



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

ปริญญา

เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การวิเคราะห์การจับยึดของคัมไบพัต

Analysis of Fan Hub Connection

نامผู้วิจัย

นายทรงชัย สุวรรณภรณ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ประพนธ์ ขุนทอง, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชพล ชังชู, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชพล ชังชู, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์การจับยึดของดุมใบพัด

Analysis of Fan Hub Connection

โดย

นายทรงชัย สุวรรณภรณ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทรงชัย สุวรรณภรณ์ 2553: การวิเคราะห์การจับยึดของคัมไบพัด ปริญาวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม) สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต
ทางอุตสาหกรรม โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ประพนธ์ ขุนทอง, Ph.D. 88 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงจับยึดในคัมวาล์วพัฒมกรงกระรอกด้วยระเบียบ
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยการวิเคราะห์เริ่มจากการจำลองการบีบอัดคัมเข้ากับจานวาล์ว ซึ่งจำลอง
เป็นแบบสองมิติสมมาตรรอบแกน ความเครียดค้ำได้จากการวิเคราะห์นำมาเปรียบเทียบกับ
ผลการทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้อง การวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่
กระทำต่อหัวกดเพื่อขยายปลอกคัมให้บีบอัดเข้ากับจานวาล์วกับแรงสัมผัสตั้งฉากระหว่างคัมและ
จานวาล์ว นอกจากนี้การวิเคราะห์ยังทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของความเค้นที่เกิดขึ้นใน
ระหว่างการบีบอัดอีกด้วย ผลการวิเคราะห์แบบ 2 มิติที่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อการวิเคราะห์แรงบีบจับ
ยึดระหว่างคัมกับจานวาล์ว ซึ่งทำได้โดยการหมุนแบบจำลองสองมิติรอบแกนสมมาตรเพื่อสร้าง
แบบจำลองสามมิติขึ้นมา ผลการวิเคราะห์แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงใช้ในการบีบอัดกับ
แรงบิดที่ทำให้คัมหลุดออกจากจานวาล์ว ผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูก
นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองและถูกนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงหัวกด
เพื่อให้คัมของวาล์วพัฒมกรงกระรอกรับแรงบิดได้สูงขึ้น

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Songchai Suwannaporn 2010: Analysis of Fan Hub Connection. Master of Engineering (Industrial Production Technology) Major Field: Industrial Production Technology, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Mr. Prapot Khunthong, Ph.D. 88 pages.

The purpose of this work is to study the clamping force in the squirrel cage blower wheel hub using finite element method. The analysis began with a simulation of clamping the hub to the blower wheel in which it can be described as 2D axisymmetrical model. The residual strains obtained from the analysis were then confirmed with experimental measurements. The analysis also leads to the relationship between the pressing forces acting on the press block for attaching the hub to the wheel disc and the normal contact forces between the hub and the wheel disc. Moreover, the analysis provides an understanding of stress behavior in the hub occurred throughout the clamping process. The results of analysis were further used to analyze the clamping moment between the hub and the wheel disc. The 3-dimensional finite element model was created by revolving the axisymmetric model about the symmetry axis. The analysis provides the relationship between the forces used for clamping the workpieces and the torque used for breaking loose the wheel hub. The results of finite element analysis were compared to those of the experimental test and were used for the improvement of the design of press block in such a way that the wheel hub of the squirrel cage blower can withstand greater twisting moment.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ประพนธ์ ขุนทอง อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร. ชัชพล ชังชู อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยอบรมสั่งสอน และคอยให้คำแนะนำนำความรู้ทางวิชาการอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่อุดหนุนทุนที่ใช้ในการวิจัยบางส่วน, T.Kim Panell, PhD, Senior Manager, User Experience MSC Software USA. ที่ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์, คุณคุณากร ศรีจักรโคตร, คุณสรวิศ ลิ้มทองกุล คุณสัมพันธ์ ไหมพิม นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ร่วมเก็บข้อมูลในการทดลอง, หนังสือตลอดจนเอกสารทางวิชาการทุกฉบับที่ข้าพเจ้าใช้อ้างอิง, แผนกกราฟฟิก บริษัทรอยัลคิงผลิตภัณฑ์เด็ก จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำรูปภาพ, บริษัทรอยัลคิงผลิตภัณฑ์เด็ก จำกัด ที่ให้โอกาสทางการศึกษา และท้ายที่สุด ขอขอบคุณบริษัท เอ็กซ์เพอร์ เทคเนีย (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

คุณประโยชน์อันใดที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเป็นกตัญญูแด่พ่อแม่พี่น้อง ที่ได้เอาใจใส่เลี้ยงดู และเป็นกำลังใจให้ตลอดมา รวมถึง ครูอาจารย์ ที่ให้คำแนะนำสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ทรงชัย สุวรรณภรณ์

มีนาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	53
ผล	53
วิจารณ์	68
สรุปและข้อเสนอแนะ	69
สรุป	69
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	72
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดง Boundary Condition ที่กำหนดในโปรแกรม	46
2	สมบัติทางกลของวัสดุ	47
3	แสดงจำนวนเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ	50
4	แสดงผลการทดลองในการอัดฉีดคัมไบพัดก่อนการปรับปรุง	55
5	แสดงผลของแรงกดกับแรงสัมผัสตั้งฉากของหัวกด	57
6	เปรียบเทียบแรงบิดจากการทดลอง	59
7	แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในการปรับมุมเอียงหัวกด ที่ระดับแรงกด 25 ตัน	61
8	แสดงผลการทดลองหัวกดที่ปรับปรุงแล้วเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	63
9	แสดงผลของแรงกดกับแรงสัมผัสตั้งฉากของหัวกดแบบใหม่	67
10	เปรียบเทียบผลในการรับแรงบิดระหว่างหัวกดใหม่ กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	รูปของใบพัดที่ใช้ในงานวิจัย	2
2	แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองกับชิ้นงานทดลองจริง	4
3	แสดงตำแหน่งของแผ่นเพลทในใบพัดที่ทำการวิเคราะห์	5
4	แสดงบริเวณที่เกิดความเสียหายของใบพัด	6
5	แสดงการติดตั้ง Load Cell ที่เกี่ยวข้องกับสลักเกลียว	6
6	แสดงตารางการเปรียบเทียบของแรงบิดและแรงจذبยัดระหว่าง การเติมสารหล่อลื่นกับการไม่เติมสารหล่อลื่น	7
7	วงล้อใบพัดทรงกระบอก	8
8	ขั้นตอนการประกอบคู่มือใบพัดของพัดลมทรงกระบอก	8
9	แบบจำลองทางกลศาสตร์ของคู่มือและจานยึดใบพัด	9
10	ความเค้นในระบบระนาบสามมิติ	11
11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	17
12	แสดงเอลิเมนต์แบบหนึ่งมิติ	30
13	แสดงเอลิเมนต์แบบสองมิติ	30
14	แสดงเอลิเมนต์แบบสามมิติ	31
15	แสดงการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	32
16	แสดงการแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม	32
17	การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมโค้งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมย่อย	33
18	รูปแบบของ Strain Gauge	35
19	เครื่องทดสอบแรงบิด	37
20	คู่มือและจานใบพัดที่ใช้ในการทดลอง	37
21	(ก) แท่นยึดที่ใช้ในการทดลอง, (ข) Strain gauge, (ค) Strain Meter	38
22	ความเค้นและความเครียด	40
23	Stress-Strain เฉลี่ย	41
24	True Stress-Strain ของวัสดุที่กำหนด	42
25	ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain Gauge	42
26	ขั้นตอนการกดและวัดค่าความเครียด	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	การทดสอบแรงบิด	44
28	แสดงลักษณะหน้าจอของโปรแกรม MSC Marc Mentat 2005r3	45
29	แสดงรูปแบบการกำหนดขอบเขต	47
30	Fix Displacement	48
31	บริเวณที่เกิดการสัมผัส	49
32	Boundary Condition	50
33	การเพิ่มแรงบิด	51
34	แสดง node370 ที่ใช้อ่านค่าความเครียด และ node 38 ที่ใช้แสดงค่าแรงสัมผัสตั้งฉาก (contact force)	53
35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าความเครียดของหัวกดเก่า	54
36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กับความเครียดตกค้าง	56
37	เปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูป (ก) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, (ข) จากชิ้นงานทดสอบ	56
38	รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 20 ตัน (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)	57
39	รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 22.5 ตัน (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)	58
40	รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 25 ตัน (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)	58
41	(ก) แสดงค่าความเค้น von mises ในตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุด ของ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, (ข) บริเวณที่เกิดการแตกของชิ้นงานที่ได้ จากการทดลอง	60
42	ค่าความเค้น von mises ในหัวกดที่ได้ปรับปรุงแล้ว (ก) แบบจำลองไฟ ไนต์เอลิเมนต์ที่ระดับแรงกด 30 ตัน, (ข) ชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง	61
43	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าความเครียดในหัวกดที่ได้ปรับปรุงแล้ว	62
44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเครียดตกค้าง ของหัวกดใหม่	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
45	รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 25 ตัน ของหัวกดใหม่ (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)	64
46	รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 27.5 ตัน ของหัวกดใหม่ (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)	64
47	รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 30 ตัน ของหัวกดใหม่ (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)	65
48	ตำแหน่งที่ใช้แสดงค่าความเค้น	65
49	แสดงค่าความเค้นตึงฉากในสภาวะการกดที่ 30 ตัน ขณะที่เกิดการตัดของวัสดุเทียบกับค่าการเคลื่อนที่ของหัวกด	66
ภาพผนวกที่		
1	การเตรียมพื้นผิว	75
2	การขัดพื้นผิว	75
3	การปรับสภาพพื้นผิวให้เหมาะสม	76
4	การปรับสภาพพื้นผิวให้เป็นกลาง	77
5	ทำการรัด Tape ให้ขนานไปกับ Strain gauge และ Terminal	78
6	การวาง Strain gauge ให้อยู่ในตำแหน่งที่ทำเครื่องหมาย	78
7	การรัดปลาย Tape ด้าน Terminal	79
8	การติด Strain gauge ด้วยกาว	79
9	การตากกาว	80
10	วิธีการกดลงบน Strain gauge และ Terminal	80
11	เอามือกดอย่างแรง	81
12	การลอก Tape	81
13	แสดงการปรับมุมเอียงหัวกดที่ 80 องศา และ 88 องศา	82
14	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 72 องศา ค่าความเค้น 1145 MPa	82
15	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 74 องศา ค่าความเค้น 933.9 MPa	83
16	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 76 องศา ค่าความเค้น 919.3 MPa	83

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
17	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 78 องศา ค่าความเค้น 886.3 MPa	84
18	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 80 องศา ค่าความเค้น 869.3 MPa	84
19	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 82 องศา ค่าความเค้น 864.9 MPa	85
20	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 84 องศา ค่าความเค้น 853.9 MPa	85
21	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 86 องศา ค่าความเค้น 853.9 MPa	86
22	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 88 องศา ค่าความเค้น 835.3 MPa	86
23	ระดับแรงกดที่ 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 90 องศา ค่าความเค้น 836.8 MPa	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\tilde{\sigma}$	=	ความเค้นจริง
$\tilde{\sigma}_0$	=	ความเค้นจริงตามความเครียด
μ	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
γ	=	ความเครียดเฉือน
$\tilde{\epsilon}$	=	ค่าความเครียดจริง
h	=	ค่าความชันช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร
[K]	=	element stiffness matrix
{u}	=	vector of nodal displacements
{F}	=	vector of nodal forces
M	=	โมเมนต์ดัดที่กระทำบนพื้นที่หน้าตัด
Y	=	ระยะจากแกนสะเทินไปยังตำแหน่งที่ต้องการหา หน่วยแรงดัด
τ	=	หน่วยแรงเฉือนในแนวราบ
μ	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
L	=	ความยาว
T	=	โมเมนต์บิด
J	=	โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว
ω	=	ความเร็วเชิงมุม
N	=	ความเร็วรอบ
W_p	=	กำลังงาน
n	=	ตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain Hardening Exponent)

การวิเคราะห์การจับยึดของดุมใบพัด

Analysis of Fan Hub Connection

คำนำ

อุตสาหกรรมภาคการผลิตในประเทศไทยมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ กระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะเป็นเทคโนโลยีการผลิตรูปแบบหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างหลากหลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตสั้น และยังสามารถผลิตได้ในปริมาณมากอีกด้วย กระบวนการอัดขึ้นรูปวัสดุนั้น มีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้วิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะนี้ได้นำมาใช้ในกระบวนการผลิตใบพัดแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Fan) โดยที่ส่วนดุมของใบพัดได้ใช้การอัดขึ้นรูปโลหะ เพื่อให้ส่วนของดุมยึดติดกับส่วนจานของใบพัด

ใบพัดเป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานกันอยู่ทั่วไป ในภาคอุตสาหกรรมมีการใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น การใช้ใบพัดเพื่อกวนผสมของเหลวเข้าด้วยกัน การใช้ใบพัดเพื่อสร้างแรงดันลมเพื่อนำไปใช้งานต่างๆ ในด้านการทำความเย็นใช้ใบพัดเพื่อส่งลมเย็นแก่ผู้ใช้งาน รวมถึงการใช้ใบพัดเพื่อการระบายความร้อนในรถยนต์ ในที่พักอาศัยใช้ใบพัดเพื่อการถ่ายเทอากาศทำให้เกิดการไหลเวียนอากาศที่ดีขึ้น ในปัจจุบันใบพัดรูปแบบต่างๆ สามารถผลิตขึ้นได้ภายในประเทศ ทำให้ลดการนำเข้าใบพัดจากต่างประเทศได้ อย่างไรก็ดี กระบวนการผลิตใบพัดภายในประเทศยังขาดความรู้ ความเข้าใจ ทางด้านหลักการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อใช้ในการออกแบบใบพัดให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งใบพัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ดุมของใบพัดถูกยึดติดกับตัวใบพัดโดยการอัดขึ้นรูปทำให้ตัวดุมเกิดแรงจับยึดกับตัวจานของใบพัด ซึ่งแรงจับยึดที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากความเค้นตกค้าง (residual stress) ภายในวัสดุ โดยแรงจับยึดที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับการเกิดแรงเสียดทานระหว่างตัวดุมและจานของใบพัดซึ่งเป็นไปตามกฎแรงเสียดทานของ Coulomb

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแรงจับยึดที่เกิดขึ้นที่ดุมของใบพัด และ ทำการพัฒนากระบวนการจับยึดให้ดุมใบพัดสามารถรับแรงบิดได้มากขึ้นโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับการทดลองจริง



ภาพที่ 1 รูปของใบพัดที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและวิเคราะห์หาแรงจับยึดในคัมล้อใบพัดลมกรงกระรอก
2. ปรับปรุงให้ตัวคัมสามารถรับแรงบิดได้มากขึ้น
3. เป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา และพัฒนาวิธีการจับยึดต่อไป

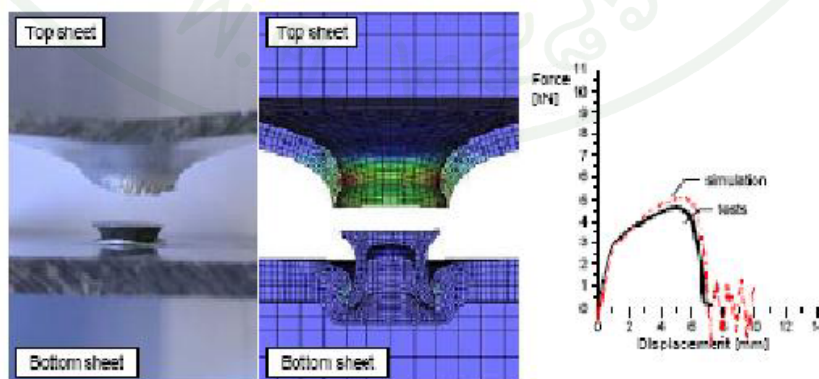
ขอบเขตของงานวิจัย

1. คัมใบพัดที่ใช้ในการศึกษาเป็นของใบพัดจากม่านอากาศ รุ่น XP809
2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาตัวคัมใบพัดเป็นเหล็กเพลลาขาว SS400 และ จานใบพัดเป็นเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีความหนา 0.8 มิลลิเมตร จำนวน 3 แผ่น
3. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างคัมใบพัดและจานใบพัดทุกผิวสัมผัส คิดเป็นแรงเสียดทานแบบสถิตย์ กำหนดให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็น 0.6
4. เครื่องมือที่ใช้ในแบบจำลองเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid Body)
5. ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่พิจารณาเรื่องการแตกร้าวของวัสดุ
6. ขอบเขตของการพัฒนากระบวนการจับยึด มุ่งเป้าหมายให้ตัวคัมสามารถรับแรงบิดเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น

การตรวจเอกสาร

การอัดยัดตัวคูลัมไบพอดนั้นได้ใช้กระบวนการทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (plastic deformation) ซึ่งเป็นหลักการขั้นพื้นฐานที่สำคัญเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบชิ้นงานที่เป็นโลหะ การวิเคราะห์การขึ้นรูปโลหะนั้น โดยส่วนมากจะอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบจำเป็นต้องใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมเป็นอย่างมาก ทำให้ยากที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาจริงในการขึ้นรูปโลหะ

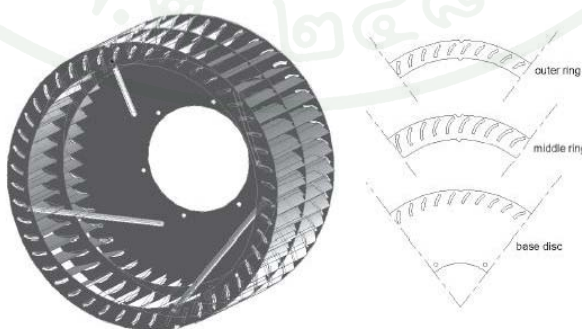
ในอดีตสมการเชิงคณิตศาสตร์ต่างๆที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของโลหะในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรมักจะเป็นสมการที่ซับซ้อนในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการในการหาคำตอบและจำลองพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปถาวรของโลหะได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้นวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการหาผลเฉลย และทำนายการเปลี่ยนรูปของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งได้มีนักวิจัยจำนวนมาก ใช้ผลเฉลยโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง R.Porcaro. และคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของหมุดย้ำขณะที่ถูกขึ้นรูป ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุในช่วงเปลี่ยนรูปถาวร โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เทียบกับการทดลองจริง และได้สร้างแบบจำลองการเสียรูปขึ้นในคอมพิวเตอร์ ภายใต้สภาวะการจับยึดของหมุดย้ำขณะที่ได้รับแรงดึงและแรงเฉือน ซึ่งหลังจากที่ได้ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์แล้ว ได้นำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสียรูป (deformation) ของหมุดย้ำ และแผ่นเหล็กพบว่าแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นเพื่อจำลองการเสียรูปของหมุดย้ำและแผ่นเหล็ก มีการเสียหายและเสียรูปไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองจริง



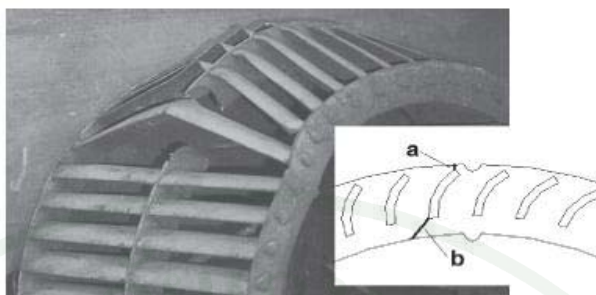
ภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองกับชิ้นงานทดลองจริง

จะเห็นว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เพียงแต่จำลองพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุ ยังสามารถวิเคราะห์แรงที่ใช้ในการจับยึด และแรงที่ใช้ในการดึงจนทำให้ชิ้นงานทดสอบเสียหายได้ อีกด้วย Juan Gabriel Monge Gapper (2005) ได้ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลทำให้ใบพัดแบบ Impeller Backward เกิดการเสียหาย โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นเกิดจากการขาดของตัวใบพัด ซึ่งในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ให้ความสนใจไปที่รอยบากที่มีบนแผ่น Base disc ,Middle ring และ Outer ring ซึ่งเป็นรอยที่เกิดจากกระบวนการผลิต ทางผู้วิจัยคาดว่าจะจะเป็นจุดที่เกิดความเค้นหนาแน่น (Stress Concentration) ที่บริเวณดังกล่าว และการเกิดสนิมที่ตัวใบพัดที่บริเวณ Middle ring ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการแตกร้าว หลังจากที่ได้ทำการสร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ และนำแบบจำลองไปทำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้น มีความแข็งแรงมากกว่าตัวชิ้นงานจริงเล็กน้อย พบว่าบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดไม่ได้เกิดที่รอยบากที่แผ่นเพลททั้ง 3 แผ่น และ ผู้วิจัยได้สรุปสาเหตุของการเสียหายของใบพัดไว้โดยแบ่งเป็นกรณี คือ กรณีแรก การผิดพลาดจากการออกแบบ ซึ่งหลังจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำให้ทราบว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 570 MPa ซึ่งยังไม่เกินค่าความแข็งแรงของวัสดุ จึงสรุปได้ว่าการที่ใบพัดเสียหายไม่ได้เกิดขึ้นจากการออกแบบ และไม่ได้เกิดขึ้นจากความแข็งแรงของวัสดุ

กรณีที่สอง การสั่นสะเทือน (Vibration) จากการใช้งาน หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของใบพัดจากสภาวะการใช้งานปกติ 1650 rpm (27,15Hz) ไม่ได้เป็นสาเหตุที่ทำให้ใบพัดเกิดการเสียหาย และได้ทำการเพิ่มความถี่มากขึ้นมากกว่าการใช้งานปกติที่ 116,2-145,05 Hz ใบพัดจึงเริ่มเสียหาย ส่วนปัจจัยที่ทำให้ใบพัดได้รับการ



ภาพที่ 3 แสดงตำแหน่งของแผ่นเพลทในใบพัดที่ทำการวิเคราะห์



ภาพที่ 4 แสดงบริเวณที่เกิดความเสียหายของใบพัด

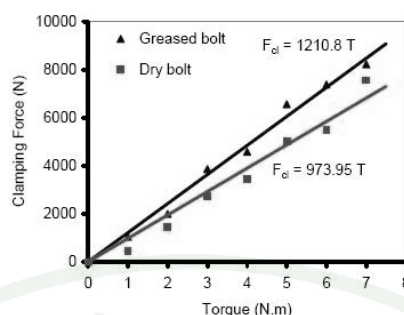
ความเสียหายจากการที่บางส่วนของใบพัด เป็นสนิม ทำให้เกิดความเค้นหนาแน่น (Stress Concentrate) ที่บริเวณดังกล่าว จึงทำให้ใบพัดได้รับความเสียหาย

แรงจذبที่เกิดขึ้นที่วัสดุเป็นเรื่องยุ่งยากในการตรวจสอบ E. Hemmati Vand และ R. H. Oskouei ได้ทำการออกแบบการทดลองการตรวจสอบแรงที่ใช้จذبชิ้นงานโดยใช้สลักเกลียวกับแป้นเกลียว ทำการเพิ่มแรงบิดโดยการขันแป้นเกลียว การออกแบบการทดลองเป็นไปตามกฎของฮุก โดยทำการวัดแรงกดที่เกิดขึ้นตามแนวแกน ซึ่งจะใช้ปลอกเหล็กคั่นกลางระหว่างชิ้นงาน ทดสอบกับแป้นเกลียว โดยที่ตัวปลอกเหล็กจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงที่ใช้ในการจذب (Load Cell) เพื่อทำการตรวจสอบแรงจذبที่เพิ่มขึ้น

วัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะการจذبชิ้นงานที่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มแรงกดที่แป้นเกลียว และศึกษาถึงการเติมสารหล่อลื่นที่สลักเกลียว ซึ่งมีผลทำให้แรงจذبชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



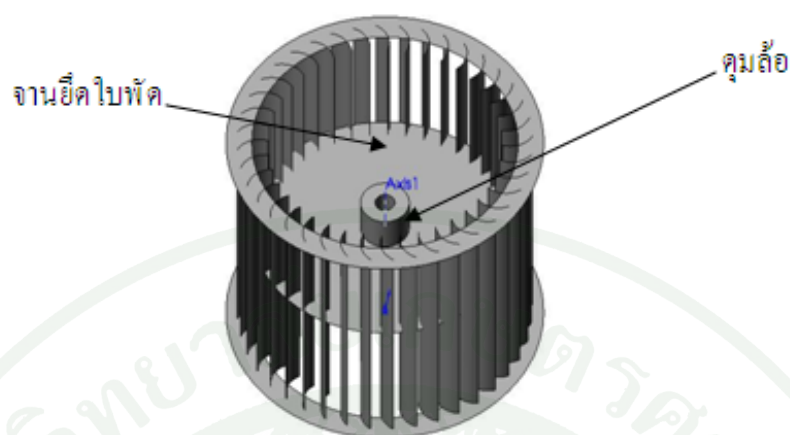
ภาพที่ 5 แสดงการติดตั้งLoad Cell ที่แป้นเกลียวกับสลักเกลียว



