไป แต่ละไฟล์สามารถเชื่อมโยงกัน เพื่อใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลที่ต้องการ ซึ่งจะยกตัวอย่างไฟล์มีหน้าที่สำคัญ ดังนี้

- 1) ไฟล์ fun01 คือ โปรแกรมหลัก (Main program) ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลเพื่อหารูปปร่างที่เหมาะสมที่สุด โดยโปรแกรมหลักจะคำนวณค่าต่างๆ ที่สำคัญสำหรับปัญหา คือ ตัวแปรออกแบบ ฟังก์ชันเป้าหมาย รวมไปถึงการตรวจสอบเงื่อนไขบังคับที่กำหนดอีกด้วย
- 2) ไฟล์ MORNSGA คือ โปรแกรมสำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย
- 3) ไฟล์ ea_initialcon01 คือ โปรแกรมสำหรับเก็บค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นการคำนวณ

4) ไฟล์ runmoea คือ โปรแกรมที่ใช้เรียกการรัน โดยจะเป็นโปรแกรมที่เชื่อมโยงข้อมูลกับโปรแกรมทั้งหมดที่ใช้คำนวณ รวมถึงการกำหนดจำนวนประชากรที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งประชากรที่กล่าวมา คือ จำนวนรอบในการคำนวณ (Number of loop , nloop) และ จำนวนของผลเฉลยต่อรอบ (Number of solution , nsol)

และยังมีไฟล์โปรแกรมของ M-file function อื่นๆที่ไม่ได้กล่าวถึง โดยแต่ละไฟล์จะมีหน้าที่ในการทำงานที่แตกต่างกันไป ซึ่งโปรแกรมจะไม่สามารถทำงานถ้ามีไฟล์หายไป ดังนั้นทุกไฟล์จึงมีความสำคัญในการคำนวณหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด

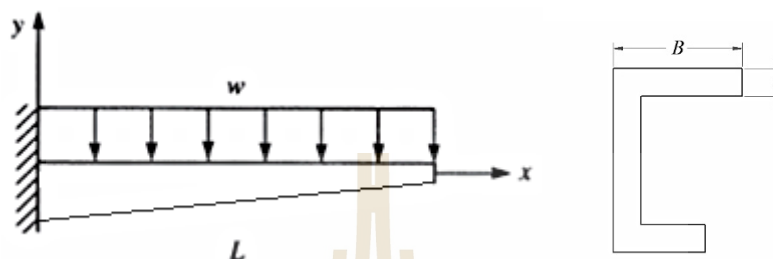
ขั้นตอนวิธีการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 Flow chart ของการคำนวณ

3.3 การจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) สำหรับการคำนวณนั้นจะใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบเดียวกันทั้ง 4 กรณี ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 3.12 โดยจำนวนตัวแปรออกแบบของปัญหาทั้ง 4 กรณีนั้นได้แสดงอยู่ในหัวข้อที่ 3.1.2 แล้ว



รูปที่ 3.12 เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

โดยค่า w คือค่าภาระกระทำกับชิ้นงานโดยวัดจากน้ำหนัก 30 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อทำการคำนวณน้ำหนักดังกล่าวให้อยู่ในรูปของภาระกระทำแบบกระจายจะได้เท่ากับ 22 kPa ค่า L ได้ทำการกำหนดให้เท่ากับ 45 เซนติเมตร ค่า B ได้กำหนดให้เท่ากับ 3 เซนติเมตร และค่าความหนาหรือ t ของชิ้นงานได้กำหนดเท่ากับ 3 มิลลิเมตร

ค่าคุณสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุ

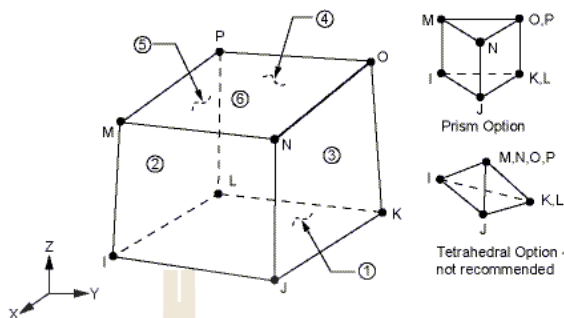
วัสดุ	SS400
Young's Modulus (GPa)	190-210
Tensile Strength (MPa)	400-510
Yield Strength (MPa)	205-245
Poisson's Ratio	0.26

ที่มา: <http://www.meadinfo.org> (2010)

การใช้งานโปรแกรม Ansys 10 สำหรับการคำนวณ ขั้นตอนที่สำคัญมีดังนี้

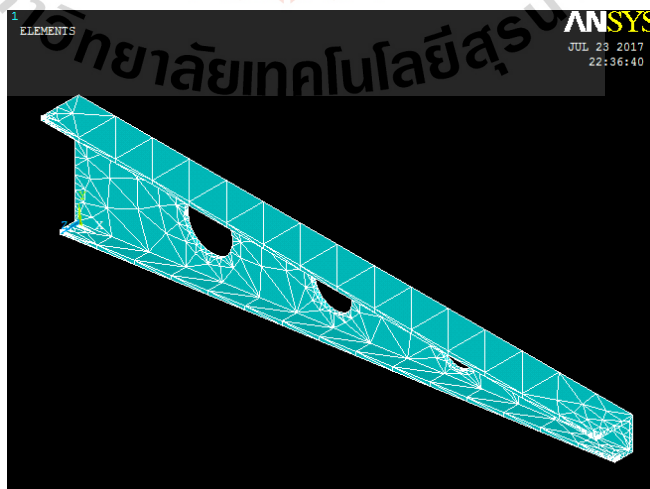
- 1) การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ ซึ่งการคำนวณได้ทำการเลือกเอลิเมนต์ชนิด Solid185 เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสมสำหรับปัญหาโครงสร้าง 3 มิติ ซึ่งในหนึ่งเอลิเมนต์จะประกอบไป

ด้วย 8 โหนด แต่ละโหนดสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งทิศทางแกน x, y และ z ซึ่งลักษณะของเอลิเมนต์จะแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 รูปร่างของเอลิเมนต์ชนิด Solid185 (Ansys 10)

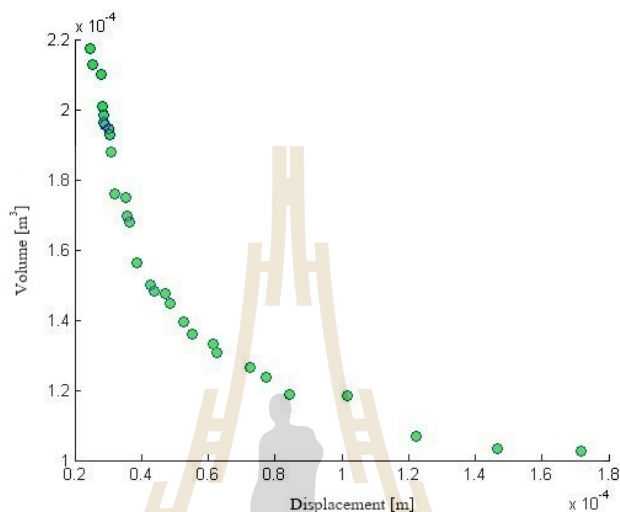
- 2) การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดวัสดุให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) และมีคุณสมบัตินี้เหมือนกันในทุกทิศทางหรือเรียกอีกอย่างได้ว่า Isotropic material
- 3) การสร้างชิ้นงานเพื่อนำ Log file ไปประยุกต์ใช้ดังที่ได้กล่าวไปในหัวข้อที่ 3.2
- 4) การ meshing ซึ่งในการคำนวณจะเลือก meshing แบบ free-mesh โดยแต่ละเอลิเมนต์เป็นรูปทรงสี่หน้า ซึ่งในการ meshing นี้ ยังมีจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นก็จะทำให้ได้คำตอบที่ละเอียดและตรงมากขึ้นด้วย แต่อาจจะใช้ระยะเวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วยเช่นกัน ตัวอย่างชิ้นงานที่ถูก meshing แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การ meshing ชิ้นงาน

3.4 การแสดงผลการคำนวณ

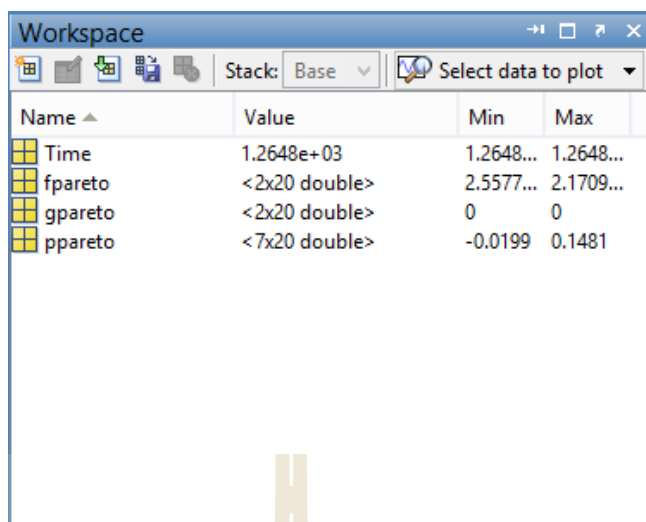
ผลการคำนวณของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองเป้าหมายนั้น จะแสดงอยู่ในรูปของกราฟเส้นโค้ง หรือขอบหน้าพารेटอ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งจะแสดงเป็นกลุ่มหรือเซตของคำตอบบนเส้นโค้ง คำตอบดังกล่าวคือ รูปร่างที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.15 ขอบหน้าพารेटอ

จากรูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างขอบหน้าพารेटอของปัญหาที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งปัญหาในงานวิจัย คือ การทำให้ปริมาตรและการโก่งตัวของชิ้นงานน้อยที่สุด ฉะนั้นเซตของคำตอบจะต้องมีแนวโน้มเส้นโค้งเข้าใกล้กับแกนดังรูปที่ 3.15 โดยแกน x คือ ปริมาตร มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นฟังก์ชันเป้าหมายแรกและแกน y คือ ระยะการโก่งตัวของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นเมตร ในเซตคำตอบบนขอบหน้าพารेटอจะมีจุดของผลเฉลย โดยจุดของผลเฉลยดังกล่าวทุกจุด เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดทั้งหมด ซึ่งแต่ละจุดจะมีค่าผลเฉลยของฟังก์ชันเป้าหมายแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการเลือกไปใช้งาน

ข้อมูลฟังก์ชันเป้าหมายที่นำมาทำการ plot ขอบหน้าพารेटอและข้อมูลอื่นๆ จะถูกทำการบันทึกในรูปแบบของ Mat file ดังแสดงในรูป 3.16



Name	Value	Min	Max
Time	1.2648e+03	1.2648...	1.2648...
fpareto	<2x20 double>	2.5577...	2.1709...
gpareto	<2x20 double>	0	0
ppareto	<7x20 double>	-0.0199	0.1481

รูปที่ 3.16 ข้อมูลต่างๆ ที่ถูกบันทึก ในรูปแบบของ Mat file

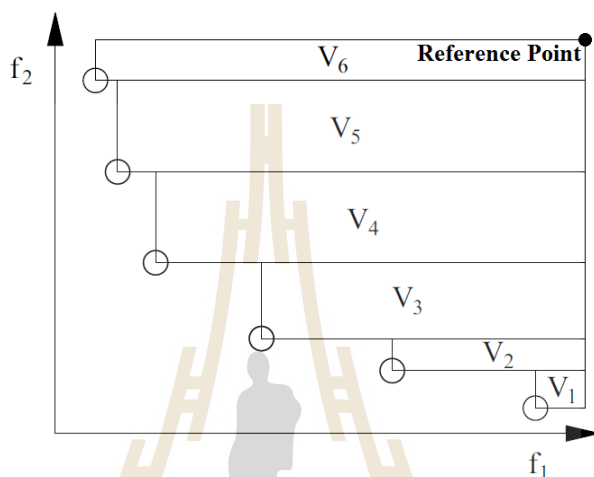
จากรูปที่ 3.16 แสดงข้อมูลต่างๆ ที่ถูกบันทึก ในรูปแบบของ Mat file ซึ่งข้อมูลต่างๆมีหน้าที่ยังต่อไปนี้

- 1) Time มีหน้าที่เก็บข้อมูลเวลาที่ใช้ในกระบวนการคำนวณของโปรแกรม
- 2) fpareto มีหน้าที่เก็บข้อมูลค่าฟังก์ชันเป้าหมายของแต่ละผลเฉลยของโปรแกรม
- 3) gpareto มีหน้าที่เก็บค่าการตรวจสอบเงื่อนไขบังคับของแต่ละผลเฉลยของโปรแกรม
- 4) ppareto มีหน้าที่เก็บข้อมูลตัวแปรออกแบบของแต่ละผลเฉลยของโปรแกรม

3.4.1 การเลือกขอบหน้าพารेटแต่ละกรณีศึกษา

สำหรับการเลือกขอบหน้าพารेटที่เหมาะสมที่สุดนั้นก็สิ่งที่สำคัญ เนื่องจากในหนึ่งปัญหาจะต้องมีการคำนวณหลายครั้งเพื่อเปรียบเทียบค่า สิ่งที่สำคัญของการคำนวณในแต่ละครั้ง คือ การกำหนดจำนวนประชากร โดยในหนึ่งปัญหาอาจจะมีการกำหนดจำนวนประชากรอยู่หลายค่า ซึ่งการกำหนดจำนวนประชากรมากนั้น จะเป็นผลให้ได้ค่าที่เหมาะสมมากกว่า แต่การกำหนดประชากรที่มากเกินไปอาจจะทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณนั้นมากเกินไปเช่นกัน และในทางกลับกันการกำหนดจำนวนประชากรน้อยเกินไปก็อาจจะทำให้ได้ค่าที่ยังไม่ลู่เข้าคำตอบที่เหมาะสม ดังนั้นการที่จะเลือกจำนวนประชากรที่เหมาะสมนั้นจึงมีความจำเป็น ทั้งนี้เพื่อการประหยัดเวลาในการคำนวณ ซึ่งวิธีการที่จะช่วยในการเลือกจำนวนประชากรที่เหมาะสม คือ วิธีการเปรียบเทียบค่า Hyper volume

Hyper volume คือ เครื่องมือที่ใช้วัดคุณภาพของขอบหน้าพาเรโตของปัญหา โดยการวัดปริมาณพื้นที่ทั้งหมดจากการรวมพื้นที่ย่อย ซึ่งวัดจากจุดอ้างอิง (Reference Point) จุดเดียวกันเป็นหลัก โดย Hyper volume ใช้สัญลักษณ์ค่าย่อเป็น HV รูปที่ 3.17 แสดงการหาค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตสำหรับปัญหาการหาค่าต่ำที่สุด โดยมีพื้นที่ย่อยทั้งหมด 6 ส่วน ดังนั้นเมื่อค่า HV มีค่ามาก หมายความว่า ขอบหน้าพาเรโตนั้นมีคุณภาพที่ดีกว่า จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานต่อไป



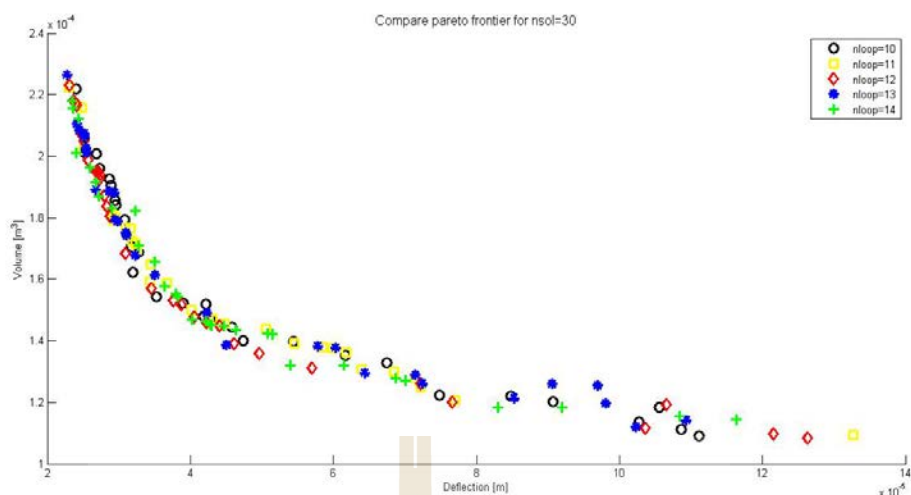
รูปที่ 3.17 หลักการหา Hyper volume

ในงานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณหาค่า HV แบบ Normalized Hyper volume ซึ่งการคำนวณดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้ (ธีทัต คลวิชัย, 2555)

$$HV = \frac{\sum_{i=1}^n V(i)}{V_{\max}} \quad (3.5)$$

3.4.1.1 ขอบหน้าพาเรโต กรณีไม่มีรูเจาะ

สำหรับการเลือกจำนวนประชากรที่เหมาะสมที่สุดนั้นต้องใช้ในการคำนวณหลายรอบเพื่อการเปรียบเทียบค่า HV และระยะเวลาในการคำนวณ โดยจะต้องนำขอบหน้าพาเรโตของการคำนวณทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การเปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตของกรณีไม่มีรูเจาะ

รูปที่ 3.18 แสดงการเปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ ซึ่งขอบหน้าพาเรโตที่เป็นจุดขั้วแหลมตัด คือ ขอบหน้าพาเรโตที่มีค่า HV สูงที่สุดหรือเป็นขอบหน้าพาเรโตที่เหมาะสมที่สุด โดยเป็นการเปรียบเทียบค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่า HV ได้แสดงดังตารางที่ 3.3

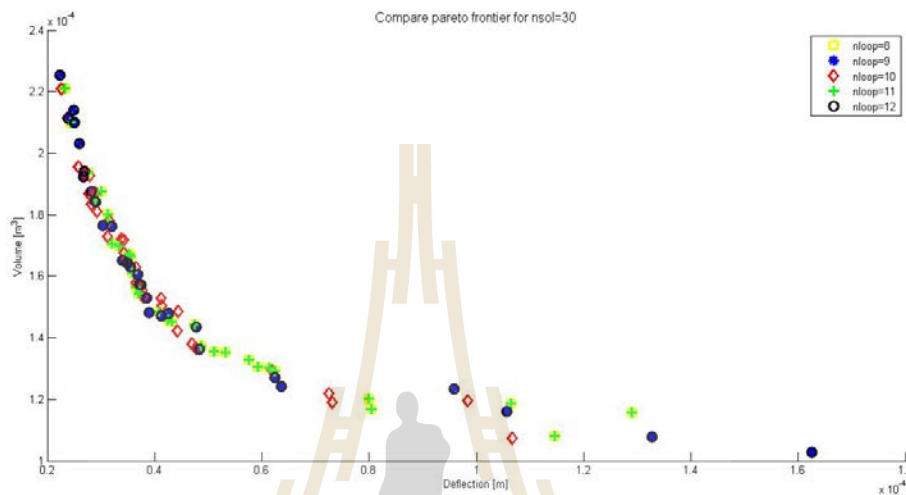
ตารางที่ 3.3 ค่า Hyper volume และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

nloop	nsol = 30	
	ค่า Hyper volume	เวลาในการคำนวณ (นาทื)
10	0.9902	13.33
11	0.9622	13.98
12	1.000	15.25
13	0.9771	16.45
14	0.9846	16.50

จากตารางที่ 3.3 แสดงค่า HV และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ ซึ่งค่า HV มากที่สุด คือ nloop เท่ากับ 12 และ nsol เท่ากับ 30 ดังนั้นในกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ จึงได้เลือกใช้จำนวนประชากรที่กล่าวมาให้เป็นคำตอบของรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด

3.4.1.2 ขอบหน้าพารेट กรณีสมี 1 รูเจาะ

การเปรียบเทียบค่า HV และระยะเวลาในการคำนวณ จะเหมือนกับกรณี
 ชิ้นงานไม่มีรูเจาะ โดยจะต้องนำขอบหน้าพารेटของการคำนวณทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันดัง
 แสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การเปรียบเทียบขอบหน้าพารेटของกรณีสมี 1 รูเจาะ

รูปที่ 3.19 แสดงการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบขอบหน้าพารेटของกรณีสมี 1 รูเจาะ ซึ่งขอบหน้าพารेटที่เป็นจุดขั้วแหลมตัด คือ ขอบหน้าพารेटที่มีค่า HV สูงที่สุดหรือเป็นขอบหน้าพารेटที่เหมาะสมที่สุด โดยเป็นการเปรียบเทียบค่า HV ของขอบหน้าพารेटที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่า HV ได้แสดงดังตารางที่ 3.4

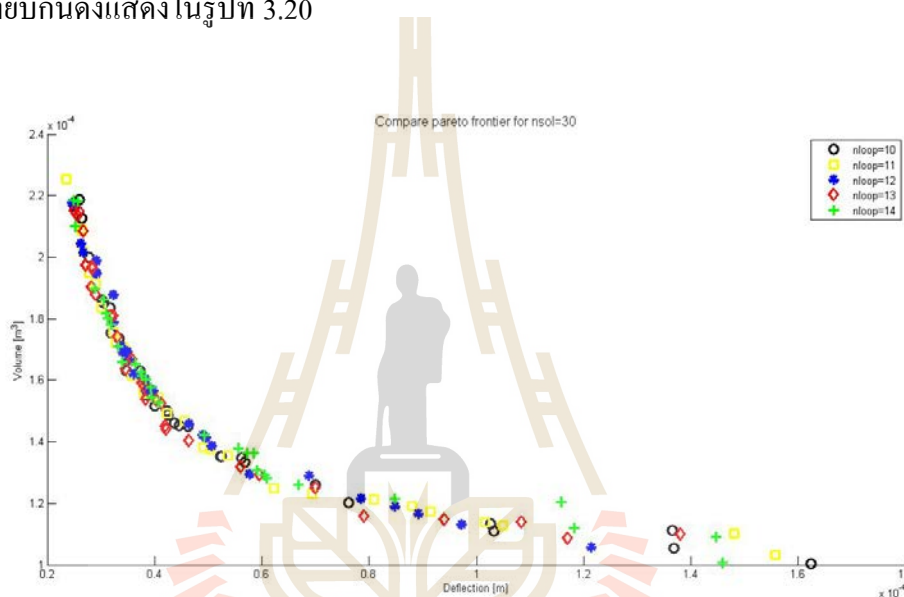
ตารางที่ 3.4 ค่า Hyper volume และเวลาในการคำนวณของกรณีสมี 1 รูเจาะ

nloop	nsol = 30	
	ค่า Hyper volume	เวลาในการคำนวณ (นาที)
8	0.9717	9.80
9	0.9746	11.11
10	1.000	14.42
11	0.9808	14.45
12	0.9680	14.72

จากตารางที่ 3.4 แสดงค่า HV และเวลาในการคำนวณของกรณีใช้งานมี 1 รูเจาะ ซึ่งค่า HV มากที่สุด คือ nloop เท่ากับ 10 และ nsol เท่ากับ 30 ดังนั้นในกรณีใช้งานมี 1 รูเจาะ จึงได้เลือกใช้จำนวนประชากรที่กล่าวมาให้เป็นคำตอบของรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด

3.4.1.3 ขอบหน้าพารेट กรณีสมี 2 รูเจาะ

การเปรียบเทียบค่า HV และระยะเวลาในการคำนวณ จะเหมือนกับกรณีใช้งานไม่มีรูเจาะและกรณีมี 1 รูเจาะ โดยจะต้องนำขอบหน้าพารेटของการคำนวณทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 การเปรียบเทียบขอบหน้าพารेटของกรณีมี 2 รูเจาะ

รูปที่ 3.20 แสดงการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบขอบหน้าพารेटของกรณีมี 2 รูเจาะ ซึ่งขอบหน้าพารेटที่เป็นจุดข้าวมืด คือ ขอบหน้าพารेटที่มีค่า HV สูงที่สุดหรือเป็นขอบหน้าพารेटที่เหมาะสมที่สุด โดยเป็นการเปรียบเทียบค่า HV ของขอบหน้าพารेटที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่า HV ได้แสดงดังตารางที่ 3.5

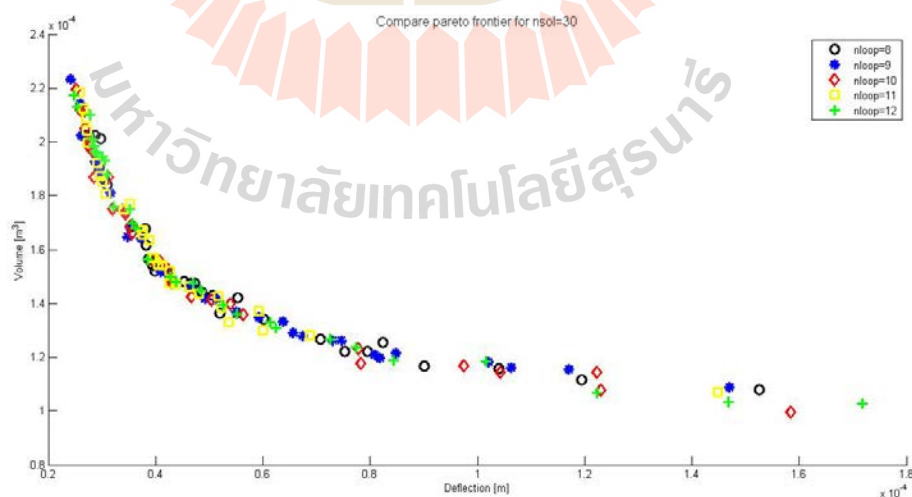
ตารางที่ 3.5 ค่า Hyper volume และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

nloop	nsol = 30	
	ค่า Hyper volume	เวลาในการคำนวณ (นาที)
10	0.9934	12.87
11	0.9893	14.02
12	0.9964	15.30
13	1.000	16.55
14	0.9747	18.02

จากตารางที่ 3.5 แสดงค่า HV และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ ซึ่งค่า HV มากที่สุด คือ nloop เท่ากับ 13 และ nsol เท่ากับ 30 ดังนั้นในกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ จึงได้เลือกใช้จำนวนประชากรที่กล่าวมาให้เป็นคำตอบของรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด

3.4.1.4 ขอบหน้าพารेट กรณีสี่รูเจาะ

การเปรียบเทียบค่า HV และระยะเวลาในการคำนวณ จะเหมือนกับทั้ง 3 กรณีก่อนหน้า โดยจะต้องนำขอบหน้าพารेटของการคำนวณทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การเปรียบเทียบขอบหน้าพารेटของการคำนวณกรณีสี่รูเจาะ

รูปที่ 3.21 แสดงการเปรียบเทียบการเปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตของกรณีมี 3 รูเจาะ ซึ่งขอบหน้าพาเรโตที่เป็นจุดข่าวหลวมตัด คือ ขอบหน้าพาเรโตที่มีค่า HV สูงที่สุดหรือเป็นขอบหน้าพาเรโตที่เหมาะสมที่สุด โดยเป็นการเปรียบเทียบค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งค่า HV ได้แสดงดังตารางที่ 3.6

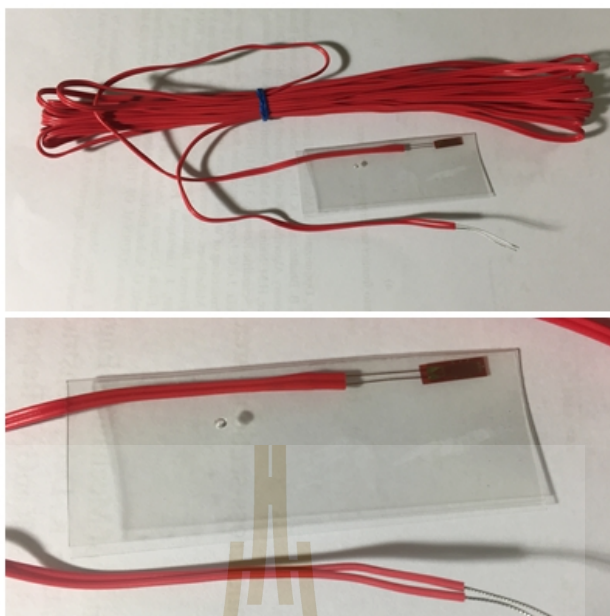
ตารางที่ 3.6 ค่า Hyper volume และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

nloop	nsol = 30	
	ค่า Hyper volume	เวลาในการคำนวณ (นาที)
8	0.9756	11.23
9	0.9690	15.65
10	1.000	13.50
11	1.000	14.82
12	0.9921	16.35

จากตารางที่ 3.6 แสดงค่า HV และเวลาในการคำนวณของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ ซึ่งค่า HV มากที่สุด คือ nloop เท่ากับ 10 และ nsol เท่ากับ 30 ดังนั้นในกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ จึงได้เลือกใช้จำนวนประชากรที่กล่าวมาให้เป็นคำตอบของรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด

3.5 การทดสอบชิ้นงาน

การทดสอบชิ้นงานทำได้โดยการใช้เกจวัดความเครียด (Strain gauge) เพื่อการวัดหาค่าความเครียด (Strain) ซึ่งเกจวัดความเครียดที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังในรูปที่ 3.22 และเครื่องมือในการอ่านค่าความเครียด คือ ชุดวัดสัญญาณความเครียด KYOWA EDX-10B ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 เกจวัดความเครียดที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.23 เครื่องมือวัดสัญญาณความเครียด KYOWA EDX-10B

ในการทดสอบนั้นได้เลือกชิ้นงานทดสอบ สำหรับกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ เนื่องจากมี
 แนวโน้มในที่ปริมาตรของชิ้นงานหลังจากการคำนวณน้อยการกรณีอื่นๆ โดยขั้นตอนในการ
 ทดสอบมีดังต่อไปนี้

- 1) ติดตั้งชั้นงานเข้ากับผนัง ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การติดตั้งชั้นงาน

- 2) ติดตั้งแถววัดความเครียดเข้ากับชั้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การติดตั้งแถววัดความเครียดบนชั้นงาน

- 3) การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณความเครียด KYOWA EDX-10B เพื่อการอ่านค่าความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การติดตั้งเครื่องมือวัดสัญญาณความเครียด KYOWA EDX-10B

- 4) ชั่งน้ำหนักของภาระกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 3.27



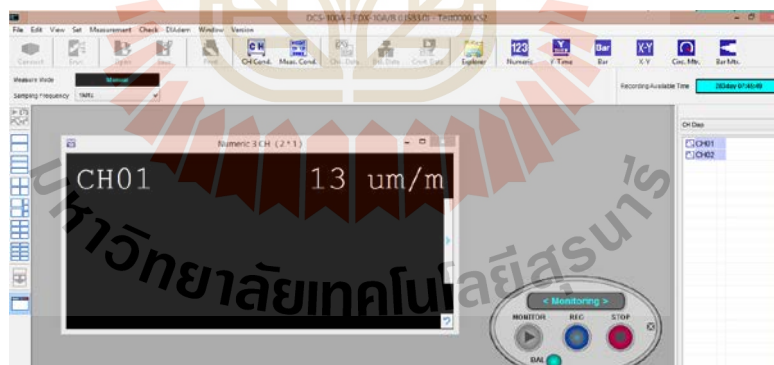
รูปที่ 3.27 น้ำหนักของภาระกระทำ

- 5) ใส่ภาระกระทำน้ำหนัก 30 กิโลกรัม บนชิ้นงาน ในลักษณะที่ใกล้เคียงกับการทำงานจริงของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ใส่ภาระกระทำ

- 6) อ่านค่าความเครียด โดยใช้โปรแกรม DCS-100A ดังแสดงในรูป 3.29



รูปที่ 3.29 การอ่านค่าความเครียด

- 7) นำค่าความเครียดที่อ่านไปคำนวณหาค่าการโก่งตัว เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม Ansys 10 ซึ่งผลการเปรียบเทียบจะแสดงในบทถัดไป

