ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล	วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาการออกแบบโหลดเซลล์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Study of Design of Load Cell Using Finite Element Method

นามผู้วิจัย นายคเณศ ไวท์ยางกูร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(อาจารย์จิระชัย มิ่งบรรเจิดสุข, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิติชัยการ, D.Phil.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการออกแบบโหลดเซลล์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Study of Design of Load Cell Using Finite Element Method

โดย

นายคเณศ ไวท์ยางกูร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คเณศ ไวท์ยางกูร 2555: การศึกษาการออกแบบโหลดเซลล์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล, Ph.D. 78 หน้า

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาออกแบบโหลดเซลล์แบบคาน (beam type load cell) ที่ใช้กับเครื่องชั่งดิจิตอล โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของความเค้น และตำแหน่งและขนาดของความเค้นสูงสุด ขณะรับโหลด ของโหลดเซลล์ที่มีช่องเจาะรูปร่างต่างๆ ประกอบด้วย วงกลม และสี่เหลี่ยม และทำการออกแบบ และวิเคราะห์ความแข็งแรงของโหลดเซลล์ ต้นแบบที่มีช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยมกับวงกลม ตลอดจนทำการวิเคราะห์หาอายุความล้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Patran และ MSC Fatigue Version 2005

ผู้วิจัยทำการศึกษาตัวแปรของรูปร่างของช่องเจาะ ที่มีผลต่อการกระจายตัวของความเค้นตามแกน x พบว่าความเค้นสูงสุดเกิดที่ผิวบนของโหลดเซลล์ และมีค่าสูงขึ้น เมื่อความกว้างของช่องเจาะมีค่าสูงขึ้น ขณะที่ความยาวของช่องเจาะ มีผลต่อความเค้นเล็กน้อย โหลดเซลล์ควรมีช่องเจาะที่เหมาะสมควรขนาด d/W เท่ากับ 0.7 โดยโหลดเซลล์ต้นแบบถูกออกแบบให้สามารถชั่งน้ำหนักได้ไม่เกิน 50 kg มีความละเอียดการวัด 0.01 kg ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3.93 และอายุการใช้งานเท่ากับ 1×10^{20} รอบ

_____ _____ ___ / _____ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kanate Witayangkool 2012: The Study of Design of Load Cell Using Finite Element Method. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Tumrong Puttapitukporn, Ph.D. 78 pages.

This research is aimed to study the design of beam type load cells installed in digital scales. The stress contours and locations of the maximum stress on load cells containing circular and rectangular slots subjected to loading were studied. The prototype load cell combined rectangular with circular slots was designed and analyzed its strength and also the fatigue life using MSC Patran and MSC Fatigue Version 2005 programs.

The researchers studied the shape variables of slots affected on their stress contour. The maximum stress was found on the top surface and increased as its wide increased. While its length slightly affected on the maximum stress. The prototype load cell has slot d/W = 0.7. This load cell can measure the maximum weight of 50 kg with measuring precision of 0.01 kg. It has the safety factor of 3.93 and the fatigue life of 1×10^{20} cycles.

_____ _____ __ / ____ / __

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธำรงค์ พุทธาพิทักษ์ผล ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆและเพื่อนๆ ทุกท่านที่ค่อยแนะนำ ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลืออีกทั้งให้คำชี้แนะให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คเณศ ไวท์ยางกูร

กันยายน 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์	38
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	48
ผล	48
วิจารณ์	57
สรุปและข้อเสนอแนะ	59
สรุป	59
ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารและอ้างอิง	61
ภาคผนวก	63
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	64
ภาคผนวก ข ขนาดของโหลดเซลล์	76
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	78

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แฟคเตอร์แก้ระดับความเชื่อมั่น	20
2	อิทธิพลอื่นๆที่มีผลต่อพิกัดการล้า	24
3	คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 5083	43
4	คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมเกรด 5083-87-CF	45
5	น้ำหนักของตุ้มน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ	46
6	ขนาดของโหลดเซลล์ต้นแบบ	54
7	ผลการสอบเทียบน้ำหนักชั่ง	55
8	ผลการทดสอบการชั่งซ้ำ	56

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ท่อนวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ	5
2	แรงดึงและแรงอัด	6
3	ความเครียดของท่อนวัสดุ	7
4	การเปลี่ยนรูปของวัสดุที่รับแรง	10
5	ความเค้นเข้มข้น	11
6	การกระจุกตัวของความเค้นที่ใกล้จุดที่มีแรงมากระทำ	12
7	ความหนาแน่นของเส้นแรงความเค้น	12
8	ความเข้นข้นของความเค้นบริเวณรอบรูเจาะและจุดเปลี่ยนขนาด	13
9	รอยแตกหักที่เกิดจากการล้า	15
10	อุปกรณ์ทดสอบความล้า	16
11	กราฟความเค้นสลับ-จำนวนรอบ (S-N curve)	16
12	แฟคเตอร์แก้ผิวสำหรับเหล็กกล้า	18
13	แฟคเตอร์แก้อุณหภูมิ	21
14	ค่า q สำหรับเหล็กล้าและอลูมิเนียมผสมที่รับภาระในแนวแกน และโมเมนต์แบบวัฏจักร	22
15	การหาค่า k_t และ k_{ts} ที่ภาระโหลดต่างๆ	23
16	การเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการดึง	25
17	การติดตั้งชุดสเตรนเกจ	27
18	วงจรวัดความหนืดของระบบไฟฟ้า (wheatstone bridge)	28
19	วงจรควอเตอร์บริดจ์	28
20	วงจรฮาล์ฟบริดจ์	29
21	วงจรฟลูบริดจ์	29
22	แผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบด้วยขอบตรงและขอบโค้ง โดยภายในมีรูกลม 2 ขนาด	30
23	การวิเคราะห์แผ่นอลูมิเนียมด้วยวิธีการผลต่างสืบเนื่อง	31

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	การวิเคราะห์แผ่นอลูมิเนียมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	31
25	การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ	32
26	เอลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบไปด้วย 3 จุดต่อ โดยมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ ณ ตำแหน่งจุดต่อ	32
27	แบบจำลองที่ 1	39
28	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ 1	39
29	แบบจำลองที่ 2	40
30	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของแบบจำลองที่ 2 ที่ d/W = 0.5, l/d = 2	40
31	แบบจำลองที่ 3	41
32	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ 3 ที่ d/W = 0.5, l/d = 1.5	41
33	แบบจำลองแบบที่ 4	42
34	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ 4 ที่ d/W = 0.6, l = 160mm	42
35	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์ต้นแบบ	44
36	กราฟ S-N ของ อลูมิเนียมเกรด 5083-87-CF	45
37	การทดสอบโหลดเซลล์ต้นแบบ	47
38	การกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 1	48
39	แสดงกราฟความเค้นหนาแน่น K_t กับอัตราส่วน r/d เปรียบเทียบระหว่าง FEA กับ การทดสอบของ Shigley and Mischke (1989)	49
40	แสดงการกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 2 ที่ d/W = 0.5 และ l/d = 1.5	50
41	กราฟ K กับ d/W ที่ l/d = 0, 1.5, 2 และ 2.5 ของแบบจำลองที่ 2	50
42	การกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 3 ที่ d/w = 0.5 และ l/d=1.5	51
43	กราฟ K กับ d/W ที่ l/d =1, 1.5, 2 ตามลำดับ ของแบบจำลองที่ 3	51
44	กราฟ K กับ d/W ที่ r = 10 mm, l = 160 mm และ w = 20 mm, l = 160 mm ของแบบจำลองที่ 4	52

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

45 กราฟ K กับ l/d ที่ r = 10 mm, w = 60 mm ของแบบจำลองที่ 4 53

46 การกระจายตัวของความเค้น von mises ของโหลดเซลล์ต้นแบบ ที่ d/W = 0.7, L = 64 mm, r = 10 mm, w = 8 54

47 แสดงกราฟค่าความปลอดภัย (safety factor, S.F.) กับ น้ำหนักชั่ง ที่ d/W = 0.7 และ 0.8 ของโหลดเซลล์ต้นแบบ 54

48 แสดงผลการวิเคราะห์ความล้าของโหลด์เซลล์ต้นแบบ 55

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อนวัสดุ
F	=	แรงภายนอก
σ	=	ความเค้น
L	=	ความยาว
ε	=	ความเครียด
δ	=	ส่วนยืดหด
E	=	modulus of elasticity หรือ Young's modulus
σ_w	=	ความเค้นที่ยอมให้
σ_y	=	ความเค้นคราก
n_u	=	ส่วนปลอดภัยเพื่อต้านการแตกหัก
P_c	=	น้ำหนักหรือแรงที่ทำให้โครงสร้างพัง (collapse load)
P_w	=	น้ำหนักหรือแรงที่โครงสร้างรับในสภาพความเป็นจริงหรือสภาพใช้งาน (working load)
ν	=	อัตราส่วนปัวซอง
t	=	ความหนาของวัสดุ
ε_t	=	ความเครียดตามแนวขวาง
ε_l	=	ความเครียดตามแนวแกน
$\sigma_{\max}$	=	ความเค้นสูงสุด
σ_{av}	=	ความเค้นเฉลี่ย
K_t	=	อัตราส่วนความเค้นเข้มข้น
σ_n	=	จุดพิกัดความล้า (fatigue limit)
S_e	=	จุดพิกัดความทนทาน (endurance limit)
σ_f	=	ความต้านทานการล้า (endurance strength)
N	=	อายุการใช้งาน
σ_n'	=	พิกัดความล้าของชิ้นงานทดสอบ
k_a	=	แฟคเตอร์แก้ผิว
k_b	=	แฟคเตอร์แก้ขนาด
k_c	=	แฟคเตอร์แก้ระดับความเชื่อมั่น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

k_d = แฟคเตอร์แก้อุณหภูมิใช้งาน

k_e = แฟคเตอร์แก้ความเค้นหนาแน่น

k_f = แฟคเตอร์แก้ค่าอิทธิพลต่างๆ

Z_r = standardized variable

T = อุณหภูมิ

q = ค่าความไวของรอยเจาะ (notch sensitivity)

$\frac{\Delta\varepsilon}{2}$ = total strain amplitude

$\Delta\sigma$ = 2×stress amplitude

N_f = number of cycles to failure

σ'_f = fatigue strength coefficient

b = fatigue strength exponent

ε'_f = fatigue ductility coefficient

c = fatigue ductility exponent

K' = cyclic strain-hardening exponent

n' = cyclic strength coefficient

R = ค่าความต้านทานของสเตรนเกจ

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะของตัวนำโลหะ

$R(x)$ = ฟังก์ชั่นตกค้างหรือค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น

$W_i(x)$ = ฟังก์ชั่นถ่วงน้ำหนัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาการออกแบบโหลดเซลล์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Study of Design of Load Cell Using Finite Element Method

คำนำ

โหลดเซลล์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องชั่งดิจิตอลทั่วไป มีหลักการทำงานคือ อาศัยการเปลี่ยนแปลงของความเครียดของโหลดเซลล์ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนัก และมีสเตรนเกจ (strain gage) เปลี่ยนแปลงความเครียดเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งโหลดเซลล์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องชั่งสำหรับวัตถุที่มีน้ำหนักเบาไปจนถึงวัตถุที่มีน้ำหนักมาก จึงเป็นที่ต้องการในงานอุตสาหกรรมต่างๆ แต่เนื่องจากโหลดเซลล์ส่วนใหญ่ออกแบบและนำเข้าจากต่างประเทศทำให้มีราคาสูง ดังนั้นหากสามารถออกแบบและผลิตเองได้ จะเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้

ในปัจจุบันโหลดเซลล์ที่มีขายตามท้องตลาด มีการออกแบบหลากหลายรูปแบบ แต่มีลักษณะคล้ายกันคือ เป็นแท่งสี่เหลี่ยมและมีรูเจาะตรงกลางแท่ง เนื่องจากโหลดเซลล์มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับตัวเครื่องชั่งทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความเครียดน้อย จึงต้องมีการเจาะรูเพื่อเป็นการเพิ่มความเค้นหนาแน่น (stress concentration) ทำให้สามารถวัดความเครียดได้ง่ายและชัดเจนขึ้น

ขณะใช้งานโหลดเซลล์ได้รับการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอยู่เสมอ อาจทำให้เกิดความล้าขึ้น กล่าวคือเมื่อโหลดเซลล์ได้รับแรงซึ่งอาจมีขนาดต่ำกว่าความเค้นครากของวัสดุกระทำกลับไปกลับมา ซ้ำๆกัน อาจจะทำให้เกิดรอยร้าวขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปรอยร้าวจะขยายใหญ่ขึ้น จนสุดท้ายโหลดเซลล์เกิดการแตกหักขึ้น ซึ่งความล้าเป็นสาเหตุหลักๆที่ทำให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆเกิดความเสียหาย

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการศึกษาลักษณะรูปร่างและรูเจาะของโหลดเซลล์ที่เหมาะสม และการทดสอบความล้า เนื่องจากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม อีกทั้งสามารถช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการสร้างแบบจำลองในการทดลองอีกด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการออกแบบลักษณะรูเจาะของโหลดเซลล์ที่ใช้กับเครื่องชั่งดิจิตอล

2. ทดสอบความล้าและทำนายอายุการใช้งานของโหลดเซลล์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและวิเคราะห์โหลดเซลล์ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้โหลดเซลล์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2. สร้างต้นแบบของโหลดเซลล์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการวัดน้ำหนัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nigrelli and Mariotti (1997) ได้คำนวณ stress concentration factor ของ collar และ shouldered เพลาที่ได้รับแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัด โดยใช้วิธี the boundary element (BEM) และวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ซึ่งค่าที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง Photoelastic

Bignardi *et al.* (1999) ศึกษา stress field และ contact pressure ของ pneumatic lip seal พิจารณาจุดที่เกิด contact pressure ขึ้น 2 จุดคือ ระหว่าง seal กับ rod และระหว่าง seal กับ mounting housing เพื่อหาลักษณะความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นที่ seal โดยหา isoclinic lines และ isochromatic fringes ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 2 มิติ และวิธี photoelastic และเปรียบเทียบผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันสามารถยอมรับได้

Van Paepegem and Degrieck (2001) ออกแบบการทดลองและคำนวณทางตัวเลขของการทดสอบความล้าที่เกิดจากโมเมนต์ดัดใน วัสดุผสม plain woven glass/epoxy มีการออกแบบเครื่องทดสอบความล้า ผลที่ได้จากการทดลอง ได้ค่า yield ของการทดสอบความล้าที่เกิดจากการดัด ซึ่งไม่สามารถหาได้จากการทดสอบการล้าที่เกิดจากการดึงทั่วๆไป

Joo *et al.* (2002) พัฒนาการออกแบบโหลดเซลล์แบบ 6 แกนที่รับแรงตามแนวแกน และโมเมนต์ โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการออกแบบขนาดของโหลดเซลล์ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้น หาตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจเพื่อใช่วัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้น และมีการออกแบบวงจรบริดจ์ ได้ผลลัพธ์ทางด้านในความไวในการตรวจจับแรงสามารถวัดค่าความผิดพลาดต่อเนื่องที่เกิดขึ้นได้ 0.38% และโหลดเซลล์สามารถรับแรงได้มากขึ้น 250%

Marines *et al.* (2003) ศึกษาผลกระทบจากความล้าของเหล็ก AISI-SAE 52100 ที่รอบ 10^5 และ 10^{11} เนื่องจากการทดสอบความล้ามีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลามาก จึงทำการทดลองโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิคความถี่ 20 และ 30 กิโลเฮิร์ต ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองโดยการดึงและการอัด และจากข้อมูลการทดสอบของญี่ปุ่นที่ใช้โมเมนต์ดัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Toubal *et al.* (2005) ทดสอบ tensile strain field ของวัสดุผสมด้วยวิธี electronic speckle pattern interferometer (ESPI) กับความเค้นหนาแน่นที่เป็นรูเจาะวงกลมโดยวิธีดังกล่าวจะวัดระยะยืดหดตัวและแสดงเป็นแถบสี ผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับการทำนายโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Wu-rong *et al.* (2008) ศึกษาความล้าที่เกิดขึ้นจาก Stamping วิเคราะห์โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลอง tubular bracket นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับการทดลอง พบว่าตำแหน่งที่เกิดรอยแตกเกิดที่ตำแหน่งเดียวกัน และมีการเปลี่ยนความหนาเพื่อเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น

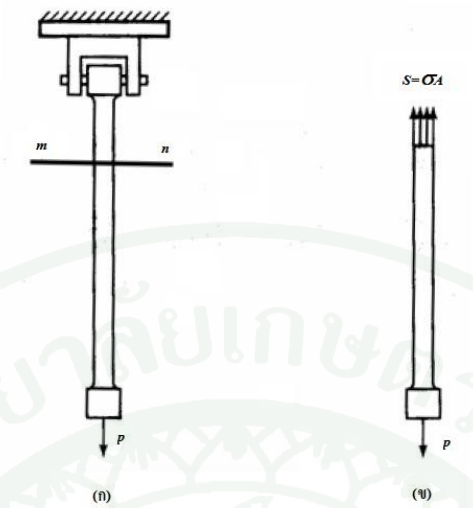
เพิ่มศักดิ์ (2550) ศึกษาการออกแบบโหลดเซลล์ โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การเสียรูปของโหลดเซลล์ ความสามารถในการรับน้ำหนัก และตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจ เพื่อช่วยลดเวลาในการออกแบบรูปทรงของโหลดเซลล์และเป็นการลดต้นทุนการผลิต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเค้น (stress)

เมื่อมีแรงมากระทำบนวัตถุใดๆ จะมีแรงต้านโดยมีขนาดรวมแล้วเท่ากับแรงภายนอก ท่อนวัสดุ (bar) ที่ถูกกระทำด้วยแรงในแนวแกน (axis force) ที่พยายามทำให้เกิดการยืดตัว (elongate) ตามแนวแกนเราเรียกว่า ท่อนวัสดุนั้นถูกกระทำด้วยแรงดึง (tension) แต่ถ้าหากแรงภายนอกที่กระทำนั้นพยายามทำให้เกิดการหดตัวตามแนวแกน เราเรียกว่าท่อนวัสดุนั้นถูกกระทำด้วยแรงกดหรือแรงอัด (compression) ดังภาพที่ 1 ถ้าลองตัดท่อนวัสดุที่หน้าตัด mn แล้วพิจารณาผังวัสดุอิสระของท่อนวัสดุดังภาพที่ 1 (ข) จะเห็นว่าการที่ส่วนนี้จะอยู่ในสภาวะสมดุลได้ จะต้องมีแรงภายใน เนื่องจากอนุภาคที่อยู่เหนือ mn ขึ้นไปกระทำกับส่วนล่างของ mn เพื่อต้านแรงภายในซึ่งจะเกิดขึ้นทุกๆจุดบนหน้าตัด mn และกระจายแรงสม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 1 ท่อนวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ

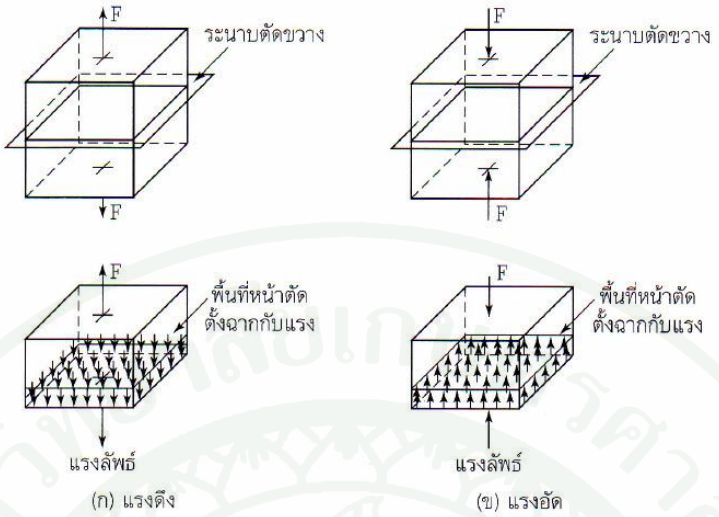
$$\sigma = \frac{F}{A}$$ คือแรงภายในต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือเรียกว่าความเค้น (1)

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของท่อนวัสดุ

F = แรงภายนอก

ถ้ามีแรงภายนอกในแนวแกนกระทำผ่านจุดเซ็นทรอยด์ (centriodal axis) ของพื้นที่หน้าตัดของท่อนวัสดุ การกระจายแรงภายในที่ต้านแรงภายนอกก็จะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดมีความเค้นเกิดขึ้นในทิศทางตั้งฉากกับแรงภายนอกจึงเรียกแรงเค้นตั้งฉาก (normal stress) ถ้าแรงกระทำเป็นแรงดึง ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นความเค้นดึง (tension stress) ถ้าแรงกระทำเป็นแรงอัด ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นความเค้นอัด (compressive stress) ดังภาพที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 2 แรงดึงและแรงอัด