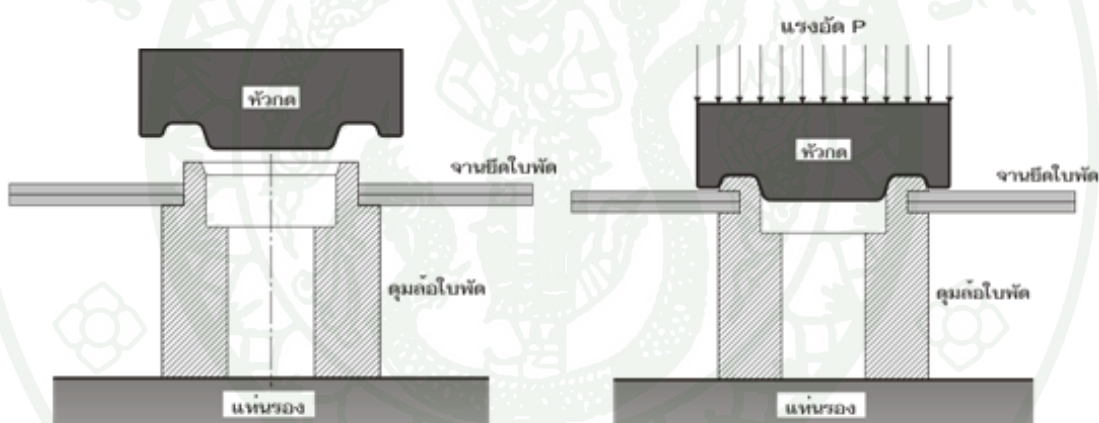
ภาพที่ 6 แสดงตารางการเปรียบเทียบของแรงบิดและแรงจับยึดระหว่างการเติมสารหล่อลื่นกับการไม่เติมสารหล่อลื่น

อุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะในประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ มีการผลิตชิ้นส่วนที่มาจากการขึ้นรูปโลหะเป็นจำนวนมาก เป็นเหตุให้ต้องมีการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของโลหะชนิดต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางกลในช่วงพลาสติก เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบหรือเลือกใช้วัสดุ และการเลือกกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่เหมาะสม ประหยัดมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย การเปลี่ยนรูป (deformation) ของโลหะนั้น อาจแบ่งได้เป็นสองลักษณะ คือ การเปลี่ยนรูปที่ขึ้นกับเวลา (creep) และการเปลี่ยนรูปที่ไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งแบ่งได้เป็นสองช่วงคือ การเปลี่ยนรูปช่วงยืดหยุ่น (elastic) และการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก (plastic) ขณะที่วัสดุถูกแรงภายนอกมากระทำ วัสดุจะเริ่มยืดตัว ทำให้รูปร่างเปลี่ยนไปจากเดิม เมื่อแรงภายนอกที่กระทำกับวัสดุมากเกินค่าความเค้นครากของวัสดุ (yield stress) ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของวัสดุจะไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป (non linear) ในวัสดุบางชนิดเมื่อได้รับแรงเกินค่าความเค้นคราก วัสดุอาจเกิดการยืดตัวออก โดยที่แรงภายนอกที่กระทำกับวัสดุยังคงที่ พฤติกรรมของวัสดุในลักษณะนี้ เป็นพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปถาวรสมบูรณ์ (perfectly plastic) หรือพลาสติกสมบูรณ์

ในกระบวนการผลิตใบพัดจะใช้การอัดขึ้นรูปตัวคัมให้เกิดแรงจับยึดเข้ากับตัวงานใบพัด ซึ่งในขณะที่ตัวคัมใบพัดถูกอัดขึ้นรูป พฤติกรรมของวัสดุในช่วงนี้จะเกิดการเปลี่ยนรูปถาวร



ภาพที่ 7 วงล้อใบพัดทรงกระบอก



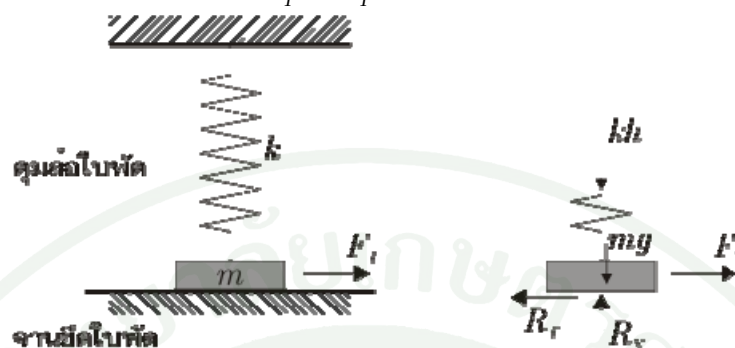
ภาพที่ 8 ขั้นตอนการประกอบค้อนใบพัดของพัลลมกรรกระรอก

(ก) การประกอบค้อนเข้ากับจานยึดใบพัด ก่อนทำการอัด (ข) การอัดค้อนเข้ากับจานยึดใบพัด

กลศาสตร์ระหว่างค้อนกับจานสามารถจำลองได้ดังแสดงตามรูปที่ 3 แรงกดที่ตัวค้อนกระทำกับผิวจานนั้นแทนด้วย R_N โดยที่ kh นั้นเทียบได้กับแรงภายในเนื้อวัสดุของค้อน F_r เทียบได้กับแรงในแนวสัมผัสที่เป็นผลมาจากแรงบิด และ R_t เป็นแรงเสียดทานระหว่างผิวค้อนกับจาน จากการทำสมมูลจะได้ว่า

$$R_N - mg - kh = 0 \quad (1)$$

$$F_T - R_T = 0 \quad (2)$$



ภาพที่ 9 แบบจำลองทางกลศาสตร์ของตุ้มล้อยืดและจานยึด

สำหรับแรงเสียดทาน R_T แบบจำลองที่ใช้โดยทั่วไปทางวิศวกรรมคือ "กฎของ Coulomb" ซึ่งแรงเสียดทานจะแปรผันตรงกับแรงกด R_N ตามสมการ

$$R_T \leq \mu R_N \quad (3)$$

โดย μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยวัตถุจะเริ่มไถลเมื่อ

$$F_T = \mu R_N \quad (4)$$

ดังนั้น จากสมการ (1) และ (4) ที่กล่าวมาข้างต้น ถ้าไม่พิจารณาถึงน้ำหนัก, mg จะเห็นได้ว่าการไถลของตุ้มล้อยืดกับจานยึดนั้นขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน μ , และแรงภายในเนื้อวัสดุ kh ซึ่งแรงภายในเนื้อวัสดุนี้เป็นผลมาจากความเค้นดักค้ำที่เกิดจากการอัดขึ้นรูปตุ้มยึด

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การบิด

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด(torque)จะบิดไปเป็นมุมเท่ากับ

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (5)$$

โดยที่

T คือ โมเมนต์บิด

L คือ ความยาว

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่ (polar area moment of inertia)

$$= \frac{\pi}{32} d^4 \text{ สำหรับท่อกลมตัน} \quad (6)$$

$$= \frac{\pi}{32} (d^4 - d_i^4) \text{ สำหรับท่อกลมกลวง} \quad (7)$$

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

เราสามารถคำนวณหาโมเมนต์บิดสำหรับเครื่องจักรกลที่ส่งกำลังมาตามเพลลาได้จาก

$$W_p = T\omega = 2\pi nT \quad (8)$$

โดยที่

W_p คือ กำลังงานเป็น W

T คือ โมเมนต์บิดเป็น Nm

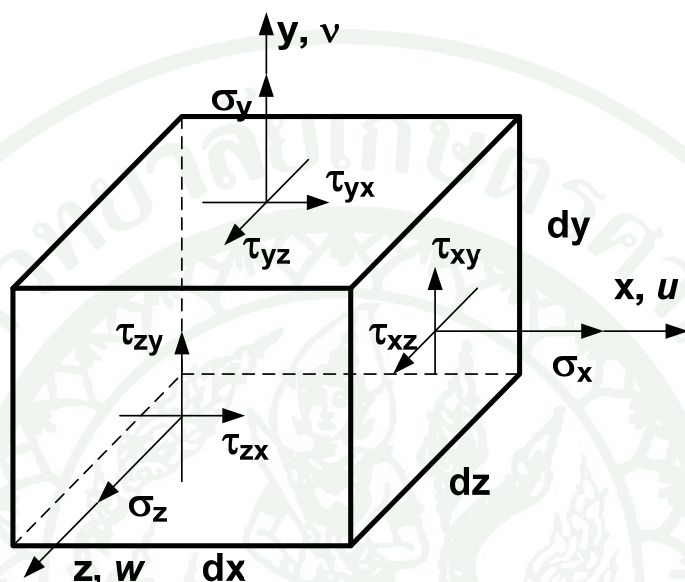
ω คือ ความเร็วเชิงมุมเป็น rad/s

n คือ ความเร็วรอบ rev/s

ความเค้นในระบบประสานสามมิติ

พิจารณาระบบความเค้นในระบบประสานสามมิติบนวัสดุที่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็ก ๆ ดังแสดงในภาพที่ 10 จะประกอบด้วยความเค้นฉากซึ่งเป็นความเค้นดึงสามค่า คือ σ_x σ_y และ σ_z และ

ความเค้นเฉือนอีกหกค่า คือ τ_{xy} τ_{xz} τ_{yx} τ_{yz} τ_{zx} และ τ_{zy} โดยจะมีความเค้นทั้งหมดมีค่าเป็นบวก และจากสภาวะสมดุลทางสถิต (static equilibrium) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้



ภาพที่ 10 ความเค้นในระบบพิกัดสามมิติ

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (9)$$

เครื่องหมายของ σ และ τ ซึ่งกระทำบนระนาบหนึ่งๆ นั้นสามารถพิจารณาได้โดย หากเป็นความเค้นจากที่เป็นความเค้นดึงพบว่า σ มีเครื่องหมายเป็นบวก ส่วนความเค้นเฉือน τ นั้นจะมีอักษรตัวห้อย 2 ตัว ซึ่งอักษรตัวแรกแสดงถึงทิศทางของแกนที่ตั้งฉาก และอักษรตัวห้อยตัวที่สองแสดงถึงทิศทางของความเค้นเฉือนที่ขนานกับแกนนั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเคลื่อนที่สามารถจัดภาพสมการ คือ

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (10)$$

โดยกำหนดให้ u , v และ w คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ซึ่งจะสัมพันธ์โดยตรงกับแกน x , y และ z และสามารถหาความเครียดเฉือน (γ) โดยการจัดภาพสมการใหม่ดังสมการ (11)

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{yx} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \gamma_{zy} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_{xz} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

จากความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน สามารถจัดสมการเป็นภาพเมทริกซ์ได้ดัง สมการ (12)

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

จัดภาพสมการใหม่ของความสัมพันธ์ของความเค้นความเครียดสำหรับวัสดุไอโซโทรปิก

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (13)$$

โดยที่ $\{\sigma\}$ และ $\{\varepsilon\}$ หาได้จากสมการที่ (13) และสามารถหา $[D]$ ได้จากสมการที่ (14)

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \\ \text{symmetry} & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

ความเค้นและความเครียด

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวรนั้น เราจะกำหนดเป็นกราฟที่เรียกว่า Flow Curve ซึ่งหาได้จากการคำนวณหาค่าความเค้นและความเครียดจริง โดยใช้พื้นที่และความยาวที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละขณะของแรงดึง ถ้าเรากำหนดให้

$\tilde{\sigma}$ = ความเค้นจริง

จากสมการพื้นฐาน
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (16)$$

จะได้
$$\tilde{\sigma} = \frac{P}{A} \quad (17)$$

หรืออยู่ในรูปของสมการ $\tilde{\sigma} = \sigma \left[\frac{A_i}{A} \right]; \left[\frac{A_i}{A} \right]$ มีค่า < 1 เสมอ

A = พื้นที่หน้าตัดใดๆ

A_i = พื้นที่หน้าตัดเดิม

σ = ความเค้นเฉลี่ย

P = แรงที่กระทำบนชิ้นงานทดสอบ

ความเครียดจริง ($\tilde{\varepsilon}$)

เมื่อเราพิจารณาที่ความยาวใดๆ ที่เพิ่มขึ้น เช่น $\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3, \Delta L_j$ และให้ความยาวเดิมเป็น L_1, L_2, L_3, L_j ซึ่งเราจะหาความเครียดจริงได้จากผลรวมที่เกิดขึ้น

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2} + \frac{\Delta L_3}{L_3} + \dots = \sum \frac{\Delta L_j}{L_j} \quad (18)$$

หรือมีการเปลี่ยนแปลงความยาวที่น้อยมากๆ เราจะได้สมการความสัมพันธ์ความเครียดจริงได้ดังนี้

$$\tilde{\varepsilon} = \int_{L_i}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_i} \quad (19)$$

ความยาวสุดท้ายของชิ้นทดสอบ $= L = L_i + \Delta L$

แต่เนื่องจากความเครียดเฉลี่ย $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i}$ (20)

ดังนั้น $\tilde{\varepsilon} = \ln \frac{L_i + \Delta L}{L_i}$ (21)

$$= \ln \left[1 + \frac{\Delta L}{L_i} \right] \quad (22)$$

$$= \ln(1 + \varepsilon) \quad (23)$$

ซึ่งในกรณีของการขึ้นรูปโลหะ ปริมาตรของโลหะก่อนและหลังขึ้นรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นจะสมมติให้ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงคือ $A_i L_i = AL$

หรือ $\frac{A_i}{A} = \frac{L}{L_i}$ (24)

$$= \frac{L_i + \Delta L}{L_i} \quad (25)$$

$$= 1 + \varepsilon \quad (26)$$

จากสมการ

$$\tilde{\sigma} = \sigma \left[\frac{A_i}{A} \right] \quad (27)$$

แทนค่า $\frac{A_i}{A} = 1 + \varepsilon$ (28)

เราจะได้สมการ $\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon)$ (29)

และจากสมการ $\tilde{\varepsilon} = \ln \frac{L}{L_i}$ (30)

เราจะได้สมการ $\tilde{\varepsilon} = \ln \frac{A_i}{A}$ (31)

ถ้ากรณีที่ชิ้นงานเกิดขาดออกจากกัน เราก็สามารถคำนวณหาความเค้นจริงและความเครียดจริงได้จาก

$$\tilde{\sigma}_f = \frac{P_i}{A_f} \quad (31)$$

$$\sigma_f = \left(\frac{A_i}{A_f} \right) \quad (32)$$

โดยที่ $A_f =$ พื้นที่หน้าตัดที่ขาดออกจากกัน

$$\tilde{\varepsilon}_f = \ln \frac{A_i}{A_f} \quad (33)$$

ในทำนองเดียวกันความเค้นสูงสุดสามารถคำนวณได้จาก

$$\tilde{\sigma}_u = \frac{P_{\max}}{A_u} \quad (34)$$

$$\tilde{\sigma}_u = \sigma_u \left(\frac{A_i}{A_u} \right) \quad (35)$$

A_u = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะที่แรงดึงเท่ากับ $P_{\max}$
ส่วนความเค้นเครียดสูงสุดหาได้ดังนี้คือ

$$\tilde{\varepsilon}_u = \ln \frac{A_i}{A_u} \quad (36)$$

ความเครียดแข็ง (Strain Hardening)

ความเครียดแข็งเกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานทดสอบได้รับแรงดึงมากกว่าแรงที่จุดคราก วัสดุจะเริ่มเปลี่ยนรูป ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกและอะตอมในเนื้อชิ้นงานทดสอบ มีผลทำให้ชิ้นงานทดสอบสามารถอัตรรับแรงดึงได้มากขึ้น ซึ่งเราเรียกว่าเกิด ความเครียดแข็งในเนื้อวัสดุ ความสัมพันธ์ของความเค้นจริง และความเครียดจริง ในช่วงเหนือจุดครากหรือในช่วงของการยืดตัวถาวร อาจจะแทนด้วยสมการ

$$\tilde{\sigma} = H \tilde{\varepsilon}^n \quad (37)$$

n คือ ตัวเลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain Hardening Exponent)

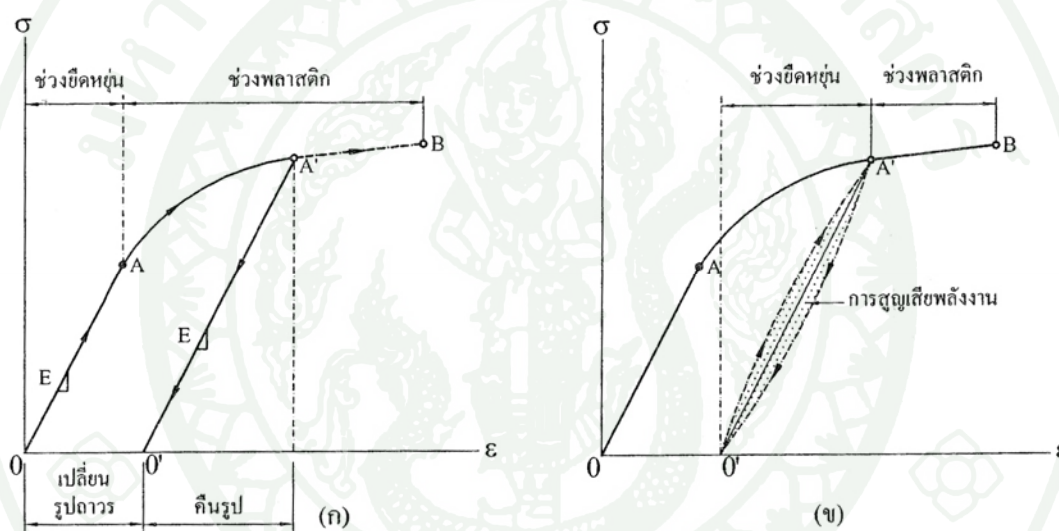
H คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุทดสอบ

ความเครียดคืนรูปและความเครียดตกค้าง

ในกรณีของการทดสอบแรงดึงของโลหะเหนียว ถ้าเราเพิ่มแรงดึงจนถึงช่วงพลาสติก เช่นที่จุด A' ในภาพที่ 11 (ก) แล้วค่อยๆลดแรงดึงเหลือศูนย์ ความเครียดส่วนหนึ่งจะคืนสู่สภาพเดิมหรือสภาพสมดุล เราเรียกว่า ความเครียดคืนรูป (recovery strain) และความเครียดอีกส่วนหนึ่งยังคง

ตกค้างอยู่หลังจากเอาแรงดึงออก เราเรียกว่า ความเครียดตกค้าง หรือ ความเครียดพลาสติก (residual strain หรือ plastic strain) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรขึ้น และเรียกส่วนที่ยึดถาวรว่า permanent set

จากภาพที่ 11(ก) จะเห็นว่าขณะที่เพิ่มแรงดึงจากจุดคราก A จนถึงจุด A' แรงดึงกล่าวจะมีค่าสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของโลหะ และขณะที่เอาแรงดึงออกอะตอมจะเคลื่อนที่หากันด้วยแรงขนาดเท่ากับแรงดึง ดังนั้นค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น E จะมีค่าเท่าเดิม ความลาดของเส้น A'O' จึงเท่ากับเส้น OA



ภาพที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในระหว่าง

(ก) การให้แรงดึงและลดแรงดึง (ข) การให้แรงดึง,ลดแรงดึงและเพิ่มแรงดึงใหม่

ในกรณีที่เพิ่มแรงดึงใหม่ วัสดุจะยืดตัวตามแนวลาดเดิมจนถึงจุดครากใหม่ ซึ่งอาจจะมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุด A' หรือสูงกว่า และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะเป็นเส้นโค้ง O'A'B ดังแสดงในรูป โดยมีจุดครากใหม่ที่จุด A' ซึ่งสูงกว่าจุดครากเดิม A ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุได้เปลี่ยนโครงสร้างอะตอมที่สามารถรับแรงได้มากขึ้นหรือแข็งแรงขึ้น (hardening) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ วัสดุสามารถดูดซับพลังงานได้สูงขึ้น แต่ความสามารถยืดตัวจะลดลง

เนื่องจากในระหว่างการลดแรงดึงจาก A' ไปยัง O' และเพิ่มแรงดึงจาก O' ไปยัง A' จะมีการสูญเสียพลังงานหรือความร้อน เส้นจาก A' ไปยัง O' และแนวเส้นจาก O' ไปยัง A' จึงเป็นเส้นโค้งตามแนวไขว้ปลา เราเรียกพื้นที่ภายในกรอบเส้นไขว้ปลาทั้งสองว่า mechanical hysteresis คือเป็นพลังงานหรือความร้อนที่สูญเสียระหว่างการลดแรงดึงและการเพิ่มแรงดึงในขึ้นทดสอบ แต่ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปถาวรจะไม่พิจารณาการสูญเสียดังกล่าว และ สมมติให้แนว A'O' เป็นเส้นตรง

ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก

ในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ จำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกของโลหะ โดยใช้ผลจากการทดสอบแรงดึงและแรงอัด แล้วมาสร้างกราฟในรูปของ Flow Curve ซึ่งจะแทนด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์

$$\varepsilon = \int (\sigma) \quad (38)$$

โดยทั่วไปทฤษฎีของการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกเรียกว่า ทฤษฎีพลาสติก มักมี 2 ทฤษฎี คือ ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Deformation Theory) และอีกทฤษฎีหนึ่ง คือ ทฤษฎีพลาสติกส่วนย่อย (Incremental Plasticity Theory) ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะใช้ทฤษฎีการเปลี่ยนรูป (Deformation Theory) ในการทำนายการเปลี่ยนรูปของโลหะ ในขณะที่เปลี่ยนทิศทางของแรงดึงเป็นแรงอัด หรือจากความเค้นดึงเป็นความเค้นอัดนั้นเราจะใช้กฎของ Kinematic Hardening คือ ความแตกต่างของความเค้นสูงสุด ($\Delta\sigma$), (ก่อนลดแรงดึง) และความเค้นครากที่จุดใหม่ (แรงอัด) จะเป็นสองเท่าของความเค้นครากเดิม (σ_o) หรือ เขียนอยู่ในรูปของสมการได้ว่า

$$\Delta\sigma = 2\sigma_o \quad (39)$$

หรืออาจจะใช้กฎของ Isotropic Hardening โดยจะให้ความแตกต่างของความเค้นดังกล่าวเท่ากับสองเท่าของความเค้นสูงสุด σ' ก่อนที่จะลดแรงดึงหรืออยู่ในสมการคือ

$$\Delta\sigma = 2\sigma_o \quad (40)$$

อย่างไรก็ตามพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปที่เป็นไปตามกฎของ Kinematic Hardening จะให้ผลที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของการขึ้นรูปโลหะที่มีลักษณะสองและสามมิติ

สมการ Levy – Mises

เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด ในช่วงพลาสติก ไม่นำความเครียดในช่วงยืดหยุ่นมาพิจารณา ซึ่งเราอาจเรียกว่า กฎการไหล (Flow Rule) หรือเรียกอีกหนึ่งว่า “Ideal Plastic Solid” ซึ่งเมื่อเราพิจารณา ชิ้นงานที่รับแรงดึงทิศทางเดียว เช่น ทิศทาง x ดังนั้น ความเค้นในแนวแกน x ($\sigma_1 \neq 0$) จะไม่เท่ากับศูนย์ ส่วนความเค้นในแนวแกน y และแกน z ($\sigma_2 = \sigma_3$) จะมีค่าเท่ากัน และทราบว่าความเค้นเฉลี่ย $\sigma_m = \frac{\sigma_1}{3}$ และเราทราบว่าความเค้นเบี่ยงเบนเท่านั้น ที่จะทำให้ชิ้นงานเปลี่ยนรูป

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{kk}}{3}$$

$$= \frac{\sigma_{kk} + \sigma_y + \sigma_z}{3}$$

$$\sigma'_{if} = \begin{bmatrix} \frac{2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z}{3} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \frac{2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x}{3} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \frac{2\sigma_z - \sigma_x - \sigma_y}{3} \end{bmatrix}$$

σ'_{if} = ความเค้นเบี่ยงเบน (Deviatoric Stresses) ประกอบไปด้วยความเค้นฉากและความเค้นเฉือน

ในกรณีที่ชิ้นงานรับแรงในแนวแกน x แกนเดียว (Uniaxial) ค่าความเบี่ยงเบน ในแนวแกน x จะมีค่าดังต่อไปนี้

$$\sigma'_x = \sigma_x - \sigma_m$$

$$= \sigma_x - \frac{\sigma_x}{3}$$

$$= \frac{2\sigma_x}{3}$$

$$\sigma'_y = \sigma'_y = -\frac{\sigma_x}{3}$$

$$\sigma'_z = 2\sigma'_y = -2\sigma'_y$$

ส่วนสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสามมิติ ในช่วงพลาสติก สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon_{px} = \frac{1}{E_p} [\sigma_x - 0.5(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_{py} = \frac{1}{E_p} [\sigma_y - 0.5(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_{pz} = \frac{1}{E_p} [\sigma_z - 0.5(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\tau_{pxy} = \frac{3}{E_p} \tau_{xy}, \tau_{pyz} = \frac{3}{E_p} \tau_{yz}, \tau_{pzx} = \frac{3}{E_p} \tau_{zx}$$

สามารถหาความเครียดส่วนย่อยในช่วงพลาสติก ε_{px} , ε_{py} และ ε_{pz}

$$d\varepsilon_{px} = \frac{\sigma_x}{E_p}, d\varepsilon_{py} = d\varepsilon_{pz} = \frac{-\sigma_x}{2E_p}$$

$$\therefore d\varepsilon_{px} = -2d\varepsilon_{py} = -2d\varepsilon_{pz}$$

$$\frac{d\varepsilon_{px}}{d\varepsilon_{py}} = -2 = \frac{\sigma'_x}{\sigma'_y}$$

หรือ

$$\frac{d\varepsilon_{px}}{\sigma'_x} = \frac{d\varepsilon_{py}}{\sigma'_y} = \frac{d\varepsilon_{pz}}{\sigma'_z} = d\lambda$$

$d\lambda$ = สัดส่วนของความเครียดและความเค้นซึ่งมีค่าคงตัวและเป็นบวก ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงใดๆของการเปลี่ยนรูป อัตราส่วนของความเครียดพลาสติกย่อยและความเค้นเบี่ยงเบนในทิศทางเดียวกันจะมีค่าคงตัว

สำหรับกรณีระบบแกนหลัก (System of Principal Axes)

$$\sigma'_x = \frac{2\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z}{3}$$

$$\sigma'_x = \frac{2}{3} \left[\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \right]$$

$$\sigma'_x = \frac{2}{3} (\tau_z + \tau_y)$$

จากสมการ

$$d\varepsilon_{px} = \frac{2}{3} d\lambda \left[\frac{\sigma_x (\sigma_y + \sigma_z)}{2} \right]$$