3.6 สถานที่ทำการวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึง รายละเอียดของผลการศึกษารูปร่างเหมาะสมที่สุดโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอกร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการศึกษารูปร่างเหมาะสมที่สุดประกอบด้วย 4 กรณีศึกษา คือ กรณีไม่มีรูเจาะ กรณีมี 1 รูเจาะ กรณีมี 2 รูเจาะ และกรณีมี 3 รูเจาะ โดยได้ผลของการศึกษาดังนี้

4.1 ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด

จากการคำนวณค่า HV จากบทที่ 3 ทำให้ได้ขอบหน้าพาเรโดที่เหมาะสมที่สุดของทั้ง 4 กรณีศึกษา ดังนี้

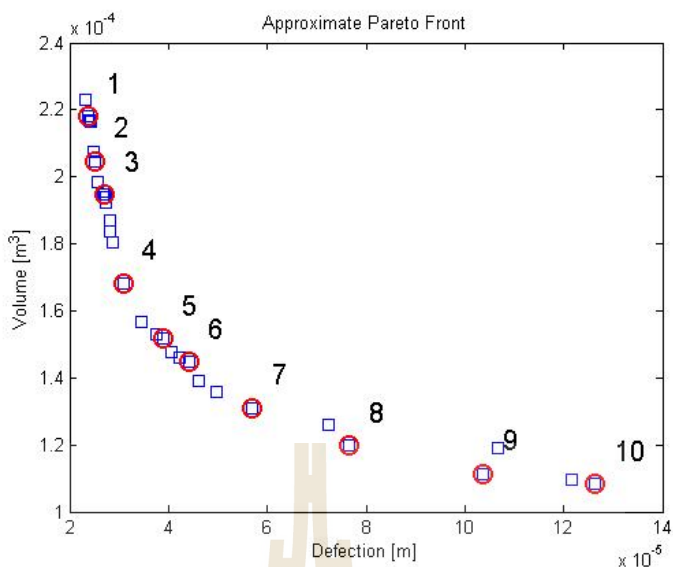
4.1.1 กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

จากตารางที่ 3.2 ทำให้ทราบว่าขอบหน้าพาเรโดที่เหมาะสมที่สุด คือ ขอบหน้าพาเรโดที่มีจำนวน n_{sol} เท่ากับ 30 และ n_{loop} เท่ากับ 12 ซึ่งมีค่า HV มากที่สุด คือ 1.000 ดังนั้นจึงนำขอบหน้าพาเรโดนี้มาทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะเลือกจุดคำตอบบนขอบหน้าพาเรโดมาทำการวิเคราะห์ 10 จุด จาก 30 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ค่าตัวแปรออกแบบ ปริมาตร และการโค้งตัวของชิ้นงานได้แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นการแสดงทั้ง 10 จุดคำตอบที่ได้เลือกมาวิเคราะห์ผล โดยจุดคำตอบที่ใกล้กับแกน y ที่สุด คือ จุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าของปริมาตรมากที่สุด แต่ก็จะมี การโค้งตัวที่น้อยที่สุดในทางกลับกันจุดคำตอบที่ใกล้กับแกน x ที่สุด คือ จุดคำตอบที่ 10 ก็จะมีค่าปริมาตรน้อยที่สุด แต่จะมีค่าการโค้งตัวมากที่สุด เนื่องจากเซตคำตอบทุกจุดบนขอบหน้าพาเรโดเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นจึงอยู่ที่ผู้ใช้งานจะเลือกจุดคำตอบใดๆ บนขอบหน้าพาเรโดเพื่อนำไปใช้ให้เหมาะสมกับงาน

การกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบมีดังนี้

$$6 \leq x_1 \leq 12 \text{ เซนติเมตร}, 2 \leq x_2 \leq 12 \text{ เซนติเมตร} \text{ และ } 1 \leq x_3 \leq 3 \text{ เซนติเมตร}$$



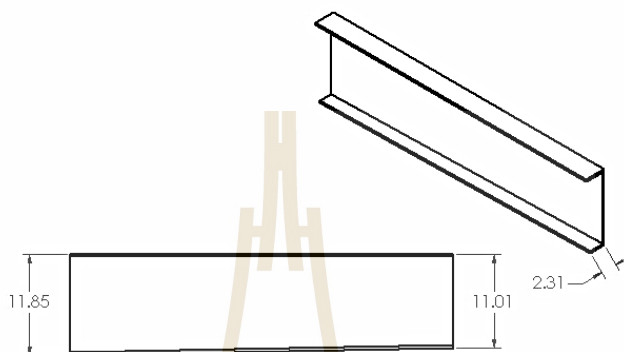
รูปที่ 4.1 ขอบหน้าพารโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ						
จุดที่		1	2	3	4	5
ตัวแปร	x_1	11.85	11.41	11.43	11.42	11.35
	x_2	11.01	8.9	8.13	4.89	3.01
ออกแบบ (cm)	x_3	2.31	2.37	2.22	1.92	1.65
ปริมาตร (cm ³)		217.92	204.66	194.74	168.35	151.62
การโก่งตัว (cm)		0.00234	0.00251	0.00272	0.00309	0.00388
กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ						
จุดที่		6	7	8	9	10
ตัวแปร	x_1	10.89	10.09	8.74	6.59	6.29
	x_2	2.13	2.11	2.13	2.03	2.11
ออกแบบ (cm)	x_3	1.82	1.21	1.04	1.55	1.42
ปริมาตร (cm ³)		144.85	131.10	119.83	111.43	108.26
การโก่งตัว (cm)		0.00441	0.00570	0.00766	0.01037	0.01264

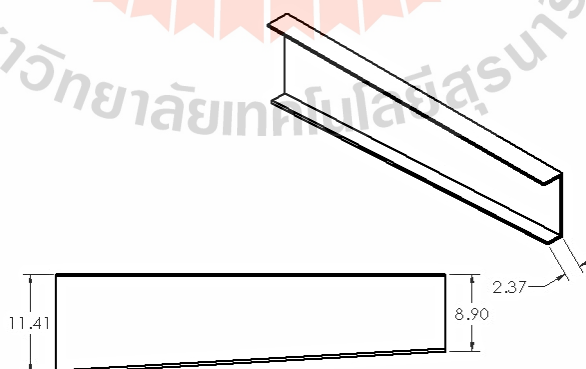
จากตารางที่ 4.1 สามารถนำข้อมูลตัวแปรออกแบบมาทำการสร้างรูปร่างเป็นรูปร่าง
ชิ้นงานได้ โดยจะแสดงรูปร่างได้ทั้งหมด 10 รูปร่างตามข้อมูลที่เลือก ดังแสดงในรูปที่ 4.2-4.11

ผลเฉลยจุดที่ 1 มีปริมาตรเท่ากับ 217.92 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโค้งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.00234 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.2



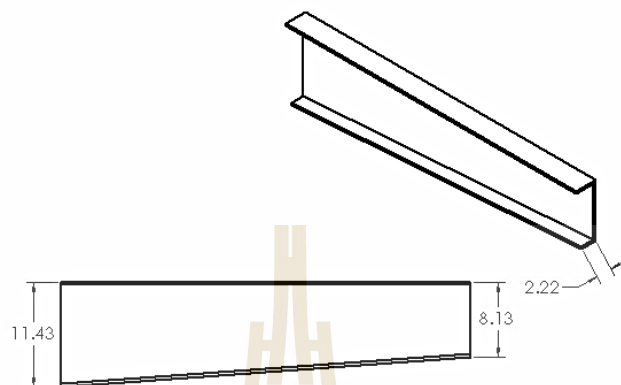
รูปที่ 4.2 ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 2 มีปริมาตรเท่ากับ 204.66 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโค้งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.00251 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.3



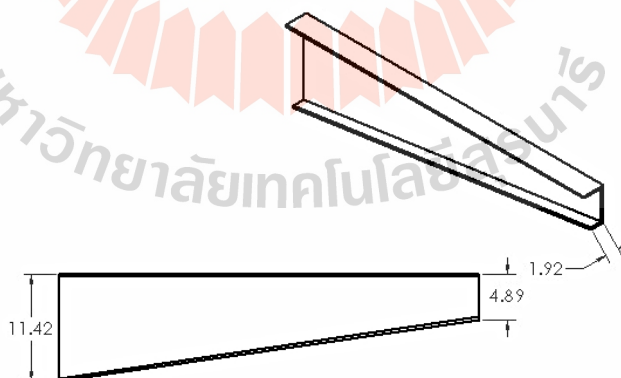
รูปที่ 4.3 ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 3 มีปริมาตรเท่ากับ 194.74 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00272 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.4



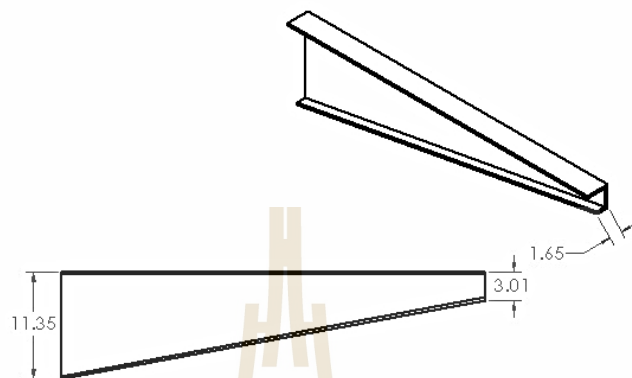
รูปที่ 4.4 ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 4 มีปริมาตรเท่ากับ 168.35 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00309 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.5



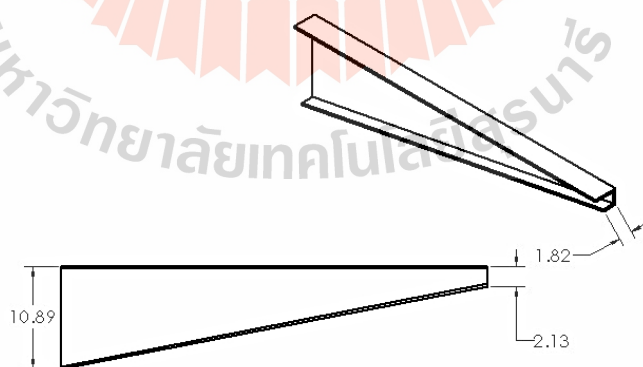
รูปที่ 4.5 ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 5 มีปริมาตรเท่ากับ 151.62 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.00388 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.6



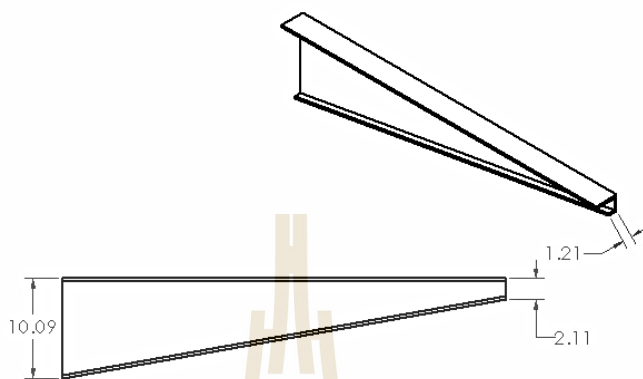
รูปที่ 4.6 ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 6 มีปริมาตรเท่ากับ 144.85 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.00441 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.7



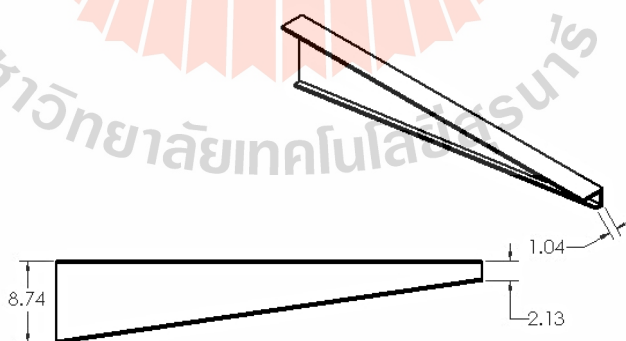
รูปที่ 4.7 ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 7 มีปริมาตรเท่ากับ 131.10 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00570 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.8



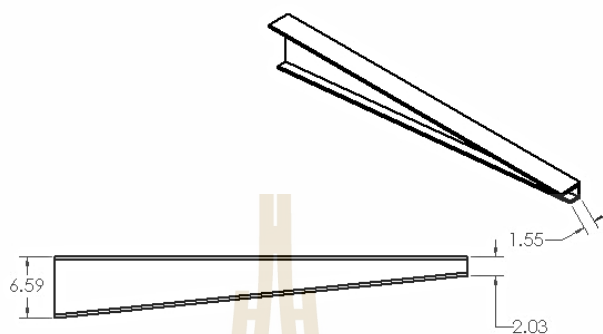
รูปที่ 4.8 ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 8 มีปริมาตรเท่ากับ 119.83 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00766 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.9



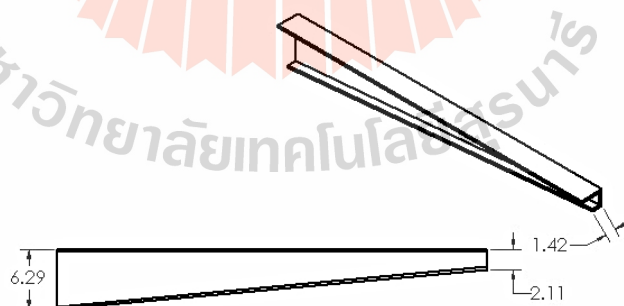
รูปที่ 4.9 ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 9 มีปริมาตรเท่ากับ 111.43 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.01037 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอบหน้าพาราทอของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 10 มีปริมาตรเท่ากับ 108.26 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.01264 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.11

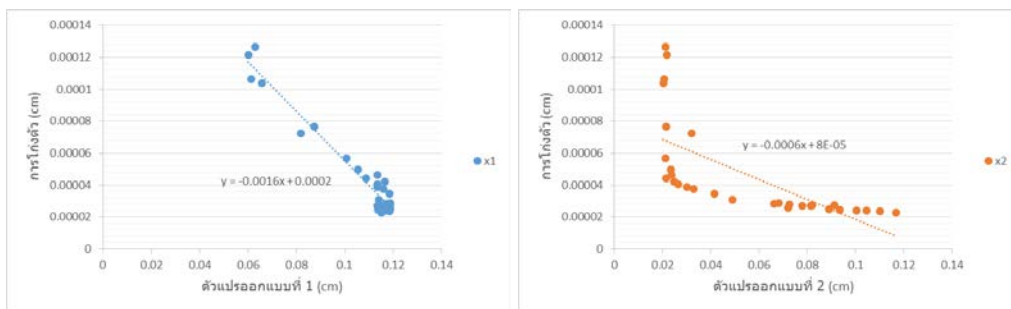


รูปที่ 4.11 ผลเฉลยจุดที่ 10 บนขอบหน้าพาราทอของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

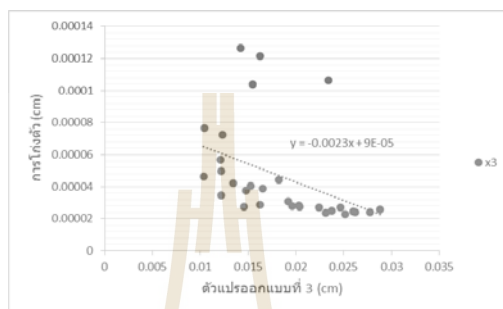
กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ					
จุดที่	1	2	3	4	5
ร้อยละของปริมาตร (%)	100	93.92	89.36	77.25	69.58
ร้อยละของการโก่งตัว (%)	18.51	19.86	21.52	24.45	30.69
กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ					
จุดที่	6	7	8	9	10
ร้อยละของปริมาตร (%)	66.47	60.12	54.99	51.13	49.68
ร้อยละของการโก่งตัว (%)	34.89	45.09	60.60	82.04	100

จากรูปที่ 4.2-4.11 แสดงรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงาน โดยที่สร้างขึ้นจากข้อมูลตัวแปรออกแบบ ซึ่งค่าฟังก์ชันเป้าหมายจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 217.92 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจึงไล่เรียงจนไปถึงรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 10 ที่มีค่าปริมาตรน้อยที่สุด เท่ากับ 108.26 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการเปรียบเทียบร้อยละของปริมาตรได้แสดงดังตารางที่ 4.2 ค่าร้อยละของปริมาตรที่จุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากจุดที่ 1 ได้ ร้อยละ 50.68 ในทางกลับการรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าการโก่งตัวน้อยที่สุด เท่ากับ 0.00234 เซนติเมตร แล้วไล่เรียงจนมาถึงรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 10 ที่มีค่าการโก่งตัวมากที่สุด เท่ากับ 0.01264 เซนติเมตร ซึ่งการเปรียบเทียบร้อยละของการโก่งตัวของจุดที่ 1 นั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ 10 จะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 81.49 โดยรูปร่างของชิ้นงานทั้งหมดจะเป็นไปตามการกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบ รูปร่างที่ได้จะมีลักษณะด้านที่ยึดติดกับผนังจะมีค่าความสูงหรือตัวแปรออกแบบ x_1 ที่มากกว่าความสูงด้านปลายของชิ้นงานหรือตัวแปรออกแบบ x_2 และบริเวณแขนด้านล่างของพื้นที่หน้าตัดรูปตัว C หรือตัวแปรออกแบบ x_3 จะสั้นกว่าแขนด้านบนสำหรับกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจานั้น ทุกจุดคำตอบบนขอบหน้าพารेटคือ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้นการที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนความพึงพอใจของผู้ที่จะใช้งานว่าต้องการสัดส่วนฟังก์ชันเป้าหมายใดมากกว่ากัน ในส่วนของแนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายแสดงดังรูปที่ 4.12-4.13



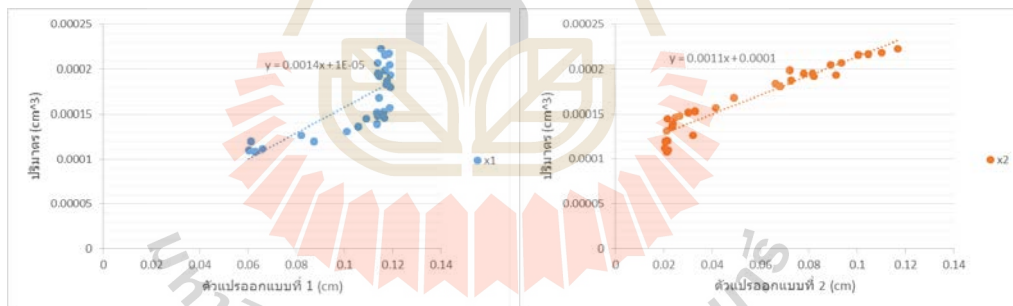
(a) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 1

(b) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 2



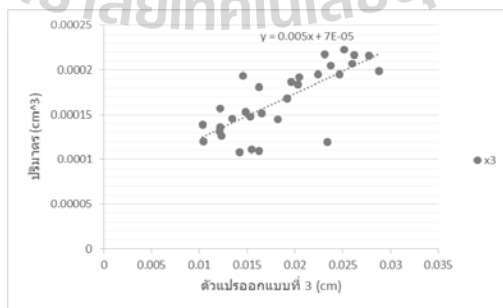
(c) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 3

รูปที่ 4.12 แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 1 กรณีใช้งานไม่มีรูเจาะ



(a) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 1

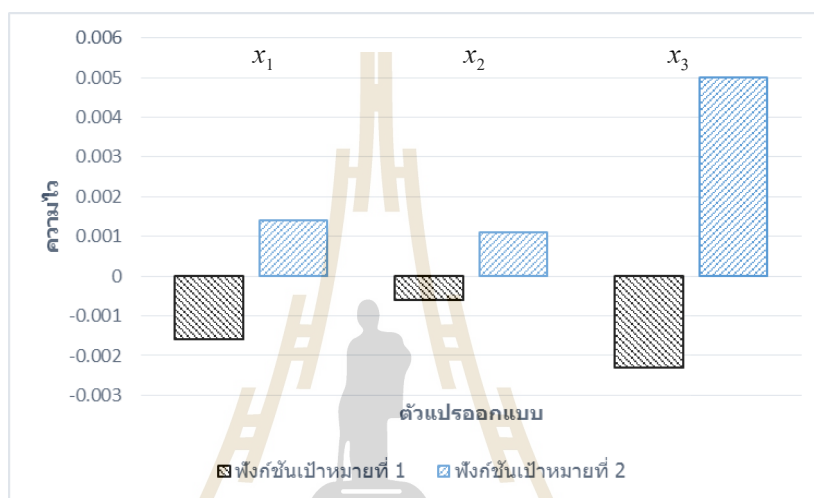
(b) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 2



(c) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 3

รูปที่ 4.13 แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 2 กรณีใช้งานไม่มีรูเจาะ

จากรูปที่ 4.12 (a) – 4.12 (c) และ 4.13 (a) – 4.13 (c) เป็นการสร้างความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรออกแบกับฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองโดยใช้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น พบว่าค่าตัวแปรออกแบ x_1 , x_2 และ x_3 แปรผกผันกับฟังก์ชันเป้าหมายที่ 1 และแปรผันตรงกับฟังก์ชันเป้าหมายที่ 2 และได้นำค่าความชันของตัวแปรออกแบเพื่อหาค่าความไว (Sensitivity) ของตัวแปรออกแบ โดยทำการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เพื่อบ่งชี้ว่าตัวแปรออกแบมีความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ความไวของตัวแปรออกแบต่อฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ

จากรูปที่ 4.14 พบว่าตัวแปรออกแบ x_3 จะมีค่าความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองสูงที่สุด ซึ่งตัวแปรออกแบ x_3 จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองมากที่สุด ดังนั้นตัวแปรออกแบดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการคำนวณชิ้นงานกรณีไม่มีรูเจาะที่สุด ขณะที่ตัวแปรออกแบ x_1 และ x_2 จะมีความไวและผลต่อการคำนวณลดลงตามลำดับ ซึ่งตัวแปรออกแบทั้งสามจะมีความสำคัญต่อการคำนวณทั้งสิ้น

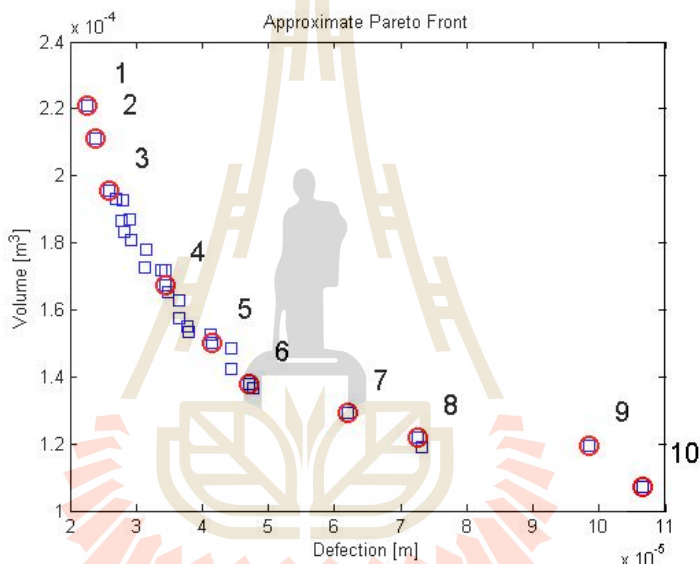
4.1.2 กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

จากตารางที่ 3.3 ทำให้ทราบว่าขอบหน้าพาเรโตที่เหมาะสมที่สุด คือ ขอบหน้าพาเรโตที่มีจำนวน $nsol$ เท่ากับ 30 และ $nloop$ เท่ากับ 10 ซึ่งมีค่า HV มากที่สุด คือ 1.000 ดังนั้นจึงนำขอบหน้าพาเรโตนี้มาทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะเลือกจุดคำตอบบนขอบหน้าพาเรโตมาทำการวิเคราะห์ 10 จุด จาก 30 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.15

การกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบมีดังนี้

$$6 \leq x_1 \leq 12 \text{ เซนติเมตร}, 2 \leq x_2 \leq 12 \text{ เซนติเมตร}, 1 \leq x_3 \leq 3 \text{ เซนติเมตร}$$

$$10 \leq x_4 \leq 25 \text{ เซนติเมตร และ } 1 \leq x_5 \leq 2 \text{ เซนติเมตร}$$



รูปที่ 4.15 ขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

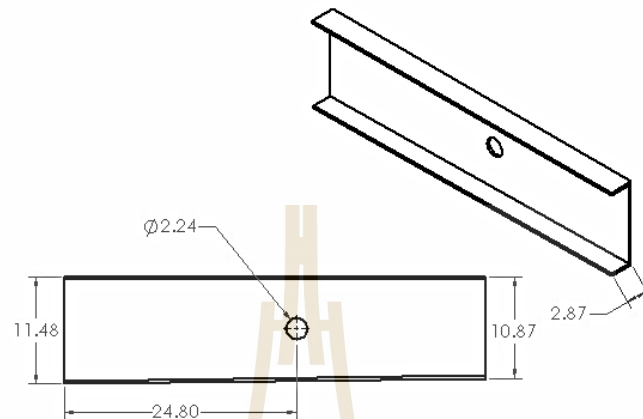
ค่าตัวแปรออกแบบ ปริมาตร และการโก่งตัวของชิ้นงานได้แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นการแสดงทั้ง 10 จุดคำตอบที่ได้เลือกมาวิเคราะห์ผล เช่นเดียวกันกับกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ โดยลักษณะของแนวโน้มคำตอบก็จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ						
จุดที่		1	2	3	4	5
ตัวแปร ออกแบบ (cm)	x_1	11.48	11.89	11.57	10.84	11.40
	x_2	10.87	10.89	6.21	5.63	2.03
	x_3	2.87	2.14	2.85	1.97	2.09
	x_4	24.80	20.11	19.25	22.55	14.23
	x_5	1.12	1.99	1.52	1.69	1.08
ปริมาตร (cm ³)		220.76	211.29	195.49	167.54	150.20
การโค้งตัว (cm)		0.00226	0.00239	0.00259	0.00343	0.00414
กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ						
จุดที่		6	7	8	9	10
ตัวแปร ออกแบบ (cm)	x_1	10.85	9.67	8.63	7.31	7.13
	x_2	2.62	2.19	2.69	2.62	2.08
	x_3	1.22	1.51	1.19	1.72	1.14
	x_4	21.75	17.952	14.65	24.77	16.69
	x_5	1.39	1.96	1.76	1.84	1.73
ปริมาตร (cm ³)		137.89	129.18	121.92	119.49	107.20
การโค้งตัว (cm)		0.00470	0.00619	0.00725	0.00985	0.01067

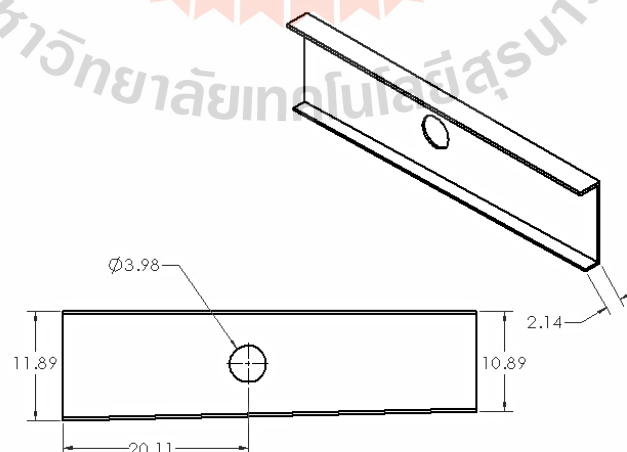
จากตารางที่ 4.3 สามารถนำข้อมูลตัวแปรออกแบบมาทำการสร้างรูปร่างเป็นรูปร่างชิ้นงานได้ โดยจะแสดงรูปร่างได้ทั้งหมด 10 รูปร่างตามข้อมูลที่เลือก ดังแสดงในรูปที่ 4.16-4.25

ผลเฉลยจุดที่ 1 มีปริมาตรเท่ากับ 220.76 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00226 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.16



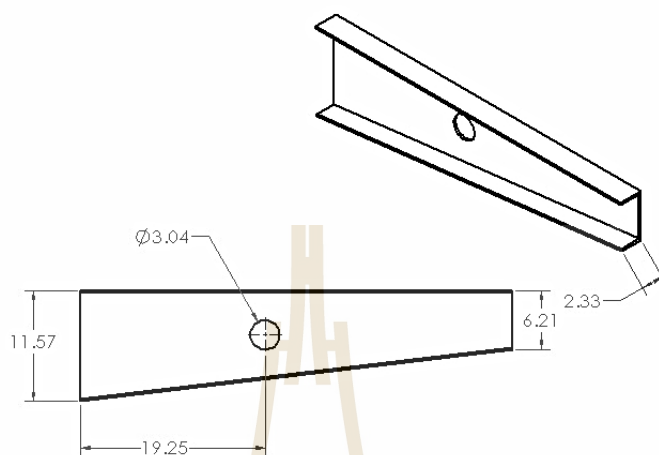
รูปที่ 4.16 ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 2 มีปริมาตรเท่ากับ 211.29 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00239 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.17



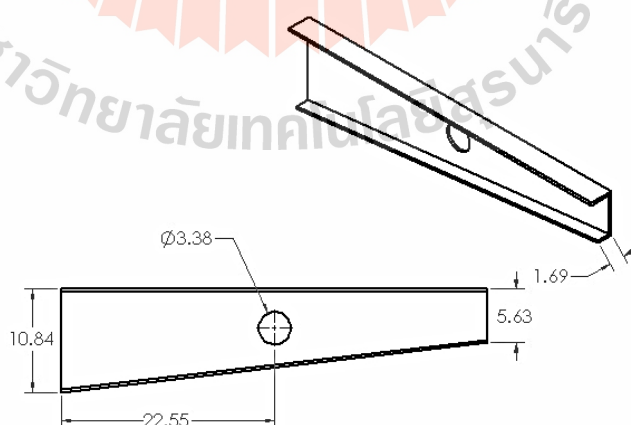
รูปที่ 4.17 ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 3 มีปริมาตรเท่ากับ 195.49 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00259 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.18



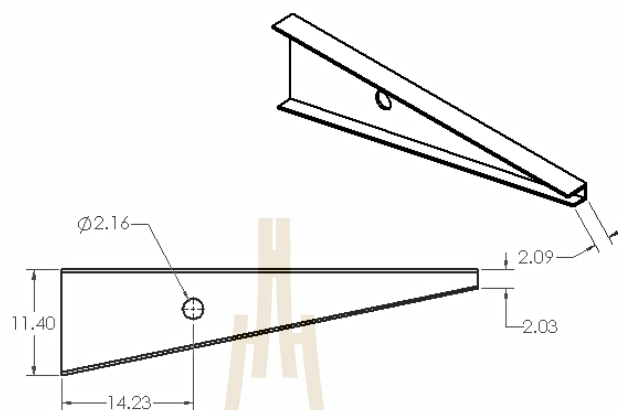
รูปที่ 4.18 ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 4 มีปริมาตรเท่ากับ 167.54 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00343 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.19



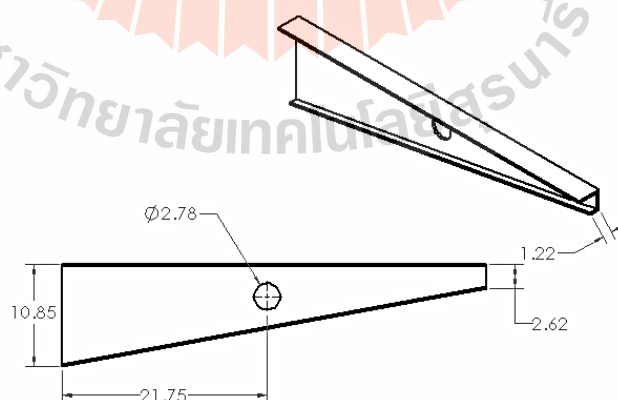
รูปที่ 4.19 ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 5 มีปริมาตรเท่ากับ 150.20 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.00414 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.20