2.2 ความเครียด (strain)

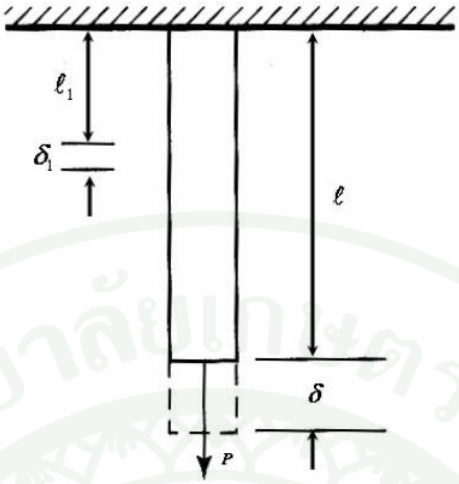
ความเครียด คือผลการกระทำของแรงภายนอกต่อวัสดุ ไม่เพียงแต่ทำให้เกิดการต้านของแรงภายในของวัสดุเท่านั้น แต่ยังมีผลทำให้วัสดุนั้นเปลี่ยนรูปไปด้วย นั่นคือวัสดุจะยืดตัวเมื่อได้รับแรงดึงและหดตัวเมื่อได้รับแรงอัด ส่วนที่เปลี่ยนรูปไปเรียกว่า “ส่วนยืดหด (elongation, δ)” ในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปของวัสดุเรามักจะใช้อัตราส่วนระหว่างการยืดหดต่อหนึ่งหน่วยความยาวเดิม เรียกว่า ความเครียด “ε ”

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \tag{2}$$

เมื่อ l = ความยาวเดิมของท่อนวัสดุ

สำหรับแรงที่กระทำลงบนวัสดุความเครียดของวัสดุไม่ว่าจะวัดจากส่วนใดของวัสดุจะมีค่าเท่ากันหมด ดังภาพที่ 3 แสดงความเครียดของท่อนวัสดุ เมื่อความยาวเท่ากับ l เมื่อถูกแรงภายนอกกระทำด้วยแรง F จะยืดออก δ แต่ถ้าวัดช่วงของวัสดุที่ความยาวเดิมเท่ากับ l_1 และยืดตัวออก δ_1 จะพบว่าความเครียดนี้จะใช้ได้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนรูปเล็กน้อย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 ความเครียดของท่อนวัสดุ

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

จากกฎของฮุค (Hooke's Law) เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงจะเกิดการยืดตัวหรือหดตัวตามทิศทางของแรงนั่นๆ ถ้านำแรงที่กระทำออกวัสดุก็จะกลับคืนสู่สภาพเดิม เรียกคุณสมบัติของวัสดุนี้ว่า ความยืดหยุ่น (elasticity) และเรียกวัสดุที่มีคุณสมบัตินี้ว่า วัสดุยืดหยุ่น (elastic material) อย่างไรก็ตามแรงที่มากระทำต่อวัสดุมีค่ามาเกินไป และเมื่อนำแรงที่กระทำออกจากวัสดุก็อาจไม่กลับสู่สภาพเดิม คือเมื่อวัสดุมีความยาวผิดไปจากเดิม ซึ่งเราเรียกพฤติกรรมของวัสดุนี้ว่า ไม่ยืดหยุ่น (inelastic) จากการทดลองพบว่าวัสดุบางอย่างเช่น เหล็ก อลูมิเนียม ไม้ และคอนกรีต อาจถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นโดยมีข้อจำกัด

จากการทดลองแรงดึงในวัสดุต่างๆ โรเบิร์ต ฮุค (Robert Hooke) พบว่าภายในขีดจำกัดของความยืดหยุ่นของวัสดุ ส่วนที่ยืดตัวของวัสดุจะแปลผันตามแรงดึง F และความยาว l ของท่อนวัสดุจะแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ

$$\delta \propto \frac{FL}{A} \text{ หรือ } \delta = \frac{FL}{EA} \tag{3}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ E เป็นค่าคงที่สำหรับวัสดุแต่ละชนิดเรียกว่า โมดูลัสความยืดหยุ่น หรือ ยังโมดูลัส (modulus of elasticity or Young's modulus) ความสัมพันธ์ตามสมาการนี้ถือเป็นกฎของฮุค ซึ่งอาจเขียนใหม่ในรูปของความเค้นและความเครียดโดยให้

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ และ } \varepsilon = \frac{\delta}{l}$$

จะได้

$$\sigma = E\varepsilon \tag{4}$$

ข้อจำกัดในการใช้กฎของฮุคคือ

1. แรงภายในของวัสดุในช่วงที่พิจารณาต้องเท่ากันตลอด
2. พื้นที่หน้าตัดของวัสดุในช่วงที่พิจารณาจะต้องเท่ากันตลอด
3. เป็นวัสดุชนิดเดียวกันตลอดช่วงการพิจารณา

2.4 ความเค้นที่ยอมให้ (allowable working stress)

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทำให้ทราบว่าวัสดุแต่ละชนิดสามารถรับความเค้นสูงสุดได้เท่าใด ในการออกแบบโครงสร้างต่างๆผู้ออกแบบต้องทำการคำนวณขนาดและโครงสร้างที่สามารถรับความเค้นที่เกิดขึ้นได้โดยไม่พังและไม่เปลี่ยนรูปมากเกินไป แต่เนื่องจากผู้ออกแบบไม่สามารถทราบถึงความเค้นที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างได้เพียงแต่คาดการณ์หรือประเมินค่าที่อาจจะเกิดขึ้นได้เท่านั้น ดังนั้นค่าความเค้นที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริงนี้จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าไม่ให้เกินค่าสูงสุดที่โครงสร้างนั้นสามารถรับได้ ค่าความเค้นที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบนี้เรียกว่า ความเค้นที่ยอมให้ (allowable working stress)

2.5 ส่วนปลอดภัย (safety factor)

การคำนวณขนาดโครงสร้างนั้นแรงกระทำหรือน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างนั้นอาจจะสูงหรือต่ำกว่าค่าที่ประมาณไว้ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงเกินค่าสูงสุดที่โครงสร้างนั้นสามารถรับได้จึงต้องกำหนดค่าความเค้นที่ยอมให้ต่ำเพียงพอที่จะสามารถรับแรงกระทำหรือน้ำหนักที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างปลอดภัย ซึ่งทำได้โดยนำตัวเลขที่เท่ากับหรือมากกว่าหนึ่งขึ้นไปมาหารค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุนั้นสามารถรับได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{n_u} \tag{5}$$

เมื่อ σ_w = ความเค้นที่ยอมให้

σ_y = ความเค้นคราก

n_u = ส่วนปลอดภัยเพื่อต้านการแตกหัก

2.6 ส่วนปลอดภัยสำหรับน้ำหนัก (load factor)

ค่าความเค้นที่ยอมให้นั้นอาจหาค่าได้โดยประมาณเท่านั้น ส่วนค่าความปรอดภัยอาจจะไม่ชี้ให้เห็นถึงระดับความปลอดภัยของส่วนประกอบของโครงสร้างต่างๆได้อย่างชัดเจน การหาระดับความปลอดภัยของโครงสร้างอาจทำได้โดยใช้อัตราส่วนที่เรียกว่า ส่วนความปลอดภัยต้านน้ำหนัก (load factor against collapse, n)

$$n = \frac{P_c}{P_w} \tag{6}$$

เมื่อ P_c = น้ำหนักหรือแรงที่ทำให้โครงสร้างพัง (collapse load)

P_w = น้ำหนักหรือแรงที่โครงสร้างรับในสภาพความเป็นจริงหรือสภาพใช้งาน (working load)

2.7 อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

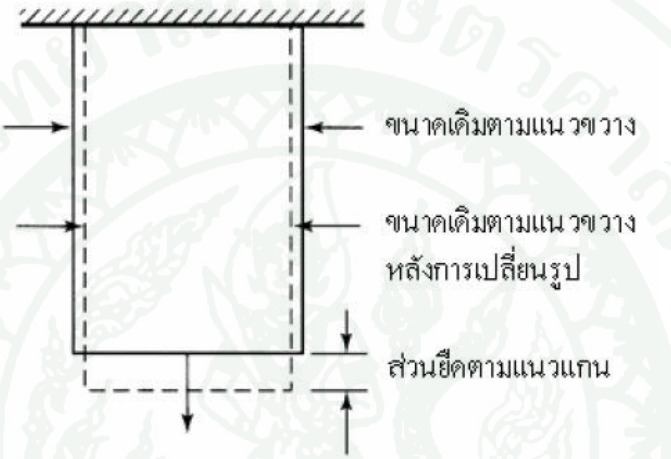
เมื่อท่อนวัสดุรับแรงตามแนวแกนจะเกิดการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนนั้น นอกจากนี้พบว่าท่อนวัสดุนั้นจะเปลี่ยนรูปในแนวตามขวางด้วย ถ้าท่อนวัสดุได้รับแรงดึงตามแนวแกนก็จะเกิดการยืดตัวตามแนวแกนหรือแนวยาว (longitudinal direction) ในขณะเดียวกันก็จะหดตัวตามแนวขวางหรือแนวด้านข้าง (transverse or lateral direction) ดังภาพที่ 4 แสดงการเปลี่ยนรูปของท่อนวัสดุที่รับแรงดึง ในทางตรงกันข้ามถ้าท่อนวัสดุรับแรงอัดตามแนวแกนจะเกิดการหดตัวตามแนวแกนและยืดตัวตามแนวขวาง ในกรณีที่แรงกระทำมีขนาดไม่มากจนเกินขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุพบว่าอัตราส่วนของความเครียดตามแนวขวางและความเครียดตามแนวแกนจะมีค่าคงที่เสมอ สำหรับวัสดุแต่ละชนิดค่าคงที่นี้เรียกว่า อัตราส่วนปัวซอง, ν

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \tag{7}$$

เมื่อ ε_t = ความเครียดตามแนวขวาง

ε_l = ความเครียดตามแนวแกน



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนรูปของวัสดุที่รับแรง

2.8 ความเค้นเข้มข้น (stress concentrations)

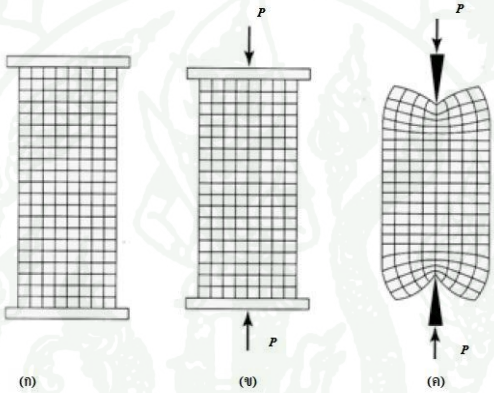
การคำนวณความเค้นตั้งฉากสมมติว่าความเค้นกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัด ซึ่งจะเป็นจริงก็ต่อเมื่อพื้นที่หน้าตัดของท่อนวัสดุสม่ำเสมอไม่มีการเปลี่ยนแปลงมิติใดๆและแรงภายนอกที่กระทำต่อวัสดุต้องกระจายสม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดด้วย

ในความเป็นจริงแรงภายนอก P ที่กระทำมักกระทำบริเวณพื้นที่เล็กๆเป็นแบบจุด (concentrated load) หรือขนาดของท่อนวัสดุเปลี่ยนไปเช่น มีการเจาะรูลดขนาด เซาะร่องหรือบากหรือตีเกลียวเป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนทำให้การกระจายของความเค้นบนหน้าตัดของวัสดุเปลี่ยนไปทั้งสิ้น คือมีการกระจุกตัวหรอการเพิ่มขึ้นของความเค้น (stress concentration or stress raisers) นั่นคือความเค้น ณ บริเวณเหล่านั้นจะสูงมาก เกินค่าเฉลี่ยปกติการวิเคราะห์การกระจายของความเค้นนี้ค่อนข้างสลับซับซ้อน แต่อาจหาได้จากการทดลองการพิจารณาท่อนวัสดุที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตลอดความยาวดังภาพที่ 5 (ก) ซึ่งมีแผ่นวัสดุปิดหัวท้าย เมื่อรับแรง P ที่ปลายทั้งสองข้าง จะหดตัวเท่ากันตลอดดังภาพที่ 5 (ข) ซึ่งหมายความว่าความเค้นกระจายสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของท่อนวัสดุ

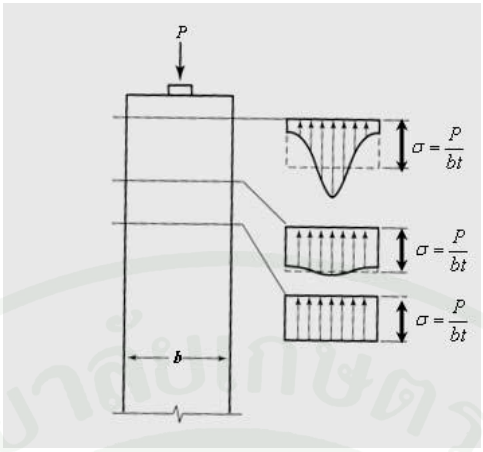
ถ้าท่อนวัสดุรับแรง P โดยไม่มีแผนวัสดุปิดหัวท้าย ณ บริเวณใกล้เคียงที่แรง P กระทำจะมีการหดตัวมากและหดตัวน้อยลงในบริเวณที่ห่างออกไปดังภาพที่ 5 (ค) นั่นคือแรงเค้น ณ ตำแหน่งที่แรงกระทำจะสูงเกินปกติหรือเรียกว่าเกินแรงเค้นเข้มข้น แต่การกระจายของแรงเค้นจะสม่ำเสมอ ณ หน้าตัดที่ห่างจากปลายที่แรงกระทำ (แรงปฏิกิริยา) ไม่น้อยกว่าความกว้างหรือเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนวัสดุตามหลักการ “Saint-Venant’s principle”



ภาพที่ 5 ความเค้นเข้มข้น

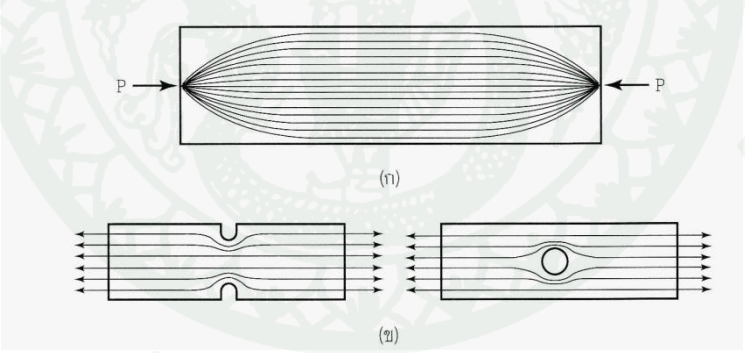
จากภาพที่ 6 แสดงความเค้นเข้มข้นใกล้สุดที่แรงกระทำ แผ่นวัสดุหนา t กว้าง b ที่รับแรง P จะมีการกระจุกตัวของความเค้นที่ใกล้ปลายวัสดุที่แรง P กระทำและที่หน้าตัดห่างจากปลายจะมีความเค้นเข้มข้นค่อนข้างสม่ำเสมอ ณ หน้าตัดที่อยู่ห่างจากปลายเป็นระยะมากกว่าความหนา b

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 การกระจุกตัวของความเค้นที่ใกล้จุดที่มีแรงมากระทำ

ความเค้นเข้มข้นอาจเปรียบเทียบกับการไหลกระจายของน้ำในท่อ แสดงความหนาแน่นของเส้นแรงดังภาพที่ 7 ซึ่งการกระจุกตัวหรือความหนาแน่นบริเวณใกล้จุดแรงกระทำหรือบริเวณที่หน้าตัดเล็กลงแต่การกระจายตัวจะสม่ำเสมอบนหน้าตัดที่ห่างจากตำแหน่งเหล่านี้



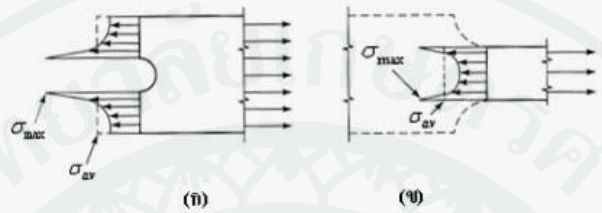
ภาพที่ 7 ความหนาแน่นของเส้นแรงความเค้น

เนื่องจากความเค้นเข้มข้นนี้เกิดเฉพาะแห่งคือบริเวณที่แรงกระทำหรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปทรงของหน้าตัดอย่างกะทันหันเท่านั้น ดังนั้นการคำนวณหาค่าการยืดหดของวัสดุทั้งท่อนจากสูตร $\delta = \frac{PL}{EA}$ โดยทั่วไป ค่าความเค้นตรงจุดที่มีการเปลี่ยนรูปร่าง เช่นที่ขอบรูหรือขอบนอกของแผ่นวัสดุ (ตรงส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า) จะมีค่าสูงสุดคือ $\sigma_{\max}$ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าความเค้นเฉลี่ย σ_{av} บนหน้าตัดดังภาพที่ อัตราส่วน K_t ของค่าทั้งสองเรียกว่า อัตราส่วนความเค้นเข้มข้น (stress concentration factor)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{av}} \tag{8}$$

เมื่อ $\sigma_{av} = \frac{P}{dt}$, t = ความหนาของแผ่นวัสดุ



ภาพที่ 8 ความเข้มข้นของความเค้นบริเวณรอบรูเจาะและจุดเปลี่ยนขนาด

จากภาพที่ 8 บริเวณที่เจาะรูและที่เปลี่ยนขนาดของหน้าตัด ถ้ารูเล็กมาก ค่า K_t อาจสูงถึง 3 แต่ถ้าขนาดของรู,r ใหญ่ขึ้นค่า K_t จะลดลง ในกรณีที่แผ่นวัสดุเปลี่ยนขนาดอาจลดการกระจุกตัวของความเค้นให้น้อยลง โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ละน้อยเป็นส่วนโค้งที่เรียกว่าขอบมนหรือ fillets สำหรับหน้าตัดของแผ่นวัสดุที่ห่างจากรูหรือจุดเปลี่ยนขนาดระยะเท่ากับหรือมากกว่าความกว้าง, D ของแผ่นวัสดุความเค้นเข้มข้นจะสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดตามหลักของ Saint-Venant's principle

ความเค้นเข้มข้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในกรณีของการรับแรงซ้ำซาก (repeated load) เพราะจะเกิดการล้า (fatigue) และรอยแตกร้าวจะเริ่มที่จุดที่มีความเค้นสูงสุด แล้วค่อยๆขยายไปยังส่วนอื่นๆของหน้าตัด สำหรับท่อนวัสดุรับแรงสถิตย์หรือแรงไม่เคลื่อนที่ (static load) ความเค้นเข้มข้นจะมีผลมากเฉพาะในวัสดุเปราะเท่านั้น ส่วนวัสดุเหนียวจะมีผลน้อยมาก

2.9 ทฤษฎีความล้า

ความล้าเป็นการวัดคุณสมบัติของวัสดุที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้วัสดุ ความล้าเป็นประเภทของการล้มเหลวของวัสดุประเภทโลหะและอโลหะ ความล้าเกิดเนื่องจากชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลรับภาระแบบวัฏจักร ทำให้เกิดความเค้นสลับกระทำซ้ำๆกันเป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบวัฏจักร และเป็นประเภทของความล้มเหลวของวัสดุที่พบบ่อยๆ เพราะความเค้นที่ทำให้วัสดุล้มเหลวในกรณีนี้มักจะมีค่าต่ำกว่าความเค้นสูงสุด

2.9.1 สาเหตุของความเสียหายที่เกิดจากการล้า

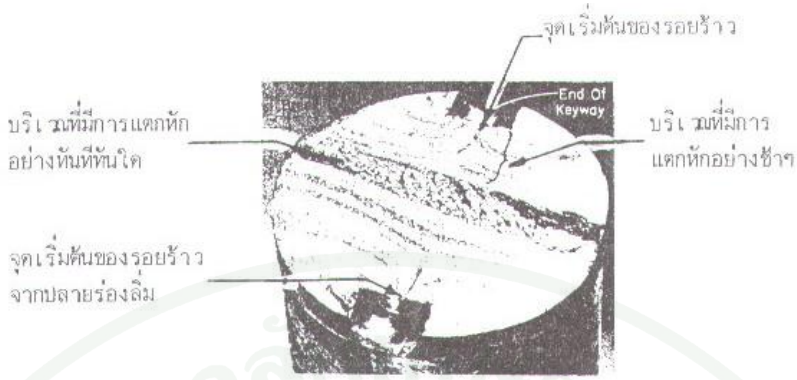
ความเสียหายจากการล้าจะเริ่มต้นจากมีรอยแตกเล็กๆ ซึ่งอาจไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าซึ่งรอยแตกนี้สามารถเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ในกระบวนการผลิตหรืออาจเกิดขึ้นหลังจากที่มีความเครียดสลับในบริเวณที่มีความเค้นหนาแน่น รอยแตกที่เกิดจากความล้า มักจะเริ่มต้นจากการแตกบริเวณที่มีรอยแตกหรือรอยบาก การเกิดความเสียหายจากการล้าแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การเกิดรอยแตก การขยายตัวของรอยแตกและการเกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด เนื่องจากความไม่เสถียรของการขนานตัวของรอยแตก ขั้นตอนแรกอาจจะอยู่ในช่วงสั้นๆ ขั้นตอนที่สองจะใช้เวลาเท่ากับอายุของชิ้นงาน และขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะเกิดขึ้นชั่วขณะเท่านั้น