ในกรณีของความเครียดประสิทธิผลส่วนย่อยในช่วงพลาสติก

$$d\tilde{\varepsilon}_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{((d\varepsilon_{px} - d\varepsilon_{py})^2 + (d\varepsilon_{py} - d\varepsilon_{pz})^2 + (d\varepsilon_{pz} - d\varepsilon_{px})^2)}$$

หรือ

$$d\tilde{\varepsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_{px}^2 + \varepsilon_{py}^2 + \varepsilon_{pz}^2)}$$

ซึ่งสามารถหา $d\lambda$ ในเทอมของความเค้นและความเครียดประสิทธิผลได้ดังนี้

$$d\tilde{\varepsilon}_p = d\lambda \tilde{\sigma}$$

หรือ

$$d\lambda = d\tilde{\varepsilon}_p \sqrt{\sigma}$$

แทนค่า $d\lambda$ ในสมการ

ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดส่วนย่อยและความเค้นหลัก σ_x, σ_y และ σ_z คือ

$$d\varepsilon_{px} = \frac{d\tilde{\varepsilon}_p}{\tilde{\sigma}} \left[\sigma_x - \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z) \right]$$

$$d\varepsilon_{py} = \frac{d\tilde{\varepsilon}_p}{\tilde{\sigma}} \left[\sigma_y - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_z) \right]$$

$$d\varepsilon_{pz} = \frac{d\tilde{\varepsilon}_p}{\tilde{\sigma}} \left[\sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \right]$$

ซึ่งเราเรียกสมการข้างบนนี้ว่า “กฎการไหลของของแข็ง”

ทฤษฎีการครากของ Von Mises

ทฤษฎีการครากของ Von Mises หรือเรียกว่า ทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Energy Theory) เป็นทฤษฎีที่ใช้การทำนายการแตกหัก โดยใช้หลักการความเค้นเบี่ยงเบน กล่าวคือ ให้ชิ้นงานทดสอบเป็นวัสดุยืดหยุ่นอยู่ภายใต้ความดัน (แรงกดหรือแรงดึง) ที่กระจายสม่ำเสมอ โดยที่วัสดุสามารถรับแรงได้มากกว่าชิ้นงานทดสอบที่มีแรงดึงหรือแรงอัดกระทำตามวิธีทดสอบแบบ

ธรรมดา สามารถรับแรงได้มากขึ้นซึ่งอาจเกิดจากการการแปรรูปของพลังงานในเนื้อวัสดุ วัสดุจะเริ่มเสียรูป โดยที่พลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ

ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปส่วนย่อย

เมื่อวัสดุเริ่มได้รับแรงกระทำ ในช่วงแรกวัสดุจะเริ่มเปลี่ยนรูป ซึ่งจะเรียกว่าการเปลี่ยนรูปในช่วงอีลาสติก ถ้าให้แรงกระทำกับวัสดุต่อไปจนเกินความเค้นครากของวัสดุ วัสดุก็จะเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก โดยรวมแล้วสามารถแบ่งการเปลี่ยนรูปของวัสดุได้สองส่วนคือ การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นและการเปลี่ยนรูปในช่วงถาวร ส่วนทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายการเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติกนี้เรียกว่า ทฤษฎีพลาสติก ซึ่งนิยมใช้กันสองทฤษฎีคือ ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปถาวร (Deformation Theory) หรือเรียกอีกชื่อว่า ทฤษฎีความเครียดรวมช่วงพลาสติก (Total Strain Theory of Plasticity) ส่วนอีกทฤษฎีคือ ทฤษฎีพลาสติกส่วนย่อย (Incremental Plastic Theory) ซึ่งใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงอีลาสติกและพลาสติก สามารถอธิบายได้โดยสมการของเลวี-มิเชล (Levy-Mises) และให้ผลการทำนายการทำนายการเปลี่ยนรูปได้ถูกต้องมากกว่าด้วย

การวิเคราะห์การดัดขึ้นรูป

การหาโมเมนต์ดัดและโหลดหรือแรง ในกรณีที่ต้องการดัดโลหะแผ่นบางให้โค้งงอหรือโค้งเท่ากับรัศมี R การดัดขึ้นรูปลักษณะนี้จำเป็นจะต้องให้โหลดหรือแรงดัดอย่างน้อยเท่ากับแรงที่ทำให้เนื้อโลหะเกิดการคราก หรือเนื้อโลหะบริเวณที่ถูกดัดเริ่มถึงจุดพลาสติกสมบูรณ์ตลอดหน้าตัดของชิ้นงาน โดยทั่วไปถ้ารัศมี R มีค่าน้อย ความหนาบริเวณส่วนโค้งจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาเดิม (t)

การวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูปโลหะ

ทฤษฎีในการวิเคราะห์ขบวนการขึ้นรูปโลหะที่ได้มีการพัฒนาและเป็นที่นิยมนั้น มีอยู่หลายวิธี เช่น วิธี Slab Method, Slip-Line Field Method, Viscoplasticity Method, Upper and Lower Bound Techniques, Hill's General Method และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) เนื่องจากได้มีการพัฒนานำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ จึงทำให้

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมใช้กันมาก และสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง ซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการเริ่มต้น โดยในปี ค.ศ.1940 ได้มีการนำแนวคิดทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์ปัญหาความเค้นในมิติเดียว เช่น ความเค้นในท่อนโลหะและคาน แต่ในช่วงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ต่อมาในปี ค.ศ.1954 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงได้รับความนิยมมากขึ้น โดย Turner, Clough, Martins และ Topp ได้นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ปัญหาสองมิติเป็นครั้งแรก โดยแสดงวิธีการหาสตีฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์สองมิติแบบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมในปัญหาโครงข้อหมุนของเอลิเมนต์คาน ซึ่งสมมุติเป็นฟังก์ชันการกระจัด เรียกกันโดยทั่วไปว่า วิธีสตีฟเนสโดยตรง(Direct Stiffness Method) และรวมสตีฟเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นสตีฟเนสเมทริกซ์ของโครงสร้างทั้งระบบ ในปี ค.ศ. 1960 Clough ได้พัฒนานำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์ปัญหาความเค้นระนาบในงานวิจัยเป็นครั้งแรกโดยใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมมุมฉากซึ่งการเปลี่ยนรูปของวัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Linearity) โดยมีความเครียดและการกระจัดน้อย ต่อมาทฤษฎีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความสนใจมากขึ้นและได้พัฒนาใช้หลักการต่างๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีการเปลี่ยนรูปของวัสดุอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้นได้ (Non-Linearity) โดยมีความเครียดและการกระจัดมาก ปัจจุบันวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง ซึ่งมีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จัดพิมพ์เป็นหนังสือมากมายและมีการสอนในหลักสูตรการเรียนในมหาวิทยาลัยต่างๆ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับการพัฒนาและประยุกต์ในการวิเคราะห์ปัญหาทางโครงสร้าง ถึงความคืบหน้า การไหลตัวของลมหรือของเหลว การนำความร้อน การเปลี่ยนรูปของโลหะก้อนหรือโลหะแผ่น การลั่นสะเทือน พลังสนามแม่เหล็ก ปฏิกิริยาของอนุภาคทางชีวและเคมี ซึ่งมีประโยชน์มากด้านการศึกษา

ในอดีตการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปถาวรของโลหะเพื่อหาโหลด และการศึกษาการไหลตัวของโลหะจะนิยมใช้วิธีออฟเพอร์แบนด์ แต่ในปัจจุบันมักนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากขึ้นทั้งนี้เพราะสามารถจะวิเคราะห์ปัญหาสองและสามมิติที่ซับซ้อนได้สะดวกกว่าวิธีออฟเพอร์แบนด์อย่างไรก็ตามพื้นฐานที่สำคัญของการวิเคราะห์การเปลี่ยนรูปด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นก็มาจากสมการต่างๆ ของวิธีออฟเพอร์แบนด์และลักษณะของการวิเคราะห์ปัญหาคู่ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มักจะไม่พิจารณาความเครียดในช่วงยืดหยุ่น คือ จะพิจารณาเฉพาะความเครียดในช่วงพลาสติกโดยจะสมมุติให้วัสดุมีพฤติกรรมแบบแข็งเกร็ง-พลาสติกสมบูรณ์ (R-PP) หรือแบบแข็งเกร็ง-วิสโคพลาสติก (rigid-viscoplastic, R-VP) และเรียกการวิเคราะห์ในลักษณะนี้ว่า flow formulation

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นมักประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่างๆกันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น ผลเฉลยแม่นยำตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาผลเฉลยแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าต่างๆจำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่าเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (elements) ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ยังบ่งชี้เป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (satisfy) กับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงไปในระบบสมการรวมนี้ก่อนทำการแก้ทั้งระบบสมการดังกล่าว เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. แบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ เช่น ปัญหาความล้าของวัสดุ ปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งปัญหาด้านการไหล เป็นต้น

2. การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม โดยที่จุดต่อเป็นตำแหน่งที่ตั้งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 , และ ϕ_3 ตามลำดับ ตัวไม่รู้ค่าที่เป็นจุดต่ออาจเป็นค่าของการเสียรูป (Displacement) หากเราวิเคราะห์ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็งหรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิหากเราทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

หรืออาจเป็นความเร็วของของไหลหากเราวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ คือ

$$\phi(x,y) = N_1(x,y) \phi_1 + N_2(x,y) \phi_2 + N_3(x,y) \phi_3 \quad (41)$$

โดย $N_i(x,y)$, $i=1,2,3$ แทนฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์
สมการที่(5) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ คือ

$$\begin{aligned} \phi(x,y) &= \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} N \end{bmatrix} \{ \phi \} \\ &\quad (1 \times 3) \quad (3 \times 1) \end{aligned} \quad (42)$$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์และ $\{\phi\}$ แทนเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น สัญลักษณ์ $[\]$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวอน(row metrix) และ $\{ \}$ แสดงถึงเมทริกซ์แถวตั้ง (column matrix) ที่เรียกกันว่าเวกเตอร์

3. การสร้างสมการเอลิเมนต์ (element equations) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยม จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (43)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{ \phi \}_e = \{ F \}_e$$

ขั้นตอนที่ 3 นี้ถือเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ(7) สามารถทำได้โดย

ก.วิธีการ โดยตรง(direct approach)

ข.วิธีการแปรผัน(variational approach)

ค.วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals)

4. การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการรวม (system of simultaneous equation) ในรูปแบบดังนี้

$$\sum (\text{element equations}) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (44)$$

5.ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ลงในระบบสมการรวม(8) แล้วจึงแก้สมการรวมนี้เพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ โดยประกอบไปด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ (nodal unknowns) ซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่อต่างๆของโครงสร้าง หรือเป็นค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อ หากเป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลตามจุดต่อหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับการไหล เป็นต้น

6. เมื่อคำนวณค่าต่างๆที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าอื่นๆที่ต้องการต่อไปได้อีก เช่น เมื่อรู้ค่าการเสียดรูป (displacement)ตามจุดต่อต่างๆของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้หาค่าความเครียด (strain) และความเค้น (stress) ได้ตามลำดับ หรือเมื่อรู้ค่าอุณหภูมิที่จุดต่อก็สามารถคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของของไหลที่จุดต่อก็สามารถไปคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลได้ เป็นต้น

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ขบวนการอัดขึ้นรูปโลหะ สามารถหาได้จากวิธีพื้นฐาน 2 วิธีคือ วิธีแรงหรือวิธียืดหยุ่น (Force or Flexibility Method)และวิธีการกระจัดหรือวิธีสทิฟเนส (Displacement or Stiffness Method)วิธีแรกสามารถจะหาแรงภายในและแรงปฏิกิริยาได้โดยอาศัยสมการสมดุลของแรงตามเงื่อนไขการกระจัด ส่วนวิธีที่สองสามารถจะหาการกระจัดที่สมดุลขึ้นโดยมีเงื่อนไขของความต่อเนื่องของเอลิเมนต์ที่แต่ละจุดต่อ หรือที่บริเวณขอบสัมผัสกันก่อนและหลังไหลดกระทำซึ่งมีความต่อเนื่องกัน ดังนั้นสมการสมดุลจะเขียนอยู่ในเทอมของการ

การจัดของแต่ละจุดต่อ และค่าของการจัดสามารถหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการจัด การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะนิยมใช้วิธีที่สองมากกว่าทั้งนี้เพราะสามารถจะหาสมการสมดุลและผลเฉลยได้สะดวกกว่า รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางการค้าที่ใช้ในการวิเคราะห์นิยมใช้วิธีการการจัด

แบบจำลองลักษณะของวัสดุและสมการพื้นฐานที่ใช้ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาการขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อาจจะแยกแบบจำลองออกได้สามลักษณะตามพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของวัสดุ คือ

1. วัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์ (E-PP)
2. วัสดุมีพฤติกรรมแบบแข็งเกร็ง-พลาสติกสมบูรณ์ (R-PP)
3. วัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น/แข็งเกร็ง-วิสโคพลาสติก (E/R-VP)

ในช่วงยืดหยุ่น

การเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่นจะใช้สมการหรือกฎของฮุก คือ

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \left(d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \delta_{ij} d\sigma_{kk} \right) \quad (45)$$

ในช่วงพลาสติก

จะอาศัยสมการของ Prandtl-Reuss และเกณฑ์การครากตามทฤษฎีของ Von Mises คือความเครียดรวม

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (46)$$

และ

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \sigma'_{ij} \quad (47)$$

ซึ่ง

$$\sigma'_{ij}\sigma'_{ij} = \frac{2}{3}\bar{\sigma}^2 \quad (48)$$

ส่วน

$$d\sigma_{ij} = 2G \left[d\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\nu}{1-2\nu} d\varepsilon_{kk} - \sigma'_{ij} \frac{\sigma'_{kl} d\varepsilon_{kl}}{S} \right] \quad (49)$$

ซึ่ง

σ'_{ij} = ความเค้นเบี่ยงเบน

δ_{ij} = เดลต้าครอนเนกเกอร์

G = มอดุลัสเฉือน

$\bar{\sigma}$ = ความเค้นประสิทธิผล

S = ค่าอิสระของโลหะ(material dependent)

หลักการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

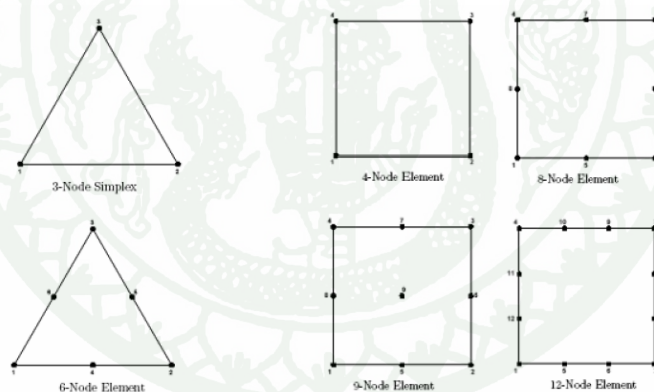
1. ประเภทของเอลิเมนต์

การวิเคราะห์ชิ้นงานเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องแบ่งโครงสร้างหรือชิ้นส่วนออกเป็นส่วนเล็กๆ และเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของงานและการกระทำของโหลด ชนิดของเอลิเมนต์อาจจะแบ่งออกได้ 3 ประเภท ตามมิติ คือ เอลิเมนต์สำหรับปัญหามิติเดียว สองมิติ และสามมิติ (เดช พุทธเจริญทอง, 2541) เอลิเมนต์มิติเดียวเป็นเอลิเมนต์ที่นิยมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียว เช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกนชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโค้งงอของคาน การนำความร้อนในทิศทางเดียว โครงสร้างแบบสองมิติและสามมิติ เป็นต้น



ภาพที่ 12 แสดงเอลิเมนต์มิติเดียว

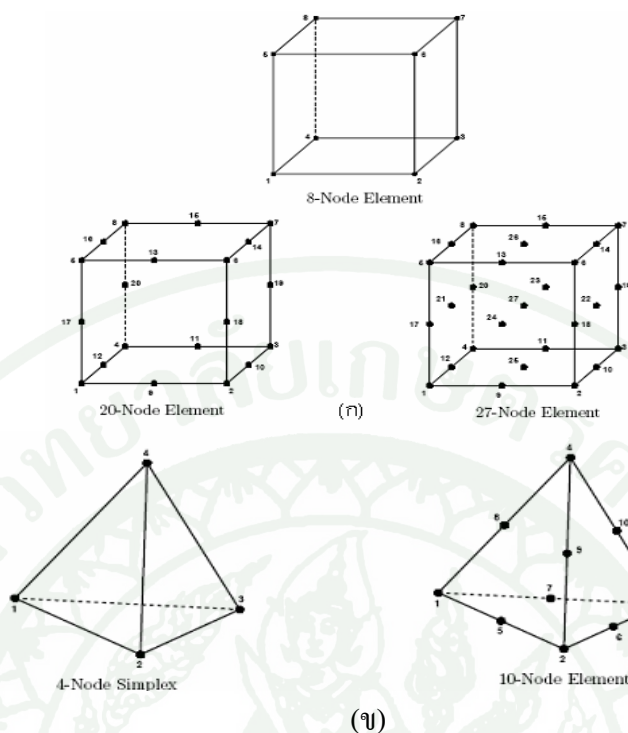
เอลิเมนต์สองมิติ มักใช้กับการวิเคราะห์ความเค้นความเครียดบนปัญหาแบบระนาบ โดยทั่วไปเอลิเมนต์สองมิติจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งเอลิเมนต์สามมิติจะใช้กับการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติต่างๆ ไป โดยลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึมและรูปกรวยสามเหลี่ยม



(ก)

(ข)

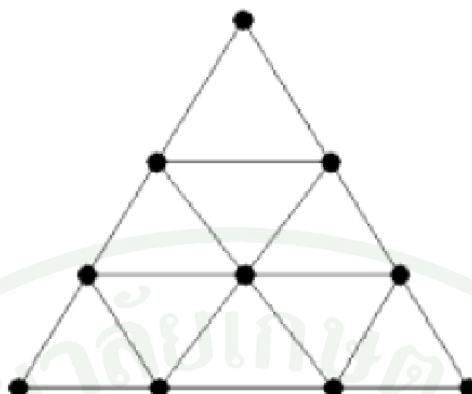
ภาพที่ 13 แสดงเอลิเมนต์แบบสองมิติ (ก) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (ข) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม



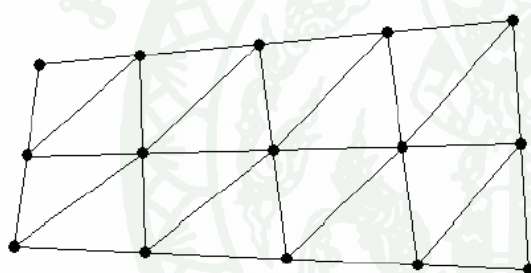
ภาพที่ 14 แสดงเอลิเมนต์แบบสามมิติ (ก) ชนิดปริซึม หรือชนิดทรงหกหน้า (ข) ชนิดกรวย สามเหลี่ยม หรือชนิดทรงสี่หน้าทรงสี่หน้า 10 จุดต่อ (Tetrahedral Element)

2. การแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์

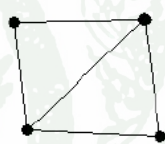
การวิเคราะห์ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วน ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาโดยเลือกใช้เอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับปัญหา ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่กำลังพิจารณา การแบ่งชิ้นส่วนอาจจะเริ่มแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม หรือสามเหลี่ยม ที่มีขนาดใหญ่ๆ ก่อนแล้วจึงแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยอีกครั้งหนึ่ง ตำแหน่ง 20 ของโหนดภายนอกของเอลิเมนต์ย่อยควรจะอยู่ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนรูปร่างของ ชิ้นส่วน หรือตำแหน่งที่มีแรงกระทำหรือตำแหน่งที่มีการใช้วัสดุต่างๆ กัน



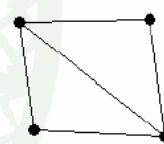
ภาพที่ 15 แสดงการแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม



(ก)



(ข)



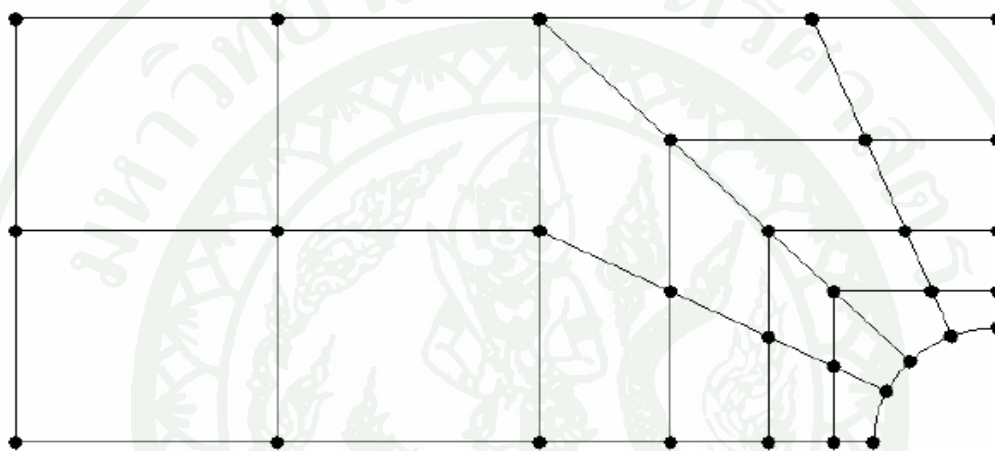
(ค)

ภาพที่ 16 แสดงการแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

ชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมในภาพประกอบ 15 ก่อนข้างจะแบ่งเป็นเอลิเมนต์ย่อยได้ง่าย คือ กำหนดโหนดในแต่ละด้านของสามเหลี่ยมให้มีจำนวนเท่ากัน ลากเส้นโค้งโยงระหว่างโหนด จะได้โหนดตรงที่เส้นตัดกันเพิ่มขึ้น โดยชิ้นส่วนจะถูกแบ่งออกเป็น 9 เอลิเมนต์แต่ละด้านจะมีโหนดระยะระหว่างโหนดของแต่ละด้านของสามเหลี่ยม ไม่จำเป็นต้องเท่ากันขนาดของเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ จึงมีขนาดแตกต่างกันตามที่ต้องการ ถ้าเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้วยกัน เอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านเท่าจะให้ผลเฉลยที่ดีที่สุดแต่ถ้าจำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมใด ๆ มุมภายในของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมควรอยู่ระหว่าง 30° ถึง 120°

สำหรับชิ้นส่วนรูปสี่เหลี่ยมในภาพประกอบ 16 (ก) การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยๆ นั้นทำได้สะดวก คือ กำหนดโหนดในแต่ละด้านของสี่เหลี่ยม ลากเส้นระหว่างโหนดที่อยู่ตรงข้าม จุดตัดของแต่ละเส้น

จะเป็นโหนดภายในของชิ้นส่วน และถ้าต้องการจะแบ่งเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยก็ทำได้โดยลากเส้นทแยงมุมของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม การลากเส้นทแยงมุมนั้นควรจะเลือกเส้นทแยงมุมที่สั้นที่สุด เพราะจะทำให้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมมีสัดส่วนใกล้เคียงสามเหลี่ยมด้านเท่ามากขึ้น ตัวอย่างในภาพประกอบ 16 (ข) และ (ค) ในกรณีที่เลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม สัดส่วนด้านยาวสุดต่อด้านสั้นสุดของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมควรจะเท่ากับ 1 จึงจะทำให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากขึ้น



ภาพที่ 17 การแบ่งชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมโค้งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมย่อย

ในภาพที่ 17 ระยะระหว่างโหนดของชิ้นส่วนสี่เหลี่ยมจะมีขนาดต่างกัน ทั้งนี้เพื่อให้เอลิเมนต์ในบริเวณขอบที่เป็นส่วนโค้งมีขนาดเล็ก คือพยายามทำให้แบบจำลองมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของชิ้นส่วนจริงมากที่สุด ปกติไม่นิยมแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดเท่ากัน และมีรูปร่างเหมือนกันตลอดชิ้นส่วน เพราะบริเวณที่มีความเค้นสูงหรือบริเวณที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ ควรจะแบ่งให้มีเอลิเมนต์ขนาดเล็กๆ ส่วนบริเวณที่ไกลออกไปจะแบ่งให้มีขนาดโตขึ้น การเปลี่ยนของเอลิเมนต์จะมีประโยชน์มากสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน วิธีที่ง่ายที่สุดของการเปลี่ยนแปลงขนาดของเอลิเมนต์ กำหนดให้จำนวนโหนดบนด้านตรงข้ามของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมให้แตกต่างกัน