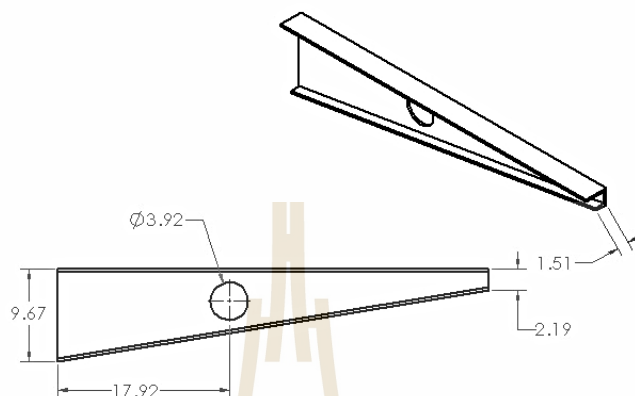
รูปที่ 4.20 ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 6 มีปริมาตรเท่ากับ 137.89 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.00470 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.21



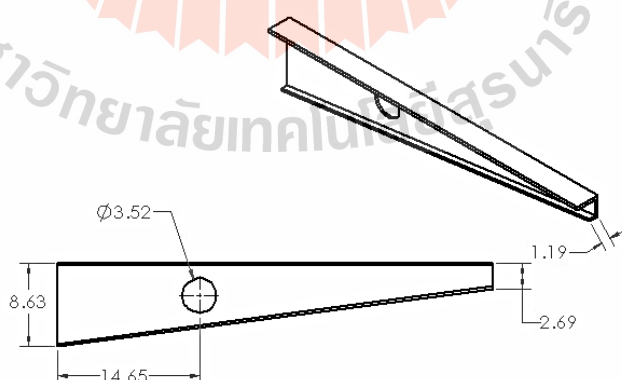
รูปที่ 4.21 ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 7 มีปริมาตรเท่ากับ 129.18 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.00619 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.22



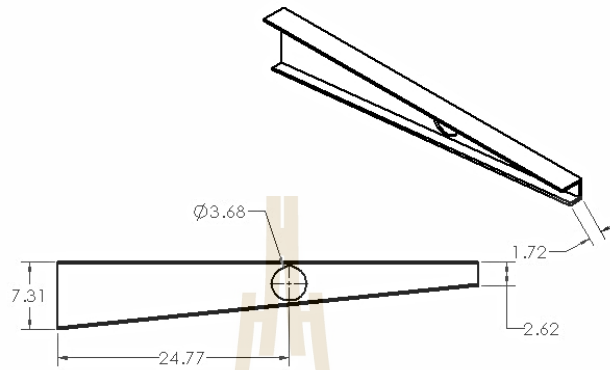
รูปที่ 4.22 ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 8 มีปริมาตรเท่ากับ 121.92 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.00725 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.23



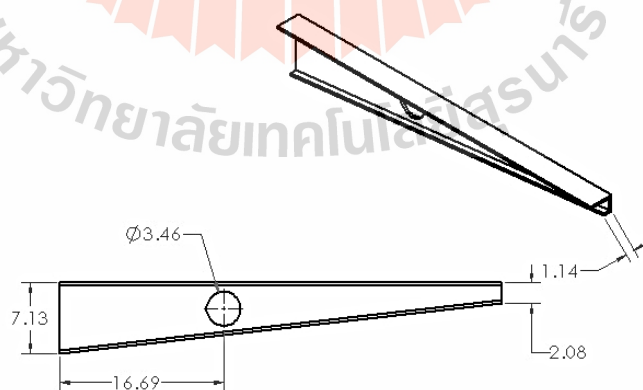
รูปที่ 4.23 ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 9 มีปริมาตรเท่ากับ 119.49 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00985 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 10 มีปริมาตรเท่ากับ 107.20 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.01067 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.25



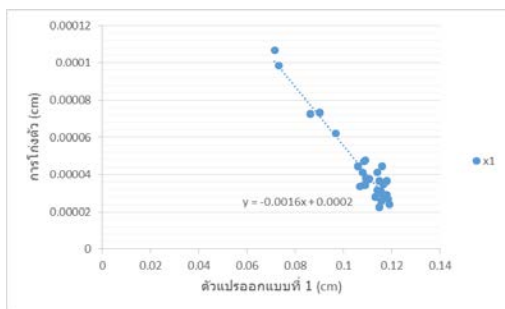
รูปที่ 4.25 ผลเฉลยจุดที่ 10 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

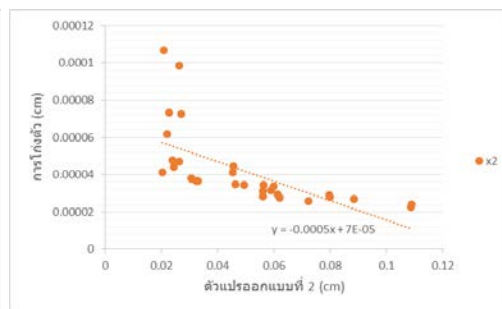
กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ					
จุดที่	1	2	3	4	5
ร้อยละของปริมาตร (%)	100	95.71	88.55	75.89	68.04
ร้อยละของการโก่งตัว (%)	21.81	22.39	24.27	32.15	38.80

กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ					
จุดที่	6	7	8	9	10
ร้อยละของปริมาตร (%)	62.46	58.52	55.22	54.13	48.56
ร้อยละของการโก่งตัว (%)	44.05	58.01	67.95	92.31	100

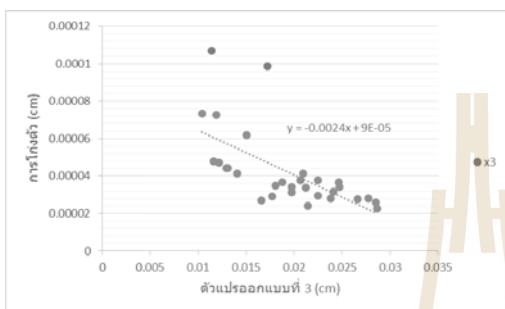
จากรูปที่ 4.16-4.25 แสดงรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงานโดยที่สร้างขึ้นจากข้อมูลตัวแปรออกแบบ ซึ่งค่าฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าไม่เท่ากัน โดยรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 220.70 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจึงไล่เรียงจนไปถึงรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 10 ที่มีค่าปริมาตรน้อยที่สุด เท่ากับ 107.20 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการเปรียบเทียบร้อยละของปริมาตรได้แสดงดังตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละของปริมาตรที่จุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากจุดที่ 1 ได้ร้อยละ 51.44 ในทางกลับการรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าการโก่งตัวน้อยที่สุด เท่ากับ 0.00226 เซนติเมตร แล้วไล่เรียงจนมาถึงรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 10 ที่มีค่าการโก่งตัวมากที่สุด เท่ากับ 0.01067 เซนติเมตร ซึ่งการเปรียบเทียบร้อยละของการโก่งตัวของจุดที่ 1 นั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ 10 จะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 78.19 ซึ่งแนวโน้มของค่าตัวแปรออกแบบ x_1 , x_2 และ x_3 จะเป็นไปในทิศทางเดียวกับกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ แต่ในกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะนี้ จะมีตัวแปรออกแบบเพิ่มขึ้นมาอีก 2 ตัว คือตัวแปรตำแหน่งของรูเจาะหรือตัวแปรออกแบบ x_4 และขนาดรัศมีของรูเจาะหรือตัวแปรออกแบบ x_5 โดยรูเจาะที่อยู่บนชิ้นงานนั้นจะมีตำแหน่งและขนาดเป็นไปตามการกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบ ทำให้รูเจาะจะอยู่บนบริเวณกลางชิ้นงาน สำหรับกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะนั้น ทุกจุดคำตอบบนขอบหน้าพาเรโต คือ คำตอบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้นการที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนความพึงพอใจของผู้ที่จะใช้งานว่าต้องการสัดส่วนฟังก์ชันเป้าหมายใดมากกว่ากัน ในส่วนของแนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายแสดงดังรูปที่ 4.26-4.27



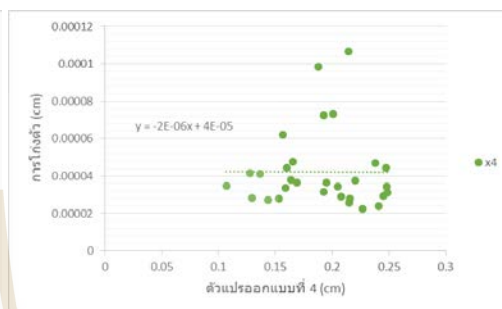
(a) ผลของตัวแปรรอกแบบที่ 1



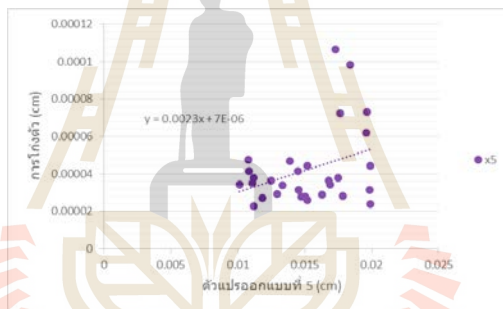
(b) ผลของตัวแปรรอกแบบที่ 2



(c) ผลของตัวแปรรอกแบบที่ 3



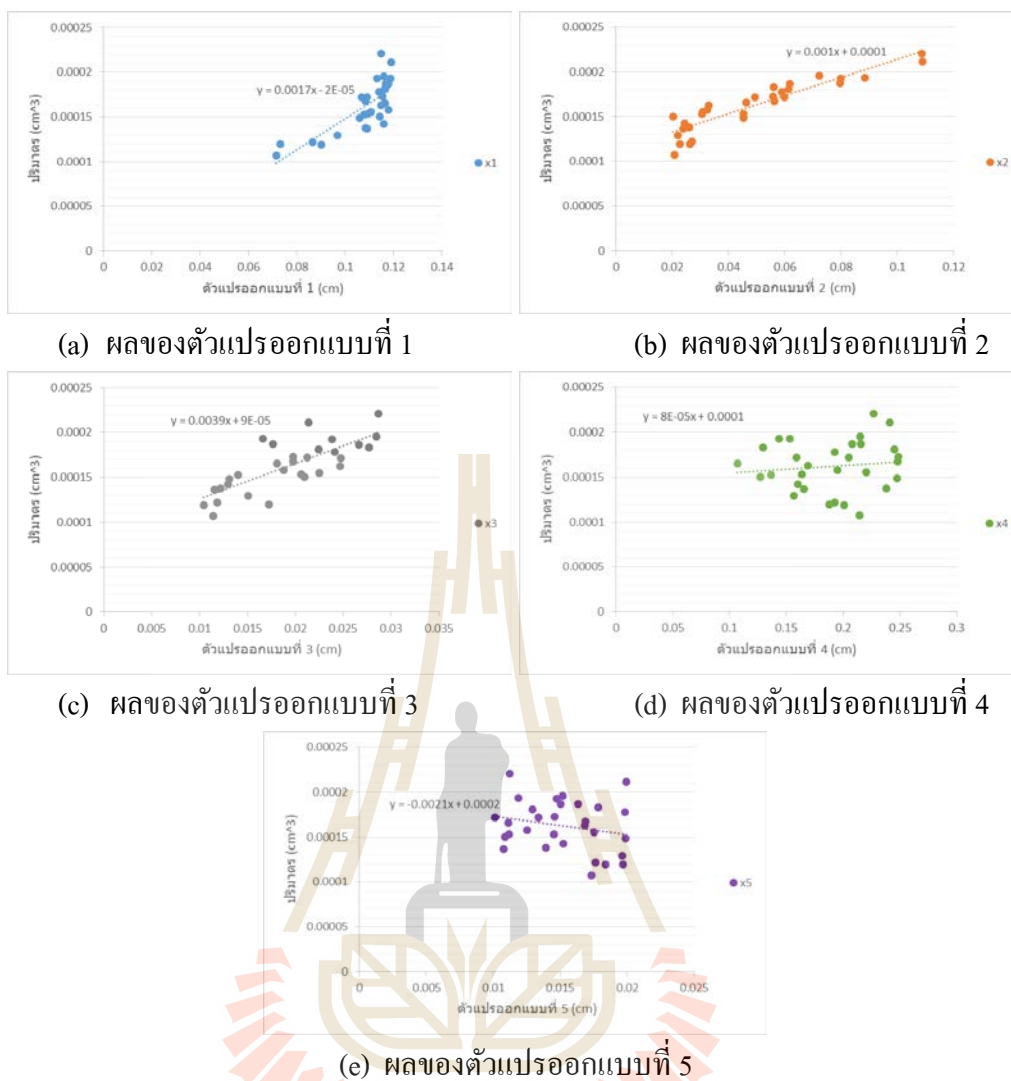
(d) ผลของตัวแปรรอกแบบที่ 4



(e) ผลของตัวแปรรอกแบบที่ 5

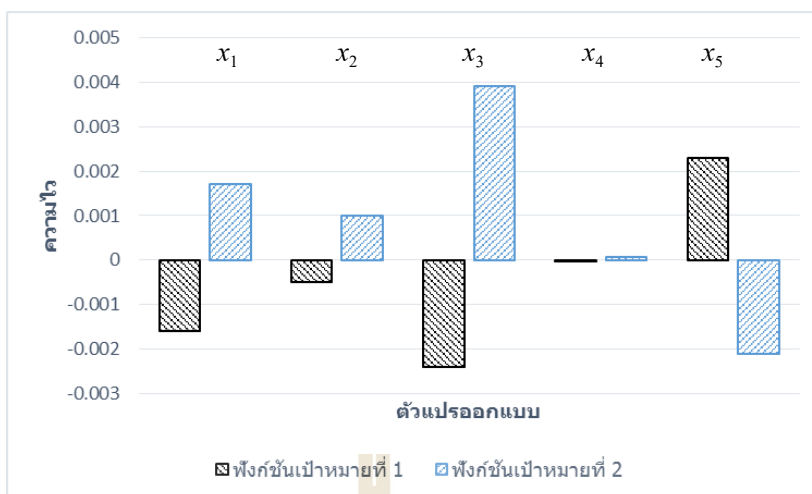
รูปที่ 4.26 แนวโน้มของตัวแปรรอกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 1 กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ





รูปที่ 4.27 แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 2 กรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

จากรูปที่ 4.26 (a) – 4.26 (e) และ 4.27 (a) – 4.27 (e) พบว่าค่าตัวแปรออกแบบ x_1 , x_2 และ x_3 จะมีค่าไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ ซึ่งจะมีค่าตัวแปรที่ออกแบบ x_4 และ x_5 ที่เพิ่มขึ้นมา โดยค่าของตัวแปรออกแบบ x_5 จะมีแนวโน้มตรงข้ามกับตัวแปรออกแบบทั้งสาม เนื่องจากเป็นตัวแปรขนาดของรูเจาะ จะมีเพียงค่าตัวแปรออกแบบ x_4 ที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไม่ตามฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองมากนัก เนื่องจากเป็นตัวแปรออกแบบที่เป็นค่าระยะความยาวตามแนวระดับ และได้นำค่าความชันของตัวแปรออกแบบเพื่อหาค่าความไวของตัวแปรออกแบบ โดยทำการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อบ่งชี้ว่าตัวแปรออกแบบมีความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความไวของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ

จากรูปที่ 4.28 พบว่าตัวแปรออกแบบ x_3 จะมีค่าความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองสูงที่สุด ซึ่งตัวแปรออกแบบ x_3 จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองมากที่สุด ดังนั้นตัวแปรออกแบบดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการคำนวณที่สุด ขณะที่ตัวแปรออกแบบ x_5 , x_1 , x_2 และ x_4 จะมีความไวและผลต่อการคำนวณลดลงตามลำดับ โดยตัวแปรออกแบบ x_4 นั้นมีค่าความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมายน้อยมาก จึงอาจสามารถตัดตัวแปรออกแบบนี้ออกได้เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ

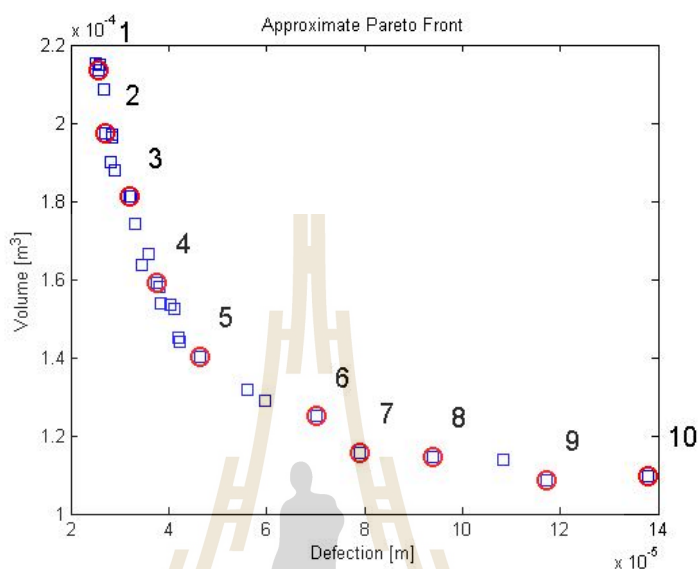
4.1.3 กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

จากตารางที่ 3.4 ทำให้ทราบว่าขอบหน้าพาเรโตที่เหมาะสมที่สุด คือ ขอบหน้าพาเรโตที่มีจำนวน $nsol$ เท่ากับ 30 และ $nloop$ เท่ากับ 13 ซึ่งมีค่า HV มากที่สุด คือ 1.000 ดังนั้นจึงนำขอบหน้าพาเรโตนี้มาทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะเลือกจุดค่าตอบบนขอบหน้าพาเรโตมาทำการวิเคราะห์ 10 จุด จาก 30 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.29

การกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบมีดังนี้

$6 \leq x_1 \leq 12$ เซนติเมตร, $2 \leq x_2 \leq 12$ เซนติเมตร, $1 \leq x_3 \leq 3$ เซนติเมตร

$10 \leq x_4 \leq 15$ เซนติเมตร, $1 \leq x_5 \leq 2$ เซนติเมตร และ $1 \leq x_6 \leq 2$ เซนติเมตร



รูปที่ 4.29 ขอบหน้าพารโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

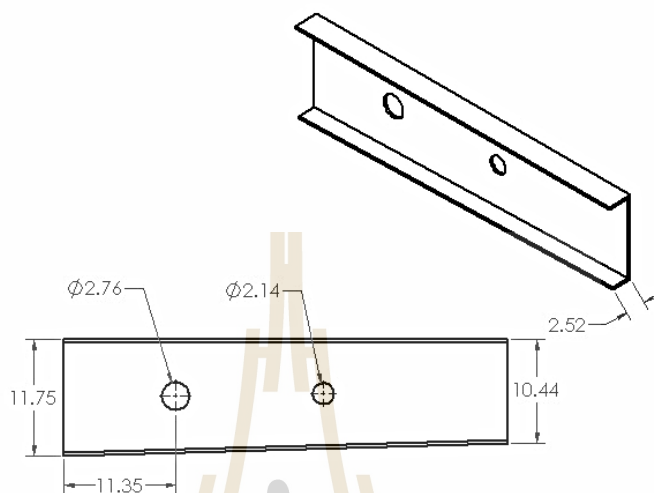
ค่าตัวแปรออกแบบ ปริมาตร และการโก่งตัวของชิ้นงานได้แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นการแสดงทั้ง 10 จุดคำตอบที่ได้เลือกมาวิเคราะห์ผล เช่นเดียวกันกับกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะและกรณีมี 1 รูเจาะ โดยลักษณะของแนวโน้มคำตอบก็จะไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ						
จุดที่		1	2	3	4	5
ตัวแปร ออกแบบ (cm)	x_1	11.75	11.84	11.47	11.65	11.11
	x_2	10.44	8.45	7.00	3.21	2.20
	x_3	2.52	2.53	2.27	2.14	1.82
	x_4	11.35	14.06	10.48	10.61	14.34
	x_5	1.38	1.98	1.81	1.31	1.90
	x_6	1.07	1.71	1.95	1.07	1.84
ปริมาตร (cm ³)		213.42	197.23	190.12	159.15	140.23
การโค้งตัว (cm)		0.00257	0.00271	0.00319	0.00376	0.00464
กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ						
จุดที่		6	7	8	9	10
ตัวแปร ออกแบบ (cm)	x_1	9.23	8.89	8.21	6.58	6.14
	x_2	2.76	2.09	2.02	2.56	3.20
	x_3	1.20	1.06	1.31	1.40	1.46
	x_4	14.65	14.93	11.97	14.96	10.78
	x_5	1.92	1.66	1.30	1.20	1.97
	x_6	1.19	1.6	1.86	1.78	1.36
ปริมาตร (cm ³)		125.00	115.78	114.65	108.66	109.79
การโค้งตัว (cm)		0.00701	0.00791	0.00939	0.01171	0.01380

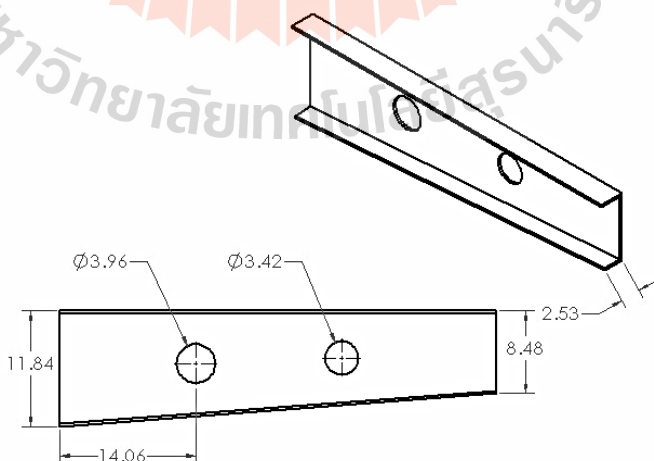
จากตารางที่ 4.5 สามารถนำข้อมูลตัวแปรออกแบบมาทำการสร้างรูปร่างเป็นรูปร่างชิ้นงานได้ โดยจะแสดงรูปร่างได้ทั้งหมด 10 รูปร่างตามข้อมูลที่เลือก ดังแสดงในรูปที่ 4.30-4.39

ผลเฉลยจุดที่ 1 มีปริมาตรเท่ากับ 213.42 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00257 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.30



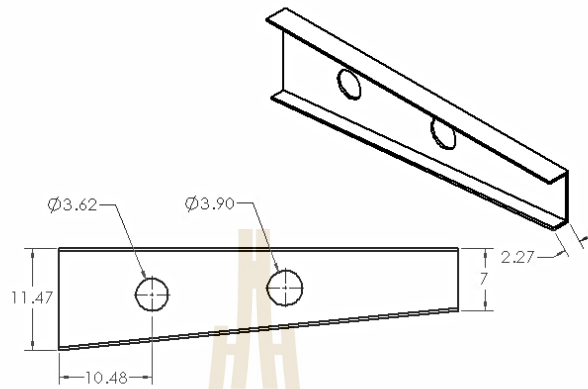
รูปที่ 4.30 ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพาเรโโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 2 มีปริมาตรเท่ากับ 197.23 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00271 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.31



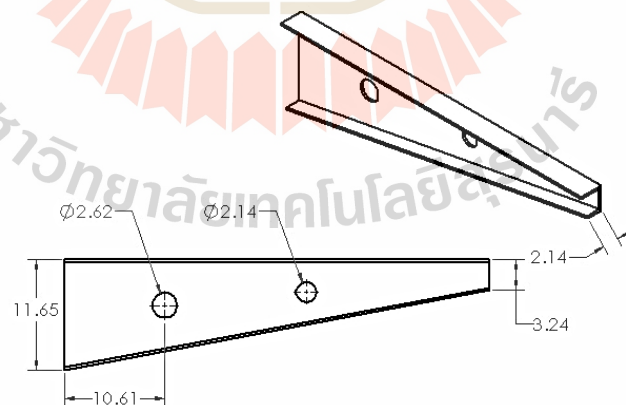
รูปที่ 4.31 ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพาเรโโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 3 มีปริมาตรเท่ากับ 190.12 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00319 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.32



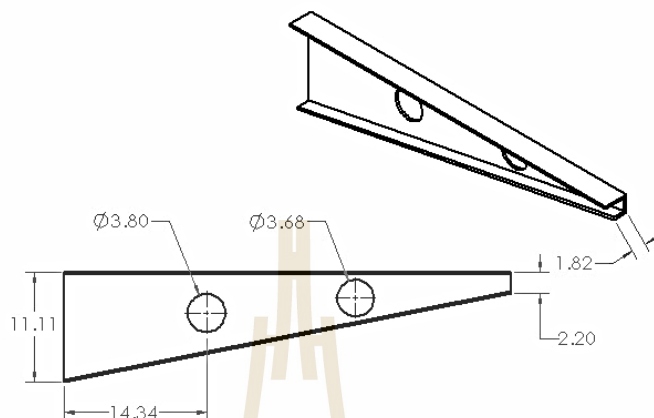
รูปที่ 4.32 ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 4 มีปริมาตรเท่ากับ 159.15 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00376 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.33



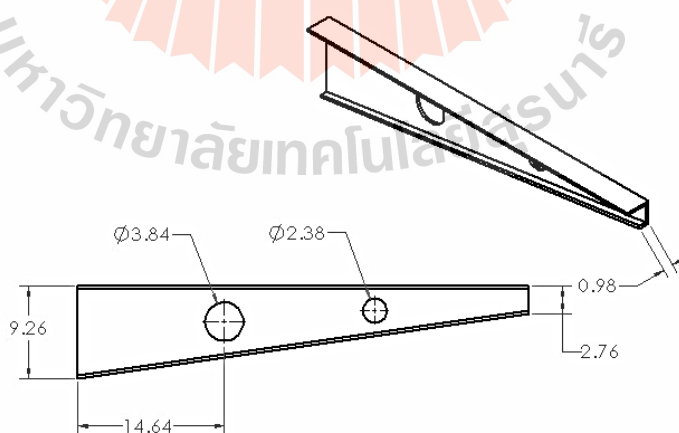
รูปที่ 4.33 ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 5 มีปริมาตรเท่ากับ 140.23 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00464 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.34



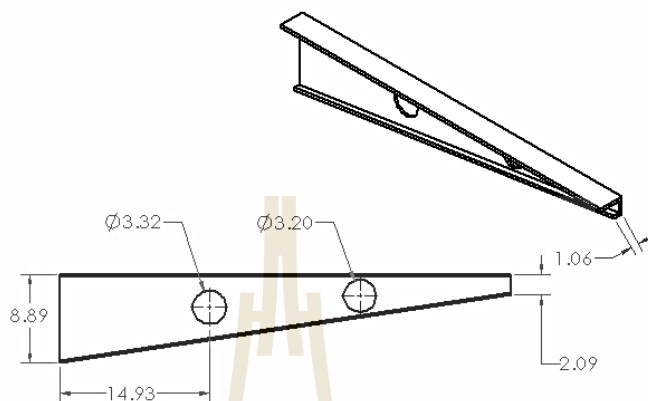
รูปที่ 4.34 ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 6 มีปริมาตรเท่ากับ 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00701 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.35



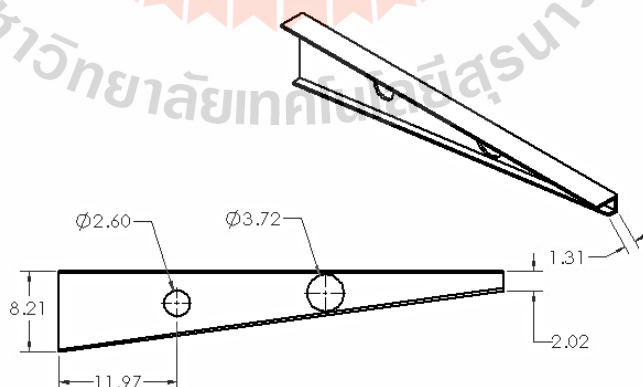
รูปที่ 4.35 ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 7 มีปริมาตรเท่ากับ 115.78 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00791 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.36



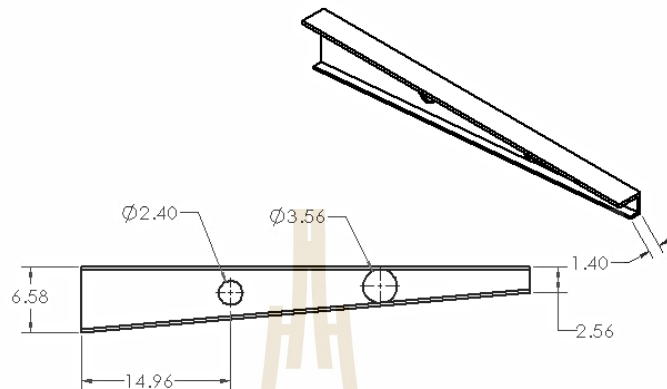
รูปที่ 4.36 ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 8 มีปริมาตรเท่ากับ 114.65 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00939 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.37



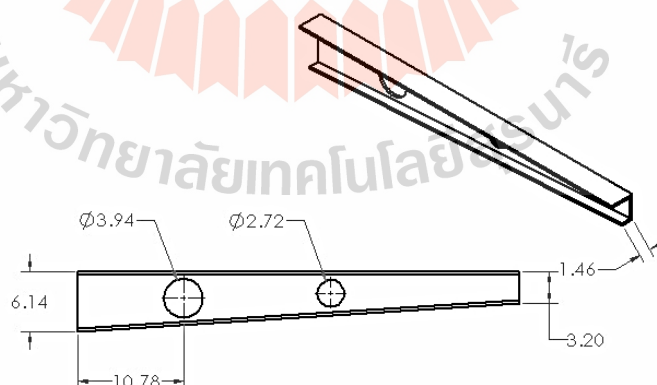
รูปที่ 4.37 ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 9 มีปริมาตรเท่ากับ 108.66 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.01171 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอบหน้าพารโทของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 10 มีปริมาตรเท่ากับ 109.79 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.01380 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.39

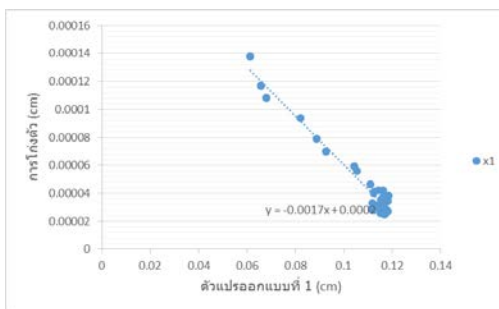


รูปที่ 4.39 ผลเฉลยจุดที่ 10 บนขอบหน้าพารโทของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

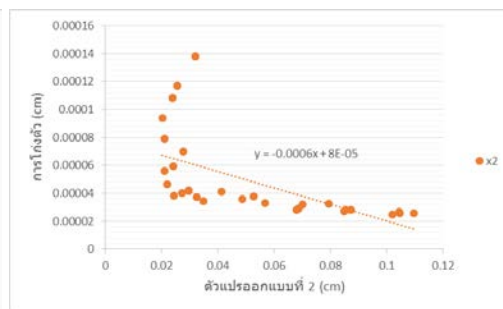
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ					
จุดที่	1	2	3	4	5
ร้อยละของปริมาตร (%)	100	92.41	89.08	74.57	65.71
ร้อยละของการโค้งตัว (%)	18.62	19.64	23.12	27.25	33.62
กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ					
จุดที่	6	7	8	9	10
ร้อยละของปริมาตร (%)	58.57	54.25	53.72	50.91	51.44
ร้อยละของการโค้งตัว (%)	50.79	57.31	68.04	84.86	100