-ขั้นตอนการเกิดรอยแตก กรณีที่ไม่มีรอยแตกใดเกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิต แต่ภายในเนื้อวัสดุมีชิ้นส่วนแปลกปลอมปะปนอยู่ทำให้วัสดุดังกล่าว เกิดความเค้นหนาแน่นและรอยบากนั้นอยู่ในตำแหน่งที่สำคัญของการแปรปรวนของความเค้นสลับครากตัว การครากตัวอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นหนาแน่นถึงแม้ว่าความเค้นที่ตำแหน่งดังกล่าวจะยังมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงครากของวัสดุก็ตาม

-ขั้นตอนการขยายตัวของรอยแตก เมื่อมีรอยแตกเล็กๆ เกิดขึ้นก็เป็นจุดเริ่มต้นของการแตกหัก และรอยแตกดังกล่าวจะมีค่าความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นจะสูงกว่าความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบริเวณที่มีรอยบาก เป็นการช่วยให้เกิดการขยายตัวของรอยแตกอย่างต่อเนื่อง

-ขั้นตอนการแตกหัก รอยแตกจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะที่เกิดความเค้นดึงจนกระทั่งถึงจุดๆหนึ่ง รอยแตกที่เกิดขึ้นโตพอที่จะทำให้ตัวประกอบของความเค้นเข้มข้นที่ปลายของรอยแตกมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับของความเหนียวของการแตกหักของวัสดุและทำให้เกิดการแตกหักอย่างทันทีทันใด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 9 รอยแตกหักที่เกิดจากการล้า

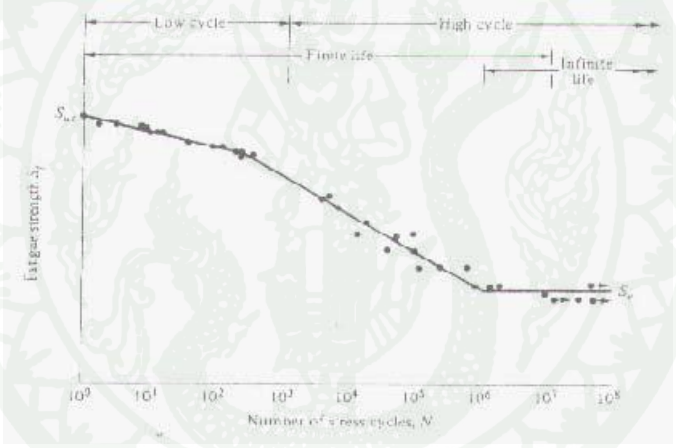
ที่มา : จำลอง (2534)

2.9.2 ความต้านทานการล้า (σ_f) และพิกัดการล้า (σ_n)

การหาความแข็งแรงของวัสดุภายใต้การกระทำของแรงที่ทำให้เกิดการล้า ชิ้นส่วนจะถูกกระทำด้วยแรงขนาดต่างๆซ้ำไปซ้ำมา ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากได้แก่ วิธีการของ Moore High-speed rotating beam machine ซึ่งจะเป็นการทำให้ชิ้นทดสอบอยู่ภายใต้สภาวะของการดัดเพียงอย่างเดียว โดยอาศัยการกระทำของแรงในแนวรัศมี ซึ่งในการทดลองของ Moore จะใช้ก้อนน้ำหนักถ่วงเข้าไป และสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของก้อนน้ำหนักได้ เพื่อเปลี่ยนขนาดของโมเมนต์กระทำบนชิ้นทดสอบ ชิ้นทดสอบที่มีขนาดมาตรฐานและผิวเกลี้ยง มีการขัดมันอย่างดี สำหรับการทดสอบโดยการหมุนเราจะต้องประยุกต์ภาระเข้าไปอย่างคงที่เพื่อให้เกิดการดัดตัว หลังจากนั้นจะต้องทำการบันทึกข้อมูลจำนวนรอบของการหมุนที่ทำให้เกิดการล้า แล้วนำผลที่ได้ไปกำหนดจุดลงบน แผนภาพ S-N ซึ่งอาจจะใช้กราฟ log-log หรือ semi-log ก็ได้ดังแสดงในภาพที่ 11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 10 อุปกรณ์ทดสอบความล้า



ภาพที่ 11 กราฟความเค้นสลับ-จำนวนรอบ (S-N curve)

ที่มา : จำลอง (2534)

กราฟ S-N เป็นกราฟที่แสดงอายุการใช้งานเป็น N รอบและค่าความเค้นสลับ σ_f ที่เกิดจากโมเมนต์ดัดคงที่ในชิ้นทดสอบมาตรฐานของ Moore ค่าความเค้นสลับนี้คือ ค่าความต้านทานการล้า (fatigue strength) หรือความทนทานการล้า (endurance strength) ซึ่งเขียนแทนด้วย σ_f หรือ S_f ในแผนภาพ S-N จะมีจุดหักงอของเส้นกราฟเกิดขึ้นซึ่งหลังจากเส้นกราฟหักงอแล้วก็จะเบี่ยงเบนอยู่ในระดับเสมอ ถ้าจำนวนรอบของการทำงานอยู่เลยจุดหักงอนี้ไปแล้วชิ้นส่วนจะไม่เกิดความเสียหาย ไม่ว่าอายุของการล้าจะเพิ่มมากขึ้นเท่าไหร่ก็ตาม ความเค้นที่บริเวณจุดหักงอนี้เรียกว่า “จุดพิกัดความล้า (fatigue limit, σ_n) หรือจุดพิกัดความทนทาน (endurance limit, S_e)”

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การจำแนกชนิดของการล้าจะพิจารณาจากจำนวนรอบของความเค้นเป็นเกณฑ์ เช่น ถ้า N = 1 ถึง N = 1000 รอบ จัดให้เป็นการล้าที่รอบต่ำ (low-cycle fatigue) ถ้า N > 1000 รอบ จะจัดให้เป็นการล้าที่รอบสูง (high-cycle fatigue)

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกการล้าออกได้เป็นส่วนของอายุที่จำกัด (finite life region) กับส่วนของอายุที่ไม่จำกัด (infinite life region) ดังภาพที่ 11

จุดพิกัดความทนทานการทดสอบเพื่อทดสอบหาความแข็งแรงของการล้าของวัสดุดังได้กล่าวมาแล้ว พบว่าเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาค่อนข้างนานในการทดสอบ ดังนั้นในการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนมีความจำเป็นที่จะต้องทราบค่าจุดพิกัดความทนทานเร็วที่สุด ซึ่งจากผลการทดสอบเหล็กกล้าที่มีค่าความแข็งแรงดึงเป็น 200 ksi จะเห็นได้ว่าค่าจุดพิกัดความทนทานจะมีค่าประมาณ 40%-60% ของค่าความเค้นสูงสุด ความสัมพันธ์ของสมการนี้จะใช้สำหรับประยุกต์เพื่อประมาณหาค่าจุดพิกัดการล้าของวิธีทดสอบเหล็กกล้าตามการสรุปของ Mischke ได้ดังนี้

$$\sigma_n' = \begin{cases} 0.504\sigma_{ut} & \text{เมื่อ } \sigma_{ut} \le 1400MPa \\ 700MPa & \sigma_{ut} > 1400MPa \end{cases} \quad (9)$$

แต่ในการใช้งานจริง การใช้งานของวัสดุนั้นๆในสภาพที่แตกต่างกันจะทำให้ค่าพิกัดการล้าที่แท้จริงไม่ใช่ค่าที่ได้จากการทดสอบโดยตรง มีการปรับค่าให้เข้ากับสภาพการใช้งานจริง

2.9.3 ค่าพิกัดการล้าของชิ้นงานจริง σ_n

ค่าพิกัดการล้าของชิ้นงานจริง ที่ใช้ในการออกแบบ สามารถหาได้จาก

$$\sigma_n = k_a k_b k_c k_d k_e k_f \sigma_n' \quad (10)$$

เมื่อ σ_n คือ พิกัดความล้าของชิ้นงานจริง

σ_n' คือ พิกัดความล้าของชิ้นงานทดสอบ

k_a คือ แฟคเตอร์แก้ผิว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

k_b คือ แฟคเตอร์แก้ขนาด

k_c คือ แฟคเตอร์แก้ระดับความเชื่อมั่น

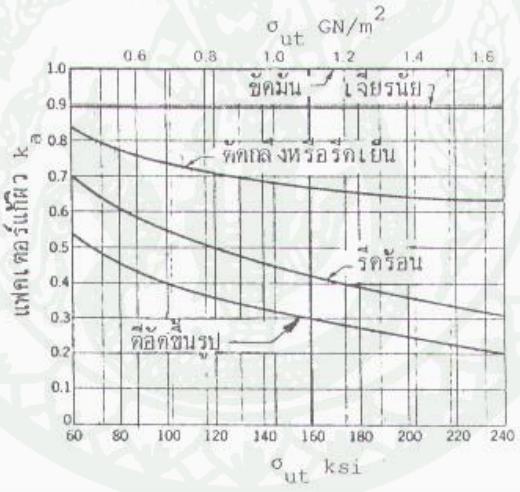
k_d คือ แฟคเตอร์แก้อุณหภูมิใช้งาน

k_e คือ แฟคเตอร์แก้ความเค้นหนาแน่น

k_f คือ แฟคเตอร์แก้ค่าอิทธิพลต่างๆ

2.9.3.1 แฟคเตอร์แก้ผิว (k_a)

เมื่อกำหนดให้ผิวขัดมันของชิ้นงานทดสอบหมุนดัดตามมาตรฐานของ Moore ซึ่งมีแรงกระทำแบบกะทำซ้ำไปซ้ำมา มีค่า k_a =1 ส่วนลักษณะที่ต่างออกไปค่า k_a <1 ซึ่งสามารถหาได้จากภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แฟคเตอร์แก้ผิวสำหรับเหล็กกล้า

ที่มา : จำลอง (2534)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.9.3.2 แฟคเตอร์แก้ขนาด (k_b)

ค่าพิกัดการล้าที่ได้มาจากชิ้นทดสอบมาตรฐาน ถ้าชิ้นงานที่แตกต่างออกไปจากขนาดของชิ้นงานทดสอบ ค่าพิกัดการล้าก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยซึ่งใช้ k_b ในการปรับค่าซึ่งหาได้จาก

กรณีโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิด

ชิ้นทดลองที่รับโมเมนต์ดัดและโมเมนต์บิดสองทิศทาง มีขนาดแตกต่างจากชิ้นทดสอบมาตรฐาน สามารถหาค่า k_b ได้จาก

$$k_b = \begin{cases} 0.869d^{-0.097} & 0.3in < d < 10in \\ 1 \quad \text{เมื่อ} & d < 0.3in \\ 1.189d^{-0.097} & 8mm < d < 250mm \end{cases} \tag{11}$$

2.9.3.3 แฟคเตอร์แก้ระดับความเชื่อมั่น (k_c)

ที่ระดับความเชื่อมั่น 50% หมายถึงค่าเฉลี่ย กำหนดให้ระดับความเชื่อมั่น $k_c = 1$ ที่ระดับความเชื่อมั่นสูงกว่า 50% หาได้จาก

$$k_c = 1 - 0.08Z_r \tag{12}$$

เมื่อ Z_r คือ standardized variable สามารถหาได้จาก ตารางที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 แฟคเตอร์แก้ระดับความเชื่อมั่น

Reliability, R	Standardized variable, Z_r	Reliability factor, k_c
0.5	0	1.000
0.90	1.288	0.897
0.95	1.645	0.868
0.99	2.326	0.814
0.999	3.091	0.753
0.999 9	3.719	0.702
0.999 99	4.263	0.659
0.999 999	4.753	0.620

ที่มา : จำลอง (2534)

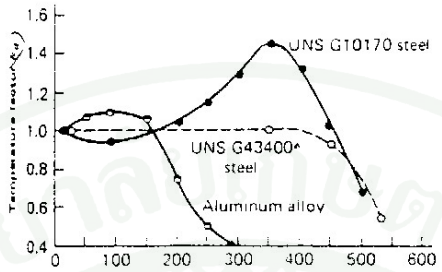
2.9.3.4 แฟคเตอร์แก้อุณหภูมิใช้งาน (k_d)

ชิ้นงานรับภาระที่อุณหภูมิสูง ค่าพิกัดการล้าของโลหะก็จะเปลี่ยนไป และมีอิทธิพลต่อการคืบตัวของโลหะอีกด้วย ค่า k_d ของเหล็กเหนียวสามารถหาได้จาก

$$k_d = \begin{cases} 1 & T < 450^oC(840^oF) \\ 1-5.8\times10^{-3} & \text{เมื่อ} \quad 450^oC < T < 550^oC \\ 1-3.2\times10^{-3} & 840^oF < T < 1020^oF \end{cases} \qquad (13)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ค่า k_d ที่ได้จากการทดลองแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แฟคเตอร์แก้อุณหภูมิ

ที่มา : จำลอง (2534)

2.9.3.5 แฟคเตอร์แก้ความเค้นหนาแน่น (k_e)

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดเช่น บริเวณร่องลิ่ม, รู, การลดขนาดของเพลาหรือมีรอยตำหนิ เมื่อชิ้นส่วนเครื่องจักรเหล่านี้รับภาระทั้งแบบภาระในแนวแกน โมเมนต์ดัดหรือโมเมนต์บิด ที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีความเค้นสูงกว่าปกติที่ได้ในทฤษฎี ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\sigma_{\max} = k_t \sigma_0 \text{ (ความเค้นดึง)} \tag{14}$$

$$\sigma_{\max} = k_{ts} \tau_0 \text{ (ความเค้นเฉือน)} \tag{15}$$

เมื่อ k_t และ k_{ts} เป็นค่าความเค้นหนาแน่น ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงาน, รอยตำหนิ และชนิดของภาระ

σ_0 และ τ_0 เป็นค่าความเค้นระบุ หรือค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี สำหรับค่าความเค้นหนาแน่นจากการล้าแทนด้วย k_f ดังนั้น

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \tag{16}$$

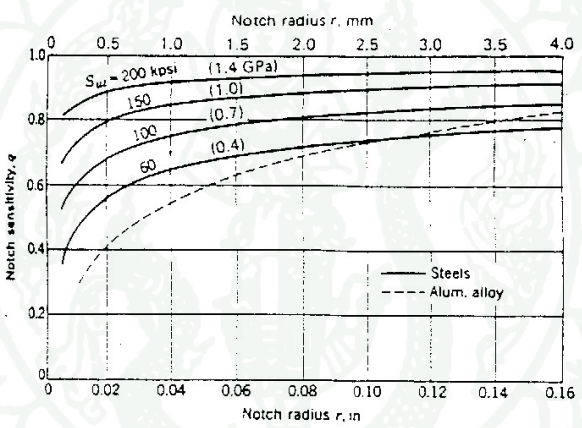
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ

k_f คือ แฟคเตอร์ลดความต้านทานการล้า หรือแฟคเตอร์ลดค่าพิกัดการล้า หรือค่าความเค้นหนาแน่นเนื่องจากการล้า

q คือ ค่าความไวของรอยเจาะ (notch sensitivity) เป็นตัวเลขที่บอกถึงอิทธิพลของรอยตำหนิที่มีผลต่อความเค้นหนาแน่น

สำหรับวัสดุเปราะเช่น เหล็กหล่อทุกชนิด ใช้ค่า $q = 0.2$ ในการออกแบบ แต่สำหรับเหล็กกล้าและอลูมิเนียมผสมที่รับภาระในแนวแกน หรือดัดกลับไปกลับมา หาค่า q ได้จากภาพที่ 14

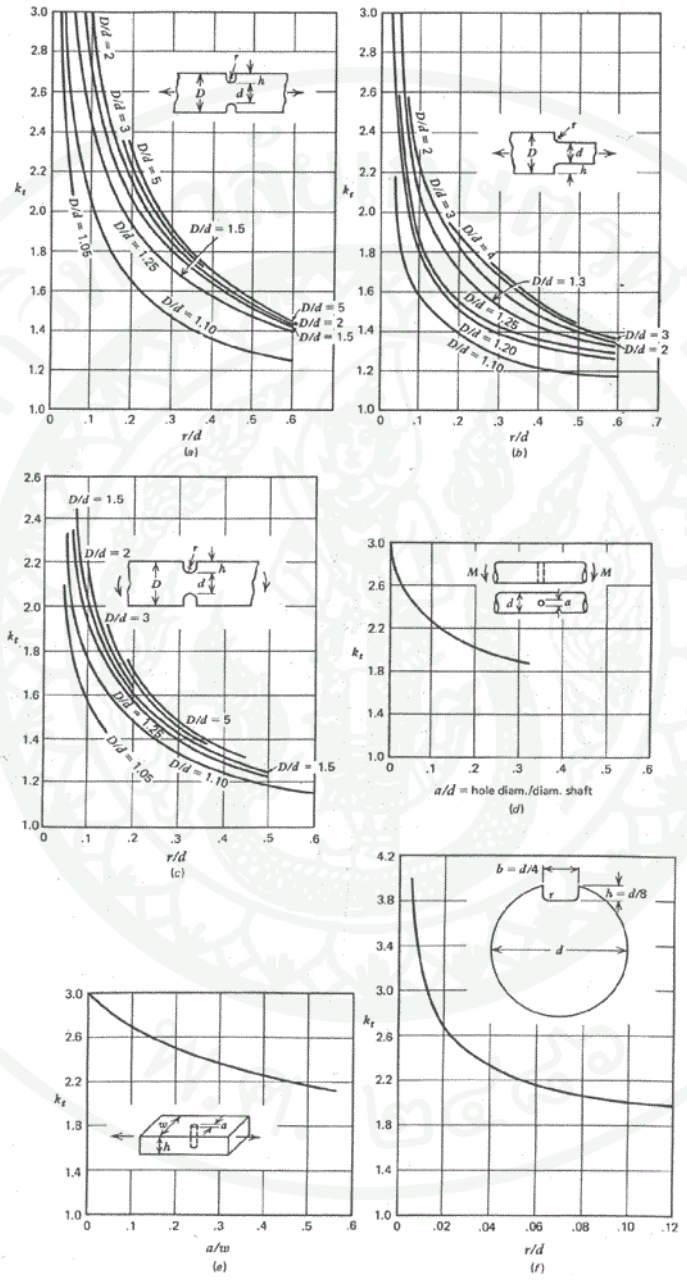


ภาพที่ 14 ค่า q สำหรับเหล็กกล้าและอลูมิเนียมผสมที่รับภาระในแนวแกนและโมเมนต์แบบวัฏจักร

ที่มา : จำลอง (2534)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับค่า k_t และ k_{ts} นั่นขึ้นอยู่กับลักษณะการเปลี่ยนแปลงขนาดชิ้นงานและประเภทของภาระ ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ค่า k_t และ k_{ts} ที่ภาระโหลดต่างๆ

ที่มา : จำลอง (2534)

ดังนั้นค่าแฟคเตอร์แก้ความเค้นหนาแน่น k_e หาได้จากสมการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$k_e = \frac{1}{k_f} \text{ สำหรับความเค้นดึงหรือกด} \quad (17)$$

$$k_e = \frac{1}{k_{fs}} \text{ สำหรับความเค้นเฉือน} \quad (18)$$

2.9.3.6 แฟคเตอร์แก้อิทธิพลอื่นๆ (k_f)

อิทธิพลจากตัวแปรอื่นๆอาจจะทำให้พิกัดการล้าเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งได้ประมาณไว้ตามอิทธิพลต่างๆดังแสดงต่อไปนี้

ตารางที่ 2 อิทธิพลอื่นๆที่มีผลต่อพิกัดการล้า

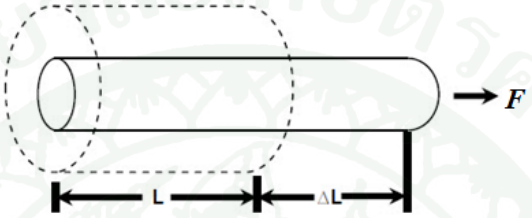
อิทธิพลต่างๆ	ค่า k_f (โดยประมาณ)
ก. ความเค้นตกค้างเนื่องจากการรีดเย็นและตีอัดขึ้นรูป	$k_f > 1$
การทำ short peening หรือ surface rolling	$k_f < 1.25$
ข. การกัดกร่อนเนื่องจากการเสียดสี หรือขูดกันระหว่างผิวของชิ้นงาน	$k_f < 1$
ค. การเคลือบผิวโลหะโดยใช้ไฟฟ้าเช่น การเคลือบ Ni, Pt หรือ Cd	$k_f = 0.25$
ง. การฉีดพ่นโลหะเคลือบผิว (เป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยร้าว)	$k_f = 0.86$
จ. การกัดกร่อนระหว่างหน้าสัมผัส (frettage corrosion) ของคู่ชิ้นงานดังต่อไปนี้ ข้อต่อสลักเกลียว หน้าสัมผัสระหว่างแบริ่ง ดุมและล้อ	$k_f = 0.24\text{-}0.9$

ที่มา : จำลอง (2534)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.10 สเตรนเกจ (strain gage)

สเตรนเกจเป็นตัวแปลงความเฉื่อยงาน (passive transducer) ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในลวดเพื่อการตรวจวัดความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวด สเตรนเกจมีการนำไปตรวจจับและใช้งานได้อย่างกว้างขวาง



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการดึง

การทำงานของสเตรนเกจดังภาพที่ 16 แสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการดึงเมื่อสเตรนเกจ ถูกดึงให้ยืดออกตามความยาว (L) ของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้นในขณะพื้นที่หน้าตัด (A) จะลดลงทำให้ค่าความต้านทานของเส้นลวดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความต้านทานของโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงกับความยาวและแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด

$$R = \rho \frac{L}{A} \tag{19}$$

เมื่อ R คือค่าความต้านทานของสเตรนเกจ

L คือความยาวของเส้นลวด

A คือพื้นที่หน้าตัด

ρ คือค่าความต้านทานจำเพาะของตัวนำโลหะ

จากนั้นเพื่อให้ง่ายกับความเข้าใจจึงเปลี่ยน Δ เป็น d จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\Delta R \cong dR = d\left(\rho \frac{L}{A}\right) \tag{20}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\ln(R) = \ln(\rho) + \ln(L) - \ln(A) \tag{21}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \tag{22}$$

เขียนให้อยู่ในรูปสมการทั่วไปจะได้

$$A = CD^2 \tag{23}$$

$$\frac{dA}{A} = 2\frac{dD}{D} \tag{24}$$

เมื่อ D คือมิติตัดขวาง

C คือค่าคงที่เช่น เมื่อ D คือรัศมีของวงกลม $C = \pi$ เป็นต้น

จากสมการจะได้ความเครียดตามแนวแกน (longitudinal strain, ε) และความเครียดตามขวาง (lateral strain, ε_D) ดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} \text{ และ } \varepsilon_D = \frac{dD}{D} \tag{25}$$

โดยได้สมการพฤติกรรมการยืดหยุ่นในทุกแนวแกนเป็น

$$\varepsilon_D = -\nu\varepsilon \tag{26}$$

ผลลัพธ์ของสมการจะได้

$$\frac{dA}{A} = 2\varepsilon_D = -2\nu\varepsilon = -2\nu\frac{dL}{L} \tag{27}$$

โดยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่อหน่วย ($\Delta R/R$) เขียนเป็นสมการดังนี้

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\nu)\varepsilon \tag{28}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

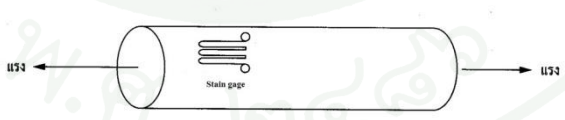
การใช้สเตรนเกจในการวัดค่าความเครียดของวัตถุนั้นจะต้องพิจารณาถึงปริมาณทางกายภาพของสองสิ่งคือค่าความต้านทานของเกจ (gage resistance) ที่เปลี่ยนแปลงและค่าความยาวที่เปลี่ยนนี้มีความสัมพันธ์ของสองตัวแปรแสดงในรูปของอัตราส่วนที่เรียกว่า “เกจแฟคเตอร์” (gage factor) ดังสมการต่อไปนี้

$$GF = \frac{dR / R}{\varepsilon} \tag{29}$$

สเตรนเกจแบ่งตามโครงสร้างได้ 2 แบบคือ

1. สเตรนเกจชนิดโลหะทำจากวัสดุที่เป็นเส้นลวดต้านทานบางๆขนาดเล็ก หรือทำมาจากฟอยล์โลหะ (metal foil) บางๆมาตัดเป็นรูปซิกแซกคล้ายกับเส้นลวดของสเตรนเกจ
2. สเตรนเกจชนิดสารกึ่งตัวนำเป็นสเตรนเกจที่ทำมาจากผลึกซิลิกอนที่มีเกจเฟคเตอร์สูงประมาณ 50-200 สเตรนเกจชนิดนี้จะมีความไวสูงมากประมาณ 10 เท่าของสเตรนเกจแบบเส้นลวดแต่มีความเป็นเชิงเส้นต่ำมาก

จากรูปทิศทางของการทำงานจะตามความยาวของตัวสเตรนเกจ เมื่อมีแรงมากระทำจากนั้นค่าความต้านทานของสเตรนเกจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและส่งค่าที่ได้ไปยังวงจรอิเล็คทรอนิกส์ ในการติดตั้งสเตรนเกจนั้นต้องดูทิศทางที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางการทำงานของสเตรนเกจดังภาพที่ 17



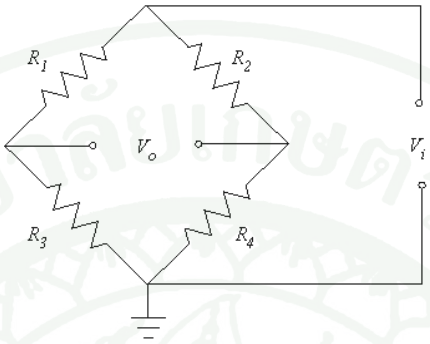
ภาพที่ 17 การติดตั้งชุดสเตรนเกจ

การเลือกใช้งานสเตรนเกจนั้นขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานที่ต้องการใช้งาน ปกตินั้นค่าความต้านทานของสเตรนเกจ เมื่อไม่มีแรงกระทำจะมีค่าความต้านทานอยู่ที่ 120โอห์มหรือ 350 โอห์ม

2.11 วงจรวัดความหนืดของระบบไฟฟ้า (wheatstone bridge)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

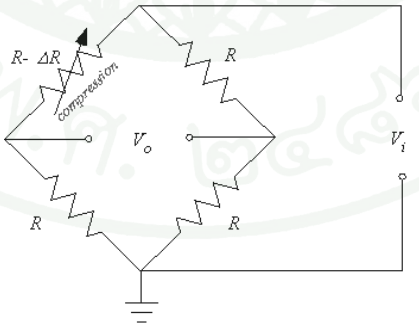
วงจรนี้เป็นวงจรที่มีความแม่นยำซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเล็กน้อยก็สามารถทำการวัดค่าได้หรือเรียกกันว่า วงจรวัดความหนืดของระบบไฟฟ้า (wheatstone bridge) ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 วงจรวัดความหนืดของระบบไฟฟ้า (wheatstone bridge)

ในหลักการทำงานถ้าค่าความต้านทานทั้ง 4 ตัวนั้นมีค่าเท่ากันคือ $R_1=R_2=R_3=R_4$ นั้นแสดงว่าวงจรนี้อยู่สภาวะสมดุลหรือเรียกว่า สมดุล โดยทั่วไปแล้วค่าแรงดันขาออกจะเป็นศูนย์ ในการออกแบบนั้นประกอบด้วยวงจร wheatstone bridge 3 แบบคือ

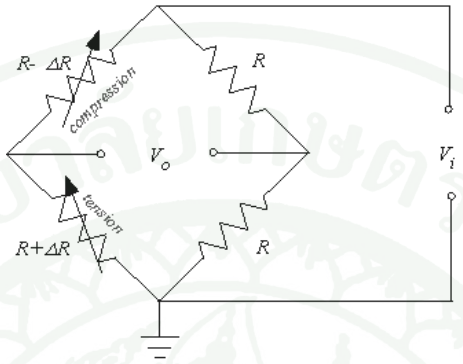
วงจรควอเตอร์บริดจ์ (quarter bridge circuit) คือวงจรที่มีค่าความต้านทานสามารถเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเพียงตัวเดียว



ภาพที่ 19 วงจรควอเตอร์บริดจ์

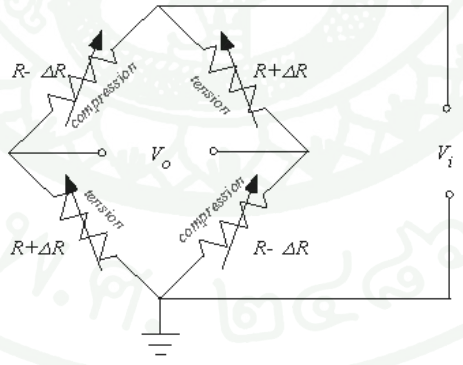
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วงจรฮาล์ฟบริดจ์ (half bridge) คือวงจรที่มีค่าความต้านทานที่สามารถปรับค่าทั้งหมด 2ตัว ส่วนใหญ่ใช้ในการวิเคราะห์คาน (beam) ซึ่งติดตัวตรวจจับด้านบนและด้านล่าง โดยค่าความไวในการเปลี่ยนแปลงของวงจรนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวงจรด้วย



ภาพที่ 20 วงจรฮาล์ฟบริดจ์

วงจรฟลูบริดจ์ (full bridge) คือวงจรที่มีค่าความต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ทั้งหมด 4 ตัว วงจรนี้เหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการตรวจวัดด้วยความเร็วสูงและความไวในการตรวจจับมาก



ภาพที่ 21 วงจรฟลูบริดจ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.12 ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณของปัญหา โดยแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาที่จะใช้ในการคำนวณออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (element) เอลิเมนต์เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณหาค่าตัวแปรตาม (dependent variables) ที่ต้องการ

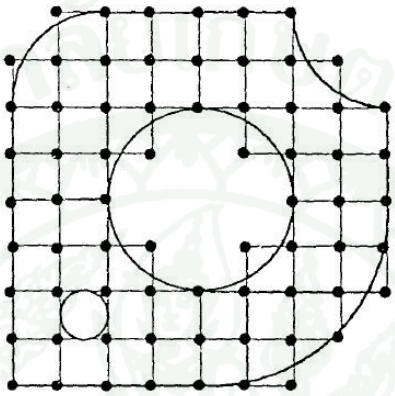
เพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อแตกต่างระหว่างวิธีการผลต่างสืบเนื่องและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถพิจารณาภาพที่ 22 แสดงลักษณะของแผ่นโลหะอลูมิเนียมลักษณะหนึ่งที่เสริมความแข็งของโครงสร้าง แผ่นโลหะดังกล่าวประกอบด้วยขอบรอบนอกที่ประกอบด้วยขอบตรงและขอบโค้ง โดยภายในมีรูกลม 2 ขนาดในตำแหน่งที่ต่างกัน การวิเคราะห์การกระจายของความเค้น (stress distribution) บนแผ่นอลูมิเนียมนี้ภายใต้แรงกระทำที่กำหนดให้โดยใช้วิธีการผลต่างสืบเนื่องจะเริ่มจากการแบ่งแผ่นอลูมิเนียมนี้ออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 23 โดยที่ตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่างๆและขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่ทราบค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง

ภาพที่ 22 แผ่นอลูมิเนียมที่ประกอบด้วยขอบตรงและขอบโค้งโดยภายในมีรูกลม 2 ขนาด

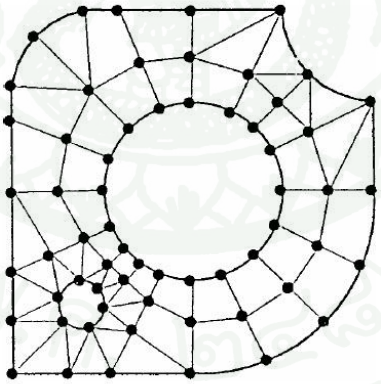
จากภาพที่ 23 แสดงให้เห็นว่าตารางสี่เหลี่ยมที่ใช้ในวิธีผลต่างสืบเนื่องไม่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงของแผ่นอลูมิเนียมดังกล่าวได้โดยเที่ยงตรงหากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นก็จะสามารถจำลองรูปร่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนของสมการผลต่างสืบเนื่องมากขึ้นด้วยและกระบวนการในการแก้ปัญหาจำต้องการหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นรวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงขึ้นมากตามไปด้วย



ภาพที่ 23 การวิเคราะห์แผ่นอลูมิเนียมด้วยวิธีการผลต่างสืบเนื่อง



ภาพที่ 24 การวิเคราะห์แผ่นอลูมิเนียมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) หรือที่เรียกกันว่า FEM วิธีการนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนใดก็ได้โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรง หลักการของวิธีการนี้ในขั้นต้นคล้ายกับวิธีผลต่างสืบเนื่องกล่าวคือ เริ่มจาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ต่างๆเหล่านี้อาจอยู่ในรูปร่างลักษณะของสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ดังภาพที่ 24
ขั้นตอนโดยทั่วไปของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

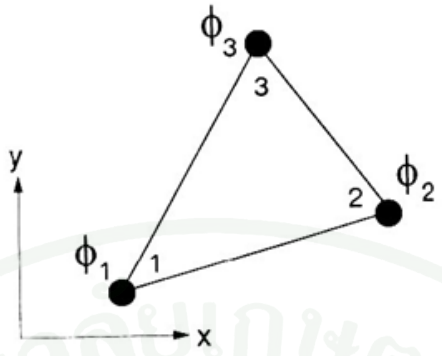
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 6 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาผลลัพธ์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆดังภาพที่ 25 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆกันเช่น ปัญหาการยืดหดตัว (elasticity problem), ปัญหาทางด้านอุณหภูมิ (thermal problem) และปัญหาทางด้านของไหล (fluid problem) เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชั่นประมาณภายในเอลิเมนต์ เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังภาพที่ 26 เอลิเมนต์ดังกล่าวมีจุดต่อ 3 จุด ที่มีหมายเลข 1, 2, 3 ดังภาพที่ 26 โดยจุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่ทราบค่า ซึ่งตัวไม่ทราบค่าที่จุดเหล่านี้อาจเป็นค่าการยืดตัวหรือหดตัว หากเราทำปัญหายืดหยุ่นในของแข็ง

ภาพที่ 25 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 26 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบไปด้วย 3 จุดต่อ โดยมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ ณ ตำแหน่งจุดต่อ

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ เช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมดังภาพที่ 26

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \tag{30}$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]\{\phi\} = \{F\} \tag{31}$$

โดย $[K]$ คือเอลิเมนต์เมตริกซ์ความแข็งแกร่ง (element stiffness matrix)

$\{\phi\}$ คือเวกเตอร์ซึ่งประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่างๆของเอลิเมนต์

$\{F\}$ คือโหลดเวกเตอร์ของเอลิเมนต์

ถ้า $N_i(x,y)$ โดยที่ $i = 1, 2, 3$ คือฟังก์ชั่นภายในเอลิเมนต์ ดังนั้นสมการของ $\phi(x,y)$ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\phi(x,y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \tag{32}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดย $[N]$ คือเมตริกซ์ของฟังก์ชั่นประมาณการภายในเอลิเมนต์

$\{\phi\}$ คือเวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 4 นี้ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ 2 ตัวแปร สามารถทำได้โดย

การหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate method) แบ่งออกเป็น 3 วิธีการคือ

1. วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณโดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite different method) เป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อใช้ในการหาผลเฉลี่ยโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดมาให้ หลักการของวิธีนี้คือการแทนตัวอนุพันธ์ที่ปรากฏอยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยสมการพีชคณิตโดยประมาณซึ่งจะอยู่ในรูปตัวแปรตาม ณ จุดต่อต่างๆในขอบเขตของรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น

2. วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณโดยวิธีแปรผกผันสามารถทำได้ 2 วิธี

2.1. การใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายปัญหานั้น (governing differential equation) ร่วมกันกับการใช้เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ที่เหมาะสมกับปัญหานั้น

2.2. การใช้สูตรแปรผัน (variation formulation) การการใช้สูตรแปรผันคือการหาหรือสร้างฟังก์ชั่นนั้นแล้วจะเป็นผลให้เกิดสมการอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่เราทำการแก้อยู่นั้นดังตัวอย่างเช่น

$$D\frac{d^2y}{dx^2}+Q=0 \tag{33}$$

โดยที่ $y=y(x)$ และมีเงื่อนไขขอบเขต $y(0)=y_0$ และ $y(H)=y_H$ ซึ่งมีความสมมูล (equivalence) เช่นเดียวกันหากทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชั่น

$$\Pi=\int_0^H\left[\frac{D}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2-Qy\right]dx=0 \tag{34}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. วิธีการหาผลเฉลยโดยวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง จะมีรูปแบบอยู่รูปของสมการอินทิกรัล หลักการที่สำคัญในวิธีนี้คือ การสมมติผลเฉลยแล้วแทนค่าลงในสมการอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายปัญหานั้นๆ จากการดำเนินการด้วยวิธีดังกล่าวจะเกิดค่าของเศษตกค้างหรือค่าผิดพลาด (residual or error) เกิดขึ้นดังเช่นสมมติฐานผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายปัญหาสมการ (33) มีรูปแบบฟังก์ชั่น $y = h(x)$ เมื่อแทนผลเฉลยลงในสมการ (33) จะได้

$$D\frac{d^2h(x)}{dx^2} + Q = R(x) \neq 0 \tag{35}$$

แต่เนื่องจากผลเฉลย y=h(x) ไม่ใช่ผลเฉลยแม่นตรงของสมการ (33) ดังนั้น $R(x)$ คือฟังก์ชั่นตกค้างหรือค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นดังนั้นเพื่อให้ได้ผลเฉลยโดยประมาณที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นตรงมากที่สุดจึงจำเป็นต้องหาการถ่วงเศษตกค้างที่ได้จากสมการ (36) ให้มีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุดหรืออาจเขียนให้อยู่ในรูปอินทิกรัลได้ดังนี้

$$\int_0^H W_i(x)R(x)dx = 0 \tag{36}$$

โดย $W_i(x)$ เป็นฟังก์ชั่นถ่วงน้ำหนัก

วิธีการกำหนดฟังก์ชั่นถ่วงน้ำหนักมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีการที่นิยมใช้กันมีดังต่อไปนี้

3.1. วิธีการจัดตำแหน่งจุด (collocation method) คือกำหนดให้ค่าเศษตกค้างเท่ากับศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆภายในโดเมนของปัญหานั้นโดยจะใช้ฟังก์ชั่นการถ่วงน้ำหนัก $W_i(x) = \delta(x - X_i)$ จำนวนจุดตำแหน่งที่พิจารณานั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้ค่าในสมการผลเฉลยที่สมมติขึ้นมา

3.2. วิธีการจัดโดเมนย่อย (sub domain method) ทำได้โดยแบ่งโดเมนทั้งหมดออกเป็นส่วนย่อยๆแล้วกำหนดให้ผลการอินทิเกรดของฟังก์ชั่นเศษตกค้างสมการ (36) ของแต่ละโดเมนย่อยนั้นเท่ากับศูนย์โดยฟังก์ชั่นการถ่วงน้ำหนัก $W_i(x) = 1$ จำนวนของโดเมนย่อยที่จะใช้ในการพิจารณานั้นขึ้นอยู่กับจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้ค่าในสมการผลเฉลยที่สมมติขึ้นมา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.3. วิธีการกาเลอร์คิน (Galerkin's method) จะใช้หลักการตามวิธีการเช่นเดียวกับการถ่วงเศษตกค้างในสมการ (36) โดยฟังก์ชั่นการถ่วงน้ำหนักเท่ากับ $W_i(x)$ และจะทำการพิจารณาการถ่วงน้ำหนักในสมการ (36) ให้เท่ากับศูนย์ทั่วทั้งโดเมนของปัญหานั้น

3.4. วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) ทำได้โดยการยกกำลังสองของฟังก์ชั่นตกค้าง $R(x)$ แล้วทำการอินทิเกรดตลอดทั่วทั้งโดเมนของปัญหานั้น ซึ่งจะมีรูปแบบของสมการอินทิกรัลเป็น

$$Er = \int_0^H \left[R(x) \right]^2 dx = 0 \tag{37}$$

โดย Er จะเป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นของผลเฉลยโดยประมาณ ดังนั้นหากทำการหาค่าต่ำสุด (minimization) ของ Er ในสมการ (37) โดยเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าในสมการผลเฉลยที่สมมติขึ้นมา ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าผลเฉลยแม่นตรงของปัญหานั้นๆ

ขั้นตอนที่ 5 การนำสมการที่ได้มาประกอบกันได้ระบบสมการพร้อมกัน (system of simulataneous equation)

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อมาได้แล้วก็สามารถคำนวณหาค่าอื่นๆได้เช่น เมื่อรู้ค่าการเคลื่อนที่ตำแหน่งต่างๆของโครงสร้างก็นำไปหาค่าความเครียดและความเค้นได้ เมื่อรู้อุณหภูมิก็สามารถหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นได้ ทั้ง 6 ขั้นตอนจะเห็นว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีขั้นตอนโดยหัวใจสำคัญคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.13 การคำนวณความล้าในโปรแกรม MSC. Fatigue

โปรแกรม MSC. Fatigue ใช้สมการ strain-life relation ของ Marrow, J. (1968) และสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น $\Delta\sigma$ กับความเครียด $\Delta\varepsilon$ ในการคำนวณอายุการใช้งาน N_f

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}\left(2N_f\right)^b + \varepsilon'_f\left(2N_f\right)^c \tag{38}$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{K'}\right)^{1/n'} \tag{39}$$

เมื่อ

$\frac{\Delta\varepsilon}{2}$ คือ total strain amplitude

$\Delta\sigma$ คือ 2×stress amplitude

N_f คือ number of cycles to failure

σ'_f คือ fatigue strength coefficient

b คือ fatigue strength exponent

ε'_f คือ fatigue ductility coefficient

c คือ fatigue ductility exponent

K' คือ cyclic strain-hardening exponent

n' คือ cyclic strength coefficient

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์
2. เครื่องพิมพ์
3. โปรแกรม MSC. Patran และ Nastran version 2005
4. Strain gage ของบริษัท Tokyo Sokki kenkyojo รุ่น: FLA-5-11-1L มี G.F. = 2.11 ± 1% และ gage resistance = 119.8 ± 0.5 Ω
5. Data Locker ยี่ห้อ National Instruments รุ่น: WLS-9163

วิธีการ

1. การศึกษาการกระจายตัวของความเค้นรอบช่องเจาะลักษณะต่างๆ

ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองของโหลดเซลล์ที่มีช่องเจาะลักษณะต่างๆ ด้วยโปรแกรมไฟไนเอลิเมนต์ เพื่อหาค่า K คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ผิว (σ_{max}) กับความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเมื่อไม่มีช่องเจาะ (σ_n) เพื่อหาลักษณะของช่องเจาะที่ให้ค่า K สูงสุดโดยแบบจำลอง ถูกโมเมนต์ดัดขนาด 1 N·mm กระทำที่ปลายทั้ง 2 ข้าง

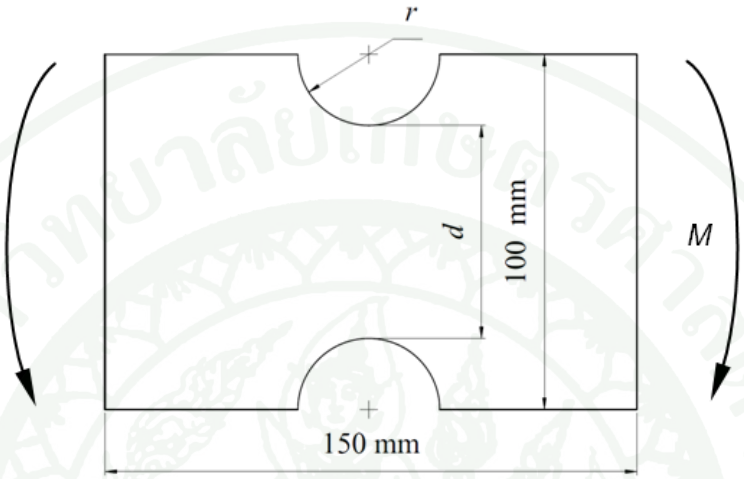
ผู้วิจัยใช้เอลิเมนต์สองมิติ 4 จุดต่อ แบบ plane stress ทำการเกลี่ยเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กรอบรูเจาะและใหญ่ขึ้นเมื่อไกลจากรูเจาะ เพื่อให้มีความแม่นยำและลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ลงคุณสมบัติทางกลของแบบจำลอง กำหนดให้เป็นแบบ isotropic มี $E = 200\times10^3$ MPa และ $\nu = 0.3$

1.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 1

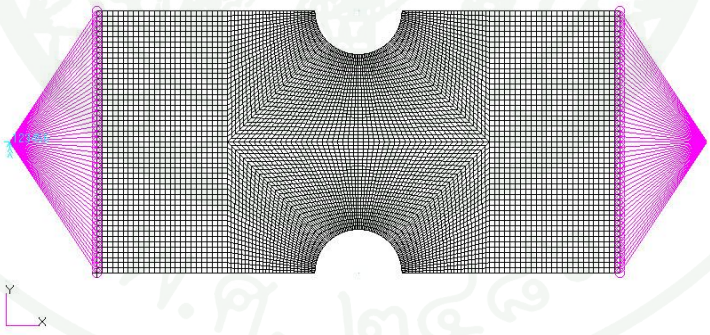
แบบจำลองที่ 1 สร้างขึ้นเพื่อตรวจสอบความความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MSC. Patran Version 2005 โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ (Shigley and Mischke, 1998)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โดยแบบจำลองแผ่นโลหะรับโมเมนต์ดัด M ขนาด 1 N-m กระทำที่ปลายทั้งสองด้าน แสดงในภาพที่ 27 เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเค้นหนาแน่น (stress concentration, K_t) กับอัตราส่วน r/d ภาพที่ 28 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ 1



ภาพที่ 27 แบบจำลองที่ 1

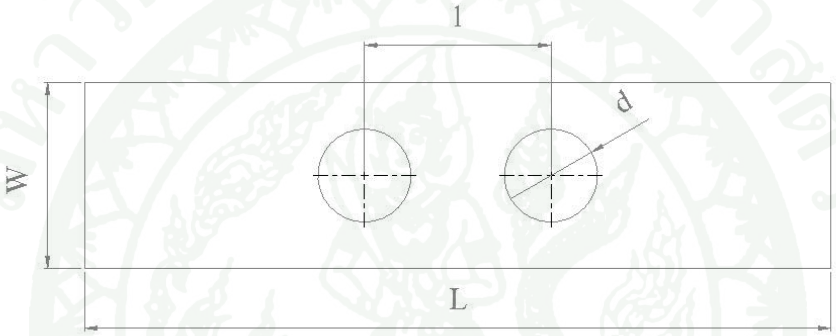


ภาพที่ 28 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ 1

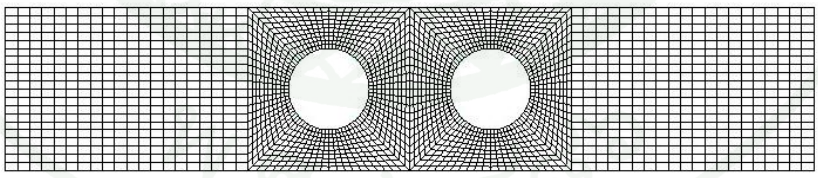
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 2

แบบจำลองช่องเจาะรูปวงกลม 2 วง มีขนาด ความยาว (L) x ความกว้าง (W) เท่ากับ 400 mm x 100 mm ดังแสดงในภาพที่ 29 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางรูเจาะ (d) และความกว้างของโหลดเซลล์ (W) ที่ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของรูเจาะ (l) ขนาดต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 30 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่มีช่องเจาะรูปวงกลม 2 วง ที่อัตราส่วน d/W= 0.5, l/d=2



ภาพที่ 29 แบบจำลองที่ 2

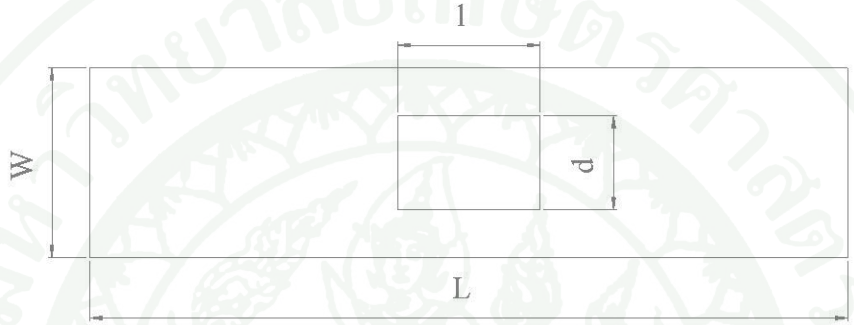


ภาพที่ 30 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของแบบจำลองที่ 2 ที่ d/W = 0.5, l/d = 2

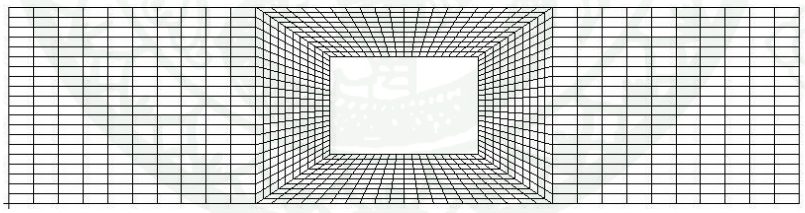
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 3

แบบจำลองของช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 31 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างความกว้างของช่องเจาะ (d) และความกว้าง (W) ที่ความยาวของรูเจาะ (L) ขนาดต่างๆ ภาพที่ 32 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ 3 ที่ d/W = 0.5, l/d = 1.5



ภาพที่ 31 แบบจำลองที่ 3

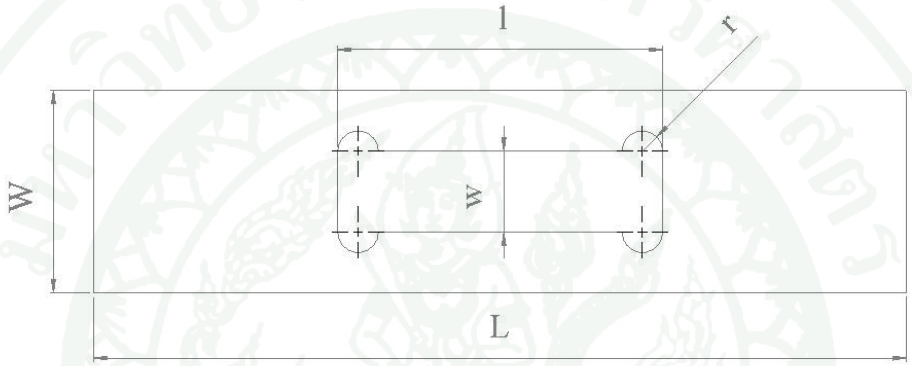


ภาพที่ 32 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ 3 ที่ d/W = 0.5, l/d = 1.5

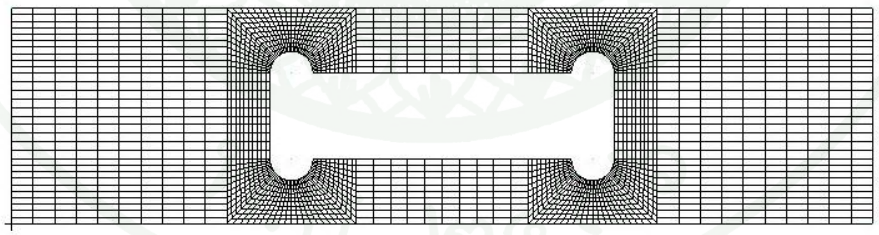
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 4

แบบจำลองของช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม ดังแสดงในภาพที่ 33 เพื่อศึกษาผลของรัศมีของส่วนโค้ง (r) ความกว้างของรูเจาะ (w) ความยาวของรูเจาะ (l) และระยะความกว้างรูเจาะสูงสุด (d) เท่ากับ w+2r ที่มีต่อการกระจายตัวของความเค้นขณะรับโหลด ภาพที่ 34 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม ที่ d/W = 0.6, l = 160 mm



ภาพที่ 33 แบบจำลองแบบที่ 4



ภาพที่ 34 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ 4 ที่ d/W = 0.6, l = 160 mm

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์ต้นแบบ

ผู้วิจัยทำการออกแบบโหลดเซลล์ต้นแบบมีขนาด กว้าง (W) x ยาว (L) x หนา (b) เท่ากับ 40 mm x 150 mm x 25 mm รองรับน้ำหนักขนาด 10 kg, 20 kg, 50 kg, 100 kg และ 200 kg ที่บริเวณส่วนปลายด้านขวาของผิวด้านบนของโหลดเซลล์ และทำการตรึงแน่นที่บริเวณส่วนปลายด้านซ้าย ของผิวด้านล่าง

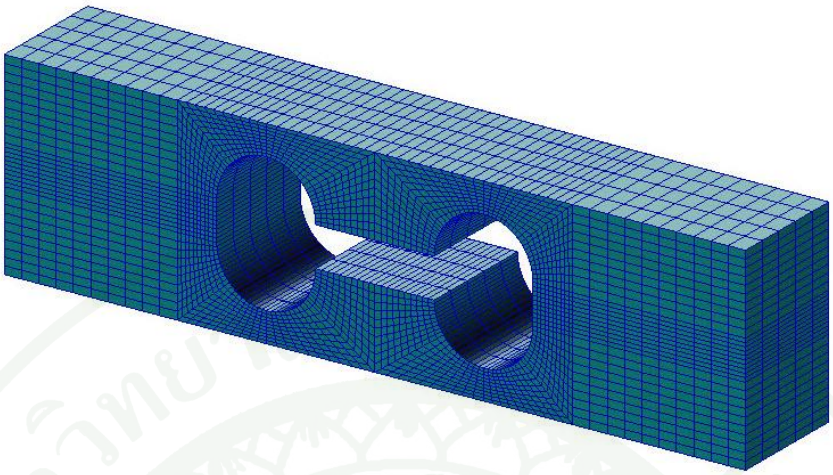
2.1 การวิเคราะห์ความความแข็งแรง

ผู้วิจัยใช้เอลิเมนต์สามมิติ 8 จุดต่อ ทำการเกลี่ยเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กรอบรูเจาะและใหญ่ขึ้นเมื่อไกลจากรูเจาะ ดังแสดงในภาพที่ 35 คุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นแบบ Isotropic ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียม เกรด 5083

Material Properties	Values
Poisson's Ratio	0.33
Elastic Modulus	71 GPa
Tensile Strength	305 MPa
Yield Strength	195 MPa

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 35 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์ต้นแบบ

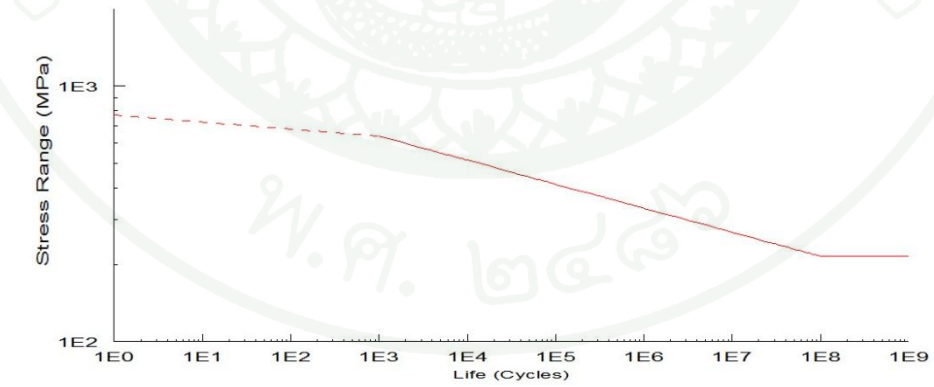
2.2 การวิเคราะห์ความล้า

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ความล้าเพื่อประเมินอายุการใช้งานด้วยโปรแกรม MSC Fatigue โดยโหลดเซลล์ต้นแบบสามารถชั่งน้ำหนักได้ 50 kg ที่ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3.93 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้เอลิเมนต์แบบลูกบาศก์สามมิติ 8 จุดต่อ ทำการเกลี่ยเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กรอบรูเจาะและใหญ่ขึ้นเมื่อไกลจากรูเจาะ คุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นแบบ isotropic ดังแสดงในตารางที่ 4 ทำการวิเคราะห์ความล้าจากสมการของ Goodman และใช้ทฤษฎี distortion energy หรือ Von Mises โดยเลือกวัสดุเป็นอลูมิเนียมเกรด 5083-87-CF ที่มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับ เกรด 5083 ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ภาพที่ 36 แสดงกราฟ S-N ของอลูมิเนียมเกรด 5083-87-CF และเลือกลักษณะผิวแบบ No Finish เสริมความแข็งแรงแบบ No Treatment ใช้ load cycle แบบ sine wave มีแอมพลิจูดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 คุณสมบัติทางกลและกราฟ S-N ของอลูมิเนียมเกรด 5083-87-CF มีที่มาจากฐานข้อมูลของโปรแกรม MSC Fatigue

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางกลของอลูมิเนียมเกรด 5083-87-CF

Material Properties	**Values**
Poisson's Ratio	0.33
Elastic Modulus	69 GPa
Tensile Strength	385 MPa
Yield Strength	285 MPa
Work hardening exponent	0.081
Work hardening coefficient	466 MPa
Fatigue strength coefficient	650 MPa
Fatigue strength exponent	-0.094
Fatigue ductility coefficient	2.26
Fatigue ductility exponent	-1.01
Cyclic strain-hardening exponent	0.035
Cyclic strength coefficient	417 MPa



ภาพที่ 36 กราฟ S-N ของ อลูมิเนียมเกรด 5083-87-CF

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การทดสอบการใช้งานของโหลดเซลล์ต้นแบบ

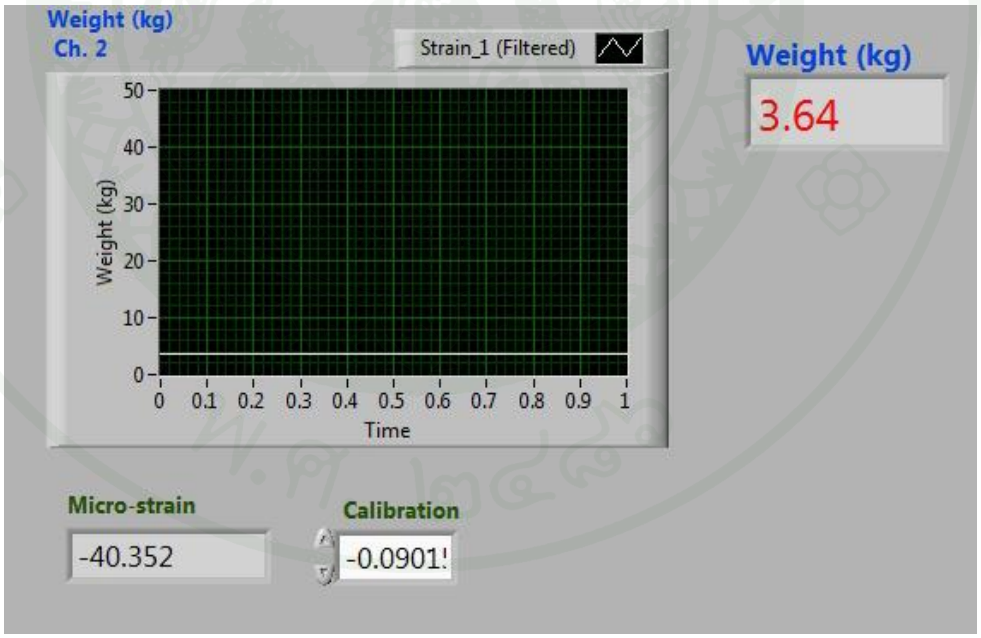
ผู้วิจัยทำการติดตั้งสเตรนเกจ จำนวน 2 ตัว ไว้บริเวณบนและล่างของโหลดเซลล์ต้นแบบ ที่ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นตามแกน x สูงสุด และต่ำสุด ขณะทำการชั่งน้ำหนัก โดยทำการต่อวงจรแบบ half wheatstone bridge และต่อเข้ากับอุปกรณ์ A/D เพื่อแสดงผลของน้ำหนักที่ชั่ง และทำการทดสอบการใช้งานของโหลดเซลล์ โดยนำตุ้มน้ำหนักที่ได้รับการสอบเทียบแล้วจำนวน 3 ก้อน มาชั่งดังแสดงในตารางที่ 5 และภาพที่ 37

ตารางที่ 5 น้ำหนักของตุ้มน้ำหนักที่ใช้ทดสอบ

หมายเลข	น้ำหนัก (kg)
1	1.243
2	1.163
3	1.233

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(ก)



(ข)

ภาพที่ 37 การทดสอบโหลดเซลล์ต้นแบบ (ก) ขณะทำการชั่งน้ำหนัก (ข) หน้าจอแสดงน้ำหนักที่ชั่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

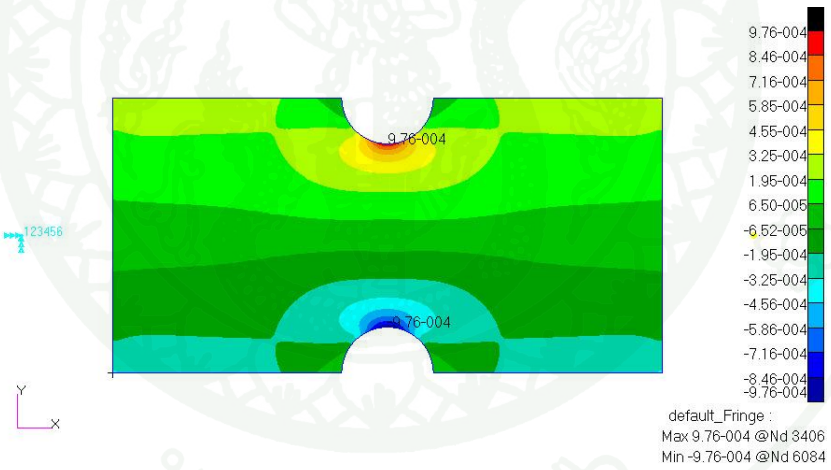
ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นรอบช่องช่องเจาะลักษณะต่างๆ

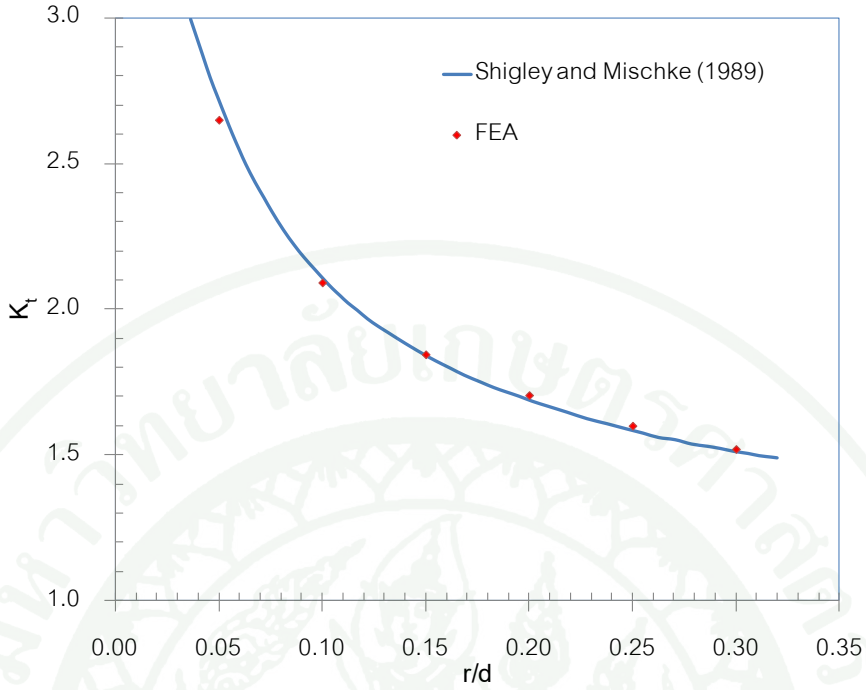
1.1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 1

ภาพที่ 38 แสดงการกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 1 ที่อัตราส่วน r/d = 0.25 ภาพที่ 39 แสดงกราฟค่าความเค้นหนาแน่น K_t กับอัตราส่วน r/d พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม MSC. Nastran ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างน้อยกว่า 2.37% เมื่อเทียบกับการทดสอบของ Shigley and Mischke (1989)



ภาพที่ 38 การกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 1 ที่อัตราส่วน r/d = 0.25

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

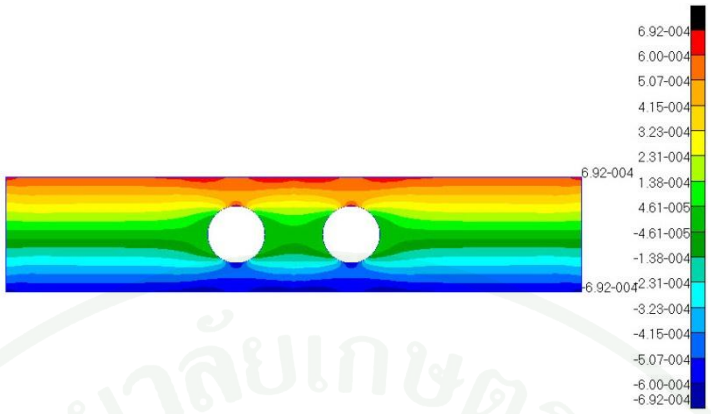


ภาพที่ 39 กราฟความเค้นหนาแน่น K_t กับอัตราส่วน r/d เปรียบเทียบระหว่าง FEA กับ การทดสอบของ Shigley and Mischke (1989)

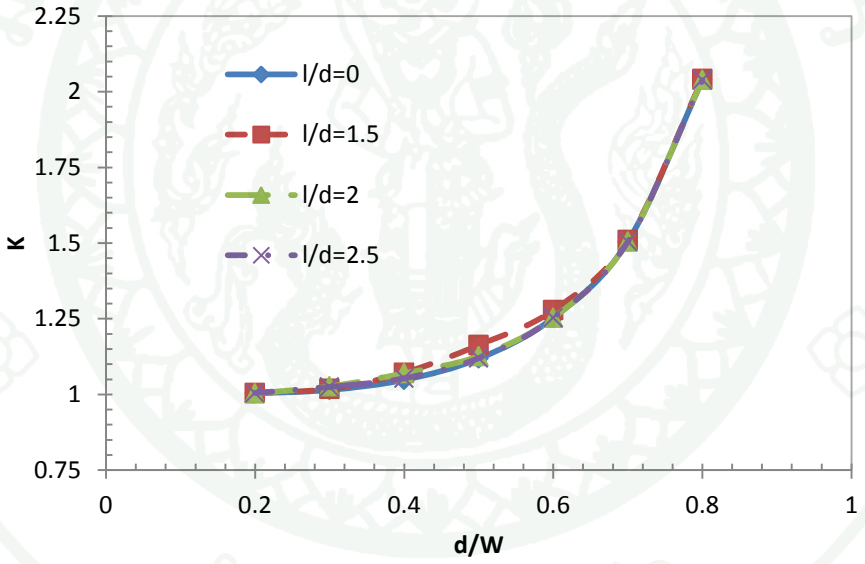
1.2. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 2

ภาพที่ 40 แสดงการกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 2 ที่ d/W = 0.5 และ l/d = 1.5 ภาพที่ 41 กราฟ K กับ d/W ที่ l/d เท่ากับ 0, 1.5, 2 และ 2.5 ตามลำดับ พบว่าเมื่อ d/W เพิ่มขึ้น K มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดรับความเค้นทำให้ความเค้นหนาแน่นเกิดขึ้น และ l/d ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ K เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นหน้าตัดรับความเค้นจึงไม่มีความเค้นหนาแน่นเกิดขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 40 การกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 2 ที่ d/W = 0.5 และ l/d = 1.5



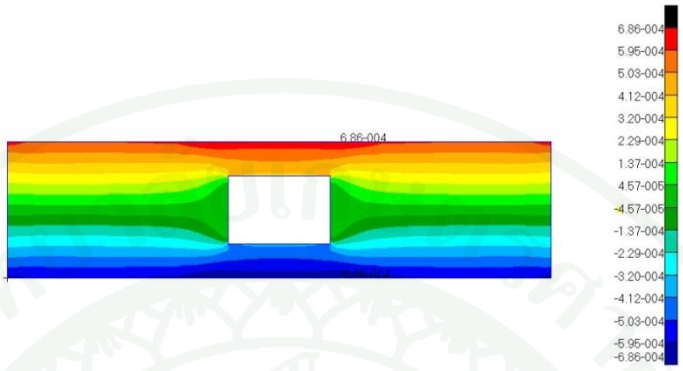
ภาพที่ 41 กราฟ K กับ d/W ที่ l/d = 0, 1.5, 2 และ 2.5 ของแบบจำลองที่ 2

1.3. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 3

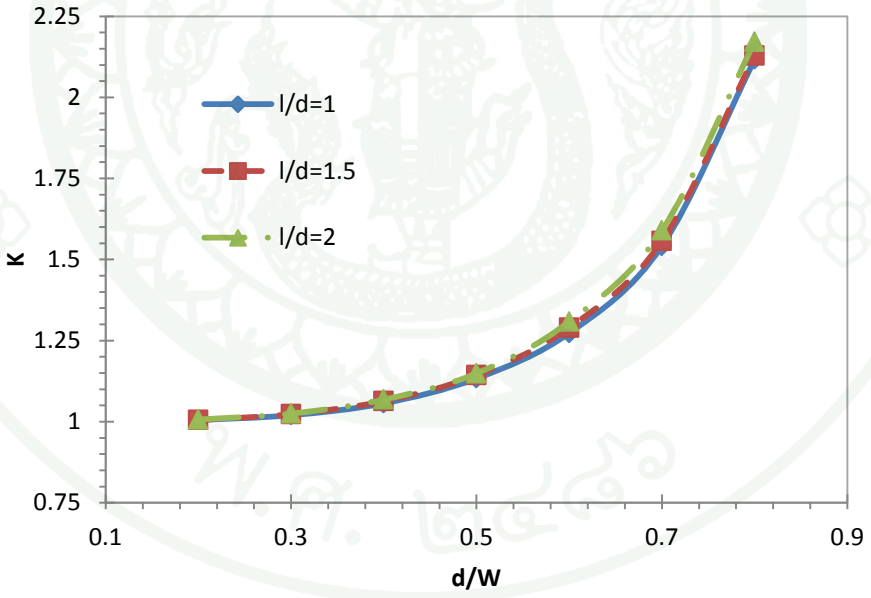
ภาพที่ 42 แสดงการกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 2 ที่ d/w = 0.5 และ l/d = 1.5 ภาพที่ 43 แสดงกราฟ K กับ d/W ที่ l/d เท่ากับ 0, 1.5, 2 และ 2.5 พบว่าเมื่อ d/W เพิ่มขึ้น K มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดรับความเค้นทำให้ความเค้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

หนาแน่นเกิดขึ้น และ l/d ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ K เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นหน้าตัดรับความเค้นจึงไม่มีความเค้นหนาแน่นเกิดขึ้น



ภาพที่ 42 การกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน x ของแบบจำลองที่ 3 ที่ d/w = 0.5 และ l/d = 1.5



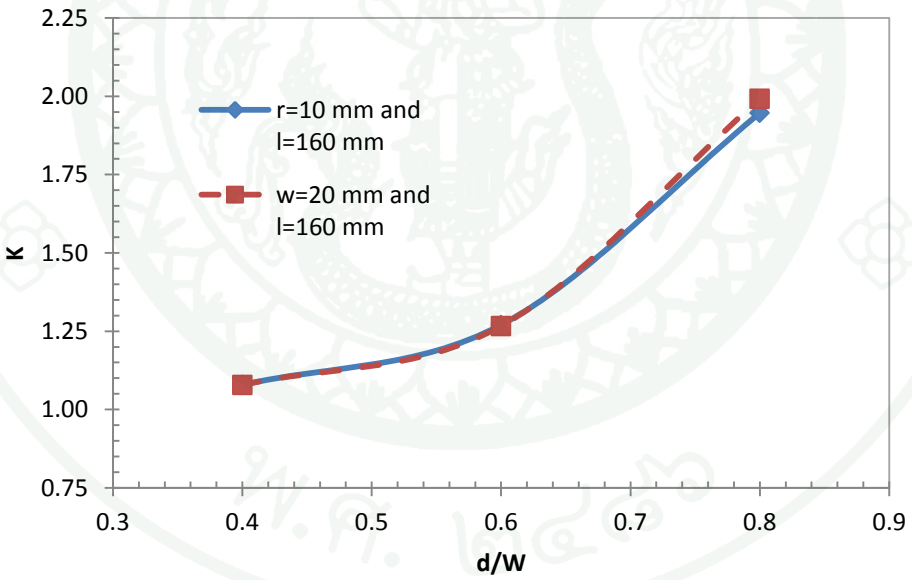
ภาพที่ 43 กราฟ K กับ d/W ที่ l/d =1, 1.5, 2 ตามลำดับ ของแบบจำลองที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.4. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 4

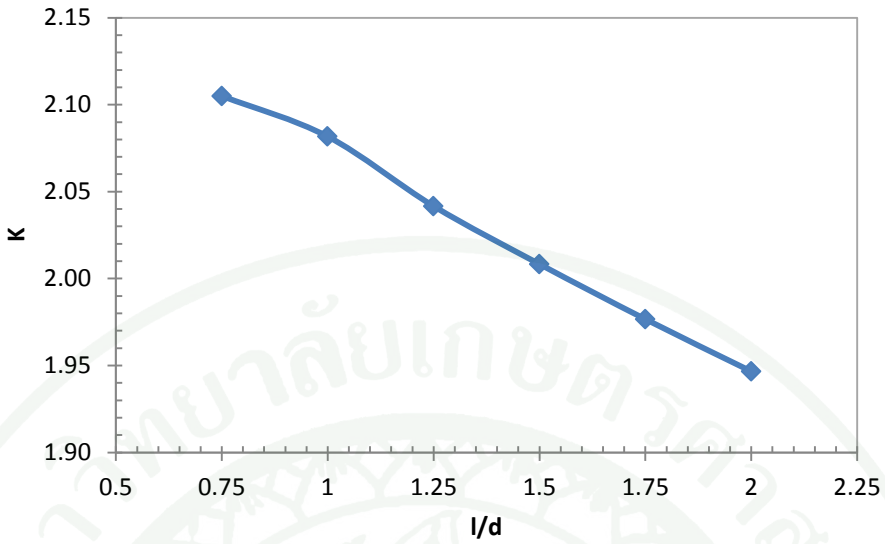
จากการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ 2 และ 3 พบว่า ที่ d/W เท่ากับ 0.8 รูเจาะรูปสี่เหลี่ยมให้ค่าความเค้นตามแกน x ที่ผิวบนสูงกว่ารูเจาะรูปวงกลม และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอบริเวณผิวบนและล่างของรูเจาะ แต่มีปริมาณความเค้นหนาแน่นสูง บริเวณมุมของรูเจาะรูปสี่เหลี่ยม ผู้วิจัยจึงได้นำรูเจาะรูปวงกลมมาวางตรงบริเวณมุมของสี่เหลี่ยมเพื่อลดความเค้นลง

ภาพที่ 44 แสดงกราฟ K กับ d/W ที่ r = 10 mm, l = 160 mm และ w = 20 mm, l = 160 mm ของแบบจำลองที่ 4 พบว่ากราฟ l และ w คงที่ มีลักษณะใกล้เคียงกับ กราฟ r และ l คงที่ แต่เมื่อ d/W = 0.8 กราฟ l และ w คงที่ มีความเค้นตามแกน x สูงสุด สูงกว่า กราฟ r และ l คงที่ ภาพที่ 45 แสดงกราฟ K กับ l/d ที่ r = 10 mm, w = 60 mm ของแบบจำลองที่ 4 พบว่าเมื่อ l/d เพิ่มขึ้น K มีค่าลดลง มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง K น้อยกว่า d/W



ภาพที่ 44 กราฟ K กับ d/W ที่ r = 10 mm, l = 160 mm และ w = 20 mm, l = 160 mm ของแบบจำลองที่ 4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 45 กราฟ K กับ l/d ที่ r = 10 mm, w = 60 mm ของแบบจำลองที่ 4

จากแบบจำลองที่ 3 และ 4 ที่ d/W = 0.8 ช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยม มีค่า K = 2.17 สูงกว่าช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม (มีค่า K = 1.99) แต่ช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยมและวงกลม สามารถลดความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นที่มุมของช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยมได้

2. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของ โหลดเซลล์ต้นแบบ

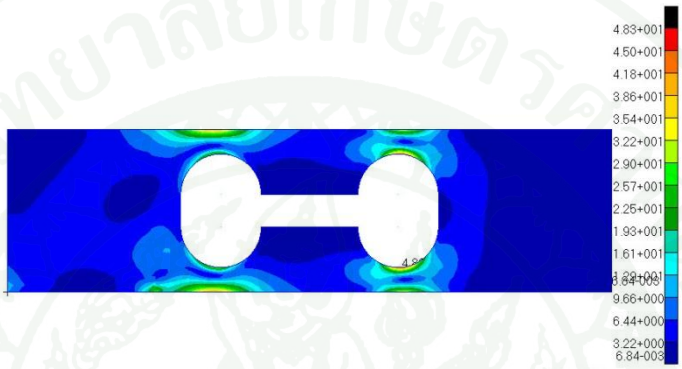
2.1. การวิเคราะห์ความความแข็งแรง

ตารางที่ 6 แสดงขนาดของโหลดเซลล์ต้นแบบ ภาพที่ 46 แสดงการกระจายตัวของความเค้น von mises ของโหลดเซลล์ต้นแบบ ที่ d/W = 0.7, L = 64 mm, r = 10 mm, w = 8 mm ภาพที่ 47 แสดงกราฟ safety factor (S.F.) กับ น้ำหนักชั่ง ที่ d/W เท่ากับ 0.7 และ 0.8 ของโหลดเซลล์ต้นแบบ โดยใช้ทฤษฎี distortion energy หรือ Von Mises ในการคำนวณหา safy factor พบว่าที่น้ำหนักชั่ง 50 kg d/W = 0.8 มีค่า S.F. = 2.18 ต่ำกว่า d/W = 0.7 มีค่า S.F. = 3.93

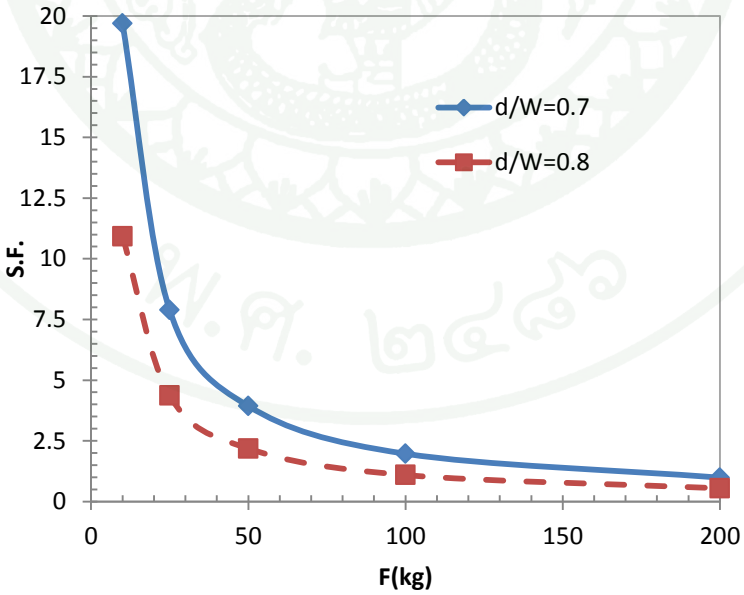
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 6 ขนาดของโหลดเซลล์ต้นแบบ

d/W	r (mm)	w (mm)	L(mm)
0.7	10	8	64
0.8	12	8	64



ภาพที่ 46 การกระจายตัวของความเค้น von mises ของโหลดเซลล์ต้นแบบ ที่ d/W = 0.7, L = 64 mm, r = 10 mm, w = 8

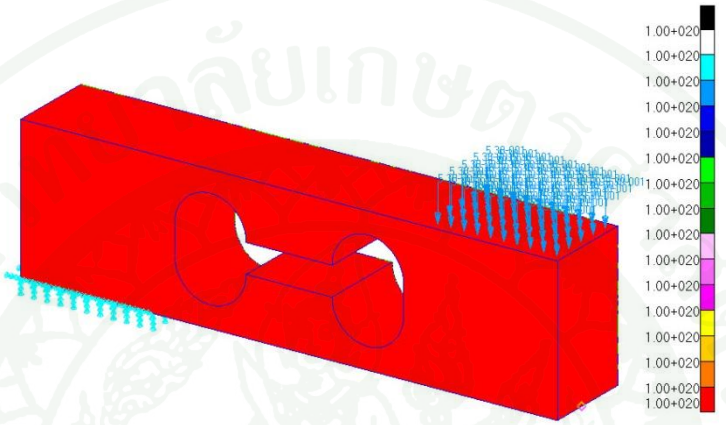


ภาพที่ 47 กราฟค่าความปลอดภัย (safety factor, S.F.) กับ น้ำหนักชั่ง ที่ d/W = 70 และ 80 ของโหลดเซลล์ต้นแบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2. ผลการวิเคราะห์ความล้าของ โหลดเซลล์ต้นแบบ

ภาพที่ 48 แสดงผลการวิเคราะห์ความล้าของโหลดเซลล์ต้นแบบ พบว่าโหลดเซลล์ต้นแบบมีอายุ การใช้งาน 1×10^{20} รอบ เมื่อชั่งน้ำหนัก 50 kg



ภาพที่ 48 ผลการวิเคราะห์ความล้าของโหลดเซลล์ต้นแบบ

3. ผลการทดลองการใช้งานของโหลดเซลล์ต้นแบบ

โหลดเซลล์ต้นแบบสามารถแสดงผลน้ำหนักชั่งในหน่วย kg มีความละเอียดการวัด ที่จุดทศนิยม 2 ตำแหน่ง และมีอัตราส่วนของน้ำหนักชั่ง (kg) ต่อความเครียดตามแกน x ($x10^{-6}$) เท่ากับ 0.09015 ตารางที่ 7 แสดงการสอบเทียบน้ำหนักชั่ง ตารางที่ 8 แสดงการทดสอบการชั่งซ้ำ

ตารางที่ 7 การสอบเทียบน้ำหนักชั่ง

ตุ้มน้ำหนัก	ค่าจริง (kg)	ค่าที่วัดได้ (kg)
No.1+2	2.40625	2.41
No.1+3	2.47616	2.48
No.1+2+3	3.6393	3.64

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 การทดสอบการชั่งซ้ำ

ตุ้มน้ำหนัก	น้ำหนักที่วัดได้ (kg)		
	ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**
No.1	1.24	1.24	1.24
No.2	1.16	1.16	1.16
No.3	1.23	1.23	1.23

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิจารณ์

1. การวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นรอบช่องช่องเจาะลักษณะต่างๆ

1.1. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 1

จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 1 พบว่าการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม MSC. Nastran มีความแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับทดสอบของ Shigley and Mischke มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 2.37%

1.2. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 2

จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 2 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่า K คือความกว้างของรูเจาะ และระยะห่างระหว่างรูเจาะไม่มีผลต่อค่า K และเมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน X พบว่า รูเจาะวงกลมสามารถเบี่ยงเบนเส้นแรงความเค้นได้ดีกว่ารูเจาะสี่เหลี่ยม

1.3. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 3

จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 3 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่า K คือความกว้างของรูเจาะ และความยาวรูเจาะไม่มีผลต่อค่า K รูเจาะสี่เหลี่ยมให้ค่า K สูงกว่ารูเจาะวงกลม แต่ไม่เหมาะที่จะนำมาออกแบบเนื่องจากเกิดความเค้นหนาแน่นสูงบริเวณมุมของรูเจาะ และเกิดความเค้นสูงในบริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลทำให้โหลดเซลล์เกิดความเสียหายในภายหลังได้

1.4. แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 4

จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองที่ 4 เมื่อให้ค่าความกว้างของรูเจาะ (w) และความยาวรูเจาะ (l) คงที่ เปลี่ยนแปลงรัศมี (r) ของรูเจาะวงกลม พบว่าเป็นลักษณะรูเจาะที่ให้ค่า K สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับรูเจาะสี่เหลี่ยมที่ความกว้างของรูเจาะมีขนาดเท่ากัน พบว่าค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

K ของรูเจาะที่ออกแบบน้อยกว่ารูเจาะสี่เหลี่ยมเล็กน้อย เมื่อ d/W เท่ากับ 0.8 รูเจาะที่ออกแบบให้ค่า K เท่ากับ 1.99 รูเจาะสี่เหลี่ยมให้ค่า K เท่ากับ 2.16 แต่รูเจาะที่ออกแบบสามารถลดความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นที่มุมของรูเจาะสี่และบริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นได้

2. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของ โหลดเซลล์ต้นแบบ

2.1. การวิเคราะห์ความความแข็งแรง

จากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบจำลองโหลดเซลล์ต้นแบบ ที่รูเจาะขนาด d/W เท่ากับ 0.7 และ 0.8 พบว่าขนาด d/W เท่ากับ 0.7 เหมาะต่อการออกแบบมากกว่าเมื่อรับน้ำหนัก 50kg เนื่องจากมีค่า S.F.สูงกว่า แต่ให้ค่า K ต่ำกว่าเล็กน้อย ที่ขนาด d/W เท่ากับ 0.8 ให้ค่า K เท่ากับ 1.99 และ d/W เท่ากับ 0.7 ให้ค่า K เท่ากับ 1.6

2.2. การวิเคราะห์ความล้าของ โหลดเซลล์ต้นแบบ

ผลการวิเคราะห์ความล้า เมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำพบว่าโหลดเซลล์อายุการใช้งานเท่ากับ 1×10^{20} รอบ เนื่องจาก software ใช้สมการ (19) และ (20) ในการคำนวณและแทนค่า $\Delta\sigma$ ซึ่งนำมาจากค่าความเค้น Von Mises จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MSC. Nastran ที่ผู้วิจัยมีการตรวจสอบความแม่นยำในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบที่ 1

3. การทดลองการใช้งานของโหลดเซลล์ต้นแบบ

จากผลการทดลองใช้ของโหลดเซลล์ต้นแบบ พบว่าโหลดเซลล์ที่ได้ทำการออกแบบมีความละเอียดในการวัด 0.01 kg และให้ความน่าเชื่อถือในการวัดดังตารางที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ผู้วิจัยทำการทดสอบความแม่นยำของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Patran version 2005 ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของความเค้นตามแกน x ของแบบจำลองที่ 1 พบว่าให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ K_t น้อยกว่า 2.37% เมื่อเทียบกับการทดสอบของ Shigley and Mischke (1989) และทำการศึกษาการกระจายตัวของความเค้นตามแกน x ของแบบจำลองของช่องเจาะรูปวงกลม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมและวงกลม พบว่า แบบจำลองของช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยมและวงกลมให้การกระจายตัวของความเค้นตามแกน x ที่สม่ำเสมอ และค่า K = 1.99

ผู้วิจัยใช้ช่องเจาะรูปสี่เหลี่ยมและวงกลมในการออกแบบโหลดเซลล์ต้นแบบ ที่ชั่งน้ำหนักไม่เกิน 50 kg มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3.93 และทำการวิเคราะห์ความล้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยวัสดุอลูมิเนียมเกรด 5083-87-CF ที่มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับ เกรด 5083 ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย พบว่ามีอายุการใช้งานเท่ากับ 1×10^{20} รอบ

ผู้วิจัยพบว่าโหลดเซลล์ต้นแบบที่จัดสร้าง สามารถแสดงผลน้ำหนักชั่งในหน่วย kg มีความละเอียดการวัด 0.01 kg และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักชั่ง (kg) กับความเครียดตามแกน x ($x10^{-6}$) เท่ากับ 0.09015

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาโหลดเซลล์ต่อไปในอนาคต

1. เพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้นในการวิเคราะห์การล้า ควรจะมีการทดสอบคุณสมบัติการล้าของวัสดุที่นำใช้ในการสร้างโหลดเซลล์เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์การล้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. ควรติดตั้งสเตรนเกจเป็น 4 ตัวโดยต่อวงจรแบบวงจรฟูลบริดจ์สามารถวัดความเครียดที่เกิดขึ้นได้ละเอียดยิ่งขึ้น

3. ควรมีการออกแบบทางเดินสายส่งสัญญาณของโหลดเซลล์ ฐานรองโหลดเซลล์และจานสำหรับรองรับน้ำหนัก

4. นำโหลดเซลล์ที่ทำการวิเคราะห์ออกแบบมาประกอบเป็นเครื่องชั่งและใช้งานจริง

5. นำวิธีที่ทดลองไปเป็นต้นแบบในการออกแบบโหลดเซลล์ลักษณะอื่น

6. ควรจะมีการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและสัญญาณรบกวนต่างๆที่มีผลต่อค่าน้ำหนักที่ได้จากการวัดโดยโหลดเซลล์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เพิ่มศักด์ เกตุนวม. 2550. **การออกแบบโหลดเซลล์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Bignardi, C., A.M. Bertetto and L. Mazza. 1999. Photoelastic measurements and computation of the stress field and contact pressure in a pneumatic lip seal. **Tribology International Journal** 1999 (32): 1-13

Joo, J.W, K.S. Na and D.I. Kang. 2002. Design and evaluation of a six-component load cell. **International Journal of measurement** 2002 (32): 125-133

Marines I., G. Dominguez, G. Baudry, J.-F. Vittori, S. Rathery, J.-P. Doucet and C. Bathias. 2003. Ultrasonic fatigue tests on bearing steel AISI-SAE 52100 at frequency of 20 and 30 kHz. **International Journal of Fatigue** 2003 (25): 1037-1046

Nigrelli, V. and G.V. Mariotti. 1997. Stress concentration factor in collar and shouldered shafts in traction or in bending. **International Journal of Engineering Analysis with Boundary Element** 1997 (20): 245-252

Toubal, L., M. Karama and B. Lorrain. 2005. Stress concentration in a circlular hole in composite plate. **International Journal of Composite Structures** 2005 (68): 31-36

Van Paepegem, W. and J. Degrieck. 2001. Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites. **International Journal of Composite Structures** 2001 (51): 1-8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Wu-rong, W, C. Guanlong and L. Zhong-qin. 2008. The study on fatigue FEM analysis considering the effect of stamping. **International Journal of Materials and Design** 2008

Morrow, J. 1968. **Fatigue Design Handbook: Advances in Engineering.** Warendale, PA: SAE, 21-29.

Shigley, J. E. and C. R. Mischke. 1998. **Machine design. 5th ed.** McGraw-Hill, New York.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

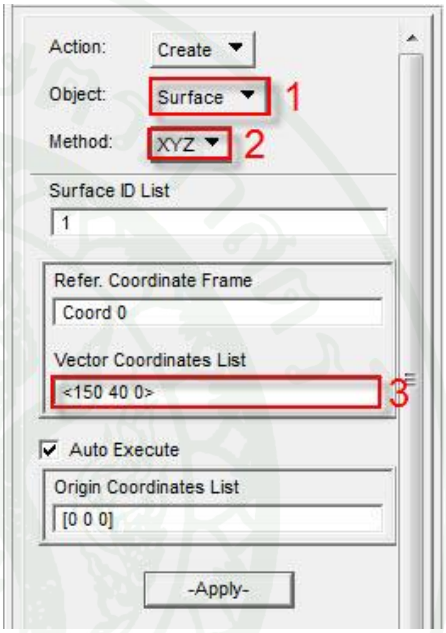
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์อย่างง่าย แท่งอลูมิเนียมเกรด 5083 สี่เหลี่ยมยาว 150mm กว้าง 40mm หน้า 25mm รับแรงดึงที่ปลายทั้งสองข้างในแนวตามยาวขนาด 1N

- Geometry

1. Object: เลือก Surface
2. Method: เลือก XYZ
3. ใส่ค่า <150 40 0> คลิก Apply
   เราจะได้ surface สี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 150mm กว้าง 40mm

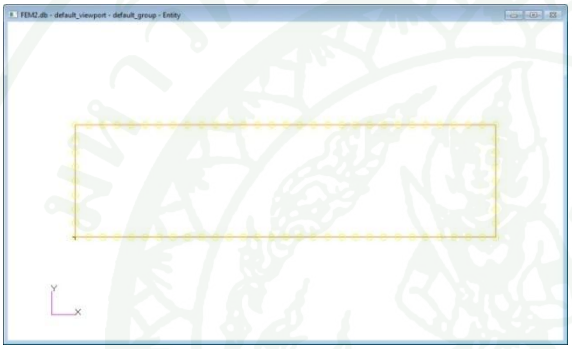


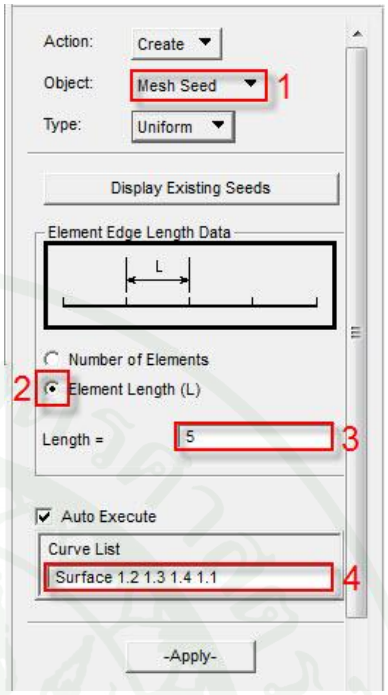
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- Element

1. Object: เลือก Mesh Seed
2. คลิก Element Length (L)
3. Length = ใส่ค่า 5
4. เลือก Surface ที่ได้สร้างในขั้นตอน Geometry คลิก Apply

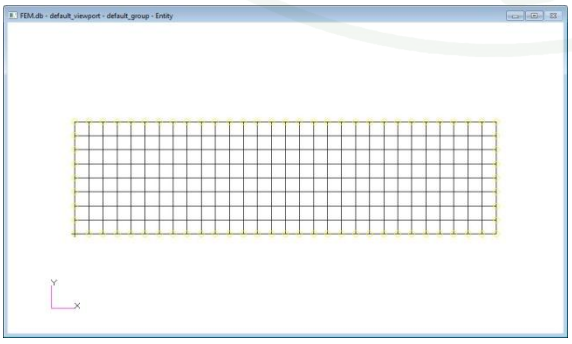
จะได้ Surface ที่แบ่งความยาวช่วงละ 5mm

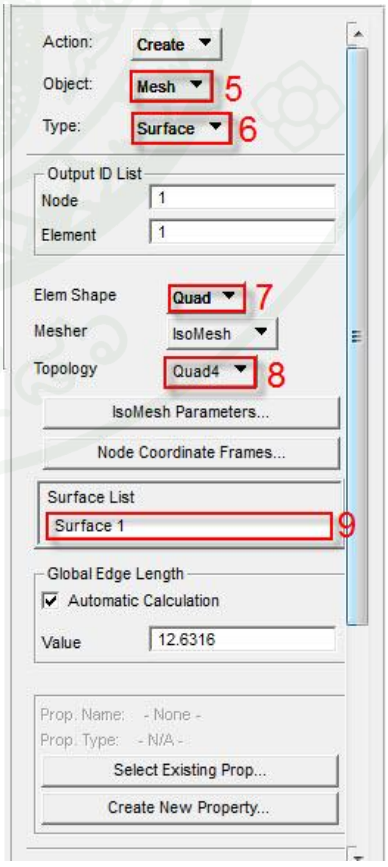




5. Object: เลือก Mech
6. Type: เลือก Surface
7. Elem Shape เลือก Quad
8. Topology เลือก Quad4
9. เลือก Surface ที่จะทำการ Mech คลิก Apply

จะได้ Surface ที่ Mech เรียบร้อย

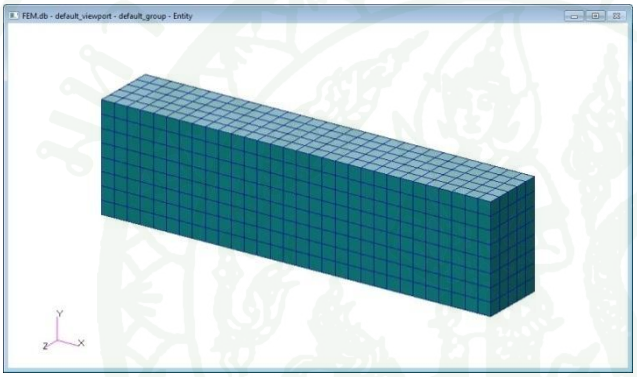


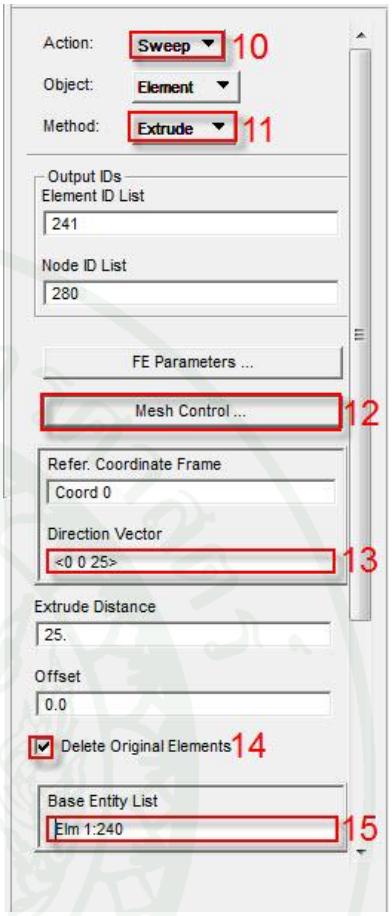


ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

10. Action: เลือก Sweep
11. Method: เลือก Extude
12. คลิก Mech Control ใส่ค่า 5 แล้วคลิก OK
13. ใส่ค่า <0 0 25>
14. คลิก Delete Original Elements
15. เลือก Element ทั้งหมดที่ได้จากการ Mech แล้วคลิก Apply

จะได้แท่ง Element 3D

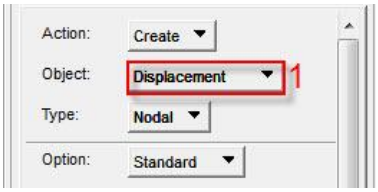




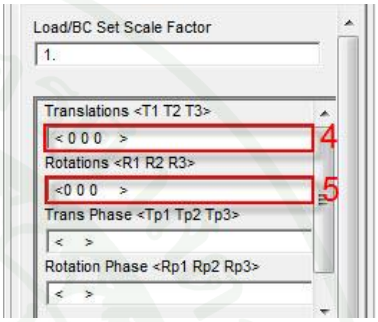
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- Load/Bcs

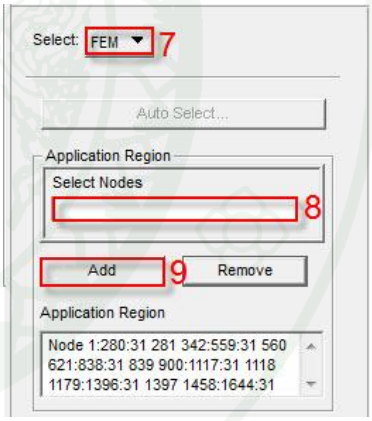
1. Oject: เลือก Displacement
2. ตั้งชื่อในช่อง New Set Name

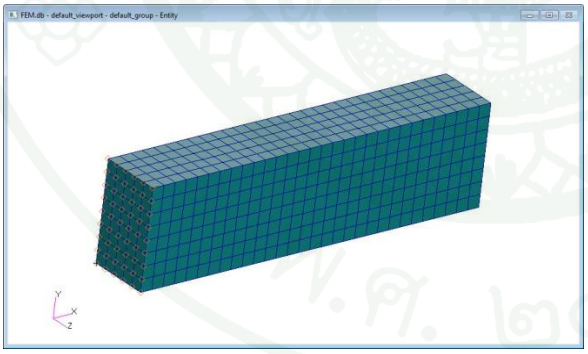


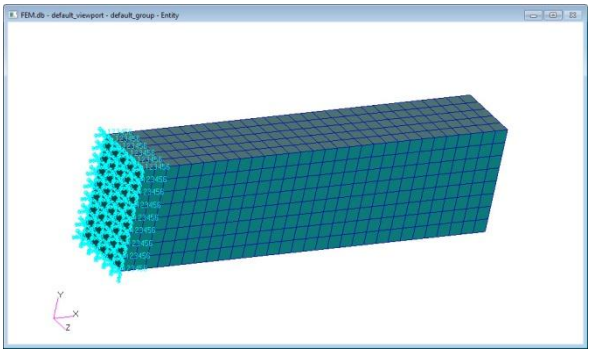
3. คลิก Input Data...
4. ใส่ค่า <0 0 0>
5. ใส่ค่า <0 0 0> แล้วคลิก OK



6. คลิก Select Application Region...
7. Select: เลือก FEM
8. เลือก Node ที่ต้องการจะยึดอยู่กับที่
9. คลิก Add แล้วคลิก OK ต่อด้วยคลิก Apply

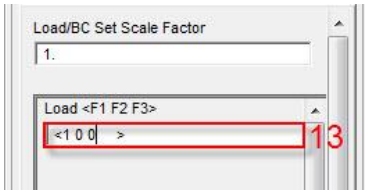


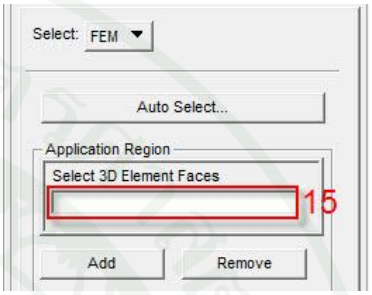


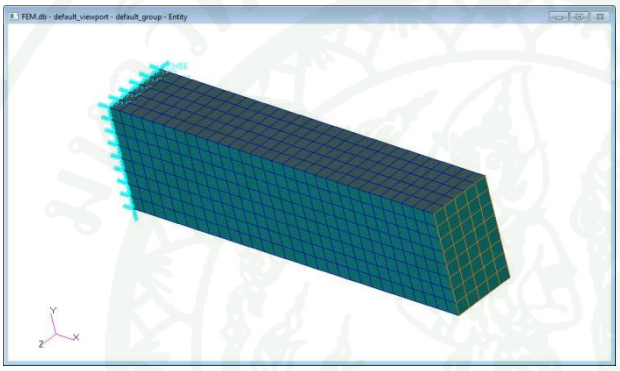


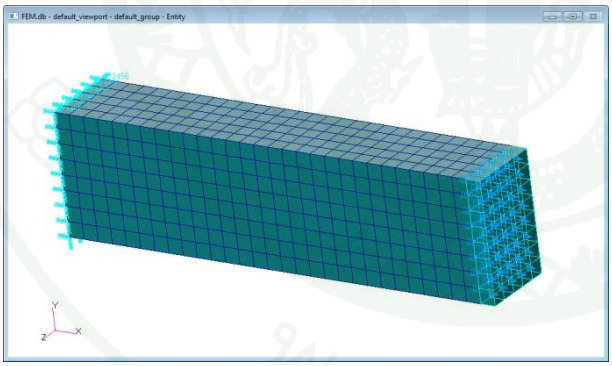
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

10. Object: เลือก Total Load
11. ตั้งชื่อในช่อง New Set Name
12. คลิก Input Data...
13. ใส่ค่า <1 0 0> แล้วคลิก OK
14. คลิก Select Application Region...
15. เลือก Surface ที่ต้องการใส่แรง 1N คลิก Add แล้วคลิก OK แล้วต่อด้วย Apply





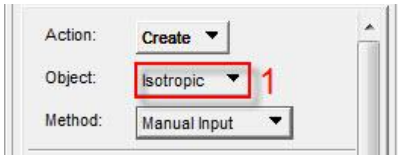


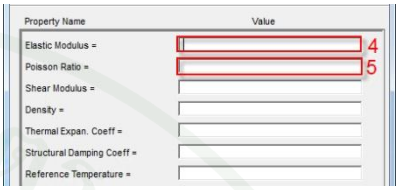


ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- Material

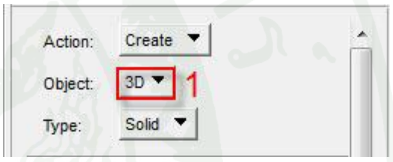
1. Object: เลือก Isotropic
2. ตั้งชื่อในช่อง Material Name
3. คลิก Input Properties...
4. ใส่ 71000
5. ใส่ 0.33 คลิก OK แล้วต่อด้วย Apply





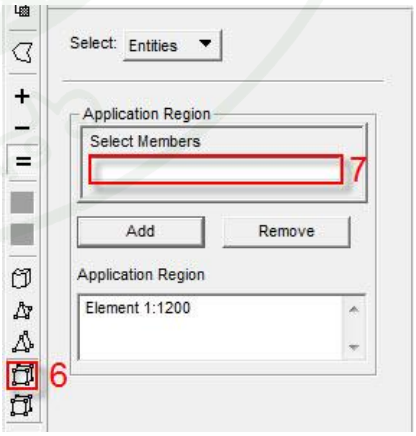
- Properites

1. Object: เลือก 3D
2. ตั้งชื่อในช่อง Property Set Name



3. คลิก Input Properties...
4. คลิก เลือก Material ที่ได้สร้างไว้ แล้วคลิก OK

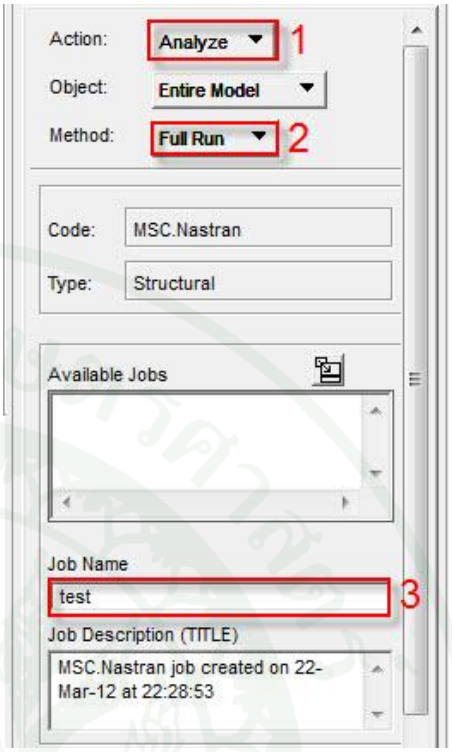
5. คลิก Select Application Region...
6. คลิก Hex Element
7. เลือก Element ทั้งหมดที่ทำการวิเคราะห์ แล้วคลิก OK แล้วต่อด้วย Apply



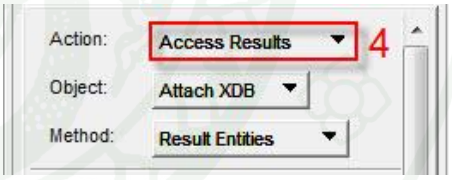
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

- Analysis

1. Action: เลือก Analyze
2. Method: เลือก Full run
3. ตั้งชื่อในช่อง Job Name แล้วคลิก Apply



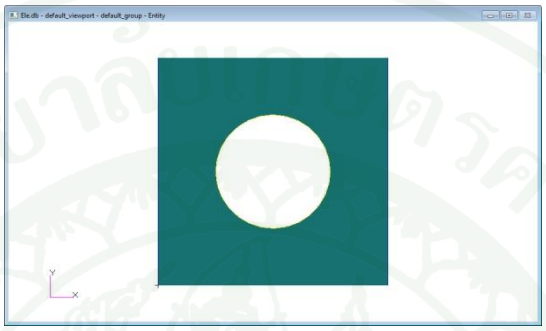
4. Action: เลือก Access Results
5. คลิก Select Result File แล้วเลือกชื่อไฟล์ที่ได้ตั้ง ไว้แล้วคลิก OK แล้วต่อด้วย Apply



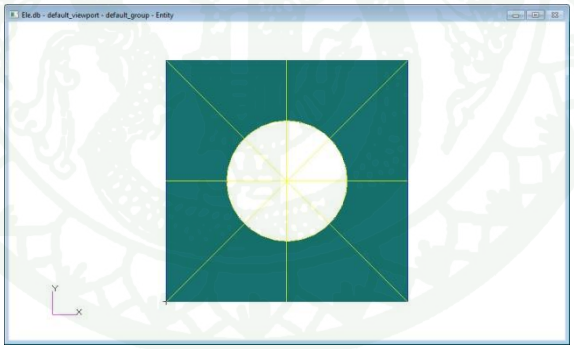
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการเกลี่ยเอลิเมนต์

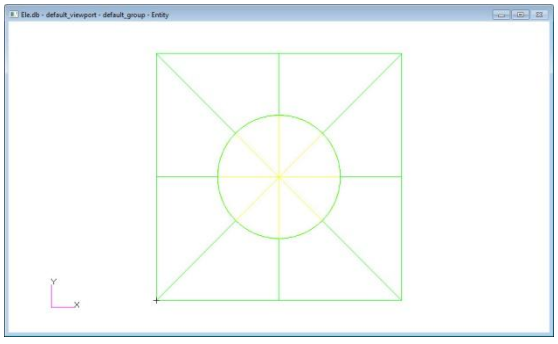
ในกรณีที่ต้องการ mech เอลิเมนต์ให้ละเอียดสามารถทำได้โดย ตัวอย่าง Surface ขนาด ยาว 100mm กว้าง 100mm มีรูเจาะวงกลมตรงกึ่งกลางรัศมีขนาด 25mm



1. ในส่วนของ Geometry สร้างเส้นทแยงมุมและเส้นแบบครึ่งด้านของ Surface สี่เหลี่ยม โดยใช้คำสั่ง Create > Curve

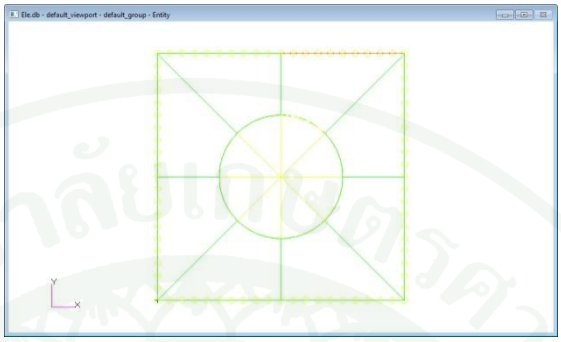


2. แบ่ง surface เป็นส่วนๆ โดยใช้คำสั่ง Edit > Surface > Break แล้วเลือก Surface และ Curve ที่ต้องการจะแบ่ง

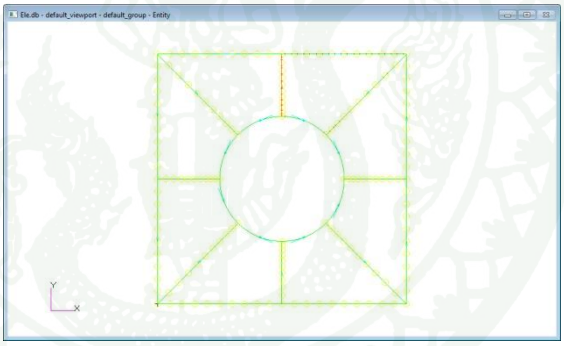


ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

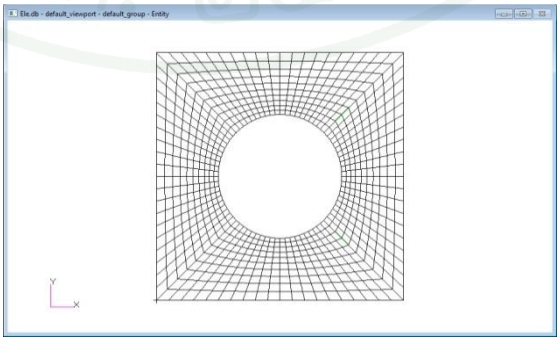
3. ต่อไปเป็นส่วนของ Elements ให้ Mesh Seed เส้นขอบของ Surface สี่เหลี่ยม โดยคำสั่ง Create > Mech Seed > Uniform > Element Length = 5



4. Mesh Seed เส้นตรงที่เหลือโดยคำสั่ง Create > Mech Seed > One Way Bias > Num Elems and L2/L1 > Num = 10 > L2/L1= 0.5



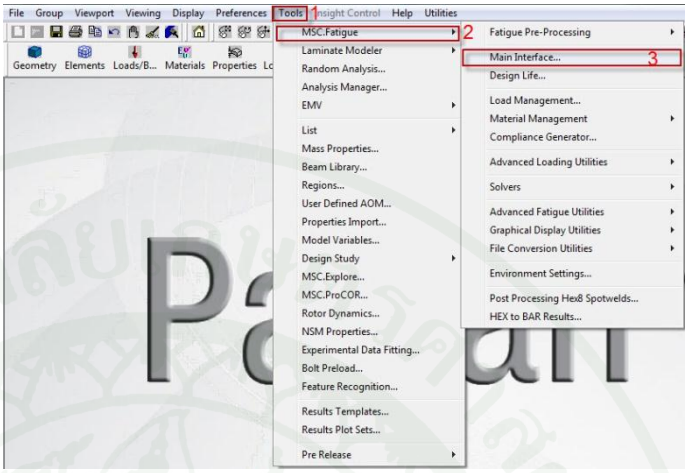
5. Mesh Surface โดยคำสั่ง Create > Mesh > Surface > เลือก Surface ทั้งหมด
6. ทำการลบ node ซ้ำที่ซ้อนกัน โดยคำสั่ง Equivalence > Apply



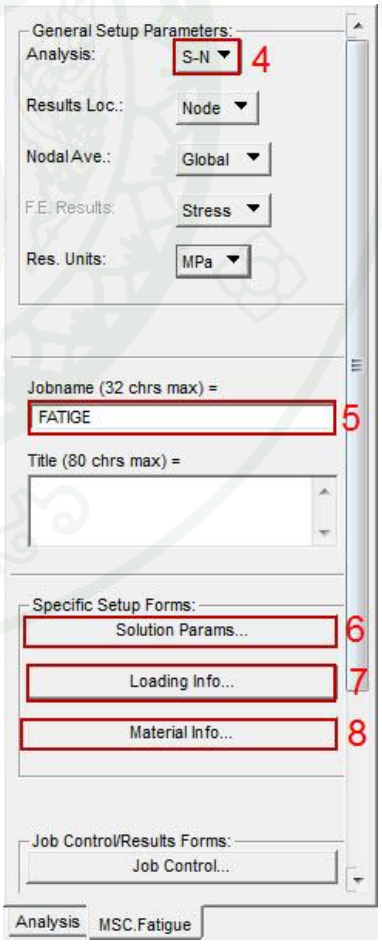
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

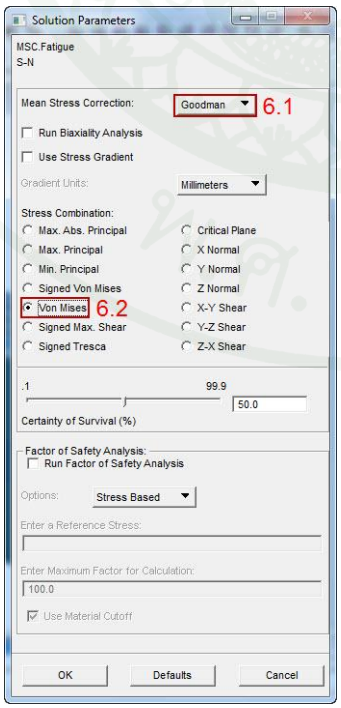
วิธีวิเคราะห์ความล้าโดย MSC Fatigue

1. คลิก Tools ที่ Tools bar
2. คลิก MSC.Fatigue
3. คลิก Main Interface...

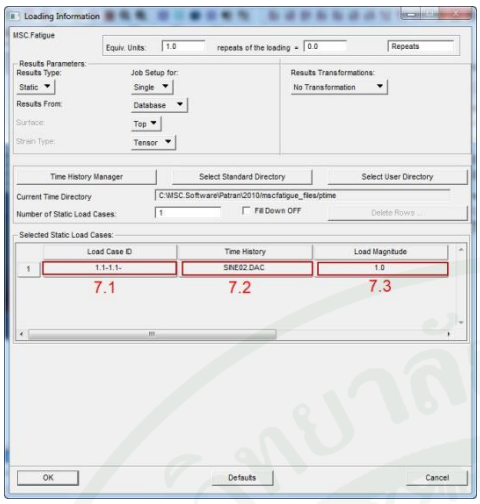


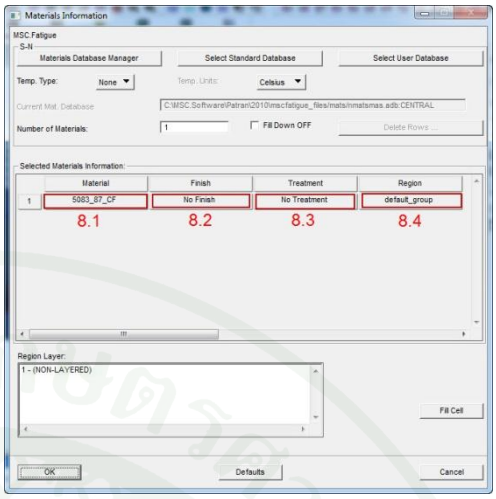
4. Analysis: เลือก S-N
5. Jobname ตั้งชื่องานที่วิเคราะห์ความล้า
6. คลิก Solution Params...
   6.1. Mean Stress Correction: เลือก Goodman
   6.2. Stress Combination: เลือก Von mises แล้วคลิก OK





ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





7. คลิก Loading Info...
   7.1. Load Case ID เลือก Result Load Case จากการวิเคราะห์ Static
   7.2. Time History เลือก Sine02.DAC คือแรงกระทำซ้ำในลักษณะกราฟ Sine มีแอมปลิจูด 0 ถึง 1
   7.3. Load Magnitude ใส่ค่า 1.0
8. คลิก Material Info...
   8.1. Material เลือก 5083_87_CF
   8.2. Finish เลือก No Finish
   8.3. Treatment เลือก No Treatment
   8.4. Region เลือก default_group
9. คลิก Job Control > Action: เลือก Full Analysis > คลิก Apply
10. คลิก Import Result > คลิก Apply

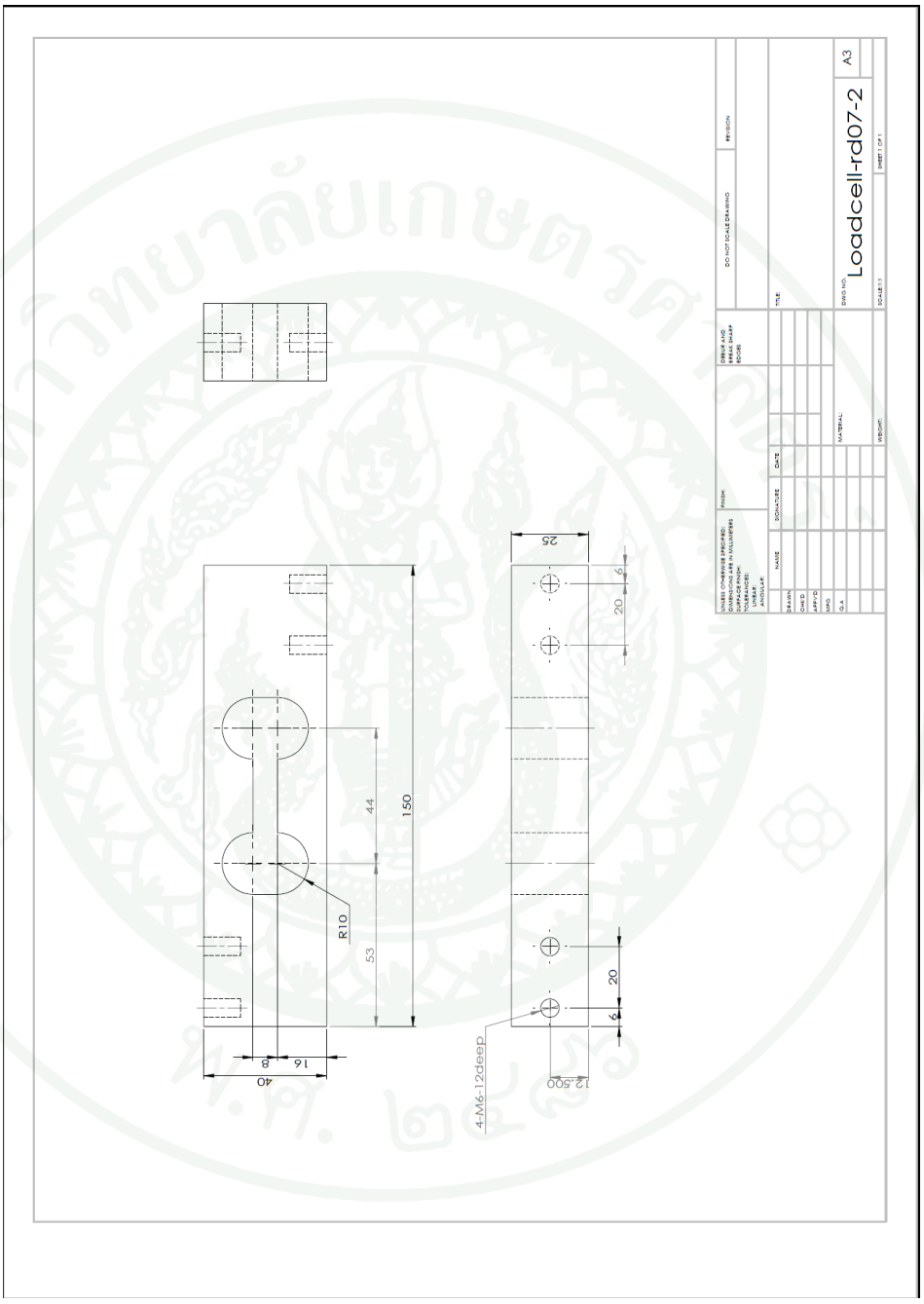
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

แบบแปลนของโหลดเซลล์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบแปลนของโหลดเซลล์



ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายคเณศ ไวท์ยางกูร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 14 ธันวาคม 2527
สถานที่เกิด	ขอนแก่น
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่การงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2553 เรื่องการวิเคราะห์และออกแบบโหลดเซลล์แบบคานที่ติดตั้งในเครื่องชั่งดิจิตอลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์