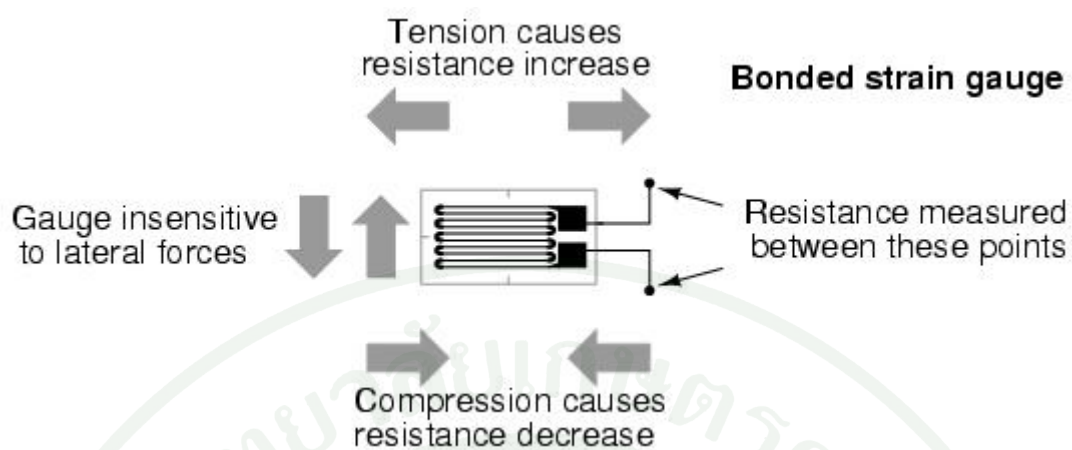
โพลีเซลล์แบบสเตรนเกจ

เป็นตัวอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวเซนเซอร์ หรือทรานสดิวเซอร์ แรง (Force) ที่มากระทำที่ตัวมัน สเตรนเกจเป็นตัวแปลงสัญญาณที่มีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะมีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น เทียงตรง ทนทาน ราคาไม่แพง โดยอาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงความต้านทานซึ่งแปรผันตรงกับระยะยืดหรือความเครียดจะเปลี่ยนแรงที่มากระทำเป็นสัญญาณไฟฟ้า เครื่องมือวัดแบบนี้ยึดติดกับโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนรูปเมื่อมีแรงหรือน้ำหนักมากระทำ ส่วนใหญ่แล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว ในการวัดเพื่อให้ได้ความไวสูงสุดและมีการชดเชยผลของอุณหภูมิขณะทำการวัดด้วย เกจทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อช่วยในการปรับตั้งค่าชดเชยวงจร โดยทั่วไปเกจ 2 ตัวจะอยู่ในสภาพถูกดึงและอีก 2 ตัวอยู่ในสภาพถูกกด ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียดจะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ

โครงสร้างของสเตรนเกจ

เส้นโลหะตัวนำเส้นเดียวไม่สามารถนำมาใช้เป็นสเตรนเกจได้ เนื่องจากปัจจัยของความต้านทานรวมของเกจและพื้นที่ที่รับแรงดึงนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความยาวของตัวนำและลดขนาดพื้นที่ของเกจ เส้นโลหะตัวนำของสเตรนเกจจึงได้ถูกผลิตให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลงสามารถขดรวมกันเป็นกลุ่มได้ ขดลวดนี้จะมีชื่อเรียกว่ากริด (Grid) สำหรับเมทาลิสสเตรนเกจขบวนการในการผลิตกริดที่นิยมใช้ คือ (Photoetching process) เนื่องจากขบวนการนี้สามารถผลิตกริดที่มีรูปร่างและขนาดหลากหลายตามต้องการจากเส้นโลหะที่มีขนาดเล็กๆ ได้ส่วนหัวและส่วนปลายของขดลวดตัวนำจะถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อเข้ากับวงจรทางไฟฟ้าเรียกว่า จุดต่อเชื่อม (Solder) ในภาพที่ 18 แสดงรูปแบบของสเตรนเกจ ตำแหน่งที่เป็นขดลวดจะติดตั้งที่บริเวณที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งสามารถวัดค่าความเค้นดึง และความเค้นอัดได้

เนื่องจากกริดภายในสเตรนเกจ มีคุณสมบัติเปราะบางและง่ายต่อการเสียหาย ดังนั้นในขบวนการผลิตจะมีการนำแผ่นพลาสติกบางๆ มาใช้เป็นพื้นรองและตัวนำพา โดยมีการทำเครื่องหมาย ที่กึ่งกลางของความยาวของเกจให้ง่ายในการติดตั้งและยังทำหน้าที่เป็นฉนวนให้กับเกจกับวัสดุที่ นำไปติดตั้งได้อีกด้วย



ภาพที่ 18 รูปแบบของ strain gauge

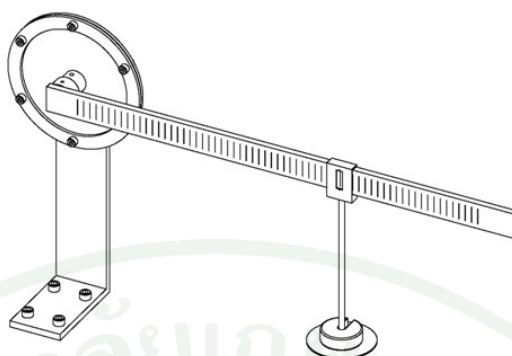
อุปกรณ์และวิธีการ

สมมติฐาน

1. วัสดุที่ใช้ทำคัมไบพัคเป็นเหล็กเพลทขาวSS400 กลึงขึ้นรูปและงานไบพัคเป็นเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี กำหนดให้มีคุณสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง(Isotropic)
2. แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทุกผิวสัมผัส คิดเป็นแรงเสียดทานแบบสถิตย์ กำหนดให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็น 0.6 และไม่พิจารณาค่าความเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับผิวแม่พิมพ์

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 ชุด
2. โปรแกรม Solidwork 2006
3. โปรแกรม MSC Marc Mentat 2005r3
4. เครื่องทดสอบแรงบิด
5. ชิ้นงานทดสอบ (Specimen) คัมและงานไบพัค



ภาพที่ 19 เครื่องทดสอบแรงบิด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 20 (ก) ดุม(Hub), (ข) จาน(Plate)ที่ใช้ในการทดลอง

6. เครื่องอัดไฮดรอลิก

7. Loadcell แบบ Strain gauge และ Strain Meter



(ก)

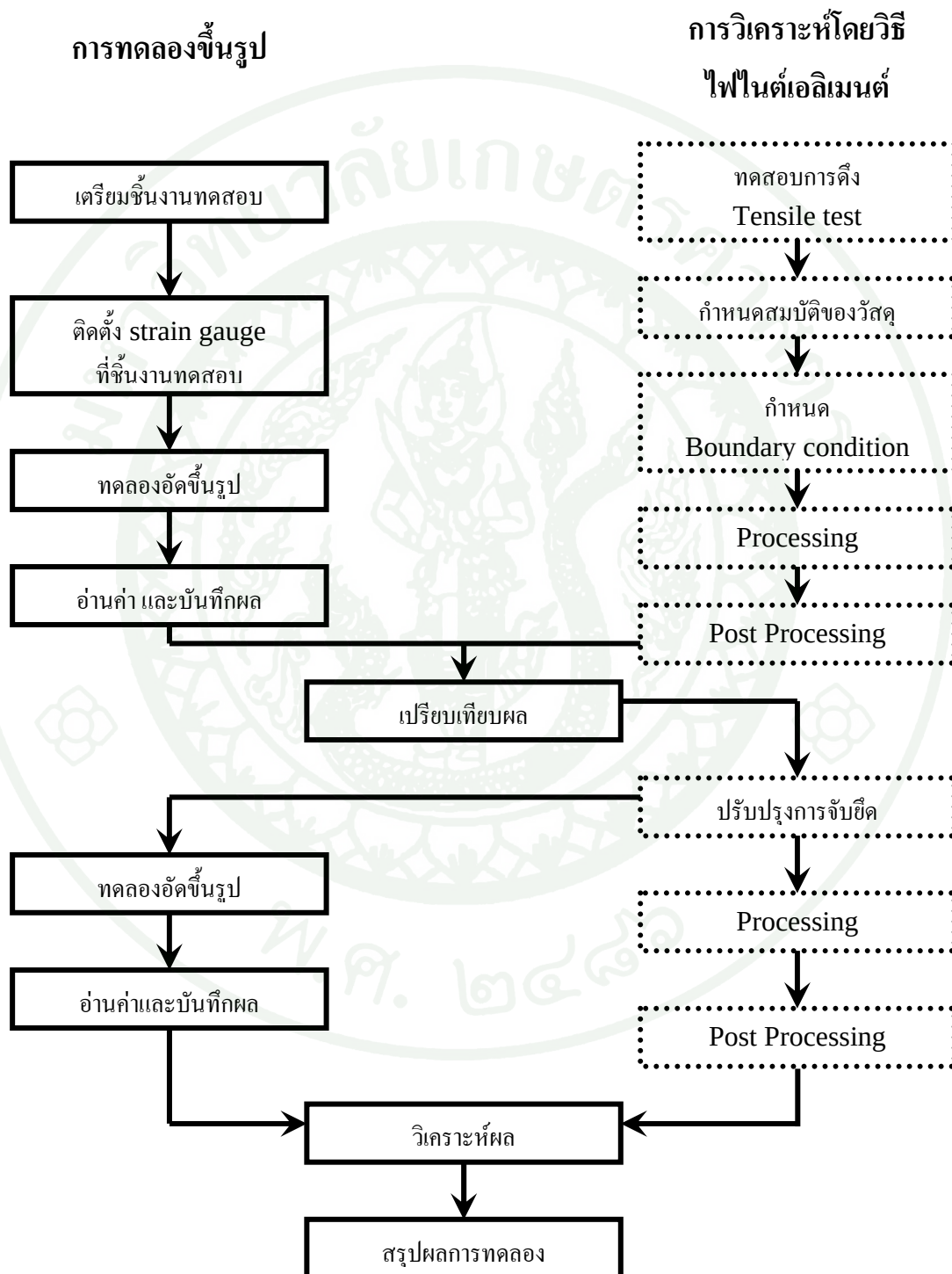
(ข)

(ค)

ภาพที่ 21 (ก) แท่นอัดที่ใช้ในงานวิจัย, (ข) Strain gauge, (ค) Strain meter

วิธีการ

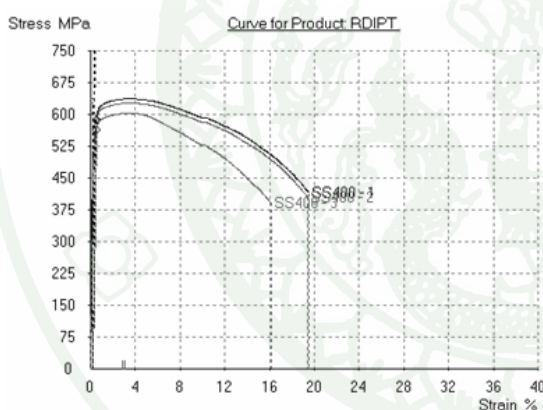
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



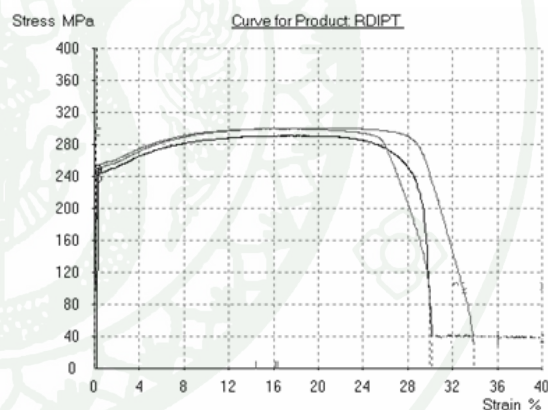
1.1 ทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

นำวัสดุที่ใช้ทำคัมและจานใบพัดไปทำการทดสอบหาสมบัติทางกลซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานให้สมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานทดลองนี้เป็นวัสดุที่มีสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทางแบบ Isotropic จากที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น สมบัติทางกลของวัสดุถือเป็นปัจจัยที่สำคัญ เพราะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบหาสมบัติของวัสดุ โดยวิธีการดึง(uniaxial tensile test)

ในการทดสอบทางกลกับวัสดุนั้น เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องได้จัดทำชิ้นงานทดสอบ (Specimen) วัสดุละ 3 ชิ้นทำการทดสอบ 3 ครั้งต่อวัสดุ จากภาพที่ 22 แสดงค่าความเค้นและค่าความเครียดของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดสอบแต่ละครั้ง ผลการทดสอบจะให้ค่าที่ไม่เท่ากัน จึงนำผลการทดสอบที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและสร้างกราฟใหม่อีกครั้งดังแสดงในภาพที่ 24

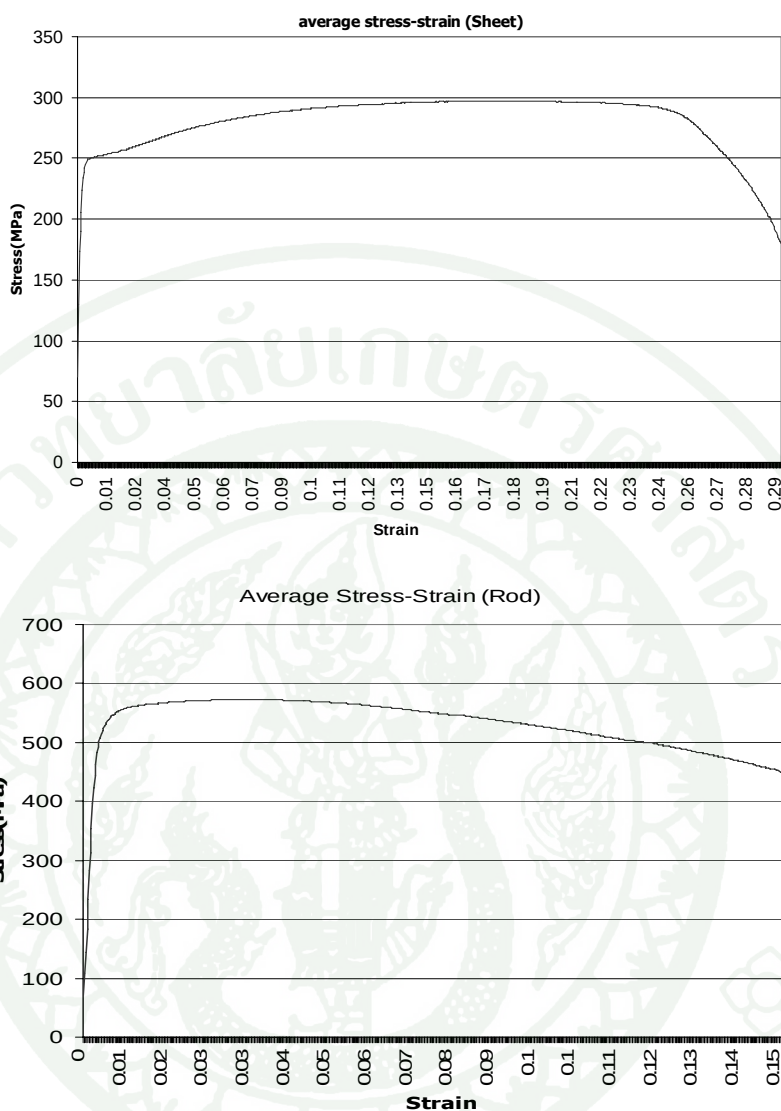


(ก)



(ข)

ภาพที่ 22 ค่าความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดสอบ (ก) วัสดุ SS400, (ข) เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี

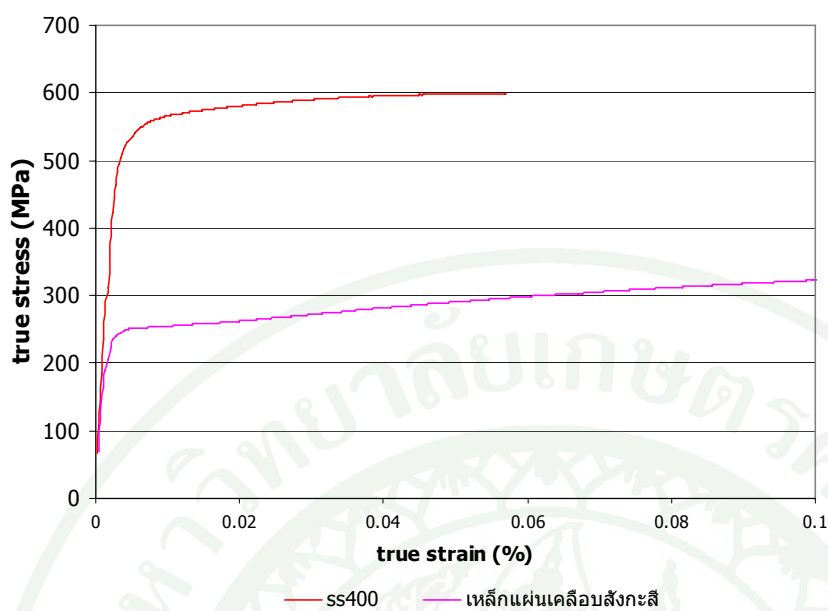


ภาพที่ 23 Stress-Strain เหล็ก

เนื่องจาก ข้อมูลจากการทดสอบทางกลที่ได้จะเป็นค่าความเค้นทางวิศวกรรม (engineering stress) และ ค่าความเครียดทางวิศวกรรม(engineering strain) ซึ่งในการวิเคราะห์ช่วงพลาสติกต้องใช้ค่าความเค้นจริง (true stress) และ ค่าความเครียดจริง (true stain) ได้ทำการเปลี่ยนค่าโดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (50)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (51)$$

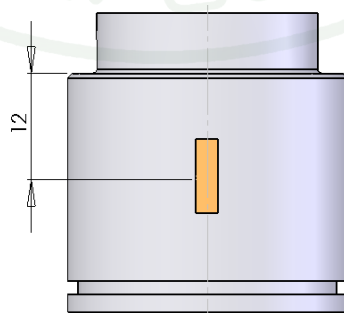


ภาพที่ 24 True Stress-Strain ของวัสดุที่กำหนดในแบบจำลอง

จากนั้นจึงนำค่าความเค้นจริง และค่าความเครียดจริงที่ได้ไปกำหนดให้กับวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

1.2 ติดตั้ง Strain gauge และการอัดยัดคุม

ทำการติดตั้ง Strain gauge ที่ตัวคุมโดยกำหนดระยะติดตั้งตามภาพที่ 25 ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับที่ใช้อ่านผลวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (รายละเอียดการติดตั้ง Strain gauge ดูที่ภาคผนวก)



ภาพที่ 25 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Strain gauge

จากนั้นจึงนำชิ้นส่วนคูลล์และจานใบพัดมากดยึดด้วยแท่นอัดไฮดรอลิก การบันทึกผลค่าความเครียดของชิ้นงานทดสอบจะกระทำที่ทุกระดับแรงดันในการกดยึด ค่าความเครียดที่ได้จากการอ่านผลของ strain gauge จะนำมาใช้เปรียบเทียบกับวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเป็นการยืนยันผลเฉลยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในงานวิจัยชิ้นนี้มีเป้าหมายเพื่อให้ตัวคูลล์ใบพัดสามารถรับแรงบิดได้เพิ่มขึ้น จึงได้ออกแบบการทดลองโดยทำการแปรผันแรงที่ใช้ในการกดยึด เพื่อศึกษาถึงผลของแรงกดยึดที่ใช้ กับการต้านทานแรงบิดของตัวคูลล์ใบพัด ได้กำหนดสภาวะเงื่อนไขของแรงดันที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1.2.1 กำหนดแรงดันกระบอกไฮดรอลิกที่ 20 ตัน พร้อมทั้งทำการวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในคูลล์ขณะที่ทำการกดและหลังจากการกดด้วยstrain meter

1.2.2 กำหนดแรงดันกระบอกไฮดรอลิกที่ 22.5 ตัน พร้อมทั้งทำการวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในคูลล์ขณะที่ทำการกดและหลังจากการกดด้วยstrain meter

1.2.3 กำหนดแรงดันกระบอกไฮดรอลิกที่ 25 ตัน พร้อมทั้งทำการวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในคูลล์ขณะที่ทำการกดและหลังจากการกดด้วยstrain meter



ภาพที่ 26 ขั้นตอนการกดและวัดค่าความเครียด

จากการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุจะเห็นว่าวัสดุชนิดเดียวกันแต่ผลที่ได้จากการทดสอบในแต่ละครั้งมีค่าไม่เท่ากัน ในขั้นตอนการทดลองกดยึดนี้จึงกำหนดให้ทำการทดลองสามครั้งต่อแรงดันกระบอกไฮดรอลิกในแต่ละช่วง กล่าวคือ ที่แรงดันกระบอกไฮดรอลิก 20, 22.5 และ 25 ตัน ทำการทดลองอย่างละ 3 ครั้ง แล้วจึงนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำไปเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ทดสอบแรงบิด

นำคูลูกที่ได้กดยึดเข้ากับงานใบพัดจากหัวข้อการทดลองที่ 1.2 มาทำการทดสอบหาแรงจับยึด เมื่อถูกกระทำด้วยแรงบิด จากวิชากลศาสตร์เบื้องต้นขนาดของโมเมนต์ คือ ผลคูณระหว่างขนาดของแรงกับระยะทางจากจุดหมุนไป ตั้งฉากกับแนวแรง จากหลักการนี้จึงได้ออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบแรงบิดไว้ ซึ่งแรงบิดที่กระทำต่อคูลูกจะถูกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคูลูกนั้นหลุดออกจากงานใบพัด การเพิ่มแรงบิดนั้นทำได้โดยการเติมคูลูกน้ำหนักหรือเพิ่มระยะแขนโมเมนต์ ในการเพิ่มน้ำหนักจะใช้แผ่นโลหะหนัก 1 กิโลกรัมต่อแผ่น วางซ้อนกัน จำนวนของแผ่นโลหะและระยะของแขนโมเมนต์ที่ใช้ จะถูกบันทึกไว้ในขณะทำการทดลอง เพื่อนำมาคำนวณหาโมเมนต์บิด

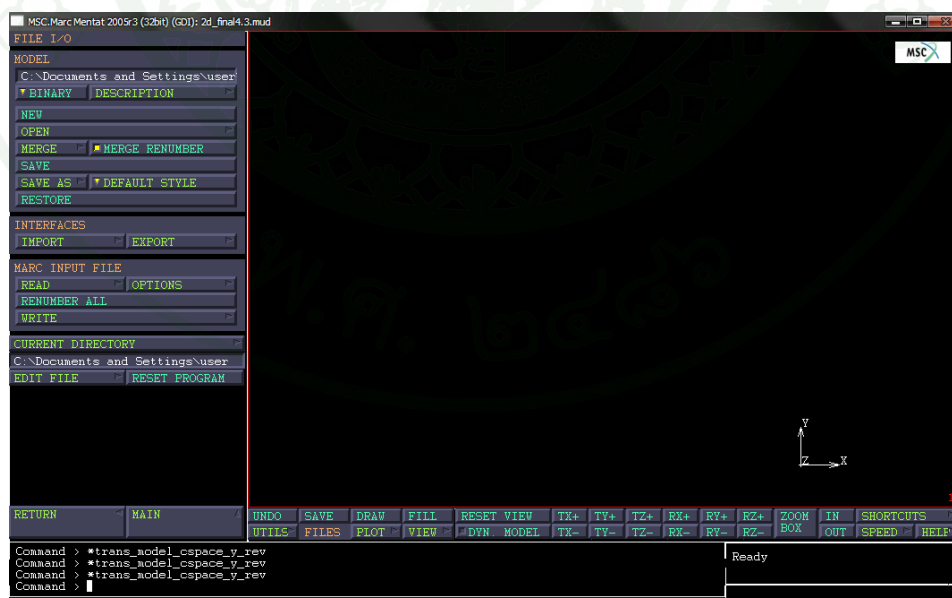


ภาพที่ 27 การทดสอบแรงบิด

1.4 ทำการวิเคราะห์การกดยึดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นำชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัยมาตรวจสอบขนาดและสร้างแบบจำลองพื้นผิวโดยใช้โปรแกรม Solidwork จากนั้นทำการส่งถ่ายข้อมูลไปยังโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการ Import file เป็นนามสกุล IGES เพื่อทำการวิเคราะห์การยึดยึดระหว่างคัมและงานใบพัด โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc Mentat 2005r3 แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าที่ได้จากการวัดในหัวข้อ 1.3 เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง โดยโปรแกรม MSC Marc Mentat สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้หลากหลาย เช่น Structural Mechanic, Heat Transfer, Electromagnetic, Fluid Mechanic, Fracture Mechanic ในส่วนของงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear) ภาพที่ 28 แสดงรูปแบบหน้าจอของโปรแกรม

ในการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำการวิเคราะห์ได้ในรูปแบบปัญหา 2 มิติ หรือแบบปัญหา 3 มิติ และแบบสมมาตรรอบแกน (symmetry) ซึ่งการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ จะอธิบายถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุได้ และ แสดงลักษณะได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง แต่จะใช้เวลาในการประมวลผลนาน ส่วนการวิเคราะห์ปัญหาแบบ 2 มิติ และแบบสมมาตรรอบแกน สามารถแสดงผลได้เฉพาะบางส่วนของชิ้นงาน ดังนั้นการวิเคราะห์ผลให้ได้



ภาพที่ 28 แสดงลักษณะหน้าจอของโปรแกรม MSC Marc Mentat2005r3

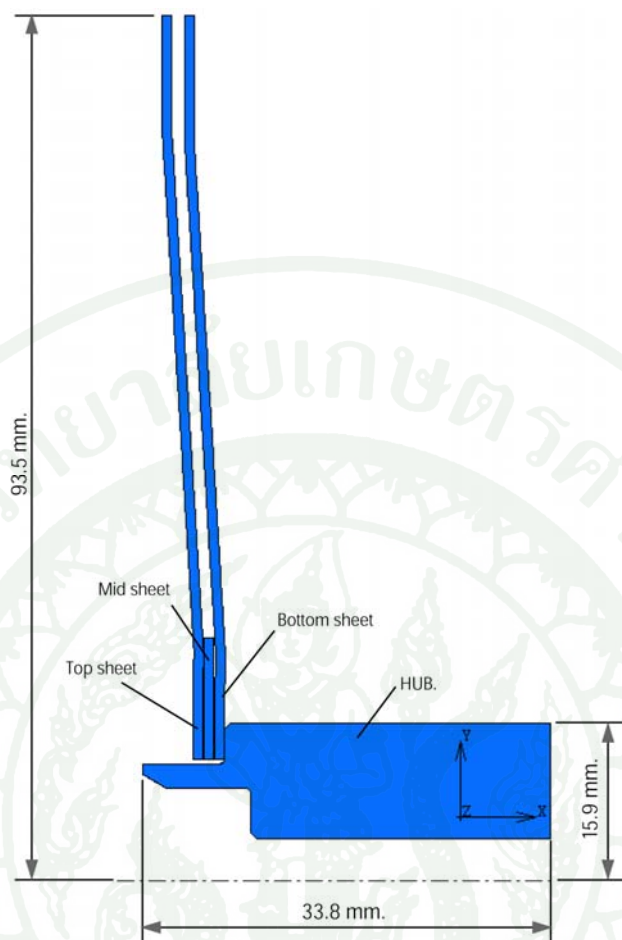
ถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริง จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลาย เช่น สภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุด, สมบัติของวัสดุที่กำหนด และขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้ ซึ่งการเลือกใช้อิเล็กเมนต์ให้เหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน, บริเวณที่ให้ความสนใจ หรือเป็นจุดวิกฤต อย่างไรก็ดี ในช่วงที่ทำการอัดฉีดคัมโบพัด สามารถกำหนดแบบจำลองให้เป็นแบบ 2 มิติได้ เนื่องจากเป็นปัญหาแบบสมมาตรรอบแกน ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการ axito3d ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปัญหาโดยแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงของการอัดฉีด ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนรูปของวัสดุอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น(Non-Linearity) และมีความเครียดและการกระจัดมาก จะวิเคราะห์ปัญหาเป็นแบบ 2 มิติ เพื่อลดเวลาในการประมวลผล จากนั้นในช่วงที่สองจะนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในแบบ 2 มิติ มาหมุนรอบแกน x เพื่อกำหนดแบบจำลองให้เป็น 3 มิติ จากนั้นทำการเพิ่มแรงบิดให้กับแบบจำลองเพื่อหา torque สูงสุดที่ตัวคัมโบสามารถรับได้ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

โดยแบบจำลองตัวคัมโบและจานของใบพัดที่เป็นแบบ 2 มิติ กำหนด Boundary Condition ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดง Boundary Condition ที่กำหนดในโปรแกรม

วัสดุ	Contact Type		Contact Table				จำนวนเอลิเมนต์
	Deform Body	Rigid Body	Hub	Sheet	Sheet1	Sheet_cen	
1 Hub	•			T	T	T	3065
2 Sheet	•		T		T	T	859
3 Sheet1	•		T	T		T	859
4 Sheet_cen	•		T	T	T		480
5 Lower		•	G				
6 Punch		•	T				

T=Touching G=Glue



ภาพที่ 29 แสดงรูปแบบการกำหนดขอบเขตในโปรแกรม

จากการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุตามขั้นตอนการทดลองที่ 1 เมื่อทำการเปลี่ยนค่า Engineering Stress-Strain ตามสมการที่ 3 และ 4 จะได้ True Stress-Strain จากนั้นจึงกำหนดสมบัติทางกลของวัสดุในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของวัสดุ

วัสดุ	Young's Modulus(E)	Poisson's	Yield Stress(σ_y)	Friction Coe
	(Mpa)	Ratio(v)	(Mpa)	(μ)
เหล็กเพลลาขาวSS400	1.9x10 ⁵	0.3	579.5	0.6
เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี	2.1x10 ⁵	0.3	244.6	0.6

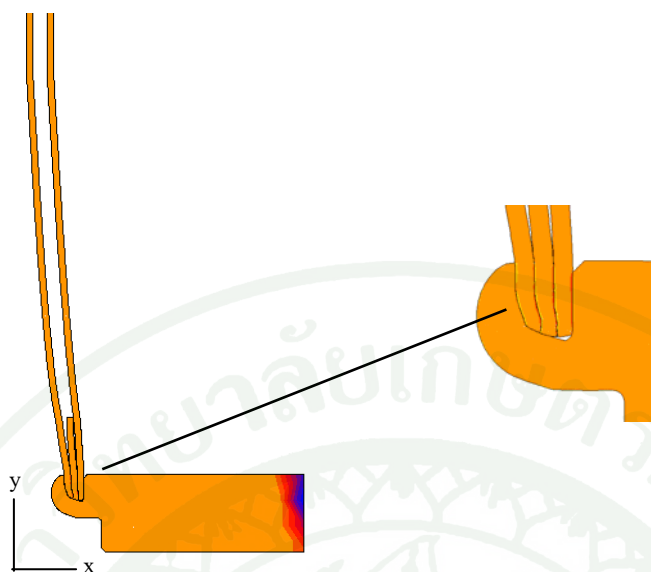


ภาพที่ 30 Fix Displacement ในแนวแกน y

เนื่องจากในขั้นตอนการกดขี่จริง ตัวงานของใบพัดจะสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระในแนวแกน x แต่จะไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน y จึงกำหนด Displacement ที่ขอบด้านนอกของตัวงานใบพัดแผ่นที่ 1, งานใบพัดแผ่นที่ 2 และ งานใบพัดแผ่นที่ 3 ให้ไม่มีการเคลื่อนที่ทางแนวแกน y

ทำการประมวลผล (Processing) และแสดงผลการประมวลผล (Post Processing)

จากที่ได้ทำการประมวลผล จะได้ผลเฉลยออกมาในรูปแบบของข้อมูลเชิงตัวเลข กราฟแสดงความสัมพันธ์ เช่น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงกับเวลา หรือ แรงต่อการเคลื่อนที่ และ



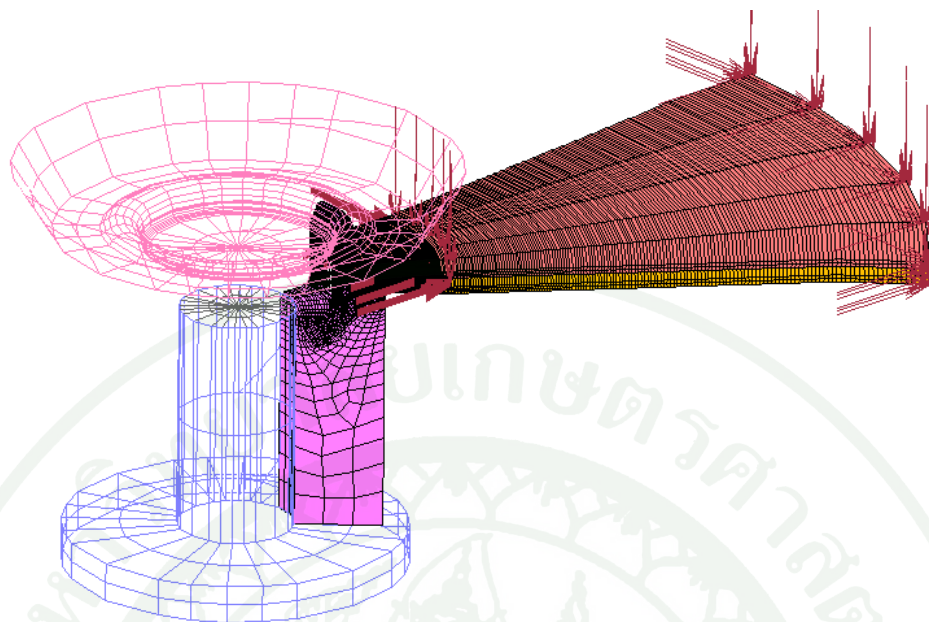
ภาพที่ 31 บริเวณที่เกิดการสัมผัสระหว่างตัวคุมและงานใบพัด

ภาพกราฟฟิก เช่น ภาพแสดงความเค้นและความเครียด ตำแหน่งที่เกิดการสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ 31 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดการสัมผัสกันของวัสดุ

1.5 วิเคราะห์หาแรงบิด

นำผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการกดยึดคุมเข้ากับงานในแบบ 2 มิติ ในหัวข้อ 1.4 มาสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติต่อ เพื่อวิเคราะห์หาแรงจับยึดระหว่าง คุมกับงาน เมื่อถูกกระทำด้วยแรงบิด แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อ 1.3 เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากที่ทำการวิเคราะห์หาแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปและความเค้นภายในวัสดุแล้วจะใช้ คำดังกล่าวมาจำลองเป็นรูปแบบ 3 มิติ เนื่องจากลักษณะของปัญหาเป็นแบบสมมาตรรอบแกนจึงใช้ วิธีการ axito 3 d ซึ่งเป็นการหมุนแบบจำลองในแบบ 2 มิติ รอบแกน x จะได้แบบจำลองในแบบ 3 มิติ ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยให้ประหยัดเวลาในการประมวลผลได้ดี เพราะจะใช้ค่าการวิเคราะห์จากใน ขั้นตอนแรกมาประมวลผลต่อเนื่องทำให้ไม่ต้องมาประมวลผลในส่วนของการขึ้นรูปใหม่ทุกครั้ง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการหมุนกวาดรอบแนวแกนจะทำให้จำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นซึ่งทำให้ต้องใช้ เวลาในการประมวลผลนานมากขึ้นตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้กำหนดการหมุนของเอลิเมนต์ไว้ที่



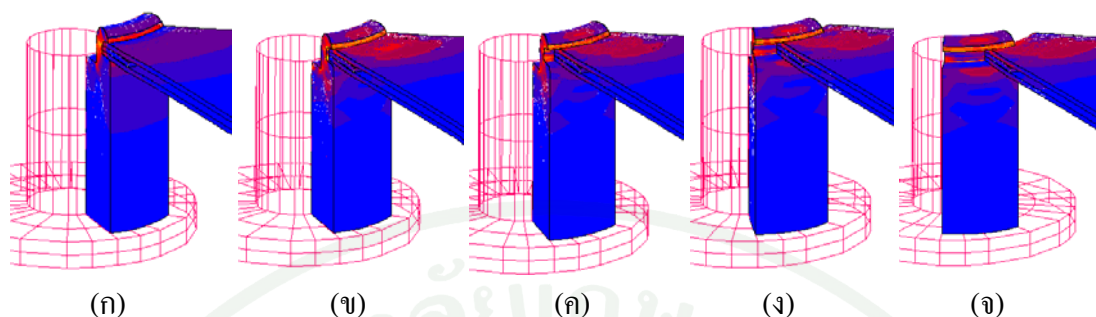
ภาพที่ 32 Boundary Condition ของแบบจำลอง 3 มิติ

9 องศา และ Repetitions 5 มุมรวมของตัวแบบจำลองจึงเป็น 45 องศา เพื่อประหยัดเวลาในการประมวลผล จากนั้นได้ทำการจำลองรูปแบบการหมุนในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนด Boundary condition ที่ขอบนอกของตัวงานใบพัดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง Fix Displacement x,y,z

เมื่อกำหนด Boundary Condition ต่างๆเรียบร้อยแล้ว จึงให้โปรแกรมทำการประมวลผลซึ่งจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในแต่ละวัสดุได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงจำนวนเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ

วัสดุ	จำนวนเอลิเมนต์
Hub	15325
Sheet	4295
Sheet1	4295
Sheet_cen	2400



ภาพที่ 33 การเพิ่มแรงบิดจนกระทั่งตัวคุมไบพัดหลุดออกจากงานไบพัด (ก) ที่ increment 0, (ข) increment 5, (ค) ที่ increment 10, (ง) ที่ increment 15, (จ) ที่ increment 20

ในภาพที่ 33 เป็นการแสดงแบบจำลองในช่วง Increment 0 และภาพที่ เป็นการแสดงแบบจำลองในช่วงที่ Increment 20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวคุมไบได้หลุดออกจากงานไบพัด

1.1 ทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองจริง

รายละเอียดของข้อมูลสามารถดูได้ที่หัวข้อผลการทดลอง

1.2 ปรับปรุงวิธีการจับยึด

ปรับปรุงรูปแบบของหัวกด เพื่อให้ตัวคุมไบพัดสามารถรับแรงบิดได้มากขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าแรงกดที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อแรงสัมผัสตั้งฉาก(contact force) ซึ่งจะทำให้ตัวคุมไบพัดต้านทานแรงบิดได้เพิ่มขึ้นด้วย แต่หัวกดจากโรงงานผู้ผลิต เมื่อกำหนดแรงดันที่ 25 ton จะเกิดการแตกร้าวที่ขอบของคุมไบพัด จึงทำให้เกิดแนวคิดในการปรับปรุงหัวกด ให้สามารถกดยึดโดยใช้ระดับแรงดันในการกดที่มากขึ้น จึงทำการปรับเปลี่ยนมุมเอียงของหัวกด ซึ่งหัวกดจากโรงงานจะมีมุมเอียงที่ 72 องศา จึงสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นมาเพื่อวิเคราะห์หาการเพิ่มมุมเอียงของหัวกดที่เหมาะสม จากการทดลองจริงทำให้ทราบว่าชิ้นงานทดลองจะแตกร้าวเมื่อทำการกดที่แรงกด 25 ตัน เมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า เกิดค่าความเค้น 1145 MPa ที่บริเวณขอบของตัวคุม จึงได้ออกแบบหัวกดขึ้นมาใหม่ โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำ

การจำลองมุมเอียงของหัวกดลดลงครั้งละ 2 องศา โดยกำหนดเป้าหมายให้เลือกใช้ค่าความเค้นที่มีค่าน้อยที่สุด

1.3 ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลที่วิเคราะห์จากไฟไนต์เอลิเมนต์

หลังจากที่ได้ทำการปรับปรุงหัวกดแบบใหม่ให้สามารถรับแรงกดได้มากขึ้น โดยที่หัวกดแบบใหม่ไม่เสียหาย จึงได้ทำการทดลองที่ระดับแรงกดที่มากขึ้น ทำการศึกษาที่ 3 สภาวะ คือ ที่ระดับแรงกด 25 , 27.5 และ 30 ตันตามลำดับ จากนั้นได้ทำการติดตั้งส텐เกจที่ชิ้นงานทดสอบ เพื่อใช้อ่านค่าความเครียด และบันทึกผลที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการกดยึดตัวดุมใบพัด ผลที่ได้จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเป็นการยืนยันผล จากนั้นจึงนำชิ้นงานทดลองไปทดสอบแรงบิด และนำผลไปเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

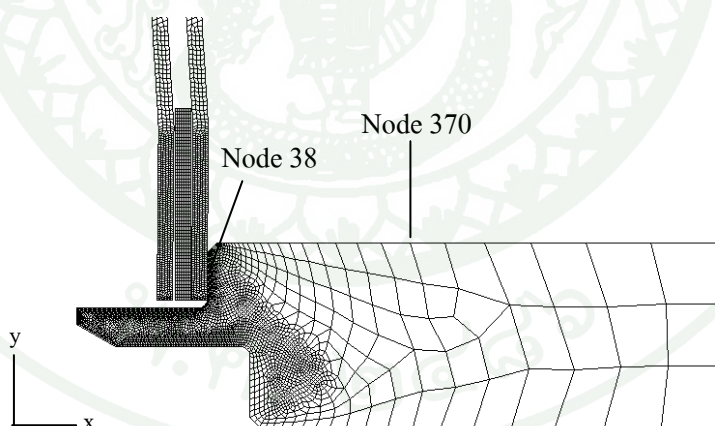
ผลและวิจารณ์

ผล

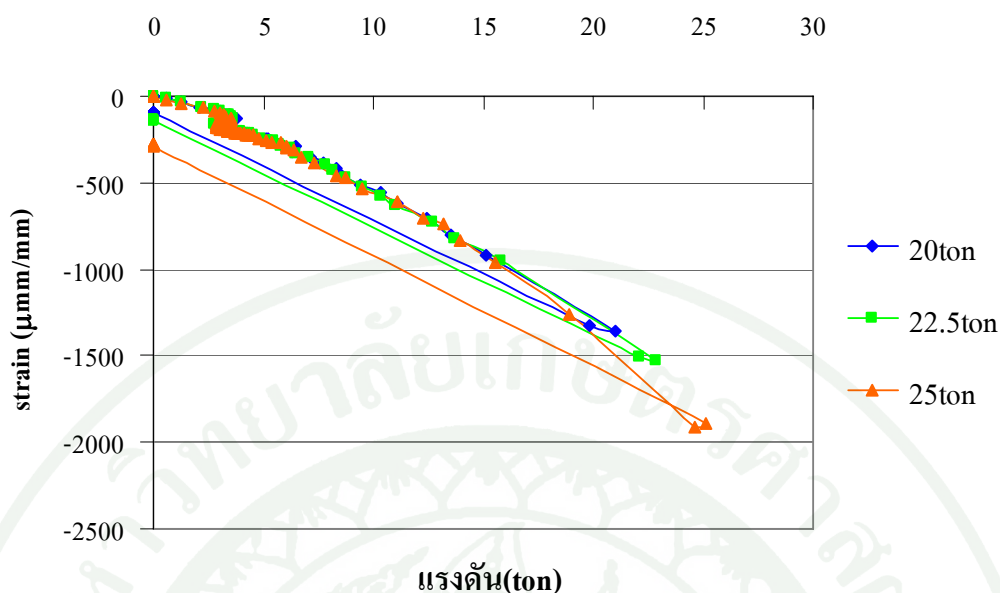
ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการจำลองแบบการกดขี่คูลัมโบพัคด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การจำลองที่ระดับแรงดันในการกดขี่ที่แตกต่างกัน ผลที่ได้จากการจำลองจะใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงซึ่งจะใช้ระดับแรงดันเทียบกับค่าของความเครียดที่วัสดุได้รับโดยให้ความสนใจที่ผลของค่าความเครียดตกค้างซึ่งในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถดูค่าความเครียดของวัสดุได้ที่ node ซึ่งในแบบจำลองนี้เลือกใช้ที่ node370 ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่ติดตั้ง strain gauge ในการทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งเป็น node ที่ใช้ในการอ่านค่าความเครียด

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าความเครียดที่ระดับต่างๆ และความเครียดตกค้างดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 34 แสดง node370 ที่ใช้อ่านค่าความเครียด และnode 38 ที่ใช้แสดงค่าแรงสัมผัส
ตั้งฉาก (contact force)



ภาพที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าความเครียดของหัวกดเก่า

ผลการทดลองในการกดยึดคัมโบ้พัดก่อนการปรับปรุง

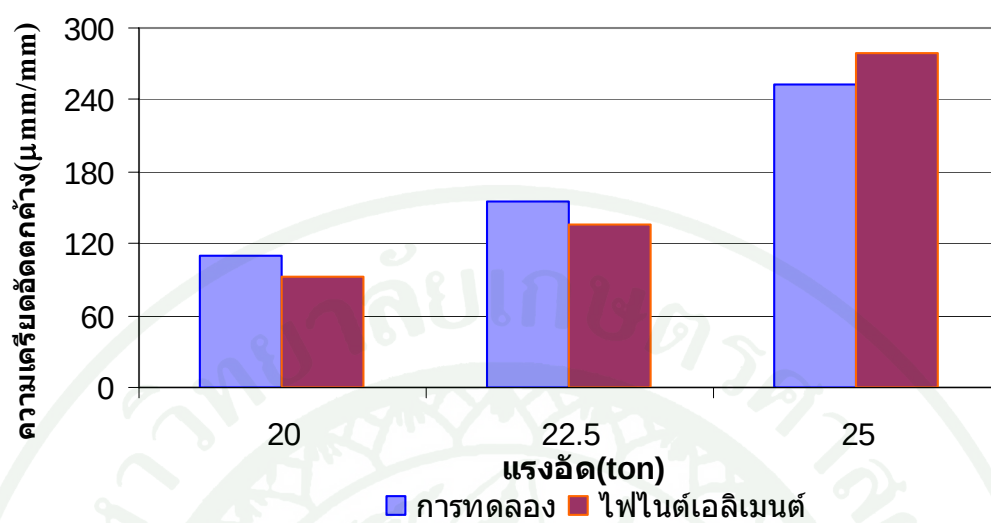
ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการทดลองจริงนั้น ได้ใช้ load cell แบบ strain gage ติดตั้งไว้ที่ชิ้นงานทดสอบเพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับแรงดันที่ใช้ในการกดและทำการบันทึกผลในแต่ละช่วงระดับแรงดันที่ใช้เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการอัดยึดคัมโบ้พัดได้กำหนดสถานะในการอัดยึด คือ ที่ระดับแรงดันในการกดที่ 20, 22.5 และ 25 ตัน ตามลำดับ เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบสถานะการจับยึดในระดับแรงดันที่แตกต่างกันโดยให้ความสนใจที่ผลในการรับแรงบิดที่เพิ่มขึ้นจากที่ได้ทำการทดลองกดยึดคัมโบ้พัดเข้ากับงานใบพัด ผลที่ได้นำมาสร้างตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ใช้กับค่าความเครียดตกค้าง และแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีการทั้งสองแบบ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการทดลองในการกดยึดคุมใบพัดก่อนการปรับปรุง

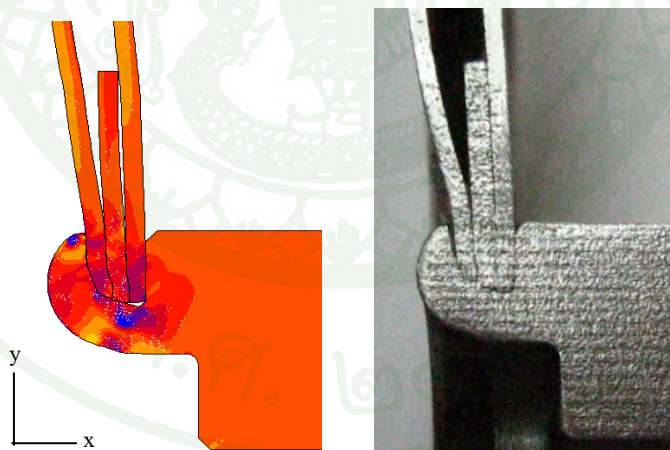
แรงกด (ตัน)	ความเครียดตกค้าง ($\mu\text{mm/mm}$)		ความแตกต่าง (%)
	การทดลอง (ค่าเฉลี่ย)	ไฟไนต์เอลิเมนต์	
20	-110.33	-91.84	16.7
22.5	-154.67	-136.1	12
25	-253.33	-279.4	-10.3

นำข้อมูลจากตารางที่ 4 มาสร้างกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ใช้กับค่าความเครียดตกค้าง ของการทดลองจริงกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากการจับยึดของตัวคุมเกิดขึ้นได้เพราะมีแรงภายในมากระทำที่ตัวคุมและจานใบพัด ซึ่งแรงภายในตัวคุมเกิดจากความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการกด ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวกำหนดการกระการจับยึดที่เกิดขึ้นระหว่างตัวคุมและจานใบพัด จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบถึงบริเวณที่มีการจับยึดและทราบถึงความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในวัสดุ ในภาพที่ 36 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นที่ตัวคุมและจานใบพัด

ในขั้นตอนนี้ได้แสดงผลการทดลองที่ใช้ห้วกดแบบเก่าเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบของผลเฉลยจะออกมาในรูปแบบของข้อมูลเชิงตัวเลข แถบชั้นสีหลายระดับสี (fringe plot) กราฟแสดงความสัมพันธ์ เช่น กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงกับเวลา และภาพกราฟฟิกลำลองพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ จากการทดลองนำผลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่ใช้กับค่าความเครียดตกค้าง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลเฉลยทางไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในภาพที่ 36 จะเห็นได้ว่ารูปแบบของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดลองกับผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อีกทั้งลักษณะการเสียรูปของแบบจำลองกับชิ้นงานจริงยังมีความใกล้เคียงกันมากอีกด้วย ในภาพที่ 37 แสดงรูปแบบการกระจายตัวของความเค้นในแนวแกน(axial stress), ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)



ภาพที่ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กับความเคียวตกร้าง



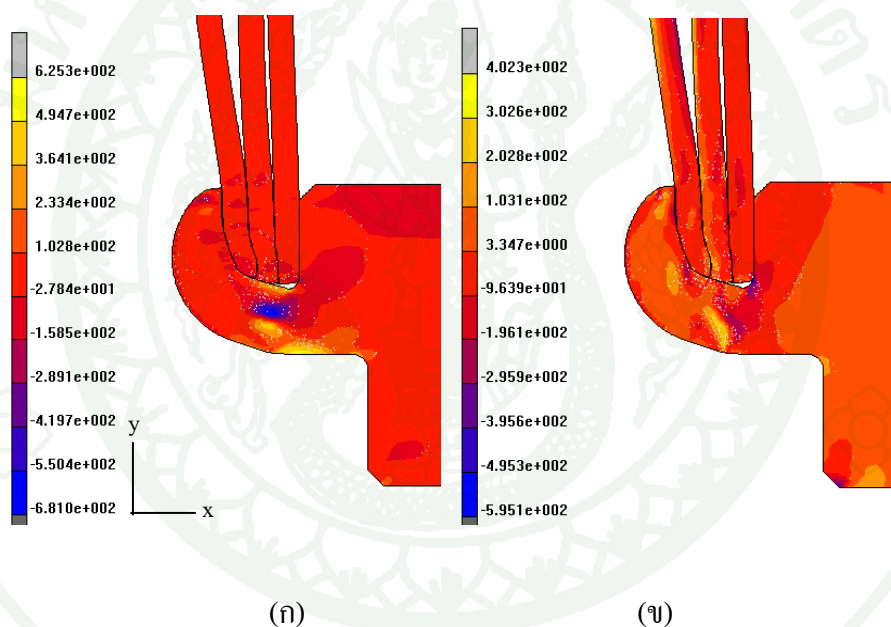
(ก)

(ข)

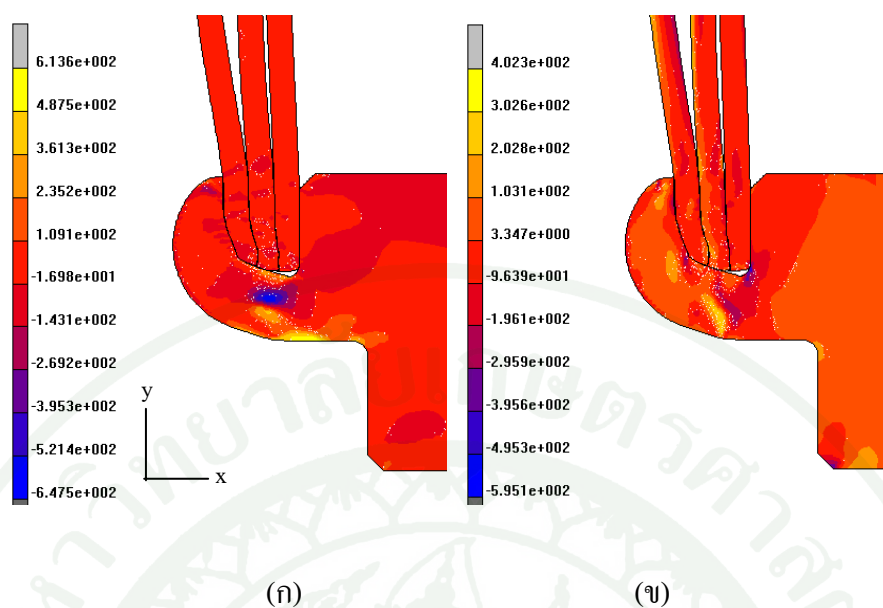
ภาพที่ 37 เปรียบเทียบพฤติกรรมการเปลี่ยนรูป (ก) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, (ข) จากชิ้นงานทดสอบ

ตารางที่ 5 แสดงผลของแรงกดกับแรงสัมผัสตั้งฉากของหัวกด

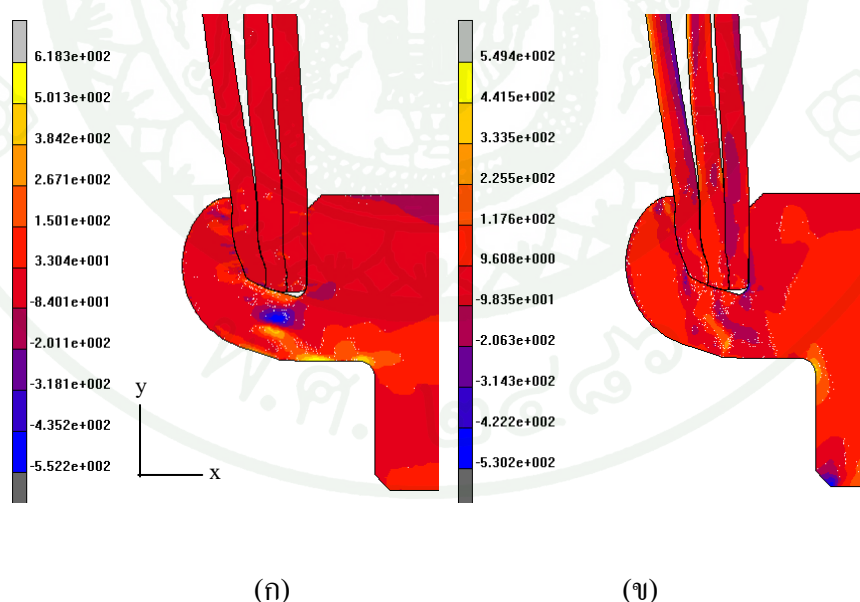
แรงกด(ตัน)	แรงสัมผัสตั้งฉาก(N)
20หัวกดเก่า	384.91
22.5หัวกดเก่า	473.14
25หัวกดเก่า	537.43



ภาพที่ 38 รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 20 ตัน (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)



ภาพที่ 39 รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 22.5 ตัน (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress),
(ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)



ภาพที่ 40 รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 25 ตัน (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress),
(ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบแรงบิดจากการทดลอง

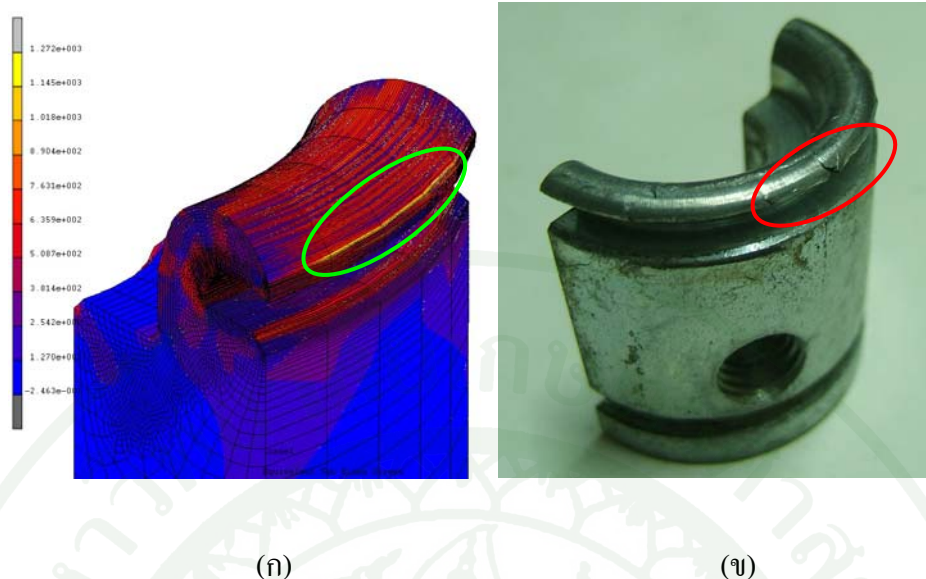
แรงกด (ตัน)	แรงบิด (N.m)		ความแตกต่าง (%)
	การทดลอง (ค่าเฉลี่ย)	ไฟไนต์เอลิเมนต์	
20	27.57	28.29	-2.61
22.5	33.79	35.05	-3.72
25	24.63	40.56	-64.67

เปรียบเทียบการทดสอบแรงบิด

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบการบิดโดยวิธีการทดลองจริงได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับผลวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ หากพิจารณาที่แรงกด 25 ตัน พบว่าค่าที่ได้แตกต่างจากผลเฉลยทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาก เนื่องจากในการทดลองกดยึด พบว่าเมื่อใช้ระดับแรงกดยึดที่ 25 ตัน ขอบของตัวคืมใบพัดจะแตกร้าว ซึ่งจะส่งผลให้คืมใบพัดต้านทานแรงบิดได้น้อยลง แต่ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ไม่ได้พิจารณาเรื่องการแตกร้าวของวัสดุ จึงทำให้ผลที่ออกมาคลาดเคลื่อนกับผลการทดลอง

การปรับปรุงห้วกยึด

หลังจากที่ได้ทำการทดลองจริงเทียบกับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วจะเห็นได้ว่าผลวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ค่าความเครียดตกค้างใกล้เคียงกับผลการทดลองและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลอง จึงเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการปรับปรุงกระบวนการอัดยึดต่อไป ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการทดลอง สังเกตได้ว่าที่ตัวคืมใบพัดเมื่อใช้ระดับแรงดันในการกดที่ 25 ตัน ตัวคืมใบพัดในบริเวณขอบด้านนอกของตัวคืม ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) มีบางส่วนเกิดการแตกร้าวของวัสดุ เมื่อพิจารณาที่ตัวแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าบริเวณดังกล่าวเกิดค่าความเค้นสูงสุด แต่เนื่องจากในแบบจำลองไม่ได้พิจารณาถึงเรื่อง fracture จึงทำให้ชิ้นงานในแบบจำลองไม่แตกเหมือนกับชิ้นงานทดลอง



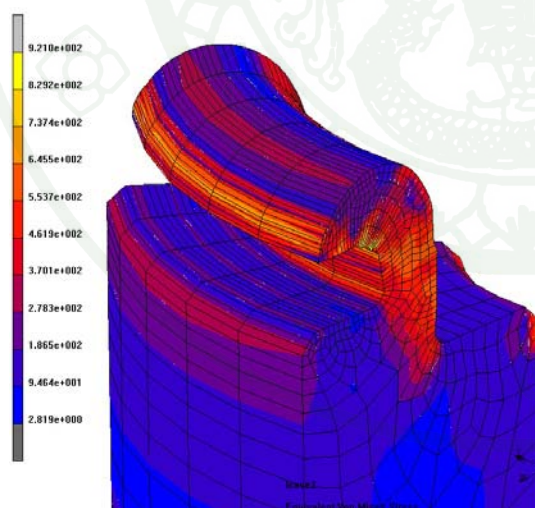
ภาพที่ 41 (ก) แสดงค่าความเค้น von mises ในตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุด ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์, (ข) บริเวณที่เกิดการแตกของชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง

ค่าความเค้นที่บริเวณขอบของตัวคัมไบพัต มีค่า 1145 MPa จึงเกิดแนวคิดในการปรับปรุงหัวกดใหม่ขึ้นมา เนื่องจาก ผลจากการทดลองหัวกดแบบเก่า เมื่อใช้แรงอัดยัดสูงขึ้น แรงสัมผัสตั้งฉาก (Contact Force) จะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ตัวคัมไบพัตสามารถต้านทานการบิดได้ดีขึ้น จากภาพที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นในวัสดุสูงสุดทำให้วัสดุเกิดการแตกออก จึงได้ออกแบบหัวกดขึ้นมาใหม่ โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำการจำลองมุมเอียงของหัวกดลดลงครึ่งละ 2 องศา โดยกำหนดเป้าหมายให้เลือกใช้ค่าความเค้นที่มีค่าน้อยที่สุด

จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดมุมเอียงของหัวกดมากขึ้น ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะลดลงแต่เมื่อลดมุมเอียงหัวกดที่ 90 องศา พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นจึงหยุดทำการทดลองเนื่องจากในกระบวนการผลิตจริง หากใช้มุมเกินกว่า 90 องศา เมื่อทำการอัดยัดจะไม่สามารถถอดหัวกดออกจากชิ้นงานได้เนื่องจากไม่มีมุมที่ใช้ในการปลดชิ้นงาน เมื่อพิจารณาถึงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุ พบว่าที่มุมเอียง 88 องศา ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุดจึงเลือกใช้ที่มุมเอียงดังกล่าวในการปรับปรุงหัวกด รูปแบบการปรับมุมเอียงหัวกดเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก

ตารางที่ 7 แสดงค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในการปรับมุมเอียงหัวกดที่ระดับแรงกด 25 ตัน

มุมเอียงหัวกด (องศา)	ค่าความเค้น (MPa)
72	1145
74	933.9
76	919.6
78	886.3
80	869.3
82	864.9
84	853.9
86	853.9
88	835.3
90	836.8



(ก)

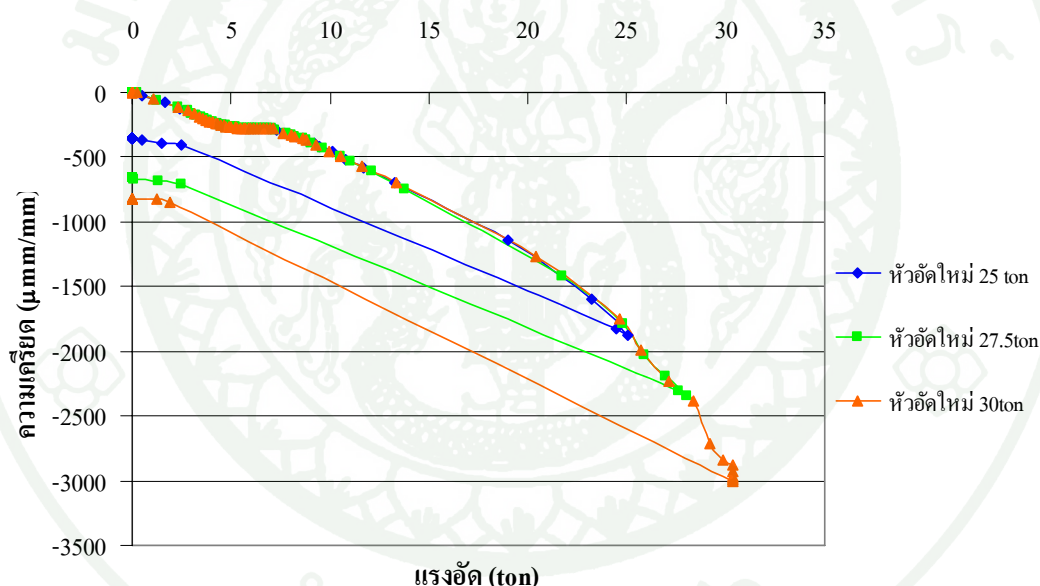


(ข)

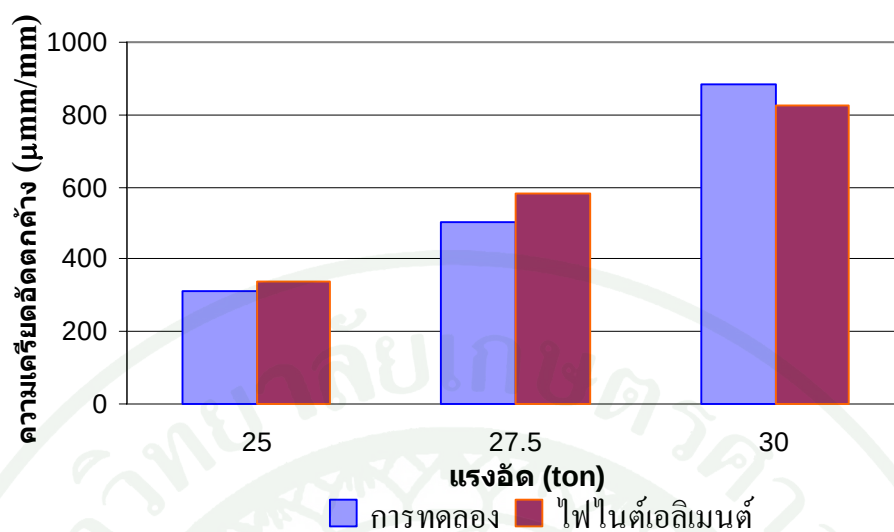
ภาพที่ 42 ค่าความเค้น von mises ในหัวกดที่ได้ปรับปรุงแล้ว (ก) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระดับแรงกด 30 ตัน, (ข) ชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง

ผลการทดลองในการกดยึดคุมใบพัดหลังการปรับปรุง

จากที่ได้ทำการปรับปรุงรูปแบบของหัวกดแบบใหม่ ทำให้หัวกดแบบใหม่สามารถรับแรงกดได้มากขึ้น จึงได้ออกแบบการทดลองที่ใช้ศึกษาการจับยึดโดยเลือกใช้ที่ระดับแรงกดที่ 25, 27.5 และ 30 ตัน ตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในขณะที่ทำการทดลองจะทำการบันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้น นำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าความเครียดตกค้าง ในภาพที่ 43 เป็นการเปรียบเทียบค่าความเครียดตกค้างจากการทดลอง เทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนในตารางที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและค่าความเครียดในหัวกดที่ได้ปรับปรุงแล้ว

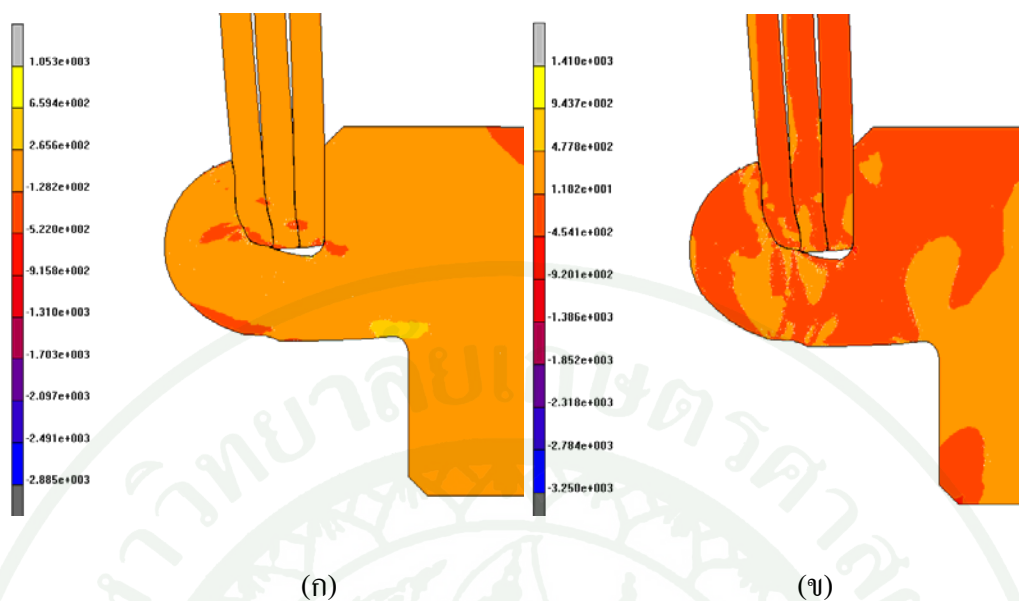


ภาพที่ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเครียดค้ำของหัวกดใหม่

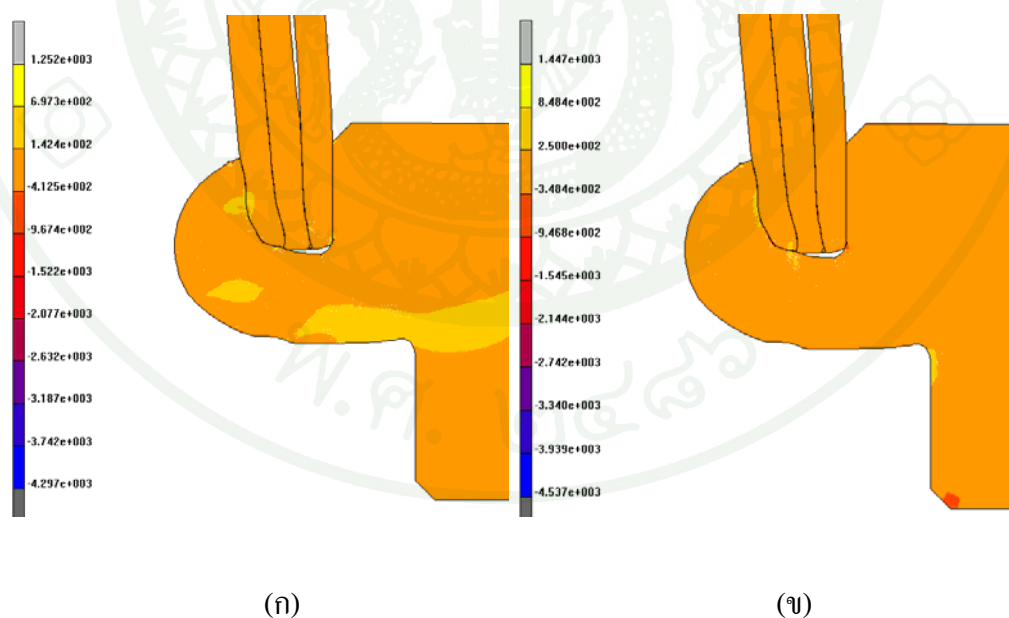
จากการปรับเปลี่ยนมุมเอียงของหัวกดส่งผลให้ค่าความเค้นและค่าความเครียดในวัสดุเปลี่ยนแปลงไป การกระจายตัวของความเค้นในแนวแกนได้แสดงในภาพที่ 45 ถึง ภาพที่ 47 ได้แสดงค่าความเค้นในแนวแกน และค่าความเค้นในแนวรัศมีของหัวกดแบบใหม่

ตารางที่ 8 แสดงผลการทดลองหัวกดที่ปรับปรุงแล้วเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

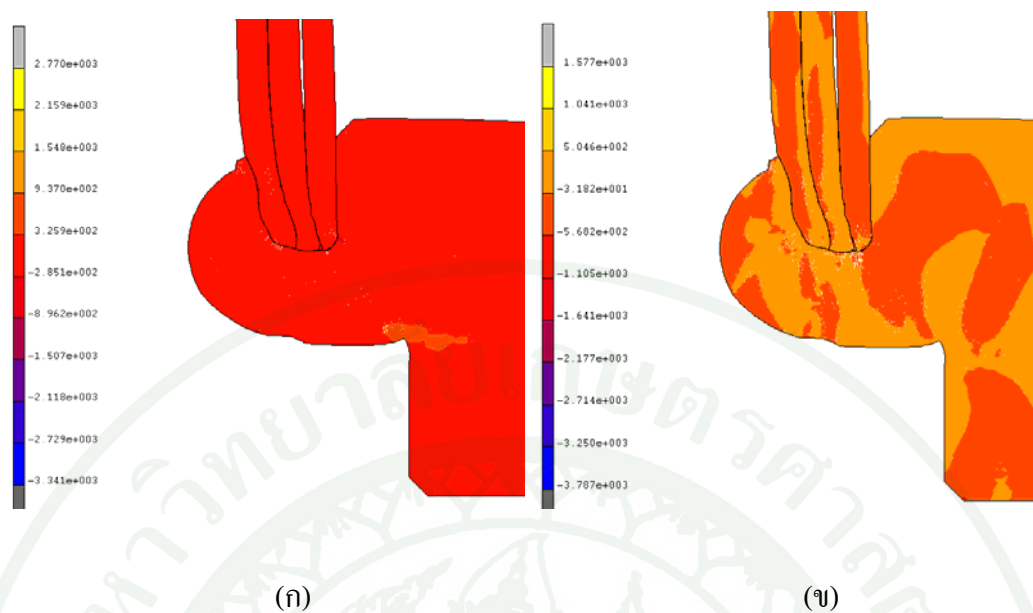
แรงกด (ตัน)	ความเครียดค้ำ ($\mu\text{mm/mm}$)		ความแตกต่าง (%)
	การทดลอง (ค่าเฉลี่ย)	ไฟไนต์เอลิเมนต์	
25	-312.67	-339.06	8.4
27.5	-503.5	-583.96	15.9
30	-883.67	-827.27	6.38



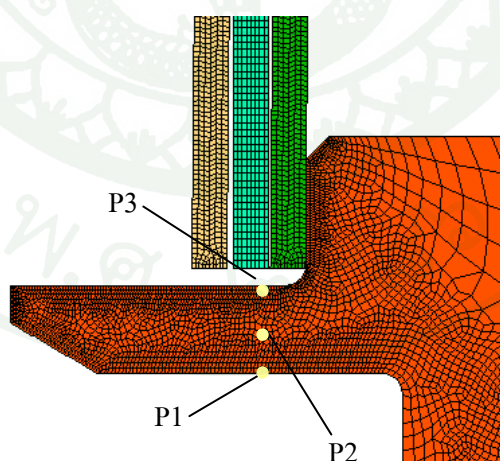
ภาพที่ 45 รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 25 ตัน ของหัวกดใหม่ (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)



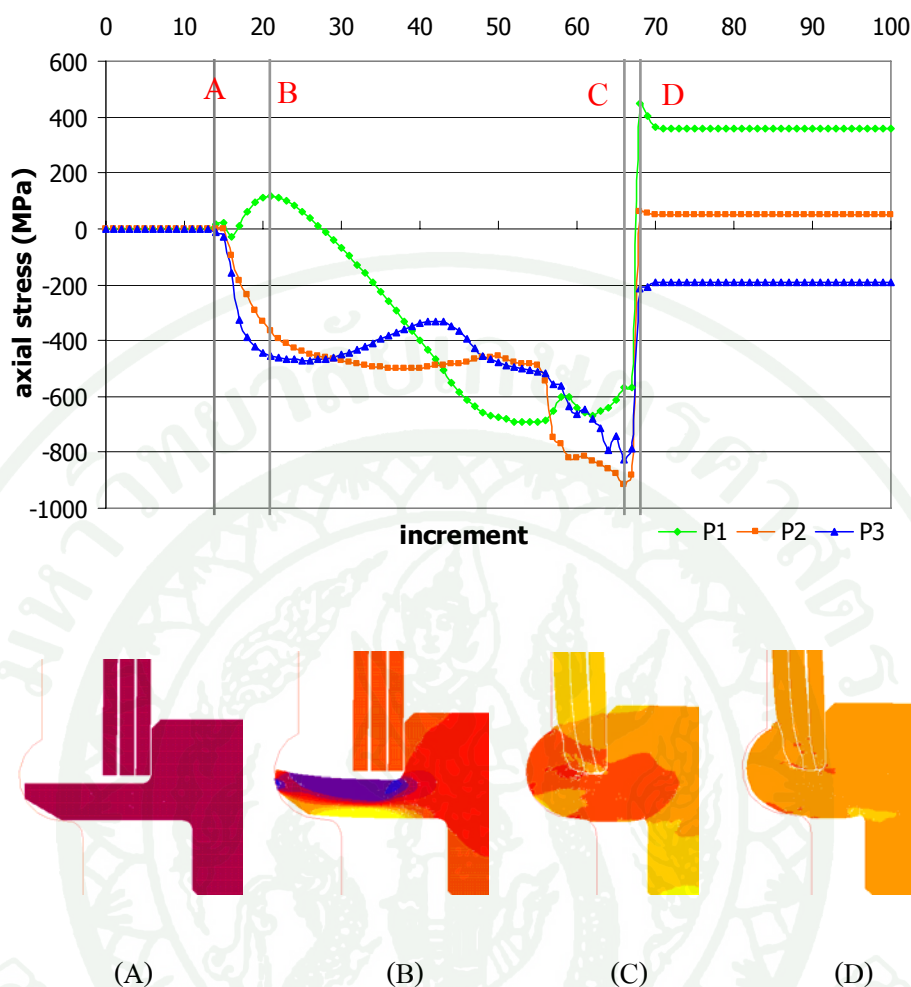
ภาพที่ 46 รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 27.5 ตัน ของหัวกดใหม่ (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)



ภาพที่ 47 รูปแบบของความเค้นที่ระดับแรงกด 30 ตัน ของหัวกดใหม่ (ก) ความเค้นในแนวแกน (axial stress), (ข) ความเค้นในแนวรัศมี (radial stress)



ภาพที่ 48 ตำแหน่งที่ใช้แสดงค่าความเค้น



ภาพที่ 49 แสดงค่าความเค้นตั้งฉากในสภาวะการกดที่ 30 ตัน ขณะที่เกิดการตัดของวัสดุเทียบกับค่าการเคลื่อนที่ของหัวกด

เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของวัสดุ รวมถึงลักษณะของการกระจายค่าความเค้นภายในวัสดุที่อยู่ในช่วงเปลี่ยนรูปถาวร จะใช้ผลเฉลยทางไฟไนต์เอลิเมนต์ มาเพื่ออธิบายค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงที่ทำการกดอัด โดยในภาพที่ 48 แสดงถึงจุดที่ใช้แสดงค่าความเค้นจากดุมไบพัต ที่จุด P1,P2 และ P3 ซึ่งเป็นจุดที่จะเกิดการดัดงอมากที่สุด ได้นำค่าความเค้นที่ได้จากผลเฉลยมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับการเคลื่อนที่ของหัวกด เป็นการแสดงพฤติกรรมของวัสดุที่เกิดขึ้นในขณะทำการกดอัด ด้วยหัวกดใหม่ที่มีระดับแรงกด 30 ตัน

ที่ตำแหน่ง A ในภาพที่ 49 เป็นตำแหน่งที่หัวกดเริ่มสัมผัสกับตัวดุมไบพัตค่าความเค้นที่จุด P1,P2 และ P3จะยังเป็ศูนย์กลาง ที่ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งที่หัวกดเคลื่อนที่ลงกดตัวดุม ในช่วงนี้

พฤติกรรมของวัสดุจะมีลักษณะเหมือนการดัดงอ ทำให้ค่าความเค้นที่จุด P1 เกิดความเค้นดึง ส่วนที่จุด P2 และ P3 จะเป็นความเค้นอัด จากนั้นเมื่อหัวกดเคลื่อนที่กดต่อไป พฤติกรรมของวัสดุจะเปลี่ยนจากการถูกดัดเป็นการอัด ทำให้ค่าความเค้นที่จุด P1,P2 และ P3 เป็นความเค้นอัดทั้งหมด และจะเป็นค่าความเค้นอัดต่อไปจนถึงตำแหน่ง C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่หัวกด กดลงต่ำสุด จากนั้นที่ตำแหน่ง D เป็นตำแหน่งที่หัวกดเริ่มยกตัวกลับคืน ทำให้ไม่มีแรงมากระทำที่ตัวคืม ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งสามจุดจะเป็นค่าความเค้นดก้าง โดยค่าความเค้นอัดที่จุด P1 จะเปลี่ยนกลับไปเป็นค่าความเค้นดึง ส่วนค่าความเค้นที่จุด P2 จะมีค่าน้อยลงเนื่องจากอยู่ในแนวเส้นแกนกลาง(Neutral axis) และที่จุด P3 ค่าความเค้นอัดจะลดลง สภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุหากพิจารณาเปรียบเทียบกับทฤษฎีการคัดโลหะ จะเห็นได้ว่า ผลเฉลยจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความสอดคล้องกับค่าความเค้นในทางทฤษฎี จากตารางที่ 9 แสดงค่าแรงสัมผัสตั้งฉาก (contact force) ของหัวกดแบบใหม่ พบว่าค่าที่ได้เป็นไปตามสมมติฐานคือ เมื่อเพิ่มแรงกดมากขึ้นจะส่งผลให้ แรงสัมผัสตั้งฉากเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนในตารางที่ 10 แสดงเปรียบเทียบผลการด้านทานแรงบิด ของชิ้นงานทดลอง กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ หากพิจารณาเปรียบเทียบผลจากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่าของแรงสัมผัสตั้งฉากจะเป็นตัวแปรหลักในการด้านทานแรงบิดของคืมไบพัด

ตารางที่ 9 แสดงผลของแรงกดกับแรงสัมผัสตั้งฉากของหัวกดแบบใหม่

แรง กด (ตัน)	แรงสัมผัสตั้งฉาก (N)
25หัวกดใหม่	583.67
27.5หัวกดใหม่	649.07
30หัวกดใหม่	810.1

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบผลในการรับแรงบิดระหว่างหัวกดใหม่กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แรงกด (ตัน)	แรงบิด (N.m)		ความแตกต่าง (%)
	การทดลอง (ค่าเฉลี่ย)	ไฟไนต์เอลิเมนต์	
25	38.83	42.31	-8.96
27.5	42.63	47.74	-11.98
30	58.59	60.29	-2.27

วิจารณ์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถอธิบายรูปแบบของความเค้นและความเครียดในวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังจำลองพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง หากพิจารณาถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในงานในภาคอุตสาหกรรมจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทั้งในด้านของคุณภาพสินค้าที่ดีขึ้น, ลดขั้นตอนการผลิต, ลดเวลาในการออกแบบ ซึ่งจะส่งผลให้สามารถยกระดับกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมไทยได้เป็นอย่างดี

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทำให้ทราบถึงค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดกับวัสดุได้ ซึ่งจะทำให้ผู้ออกแบบทราบถึงภาระของแรงที่ใช้ ส่งผลให้สามารถเลือกใช้หรือปรับปรุงวิธีการในการผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ในห้วงกดแบบเก่าเมื่อทำการกดที่ระดับแรงดัน 25 ตัน พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะเพิ่มขึ้นสูงมาก ทำให้วัสดุมีโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวได้ จึงทำการออกแบบห้วงกดใหม่ขึ้นมา และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก่อนนำไปผลิตจริง แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นอกจากจะลดเวลาในการลองผิดลองถูกได้แล้วนั้น ยังได้ผลเฉลยที่เป็นข้อมูลเชิงตัวเลข เพื่อนำไปใช้ในการเทียบผลจากค่าในทางทฤษฎี ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษา และเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองจริง กับข้อมูลเชิงตัวเลข ในช่วงของการกดยึดซึ่งทำการศึกษาในรูปแบบ 2 มิติ และเมื่อทำการวิเคราะห์หาแรงบิดจะสร้างแบบจำลองเป็นแบบ 3 มิติ จากการศึกษาพบว่าผลเฉลยที่ได้จากการทดลองจริงเมื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว ผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และรูปแบบการเปลี่ยนรูปของวัสดุก็ใกล้เคียงกันมากอีกด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

พฤติกรรม การเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ เป็นเรื่องที่มีความซับซ้อนในการอธิบาย ต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ชั้นสูงในการคำนวณ ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองพฤติกรรม การเสียรูปของวัสดุ ,คำนวณค่าความเค้น-ความเครียด ของวัสดุได้อย่างแม่นยำ และยังช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ลดการลองผิดลองถูกลงได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบจับยึดในคัมไบพัดและเปรียบเทียบค่าความเครียด รวมถึงการรับแรงบิดจากการทดลองจริง เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลจากการศึกษาพบว่าแรงกดที่ใช้มีความสัมพันธ์กับแรงสัมผัสตั้งฉาก เมื่อใช้แรงกดมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดแรงสัมผัสตั้งฉากเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าเพิ่มแรงกดมากเกินไปคัมไบพัดจะแตกร้าว ซึ่งส่งผลให้แรงสัมผัสตั้งฉากลดลง ในห้วงเวลาที่ได้ออกแบบใหม่สามารถกดยึดด้วยแรงที่มากขึ้นได้โดยที่ค่าความเค้นในวัสดุจะไม่สูงจนทำให้เกิดการแตกร้าว ซึ่งเมื่อใช้แรงในการกดยึดเพิ่มขึ้น แรงสัมผัสตั้งฉากจะเพิ่มขึ้นและเป็นตัวแปรหลักในการต้านทานแรงบิดของคัมไบพัด ซึ่งเป็นไปตามกฎความเสียดทานของ Coulomb

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาเปรียบเทียบการจับยึดกับวัสดุชนิดอื่น เนื่องจากวัสดุต่างชนิดกัน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะไม่เท่ากัน จึงมีโอกาสดังกล่าวจะพัฒนาต่อเนื่อง โดยการลดแรงกดยึดลงแต่คัมไบพัด ยังสามารถรับแรงบิดได้เท่าเดิมหรือเพิ่มมากขึ้น
2. พิจารณาความเผื่อระหว่างคัมไบพัดและงานไบพัดจะมีผลต่อการจับยึดที่เพิ่มมากขึ้น ควรทำการศึกษาระยะห่างที่เหมาะสม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชาญ ถนัดงาน. 2543. เทคโนโลยีการขึ้นรูปโลหะ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
กรุงเทพฯ

เดช พุทธเจริญทอง. 2548. ทฤษฎีพลาสติกซิตีและการเปลี่ยนรูปถาวร. ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
กรุงเทพฯ

เดช พุทธเจริญทอง. 2541. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ. กรุงเทพฯ

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2550. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี. 2547. การออกแบบเครื่องกลและชิ้นส่วนเครื่องจักร1. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น,
กรุงเทพฯ

วริทธิ์ อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. 2550. การออกแบบเครื่องจักรกล. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น
กรุงเทพฯ

การติดตั้ง Strain Gauge เข้าถึง <http://pirun.ku.ac.th>

Juan Gabriel Monge Gapper .2005. **Centrifugal Fan Impeller Failure Analysis Using Finite
Element**

E. Hemmati Vand และ R. H. Oskouei. 2008. **An Experimental Method for Measuring
Clamping Force in Bolted Connections and Effect of Bolt Threads Lubrication
on its Value**

R.Porcaro,และคณะ. **An experimental and numerical investigation on self-piercing riveting**

N.Rasti . 2006. **Comparison Study of Member Stiffess Using Theoretical and Finite Element Method**

R.C.Hibbeler.1995. **Engineering Mechanics Statics**. Simon&Schuster Indochina Ltd.

Bruno eck .1973. **FANS**. PERGAMON PRESS Biddles Ltd., Guildford,Surrey.

William C Osborne.1977. **FANS**. PERGAMON PRESS Biddles Ltd., Guildford, Surrey.

Frank P. Bleier1997. **Fan Handbook Selection,Application,and Design**. McGraw-Hill.



การติดตั้งสเตรนเกจ

การติดตั้งสเตรนเกจจะมีผลกระทบต่อปัจจัยที่สำคัญสองตัว คือ ความต้านทานเริ่มแรกของสเตรนเกจและการเปลี่ยนแปลงของเกจแฟกเตอร์ การติดตั้งที่ดีหมายถึง ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของวัตถุรับแรงสามารถถ่ายทอดสู่กริดบน สเตรนเกจได้อย่างถูกต้องปราศจากความผิดพลาด นอกจากนี้ถ้าเลือกใช้วัสดุยึดติด เช่น กาวติดประเภทก็จะก่อให้เกิด Hysteresis และการสูญเสียของสัญญาณเนื่องจากการคลายตัวของความเค้นได้เช่นกัน ดังนั้น ขั้นตอนและวัสดุที่ใช้ในการติดตั้งจึงต้องกระทำและใช้อย่างถูกต้องและเหมาะสม เพื่อให้มีผลต่อปัจจัยทั้งสองน้อยที่สุด

อุปกรณ์ที่ใช้

1. วัสดุที่จะติด Strain Gage
2. Strain gage และ Terminal
3. Multimeter หรือ Ohmmeter
4. ชุดบัดกรีสายไฟ ซึ่งประกอบด้วยหัวแร้ง ลวดบัดกรี สายไฟฟ้า และคีมปลอกสาย

ไฟฟ้า

5. ชุดติดตั้ง Strain Gage ซึ่งประกอบด้วยน้ำยา Degreaser กระดาษทรายเบอร์ 220, 320, และ 400 น้ำยา Neutralizer น้ำยา Conditioner ดินสอและปากกาถูกลื่น ผ้าเช็ดแผล ไม้ปลายพันสำลี ไม้บรรทัด เทปใส น้ำยา Catalyst น้ำยา Coat และน้ำยา Adhesive

ขั้นตอนการติดตั้ง

Strain gage เป็นอุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนมาก ซึ่งจะไวต่อข้อบกพร่องซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในการ ติดตั้ง ดังนั้นการติดตั้ง Strain gage จึงต้องใช้ความละเอียดรอบคอบเป็นอย่างยิ่งในรายละเอียดขั้นตอนในการติดตั้ง การกระทำที่ไม่ควรกระทำในขั้นตอนการติดตั้งคือ

1. จับหรือแตะพื้นผิวที่กำลังถูกเตรียมอยู่
2. นำผ้าซับ (Swab) หรือผ้าเช็ดแผล (Gauze sponge) ที่ถูกใช้ไปแล้วมาใช้อีก
3. นำสิ่งสกปรก (Contaminant) เช่น ฝุ่นและคราบน้ำมัน เป็นต้น จากพื้นที่อื่นๆมายัง

พื้นที่ที่ได้หรือที่กำลังทำ ความสะอาดอยู่

4. ทิ้งพื้นผิวที่ได้หรือที่กำลังทำความสะอาดอยู่ เป็นระยะเวลานานก่อนที่จะทำขั้นตอนต่อไป

การเตรียมพื้นผิวที่จะติดตั้ง Strain gages

Strain gage สามารถที่จะนำมาติดตั้งอยู่บนวัสดุทางวิศวกรรมแทบทุกชนิด ถ้าพื้นผิวของวัสดุที่จะทำการติดตั้ง Strain gage มีการเตรียมพื้นผิวที่ถูกต้อง วัตถุประสงค์หลักในการเตรียมพื้นผิวของวัสดุคือ ต้องการที่จะปรับสภาพพื้นผิวให้มีความหยาบ (Roughness), สภาพทางเคมี, และความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่เหมาะสม นอกจากนั้นแล้วเพื่อที่จะได้วางเส้นที่บอกตำแหน่งและทิศทางของ Strain gage ที่ถูกต้องและตรงจุดที่เราต้องการ

ขั้นตอนในการเตรียมพื้นผิวสำหรับ Aluminum alloys และ Steel มีดังต่อไปนี้

1. การเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน (Degreasing)
2. การขัดพื้นผิว (Surface abrading)
3. การวางตำแหน่งและทิศทางของ Strain gage (Application of gage layout lines)
4. การปรับสภาพพื้นผิวให้เหมาะสม (Surface conditioning)
5. การปรับสภาพพื้นผิวให้เป็นกลาง (Neutralizing)

1. การเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน

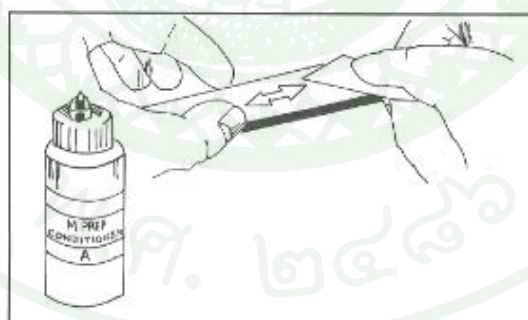
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนเริ่มแรกในการเตรียมพื้นผิวที่จะติดตั้ง Strain gage และเป็นการชำระล้างสารต่างๆ ที่มีลักษณะเป็นไขมัน (Grease), น้ำมัน (Oil), สารอินทรีย์ที่สกปรก (Organic Contaminant), และสารเคมีตกค้าง (Chemical residue) ออกไปจากพื้นผิวของวัสดุที่กำลังจะติดตั้ง Strain gage โดยใช้ Degreaser พ่น (Spray) หรือใช้ผ้าเช็ดแผลชุบ Degreaser เช็ดที่บริเวณนั้น



ภาพผนวกที่ 1 การเตรียมพื้นผิว

2. การขัดพื้นผิว (Surface abrading)

ในขั้นตอนนี้พื้นผิวของตัวอย่างทดสอบ (Specimen) จะถูกขัดเพื่อที่จะขจัดสิ่งสกปรกต่างๆที่ไม่ต้องการเช่น คราบ ปูน, คราบสนิม, และคราบสกปรก เป็นต้น ออกจากพื้นผิวบริเวณที่จะติดตั้ง Strain gage และเพื่อที่จะเตรียมพื้นผิวใหม่ลักษณะ เหมาะสมที่กาว (Adhesive) จะยึดติด Strain gage กับพื้นผิวได้ดี



ภาพผนวกที่ 2 การขัดพื้นผิว

การขัดพื้นผิวจะเป็นการขัดพื้นผิวแบบเปียกจะเริ่มจากการเท Conditioner ลงในบริเวณที่จะเตรียมพื้นผิวติดตั้ง Strain gage เป็นปริมาณเล็กน้อย แล้วใช้กระดาษทราย (เบอร์ 320 สำหรับอลูมิเนียม หรือเบอร์ 220 สำหรับเหล็ก) ขัดบนพื้นผิวบริเวณนั้น หลังจากนั้นถ้าเห็นว่าพื้นผิวค่อนข้างแห้งเกินไปก็เท Conditioner เพิ่มขัดจนกว่าที่พื้นผิวบริเวณที่ต้องการมีลักษณะมันวาว จากนั้นใช้

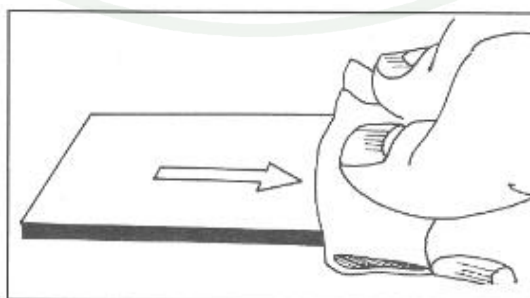
ผ้าเช็ดแผลที่สะอาดเช็ดพื้นผิวบริเวณนั้นและรอบๆให้สะอาด การเช็ดจะเช็ดไปทางเดียวแล้วกลับด้านผ้าเช็ดแผลเช็ดอีกทีแล้วทิ้งเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกทั้งหลายมาตกอยู่ในบริเวณที่กำลังถูกทำความสะอาด กระทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำอีกครั้งแต่ใช้กระดาษทรายเบอร์ 400 สำหรับอลูมิเนียมหรือเบอร์ 320 สำหรับเหล็ก

3. การวางตำแหน่งและทิศทางของ Strain Gage (Application of gage layout lines)

ตำแหน่งและทิศทางของ Strain gage บนผิวของตัวอย่างทดสอบจะถูกทำเครื่องหมายโดยใช้เส้นตรงสองเส้นที่ติดกันเป็นมุม 90 องศา เป็นเส้นอ้างอิง เส้นทั้งสองนี้ควรจะมีขนาดที่ยาวพอสมควรและชัดเจนสำหรับอลูมิเนียม เส้นทั้งสองควรลาก โดยใช้ดินสอที่แกนดินสอมีความแข็ง HB หรือสำหรับเหล็กเส้นทั้งสองควรลากโดยใช้ปากกาถูกลื่น

4. การปรับสภาพพื้นผิวให้เหมาะสม (Surface conditioning)

หลังจากที่เส้นอ้างอิงทั้งสองได้ถูกร่างไว้บนตัวอย่างทดสอบ สิ่งสกปรกจากไส้ดินสอหรือน้ำหมึกปากกาจะถูกทำความสะอาดออกไปโดยการ เท Conditioner ลงในบริเวณที่จะเตรียมพื้นผิวดัดตั้ง Strain gage เป็นปริมาณเล็กน้อย แล้วใช้ไม้ ปลายพันสำลี (Cotton-tipped applicator หรือ Cotton butt) ถูบริเวณนั้นจนกระทั่งเส้นของไส้ดินสอหรือน้ำหมึกปากกาไม่ปรากฏ อยู่บนไม้ ปลายพันสำลีจากนั้น บริเวณดังกล่าวจะถูกทำให้แห้งอีกครั้งโดยการใช้ผ้าเช็ดแผลที่สะอาด เช็ดไปทางเดียวอย่างซ้ำๆอย่างน้อยอีกสองครั้ง ถูกทำให้แห้งอีกครั้งโดยการใช้ ผ้าเช็ดแผลที่สะอาดเช็ดไปทางเดียวอย่างซ้ำๆอย่างน้อยอีกสองครั้ง



ภาพผนวกที่ 3 การปรับสภาพพื้นผิวให้เหมาะสม

5. การปรับสภาพพื้นผิวให้เป็นกลาง (Neutralizing)

ขั้นตอนนี้กระทำเพื่อที่จะให้พื้นผิวที่จะติด Strain Gage ให้มีความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่เหมาะสมในการติดตั้ง Strain gage ด้วยการใช้ฟองน้ำจะถูปรับสภาพพื้นผิวให้เป็นกลางโดยการ เท Neutralizer ลงในบริเวณนั้นเป็นปริมาณเล็กน้อย แล้วใช้ไม้ปลายพันสำลีถู จากนั้นบริเวณดังกล่าวจะถูกทำให้แห้งอีกครั้งโดยการใช้ผ้าเช็ดแผลที่สะอาดเช็ดไปทางเดียวอย่างช้าๆ อย่างน้อยอีกสอง ครั้ง



ภาพผนวกที่ 4 การปรับสภาพพื้นผิวให้เป็นกลาง

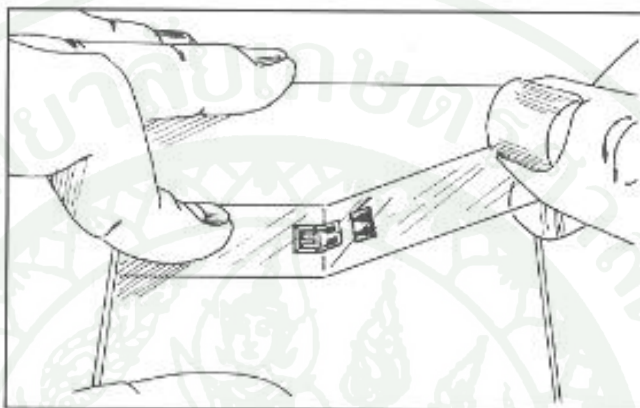
การติดตั้ง Strain gage

หลังจากที่ขั้นตอนที่หนึ่งได้เสร็จสิ้นลง ขั้นตอนการติดตั้ง Strain gage ควรที่จะกระทำ ภายใน 30 นาทีสำหรับอลูมิเนียมและ 45 นาทีสำหรับเหล็กเพื่อที่จะได้สภาพพื้นที่ที่จะติดตั้ง Strain gage ที่เหมาะสม

1. การเตรียม Strain gage ก่อนการติดตั้ง

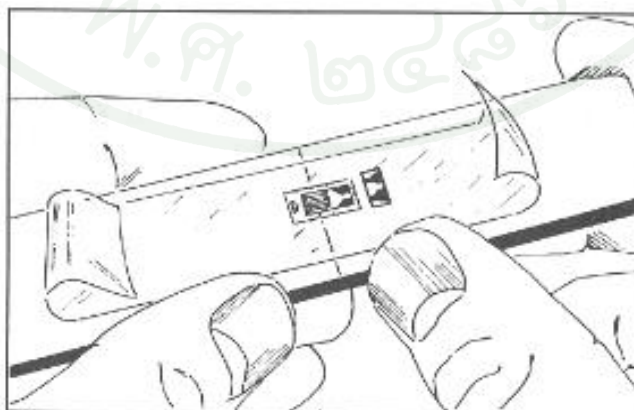
ขั้นตอนนี้เริ่มจากการนำ Strain gage ออกจากซองเก็บโดยใช้คีมขนาดเล็ก (Tweezer) จับ ที่ด้านข้างของ Strain gauge (ไม่ควรที่จะใช้นิ้วมือจับที่ Strain gauge โดยตรง) แล้ววาง Strain gauge บนแผ่นกระจกหรือกล่องใส Strain gage ที่สะอาดโดย ให้ด้านของ Strain gauge ที่จะติดกาวคว่ำลง

จากนั้นวาง Terminal (ถ้ามมี) ให้ห่างจาก Strain gauge เป็นระยะ 1.5 มม. ติด Cellophane Tape ใหม่ ขนาดยาว 10 - 15 ซม. แล้วติดด้านหนึ่งของ Tape ไว้ทางด้านหลังของ Strain gauge และ Terminal โดยกะให้ Tape ขนานไปกับ Strain gauge และ Terminal ดังแสดงในรูป



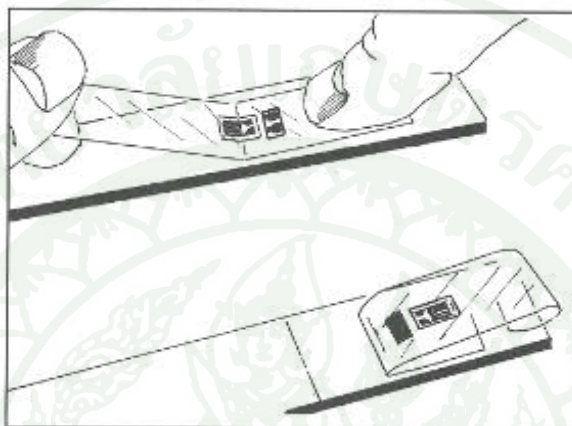
ภาพผนวกที่ 5 ทำการรัด Tape ให้ขนานไปกับ Strain gauge และ Terminal

จากนั้นทำการรัด Tape ให้ขนานไปกับ Strain gauge และ Terminal อย่างแน่นหนา จนทับทั่วทั้ง Strain gauge และ Terminal จึงหยุด แล้วทำการยก Strain gauge และ Terminal ที่ติดกับ Tape ขึ้นเพื่อนำไปติดกับตัวอย่างทดสอบ โดยการค่อยๆยก Tape ขึ้นเป็นมุม 30-45 องศา กับแผ่นกระจกหรือกล่องใส่ Strain gauge



ภาพผนวกที่ 6 การวาง Strain gage ให้อยู่ในตำแหน่งที่ทำเครื่องหมาย

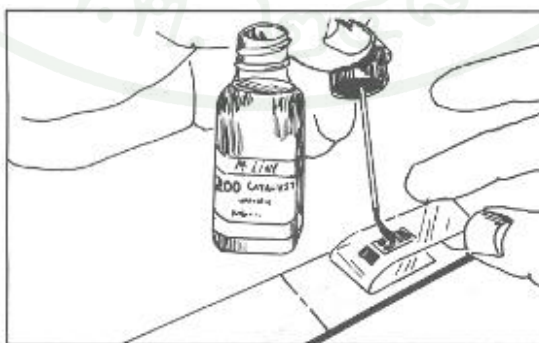
ในการวาง Stain gage ให้อยู่ในตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายนั้น เราจะวางให้เครื่องหมายที่อยู่บน Stain gage ตรงกับ เครื่องหมายที่เราได้ทำไว้บนตัวอย่างทดสอบ จากนั้นรูดปลาย Tape ด้าน Terminal ให้ติดแน่นกับวัสดุ ส่วนปลายอีกข้าง ให้ยกกลับมาในลักษณะที่แสดงตามรูป



ภาพผนวกที่ 7 การรูดปลาย Tape ด้าน Terminal

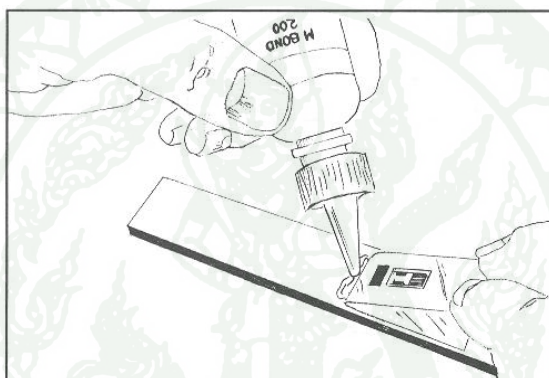
2. การติด Strain gage ด้วยกาว

ก่อนที่จะป้ายน้ำยา Catalyst ลงบนตัว Stain gage และ Terminal แปรงที่จุ่ม Catalyst จะต้องป้ายไปบนปากขวดน้ำยาก่อนประมาณ 10 ครั้งเพื่อที่จะลดปริมาณน้ำยาบนขนแปรงลงให้พอเหมาะ การป้ายจะมีลักษณะการป้ายที่บางๆและหนาสม่ำเสมอลงบนตัว Strain gage และ Terminal โดยการเลื่อนแปรงไปตามตัว Strain gage และ Terminal

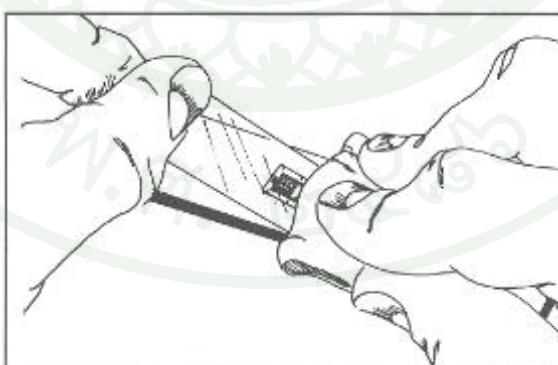


ภาพผนวกที่ 8 การติด Strain gauge ด้วยกาว

ขั้นตอนต่อไปนี้เป็นที่ที่จะต้องทำให้เสร็จภายใน 3-5 วินาที ยก Tape ด้านที่ถูกงอปลาย ขึ้นดังแสดงในรูป จับปลาย Tape ให้แน่นแล้วหยดกาวหนึ่งถึงสองหยด ลงตรงจุดที่ห่าง จากรอยต่อ ระหว่าง Tape กับตัวอย่างทดสอบ ซึ่งห่างจากตัว Terminal เป็นระยะ 1.2 ซม. จากนั้นหมุนปลาย Tape กลับมาอีกทางหนึ่งทำมุมประมาณ 30 องศา กับพื้นผิวตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูป โดยดึง Tape ให้ตึงเล็กน้อยแล้วใช้ผ้าพันแผลรัด ไปบนตัว Tape โดยให้เครื่องหมายที่เราทำไว้บนตัวอย่าง ทดสอบตรงกับเครื่องหมายที่อยู่บน Strain gauge การรัดเราจะทำจากด้านปลายที่ทา กาวไปยังด้านที่ เราจับปลาย Tape อย่างช้าและใช้แรงกดด้วย เสร็จแล้วปล่อยปลาย Tape ออก

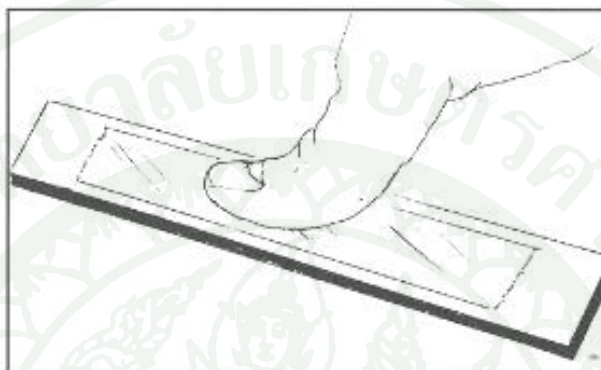


ภาพผนวกที่ 9 การทา กาว



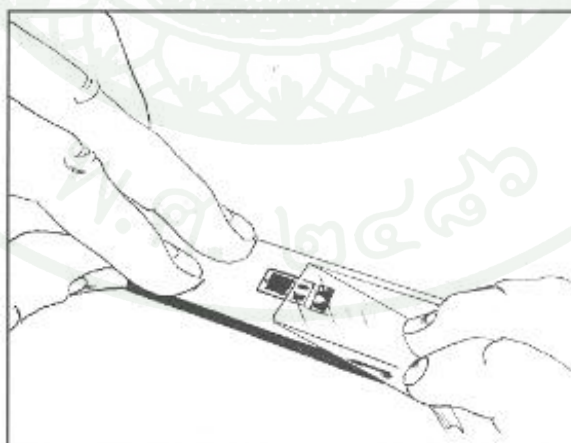
ภาพผนวกที่ 10 วิธีการกดลงบน Strain gauge และ Terminal

ทันทีที่เสร็จขั้นตอนที่แล้วให้เอาหัวนิ้วมือแม่โป้งกดลงบน Strain gage และ Terminal อย่างแรงเป็นเวลาอย่างน้อย 1 นาที จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาทีเพื่อให้กาวแห้งดีก่อนที่จะลอก Tape ออกจาก Strain gage และ Terminal



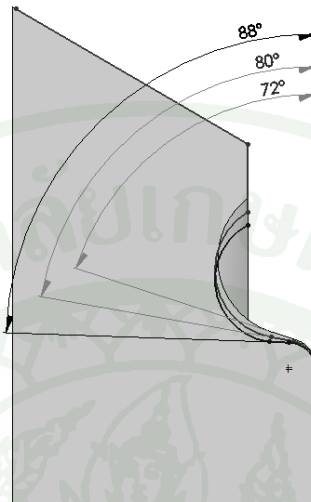
ภาพผนวกที่ 11 เอามือกดอย่างแรง

การลอก Tape ออกนั้น เราจะดึง Tape ออกในลักษณะที่แสดงตามรูปอย่างช้าๆ ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ

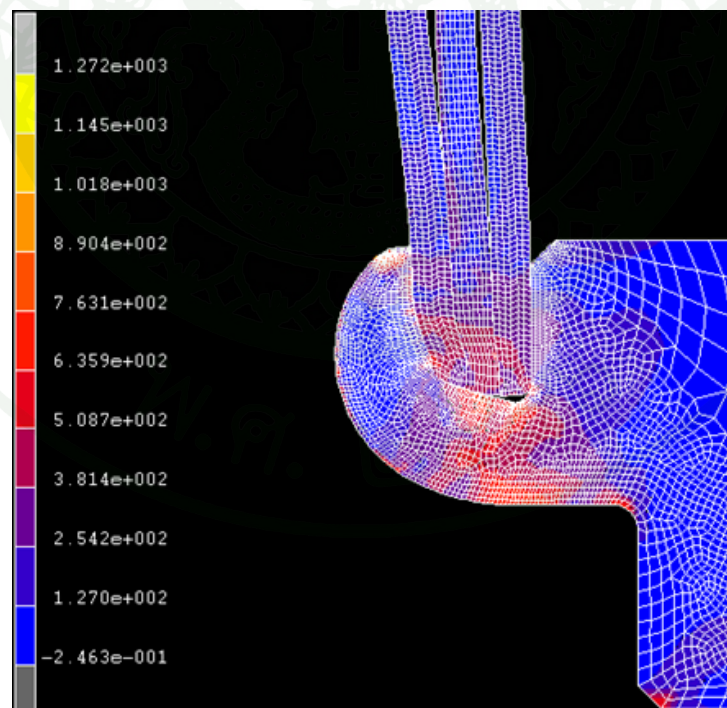


ภาพผนวกที่ 12 การลอก Tape

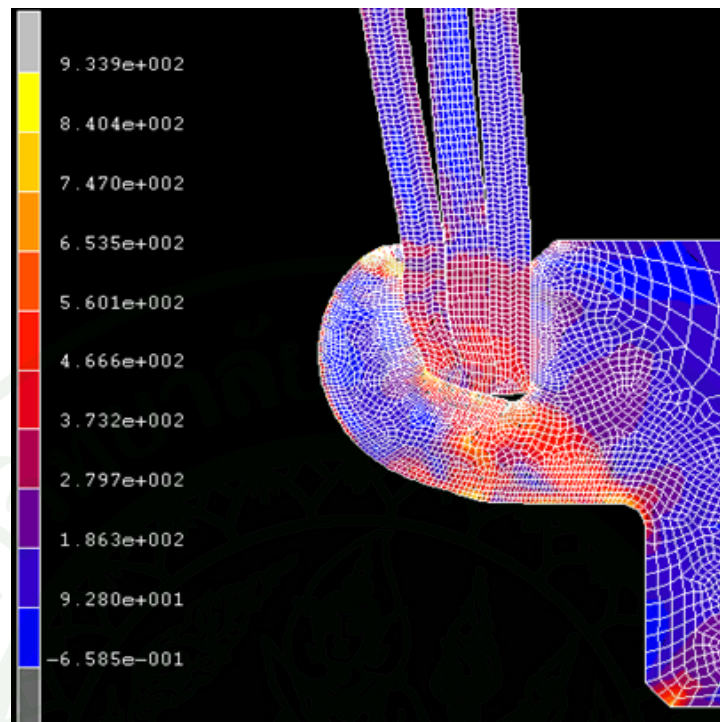
การปรับมุมเอียงของหัวกด



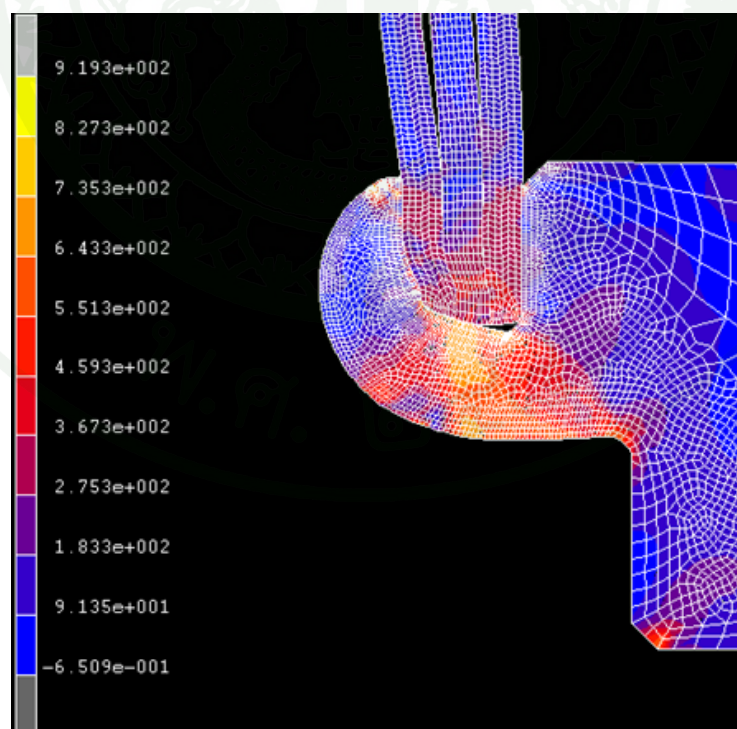
ภาพผนวกที่ 13 แสดงการปรับมุมเอียงหัวกดที่ 80 องศา และ 88 องศา



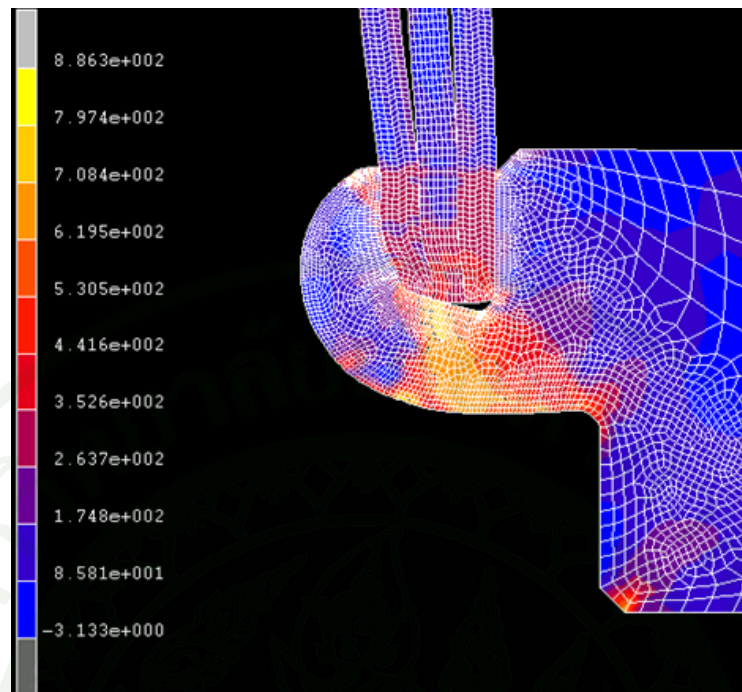
ภาพผนวกที่ 14 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 72 องศา ค่าความเค้น 1145 MPa



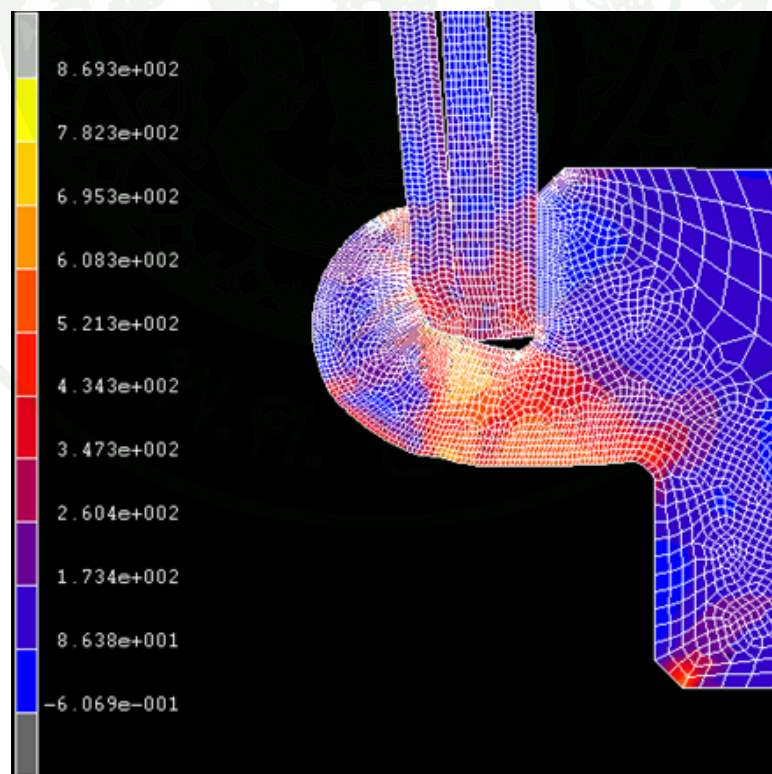
ภาพผนวกที่ 15 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 74 องศา ค่าความเค้น 933.9 MPa



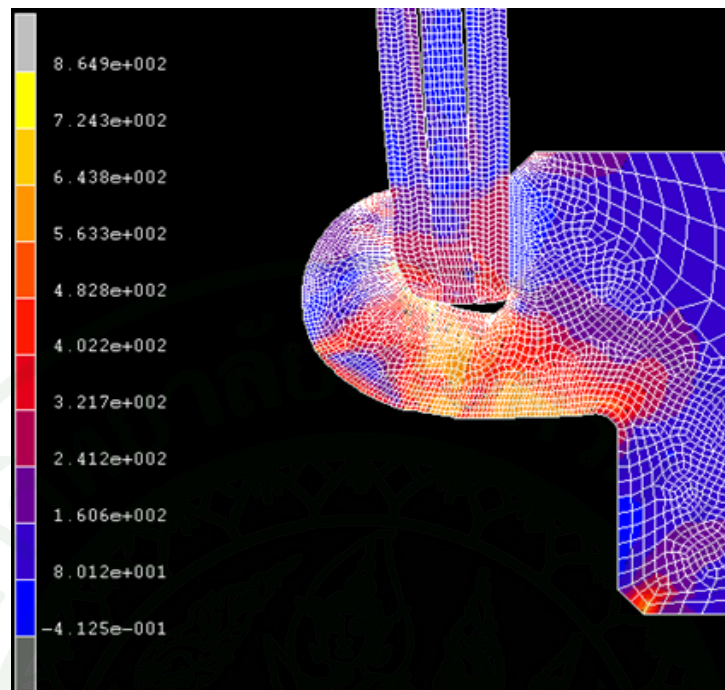
ภาพผนวกที่ 16 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 76 องศา ค่าความเค้น 919.3 MPa



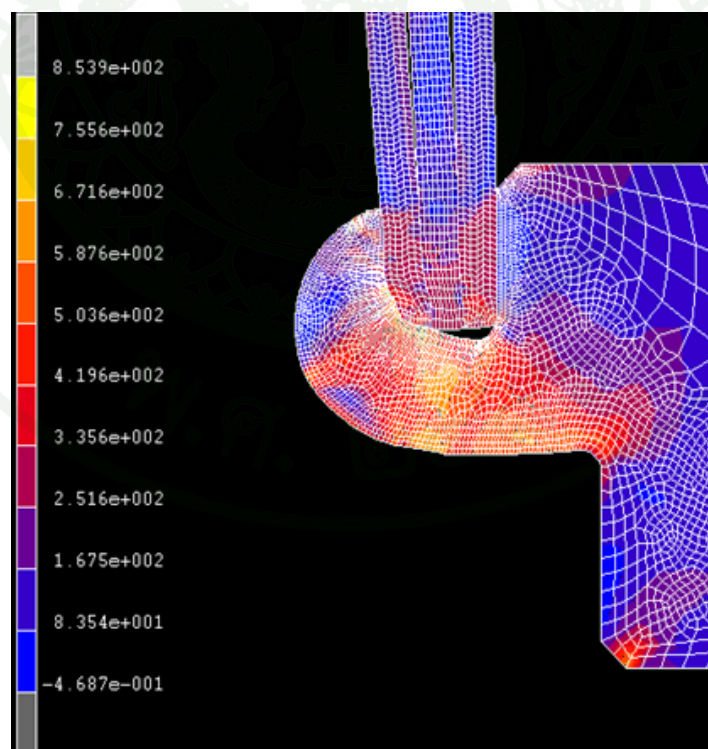
ภาพผนวกที่ 17 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 78 องศา ค่าความเค้น 886.3 MPa



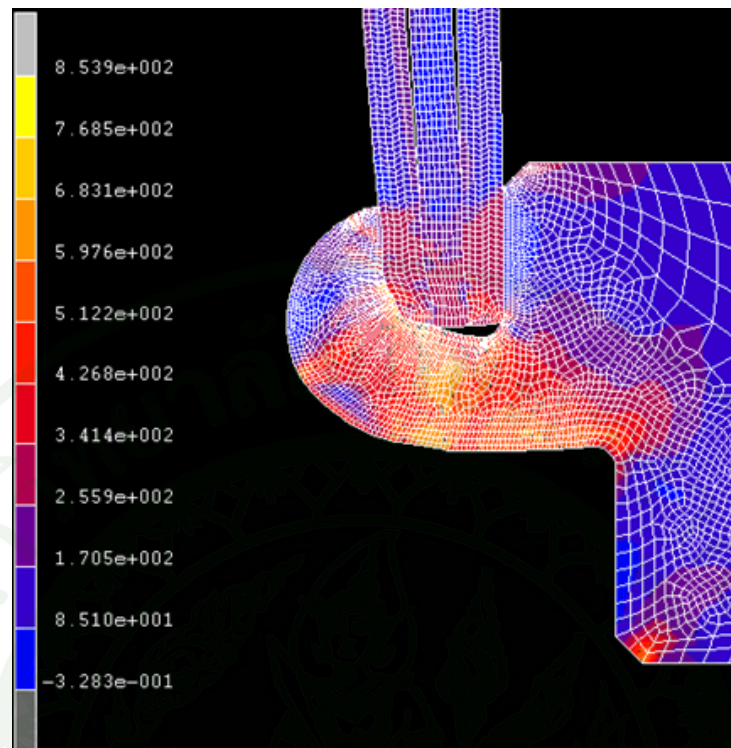
ภาพผนวกที่ 18 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 80 องศา ค่าความเค้น 869.3 MPa



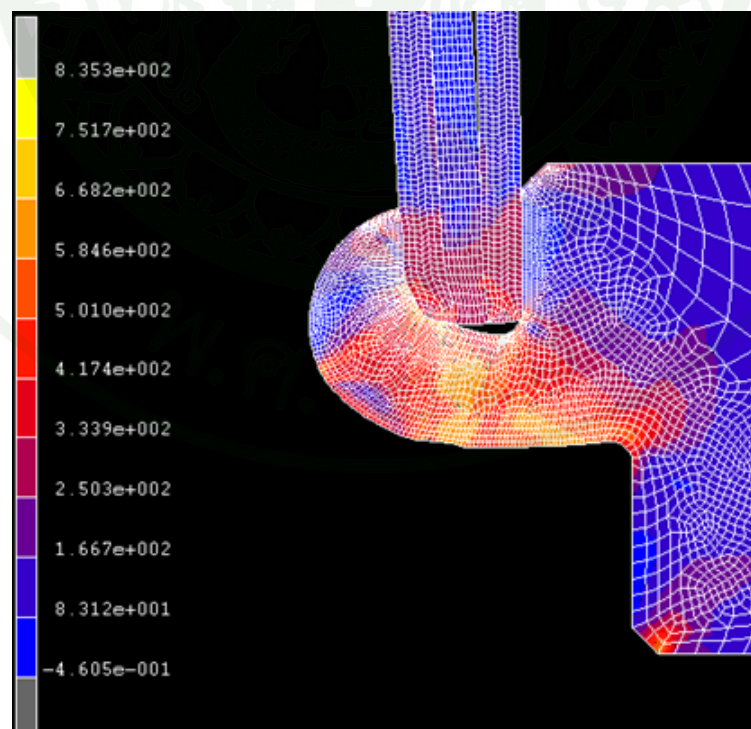
ภาพผนวกที่ 19 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวคดเอียง 82 องศา ค่าความเค้น 864.9 MPa



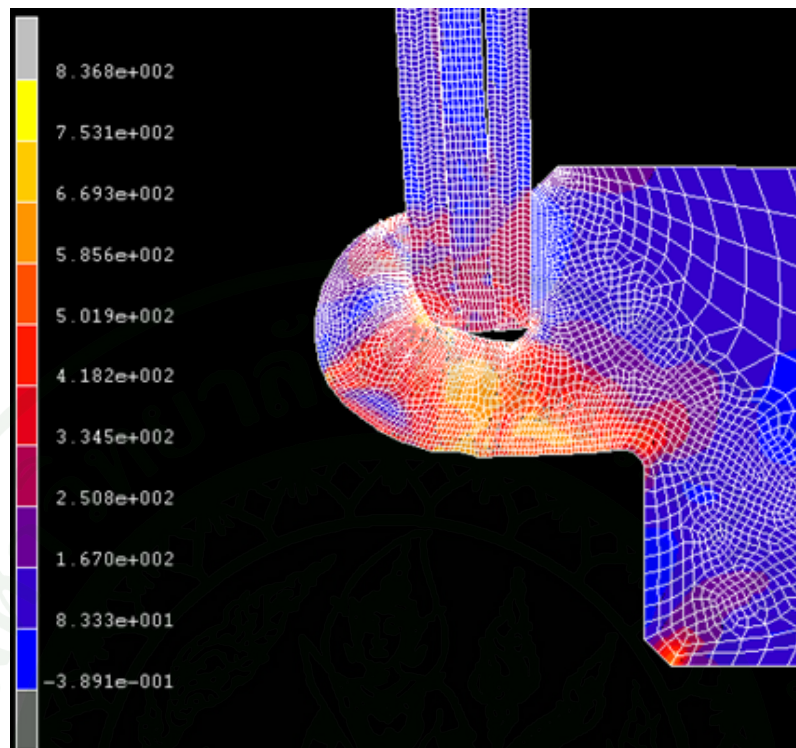
ภาพผนวกที่ 20 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวคดเอียง 84 องศา ค่าความเค้น 853.9 MPa



ภาพผนวกที่ 21 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 86 องศา ค่าความเค้น 853.9 MPa



ภาพผนวกที่ 22 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวกดเอียง 88 องศา ค่าความเค้น 835.3 MPa



ภาพผนวกที่ 23 ระดับแรงกด 25 ตัน มุมหัวกดเฉียง 90 องศา ค่าความเค้น 836.8 MPa

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	ทรงชัย สุวรรณภรณ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	15 มกราคม 2519
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	อ.ส.บ เครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขต พระนครเหนือ
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ออกแบบผลิตภัณฑ์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บจก.รอยัลคิงผลิตภัณฑ์เด็ก
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	ไม่มี
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ไม่มี