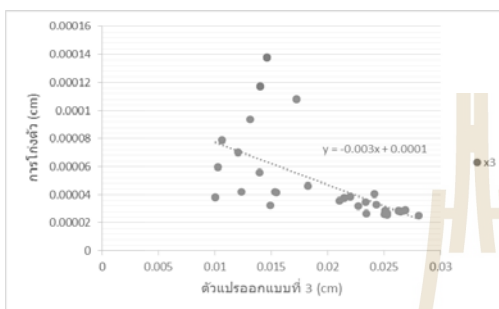
จากรูปที่ 4.30-4.39 แสดงรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงานโดยที่สร้างขึ้นจากข้อมูลตัวแปรออกแบบ ซึ่งค่าฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าไม่เท่ากัน โดยรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 213.42 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจึงไล่เรียงจนไปถึงรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 10 ที่มีค่าปริมาตรน้อยที่สุด เท่ากับ 109.79 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการเปรียบเทียบร้อยละของปริมาตรได้แสดงดังตารางที่ 4.6 ค่าร้อยละของปริมาตรที่จุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากจุดที่ 1 ได้ร้อยละ 48.56 ในทางกลับการรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าการโค้งตัวน้อยที่สุด เท่ากับ 0.00257 เซนติเมตร แล้วไล่เรียงจนมาถึงรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 10 ที่มีค่าการโค้งตัวมากที่สุด เท่ากับ 0.01380 เซนติเมตร ซึ่งการเปรียบเทียบร้อยละของการโค้งตัวของจุดที่ 1 นั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ 10 จะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 81.38 ซึ่งแนวโน้มของค่าตัวแปรออกแบบ x_1, x_2, x_3, x_4 และ x_5 จะเป็นไปในทิศทางเดียวกับ 2 กรณีก่อนหน้านี้ แต่ในกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะนี้ จะมีตัวแปรออกแบบเพิ่มขึ้นมาอีก 1 ตัว คือตัวแปรขนาดรัศมีของรูเจาะรูที่ 2 หรือตัวแปรออกแบบ x_6 โดยรูเจาะที่อยู่บนชิ้นงานนั้นจะมีตำแหน่งและขนาดเป็นไปตามการกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบ ทำให้รูเจาะจะอยู่บนบริเวณกลางชิ้นงาน โดยได้มีการกำหนดระยะห่างระหว่าง 2 รูเจาะเท่ากับ 15 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหารูเจาะทั้งสองจะซ้อนทับกัน สำหรับกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะนั้น ทุกจุดคำตอบบนขอบหน้าพาเรโต คือ คำตอบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้นการที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนความพึงพอใจของผู้ที่จะใช้งานว่าต้องการสัดส่วนฟังก์ชันเป้าหมายใดมากกว่ากัน ในส่วนของแนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายแสดงดังรูปที่ 4.40-4.41



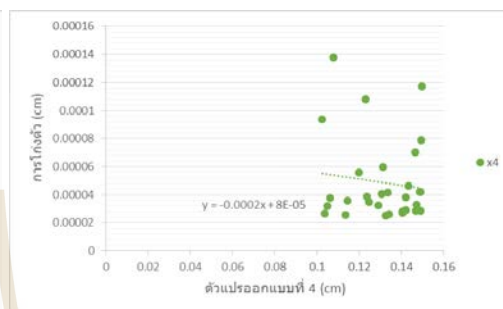
(a) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 1



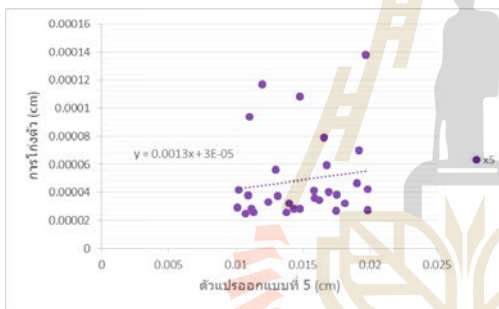
(b) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 2



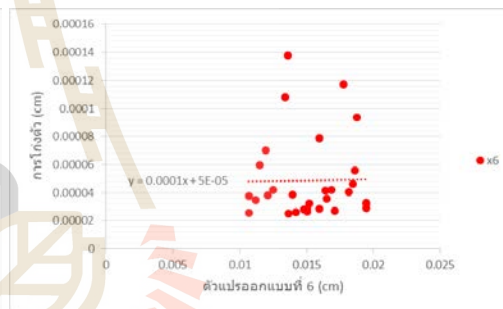
(c) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 3



(d) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 4

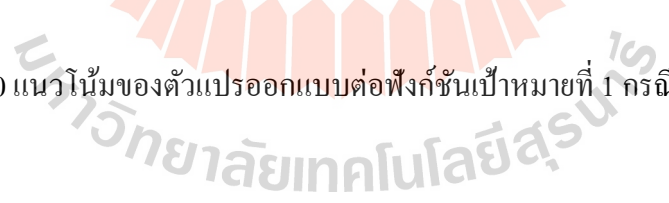


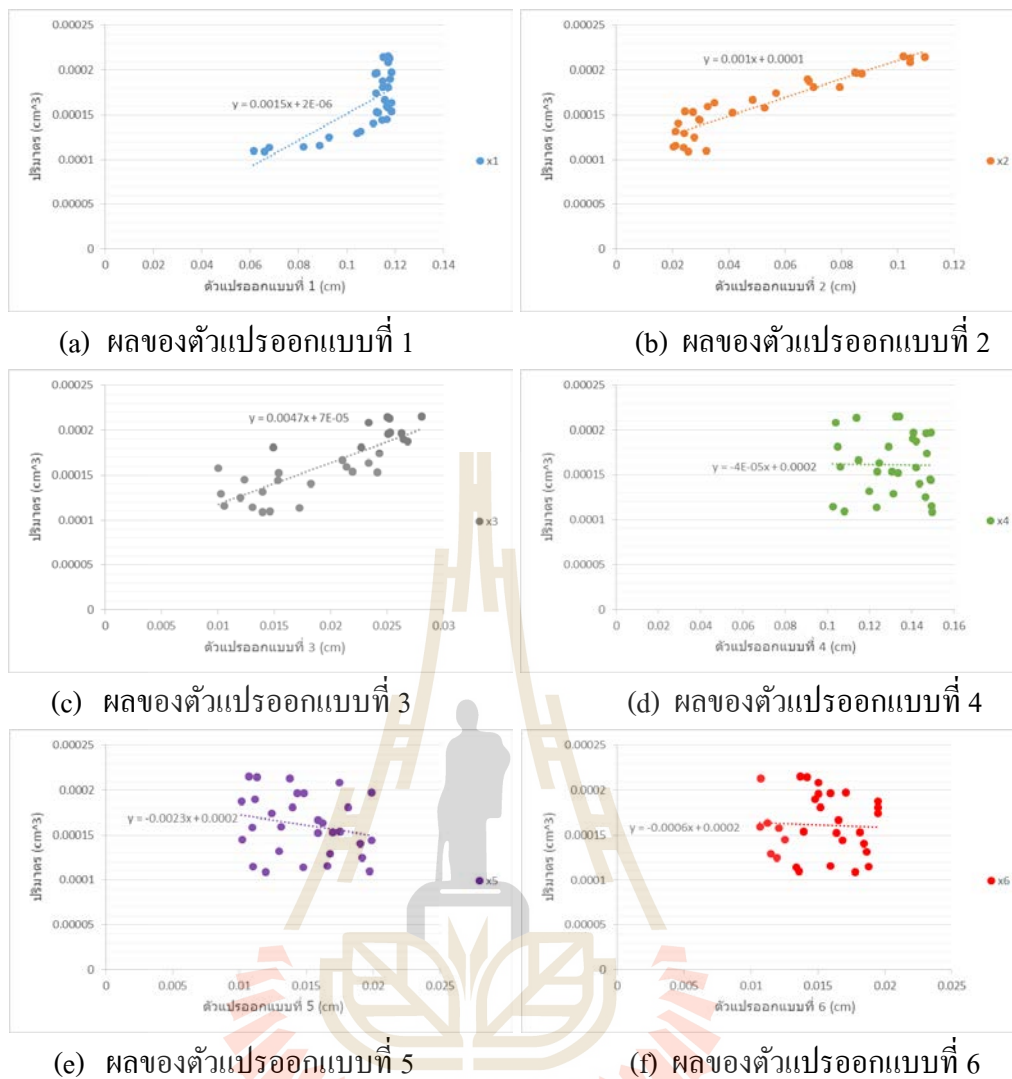
(e) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 5



(f) ผลของตัวแปรออกแบบที่ 6

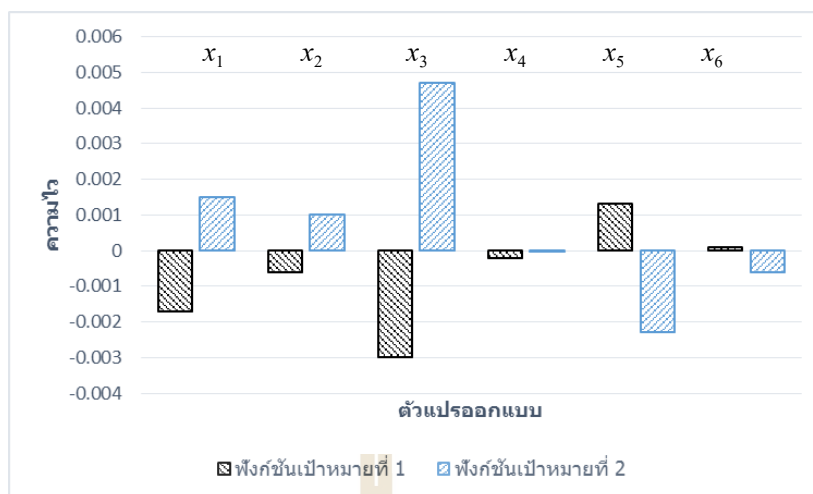
รูปที่ 4.40 แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 1 กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ





รูปที่ 4.41 แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 2 กรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

จากรูปที่ 4.40 (a) – 4.40 (f) และ 4.41 (a) – 4.41 (f) พบว่าค่าตัวแปรออกแบบ x_1 , x_2 , x_3 , x_4 และ x_5 จะมีค่าไปในทิศทางเดียวกันกับกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะและชิ้นงานมี 1 รูเจาะ ซึ่งจะมีค่าตัวแปรที่ออกแบบ x_6 ที่เพิ่มขึ้นมา โดยค่าตัวแปรออกแบบ x_6 จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับตัวแปรออกแบบ x_5 และได้้นำค่าความชันของตัวแปรออกแบบเพื่อหาค่าความไวของตัวแปรออกแบบ โดยทำการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อบ่งชี้ว่าตัวแปรออกแบบมีความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ความไวของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ

จากรูปที่ 4.42 พบว่าตัวแปรออกแบบ x_3 จะมีค่าความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองสูงที่สุด ซึ่งตัวแปรออกแบบ x_3 จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองมากที่สุด ดังนั้นตัวแปรออกแบบดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการคำนวณที่สุด ขณะที่ตัวแปรออกแบบ x_5, x_1, x_2, x_6 และ x_4 จะมีความไวและผลต่อการคำนวณลดลงตามลำดับ โดยตัวแปรออกแบบ x_4 นั้นมีค่าความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมายน้อยมาก จึงอาจสามารถตัดตัวแปรออกแบบนี้ออกได้เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ

4.1.4 กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

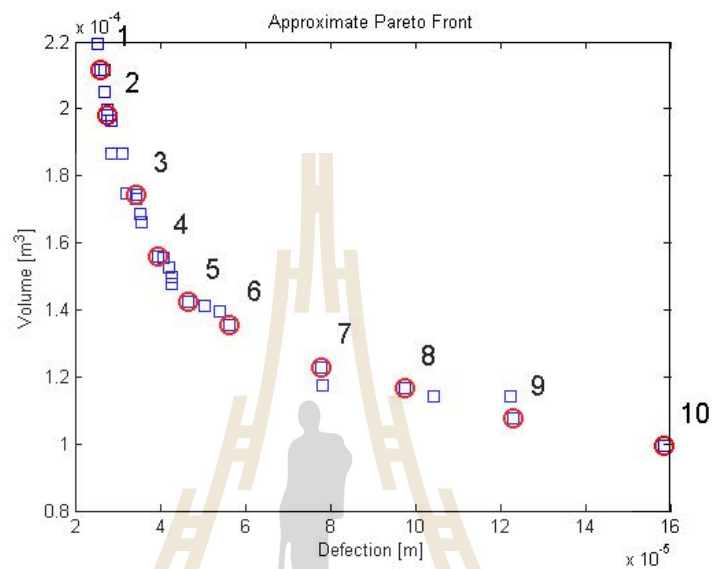
จากตารางที่ 3.5 ทำให้ทราบว่าขอบหน้าพาเรโตที่เหมาะสมที่สุด คือ ขอบหน้าพาเรโตที่มีจำนวน $nsol$ เท่ากับ 30 และ $nloop$ เท่ากับ 10 ซึ่งมีค่า HV มากที่สุด คือ 1.000 ดังนั้นจึงนำขอบหน้าพาเรโตนี้มาทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะเลือกจุดค่าตอบบนขอบหน้าพาเรโตมาทำการวิเคราะห์ 10 จุด จาก 30 จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.43

การกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบมีดังนี้

$6 \leq x_1 \leq 12$ เซนติเมตร, $2 \leq x_2 \leq 12$ เซนติเมตร, $1 \leq x_3 \leq 3$ เซนติเมตร

$10 \leq x_4 \leq 15$ เซนติเมตร, $1 \leq x_5 \leq 2$ เซนติเมตร, $1 \leq x_6 \leq 2$ เซนติเมตร

และ $1 \leq x_7 \leq 1.5$ เซนติเมตร



รูปที่ 4.43 ขอบหน้าพารेटอของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

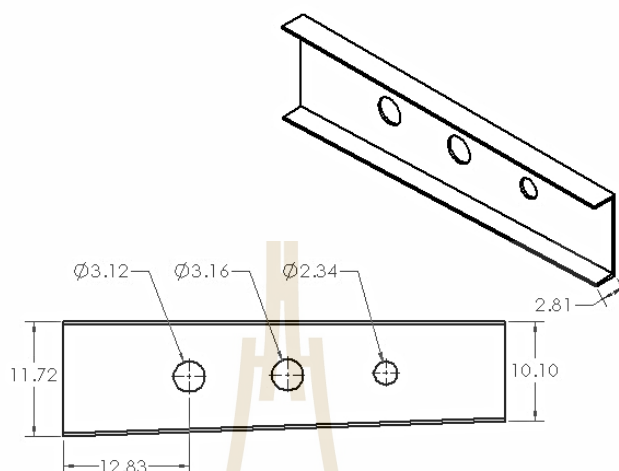
ค่าตัวแปรออกแบบ ปริมาตร และการโก่งตัวของชิ้นงานได้แสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นการแสดงทั้ง 10 จุดคำตอบที่ได้เลือกมาวิเคราะห์ผล เช่นเดียวกับกับสามกรณีก่อนหน้านี้ โดยลักษณะของแนวโน้มคำตอบก็จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ						
จุดที่		1	2	3	4	5
ตัวแปร ออกแบบ (cm)	x_1	11.72	11.62	11.86	11.69	11.71
	x_2	10.1	8.17	6.74	2.11	2.54
	x_3	2.81	2.76	1.56	1.61	1.42
	x_4	12.83	13.51	10.64	13.09	11.46
	x_5	1.56	4.69	1.37	1.32	1.41
	x_6	1.58	1.26	1.22	1.38	1.57
	x_7	1.17	1.09	1.32	1.21	1.12
ปริมาตร (cm ³)		211.75	197.97	174.18	155.91	142.39
การโค้งตัว (cm)		0.00259	0.00276	0.00344	0.00394	0.00467
กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ						
จุดที่		6	7	8	9	10
ตัวแปร ออกแบบ (cm)	x_1	10.52	9.04	7.84	6.99	6.08
	x_2	3.36	2.60	3.25	2.63	2.04
	x_3	1.15	1.48	1.12	1.13	1.48
	x_4	12.53	10.85	12.10	13.43	14.99
	x_5	1.89	1.96	1.92	1.31	1.89
	x_6	1.17	1.67	1.14	1.51	1.63
	x_7	1.17	1.36	1.03	1.21	1.39
ปริมาตร (cm ³)		135.62	122.95	116.63	107.48	99.39
การโค้งตัว (cm)		0.00563	0.00778	0.00976	0.0123	0.0158

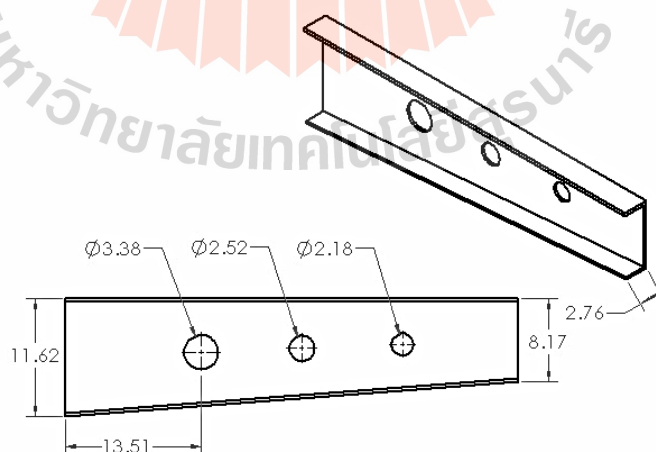
จากตารางที่ 4.7 สามารถนำข้อมูลตัวแปรออกแบบมาทำการสร้างรูปร่างเป็นรูปร่างชิ้นงานได้ โดยจะแสดงรูปร่างได้ทั้งหมด 10 รูปร่างตามข้อมูลที่เลือก ดังแสดงในรูปที่ 4.44-4.53

ผลเฉลยจุดที่ 1 มีปริมาตรเท่ากับ 211.75 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00259 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.44



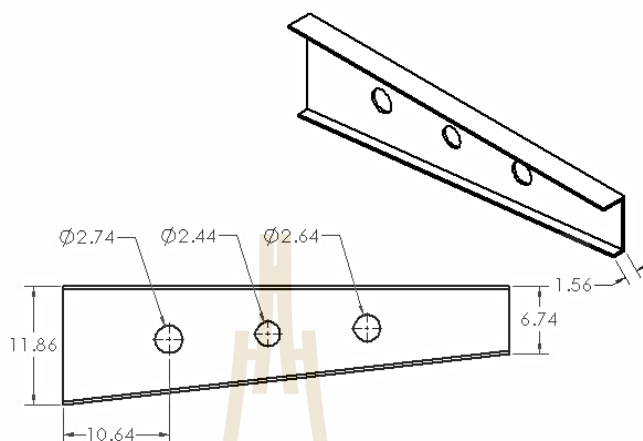
รูปที่ 4.44 ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพาราทอของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 2 มีปริมาตรเท่ากับ 197.97 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00276 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.45



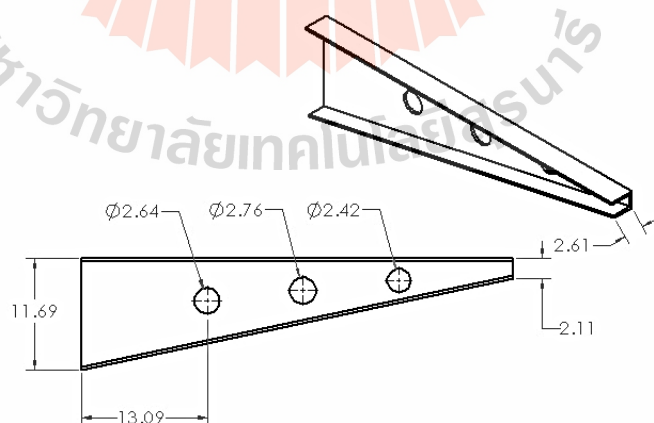
รูปที่ 4.45 ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพาราทอของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 3 มีปริมาตรเท่ากับ 174.18 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00344 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.46



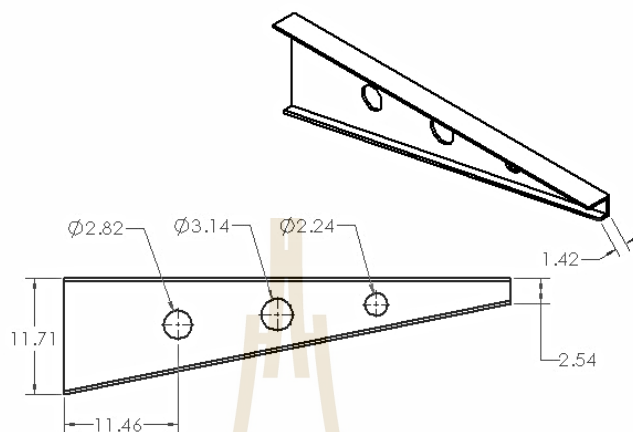
รูปที่ 4.46 ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 4 มีปริมาตรเท่ากับ 155.91 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00394 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.47



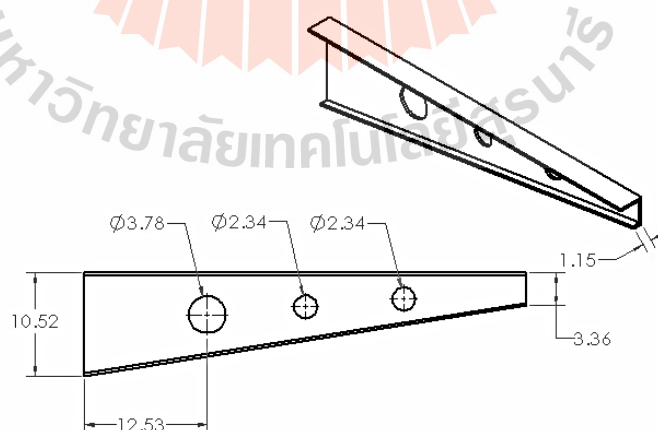
รูปที่ 4.47 ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพาเรโตของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 5 มีปริมาตรเท่ากับ 142.39 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00467 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.48



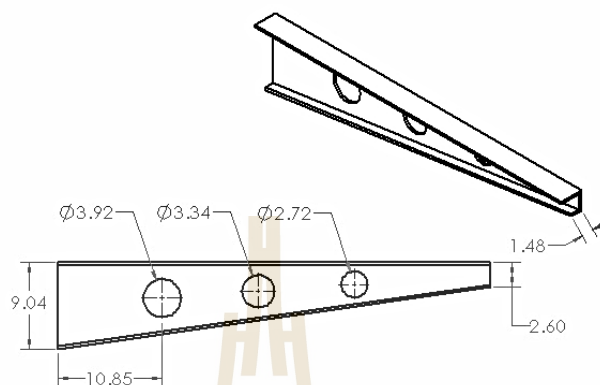
รูปที่ 4.48 ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพาเรโโตของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 6 มีปริมาตรเท่ากับ 135.62 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00563 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.49



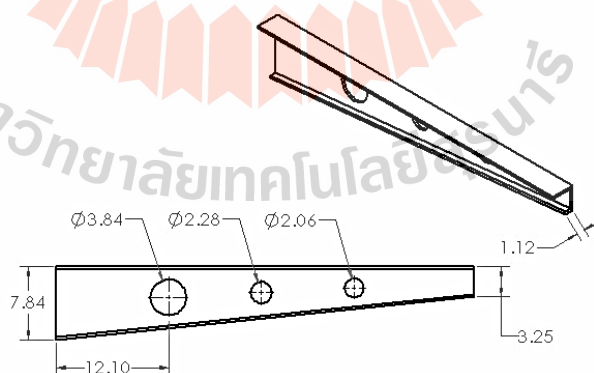
รูปที่ 4.49 ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพาเรโโตของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 7 มีปริมาตรเท่ากับ 122.95 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00778 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.50



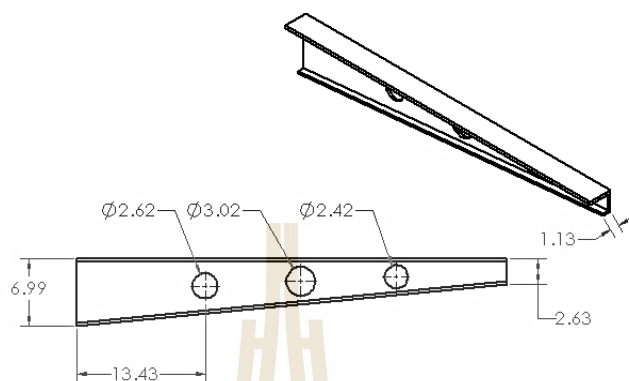
รูปที่ 4.50 ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 8 มีปริมาตรเท่ากับ 116.63 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัวของชิ้นงานเท่ากับ 0.00976 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.51



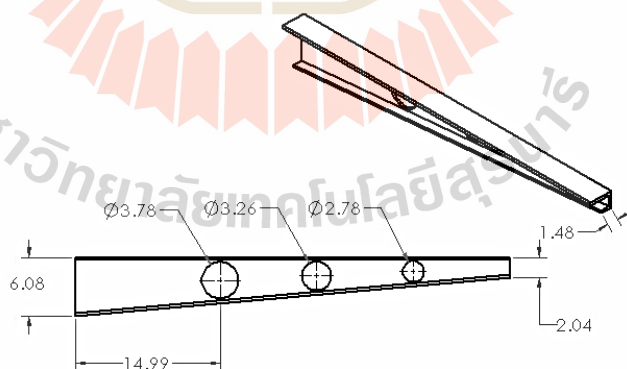
รูปที่ 4.51 ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพารโโตของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 9 มีปริมาตรเท่ากับ 107.48 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.0123 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอบหน้าพารโตะของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ผลเฉลยจุดที่ 10 มีปริมาตรเท่ากับ 99.39 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีระยะการโก่งตัว
ของชิ้นงานเท่ากับ 0.0158 เซนติเมตร โดยรูปร่างของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.53



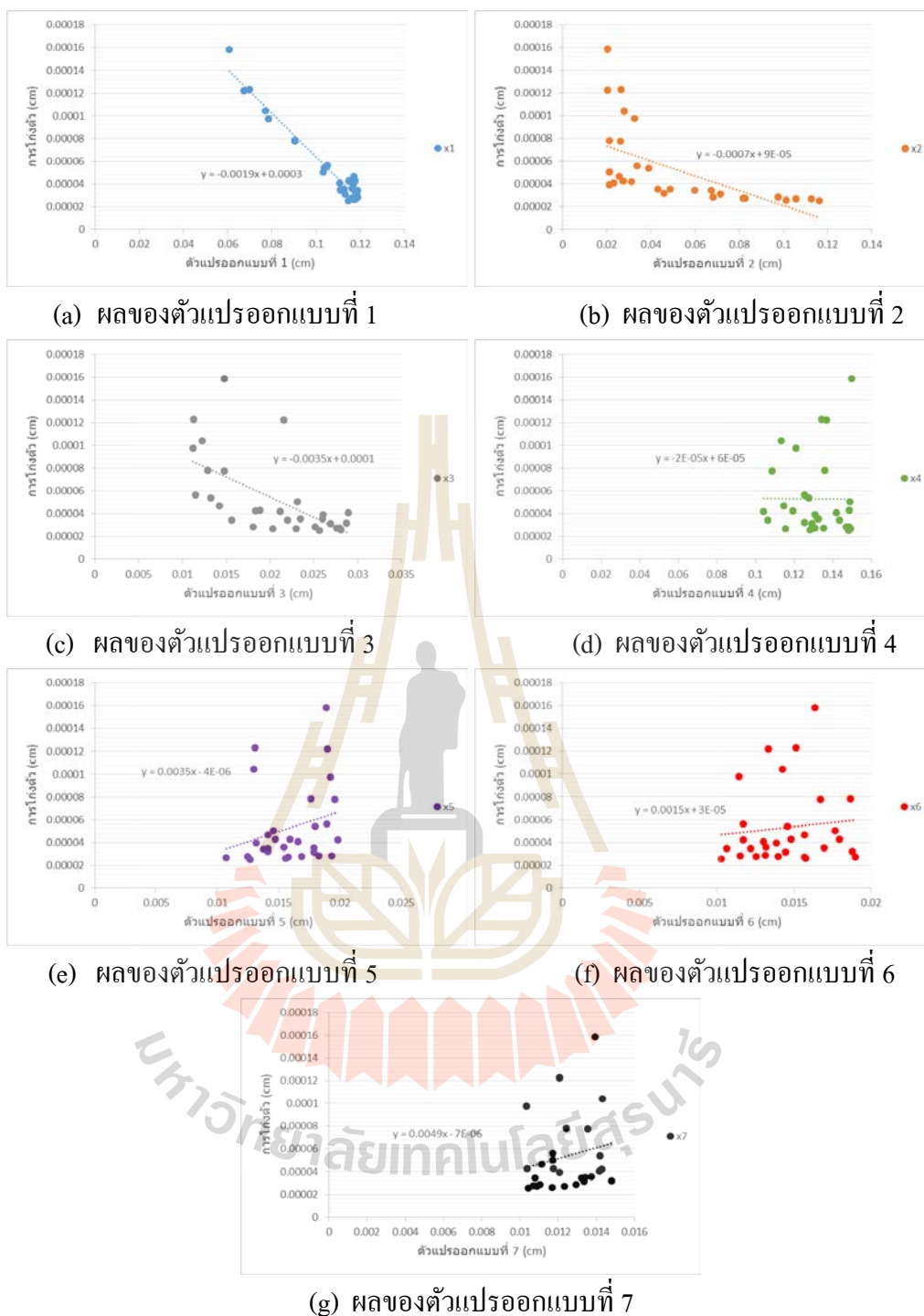
รูปที่ 4.53 ผลเฉลยจุดที่ 10 บนขอบหน้าพารโตะของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

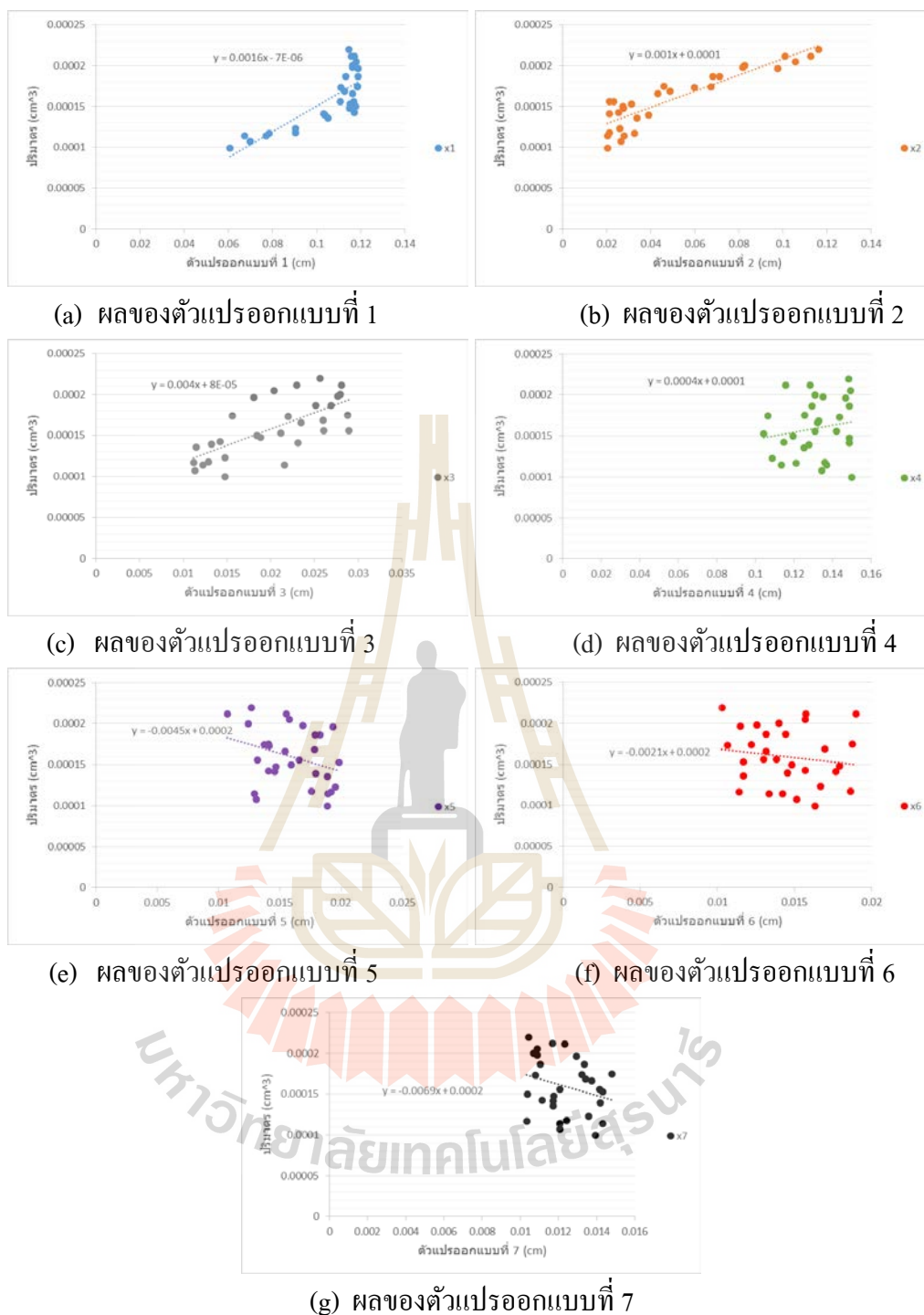
กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ					
จุดที่	1	2	3	4	5
ร้อยละของปริมาตร (%)	100	93.49	82.26	73.63	67.24
ร้อยละของการโค้งตัว (%)	16.39	17.47	21.77	24.94	29.56

กรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ					
จุดที่	6	7	8	9	10
ร้อยละของปริมาตร (%)	64.05	58.06	55.08	50.76	46.93
ร้อยละของการโค้งตัว (%)	35.63	49.24	61.77	77.85	100

จากรูปที่ 4.44-4.53 แสดงรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงาน โดยที่สร้างขึ้นจากข้อมูลตัวแปรออกแบบ ซึ่งค่าฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าไม่เท่ากัน โดยรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 211.75 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นจึงไล่เรียงจนไปถึงรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 10 ที่มีค่าปริมาตรน้อยที่สุด เท่ากับ 99.39 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการเปรียบเทียบร้อยละของปริมาตรได้แสดงดังตารางที่ 4.8 ค่าร้อยละของปริมาตรที่จุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากจุดที่ 1 ได้ร้อยละ 53.07 ในทางกลับการรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 1 จะมีค่าการโค้งตัวน้อยที่สุด เท่ากับ 0.00259 เซนติเมตร แล้วไล่เรียงจนมาถึงรูปร่างจากจุดคำตอบที่ 10 ที่มีค่าการโค้งตัวมากที่สุด เท่ากับ 0.0158 เซนติเมตร ซึ่งการเปรียบเทียบร้อยละของการโค้งตัวของจุดที่ 1 นั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ 10 จะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 83.61 ซึ่งแนวโน้มของค่าตัวแปรออกแบบ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 และ x_6 จะเป็นไปในทิศทางเดียวกับ 3 กรณีก่อนหน้านี้ แต่ในกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะนี้ จะมีตัวแปรออกแบบเพิ่มขึ้นมาอีก 1 ตัว คือตัวแปรขนาดรัศมีของรูเจาะรูที่ 3 หรือตัวแปรออกแบบ x_7 โดยรูเจาะที่อยู่บนชิ้นงานนั้นจะมีตำแหน่งและขนาดเป็นไปตามการกำหนดขอบเขตของตัวแปรออกแบบ ทำให้รูเจาะจะอยู่บนบริเวณกลางชิ้นงาน โดยได้มีการกำหนดระยะห่างระหว่างรูเจาะทั้งสามเท่ากับ 10 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหารูเจาะทั้งสองจะซ้อนทับกัน สำหรับกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะนั้น ทุกจุดคำตอบบนขอบหน้าพาเรโต คือ คำตอบที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากปัญหานี้เป็นปัญหาแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้นการที่จะได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนความพึงพอใจของผู้ที่จะใช้งานว่าต้องการสัดส่วนฟังก์ชันเป้าหมายใดมากกว่ากัน ในส่วนของความไวของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายแสดงดังรูปที่ 4.54-4.55



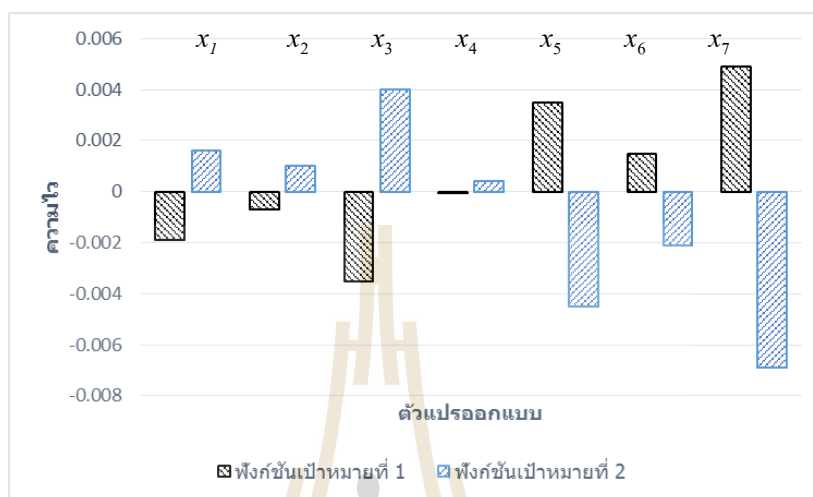
รูปที่ 4.54 แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 1 กรณีซึ่งงานมี 3 รูเจาะ



รูปที่ 4.55 แนวโน้มของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายที่ 2 กรณีซึ่งงานมี 3 รูเจาะ

จากรูปที่ 4.54 (a) – 4.54 (g) และ 4.55 (a) – 4.55 (g) พบว่าค่าตัวแปรออกแบบที่ได้ค่า x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 และ x_6 จะมีค่าไปในทิศทางเดียวกันกับสามกรณีก่อนหน้านี้ ซึ่งจะมีค่าตัวแปรที่ออกแบบ x_7 ที่เพิ่มขึ้นมา โดยค่าตัวแปรออกแบบ x_7 จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับตัว

แปรรูปแบบ x_5 และ x_6 และได้นำค่าความชันของตัวแปรรูปแบบเพื่อหาค่าความไวของตัวแปรรูปแบบ โดยทำการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อบ่งชี้ว่าตัวแปรรูปแบบมีความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.56 ความไวของตัวแปรรูปแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมายของกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ

จากรูปที่ 4.56 พบว่าตัวแปรรูปแบบ x_7 จะมีค่าความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองสูงที่สุด ซึ่งตัวแปรรูปแบบ x_7 จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองมากที่สุด ดังนั้นตัวแปรรูปแบบดังกล่าวจึงมีความสำคัญต่อการคำนวณที่สุด ขณะที่ตัวแปรรูปแบบ x_3 , x_5 , x_1 , x_6 , x_2 และ x_4 จะมีความไวและผลต่อการคำนวณลดลงตามลำดับ โดยตัวแปรรูปแบบ x_4 นั้นมีค่าความไวต่อฟังก์ชันเป้าหมายน้อยมาก จึงอาจสามารถตัดตัวแปรรูปแบบนี้ทิ้งได้เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ

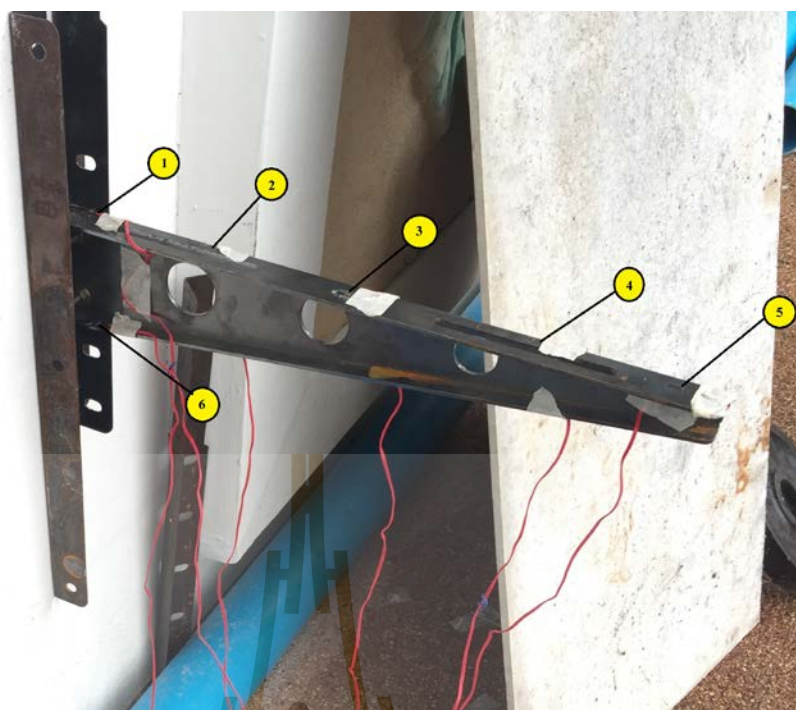
4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบ

ชิ้นงานที่เลือกมาใช้ในการทดสอบ คือ ชิ้นงานที่มี 3 รูเจาะ ที่จำนวน $nsol$ เท่ากับ 30 และ $nloop$ เท่ากับ 10 และได้เลือกจุดที่ 7 บนขอบหน้าพารโทมาใช้ในการสร้างชิ้นงานเพื่อทดสอบ เนื่องจากเป็นจุดที่อยู่ในช่วงที่ค่าฟังก์ชันเป้าหมายไม่เอียงไปทางด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไป ชิ้นงานที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.57 ซึ่งจากการทดสอบวัดค่าความเครียดของชิ้นงานจริง โดยเกจวัดความเครียด เปรียบเทียบกับผลการคำนวณชิ้นงานด้วยโปรแกรม Ansys 10 และการคำนวณค่าความเค้นจากสมการที่ (2.46)



รูปที่ 4.57 ชิ้นงานที่สร้างเพื่อการทดสอบ

การติดตั้งเกจวัดความเครียดบนชิ้นงานทั้ง 6 จุด ได้แสดงดังรูปที่ 4.58 ในการวัดความเครียดบนชิ้นงานนั้นจะวัดความเครียดหลายจุด เพื่อเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของค่าความเครียดที่ได้จากการวัดบนชิ้นงานเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองผ่าน โปรแกรม Ansys 10



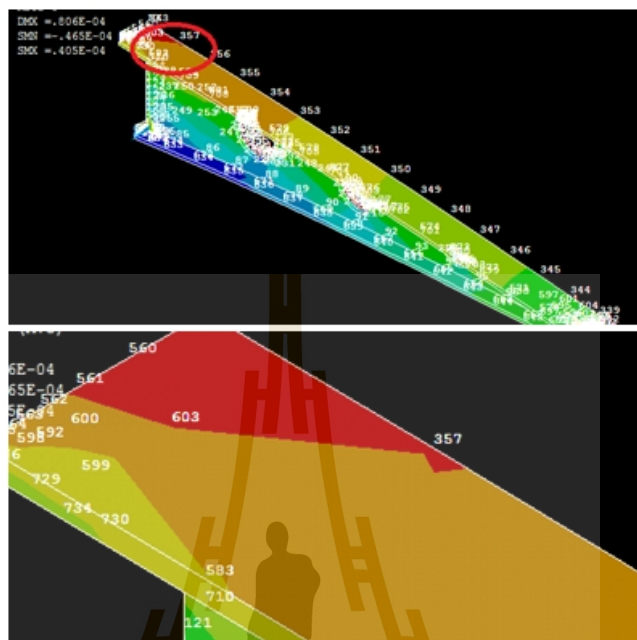
รูปที่ 4.58 การติดตั้งเกจวัดความเครียดทั้ง 6 จุดบนชิ้นงาน

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.59



รูปที่ 4.59 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดจุดที่ 1

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกว้วัดความเครียดจุดที่ 1 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในโปรแกรม Ansys 10 แสดงในรูปที่ 4.60



รูปที่ 4.60 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกว้วัดความเครียดจุดที่ 1 ในการจำลอง

ซึ่งบริเวณที่ติดตั้งเกว้วัดความเครียดจุดที่ 1 นั้น คือ โหนดที่ 506 ดังแสดงในรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.61 บริเวณที่ติดตั้งเกว้วัดความเครียด โหนดที่ 506

การอ่านค่าความเครียดจากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.62

NODE	EPTOX	EPTOY	EPTOZ	EPTOXY	EPTOYZ	EPTOXZ
491	-0.10552E-05	0.18772E-06	0.51123E-06	-0.64207E-05	0.14696E-05	0.39481E-06
492	-0.38729E-05	0.53775E-07	0.10962E-05	-0.80154E-05	0.23841E-05	0.17325E-05
493	-0.14801E-04	0.77966E-06	0.26211E-05	-0.10878E-04	0.37257E-06	0.10259E-05
494	-0.15989E-04	0.44387E-05	0.39801E-05	-0.91318E-05	0.66333E-06	0.15128E-05
495	0.21216E-05	-0.14473E-05	0.12741E-05	-0.64505E-05	0.17695E-05	0.88722E-06
496	-0.17228E-05	0.15278E-06	0.30482E-06	-0.74720E-05	0.29122E-05	0.40778E-05
497	-0.11425E-04	0.12329E-05	0.26937E-05	-0.82187E-05	0.33772E-06	0.28036E-06
498	0.76150E-07	-0.19181E-06	0.22127E-08	-0.45197E-06	-0.15663E-06	0.39526E-07
499	-0.25901E-06	0.65075E-06	0.10076E-06	-0.65417E-05	0.38150E-06	0.87360E-06
500	-0.76334E-05	0.64907E-06	0.16150E-05	-0.69329E-05	-0.37889E-07	0.88139E-06
501	-0.22950E-05	0.11289E-06	0.62581E-06	-0.56603E-05	0.96950E-07	0.16241E-05
502	-0.83369E-06	0.25038E-07	0.21341E-06	-0.33102E-05	0.10942E-06	0.86662E-07
503	-0.50567E-06	0.48384E-06	0.33326E-06	-0.50083E-05	0.56498E-06	0.31320E-06
504	0.63111E-05	-0.15830E-05	0.19819E-05	-0.47796E-05	0.14323E-05	0.49921E-05
505	0.48368E-05	-0.38325E-06	-0.69472E-06	-0.61949E-05	-0.69786E-06	0.11119E-05
506	0.13260E-04	0.13192E-05	-0.10347E-05	-0.51070E-05	-0.15707E-05	0.61834E-05
507	-0.22951E-06	0.68538E-06	-0.74459E-06	-0.74911E-05	0.14991E-05	0.10202E-05
508	-0.89466E-05	0.22659E-05	0.20876E-05	-0.53724E-05	0.21472E-05	0.15633E-06
509	-0.17498E-05	0.98743E-06	-0.50719E-06	-0.61640E-05	0.13492E-05	0.36580E-06
510	-0.65321E-05	0.11319E-05	0.17876E-05	-0.64893E-05	0.29098E-05	0.29394E-05
511	0.45940E-05	-0.15632E-05	-0.13596E-05	-0.41621E-05	0.11655E-05	0.24591E-05
512	-0.34085E-05	0.84015E-07	0.10957E-05	-0.45777E-05	0.19107E-05	0.14835E-05
513	-0.11802E-05	-0.31264E-06	0.32308E-06	-0.59505E-05	0.20483E-05	0.16060E-05

รูปที่ 4.62 การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 1 จากโปรแกรม Ansys 10

การอ่านค่าความเค้นจากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.63

NODE	SX	SY	SZ	SNX	SNY	SNZ
491	-0.34000E+06	-50701.	650.10	-0.50958E+06	0.11664E+06	31334.
492	-0.84887E+06	-0.22558E+06	-60126.	-0.63614E+06	0.18922E+06	0.13750E+06
493	-0.33295E+07	0.85643E+06	-0.56414E+06	-0.86334E+06	-29569.	-81418.
494	-0.31888E+07	53673.	-19125.	-0.72474E+06	52645.	0.12006E+06
495	0.28520E+06	-0.28129E+06	-0.25380E+06	-0.51194E+06	0.14043E+06	-70414.
496	-0.38223E+06	-84527.	-60393.	-0.59301E+06	0.23112E+06	0.32363E+06
497	-0.24581E+07	-0.44898E+06	-0.21711E+06	-0.65228E+06	26803.	-22251.
498	2333.5	-40199.	-9402.5	-35871.	-12431.	-3137.0
499	-0.11067E+06	-0.17285E+06	-53564.	-0.51918E+06	30278.	69333.
500	-0.16733E+07	-0.35863E+06	-0.20531E+06	-0.55023E+06	-3007.1	-69952.
501	-0.48910E+06	-0.11589E+06	-34476.	-0.44823E+06	-7694.5	-0.12889E+06
502	-0.18351E+06	-47204.	-17304.	-0.26272E+06	8684.0	6877.9
503	-0.13669E+06	-0.13322E+06	-3525.4	-0.39748E+06	44840.	-24857.
504	0.12379E+07	-15144.	-78469.	-0.37934E+06	0.11367E+06	-0.39619E+06
505	0.10909E+07	0.26234E+06	0.21290E+06	-0.49166E+06	-55386.	88248.
506	0.30423E+07	0.72825E+06	0.177340E+06	-0.40532E+06	-0.12466E+06	0.49075E+06
507	-0.11711E+06	-0.25147E+06	-0.26087E+06	-0.59453E+06	0.11887E+06	-80968.
508	-0.18150E+07	-35235.	-63545.	-0.42638E+06	0.17041E+06	-12407.
509	0.29969E+06	-0.13479E+06	-59564.	-0.48920E+06	0.10708E+06	-29032.
510	-0.13475E+07	-0.13094E+06	-26863.	-0.51502E+06	0.23094E+06	0.23329E+06
511	0.87290E+06	-0.10444E+06	-72123.	-0.33032E+06	92499.	-0.19517E+06
512	-0.73266E+06	-0.17830E+06	-17719.	-0.36331E+06	0.15164E+06	0.11774E+06
513	-0.28790E+06	-0.15020E+06	-49289.	-0.47226E+06	0.16256E+06	0.12746E+06
514	0.49544E+06	-63429.	-91050.	-0.43695E+06	74108.	-0.19152E+06

รูปที่ 4.63 การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 1 จากโปรแกรม Ansys 10

โดยค่าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 1

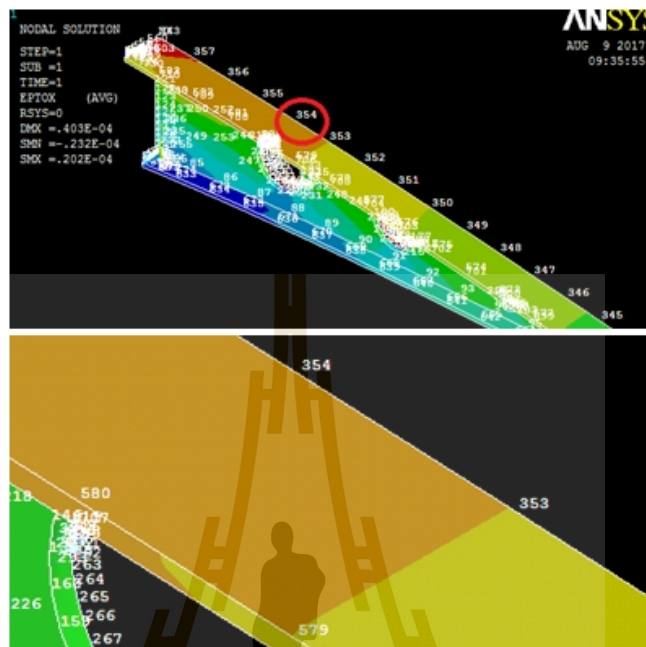
ค่าที่ได้		ความเครียด ($\mu\varepsilon$)		ความเค้น (MPa)
		ค่าจากการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
ชิ้นงานที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	13.06	13.12	2.625
	ครั้งที่ 2	13.10		
	ครั้งที่ 3	13.12		
	ครั้งที่ 4	13.20		
	ครั้งที่ 5	13.14		
การจำลองโดยโปรแกรม Ansys 10		13.26		3.042

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 2 แสดงในรูปที่ 4.64



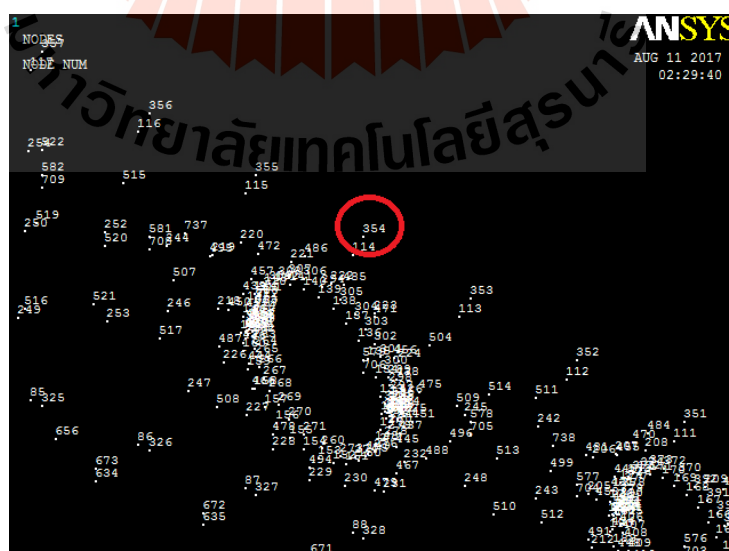
รูปที่ 4.64 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 2

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในโปรแกรม Ansys 10 แสดงในรูปที่ 4.65



รูปที่ 4.65 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 2 ในการจำลอง

ซึ่งบริเวณที่ติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 2 นั้น คือ โหนดที่ 354 ดังแสดงในรูปที่ 4.66



รูปที่ 4.66 บริเวณที่ติดตั้งเกววัดความเครียด โหนดที่ 354

การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 2 จากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.67

NODE	EPTOX	EPTOY	EPTOZ	EPTOXY	EPTOYZ	EPTOXZ
351	0.77209E-05	-0.16839E-05	-0.19110E-05	-0.48324E-06	0.64304E-06	-0.15548E-05
352	0.84596E-05	-0.29665E-05	-0.17678E-05	0.59241E-07	0.60943E-07	-0.16969E-05
353	0.61010E-05	-0.22894E-05	-0.23366E-05	0.46494E-06	0.16291E-06	-0.28540E-05
354	0.10988E-04	0.32693E-05	-0.26553E-05	0.32320E-05	0.33599E-06	-0.10481E-05
355	-0.13104E-04	0.45001E-05	-0.26983E-05	-0.26033E-05	-0.40434E-06	0.35501E-06
356	0.11754E-04	-0.36574E-05	-0.26831E-05	-0.20599E-05	0.90717E-06	-0.20321E-06
357	0.15476E-04	-0.32294E-05	-0.26987E-05	-0.33493E-05	0.16137E-05	0.29929E-05
358	0.13329E-04	-0.57543E-05	-0.45393E-05	-0.82118E-05	0.10278E-05	0.80973E-05
359	0.97707E-05	-0.53086E-07	-0.17216E-06	-0.71931E-05	-0.11682E-05	0.61366E-05
360	0.63264E-05	0.0000	0.42205E-06	-0.78877E-05	-0.28845E-06	0.61422E-05
361	0.11972E-05	-0.10567E-06	0.26864E-06	-0.64539E-05	0.91756E-07	0.21953E-05
362	-0.20621E-05	0.0000	0.69887E-06	-0.68935E-05	-0.32831E-06	0.30015E-05
363	-0.48197E-05	0.57704E-07	0.42466E-06	-0.66125E-05	-0.48599E-06	0.73385E-07
364	-0.73998E-05	0.0000	0.59529E-23	-0.73014E-05	-0.12439E-21	0.34942E-06
365	-0.89544E-05	0.15603E-06	0.65215E-06	-0.76717E-05	-0.60513E-07	-0.28816E-06
366	-0.10671E-04	0.0000	0.56843E-22	-0.87884E-05	0.60914E-21	-0.82011E-06
367	-0.12515E-04	0.21683E-06	0.14118E-05	-0.95562E-05	0.31083E-06	-0.73850E-06
368	-0.14605E-04	0.59635E-21	0.10868E-05	-0.11223E-04	0.19215E-06	-0.11596E-05
369	-0.14656E-04	0.11927E-21	-0.71755E-22	-0.11413E-04	0.33389E-21	-0.22888E-05
370	0.56186E-05	-0.14741E-05	-0.15932E-05	-0.26004E-05	-0.10576E-05	-0.30258E-06
371	0.50026E-06	-0.24772E-05	0.67793E-06	-0.35276E-05	-0.12067E-05	-0.22995E-06
372	0.40676E-05	-0.26450E-05	-0.97890E-06	-0.30930E-05	-0.13364E-05	-0.11664E-05
373	0.24709E-05	-0.36367E-05	0.30255E-07	-0.47069E-05	-0.12448E-05	-0.50372E-06
374	0.74551E-06	-0.46413E-05	0.77367E-06	-0.71621E-05	-0.11284E-05	0.81315E-07

รูปที่ 4.67 การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 2 จากโปรแกรม Ansys 10

การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 2 จากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.68

NODE	SX	SY	SZ	SNX	SNY	SNZ
351	0.13627E+07	87940.	51898.	-38352.	51035.	-0.12339E+06
352	0.16631E+07	0.15059E+06	39689.	4701.7	-4836.7	-0.13467E+06
353	0.13984E+07	21359.	13867.	-36900.	12930.	-0.22650E+06
354	0.21795E+07	-83586.	13880.	-0.25651E+06	26666.	-83184.
355	0.23078E+07	-0.20654E+06	79459.	-0.20661E+06	-32091.	-28176.
356	0.23312E+07	-0.11506E+06	39581.	-0.16348E+06	71998.	-16128.
357	0.32773E+07	0.30827E+06	0.39251E+06	-0.26582E+06	-0.12807E+06	0.23754E+06
358	0.32617E+07	0.11460E+07	0.11446E+07	-0.65173E+06	0.81568E-10	0.64265E+06
359	0.23716E+07	0.81228E+06	0.79338E+06	-0.57088E+06	-92716.	0.48703E+06
360	0.15844E+07	0.58022E+06	0.64722E+06	-0.62601E+06	-22893.	0.48747E+06
361	0.30698E+06	0.10017E+06	0.15959E+06	-0.51222E+06	7282.2	0.17423E+06
362	-0.44453E+06	-0.11721E+06	-6280.5	-0.54711E+06	-26056.	0.23822E+06
363	-0.11379E+07	-0.36376E+06	-0.30551E+06	-0.52480E+06	-38571.	5824.2
364	-0.18108E+07	-0.63623E+06	-0.63623E+06	-0.57948E+06	-0.98723E-11	27732.
365	-0.21217E+07	-0.67563E+06	-0.59638E+06	-0.60837E+06	-4802.6	-22870.
366	-0.26112E+07	-0.91744E+06	-0.91744E+06	-0.69749E+06	0.48344E-10	-65089.
367	-0.29226E+07	-0.90162E+06	-0.71195E+06	-0.75843E+06	24669.	-58611.
368	-0.34807E+07	-0.11623E+07	-0.98981E+06	-0.98068E+06	15250.	-92032.
369	-0.35865E+07	-0.12601E+07	-0.12601E+07	-0.90580E+06	-0.26499E-10	-0.18165E+06
370	0.11112E+07	-14610.	-33521.	-0.20638E+06	83938.	-24014.
371	-32279.	-0.50489E+06	-4077.3	-0.27997E+06	-95768.	-18250.
372	0.68378E+06	-0.38170E+06	-0.11724E+06	-0.24548E+06	0.10606E+06	92568.
373	0.29456E+06	-0.67490E+06	-92836.	-0.37357E+06	98791.	39978.
374	-0.15010E+06	-0.10051E+07	-0.14563E+06	-0.56840E+06	89552.	6453.6

รูปที่ 4.68 การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 2 จากโปรแกรม Ansys 10

โดยค่าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 2

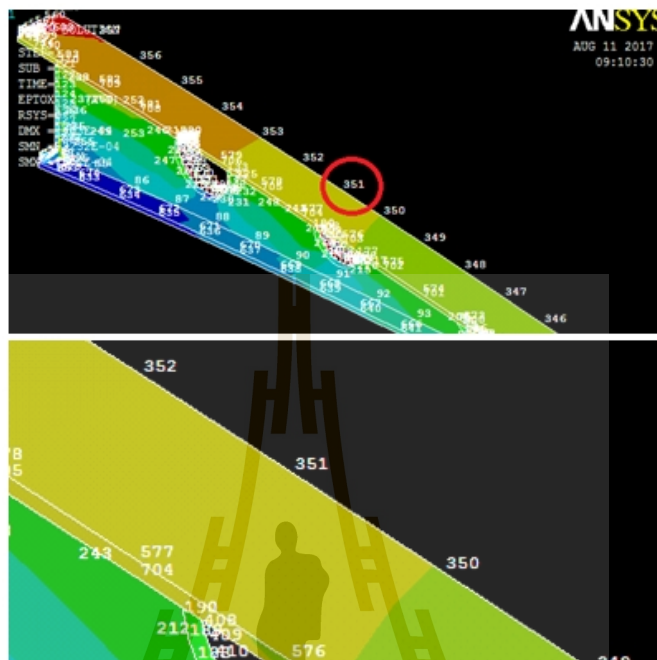
ค่าที่ได้		ความเครียด ($\mu\epsilon$)		ความเค้น (MPa)
		ค่าจากการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
ชิ้นงานที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	10.87	10.99	2.198
	ครั้งที่ 2	11.13		
	ครั้งที่ 3	11.04		
	ครั้งที่ 4	10.93		
	ครั้งที่ 5	10.98		
การจำลองโดยโปรแกรม Ansys 10		10.998		2.179

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 3 แสดงในรูปที่ 4.69



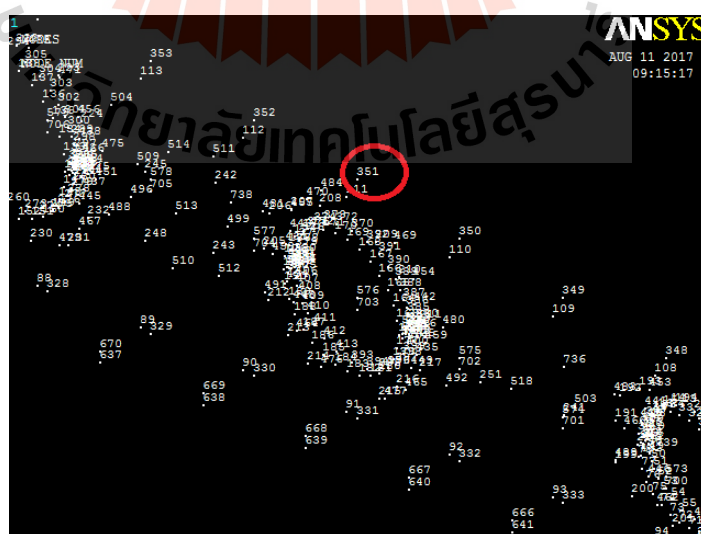
รูปที่ 4.69 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 3

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 3 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในโปรแกรม Ansys 10 แสดงในรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 3 ในการจำลอง

ซึ่งบริเวณที่ติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 3 นั้น คือ โหนดที่ 351 ดังแสดงในรูปที่ 4.71



รูปที่ 4.71 บริเวณที่ติดตั้งเกววัดความเครียด โหนดที่ 351

การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 3 จากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.72

NODE	EPTOX	EPTOY	EPTOZ	EPTOXY	EPTOYZ	EPTOXZ
351	0.72265E+05	0.16839E-05	-0.19110E-05	-0.48324E-06	0.64304E-06	-0.15548E-05
352	0.84596E+05	-0.29665E-05	-0.17678E-05	0.59241E-07	-0.60943E-07	-0.16969E-05
353	0.91010E-05	-0.22894E-05	-0.23366E-05	-0.46494E-06	0.16291E-06	-0.28540E-05
354	0.10988E-04	-0.32693E-05	-0.26553E-05	-0.32320E-05	0.33599E-06	-0.10481E-05
355	0.13104E-04	-0.45001E-05	-0.26983E-05	-0.26033E-05	-0.40434E-06	-0.35501E-06
356	0.11754E-04	-0.36574E-05	-0.26831E-05	-0.20599E-05	0.90717E-06	-0.20321E-06
357	0.15476E-04	-0.32294E-05	-0.26987E-05	-0.33493E-05	-0.16137E-05	0.29929E-05
358	0.13329E-04	-0.57543E-05	-0.45393E-05	-0.82118E-05	-0.10278E-05	0.80973E-05
359	0.97707E-05	-0.53086E-07	-0.17216E-06	-0.71931E-05	-0.11682E-05	0.61366E-05
360	0.63264E-05	0.00000	0.42205E-06	-0.78877E-05	-0.28845E-06	0.61422E-05
361	0.11972E-05	-0.10567E-06	0.26864E-06	-0.64539E-05	0.91756E-07	0.21953E-05
362	-0.20621E-05	0.00000	0.69887E-06	-0.68935E-05	-0.32831E-06	0.30015E-05
363	-0.48197E-05	0.57704E-07	0.42466E-06	-0.66125E-05	-0.48599E-06	0.73385E-07
364	-0.73998E-05	0.00000	0.59529E-23	-0.73014E-05	-0.12439E-21	0.34942E-06
365	-0.89544E-05	0.15603E-06	0.65215E-06	-0.76717E-05	-0.60513E-07	-0.28816E-06
366	-0.10671E-04	0.00000	0.56843E-22	-0.87884E-05	0.60914E-21	-0.82011E-06
367	-0.12515E-04	0.21683E-06	0.14118E-05	-0.95562E-05	0.31083E-06	-0.73850E-06
368	-0.14605E-04	0.59635E-21	0.10868E-05	-0.11223E-04	0.19215E-06	-0.11596E-05
369	-0.14656E-04	0.11927E-21	-0.71755E-22	-0.11413E-04	-0.33389E-21	-0.22888E-05
370	0.56186E-05	-0.14741E-05	-0.15932E-05	-0.26004E-05	0.10576E-05	-0.30258E-06
371	0.50026E-06	-0.24772E-05	0.67793E-06	-0.35276E-05	-0.12067E-05	-0.22995E-06
372	0.40676E-05	-0.26450E-05	-0.97890E-06	-0.30930E-05	0.13364E-05	-0.11664E-05
373	0.24709E-05	-0.36367E-05	0.30255E-07	-0.47069E-05	0.12448E-05	0.50372E-06
374	0.34551E-06	-0.46413E-05	0.77367E-06	-0.71621E-05	0.11284E-05	0.81345E-07

รูปที่ 4.72 การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 3 จากโปรแกรม Ansys 10

การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 3 จากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.73

NODE	SX	SY	SZ	SHY	SHZ	SHXZ
351	0.15817E+07	87940.	51898.	-38352.	51035.	-0.12339E+06
352	0.16631E+07	-0.15059E+06	39689.	4701.7	-4836.7	-0.13467E+06
353	0.18294E+07	21359.	13867.	-36900.	12930.	-0.22650E+06
354	0.21795E+07	-83586.	13880.	-0.25651E+06	26666.	-83184.
355	0.25878E+07	-0.20654E+06	79459.	-0.20661E+06	-32091.	28176.
356	0.23312E+07	-0.11506E+06	39581.	-0.16348E+06	71998.	-16128.
357	0.32773E+07	0.30827E+06	0.39251E+06	-0.26582E+06	-0.12807E+06	0.23754E+06
358	0.32617E+07	0.11460E+07	0.11460E+07	-0.65173E+06	0.81568E-10	0.64265E+06
359	0.23716E+07	0.81228E+06	0.79338E+06	-0.57088E+06	-92716.	0.48703E+06
360	0.15844E+07	0.58022E+06	0.64722E+06	-0.62601E+06	-22893.	0.48747E+06
361	0.30698E+06	0.10017E+06	0.15959E+06	-0.51222E+06	7282.2	0.17423E+06
362	-0.44453E+06	-0.11721E+06	-6280.5	-0.54711E+06	-26056.	0.23822E+06
363	-0.11379E+07	-0.36376E+06	-0.30551E+06	-0.52480E+06	-38571.	5824.2
364	-0.18108E+07	-0.63623E+06	-0.63623E+06	-0.57948E+06	-0.98723E-11	27732.
365	-0.21217E+07	-0.67563E+06	-0.59688E+06	-0.60887E+06	-4802.6	-22870.
366	-0.26112E+07	-0.91744E+06	-0.91744E+06	-0.69749E+06	0.48344E-10	-65088.
367	-0.29226E+07	-0.90162E+06	-0.71195E+06	-0.75843E+06	24669.	-58611.
368	-0.34807E+07	-0.11623E+07	-0.98981E+06	-0.89068E+06	15250.	-92032.
369	-0.35865E+07	-0.12601E+07	-0.12601E+07	-0.90580E+06	-0.26499E-10	-0.18165E+06
370	0.11112E+07	-14610.	-33521.	-0.20638E+06	83938.	-24014.
371	-32279.	-0.50489E+06	-4077.3	-0.27997E+06	-95768.	-18250.
372	0.68378E+06	-0.38170E+06	-0.11724E+06	-0.24548E+06	0.10606E+06	92568.
373	0.29456E+06	-0.67490E+06	-92836.	-0.37357E+06	98791.	39978.

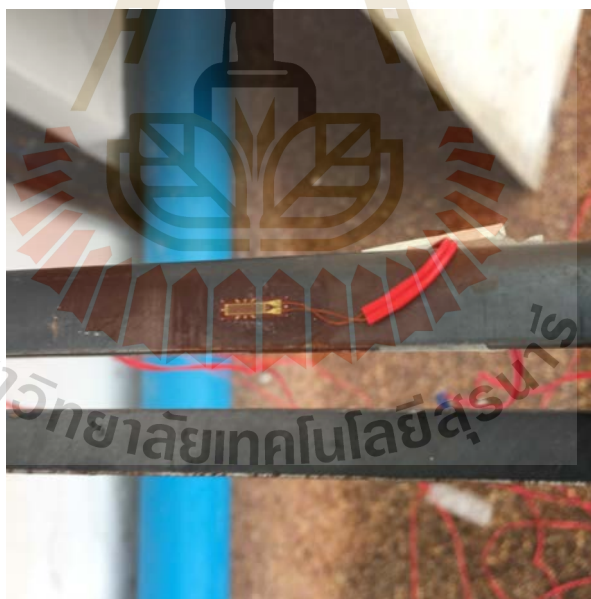
รูปที่ 4.73 การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 3 จากโปรแกรม Ansys 10

โดยค่าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 3

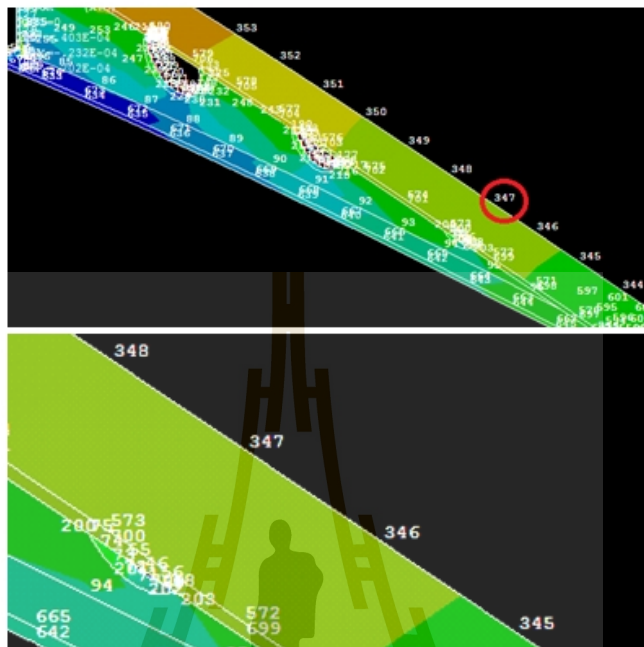
ค่าที่ได้		ความเครียด ($\mu\varepsilon$)		ความเค้น (MPa)
		ค่าจากการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
ชิ้นงานที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	7.93	7.86	1.572
	ครั้งที่ 2	7.86		
	ครั้งที่ 3	7.96		
	ครั้งที่ 4	7.59		
	ครั้งที่ 5	7.98		
การจำลองโดยโปรแกรม Ansys 10		7.727		1.582

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 4 แสดงในรูปที่ 4.74



รูปที่ 4.74 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 4

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกวียดความเครียดจุดที่ 4 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในโปรแกรม Ansys 10 แสดงในรูปที่ 4.75



รูปที่ 4.75 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกวียดความเครียดจุดที่ 4 ในการจำลอง

ซึ่งบริเวณที่ติดตั้งเกวียดความเครียดจุดที่ 4 นั้น คือ โหนดที่ 347 ดังแสดงในรูปที่ 4.76



รูปที่ 4.76 บริเวณที่ติดตั้งเกวียดความเครียด โหนดที่ 347

การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 4 จาก โปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.77

File
327 -0.17488E-04 0.44247E-05 0.45538E-05-0.79979E-05-0.80144E-06-0.28700E-06
328 -0.16794E-04 0.36378E-05 0.45896E-05-0.94941E-05 0.34246E-06 0.10100E-05
329 -0.13304E-04 0.31304E-05 0.35994E-05-0.93115E-05 0.57729E-06 0.77001E-06
330 -0.11012E-04 0.29794E-05 0.27182E-05-0.79993E-05 0.17355E-06-0.77530E-06
331 -0.11828E-04 0.27954E-05 0.30080E-05-0.77347E-05-0.28108E-06-0.90206E-06
332 -0.81419E-05 0.16082E-05 0.23184E-05-0.49792E-05 0.31304E-06 0.17836E-05
333 -0.54525E-05 0.95499E-06 0.16623E-05-0.48490E-05 0.86425E-07 0.38821E-06
334 -0.60782E-05 0.12585E-05 0.14783E-05-0.42183E-05-0.26671E-06-0.63900E-06
335 -0.44854E-05 0.47407E-06 0.13750E-05-0.32048E-05-0.10750E-06 0.12697E-05
336 -0.16575E-05 0.49817E-07 0.69193E-06-0.28451E-05-0.14900E-06 0.68486E-06
337 -0.49538E-06-0.12130E-06 0.30137E-06-0.16471E-05 0.12963E-06 0.62423E-07
338 -0.10859E-06-0.29117E-06 0.12876E-06-0.93187E-06 0.16895E-06-0.18210E-07
339 0.16827E-06-0.39837E-06 0.98518E-07-0.45422E-06-0.38541E-06-0.86782E-07
340 0.28144E-07-0.36713E-09 0.82931E-08-0.20306E-06-0.51640E-07 0.49327E-08
341 0.37680E-07-0.21904E-06 0.90656E-07-0.32984E-06-0.43320E-07 0.28050E-07
342 0.69739E-07-0.32178E-06 0.62842E-07-0.42740E-06-0.22998E-06-0.73821E-07
343 0.17926E-04-0.11454E-05-0.11150E-06-0.12314E-04-0.12569E-05 0.94227E-05
344 0.28056E-06-0.26883E-06-0.38317E-07-0.67474E-06-0.30575E-07 0.11549E-06
345 0.50320E-06-0.37042E-06 0.16372E-07-0.12995E-05 0.18957E-07 0.22532E-06
346 0.10018E-05-0.77348E-06-0.19712E-06-0.18447E-05-0.29674E-06-0.68599E-06
347 0.29294E-05 0.77467E-06-0.67843E-06-0.18407E-05 0.59438E-08-0.13371E-05
348 0.33826E-05-0.12390E-05-0.78431E-06-0.17825E-05 0.24240E-07-0.11001E-05
349 0.37671E-05-0.20198E-05-0.88199E-06-0.27717E-05-0.48985E-06-0.12166E-05
350 0.53730E-05-0.14352E-05-0.14456E-05-0.27681E-05 0.39811E-06-0.17488E-05

รูปที่ 4.77 การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 4 จาก โปรแกรม Ansys 10

การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 4 จากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.78

File
326 -0.31841E+07-0.13913E+06 -55865. -0.67228E+06 21913. -58227.
327 -0.35075E+07 -29296. -8815.3 -0.63476E+06 -63606. -22778.
328 -0.34022E+07-0.15912E+06 -8035.9 -0.75350E+06 27179. 80156.
329 -0.26858E+07 -71462. 2988.6 -0.73901E+06 45816. 61112.
330 -0.22049E+07 16002. -25452. -0.63486E+06 13774. -61532.
331 -0.23955E+07 -74297. -40548. -0.61386E+06 -22308. -71592.
332 -0.16548E+07-0.10716E+06 5570.0 -0.39518E+06 24844. 0.14156E+06
333 -0.11093E+07 -92188. 20079. -0.38484E+06 6859.1 30810.
334 -0.12521E+07 -87532. -52652. -0.33479E+06 -21168. -50714.
335 -0.93665E+06-0.15142E+06 -8419.9 -0.25435E+06 -8531.6 0.10077E+06
336 -0.34183E+06 -70829. 31093. -0.22580E+06 -11825. 54354.
337 -0.10574E+06 -46364. 20727. -0.13072E+06 10288. 4954.2
338 -40536. -69516. -2061.0 -73958. 13408. -1445.3
339 15396. -74547. 4324.4 -36049. -30588. -6887.5
340 7568.6 3043.0 4417.6 -16116. -4098.4 391.48
341 -1817.2 -42566. 6591.6 -26178. -3438.1 2226.2
342 -5197.9 -67345. -6292.6 -33920. -18252. -5858.8
343 0.42787E+07 0.12514E+07 0.14155E+07-0.97728E+06 -99755. 0.74783E+06
344 42248. -44958. -8368.1 -53551. -2426.6 9166.3
345 92697. -45973. 15422. -0.10313E+06 1504.5 17883.
346 0.16169E+06-0.12009E+06 -28609. -0.14640E+06 -23551. -54444.
347 0.59191E+06 3963.2 19239. -0.14609E+06 471.73 -0.10612E+06
348 0.65380E+06 -79792. -7620.1 -0.14147E+06 1923.8 -87308.
349 0.67235E+06-0.24621E+06 -65603. -0.21998E+06 -38877. -96558.
350 0.10671E+07 -13526. -15175. -0.21969E+06 31596. -0.13879E+06

รูปที่ 4.78 การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 4 จากโปรแกรม Ansys 10

โดยค่าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 4

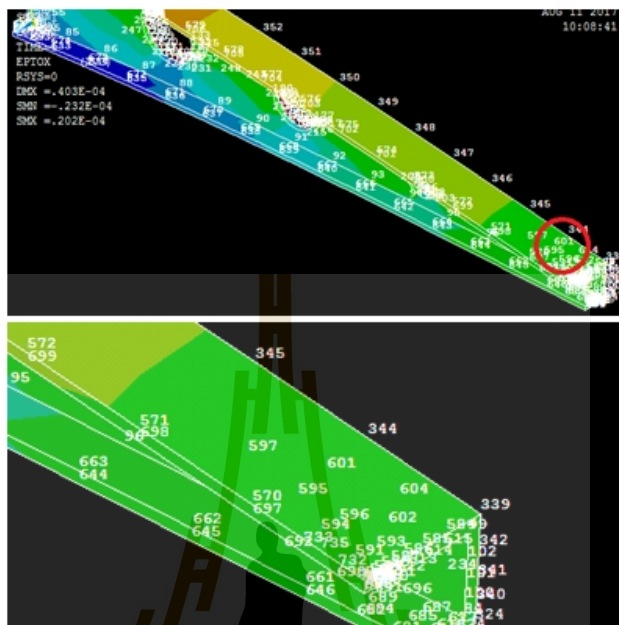
ค่าที่ได้		ความเครียด ($\mu\epsilon$)		ความเค้น (MPa)
		ค่าจากการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
ชิ้นงานที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	2.90	2.908	0.582
	ครั้งที่ 2	2.84		
	ครั้งที่ 3	3.01		
	ครั้งที่ 4	2.86		
	ครั้งที่ 5	2.93		
การจำลองโดยโปรแกรม Ansys 10		2.929		0.592

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 5 แสดงในรูปที่ 4.79

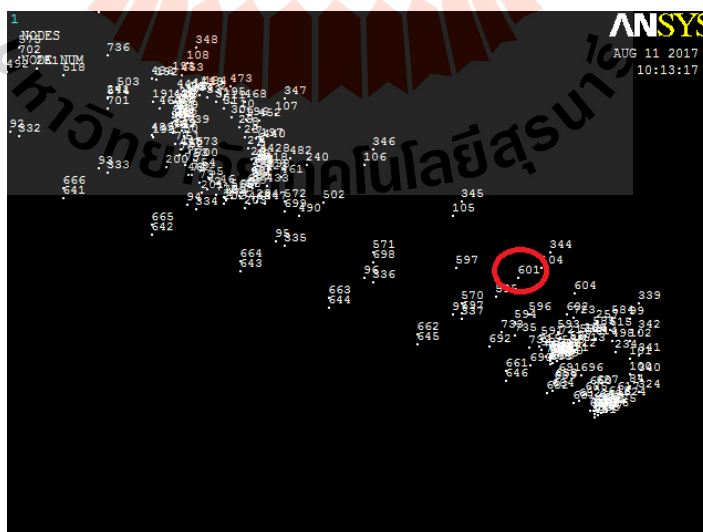


รูปที่ 4.79 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 5

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกวียดความเครียดจุดที่ 5 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในโปรแกรม Ansys 10 แสดงในรูปที่ 4.80

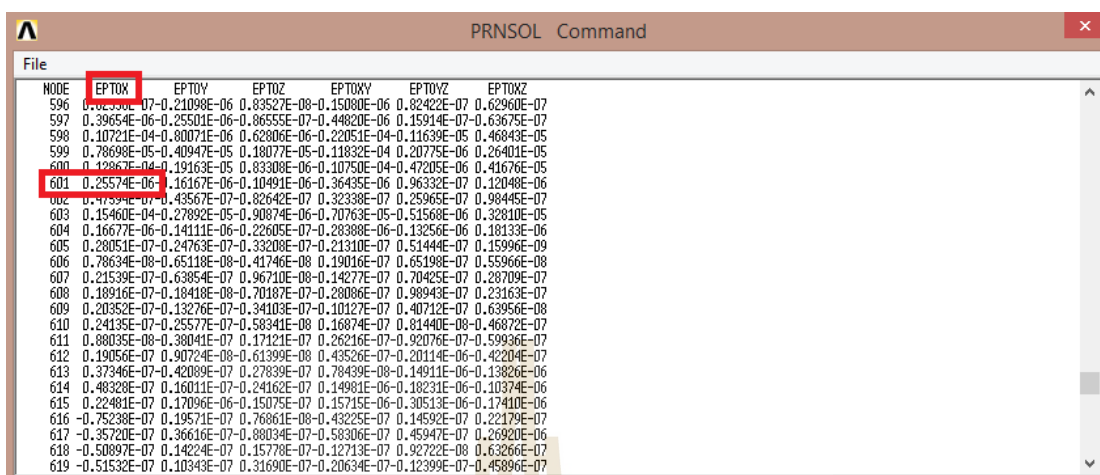


รูปที่ 4.80 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกวียดความเครียดจุดที่ 5 ในการจำลอง
ซึ่งบริเวณที่ติดตั้งเกวียดความเครียดจุดที่ 5 นั้น คือ โหนดที่ 601 ดังแสดงในรูปที่ 4.81



รูปที่ 4.81 บริเวณที่ติดตั้งเกวียดความเครียด โหนดที่ 601

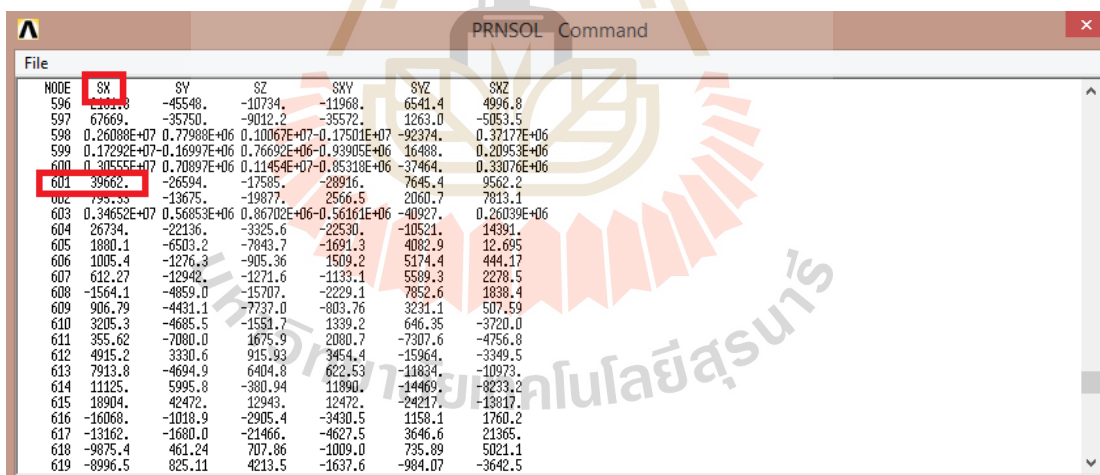
การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 5 จากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.82



NODE	EPTOX	EPTOY	EPTOZ	EPTOXY	EPTOVZ	EPTOKZ
596	0.12330E-07	-0.21098E-06	0.83527E-08	-0.15080E-06	0.82422E-07	0.62960E-07
597	0.39654E-06	-0.25501E-06	0.86555E-07	-0.44820E-06	0.15914E-07	-0.63675E-07
598	0.10721E-04	-0.80071E-06	0.62806E-06	-0.22051E-04	-0.11639E-05	0.46843E-05
599	0.78698E-05	-0.40947E-05	0.18077E-05	-0.11832E-04	0.20775E-06	0.26401E-05
600	0.12867E-04	-0.19163E-05	0.83308E-06	-0.10750E-04	0.47205E-06	0.41676E-05
601	0.25574E-06	-0.16167E-06	-0.10491E-06	-0.36435E-06	0.96332E-07	0.12048E-06
602	0.47594E-07	-0.43567E-07	-0.82642E-07	0.32338E-07	0.25965E-07	0.98445E-07
603	0.15460E-04	-0.27892E-05	0.90874E-06	-0.70763E-05	-0.51568E-06	0.32810E-05
604	0.16677E-06	-0.14111E-06	-0.22605E-07	-0.28388E-06	-0.13256E-06	0.18133E-06
605	0.28051E-07	-0.24763E-07	0.33208E-07	-0.21310E-07	0.51444E-07	0.15996E-09
606	0.78634E-08	-0.65118E-08	-0.41746E-08	0.19016E-07	0.65198E-07	0.55966E-08
607	0.21539E-07	-0.63854E-07	0.96710E-08	-0.14277E-07	0.70425E-07	0.28709E-07
608	0.18916E-07	-0.18418E-08	-0.70187E-07	-0.28086E-07	0.98943E-07	0.23163E-07
609	0.20352E-07	-0.13276E-07	0.34103E-07	-0.10127E-07	0.40712E-07	0.63956E-08
610	0.24135E-07	-0.25577E-07	0.58341E-08	-0.16874E-07	0.81440E-08	-0.46872E-07
611	0.68035E-08	-0.38041E-07	0.17121E-07	0.26216E-07	0.92076E-07	0.59936E-07
612	0.19056E-07	-0.90724E-08	-0.61399E-08	0.43526E-07	-0.20114E-06	-0.42204E-07
613	0.37346E-07	-0.42089E-07	0.27839E-07	0.78439E-08	-0.14911E-06	-0.13826E-06
614	0.48328E-07	-0.16011E-07	-0.24132E-07	-0.14901E-06	-0.18231E-06	-0.10374E-06
615	0.22491E-07	-0.17036E-06	-0.15075E-07	0.15715E-06	-0.30513E-06	-0.17410E-06
616	-0.25238E-07	-0.19571E-07	0.76861E-08	-0.43225E-07	0.14549E-07	0.22179E-07
617	-0.25720E-07	0.36616E-07	0.98034E-07	-0.58306E-07	0.45947E-07	0.26890E-06
618	-0.50897E-07	0.14224E-07	-0.15778E-07	-0.12713E-07	0.92722E-08	0.63266E-07
619	-0.51532E-07	0.10343E-07	0.31690E-07	-0.20634E-07	-0.12399E-07	-0.45896E-07

รูปที่ 4.82 การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 5 จากโปรแกรม Ansys 10

การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 5 จากโปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.83



NODE	SX	SY	SZ	SNX	SNY	SNZ
596	1.333E-08	-455.48	-10734	-11968	6541.4	4996.8
597	67669	-35750	-9012.2	-35572	1263.0	-5053.5
598	0.26088E+07	0.77988E+06	0.10067E+07	0.17501E+07	-92374	0.37177E+06
599	0.17292E+07	0.16997E+06	0.76692E+06	0.93905E+06	16488	0.20953E+06
600	0.30555E+07	0.70897E+06	0.11454E+07	0.85318E+06	-37464	0.33076E+06
601	39662	-26594	-17585	-28916	7645.4	9562.2
602	795.33	-13675	-19877	2566.5	2060.7	7813.1
603	0.34652E+07	0.56853E+06	0.86702E+06	-0.56161E+06	-40927	0.26039E+06
604	26734	-22136	-3325.6	-22530	-10521	14391
605	1880.1	-6503.2	-7843.7	-1691.3	4082.9	12.695
606	1005.4	-1276.3	-905.36	1509.2	5174.4	444.17
607	612.27	-12942	-1271.6	-1133.1	5589.3	2278.5
608	-1564.1	-4859.0	-15707	-2229.1	7852.6	1838.4
609	906.79	-4431.1	-7737.0	-803.76	3231.1	507.59
610	3205.3	-4685.5	-1551.7	1339.2	646.35	-3720.0
611	355.62	-7080.0	1675.9	2080.7	-7307.6	-4756.8
612	4915.2	3330.6	915.93	3454.4	-15964	-3349.5
613	7913.8	-4694.9	6404.8	622.53	-11834	-10973
614	11125	5995.8	-380.94	11890	-14469	-8233.2
615	18904	42472	12943	12472	-24217	-13817
616	-16068	-1018.9	-2905.4	-3430.5	1158.1	1760.2
617	-13162	-1680.0	-21466	-4627.5	3646.6	21365
618	-9875.4	461.24	707.86	-1009.0	735.89	5021.1
619	-8996.5	825.11	4213.5	-1637.6	-984.07	-3642.5

รูปที่ 4.83 การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 5 จากโปรแกรม Ansys 10

โดยค่าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 5

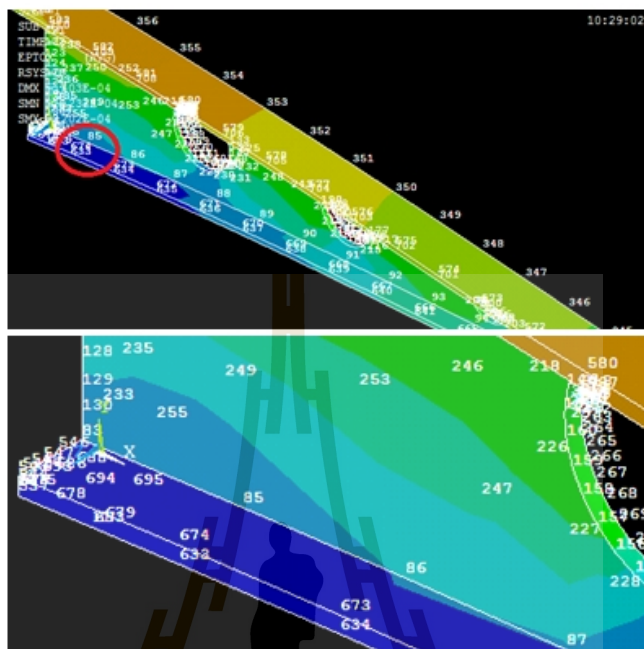
ค่าที่ได้		ความเครียด ($\mu\epsilon$)		ความเค้น (MPa)
		ค่าจากการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
ชิ้นงานที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	0.23	0.254	0.0508
	ครั้งที่ 2	0.26		
	ครั้งที่ 3	0.27		
	ครั้งที่ 4	0.25		
	ครั้งที่ 5	0.26		
การจำลองโดยโปรแกรม Ansys 10		0.256		0.0397

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 6 แสดงในรูปที่ 4.84



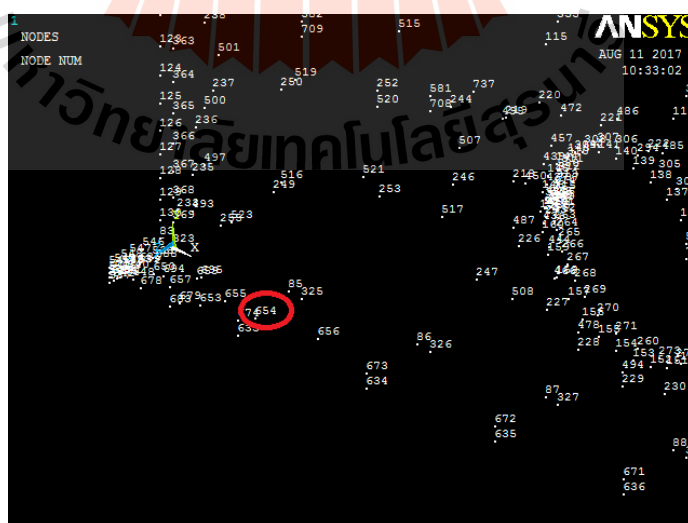
รูปที่ 4.84 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด จุดที่ 6

บริเวณที่ทำการติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 6 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณในโปรแกรม Ansys 10 แสดงในรูปที่ 4.85



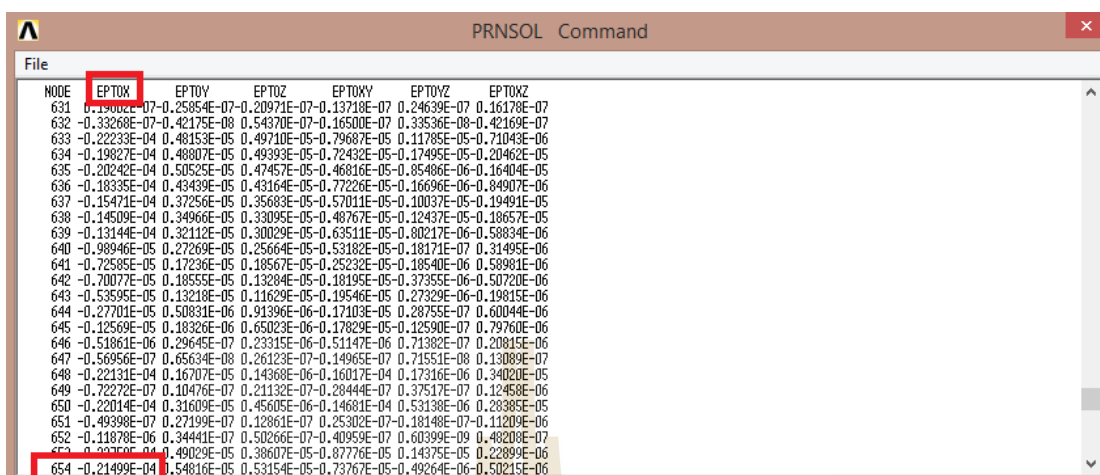
รูปที่ 4.85 บริเวณที่ทำการติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 6 ในการจำลอง

ซึ่งบริเวณที่ติดตั้งเกววัดความเครียดจุดที่ 6 นั้น คือ โหนดที่ 654 ดังแสดงในรูปที่ 4.86



รูปที่ 4.86 บริเวณที่ติดตั้งเกววัดความเครียด โหนดที่ 654

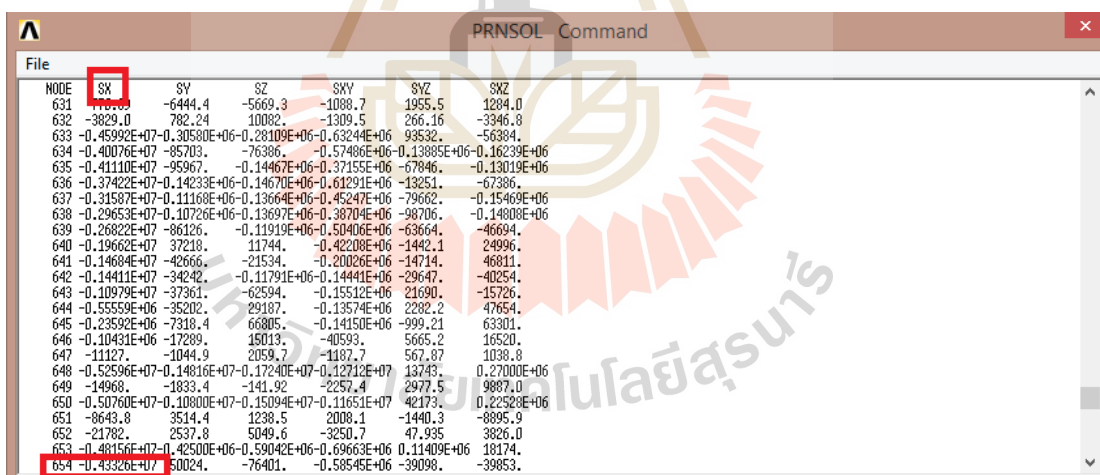
การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 6 จาก โปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.87



NODE	EPTOX	EPTOY	EPTOZ	EPTOXY	EPTOYZ	EPTOXZ
631	0.19002E-07	-0.25854E-07	-0.20971E-07	-0.13718E-07	0.24639E-07	0.16178E-07
632	-0.33268E-07	0.42175E-08	0.54370E-07	-0.16500E-07	0.33536E-08	-0.42169E-07
633	-0.22233E-04	0.48153E-05	0.49710E-05	-0.79687E-05	0.11785E-05	-0.71043E-06
634	-0.19827E-04	0.48807E-05	0.49393E-05	-0.72432E-05	-0.17495E-05	-0.20462E-05
635	-0.20242E-04	0.50525E-05	0.47457E-05	-0.46816E-05	-0.85486E-06	-0.16404E-05
636	-0.18335E-04	0.43439E-05	0.43164E-05	-0.77226E-05	-0.16696E-06	-0.84907E-06
637	-0.15471E-04	0.37256E-05	0.35683E-05	-0.57011E-05	-0.10037E-05	-0.19491E-05
638	-0.14509E-04	0.34966E-05	0.30095E-05	-0.48767E-05	-0.12437E-05	-0.18657E-05
639	-0.13144E-04	0.32112E-05	0.30029E-05	-0.63511E-05	-0.80217E-06	-0.58834E-06
640	-0.98946E-05	0.27269E-05	0.25664E-05	-0.53182E-05	-0.18171E-07	0.31495E-06
641	-0.72585E-05	0.17236E-05	0.18567E-05	-0.25232E-05	-0.18540E-06	0.58981E-06
642	-0.70077E-05	0.18555E-05	0.13284E-05	-0.18195E-05	-0.37355E-06	-0.50720E-06
643	-0.53595E-05	0.13218E-05	0.11629E-05	-0.19546E-05	-0.27329E-06	-0.19815E-06
644	-0.27701E-05	0.50831E-06	0.91396E-06	-0.17103E-05	-0.28755E-07	0.60044E-06
645	-0.12569E-05	0.18326E-06	0.65023E-06	-0.17829E-05	-0.12590E-07	0.79760E-06
646	-0.51861E-06	0.29645E-07	0.23315E-06	-0.51147E-06	-0.71382E-07	0.20815E-06
647	-0.56956E-07	0.65634E-08	0.26123E-07	-0.14965E-07	0.71551E-08	-0.13089E-07
648	-0.22131E-04	0.16707E-05	0.14368E-06	-0.16017E-04	0.17316E-06	-0.34020E-05
649	-0.72272E-07	0.10476E-07	0.21132E-07	-0.28444E-07	0.37517E-07	0.12458E-06
650	-0.22014E-04	0.31609E-05	0.45605E-06	-0.14681E-04	-0.31388E-06	-0.28385E-05
651	-0.49398E-07	0.27199E-07	0.12861E-07	-0.25302E-07	-0.18148E-07	-0.11209E-06
652	-0.11878E-06	0.34441E-07	0.50266E-07	-0.40959E-07	-0.60399E-09	0.48208E-07
653	-0.88379E-04	0.49029E-05	0.38607E-05	-0.87776E-05	0.14375E-05	-0.22899E-06
654	-0.21499E-04	0.54816E-05	0.53154E-05	-0.73767E-05	-0.49264E-06	-0.50215E-06

รูปที่ 4.87 การอ่านค่าความเครียดจุดที่ 6 จาก โปรแกรม Ansys 10

การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 6 จาก โปรแกรม Ansys 10 แสดงดังรูปที่ 4.88



NODE	SX	SY	SZ	SHX	SHY	SHZ
631	0.00000	-6444.4	-5669.3	-1088.7	1955.5	1284.0
632	-3829.0	782.24	10082.	-1309.5	266.16	-3346.8
633	-0.45992E+07	-0.30580E+06	-0.28109E+06	-0.63244E+06	93532.	-56384.
634	-0.40076E+07	-85703.	-76386.	-0.57486E+06	-0.13885E+06	-0.16239E+06
635	-0.41110E+07	-95967.	-0.14467E+06	-0.37155E+06	-67846.	-0.13019E+06
636	-0.37422E+07	-0.14233E+06	-0.14670E+06	-0.61291E+06	-13251.	-67386.
637	-0.31587E+07	-0.11168E+06	-0.13664E+06	-0.45247E+06	-79662.	-0.15469E+06
638	-0.29653E+07	-0.10726E+06	-0.13697E+06	-0.38704E+06	-98706.	-0.14808E+06
639	-0.26822E+07	-86126.	-0.11919E+06	-0.50406E+06	-63664.	-46694.
640	-0.19662E+07	37218.	11744.	-0.42208E+06	-1442.1	24996.
641	-0.14664E+07	-42666.	-21534.	-0.20026E+06	-14714.	46811.
642	-0.14411E+07	-34242.	-0.11791E+06	-0.14441E+06	-29647.	-40254.
643	-0.10979E+07	-37361.	-62594.	-0.15512E+06	21690.	-15726.
644	-0.55559E+06	-35202.	29187.	-0.13574E+06	2282.2	47654.
645	-0.23592E+06	-7318.4	66805.	-0.14150E+06	-999.21	63301.
646	-0.10431E+06	-17289.	15013.	-40593.	5665.2	16520.
647	-11127.	-1044.9	2059.7	-1187.7	567.87	1038.8
648	-0.52596E+07	-0.14816E+07	-0.17240E+07	-0.12712E+07	13743.	0.27000E+06
649	-14968.	-1833.4	-141.92	-2257.4	2977.5	9887.0
650	-0.50760E+07	-0.10800E+07	-0.15094E+07	-0.11651E+07	42173.	0.22528E+06
651	-8643.8	3514.4	1238.5	2008.1	-1440.3	-8895.9
652	-21782.	2537.8	5049.6	-3250.7	47.935	3826.0
653	-0.48156E+07	-0.42500E+06	-0.59042E+06	-0.69663E+06	0.11409E+06	18174.
654	-0.43326E+07	50024.	-76401.	-0.58545E+06	-39098.	-39853.

รูปที่ 4.88 การอ่านค่าความเค้นจุดที่ 6 จาก โปรแกรม Ansys 10

โดยค่าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลระหว่างชิ้นงานทดสอบกับผลการคำนวณที่จุดที่ 6

ค่าที่ได้		ความเครียด ($\mu\epsilon$)		ความเค้น (MPa)
		ค่าจากการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	
ชิ้นงานที่ทดสอบ	ครั้งที่ 1	16.90	20.19	4.038
	ครั้งที่ 2	18.70		
	ครั้งที่ 3	22.56		
	ครั้งที่ 4	19.87		
	ครั้งที่ 5	22.92		
การจำลองโดยโปรแกรม Ansys 10		21.499		4.332

โดยค่าความคลาดเคลื่อนของความเครียดและความเค้นจากการทดสอบและผลจากการจำลองได้แสดงในตารางที่ 4.15

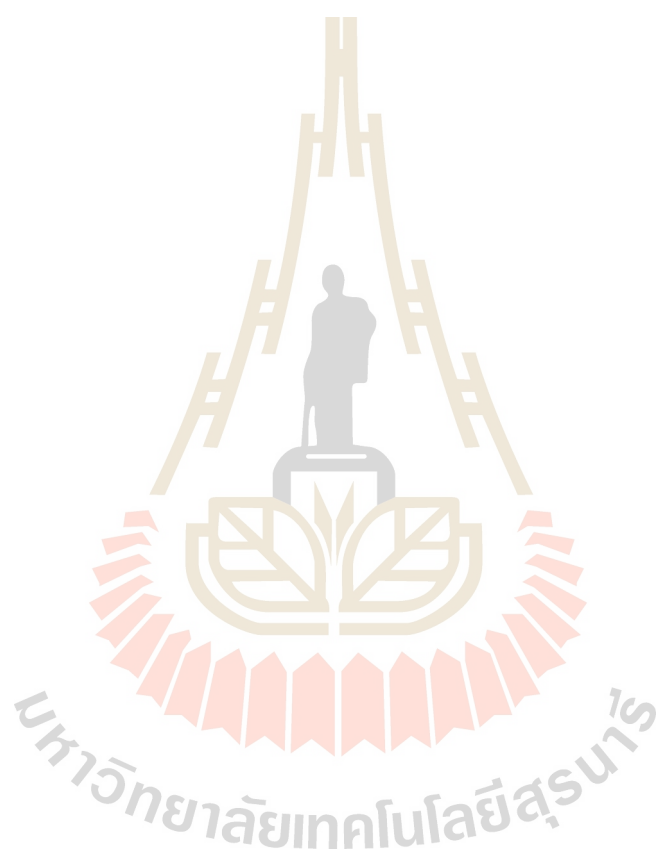
ตารางที่ 4.15 ความคลาดเคลื่อนของความเครียดและความเค้น

จุดที่ทดสอบ		1	2	3	4	5	6
ความเครียด ($\mu\epsilon$)	การทดสอบ	13.12	10.99	7.86	2.908	0.254	20.19
	การจำลอง	13.26	10.998	7.727	2.929	0.256	21.499
	ความคลาดเคลื่อน (%)	1.06	0.073	1.72	0.72	0.78	6.09
ความเค้น (MPa)	การคำนวณ	2.625	2.198	1.572	0.582	0.0508	4.038
	การจำลอง	3.042	2.179	1.582	0.592	0.0397	4.332
	ความคลาดเคลื่อน (%)	13.71	0.87	0.13	1.69	27.96	6.79

4.3 สรุป

เมื่อพิจารณาข้อมูลทั้งหมด พบว่าผลเฉลยทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนขอบหน้าพารโโต คือ ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะเป็นผลเฉลยที่ให้อุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุดของขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน โดยแต่ละจุดผลเฉลยจะให้ค่าตัวแปรออกแบบที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกว่าจะใช้ผลเฉลยจุดใดในการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ต้องการชิ้นงานที่มีปริมาตรน้อย โดยไม่คำนึงถึงระยะเวลาโค้ง ความต้องการแบบนี้สามารถเลือกใช้จุดผลเฉลยบนขอบหน้าพารโโตที่อยู่ใกล้กับแกนนอนในทางกลับกันหากต้องการชิ้นงานที่ระยะเวลาโค้งน้อย โดยไม่คำนึงถึงปริมาตรของชิ้นงาน ก็ควรเลือกผลเฉลยบนขอบหน้าพารโโตที่อยู่ใกล้เคียงกับแกนตั้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานว่าต้องการอัตราส่วนความสำคัญของฟังก์ชันเป้าหมายใดมากหรือน้อยกว่า สำหรับงานวิจัยนี้ก็ได้ทำการเสนอวิธีการที่ใช้ในการหารูปทรงที่เหมาะสมของขารองตั้งเครื่องชุดคอยล์ร้อน ซึ่งวิธีการที่นำเสนอ นั้นสามารถทำให้คำนวณถึงรูปทรงได้ โดยรูปทรงดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ รวมถึงเงื่อนไขบังคับตามที่กำหนด ซึ่งในแต่ละกรณีก็จะมีค่าฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองไปในทิศทางเดียวกัน และจากการเปรียบเทียบร้อยละของฟังก์ชันเป้าหมายพบว่า กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะผลเฉลยจุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากผลเฉลยจุดที่ 1 ได้ร้อยละ 50.68 แต่การโค้งตัวจะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 81.49 สำหรับกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ ผลเฉลยจุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากผลเฉลยจุดที่ 1 ได้ร้อยละ 51.44 แต่การโค้งตัวจะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 78.19 สำหรับกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ ผลเฉลยจุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากผลเฉลยจุดที่ 1 ได้ร้อยละ 48.56 แต่การโค้งตัวจะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 81.38 สุดท้ายคือกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ ผลเฉลยจุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากผลเฉลยจุดที่ 1 ได้ร้อยละ 53.07 แต่การโค้งตัวจะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 83.61 เมื่อทำการพล็อตค่าความไวของตัวแปรออกแบบของทั้งสี่กรณีศึกษา พบว่า ตัวแปรออกแบบที่มีผลต่อรูปทรงที่เหมาะสมที่สุดคือตัวแปรออกแบบ x_3 และ x_7 เนื่องจากเป็นตัวแปรออกแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสอง โดยตัวแปรออกแบบที่สามารถตัดจากการคำนวณได้ คือ x_4 เนื่องจากมีค่าความไวที่น้อยที่สุดและจะมีผลต่อการคำนวณน้อยที่สุด ซึ่งเป็นตัวแปรออกแบบที่เป็นค่าระยะห่างของรูเจาะในแนวระดับ จากนั้นได้เลือกกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะมาใช้ในการสร้างเพื่อการทดสอบวัดค่าความเครียดของชิ้นงาน โดยทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดทั้งหมด 6 จุดบนชิ้นงาน ได้แบ่งการวัดค่าเป็นจุดละ 5 ครั้ง โดยค่าที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 4.9-4.14 ซึ่งค่าความเครียดที่ทดสอบจะมีความคลาดเคลื่อนกับผลจากการจำลองผ่าน โปรแกรม Ansys 10 เล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 4.15 ค่าความเครียดที่ทดสอบนั้นจะมีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองรูปทรงผ่าน โปรแกรม Ansys 10 เช่นเดียวกับการคำนวณค่าความเค้น ในงานวิจัยเลือกที่จะติดตั้งเกจวัดความเครียดไปในทิศทางแนวระดับ ดังนั้นค่าความเค้นที่คำนวณนั้นจะเป็นค่าความ

เส้นในทิศทางเดียวกับความเครียด โดยค่าความเค้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.46) ซึ่งค่าความเค้นที่ได้ก็จะเข้าไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลอง



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึง การสรุปผลการศึกษารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกครอบงำ ประกอบด้วย 4 กรณี คือ กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ, ชิ้นงานมี 1 รูเจาะ, ชิ้นงานมี 2 รูเจาะ และชิ้นงานมี 3 รูเจาะ รวมถึงข้อเสนอแนะสำหรับการคำนวณ ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้หารูปร่างที่เหมาะสมที่สุด โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 4 กรณี คือ กรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ, ชิ้นงานมี 1 รูเจาะ, ชิ้นงานมี 2 รูเจาะ และชิ้นงานมี 3 รูเจาะ โดยแต่ละกรณีได้ทำการกำหนดตัวแปรออกแบบและเงื่อนไขบังคับ และได้ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกครอบงำในการคำนวณ โดยการคำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB R2010b และ Ansys 10 ซึ่งเมื่อทำการจำลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแล้วได้ข้อสรุปดังนี้

วิธีที่ใช้ในการคำนวณ คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้การคัดสรรแบบไม่ถูกครอบงำ เหตุผลที่เลือกวิธีดังกล่าว คือ ใช้งานง่าย ไม่ต้องคำนวณค่าอนุพันธ์ฟังก์ชันของผลเฉลย สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของทั้งหมดได้ มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และที่สำคัญคือวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาการออกแบบได้ทุกรูปแบบ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการหารูปร่างที่เหมาะสมของโครงสร้างทางกลอีกด้วย

จากผลการคำนวณสามารถหาขอบหน้าพารโศกของปัญหาในทุกกรณีศึกษาได้ นั่นคือสามารถหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจาะ, ชิ้นงานมี 1 รูเจาะ, ชิ้นงานมี 2 รูเจาะ และชิ้นงานมี 3 รูเจาะ โดยแต่ละกรณีเป็นการออกแบบ 2 ฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้นผลเฉลยที่ได้จะมีแนวโน้มของค่าตอบไปในทิศทางเดียวกัน คือ ผลเฉลยที่มีค่าปริมาตรที่มากที่สุดก็จะมีค่าการโก่งตัวที่น้อยที่สุดในทางกลับกันถ้าผลเฉลยที่ปริมาตรน้อยที่สุดก็จะมีค่าการโก่งตัวมากที่สุด สำหรับผลการคำนวณกรณีชิ้นงานไม่มีรูเจานั้น เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของปริมาตร ค่าร้อยละของปริมาตรที่จุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากจุดที่ 1 ได้ ร้อยละ 50.68 และการเปรียบเทียบร้อยละของการโก่งตัวของจุดที่ 1 นั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ 10 จะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 81.49 สำหรับกรณีชิ้นงานมี 1 รูเจาะ เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของปริมาตร ค่าร้อยละของปริมาตรที่จุดที่ 10

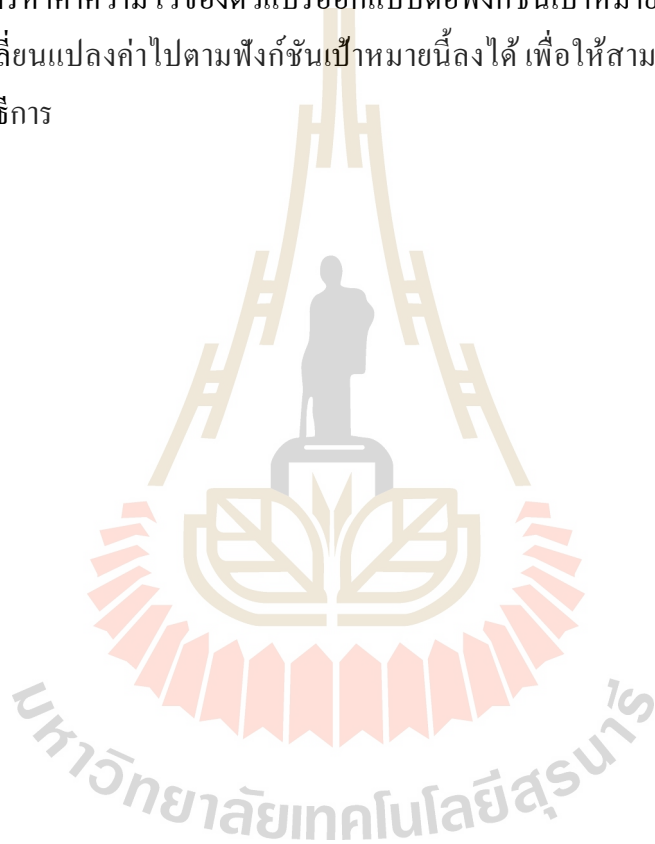
สามารถลดปริมาตรจากจุดที่ 1 ได้ ร้อยละ 51.44 และการเปรียบเทียบร้อยละของการโก่งตัวของจุดที่ 1 นั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ 10 จะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 78.19 สำหรับกรณีชิ้นงานมี 2 รูเจาะ เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของปริมาตร ค่าร้อยละของปริมาตรที่จุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากจุดที่ 1 ได้ ร้อยละ 48.56 และการเปรียบเทียบร้อยละของการโก่งตัวของจุดที่ 1 นั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ 10 จะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 81.38 และสุดท้ายคือกรณีชิ้นงานมี 3 รูเจาะ เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของปริมาตร ค่าร้อยละของปริมาตรที่จุดที่ 10 สามารถลดปริมาตรจากจุดที่ 1 ได้ ร้อยละ 53.07 และการเปรียบเทียบร้อยละของการโก่งตัวของจุดที่ 1 นั้นเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับจุดที่ 10 จะมีความแตกต่างกันถึงร้อยละ 83.61 โดยผลเฉลยบนของหน้าพาเรโตทั้งหมด คือ ผลเฉลยของรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดก็คือ รูปร่างที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้ ผู้ใช้งานสามารถเลือกรูปร่างที่เหมาะสมที่สุดได้จากเซตของผลเฉลยบนของหน้าพาเรโต

จากการเปรียบเทียบผลความเครียดการจำลองโดยโปรแกรม Ansys 10 และผลจากการทดสอบโดยการติดตั้งเกจวัดความเครียด 6 จุด บนชิ้นงาน พบว่า ค่าความเครียดที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อน โดยจุดที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด คือ จุดที่ 6 มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 6.09 จุดอื่นๆ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 2 และการเปรียบเทียบผลความเค้นจากการจำลองและการคำนวณ พบว่า ค่าความเค้นที่ได้ก็มีความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกัน โดยความคลาดเคลื่อนมากที่สุด คือ จุดที่ 5 มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 27.96 โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากการขึ้นรูปที่มีการลบมุมชิ้นงาน ซึ่งจะแตกต่างกับการจำลองที่ไม่มีการลบมุมของชิ้นงาน อีกประการ คือ การติดตั้งเกจวัดความเครียดอาจจะมีความคลาดเคลื่อนจากโหนดที่อ่านค่าจากการจำลองใน โปรแกรม Ansys 10 เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการคำนวณพบว่าขั้นตอนการเขียน code ของ M-file function มีความซับซ้อนเนื่องจากต้องเขียนหลายไฟล์ที่ต้องเชื่อมต่อกันเพื่อรับ-ส่งข้อมูลจึงอาจทำให้เกิดความสับสนได้ ดังนั้นจึงควรใช้ความรอบคอบในการเขียน code และมันตรวจสอบจุดผิดพลาดของโปรแกรมให้ถี่ถ้วน และรีบแก้ไขโดยทันที จากการคำนวณของโปรแกรมพบว่า เมื่อกรณีศึกษามีการเพิ่มรูเจาะที่มากขึ้นจะทำให้ตัวแปรออกแบบมีจำนวนมากขึ้น ซึ่งในส่วนของตัวแปรออกแบบนั้นต้องคำนวณค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดอย่างถี่ถ้วน เนื่องจากถ้าไม่คำนวณช่วงของตัวแปรออกแบบอย่างถี่ถ้วนอาจจะทำให้ชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปได้ ยกตัวอย่างเช่น รูเจาะอาจจะมีความใหญ่กว่าบริเวณที่มีเนื้อชิ้นงาน เป็นต้น และเมื่อกรณีศึกษาที่มีรูเจาะมากขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะมากขึ้นตาม

ไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีความถี่ถ้วนในการกำหนดจำนวนประชากร ซึ่งถ้าค่า $nloop$ และ $nsol$ มีค่าสูงมาก ซึ่งส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น จึงจะได้ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดที่ต้องการ และมีโอกาสสูงที่ผลเฉลยที่ได้รับยังไม่ใช่ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด เนื่องจากกำหนดค่า $nloop$ และ $nsol$ ไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังได้ทำการพล็อตความไวของตัวแปรออกแบบโดยเปรียบเทียบกับฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองพบตัวแปรออกส่วนใหญ่จะมีความสำคัญและเปลี่ยนแปลงค่าไปตามผลเฉลยของฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งตัวแปรออกแบบที่กล่าวมา คือ ตัวแปรออกแบบที่มีผลต่อรูปร่างที่เหมาะสมที่สุด แต่ก็จะมีบางตัวแปรที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงค่าไปตามฟังก์ชันเป้าหมาย โดยสามารถทราบได้จากการหาค่าความไวของตัวแปรออกแบบต่อฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้นจึงสามารถลดตัวแปรที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงค่าไปตามฟังก์ชันเป้าหมายนี้ลงได้ เพื่อให้สามารถลดระยะเวลาในการคำนวณได้อีกวิธีการ



รายการอ้างอิง

- สุจินต์ บุรีรัตน์. (2556). การหาค่าเหมาะที่สุดของระบบทางวิศวกรรมเครื่องกล เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett. (2011). **Shigley's Mechanical Engineering Design**. Ninth edition. New York, USA : McGraw-Hill.
- รศ. ร. อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์. (2555). มาตรฐานความปลอดภัยแบบความต้านทานไฟฟ้า. **ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**. 37-49.
- ธีทัต คลวิชัย. (2555). การหารูปร่างร่องดอกยางแบบกล่องเหมาะที่สุดโดยการใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์และขั้นตอนวิวัฒนาการ. **วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต มหาวิทยาลัยขอนแก่น**.
- ปิยวัฒน์ วัชรวัฒนากุล. (2554). การวิเคราะห์ความแข็งแรงของงานฉีดพลาสติกโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (CAE). การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- วุฒิชัย เครื่องถมยา. (2554). ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety). [On-line]. Available: <https://www.scribd.com/doc/52822740/%E0%B8%84-%E0%B8%B2%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%9B%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%94%E0%B8%A0%E0%B8%B1%E0%B8%A2-Factor-of-Safety> (12 April 2011).
- MEADinfo. (2010). **SS400 Structural Steel – An Overview**. [On-line]. Available: <http://www.meadinfo.org/2010/09/jis-g-3101-ss400-steel-properties-spec.html> (11 Sep 2010).
- สุดตะนนท์ โสวานิตย์. (2553). การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้เงื่อนไขอค์กีย์. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**.
- เดช พุทธเจริญทอง. (2548). การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์. ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ. กรุงเทพมหานคร.

- Faez Ahmez, Bishakh Bhattacharya and Kanyamoy Deb. (2012). Constructive Solid Geometry Based Topology Optimization using Evolutionary Algorithms. **KanGAL Report Number 2012013**.
- Ali Khazaei and Hossein Miar Naimi. (2011). Two Multi-Objective Genetic Algorithms for Finding Optimum Design of an I-Beam. **Scientific Research**. 3: 1054-1060.
- Federico M. Nadela and Jose Ernie C. Lope. (2009). Comparative Strength of Common Structural Shapes Using Genetic Algorithms. **Proceeding of World Congress on Engineering 2009 Vol II, WCE 2009**, London, UK
- Wei Lu and Pentti Mäkeläinen. (2007). Augmented Lagrangian Genetic Algorithms for Optimal Design of Hat-Shapes Cold-Formed. **Building Materials Structures and Technique, BMB 2007**, Vilnius, Lithuania.
- Sujin Bureerat and Jumlong Limtragool. (2006). Performance enhancement of search for structural topology optimization. **Finite Element in Analysis and Design**. 45:547-566.
- Tadeusz Burczynski and Grzegorz Kokot. (2003). Evolutionary Algorithms and Boundary Element Method in Generalized Shape Optimization. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics** 41. 2: 341-364.
- Eisuke Kita and Hisashi Tanie. (1997). Shape Optimization of Continuum Structures by Genetic Algorithms and Boundary Element Method. **Engineering Analysis with Boundary Element**. 19: 129-136.



ภาคผนวก ก

โปรแกรม MATLAB ที่ใช้งานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การหารูปปร่างที่เหมาะสมที่สุดของเขารองตั้งชุดคอยล์ร้อน

```

function [f,g,x]=fun01(x)
clc
clear
a = [0.001;0.001;-0.02;0.1;0.01;0.01;0.01];
b = [0.06;0.10;-0.001;0.15;0.02;0.019;0.015];

x(1)=a(1)+(b(1)-a(1)).*rand;
x(2)=a(2)+(b(2)-a(2)).*rand;
x(3)=a(3)+(b(3)-a(3)).*rand;
x(4)=a(4)+(b(4)-a(4)).*rand;
x(5)=a(5)+(b(5)-a(5)).*rand;
x(6)=a(6)+(b(6)-a(6)).*rand;
x(7)=a(7)+(b(7)-a(7)).*rand;

counter=2;
while counter==2

a1=x(1)
b1=x(2)
c1=x(3)
d1=x(4)
e1=x(5)
f1=x(6)
g1=x(7)

% cal the volume of the geometry
V=[];

if a1<=b1

    V1 = 0.45*(0.12-b1)*0.03;
    V2 = 0.5*0.45*(0.03+c1)*((0.12-b1)-(0.12-a1));
    V3 = 0.45*((0.12-a1)-0.006)*(0.03-0.003);
    V4 = 0.5*0.45*((0.12-b1)-0.006-((0.12-a1)-0.006))*(0.03-0.003);
    V5 = 0.5*0.45*((0.12-b1)-0.006-((0.12-a1)-0.006))*(0.03-
(0.03+c1));
    V6 = 0.45*0.003*(0.03-(0.03+c1));
    V7 = (22/7)*0.003*e1^2;
    V8 = (22/7)*0.003*f1^2;
    V9 = (22/7)*0.003*g1^2;
else
    V1 = 0.45*(0.12-a1)*0.03;
    V2 = 0.5*0.45*(0.03+c1)*((0.12-a1)-(0.12-b1));
    V3 = 0.45*((0.12-b1)-0.006)*(0.03-0.003);
    V4 = 0.5*0.45*((0.12-a1)-0.006-((0.12-b1)-0.006))*(0.03-0.003);
    V5 = 0.5*0.45*((0.12-a1)-0.006-((0.12-b1)-0.006))*(0.03-
(0.03+c1));
    V6 = 0.45*0.003*(0.03-(0.03+c1));
    V7 = (22/7)*0.003*e1^2;
    V8 = (22/7)*0.003*f1^2;
    V9 = (22/7)*0.003*g1^2;
end

end

```

```

V = V1-V2-V3-V4-V5-V6-V7-V8-V9

creat_ansysfile(a1,b1,c1,d1,e1,f1,g1);
delete file.*
delete vmst*
delete dpmy*

!"C:\Program Files\Ansys Inc\V100\ANSYS\bin\intel\ansys100" -b -i
cantiliver01.inp -o cantiliver01.out

close all

dpmy=load('dpmy.out');
vmst=load('vmst.out');
format long
f(1,1)= -min(dpmy);
f(2,1)= V;
st_max= max(vmst);
if st_max <= 550e6/3;
    g = [0;0];
    counter=3;
else
counter=2;
end
f
g
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function creat_ansysfile(a1,b1,c1,d1,e1,f1,g1);
fid=fopen('cantiliver01.inp','w');

% Pre-processing
fprintf(fid,'%s\n',['/BATCH']);
fprintf(fid,'%s\n',['/PREP7']);
fprintf(fid,'%s\n',['ET,1,SOLID185']);
fprintf(fid,'%s\n',['MPTEMP,,,,,,,,']);
fprintf(fid,'%s\n',['MPTEMP,1,0 ']);
fprintf(fid,'%s\n',['MPDATA,EX,1,,200E9 ']);
fprintf(fid,'%s\n',['MPDATA,PRXY,1,,0.26 '])

%Variables defind%
fprintf(fid,'%s\n',['a1 = ' num2str(a1)]);
fprintf(fid,'%s\n',['b1 = ' num2str(b1)]);
fprintf(fid,'%s\n',['c1 = ' num2str(c1)]);
fprintf(fid,'%s\n',['d1 = ' num2str(d1)]);
fprintf(fid,'%s\n',['e1 = ' num2str(e1)]);
fprintf(fid,'%s\n',['f1 = ' num2str(f1)]);
fprintf(fid,'%s\n',['g1 = ' num2str(g1)]);

```



```

% Created key points

fprintf(fid, '%s\n', ['K,1,0,a1,0,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,2,0.45,b1,0,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,3,0.45,0.12,0,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,4,0,0.12,0,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FLST,2,4,3']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,1']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,2']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,3']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,4']);
fprintf(fid, '%s\n', ['A,P51X']);
fprintf(fid, '%s\n', ['!*']);
fprintf(fid, '%s\n', ['VOFFST,1,0.03, ,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,9,0,a1+0.003,0.03,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,10,0.45,b1+0.003,0.03,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,11,0.45,0.12-0.003,0.03,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,12,0,0.12-0.003,0.03,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FLST,2,4,3']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,9']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,10']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,11']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,12']);
fprintf(fid, '%s\n', ['A,P51X']);
fprintf(fid, '%s\n', ['!*']);
fprintf(fid, '%s\n', ['/VIEW,1,1,1,1']);
fprintf(fid, '%s\n', ['/ANG,1']);
fprintf(fid, '%s\n', ['/REP,FAST']);
fprintf(fid, '%s\n', ['!*']);
fprintf(fid, '%s\n', ['VOFFST,7,-0.027, ,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['VSBV, 1, 2]);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,17,0,a1,0.03,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,18,0.45,b1,0.03,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,19,0.45,b1+0.003,0.03,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['K,20,0,a1+0.003,0.03,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FLST,2,4,3']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,17']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,18']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,19']);
fprintf(fid, '%s\n', ['FITEM,2,20']);
fprintf(fid, '%s\n', ['A,P51X']);
fprintf(fid, '%s\n', ['!*']);
fprintf(fid, '%s\n', ['VOFFST,2,c1, ,']);
fprintf(fid, '%s\n', ['VSBV, 3, 1]);
fprintf(fid, '%s\n', ['CYL4,d1,(d1*((0.12-((0.12-b1)/2))-
(0.12-((0.12-a1)/2)))/0.45)+(0.12-((0.12-a1)/2)),e1, , ,0.03']);
fprintf(fid, '%s\n', ['VSBV, 2, 1]);

fprintf(fid, '%s\n', ['CYL4,d1+0.10,((d1+0.10)*((0.12-((0.12-b1)/2))-
(0.12-((0.12-a1)/2)))/0.45)+(0.12-((0.12-a1)/2)),f1, , ,0.03']);
fprintf(fid, '%s\n', ['VSBV, 3, 1]);

fprintf(fid, '%s\n', ['CYL4,d1+0.20,((d1+0.20)*((0.12-((0.12-b1)/2))-
(0.12-((0.12-a1)/2)))/0.45)+(0.12-((0.12-a1)/2)),g1, , ,0.03']);
fprintf(fid, '%s\n', ['VSBV, 2, 1]);

```

```

fprintf(fid,'%s\n',['MSHAPE,1,3D ']);
fprintf(fid,'%s\n',['MSHKEY,0']);
fprintf(fid,'%s\n',['!*']);
fprintf(fid,'%s\n',['CM,_Y,VOLU']);
fprintf(fid,'%s\n',['VSEL, , , ,      3']);
fprintf(fid,'%s\n',['CM,_Y1,VOLU']);
fprintf(fid,'%s\n',['CMSEL,S,_Y']);
fprintf(fid,'%s\n',['!*']);
fprintf(fid,'%s\n',['VMESH,_Y1']);
fprintf(fid,'%s\n',['!*']);
fprintf(fid,'%s\n',['CMDELE,_Y']);
fprintf(fid,'%s\n',['CMDELE,_Y1']);
fprintf(fid,'%s\n',['CMDELE,_Y2']);
fprintf(fid,'%s\n',['!*']);
fprintf(fid,'%s\n',['APLOT']);

% Applied the fixed support
fprintf(fid,'%s\n',['FLST,2,1,5,ORDE,1']);
fprintf(fid,'%s\n',['FITEM,2,20']);
fprintf(fid,'%s\n',['!*']);
fprintf(fid,'%s\n',['/GO']);
fprintf(fid,'%s\n',['DA,P51X,ALL,0']);

% Applied the distributed load
fprintf(fid,'%s\n',['FLST,2,1,5,ORDE,1']);
fprintf(fid,'%s\n',['FITEM,2,5']);
;fprintf(fid,'%s\n',['/GO']);
fprintf(fid,'%s\n',['SFA,P51X,1,PRES,25000']);
fprintf(fid,'%s\n',['FINISH']);

% Solve
fprintf(fid,'%s\n',['/SOL']);
fprintf(fid,'%s\n',['/STATUS,SOLU']);
fprintf(fid,'%s\n',['SOLVE']);
fprintf(fid,'%s\n',['FINISH']);

fprintf(fid,'%s\n',['/POST1']);
fprintf(fid,['\n','*get,nnumb,node,0,count']);
fprintf(fid,['\n','*dim,nodex,,nnumb']);
fprintf(fid,['\n','*dim,nodey,,nnumb']);
fprintf(fid,['\n','*dim,nodez,,nnumb']);
fprintf(fid,['\n','*vget,nodex(1),node,1,loc,x']);
fprintf(fid,['\n','*vget,nodey(1),node,1,loc,y']);
fprintf(fid,['\n','*vget,nodez(1),node,1,loc,z']);
fprintf(fid,['\n','!']);
fprintf(fid,['\n','*c fopen,nodenum,out']);
fprintf(fid,['\n','*vwrite,nodex(1),nodey(1),nodez(1)']);
fprintf(fid,['\n','(3(e16.8))']);
fprintf(fid,['\n','*cfclose']);
fprintf(fid,['\n','!']);

```

```

% fprintf(fid,'%s\n', ['NSEL,s,loc,x,0.45']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*get,nnumb,node,0,count']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*dim,dpmy,,numb']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*Vget,dpmy(1),node,1,u,y,,,0']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*cfopen,dpmy,out']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*vwrite,dpmy(1)']);
fprintf(fid,'%s\n', ['(e16.8)']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*cfclose']);

% fprintf(fid,'%s\n', ['NSEL,s,loc,x,0']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*get,nnumb,node,0,count']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*dim,vmst,,numb']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*Vget,vmst(1),node,1,s,eqv,,,0']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*cfopen,vmst,out']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*vwrite,vmst(1)']);
fprintf(fid,'%s\n', ['(e16.8)']);
fprintf(fid,'%s\n', ['*cfclose']);

function [bin,x,f,g] = ea_initial(fun,nbit,nvar,nsol)
%
% Randomly initiate the population, design variables
% nvar=no. of variables
% nbit is the number of cell in each variable
% nsol is a number of gene
%
a=0*ones(nvar,1);
b=1*ones(nvar,1);

bin = round(rand(nbit*nvar,nsol));
bin(:,1)=ones(nbit*nvar,1);
bin(:,2)=zeros(nbit*nvar,1);
x=bin2real(bin,a,b);

for i=1:nsol
    i
    [f(:,i),g(:,i)]=feval(fun,x(:,i));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function x=bin2real(bin,a,b);
[m,n]=size(bin);
nvar=length(a);
nbit=m/nvar;

for i=1:n
    for j=1:nvar
        x(j,i)=bin2dec(bin((j-1)*nbit+1:j*nbit,i),a(j),b(j));
    end
end
function x=bin2dec(bin,a,b)
%

```

```

%
% Transformation from binary string to real number
% with lower limit a and upper limit b

n=max(size(bin));
trans=cumprod(2*ones(size(bin)))/2;
reall=sum(bin.*trans);

x=a+(reall*(b-a))/(2^n-1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function MORNSGA(fun,fundat,nloop,nsol,nvar,narchive,nbit,fout)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
rand('state',sum(100*clock));
pm=0.1;% pm = mutation probability

a=0*ones(nvar,1);% lower bounds
b=1*ones(nvar,1);% upper bounds

% Initial population
[bin0,x0,f0,g0] = ea_initial(fun,nbit,nvar,nsol);
% save(fundat,'pop0','x0','f0','g0')
% This optimiser will not use bin0.

pop0=x0;
[pop0,f0,g0,A0]=nsga_select(pop0,f0,g0,[],[],[],[]);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Start NSGA search %%%%%%%%%
tic %
iter = 0;
while iter < nloop

    iter = iter+1

    pop1=nsga_crossover(pop0,a,b);%crossover
    [pop2,f2,g2]=nsga_mutate(fun,pop1,a,b,pm);%mutation

    [pop3,f3,g3,A3]=nsga_select(pop2,f2,g2,pop0,f0,g0,A0);%selection

    pop0=pop3;f0=f3;g0=g3;A0=A3;
    figure(1),clf,hold on
%    plottruefront
    plot(f0(1,:),f0(2,:), 'o','markerfacecolor','g')
    title(['NSGA iter = ' num2str(iter)])

end

[ppareto,fpareto,gpareto]=pareto_sorting(pop0,f0,g0,A0);

Time=toc % second
save(fout,'ppareto','fpareto','gpareto','Time')

```

```

function [pop3,f3,g3,A3]=nsga_select(pop2,f2,g2,pop1,f1,g1,A1);
%
% Selection procedure of NSGAI1
%
pop=[pop1 pop2];
f=[f1 f2];
g=[g1 g2];

[m0,n0]=size(A1);
[m1,n1]=size(pop);
[m2,n2]=size(f);
[m3,n3]=size(g);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:n1
    fi=f(:,i);
    gi=g(:,i);
    A(i,i)=0;
    for j=(n0+1):n1
        fj=f(:,j);
        gj=g(:,j);
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        [p_count1,p_count2]=fdominated(fi,gi,fj,gj);
        A(i,j)=p_count1;
        A(j,i)=p_count2;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=(n0+1):n1
    fi=f(:,i);
    gi=g(:,i);
    A(i,i)=0;
    for j=i+1:n1
        fj=f(:,j);
        gj=g(:,j);
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        [p_count1,p_count2]=fdominated(fi,gi,fj,gj);

        % p_count1 = 1 if i dominates j
        % p_count2 = 1 if j dominates i

        A(i,j)=p_count1;
        A(j,i)=p_count2;
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    end
end
end
B=ndlevel_sort(A);% level of being dominated, 1 = non-dominated
[B,nsort]=sort(B);

pop=pop(:,nsort);
f=f(:,nsort);
g=g(:,nsort);
A=A(nsort,nsort);

```

```

nlevel=zeros(1,max(B));
for i=1:n1;nlevel(B(i))=nlevel(B(i))+1;end
nlevel2=cumsum(nlevel);

ncheck=nlevel(1);icheck=1;
while ncheck < n3
    icheck=icheck+1;
    ncheck=ncheck+nlevel(icheck);
end

if ncheck == n3
    pop3=pop(:,1:n3);
    f3=f(:,1:n3);
    g3=g(:,1:n3);
    A3=A(1:n3,1:n3);
elseif ncheck > n3&icheck==1
    nc2=1:nlevel2(1);

    popc=pop(:,nc2);
    fc=f(:,nc2);
    gc=g(:,nc2);
    Ac=A(nc2,nc2);

    iselect=farchive(fc,n3);

    pop3=popc(:,iselect);
    f3=fc(:,iselect);
    g3=gc(:,iselect);
    A3=Ac(iselect,iselect);
else
    nn1=nlevel2(icheck-1);
    nn2=n3-nn1;

    nc1=1:nn1;
    nc2=(nn1+1):nlevel2(icheck);

    popc=pop(:,nc2);
    fc=f(:,nc2);
    gc=g(:,nc2);
    Ac=A(nc2,nc2);

    iselect=farchive(fc,nn2);

    pop3=pop(:,iselect);
    f3=f(:,iselect);
    g3=g(:,iselect);
    A3=A(iselect,iselect);

    nc3=[nc1,nn1+iselect];
    pop3=pop(:,nc3);
    f3=f(:,nc3);
    g3=g(:,nc3);
    A3=A(nc3,nc3);
end

```

```

function B=ndlevel_sort(A);
[m,n]=size(A);
b=sum(A,1);
[b,ns]=sort(b);

ilevel=1;
B(1)=ilevel;

for i=2:n
    if b(i)==b(i-1)
        B(i)=ilevel;
    else
        ilevel=ilevel+1;
        B(i)=ilevel;
    end
end
B(ns)=B;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [ppareto,fpareto,gpareto]=pareto_sorting(pop,f,g,A);
B=sum(A,1);
col=[];
for i=1:size(pop,2)
    if B(i)==0
        col=[col i];
    end
end
ppareto=pop(:,col);
fpareto=f(:,col);
gpareto=g(:,col);
function [p1,p2]=fdominated(f1,g1,f2,g2)
n=length(f1);
mg1=max(g1);
mg2=max(g2);

icount11=0;
icount12=0;
icount21=0;
icount22=0;

if mg1<=0&mg2<=0
    for i=1:n
        if f1(i) <= f2(i)
            icount11=icount11+1;
        end
        if f1(i) < f2(i)
            icount12=icount12+1;
        end
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        if f2(i) <= f1(i)
            icount21=icount21+1;
        end
        if f2(i) < f1(i)
            icount22=icount22+1;
        end
    end
end
end

```

```

if icount11 == n & icount12 > 0
    p1=1;
else
    p1=0;
end
if icount21 == n & icount22 > 0
    p2=1;
else
    p2=0;
end
elseif mg1 <=0 & mg2 > 0
    p1=1;p2=0;
elseif mg2 <=0 & mg1 > 0
    p1=0;p2=1;
else
    [p1,p2]=fdominated_uncon(g1,g2);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% unconstrained optimisation domination sorting
function [p1,p2]=fdominated_uncon(f1,f2)
n=length(f1);

icount11=0;
icount12=0;
icount21=0;
icount22=0;

for i=1:n
    if f1(i) <= f2(i)
        icount11=icount11+1;
    end
    if f1(i) < f2(i)
        icount12=icount12+1;
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    if f2(i)<= f1(i)
        icount21=icount21+1;
    end
    if f2(i) < f1(i)
        icount22=icount22+1;
    end
end
if icount11 == n & icount12 > 0
    p1=1;
else
    p1=0;
end
if icount21 == n & icount22 > 0
    p2=1;
else
    p2=0;
end

```



```

function x1=nsga_crossover(x0,a,b)
% real-code crossover in S. Srisomporn, and S. Bureerat, Geometrical
design
% of plate-fin heat sinks using hybridization of MOEA and RSM, IEEE
% Transaction on components and Packaging Technology, 31 (2008), pp.
351-360.
[m,n]=size(x0);
x1=x0;
for i=1:n
    S=1+floor(0.999*rand*n);
    T=1+floor(0.999*rand*n);
    PR=rand;
    stl=-0.25+1.5*rand;
    for j=1:m
        if PR < 0.33
            if rand < 0.5
                x1(j,i)=x0(j,S);
            else
                x1(j,i)=x0(j,T);
            end
        elseif PR >= 0.33 & PR < 0.66
            x1(j,i)=x0(j,S)+stl*(x0(j,T)-x0(j,S));
        else
            x1(j,i)=x0(j,S)+(-0.25+1.5*rand)*(x0(j,T)-x0(j,S));
        end

        if x1(j,i) < a(j)
            x1(j,i)=a(j);
        elseif x1(j,i) > b(j)
            x1(j,i)=b(j);
        end
    end
end
end
function [x1,f1,g1] = nsga_mutate(fun,x,a,b,pm)
% real-code mutation in S. Srisomporn, and S. Bureerat, Geometrical
design
% of plate-fin heat sinks using hybridization of MOEA and RSM, IEEE
% Transaction on components and Packaging Technology, 31 (2008), pp.
% 351-360.
[m,n]=size(x);
alpha=0.5;
n0=ceil(pm*n);
%%%%%%%%%%%%%% main steps %%%%%%%%%%%%%%%
x1=x;
for i=1:n0
    irow=max([ceil((rand)*m) 1]);
    icol=max([ceil((rand)*n) 1]);
    PR=rand;
    if PR < 0.5
        x1(irow,icol)=max([a(irow),a(irow)+(-
0.25+1.25*rand)*(x1(irow,icol)-a(irow))] );
    else
        x1(irow,icol)=min([b(irow),x1(irow,icol)+(1.25*rand)*(b(irow)-
x1(irow,icol))] );
    end
end

```

```

end
end
x2=min(1,max(0,x1));
for i=1:n
    [f1(:,i),g1(:,i),x1(:,i)]=feval(fun,x2(:,i));
end

function iselect=farchive(f,narchive)

[m,n]=size(f);

fmax=max(f,[],2);[fmin nmin]=min(f,[],2);
fdel=max(fmax-fmin,1e-5);

for i=1:n
    f(:,i)=(f(:,i)-fmin)./fdel;
end

ii=1:n;
isl0=[];
for i=1:(n-narchive)
    fcrownd=fcrownding(f(:,ii));
    [fmin,nmin]=min(fcrownd);
    isl0=[isl0 ii(nmin)];
    ii(nmin)=[];
end
iselect=setdiff(1:n,isl0);

function fc=fcrownding(f);
[m,n]=size(f);
delf=max(f,[],2)-min(f,[],2);

I=zeros(m,n);
for i=1:m
    [fs,nsort]=sort(f(i,:));
    I(i,nsort(1))=1e10;I(i,nsort(n))=1e10;
    for j=2:(n-1)
        I(i,nsort(j))=abs(f(i,j+1)-f(i,j-1))/delf(i);
    end
end
fc=sum(I,1);

function [bin,x,f,g] = ea_initial(fun,nbit,nvar,nsol)
a=0*ones(nvar,1);
b=1*ones(nvar,1);
bin = round(rand(nbit*nvar,nsol));
x=bin2real(bin,a,b);
for i=1:nsol
    [f(:,i),g(:,i),x(:,i)]=feval(fun,x(:,i));
end

```

```

function x=bin2real(bin,a,b);
[m,n]=size(bin);
nvar=length(a);
nbit=m/nvar;

for i=1:n
    for j=1:nvar
        x(j,i)=bin2dec(bin((j-1)*nbit+1:j*nbit,i),a(j),b(j));
    end
end

nloop=[11 2 40];
nsol=[30 3 25];
nbit=[70 10 10];
nvar=[7 20 30];

for i=1

    fun=['fun0' num2str(i)]
    fundat=['fdat0' num2str(i)];
    fundat1=['fdat0' num2str(i)];
    nloopi=nloop(i);
    nsoli=nsol(i);
    narchivei=nsoli;
    nvari=nvar(i);
    nbiti=nbit(i);

    [pop0,x0,f0,g0]=ea_initialcon01(fun,nbiti,nvari,nsoli);
    save(fundat,'pop0','x0','f0','g0')

MORNSGA(fun,fundat1,nloopi,nsoli,nvari,narchivei,nbiti,['f'
num2str(i) 'rnsga' num2str(j)]);

end

```



ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Witchakorn Wongchanasit Teetut Dolwichai and Chalothorn Thumthae. (2016).

Shape optimization of the air compressor supporting leg by using the optimization technique. The 5th International Conference on Mechanical Engineering Materials and Energy (ICMEME 2016). 10-11 December 2016 in Hong Kong, China.



Shape Optimization of the Air Compressor Supporting Leg by Using the Optimization Technique

Witchakorn Wongchanasit^{1, a}, Teetut Dolwichai^{1, b} and Chalothorn Thumthae¹

¹School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology 30000, Thailand

^aw_witchakorn@hotmail.co.th, ^bprapun@sut.ac.th

Keywords: Air compressor supporting leg, Optimization technique, Genetic algorithms, Shape optimization, Materials reduction.

Abstract. The air conditioner installation in general, the air compressor is installed at the external of the building that has well for heat rejected and pretty location. The air compressor must be used the supporting leg for support the its weight. Now a day, the production of supporting leg has the measure to reduce its cost by reduction of material weight but its strength usable. According to material weight reduction, supporting leg shape and cross section may be change. This is the point of this work. The objective work is minimizing the material weight but it also supportable its weight. This problem can solve by the optimization technique. The optimization technique which this way is known and the most widely used for structural design problem is Genetic Algorithms. This research used the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms method for solve the multi-objective problem which it are minimize cross sectional area and minimize deflection of supporting leg and the constraint conditions is the supporting leg's bending stress does not exceed the strength of materials.

Introduction

In the present, Air conditioning is important and appreciated worldwide. Because the human needs comfortable temperature for daily routine. The air conditioner installation depending on several factors such as the width of installation area. The solution of the above mentioned is the air compressor is installed at the external of the building. The device which is important to installation is the air compressor supporting leg. As shown in Fig. 1.

In this research we will consider about a reduction of the materials of the supporting leg. Such considerations, which may affect the shape and cross-sectional area. The engineering knowledge that can be applied to this problem is the optimization technique, which must be considered in constraints of problem such as the bending force on the supporting leg, conversion of the cross sectional area, included to precision of the optimal shape after the calculation.

From the Previous paragraph, we must be used the knowledge and techniques of the optimization in the research. Evolutionary algorithms is one way of the optimization technique which the most widely used. It is Genetic algorithms. Genetic algorithm was developed based on the principles of evolution and natural selection and the most widely used in engineering such as electrical work, structural work included the pipe system. This methodology have advantages are it is easy to used, didn't calculate the derivative of the solution, chance of error is very little, and most importantly, this way be applied to the design possibilities., [1]. If the genetic algorithm applied to solve the optimal shape of the air compressor supporting leg it would be useful to solve of this research.

To solving the problem of the air compressor supporting leg. It used the same calculations with the calculations of the cantilever beam. From the studying about the research of cantilever beam have information that genetic algorithms was used to calculate the most about the calculations of the beam structure. Moreover, it have been applied to the calculation with other techniques such as genetic algorithms with Constructive geometry topology optimization method, [2], with 1-0 binary variables techniques, [6] with Boundary element method, [7], with Boundary element method and Free-form deformation technique, [8]. Moreover, genetic algorithms can also be calculated with a different

structure such as Hat-Shaped Cold-Formed, [5]. The calculation result of each research above they get the reliable results.



Figure 1. the air compressor unit and the supporting leg.

Stresses and Deflections of the Air Compressor Supporting Leg

Load on the supporting leg. Load and support conditions on the supporting leg is shown in Fig. 2. Consideration from Fig. 2. (a) we can know that the weight of air compressor unit is the distributed load on the supporting leg and fixed support.

Design variables of C-section. For this work we chosen the C-section because the C-section can be reduced the materials more than the other cross section, [4]. When they compared the results of calculation between C-section, I-section and T-section. The design variables is shown in Fig. 2 (b). The design elements are calculated as follows.

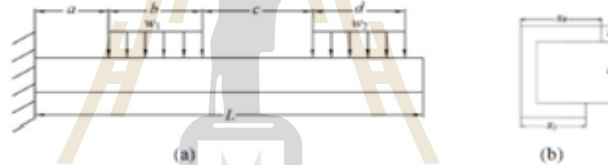


Figure 2. (a) Loads on the supporting leg and (b) design variables of C-section

Optimization Technique

Genetic Algorithms. (GA) was developed based on the principles of evolution and natural selection. A population of solutions (genes) is generated and then the next generation is produced by mating pairs of these genes. The search procedure starts with an initial population along with their respective fitness values. Three main operations, selection, crossover and mutation, are then carried out in order to generate the next population. The population is evolved repeatedly until an optimum is achieved.

This operation is presented for single objective function which this approach may finding the optimal solution for some problem but other problem need the objective function is more than one function, for example, The structure is designed for the minimum weight. Meanwhile, it also needs to be maximum strength. These problem is called Multi-objective optimization.

Multi-objective optimization. Mathematically problems for multi-objective optimization is expressed as :

$$f = \{f_1(x), \dots, f_p(x)\} \quad (1)$$

The constraint conditions are expressed as :

$$g_i(x) \leq 0 \quad (2)$$

$$h_i(x) = 0 \quad (3)$$

where x is the design variables, f_i is the objective function, g_i is the constraint conditions for inequality form and h_i is the constraint conditions for equality form.

From Fig. 3, it shown plotting of the solutions on the objective function domain or the feasible solution which it corresponds to the constraint conditions. So the optimal solutions for bi-objective optimization problem will be in the feasible region. the minimum of bi-objective function which the solutions is at the edge of the feasible region and it's on the curve between $\min f_1$ and $\min f_2$ point. These solutions called Pareto frontier. All point on pareto frontier are the optimal solutions for the minimum optimization problem and we can select the solutions on pareto frontier depending on our requirements. Pareto frontier can be obtained by non-dominated technique.

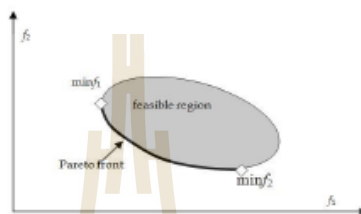


Figure 3. Pareto frontier for bi-objective optimization problem

Non-dominated sorting genetic algorithms II. (NSGAI) is the most widely used in engineering work for multi-objective problem. It's developed the single objective of GA to the multi-objective in order to it can find the better solutions. NSGAI procedure is shown in Fig. 4.

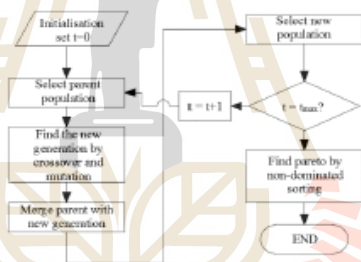


Figure 4. Flow chart for NSGAI

Objective functions and Constraint conditions

The objective of the problem is to find the optimum dimensions of the supporting leg, such that the cross section area and the deflection are both minimized and the constraint conditions is the supporting leg's bending stress does not exceed the strength of materials,[3].

Objective function as :

$$F(X^*) = [f_1(X^*), f_2(X^*)] \tag{4}$$

Where X^* is the optimum design variables, $f_1(X)$ is the objective function of the area and $f_2(X)$ is the objective function of the deflection.

Objective function above mentioned can be expressed as :

$$\min f_1(X) = \min A(x) \tag{5}$$

$$\min f_2(X) = \min \delta(x) \tag{6}$$

the constraint conditions is expressed as :

$$g(x) = \sigma_{\max} \leq \sigma_{allow}(x) \tag{7}$$

Where A is the cross section area, δ is the static deflection, σ_{\max} is the maximum stress and σ_{allow} is allowable stress.

We defined the variables follows. The values of length $a = 8$ cm. , $b = 10$ cm. , $c = 16$ cm. , $d = 10$ cm. , $L = 45$ cm. The values of forces $w_1 = 3000$ N/m , $w_2 = 3000$ N/m, Young's modulus $E = 200$ GPa, the centroid point of area and the moment of inertia can calculated from Eq. 9 and Eq. 10, respectively.

$$c = \frac{x_2(x_1 + 2x_3 + 3x_4) + x_3^2 + 2x_3x_4}{2(x_1 + x_3 + x_4)} \tag{9}$$

$$I = \frac{x_2}{12} [(x_1x_2^2 + x_3^3 + x_2^2x_4) + 6(x_1(2\bar{y} - x_2) + x_3(2\bar{y} - x_3 - 2x_2) + x_4(3x_2 + 2x_3 - 2\bar{y}))] \tag{10}$$

The constraints are

$$0.005 \leq x_1 \leq 0.03 , 0.0005 \leq x_2 \leq 0.002 , 0.09 \leq x_3 \leq 0.119 \text{ and } 0.015 \leq x_4 \leq 0.03$$

The objective function of cross sectional area and deflection are

$$A = f_1(X) = x_2(x_1 + x_3 + x_4) \tag{11}$$

$$\delta = f_2(X) = \frac{5.401(10)^{-11}}{I} \tag{12}$$

Subject to the bending stress constraint

$$\sigma = g(x) = \frac{156c}{I} \leq 250(10^6) \tag{13}$$

Result and Discussion

Fig. 5. illustrates the results of calculation which Fig. 5 (a) shown the optimal point on the Pareto frontier of this problem and Fig. 5 (b) shown the cross sectional area of each point on Pareto frontier which points are close a y-axis affect to a small cross section area and it gets the large values deflection. On the other hand, when points are close a x-axis affect to a large values of cross section area and it gets the small values deflection. The values of design variables shown in table 1. point 1 reduces the cross sectional area from point 6 about 18.34% but the deflection increase depending on the number of each point which point 6 can allow loads from the compressor unit better than smaller optimal point because the deflection values are the smallest but it used the most materials. So we can choose each optimal point depending on the requirement.

Table 1. The values of each point on Pareto frontier

Optimal point	Design variables (m)				Cross sectional area (m ²)	Deflection (m)
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄		
1	0.0051	5.0075(10 ⁻⁴)	0.0901	0.0152	5.5318(10 ⁻⁵)	0.0018
2	0.0052	5.0108(10 ⁻⁴)	0.0943	0.0153	5.7496(10 ⁻⁵)	0.0015
3	0.0051	5.0075(10 ⁻⁴)	0.1060	0.0152	6.3254(10 ⁻⁵)	0.0011
4	0.0207	0.0014	0.1011	0.0184	1.9067(10 ⁻⁴)	4.6149(10 ⁻⁴)
5	0.0067	0.0019	0.1055	0.0183	2.8784(10 ⁻⁴)	2.9102(10 ⁻⁴)
6	0.0253	0.0018	0.1169	0.0264	3.0161(10 ⁻⁴)	2.2691(10 ⁻⁴)

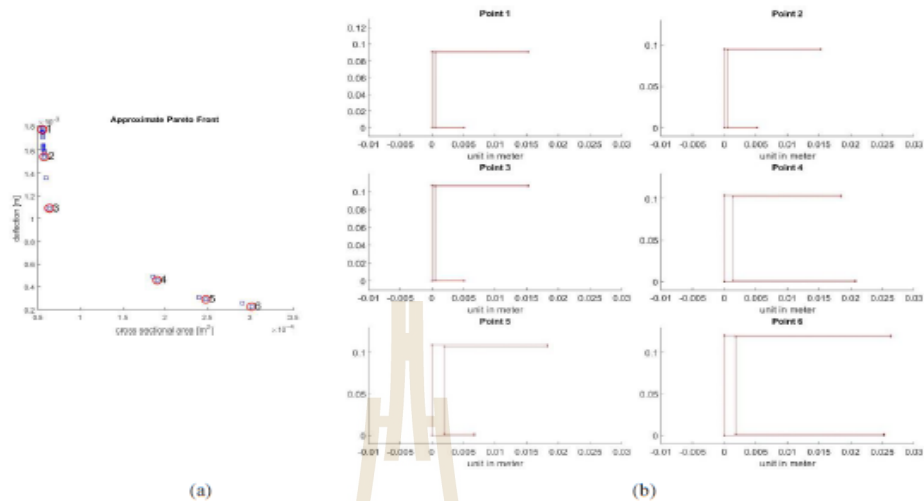


Figure 5. Pareto frontier and cross-sectional area

Conclusion

The optimal points shown on the Pareto frontier which all points are the optimal solutions. It indicated the optimal values of the cross sectional area and the deflection of the supporting leg. We can choose each point depending on the requirement of work and usability. This research used NSGAI for the calculations which it can made a good results and high precision follows the constraint conditions. Moreover, this method can apply to solve the other structural design problem and more complicated problem in the future.

References

- [1] S. Bureerat, Optimization of Mechanical Engineering systems, Khonkean, Thailand, 2013.
- [2] F. Ahmed, B. Bhattacharya, K. Deb., Constructive Solid Geometry Based Topology Optimization using Evolutionary Algorithms, KanGAL Report Number 2012013 (2012).
- [3] A. Khazaei, H.M. Naimi, Two Multi-Objective Genetic Algorithms for Finding Optimum Design of an I-Beam, Scientific Research 3 (2011) 1054-1061.
- [4] F.M. Nadela, J.E.C. Lope, Comparative Strength of Common Structural Shapes Using Genetic Algorithms, Proceeding of World Congress on Engineering 2009 Vol II (2007).
- [5] W. Lu, P. Mäkeläinen, Augmented Lagrangian Genetic Algorithms for Optimal Design of Hat-Shaped Cold-Formed, Building Materials Structures and Techniques, BMB2007 (2007).
- [6] S. Bureerat, J. Limtragool, Performance Enhancement of Search for Structural Topology Optimization, Finite Element in Analysis and Design 42 (2006) 547-566.
- [7] T. Burczynski, G. Kokot, Evolutionary Algorithms and Boundary Element Method in Generalized Shape Optimization, JOURNAL OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS 41 2 (2003) 341-364.
- [8] E. Kita, H. Tanie, Shape Optimization of Continuum Structures by Genetic Algorithms and Boundary Element Method, Engineering Analysis with Boundary Element 19 (1997) 129-136.

ประวัติผู้เขียน

นายวิชกร วงษ์ชนะสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พุทธศักราช 2534 มีภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2556 ต่อมาในภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2557 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 2 รายวิชา คือ (1) Engineering Graphics I (2) Engineering Graphics II ซึ่งทำให้เพิ่มพูนความรู้ความสามารถและประสบการณ์ต่าง ๆ ในการนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี