

การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุด
ต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำ

Using of the Finite Element Method to Study the Effects of Thin Adhesive Layer and
Riveted-Pitch Distance on the Stress Concentration Factor of Riveted Lap Joints

จักรชัย สุวรรณเนา

Jugchai Suwannao

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University

2549

ISBN 974-11-4561-6

เลขที่	TA491.R6 962, 2549 18 2
Bib Key	282711
	16.ตค. 2549

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่าง
ระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดค้ำ
ผู้เขียน นายจักร์ชัย สุวรรณเนา
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....(103นรท).....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล)

.....(103นรท).....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

.....(103นรท).....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ฟองสมุทร)

คณะกรรมการสอบ

.....(103นรท).....ประธานกรรมการ
(ดร.จิระภา สุขแก้ว)

.....(103นรท).....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล)

.....(103นรท).....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

.....(103นรท).....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ฟองสมุทร)

.....(103นรท).....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ปลุกผล)

.....(103นรท).....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตต์ญญ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
เครื่องกล

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึด
ผู้เขียน	นายจักร์ชัย สุวรรณนาวี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวบาง พิจารณาในรูปแบบของมอดูลัส และระยะห่างระหว่างหมุดยึดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึด เมื่อรับแรงดึงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย 1) การทดสอบความแข็งแรงดึงและเหนียวของชั้นกาวบาง เพื่อหามอดูลัสของชั้นกาว สำหรับกำหนดพฤติกรรมการตอบสนองการเคลื่อนที่ของชั้นกาวต่อแรงดึงและแรงเหนียวในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2) ทดสอบความต้านทานแรงดึง (stiffness) ของรอยต่อหมุดยึด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 3) ปรับเปลี่ยนความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาว และระยะห่างระหว่างหมุดในแบบจำลอง จากนั้นศึกษาว่าตัวแปรทั้งสองส่งผลอย่างไรต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรูเจาะ จากการศึกษพบว่า การเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาว ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยึดลดลง ทั้งนี้ชั้นกาวที่ยึดติดแข็งแรงขึ้นสามารถช่วยลดการคัดตัวของรอยต่อ ส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการคัดในรูเจาะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การลดระยะห่างระหว่างหมุดยึด ช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรูเจาะ เมื่อนำตัวแปรทั้งสองมาพิจารณาร่วมกันพบว่า ระยะห่างระหว่างหมุดไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น เมื่อกาวมีความแข็งแรงดึงมากกว่าหรือเท่ากับ 10 MPa

Thesis Title Using of the Finite Element Method to Study the Effects of Thin Adhesive Layer and Riveted-Pitch Distance on the Stress Concentration Factor of Riveted Lap Joints

Author Mr.Jugchai Suwannao

Major Program Mechanical Engineering

Academic Year 2006

ABSTRACT

This research focuses on the effects of the strength in stick of thin adhesive layers described in terms of modulus and the riveted-pitch distance on the stress concentration factor (SCF) of riveted lap joints, when the joints are subjected to static tensile loading using Finite Element Method (FEM). The research methodology composes of three tasks. The first task is to perform tensile and simple shear tests on thin adhesive layers to determine the modulus of adhesive, which will be used to specify the displacement-response behavior of adhesive in finite element models. The second task is to test the stiffness of riveted lap joints to verify the finite element models. The third task is to vary the strength in stick of thin adhesive layers and the riveted-pitch distance in finite element models and study how these two variables affect SCF at the rivet-shank hole. It is found that SCF is reduced when the strength in stick of thin adhesive layers is increased. The increase in the strength in stick helps reduce bending of the joints, resulting in the reduction in stresses at the rivet-shank hole. In addition, it is also found that SCF is reduced when the riveted-pitch distance is decreased. When the two variables are considered together, it is found that the riveted-pitch distance does not affect SCF when the strength in stick of thin adhesive layers is 10 MPa or higher.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบาง และ ระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้าได้รับความช่วยเหลือ และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ.ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล ผศ.ดร.วิริยะ ทองเรือง และ ผศ.ดร.ชงชัย ฟองสมุทร ซึ่งเป็นประธานกรรมการที่ปรึกษาและคณะกรรมการที่ปรึกษาตามลำดับ ที่กรุณาตลอดเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือต่างๆ ตลอดจนให้ความเอาใจใส่ ดูแล และช่วยตรวจสอบการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์อย่างสม่ำเสมอ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเสร็จสิ้นด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ข้าราชการ เจ้าหน้าที่ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่มีส่วนช่วยให้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่เข้าใจและเป็นกำลังใจตลอดมา นอกจากบุคคลที่กล่าวมาข้างต้นยังมีบุคคลที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์อีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ผู้เขียนขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

จักร์ชัย สุวรรณเนา

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(14)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.5 ขอบเขตการวิจัย	6
2 ทฤษฎี	8
2.1 คำศัพท์ประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น	8
2.2 วิธีการวิเคราะห์ชั้นกาวบาง	14
2.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	20
3 วิธีการวิจัย	26
3.1 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย	26
3.2 การทดสอบการยึดติดของชั้นกาวบาง	28
3.3 การทดสอบชิ้นงาน	34
3.4 การจำลองชิ้นงาน	39
3.5 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	42
3.6 การศึกษาตัวแปร	43
3.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	44
4 ผลและการอภิปรายผล	45
4.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมในการยึดติดของชั้นกาว	45
4.2 ผลการทดสอบรอยต่อหมุดยึด	48
4.3 ผลการยืนยันความถูกต้อง	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการศึกษาตัวแปร	58
5 สรุปผล	68
5.1 สรุปผลการทดลอง	68
5.2 วิจารณ์ผล	69
5.3 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก	73
ก. ตัวอย่างไฟล์ Input สำหรับการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์	74
ข. Elastic Constants	109
ประวัติผู้เขียน	111

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	สูตรสำหรับการคำนวณพื้นที่สปริงของแบบจำลอง 3 มิติ	20
3.1	แสดงรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบการยึดติดของชั้นกาวภายใต้แรงดึงและแรงเฉือน	31
3.2	แสดงรายละเอียดของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง	37
3.3	จำนวนสปริงอิเล็กเมนต์ที่เชื่อมต่อผิวสัมผัสทั้งหมด	42
3.4	รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์ที่ทำการยืนยันกับการทดลองจริง	42
3.5	แสดงแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์ของชิ้นงานทั้งหมด	43
4.1	ความแข็งแรงในการยึดติดของกาวในรูปของมอดูลัสเพื่อใช้กับสปริงอิเล็กเมนต์	47
4.2	เปอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการทดลองกับแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์	56
4.3	ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์ทั้งหมด	66

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 หมุดย้ำแบบหัวมาตรฐานทั้งสองข้าง	2
1.2 ชิ้นงานทดสอบของ Cheng	2
1.3 ชิ้นงานทดสอบของ Chutima and Blackie	3
1.4 ชิ้นงานทดสอบของ Barker and Hatt	4
1.5 ชิ้นงานทดสอบของ Raul, David and Siegfried	5
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเนื่องจากแรงดึง	8
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเนื่องจากแรงคด	9
2.3 ความเค้นผสมที่เกิดขึ้นบนแผ่นอลูมิเนียม	11
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลา	12
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง notch sensitivity กับรัศมีของรอยบากและวัสดุ	14
2.6 แสดงเปลี่ยนชั้นกาวบางเป็นสปริง	15
2.7 การเปลี่ยนกาวบางเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 2 มิติ	17
2.8 การเปลี่ยนกาวบางเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ	19
2.9 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย	21
3.1 แผนผังดำเนินกิจกรรม	27
3.2 การต่อแบบชน (butt joint)	28
3.3 อุปกรณ์ทดสอบแรงดึง	29
3.4 การต่อแบบเกย (single lap joint)	30
3.5 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือน	30
3.6 การเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน	33
3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)	34
3.8 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 50.8 มิลลิเมตร	35
3.9 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 38.1 มิลลิเมตร	35
3.10 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 30.16 มิลลิเมตร	36
3.11 อุปกรณ์ทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง	36
3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ	37
3.13 ลักษณะเอลิเมนต์ของแบบจำลองรอยต่อหมุดย้ำ	39

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3.14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อหมุดย้า	40
3.15 ขนาดรูปร่างของหมุดย้า	40
3.16 พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของหมุดย้าและแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์	41
4.1 กราฟแสดงพฤติกรรมการยืดคดในแนวตั้งฉากกับผิวทวภายใต้แรงดึงของชั้นทววยงยี่ห้อ ACT No. 354 H	45
4.2 กราฟแสดงพฤติกรรมการยืดคดในแนวเอียงภายใต้แรงเอียงของชั้นทววยงยี่ห้อ ACT No. 354 H	46
4.3 กราฟแสดงพฤติกรรมการยืดคดในแนวตั้งฉากกับผิวทวภายใต้แรงดึงของชั้นทวอียอกชี่ ยี่ห้อ Araldite Standard	46
4.4 กราฟแสดงพฤติกรรมการยืดคดในแนวเอียงภายใต้แรงเอียงของชั้นทวอียอกชี่ ยี่ห้อ Araldite Standard	47
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อเกลี่ยที่ได้รับจากการทดลองจริง สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร	48
4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อเกลี่ยที่ได้รับจากการทดลองจริง สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร	49
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อเกลี่ยที่ได้รับจากการทดลองจริง สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร	49
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อที่ได้รับจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร	50
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อที่ได้รับจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร	50
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อที่ได้รับจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร	51
4.11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีไม่ทากว ระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร	52
4.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีทากว ระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร	52

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.26 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีไม้ทากาว ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร	60
4.27 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาวยาง ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร	61
4.28 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาวอีพอกซี ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร	61
4.29 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีไม้ทากาว ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร	62
4.30 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาวยาง ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร	62
4.31 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาว adhesive A (E=10 MPa, G=3.84 MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร	63
4.32 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาวอีพอกซี ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร	63
4.33 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาว adhesive B (E=100 MPa, G=38.46 MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร	63
4.34 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาว adhesive A (E=10 MPa, G=3.84 MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร	64
4.35 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาว adhesive B (E=100 MPa, G=38.46 MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร	64
4.36 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาว adhesive A (E=10 MPa, G=3.84 MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร	64
4.37 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาว adhesive B (E=100 MPa, G=38.46 MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร	65
4.38 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาว adhesive A (E=10 MPa, G=3.84 MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร	65

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4.39 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีதாகาว adhesive B ($E=100$ MPa, $G=38.46$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร	65
4.40 กราฟแสดงค่ามอดูลัสของกาว และระยะห่างระหว่างหมุดยึดมีผลต่อการเพิ่มลดค่าสัมประสิทธิ์ความเค้มของความเค้นในรอยต่อหมุดยึด	66

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

SCF	ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น
SCF_r	ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นต่อการล้า
SCF_{eff}	ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่หน้าตัดของรูเจาะ
K_t^t	ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเนื่องจากแรงดึง
K_t^b	ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเนื่องจากแรงคด
K_t^{eff}	ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่หน้าตัดของรูเจาะ
FEM	วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
FEA	การวิเคราะห์ตัวบ่งชี้ไฟไนต์เอลิเมนต์
σ_{max}	ความเค้นสูงสุด
σ_{max}^o	ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ
σ_{max}^t	ความเค้นดึงสูงสุด
σ_{max}^b	ความเค้นคดสูงสุด
σ_{min}	ความเค้นต่ำสุด
σ_{min}^o	ความเค้นต่ำสุดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ
σ_o	ความเค้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ
σ_o^t	ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ
σ_o^b	ความเค้นคดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ
σ_{apply}	ความเค้นของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด
σ_m	ความเค้นเฉลี่ย
σ_a	ความเค้นส่วนเปลี่ยน
q	notch sensitivity
w	ความกว้างของแผ่นโลหะ
A	พื้นที่หน้าตัดวิกฤติ
t	ความหนาของแผ่นโลหะ
d	ขนาดของรูเจาะตรงกลางแผ่น โลหะ
M	โมเมนต์คด
I	โมเมนต์ความเฉื่อย

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

c	ระยะห่างจากกึ่งกลางถึงขอบนอกของแผ่นโลหะ
$F_{n,i}$	แรงลัพธ์ในสปริงในแนวตั้งฉาก
$v_{n,i}$	การยืดตัวของสปริงในแนวตั้งฉาก
$k_{n,i}$	ความแข็งคืดของสปริงในแนวตั้งฉาก
n	แรงยืดตัวในแนวตั้งฉากชั้นกาว
F_{fi}	แรงลัพธ์ในสปริงในแนวเฉียง
u_{fi}	การยืดตัวของสปริงในแนวเฉียง
k_{fi}	ความแข็งคืดของสปริงในแนวเฉียง
f	แรงเฉือนในแนวชั้นกาว ซึ่งจะแยกเป็นแนวแกน x และ y
w_{i-1}, w_i และ w_{i+1}	ความกว้างของเอลิเมนต์
d_e	ความลึกของเอลิเมนต์
$\{f\}$	เมทริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ
$[k]$	สทิต์เฟนสของเอลิเมนต์
$\{d\}$	การกระจัดที่จุดต่อ
$\{F\}$	เมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ
$[K]$	สทิต์เฟนสมทริกซ์รวมของระบบ
$\{D\}$	เมทริกซ์รวมของการกระจัดของระบบ
σ_i	ความเค้น
τ	ความเค้นเฉือน
F	แรงคืด
F_{max}	แรงคืดสูงสุด
F_{min}	แรงคืดต่ำสุด
P_s	แรงเฉือน
A_0	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น
ϵ_i	ความเครียด
γ	ความเครียดเฉือน
l_0	ความยาวเริ่มต้น
δ_s	ความยาวที่เปลี่ยนไปเนื่องจากแรงเฉือน

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

Δl	ความยาวที่เปลี่ยนไปเนื่องจากแรงดึง
$\Delta \sigma_c$	ความเค้นที่เปลี่ยนไป
$\Delta \tau$	ความเค้นเฉือนที่เปลี่ยนไป
$\Delta \epsilon_c$	ความเครียดที่เปลี่ยนไป
$\Delta \gamma$	ความเครียดเฉือนที่เปลี่ยนไป
E	มอดุลัสยืดหยุ่น
G	มอดุลัสเฉือน
U	อัตราส่วนปริมาตร
$\Delta U_{F,FEM}$	การยืดตัวที่เปลี่ยนไปเมื่อแรงดึงต่างกันที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์
$\Delta U_{F,Exp}$	การยืดตัวที่เปลี่ยนไปเมื่อแรงดึงต่างกันที่ได้จากการทดลอง

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์ชิ้นงาน

X X X - X - XX - XXX

แสดงสัญลักษณ์ผลที่ได้ ดังนี้

“FEM” แสดงผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

“Exp” แสดงผลที่ได้จากการทดลองจริง

แสดงหมายเลขชิ้นงานทดสอบ “01,02,03,...”

หรือสัญลักษณ์แสดงค่าเฉลี่ย “AV”

หรือสัญลักษณ์แสดงแบบจำลอง “MO”

แสดงระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ ในหน่วย mm

แสดงสัญลักษณ์การยึดติดชิ้นงาน ดังนี้

“F” แสดงการยึดแบบ free bonding คือ ไม่มีกาวเป็นตัวยึดติดชิ้นงาน

“R” แสดงการยึดติดชิ้นงาน โดยใช้กาวยาง (rubber glue)

“E” แสดงการยึดติดชิ้นงาน โดยใช้กาวอีพอกซี (epoxy adhesive)

แสดงสัญลักษณ์รูปร่างของชิ้นงานแบบต่างๆ ดังนี้

“B” แสดงชิ้นงานทดสอบกาวแบบ Butt-joint

“L” แสดงชิ้นงานทดสอบกาวแบบ Lap-joint

“J” แสดงชิ้นงานตัวอย่างที่ต่อด้วยหมุดย้ำ (riveted lap joints)

แสดงสัญลักษณ์ลักษณะของแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน ดังนี้

“T” แสดงสัญลักษณ์แรงดึง

“S” แสดงสัญลักษณ์แรงเฉือน

บทที่ 1

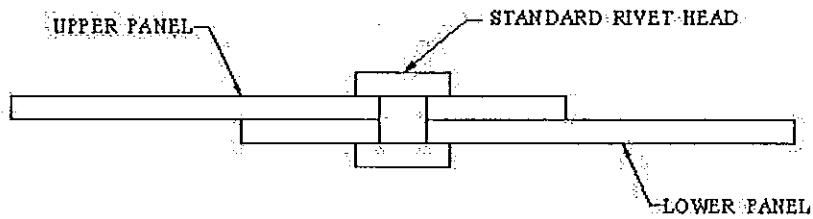
บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

การต่อแผ่นโลหะด้วยหมุดยึดโดยทั่วไปเป็นการต่อแบบเกย (lap joint) ต้องเจาะรูแผ่นโลหะสำหรับหมุดยึด (rivet) ดังรูปที่ 1.1 มีข้อดีคือ ความแข็งแรงต่อน้ำหนักของโครงสร้างสูงกว่าการเชื่อมโดยตรง มีข้อเสียคือ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration Factor, SCF) สูงบริเวณรูเจาะเมื่อรอยต่อรับแรงดึง ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบให้รอยต่อมีความคงทนต่อการล้าภายใต้แรงดึงสลับ (tensile cyclic loading) ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นบริเวณรูเจาะสูงจะส่งผลต่อความแข็งแรงและอายุการใช้งานของรอยต่อ

จากการศึกษาโดย Dechwayukul [1] พบว่า การเพิ่มการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อหมุดยึดโดยใช้สารกันรั่ว (sealants) ซึ่งเป็นกาวที่มีค่ามอดูลัสต่ำทาเป็นชั้นบางๆมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยึดลดลง เป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของรอยต่อภายใต้ภาระแรงดึงสลับ การศึกษาค้นคว้าให้แนวทางในการพัฒนาปรับปรุงรอยต่อแบบเกยด้วยหมุดยึดให้มีความทนทานมากขึ้น สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากที่กล่าวมาโดยจะศึกษาการยึดติดของกาวระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อว่าส่งผลอย่างไรต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้น เมื่อกาวมีความแข็งแรงในการยึดติดที่สูงขึ้น โดยพิจารณาจากค่ามอดูลัสของกาวที่สูงขึ้น พร้อมทั้งจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหมุดยึดว่าส่งผลอย่างไรต่อการเพิ่มลดของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยึด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบรอยต่อหมุดยึดให้สามารถต้านทานแรงดึงได้ดียิ่งขึ้นต่อไป

ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นในรอยต่อหมุดยึดขณะนี้ยังไม่สามารถทำได้โดยตรงด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากรอยต่อมีรูปทรงเรขาคณิตและการส่งผ่านแรงที่ซับซ้อน [1] อีกทั้งยังมีการยึดติดกับชั้นกาวบางระหว่างผิวสัมผัสของรอยต่อ จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) มาใช้วิเคราะห์ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรูเจาะหมุดยึด

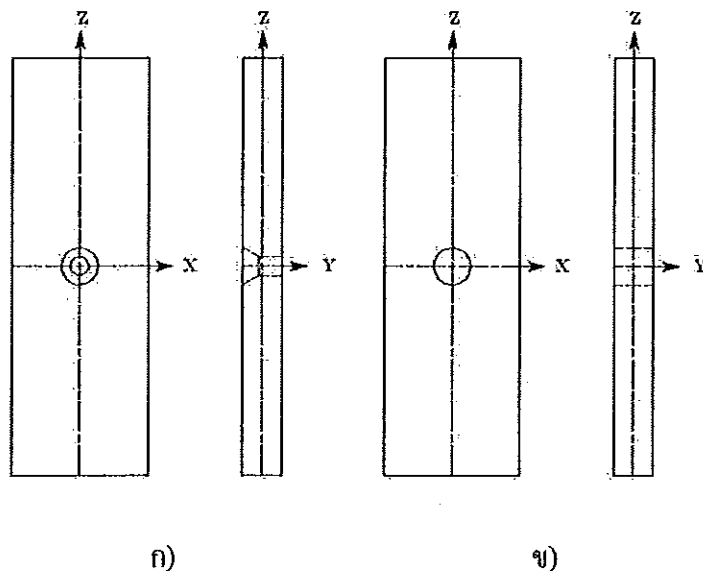


รูปที่ 1.1 หมุดย้ำแบบหัวมาตรฐานทั้งสองข้าง

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น

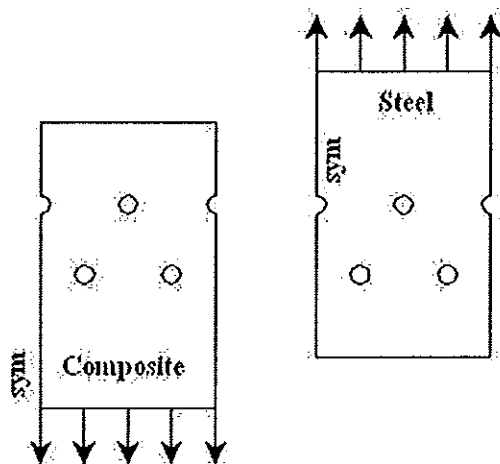
Cheng [2] พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นขึ้นอยู่กับลักษณะของรูเจาะบนแผ่นที่ใช้ยึดหมุดย้ำ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษเปรียบเทียบ ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรูเจาะระหว่างแบบหัวหมุดจม (countersunk) ตรงกลางแผ่นดังรูปที่ 1.2 ก) กับรูเจาะแบบกลมทะลุตรงกลางแผ่นดังรูปที่ 1.2 ข) ผลที่ได้คือ การเจาะรูแบบหัวหมุดจมมีค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นมากกว่าโดยใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 1.2 ชิ้นงานทดสอบของ Cheng ก) แบบหัวหมุดจม ข) แบบกลม
ที่มา : Cheng [2]

1.2.2 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาความแข็งแรงของชิ้นงานที่เชื่อมต่อด้วยหมุดย้ำ

จากการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Chutima and Blackie [3] พบว่า ระยะห่างระหว่างหมุด ระยะห่างระหว่างแถว และขนาดของหมุด มีผลต่อการส่งถ่ายแรงมายังหมุดแต่ละชั้น โดยประกอบชิ้นงานแบบต่อเกยสองชั้นแถวฟันปลา (multi-fastened double-lap joint) ดังรูปที่ 1.3 ชิ้นนี้เป็นแผ่นวัสดุผสม ส่วนชั้นนอกเป็นแผ่นเหล็ก ผลที่ได้คือ ระยะห่างระหว่างหมุด และระยะห่างระหว่างแถวที่เหมาะสมในการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอมายังหมุดแต่ละชั้นประมาณ 6 และ 2 เท่า ของขนาดของหมุด ตามลำดับ ส่วนขนาดของหมุดที่เหมาะสมในการกระจายแรงมายังหมุดแต่ละชั้นอย่างสม่ำเสมอ ควรพิจารณาจากความเค้นเฉือนสูงสุดที่มีค่าต่ำสุด และต้องคำนึงถึงค่าการกระจายแรงอย่างสม่ำเสมอมายังหมุดแต่ละชั้นด้วย



รูปที่ 1.3 ชิ้นงานทดสอบของ Chutima and Blackie

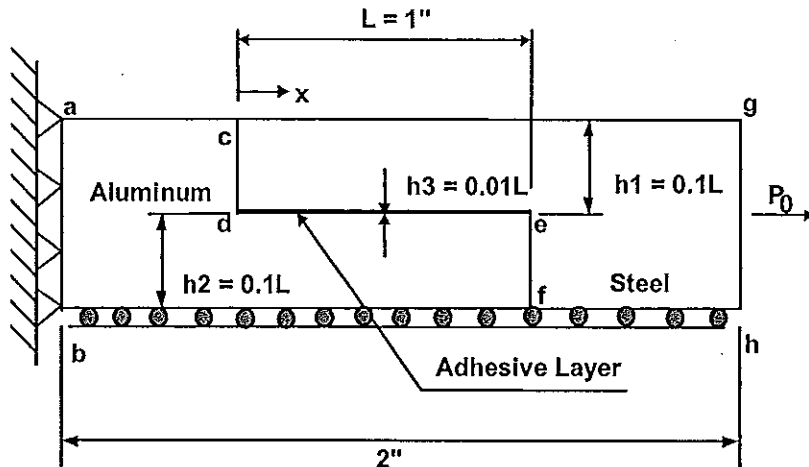
ที่มา : Chutima and Blackie [3]

1.2.3 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษารอยต่อแบบเกยด้วยกาวไม่มีหมุดย้ำ

Wooley and Carver [4] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อเกยกันด้วยกาว โดยสมมุติให้รอยต่อเป็นปัญหาแบบความเครียดในระนาบ (plane strain) และแบ่งเอลิเมนต์เป็นสามเหลี่ยม พบว่าความเข้มของความเค้นขึ้นอยู่กับรูปร่างทางเรขาคณิตและชนิดของวัสดุที่ต่อกัน ผลของการกระจายความเค้นในชั้นกาวที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของ Goland and Reissner [5] พบว่ามี การกระจายความเค้นที่เหมือนกัน

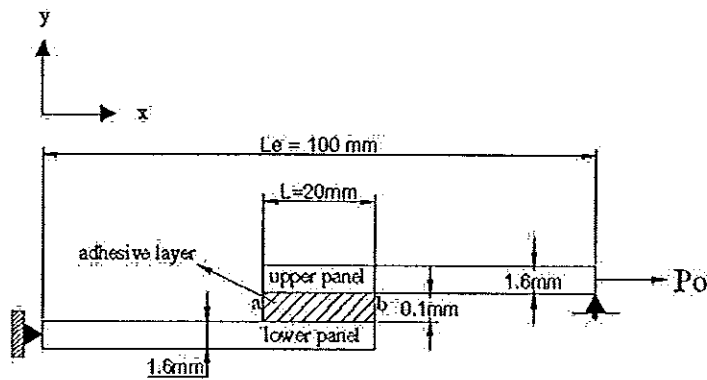
Barker and Hatt [6] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของชั้นกาวบางที่ใช้เชื่อมต่อกับโลหะต่างชนิดกัน ดังรูปที่ 1.4 ผลที่ได้ คือ การกระจายความเค้นเฉือนที่บริเวณ

จุดปลายของชั้นกาว (d และ e) มีค่าไม่เท่ากัน โดยค่าความเค้นเฉือนสูงสุดเกิดที่บริเวณจุดปลายของชั้นกาวด้านอลูมิเนียม และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นกาวลดลง ในทำนองเดียวกันค่าความเค้นเฉือนต่ำสุดอยู่ที่บริเวณตรงกลางค่อนมาทางส่วนของเหล็กที่เชื่อมแยกกัน และจะมีค่าลดลงเมื่อชั้นกาวมีความหนาลดลง



รูปที่ 1.4 ชิ้นงานทดสอบของ Barker and Hatt
ที่มา : Barker and Hatt [6]

Raul, David and Siegfried [7] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของชั้นกาวบางที่ใช้เชื่อมต่อกับโลหะชนิดเดียวกัน ดังรูปที่ 1.5 โดยส่วนของวัสดุวิเคราะห์เป็นแบบ Bernoulli-Euler beam และส่วนของชั้นกาววิเคราะห์เป็นแบบแผ่นบาง (shell element) โดยสมมติปัญหาเป็นแบบความเครียดในระนาบ ผลที่ได้ คือ การกระจายความเค้นเฉือนที่บริเวณจุดปลายของชั้นกาว (a และ b) เท่ากัน และในทำนองเดียวกับความเค้นในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส โดยที่ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดอยู่ที่บริเวณจุดปลายของชั้นกาว และจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันค่าความเค้นเฉือนต่ำสุดอยู่ที่บริเวณตรงกลางของส่วนที่เชื่อมแยกกัน และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเค้นในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสสูงสุดอยู่ที่บริเวณจุดปลายของชั้นกาว และจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันค่าความเค้นในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสต่ำสุดอยู่ที่บริเวณตรงกลางของส่วนที่เชื่อมแยกกัน และจะมีค่าแนวโน้มคงที่เมื่อแรงดึงเพิ่มขึ้น จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การทดสอบ พบว่า มีลักษณะเหมือนกัน



รูปที่ 1.5 ชิ้นงานทดสอบของ Raul, David and Siegfried
ที่มา : Raul, David and Siegfried [7]

1.2.4 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มของความเค้นในรูเจาะหมุดย้ำ

Iyer, Xue, Bastias, Rubin และ Hahn [8] ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ศึกษาเปลือกของเครื่องบินที่ใช้การต่อด้วยหมุดย้ำ โดยไม่ได้ใช้การร่วม ผลการวิเคราะห์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในบริเวณรูหมุดย้ำมีค่าอยู่ประมาณ 8 ถึง 10

Iyer [9] ได้พัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการจำลองการเชื่อมต่อแยกกันของแผ่นอลูมิเนียมด้วยหมุดย้ำแบบหนึ่งและสองแถว โดยใช้หมุดย้ำแบบหัวมาตรฐานและหัวแบบจม เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในบริเวณรูของแผ่นอลูมิเนียม

1.2.5 การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษารอยต่อหมุดย้ำร่วมกับกาว

Liu และ Sawa [10] ศึกษาโดยสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์รอยต่อหมุดย้ำ และทาการวิเคราะห์บริเวณผิวหน้าสัมผัสของรอยต่อแต่ไม่ได้ทำในส่วนของรูหมุดย้ำ จากผลการวิเคราะห์พบว่า การทาการลงบนรอยต่อทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อสูงขึ้น

Fongsamootr [11] ศึกษาโดยสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์รอยต่อหมุดย้ำร่วมกับกาวมอดูลัสต่ำ ได้ใช้สารกันรั่วบางๆทาไประหว่างผิวสัมผัสของรอยต่อทั้งหมด จากนั้นทำการทดสอบความแข็งแรงและการเสียรูปของรอยต่อ รวมทั้งความคงทนต่อการล้า พบว่าการทาสารกันรั่วซึ่งมีสมบัติคล้ายกาวยางที่มีค่ามอดูลัสต่ำช่วยให้ชิ้นงานยึดติดกัน กาวดังกล่าวช่วยลดการคัดตัวของรอยต่อส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นลดลง ซึ่งเป็นการเพิ่มความคงทนต่อการล้ามากขึ้น

Imanaka [12] ศึกษาความทนต่อการล้าของรอยต่อหมุดยั่วร่วมกับกาว เมื่อมีระยะความยาวของการเกย ชนิดของกาว และหมุดยั่วที่มีวัสดุต่างกัน โดยการกระจายความเค้นในชั้นกาวถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กาวประเภทอีพอกซีความแข็งแรงสูง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงของกาวสามารถปรับปรุงให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ โดยการเชื่อมต่อชิ้นงานด้วยกาวกับหมุดยั่วร่วมกัน

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรูเจาะหมุดยั่ว เมื่อรอยต่อมีการใช้กาวความแข็งแรงสูงร่วมกับหมุดยั่วช่วยในการยึดติดรอยต่อ

1.3.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรูเจาะหมุดยั่ว เมื่อการยึดติดของชั้นกาวมีความแข็งแรงต่างกัน โดยพิจารณาจากค่ามอดูลัสของกาวที่เปลี่ยนไป

1.3.3 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรูเจาะหมุดยั่ว เมื่อระยะห่างในการยึดหมุดยั่วเปลี่ยนไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลการออกแบบรอยต่อหมุดยั่วให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เปลี่ยนไป โดยการเลือกใช้กาว และระยะห่างระหว่างหมุดยั่วที่เหมาะสมเป็นหลัก

1.4.2 เป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analyses, FEA) สำหรับงานวิจัยทางด้านวิศวกรรม ศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรอยต่อที่มีความซับซ้อน

1.5 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรอยต่อหมุดยั่ว โดยจะศึกษาหมุดยั่วที่ลักษณะหัวมาตรฐานทั้งสองข้างดังรูปที่ 1.1 ยึดติดระหว่างชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอยด์ โดยตัวแปรและขอบเขตที่จะทำการศึกษามีดังนี้

1.5.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในรูเจาะหมุดย้ำ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของรอยต่อ

1.5.2 ค่ามอดุลัสของกาวที่เหมาะสม เนื่องจากกาวที่มีมอดุลัสที่ต่างกัน จะมีผลต่อการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อต่างกัน

1.5.3 ค่าระยะห่างระหว่างหมุดย้ำที่เหมาะสม เนื่องจากระยะห่างระหว่างหมุดย้ำที่ต่างกัน จะเป็นตัวกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของรอยต่อ จึงส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อ

1.5.4 การศึกษาครั้งนี้ไม่พิจารณาผลของความหนาของชั้นกาว และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน

1.5.5 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในการศึกษานี้ เป็นผลการคำนวณจากวิธีของไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อรอยต่อรับแรงดึงสถิตย์ (static tensile loading) เท่านั้น ในการศึกษานี้ยังไม่ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นต่อการฉีก (fatigue Stress Concentration Factor, SCF) ภายใต้แรงดึงสลับ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่ได้จากการศึกษานี้สามารถเชื่อมโยงหรือสัมพันธ์กันได้เมื่อทราบค่า q (notch sensitivity) [13]

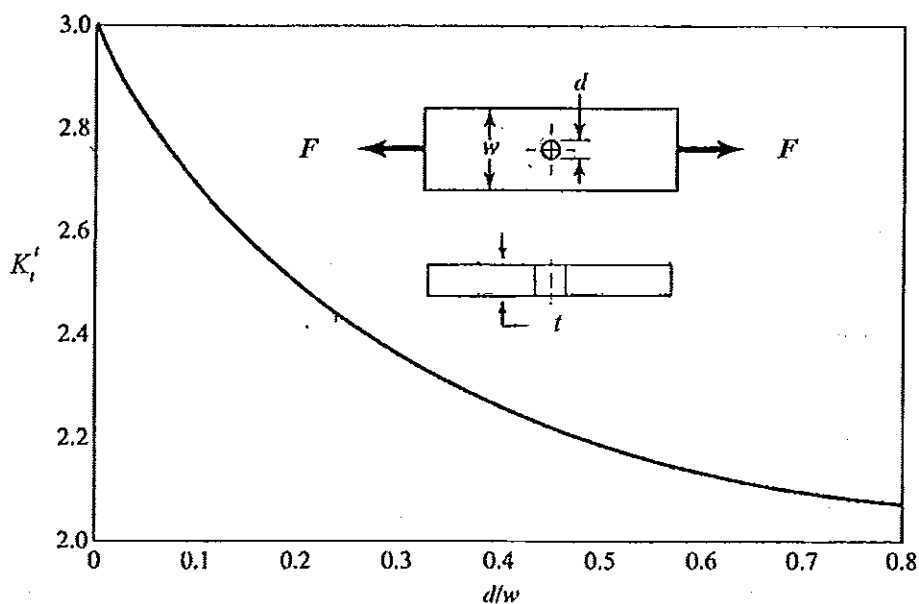
บทที่ 2

ทฤษฎี

การศึกษากลผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อเกยที่ยึดติดกันด้วยหมุดย้าและกาวร่วมกัน เป็นรอยต่อที่มีความซับซ้อน ดังนั้นต้องอาศัยหลักทฤษฎีพื้นฐานสามเรื่องประกอบเข้าด้วยกัน คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น วิธีการวิเคราะห์ชั้นกาวบาง (Thin Adhesive Layer Analysis, TALA METHOD) และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

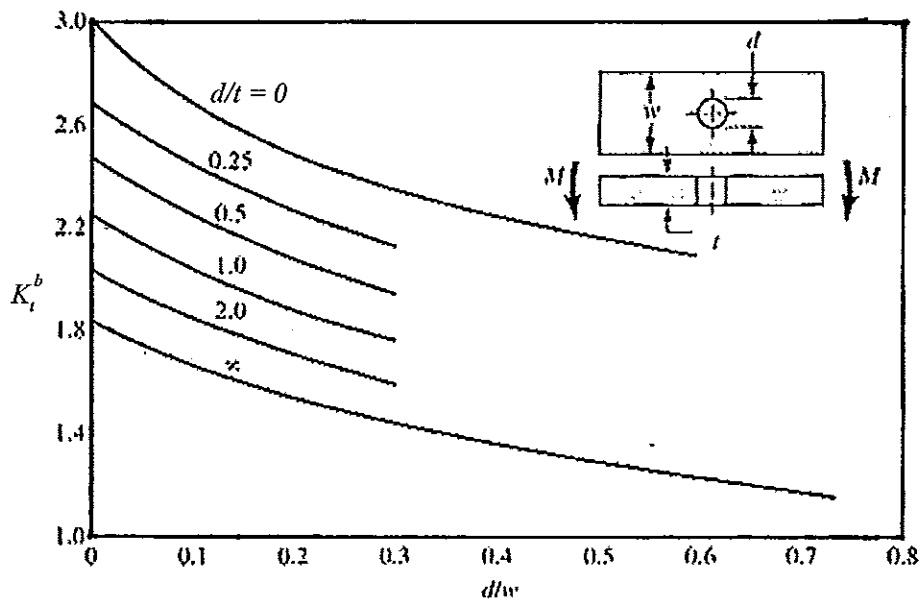
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น

ชิ้นส่วนโครงสร้างแผ่นเจาะรูกลมตรงกลาง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเปลี่ยนแปลงตามขนาดของรูเจาะและความกว้างของแผ่นโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 [13]



รูปที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเนื่องจากแรงดึง

ที่มา : Shigley, Mischke and Budynas [13]



รูปที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเนื่องจากแรงคัต
ที่มา : Shigley, Mischke and Budynas [13]

ค่าความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่บริเวณรูเจาะหมุดย้าดังแสดงในรูปที่ 4.20 หาได้จาก การคูณความเค้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะกับค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่หน้าตัดของรูเจาะ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.1)-(2.6)

ในแง่ของแรงดึง;
$$\sigma_o^t = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

$$\sigma_o^t = \frac{F}{(w-d) \times t} \quad (2.2)$$

ในแง่ของแรงคัต;
$$\sigma_o^b = \frac{Mc}{I} \quad (2.3)$$

$$\sigma_o^b = \frac{12Mc}{(w-d) \times t^3} \quad (2.4)$$

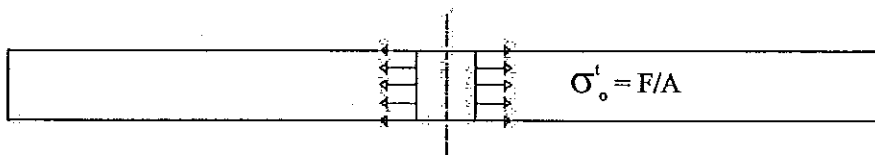
ในกรณี combined stress คิดเฉพาะความเค้นที่เกิดขึ้นที่ผิวของรูเจาะ

$$\text{เท่ากับ; } \sigma'_{\max} + \sigma^b_{\max} = K'_t \times \sigma'_o + K^b_t \times \sigma^b_o \quad (2.5)$$

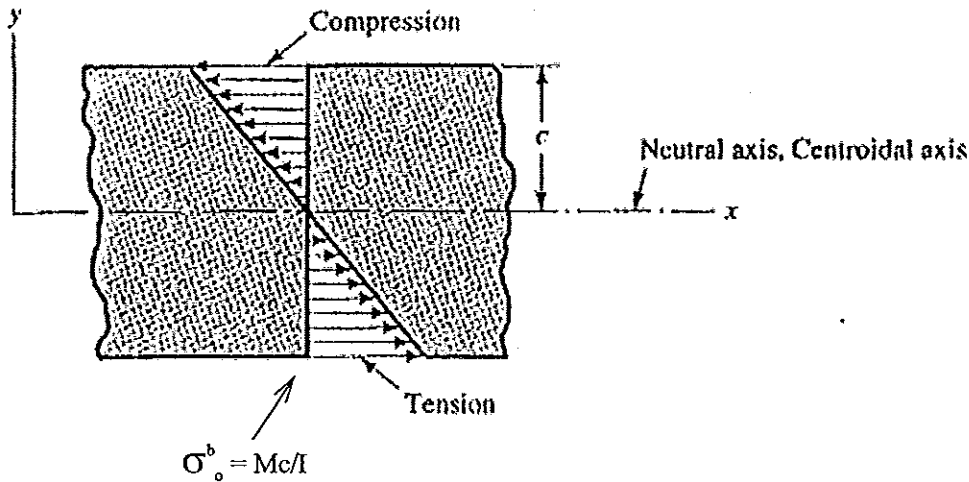
$$\sigma'_{\max} + \sigma^b_{\max} = K'_t \times \frac{F}{(w-d) \times t} + K^b_t \times \frac{12Mc}{(w-d) \times t^3} = K_t^{\text{eff}} \times \sigma_o \quad (2.6)$$

โดยที่ σ'_{\max} คือความเค้นดึงสูงสุด σ^b_{\max} คือความเค้นดัดสูงสุด σ_o คือความเค้นเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ σ'_o คือความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ σ^b_o คือความเค้นดัดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ K'_t คือค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นเนื่องจากแรงดึง K^b_t คือค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นเนื่องจากแรงดัด K_t^{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นที่หน้าตัดของรูเจาะ w คือความกว้างของแผ่นโลหะ F คือแรงดึง A คือพื้นที่ที่หน้าตัดวิกฤติ t คือความหนาของแผ่นโลหะ d คือขนาดของรูเจาะตรงกลางแผ่นโลหะ M คือ โมเมนต์ดัด I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย c คือระยะห่างจากกึ่งกลางถึงขอบนอกของแผ่นโลหะ

สำหรับการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำไม่สามารถใช้สมการที่ (2.1)-(2.6) คำนวณได้โดยตรง เพราะแรงที่กระจายบนพื้นที่หน้าตัดวิกฤติสำหรับคำนวณ σ_o นั้นไม่สามารถระบุค่าที่แน่นอนได้ขณะนี้ เนื่องจากหมุดย้ำรับแรงไปบางส่วน อีกทั้งความเค้นที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดวิกฤติ เกิดจากความเค้นผสมระหว่างการดัดของแผ่นอลูมิเนียม (plate bending due to eccentric loading) กับความเค้นเนื่องจากแรงดึง F [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นในรอยต่อหมุดย้ำจึงใช้สมการที่ (2.7) เป็นตัวกำหนดแทนเพราะรอยต่อรับความเค้นผสมจากแรงดึงและแรงดัด เนื่องจากเป็นความเค้นผสม จึงกำหนดนิยามของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นที่หน้าตัดของรูเจาะขึ้นใหม่ สำหรับรอยต่อคือ SCF_{eff} (effective Stress Concentration Factor)



(ก)



(๗)

รูปที่ 2.3 ความเค้นผสมที่เกิดขึ้นบนแผ่นอลูมิเนียม (ก) ความเค้นเนื่องจากแรงดึง (๗) ความเค้นเนื่องจากแรงดัด

$$SCF_{eff} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{apply}} \quad (2.7)$$

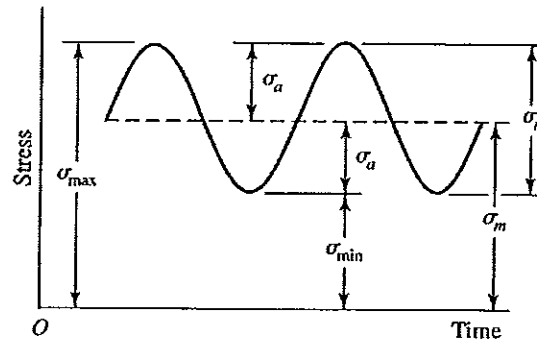
โดย σ_{apply} คือความเค้นของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด เป็นความเค้นที่อยู่ในแนวเดียวกับ σ_{max} ได้ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [1]

ทั้งนี้ σ_{max} คือความเค้นสูงสุด สามารถหาจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ σ_{apply} คำนวณจากแรงที่กระทำกับชิ้นงานหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทั้งหมด สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.8)

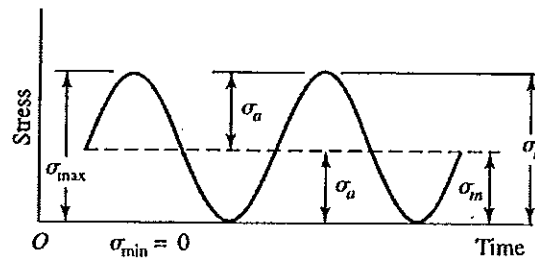
$$\sigma_{apply} = \frac{F}{(w \times t)} \quad (2.8)$$

ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ส่วนมากมักจะเป็นความเค้นสลับ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังรูปที่ 2.4 [13] ซึ่งชิ้นส่วนเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากเกิดการล้า (fatigue) การล้าที่เกิดเป็นสาเหตุใหญ่ของการเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรต่างๆ กลไกการวิบัติเนื่องจากการล้ามี 2 ระยะ คือระยะแรกชิ้นงานเกิดการรอยแตกเริ่มต้น เนื่องจากความเข้มข้นของความเค้น

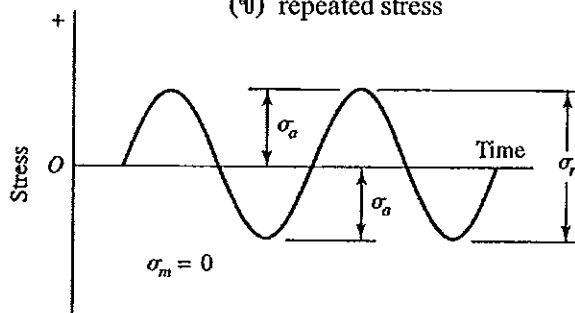
(Stress Concentration) ในบริเวณนั้นสูง และในระยะที่สอง เมื่อมีความเค้นเข้าไปซ้ำมารอยแตกนี้ก็
จะโตขึ้นเรื่อยๆ จะมีพื้นที่ภาคตัดขวางของวัสดุลดลง จนกระทั่งแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าค่า
ความแข็งแรงสูงสุด วัสดุก็จะแตกหักจากกัน



(ก) sinusoidal fluctuating stress



(ข) repeated stress



(ค) completely reversed sinusoidal stress

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับเวลา
ที่มา : Shigley, Mischke and Budynas [13]

ความเค้นที่มีอิทธิพลทำให้เกิดการวิบัติเนื่องจากการล้าของวัสดุ ประกอบด้วย ความเค้นเฉลี่ย (σ_m , meanstress) และความเค้นส่วนเปลี่ยนแปลง (σ_a , stress amplitude) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.9) และ (2.10)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.9)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.10)$$

เมื่อ σ_{\max} คือความเค้นสูงสุด σ_{\min} คือความเค้นต่ำสุด
สมการที่ (2.11)-(2.15) อธิบายผลของค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มข้นของความเค้นต่อการล้า (fatigue Stress Concentration Factor, SCF_f)

$$\sigma_{\max} = SCF_f \times \sigma_{\max}^o \quad (2.11)$$

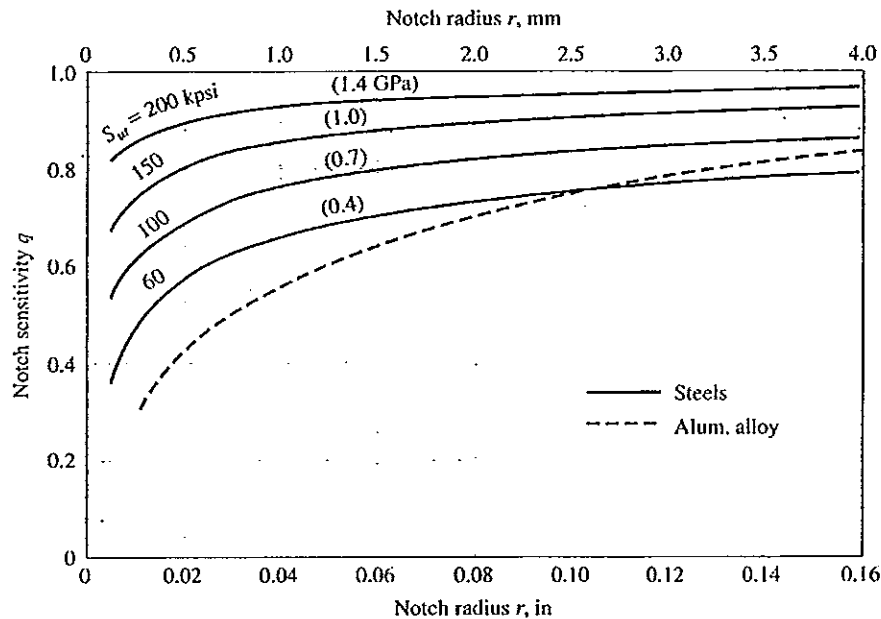
$$\sigma_{\min} = SCF_f \times \sigma_{\min}^o \quad (2.12)$$

โดยที่; $\sigma_{\max}^o = \frac{F_{\max}}{A} \quad (2.13)$

$$\sigma_{\min}^o = \frac{F_{\min}}{A} \quad (2.14)$$

และ; $SCF_f = 1 + q(SCF - 1) \quad (2.15)$

เมื่อ q คือ notch sensitivity แสดงคังรูปที่ 2.5 σ_{\max}^o คือความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ σ_{\min}^o คือความเค้นต่ำสุดที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของรูเจาะ F_{\max} คือแรงดึงสูงสุด F_{\min} คือแรงดึงต่ำสุด A คือพื้นที่หน้าตัดวิกฤติ



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง notch sensitivity กับรัศมีของรอยบากและวัสดุ
ที่มา : Shigley, Mischke and Budynas [13]

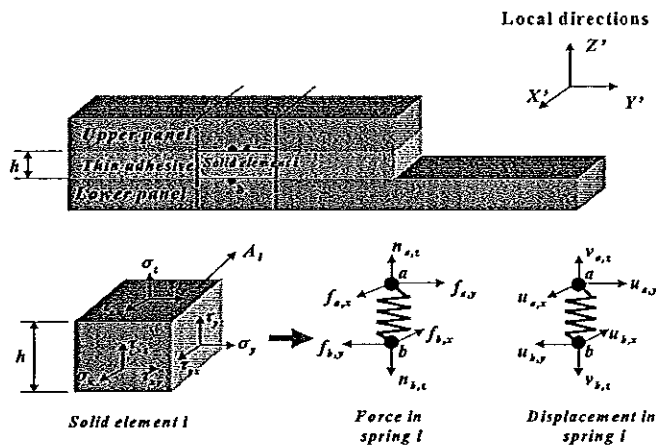
จากรูปที่ 2.5 พบว่าค่า q ขึ้นอยู่กับรัศมีของรอยบากและค่าสมบัติของวัสดุ ซึ่งค่า q จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นต่อการด้า โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นต่อการด้ามีผลต่อ σ_m และ σ_u ซึ่งความเค้นดังกล่าวจะนำไปพิจารณาการวิบัติของชิ้นงานภายใต้การด้าโดยใช้หลักการของ Goodman หรือ ASME Elliptic ต่อไป

จากสมการข้างต้นสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นต่อการด้า ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานและสมบัติเชิงกลของวัสดุ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของชิ้นงานเพียงอย่างเดียว

2.2 วิธีการวิเคราะห์ชั้นกาวบาง (Thin Adhesive Layer Analysis, TALA METHOD)

พฤติกรรมการยึดติดของชั้นกาวศึกษาในรูปของการต้านแรงและการเคลื่อนตัวระหว่างผิวสัมผัสที่กาวยึดติด การจำลองพฤติกรรมการยึดติดกันด้วยชั้นกาวบางระหว่างสองผิวสัมผัสที่สนใจในแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้หลักการ TALA [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 สปริงเอลิเมนต์หลายๆตัวจะนำมาใช้สำหรับจำลองพฤติกรรมของชั้นกาวบางทั้งในแนวเฉือนและแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส โดยสปริงแต่ละตัวจะมีค่าความแข็งตึง (stiffness) ตามความแข็งแรงในการ

ยึดติดของชั้นกาวบางในแนวต่างๆ การเปลี่ยนความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวระหว่างผิวสัมผัสให้เป็นค่าความแข็งดิ่งของสปริงทำได้โดยการเปลี่ยนมอดุลัสยึดหยุ่นและเฉือนของชั้นกาวตามขนาดพื้นที่ผิวและความหนาของชั้นกาวที่ใช้ยึดติด



รูปที่ 2.6 แสดงเปลี่ยนชั้นกาวบางเป็นสปริง

สมมุติให้ชั้นกาวบางมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงานที่ใช้ยึดติด ชั้นกาวเปรียบเสมือนผิวบางที่มีเฉพะ σ_z , τ_{xz} และ τ_{yz} เกิดขึ้นเมื่อแรงผ่านมาถึงชั้นกาว พิจารณาพื้นที่ผิวกาวเล็กๆ A_i ที่ความหนา h เชื่อมต่อระหว่างจุด a และ b ระหว่างผิวสัมผัส ความเค้นในแนวตั้งฉากกับชั้นกาว σ_z รวมทั้ง τ_{xz} และ τ_{yz} ซึ่งเป็นความเค้นเฉือนตามผิวของชั้นกาว ถูกเปลี่ยนเป็นแรงที่กระทำต่อชั้นกาว ขณะเดียวกันชั้นกาวจะต้านทานแรงเหล่านั้นด้วยความแข็งแรงของการยึดติด ซึ่งอยู่ในรูปของค่ามอดุลัส โดยยอมให้ชั้นกาวเกิดการยึดตัวด้วยความเครียด ϵ_z , γ_{xz} และ γ_{yz} จากหลักการดังกล่าวสามารถหาค่าความแข็งดิ่งของชั้นกาวบนพื้นที่ A_i ในรูปของสปริง ซึ่งสามารถจำลองพฤติกรรมกรยึดติดของชั้นกาวได้ดังสมการที่ (2.16)-(2.25)

$$\text{ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว; } \sigma_z = E \times \epsilon_z \tag{2.16}$$

$$(n_{a,z} + n_{b,z}) = \left(E \times \left(\frac{A_i}{h} \right) \right) \times (v_{a,z} + v_{b,z}) \tag{2.17}$$

$$(n_{a,z} + n_{b,z}) = k_n \times (v_{a,z} + v_{b,z}) \tag{2.18}$$

$$F_{n,i} = k_{n,i} \times v_{n,i} \quad (2.19)$$

$$k_{n,i} = E \times \left(\frac{A_i}{h} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อ $F_{n,i}$ คือแรงลัพธ์ในสปริงในแนวตั้งฉาก $v_{n,i}$ คือการยืดตัวของสปริงในแนวตั้งฉาก $k_{n,i}$ คือความแข็งตึง (stiffness) ของสปริงในแนวตั้งฉาก E คือมอดุลัสยืดหยุ่นของกาวบาง (elastic modulus of thin adhesive layer) n คือแรงยึดตัวในแนวตั้งฉากชั้นกาว

τ_{zx} และ τ_{zy} จะเท่ากันทั้งนี้วัสดุเป็นแบบไอโซโทรปิก (isotropic);

ในแนวเดือน;
$$\tau_{zx} = G \times \gamma_{zx} \quad (2.21)$$

$$(f_{a,x} + f_{b,x}) = \left(G \times \left(\frac{A_i}{h} \right) \right) \times (u_{a,x} + u_{b,x}) \quad (2.22)$$

$$(f_{a,x} + f_{b,x}) = k_f \times (u_{a,x} + u_{b,x}) \quad (2.23)$$

$$F_{f,i} = k_{f,i} \times u_{f,i} \quad (2.24)$$

$$k_{f,i} = G \times \left(\frac{A_i}{h} \right) \quad (2.25)$$

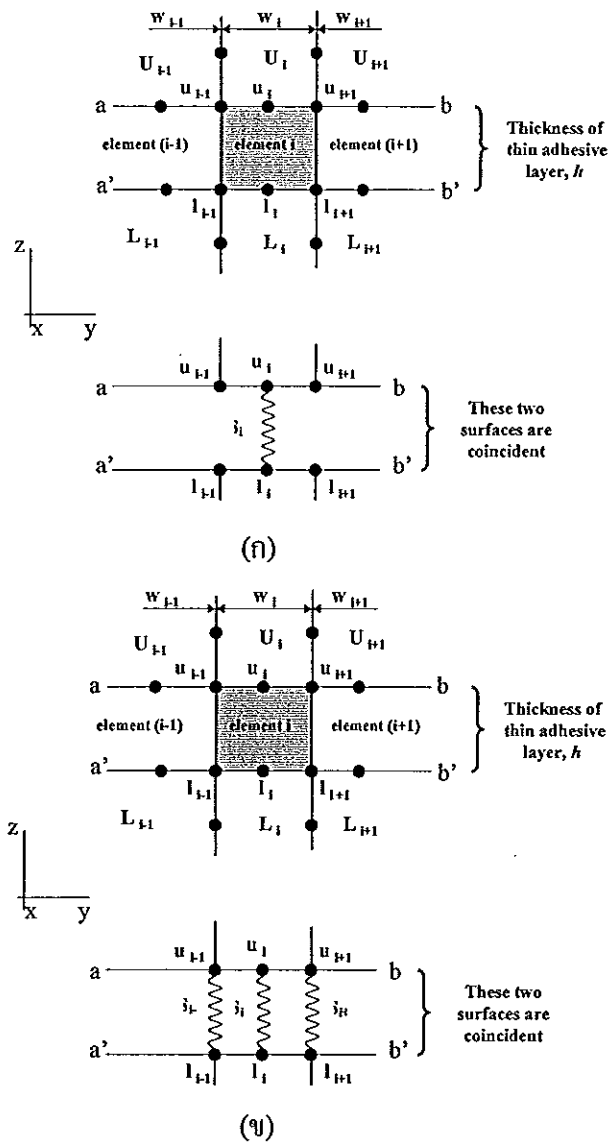
เมื่อ $F_{f,i}$ คือแรงลัพธ์ในสปริงในแนวเดือน $u_{f,i}$ คือการยืดตัวของสปริงในแนวเดือน $k_{f,i}$ คือความแข็งตึง (shear stiffness) ของสปริงในแนวเดือน G คือมอดุลัสเดือนของกาวบาง (shear modulus of thin adhesive layer) f คือแรงเดือนในแนวชั้นกาว ซึ่งจะแยกเป็นแนวแกน x และ y

จากสมการข้างต้นเมื่อทราบค่า E และ G ซึ่งได้จากการทดสอบชั้นกาวบางในห้องปฏิบัติการ เราสามารถเปลี่ยนค่าดังกล่าวเป็นค่าความแข็งตึงของสปริง เมื่อรู้ความหนาและพื้นที่สัมผัสในแบบจำลองที่เราสนใจจะศึกษาได้

2.2.1 การเปลี่ยนทาบเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 2 มิติ

การเปลี่ยนทาบเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 2 มิติ มี 2 วิธีดังต่อไปนี้

1. หนึ่งเอลิเมนต์เปลี่ยนเป็นสปริงหนึ่งตัว วิธีนี้จะทำการเปลี่ยนทาบหนึ่งเอลิเมนต์เป็นสปริงเอลิเมนต์หนึ่งตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) ซึ่งจะเปลี่ยน element i ของทาบเป็นสปริง S_i โดยที่สปริง S_i จะจำลองพฤติกรรมจริงของชั้นทาบในสองทิศทาง (z and y direction) ซึ่งสปริงจะเชื่อมต่อระหว่างจุด u_i และ l_i มีพื้นที่ดังสมการที่ (2.26)



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนทาบเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 2 มิติ (ก) หนึ่งเอลิเมนต์เปลี่ยนเป็นสปริงหนึ่งตัว (ข) หนึ่งเอลิเมนต์เปลี่ยนเป็นสปริงสามตัว

$$A_i = w_i \times d_e \quad (2.26)$$

เมื่อ w_i คือความกว้างของเอลิเมนต์ (in y' direction) d_e คือความลึกของเอลิเมนต์ (in x' direction) ซึ่งมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วย

2. หนึ่งเอลิเมนต์เปลี่ยนเป็นสปริงสามตัว วิธีนี้จะทำการเปลี่ยนกาวบางหนึ่งเอลิเมนต์เป็นสปริงเอลิเมนต์สามตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) ซึ่งจะเปลี่ยน element i ของกาวบางเป็นสปริง S_{i-1} , S_i และ S_{i+1} โดยที่สปริง S_{i-1} , S_i และ S_{i+1} จะจำลองพฤติกรรมจริงของชั้นกาวในสองทิศทาง (z and y direction) ซึ่งสปริงจะเชื่อมต่อระหว่างจุด u_{i-1} และ l_{i-1} จุด u_i และ l_i จุด u_{i+1} และ l_{i+1} มีพื้นที่ดังสมการที่ (2.27)-(2.29) ตามลำดับ

$$A_{i-1} = \left(\frac{w_{i-1}}{4} + \frac{w_i}{4} \right) \times d_e \quad (2.27)$$

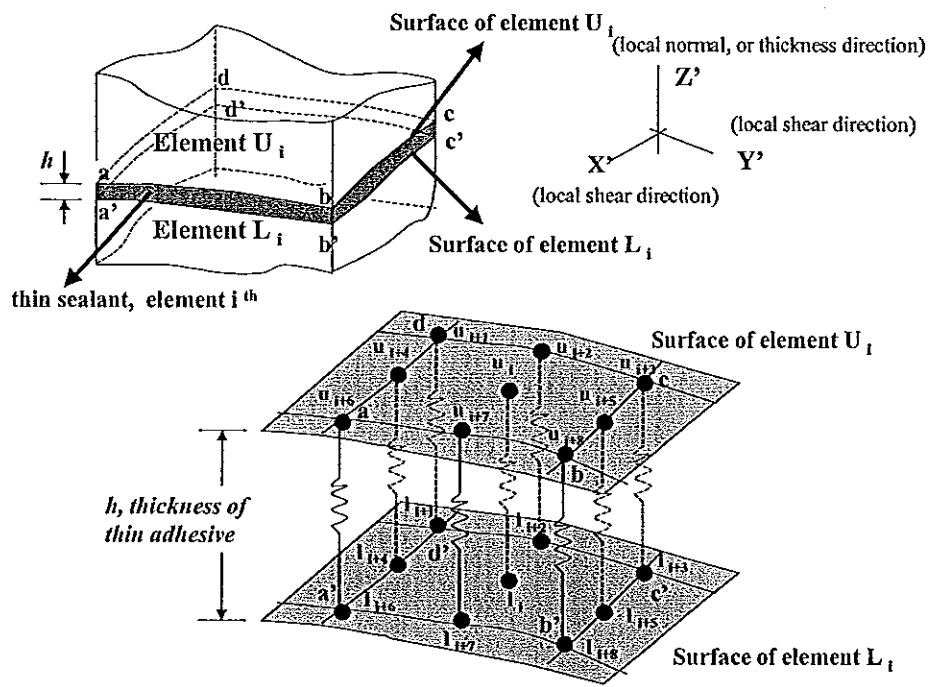
$$A_i = \left(\frac{w_i}{2} \right) \times d_e \quad (2.28)$$

$$A_{i+1} = \left(\frac{w_{i+1}}{4} + \frac{w_i}{4} \right) \times d_e \quad (2.29)$$

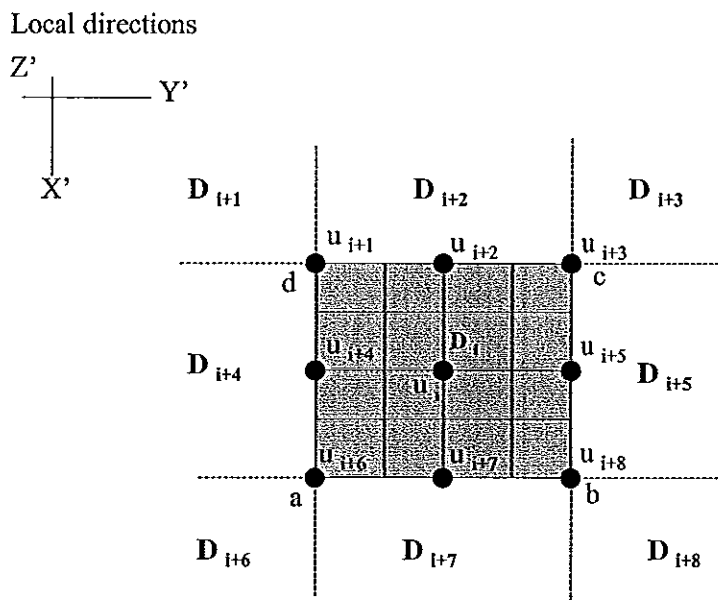
เมื่อ w_{i-1} , w_i และ w_{i+1} คือความกว้างของเอลิเมนต์ (in y' direction) d_e คือความลึกของเอลิเมนต์ (in x' direction) ซึ่งมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วย

2.2.2 การเปลี่ยนกาวบางเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ

หนึ่งเอลิเมนต์เปลี่ยนเป็นสปริงเก้าตัว วิธีนี้จะทำการเปลี่ยนกาวบางหนึ่งเอลิเมนต์เป็นสปริงเอลิเมนต์เก้าตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยที่จุดบนผิวสัมผัส a - b - c - d ของ element U_i จะเชื่อมต่อกับจุดบนผิวสัมผัส a' - b' - c' - d' ของ element L_i สปริง S_i จะจำลองพฤติกรรมจริงของชั้นกาวในสามทิศทาง ประกอบด้วยทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิว (z direction) และขนานกับผิวสัมผัส (x and y direction) ซึ่งสปริงจะเชื่อมต่อระหว่างจุด u_i และ l_i ส่วนสปริงที่เหลือ (S_{i+1} - S_{i+8}) ก็จะแสดงพฤติกรรมในลักษณะเช่นเดียวกัน โดยพื้นที่ของสปริงในแต่ละตัวแสดงในตารางที่ 2.1



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนกาวบางเป็นสปริงเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ

(ก) ภาพ isometric (ข) ภาพ top view

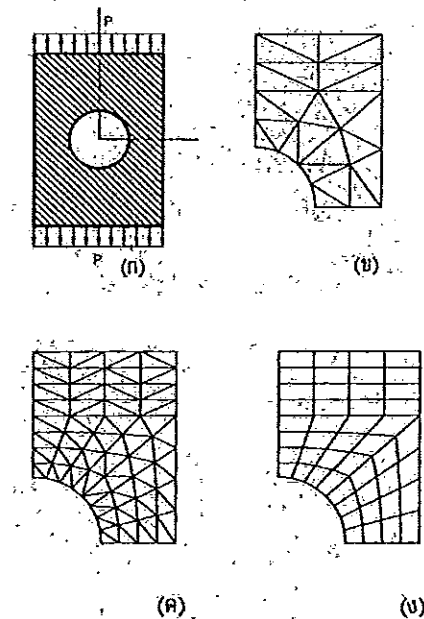
ตารางที่ 2.1 สูตรสำหรับการคำนวณพื้นที่สปริงของแบบจำลอง 3 มิติ

Spring	Spring Area
S_i	$A_i = 4(D_i)/16$
S_{i+1}	$A_{i+1} = (D_i)/16+(D_{i+1})/16+(D_{i+2})/16+(D_{i+4})/16$
S_{i+2}	$A_{i+2} = (D_i)/8+(D_{i+2})/8$
S_{i+3}	$A_{i+3} = (D_i)/16+(D_{i+2})/16+(D_{i+3})/16+(D_{i+5})/16$
S_{i+4}	$A_{i+4} = (D_i)/8+(D_{i+4})/8$
S_{i+5}	$A_{i+5} = (D_i)/8+(D_{i+5})/8$
S_{i+6}	$A_{i+6} = (D_i)/16+(D_{i+4})/16+(D_{i+6})/16+(D_{i+7})/16$
S_{i+7}	$A_{i+7} = (D_i)/8+(D_{i+7})/8$
S_{i+8}	$A_{i+8} = (D_i)/16+(D_{i+5})/16+(D_{i+7})/16+(D_{i+8})/16$

2.3 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง เช่น ด้านกลศาสตร์ของแข็ง ด้านพลศาสตร์ ด้านการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

เดซ พุทธเจริญทอง [14] กล่าวว่าในการวิเคราะห์โครงสร้าง หรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลต่างๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน สามารถจะหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่างๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ และบางบริเวณอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงของโหนดอย่างฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกัน จึงมีผลทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรง จากสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่อง ตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งเรียกชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้ว่าไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 2.9 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย (ก) แผ่นโลหะมีรูตรงกลาง (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมหายาบ (ค) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมละเอียดย (ง) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมโค้ง
ที่มา : เลข พุทธเจริญทอง [14]

2.3.1 ขั้นตอนของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลักการทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือ การแบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยๆ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งเรียกว่าไฟไนต์เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (displacement function) ที่นำมาแทนเอลิเมนต์จะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงด้วยจุดต่อ (node) หรือเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกัน และอาศัยสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน สามารถจะหาการกระจัด ความเค้น-ความเครียด ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงาน มีขั้นตอนต่างๆไปดังนี้

2.3.1.1 การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อย และการเลือกชนิดของเอลิเมนต์

การแบ่งโครงสร้างเป็นเอลิเมนต์ย่อย จะต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะของโครงสร้างเดิม คือแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) จะต้องเหมือนหรือสอดคล้องกับโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด คือบริเวณที่เป็นส่วนเว้า ส่วนโค้ง หรือมีรู หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างฉับพลัน ก็จำเป็นต้องแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้

ถูกต้องแม่นยำ ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากนักก็อาจจะแทนด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเอลิเมนต์มากเกินไปจนเกินความจำเป็น ก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง และอาจทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ด้วยถ้าเครื่องคอมพิวเตอร์มีความละเอียดในการคำนวณไม่เพียงพอ ส่วนการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ต้องคำนึงถึงรูปร่าง ลักษณะของโครงสร้าง และการกระทำของโหลด รวมทั้งความละเอียดของผลเฉลยที่ผู้วิเคราะห์ต้องการ คืออาจจะเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดมิติเดียว สองมิติ หรือสามมิติ

2.3.1.2 การเลือกฟังก์ชันการกระจัด

จะต้องเลือกฟังก์ชันการกระจัดภายในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันคือ พอลิโนเมียลฟังก์ชัน ซึ่งอาจจะเป็นพอลิโนเมียลกำลังหนึ่ง กำลังสอง กำลังสาม ทั้งนี้เพราะพอลิโนเมียลฟังก์ชันให้ความสะดวกในการวิเคราะห์มากกว่า

2.3.1.3 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด/การกระจัด และความเค้น/ความเครียด

การหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของแต่ละเอลิเมนต์ จำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ผลเฉลยของการกระจัด ความเค้น ความเครียดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกค้องแม่นยำ ย่อมขึ้นอยู่กับสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาใช้กับการคำนวณ ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้น หรือไม่เป็นสมการเชิงเส้น

2.3.1.4 หาสมการพีเนสมทริกซ์ และสมการของเอลิเมนต์

การหาสมการพีเนสมทริกซ์ของเอลิเมนต์ และสมการของแรงของแต่ละเอลิเมนต์สามารถหาได้หลายวิธีดังนี้

1. วิธีสมดุลโดยตรง (direct equilibrium method)

วิธีสมดุลโดยตรงเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถหาสมการพีเนสมทริกซ์ และสมการของแรงในทอมการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ได้ โดยใช้เงื่อนไขการสมดุลของแรงในเอลิเมนต์ ส่วนมากจะใช้หาสมการพีเนสมทริกซ์ของเอลิเมนต์มิติเดียว เช่น เอลิเมนต์สปริง เพลลา ท่อน โลหะ และคาน เป็นต้น

2. วิธีงานหรือพลังงาน (work or energy method)

โดยอาศัยหลักของงานสมมุติ (principle of virtual work) หลักของพลังงานศักย์ต่ำสุด (principle of minimum potential energy) และทฤษฎีของแคสติกลีโย (Castigliano's theorem) ก็สามารถหาสมการของเอลิเมนต์ และหาสทิวเฟเนสมเทริกซ์ของเอลิเมนต์สองและสามมิติได้ สำหรับวิธีของงานสมมุติสามารถใช้หาสทิวเฟเนสมเทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุทุกชนิด ส่วนวิธีพลังงานศักย์ต่ำสุด และทฤษฎีของแคสติกลีโย ใช้หาสทิวเฟเนสมเทริกซ์ของเอลิเมนต์ของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้นเท่านั้น

3. วิธีเวทเรซิดิว (method of weighted residuals)

วิธีเวทเรซิดิวที่นิยมกันมากคือ วิธีของกาเลอร์กิน (Galerkin's method) ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับการหาสมการของเอลิเมนต์ และให้ผลเช่นเดียวกับวิธีพลังงาน

โดยอาศัยวิธีใดวิธีหนึ่งจากสามวิธีตามที่กล่าวมา จะได้รับสมการสมดุลของแรงในเทอมของสทิวเฟเนสมเทริกซ์ และการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์ สมการดังกล่าวสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.30) และ (2.31) ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdot & \cdot & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdot & \cdot & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & \cdot & \cdot & k_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdot & \cdot & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \cdot \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\text{หรือ} \quad \{f\} = [k]\{d\} \quad (2.31)$$

เมื่อ $\{f\}$ คือเมทริกซ์ของแรงที่กระทำที่จุดต่อ $[k]$ คือสทิวเฟเนสมของเอลิเมนต์ $\{d\}$ คือการกระจัดที่จุดต่อ และ n คือจำนวนของระดับความเสรีของเอลิเมนต์

2.3.1.5 หาสมการรวมของระบบ และการกำหนดเงื่อนไขขอบ

สมการรวมของระบบโครงสร้างสามารถหาได้จาก การรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันด้วยวิธีซ้อนทับ (superposition method) หรือเรียกว่าวิธีสทิวเฟเนสมโดยตรง (direct stiffness method) โดยอาศัยหลักของการสมดุลของแรงที่จุดต่อของเอลิเมนต์ และการต่อเนื่องของโครงสร้าง สมการรวมของระบบโครงสร้างที่ได้รับ เขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.32) ดังนี้

$$\{F\} = [K]\{D\} \quad (2.32)$$

เมื่อ $\{F\}$ คือเมทริกซ์รวมของแรงที่จุดต่อ $[K]$ คือสทิตินสมเมทริกซ์รวมของระบบ $\{D\}$ คือเมทริกซ์รวมของการกระจัดของระบบ

เนื่องจากเมทริกซ์ $[K]$ เป็นเมทริกซ์เอกฐาน (singular matrix) ทั้งนี้เพราะตัวกำหนด (determinant) เท่ากับศูนย์ จึงไม่สามารถหาค่า $\{D\}$ โดยตรงจากสมการที่ (2.32) ได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) หรือเงื่อนไขบังคับ (constrains) เพื่อให้เมทริกซ์ $[K]$ ไม่เป็นเมทริกซ์เอกฐาน และสามารถหาค่าการกระจัดที่แต่ละจุดต่อที่ต้องการได้

2.3.1.6 หากการกระจัดของระบบ

หลังจากกำหนดเงื่อนไขขอบเขต หรือเงื่อนไขบังคับแล้ว สามารถหาการกระจัด d_1, d_2, \dots, d_n ได้โดยการแก้สมการพีชคณิต

2.3.1.7 การหาค่าความเครียดและความเค้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล นอกจากการทราบการกระจัดแล้วยังต้องการทราบค่าของความเครียด ความเค้น ค่าของโมเมนต์ และแรงเฉือน ค่าต่างๆ เหล่านี้สามารถจะคำนวณหาได้โดยอาศัยความรู้พื้นฐานทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง

2.3.1.8 การตีความผลลัพธ์

จากผลลัพธ์ที่คำนวณได้ สามารถจะทราบว่าที่จุดต่อใดของเอลิเมนต์ หรือบริเวณใดของโครงสร้างที่ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ เช่น บริเวณที่มีการกระจัดสูง บริเวณที่มีความเค้นสูง เป็นต้น สามารถที่จะลดขนาดของการกระจัด หรือความเค้นนั้นได้อย่างไร ทั้งนี้ต้องเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะ มิติของ โครงสร้างหรือชิ้นส่วนให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

2.3.2 ข้อได้เปรียบของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1. สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้าง หรือชิ้นงานเครื่องจักรกลที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีและสะดวก
2. สามารถจำลองการกระทำของโหลดในสถานะต่างๆ เช่น โหลดที่กระจายไม่สม่ำเสมอได้

3. ใช้วิเคราะห์โครงสร้าง หรือชิ้นส่วนระบบเครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยไม่มีควมยุ่งยาก

4. สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหา ไม่ว่าจะเงื่อนไขขอบ เงื่อนไขบังคับ และจุดรองรับจะอยู่ในลักษณะใดๆ

5. สามารถจะเลือกขนาดของเอลิเมนต์ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งให้ใหญ่หรือเล็กได้

6. ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือระบบสามารถจะเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้สะดวก ยังประหยัดเวลา และค่าใช้จ่าย

7. ในระบบการออกแบบ และการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสมัยใหม่ (CAD และ CAM) มักนิยมใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ผลก่อนที่จะผลิตชิ้นส่วนจริง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และมีความถูกต้องแม่นยำสูง

8. ในกรณีของวัสดุประเภทยืดหยุ่นตัวไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) หรือการยืดหยุ่นของวัสดุอยู่ในช่วงพลาสติก ยังสามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์สิ่งที่ต้องการได้สะดวก เช่น ใช้วิเคราะห์การล้าตัว และ creep ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เป็นต้น

ในการประมวลผลเชิงตัวเลข สามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งมีความสะดวก รวดเร็ว โดยในปัจจุบันมีซอฟต์แวร์หลายชนิด ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม ABAQUS [15] ในการวิเคราะห์ผลการคำนวณ

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

เริ่มจากการทดสอบความต้านทานการยึดติดของชั้นกาว โดยพิจารณาในแง่ของคุณลักษณะของชั้นกาวที่ต้านทานแรงดึงและแรงเฉือนเป็นหลัก เพื่อกำหนดพฤติกรรมการยึดตัวของชั้นกาวบางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) จากนั้นทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อหาความต้านทานแรงดึงของรอยต่อหมุดยึดแบบต่างๆ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง หลังจากนั้นปรับเปลี่ยนความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาว และระยะห่างระหว่างหมุดในแบบจำลอง จากนั้นศึกษาว่าตัวแปรทั้งสองส่งผลอย่างไรต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรูเจาะ

3.1 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

การศึกษานี้ประกอบด้วย 5 กิจกรรมหลัก กิจกรรมและความสัมพันธ์ของกิจกรรมแสดงในรูปที่ 3.1 ดังมีรายละเอียดดังนี้

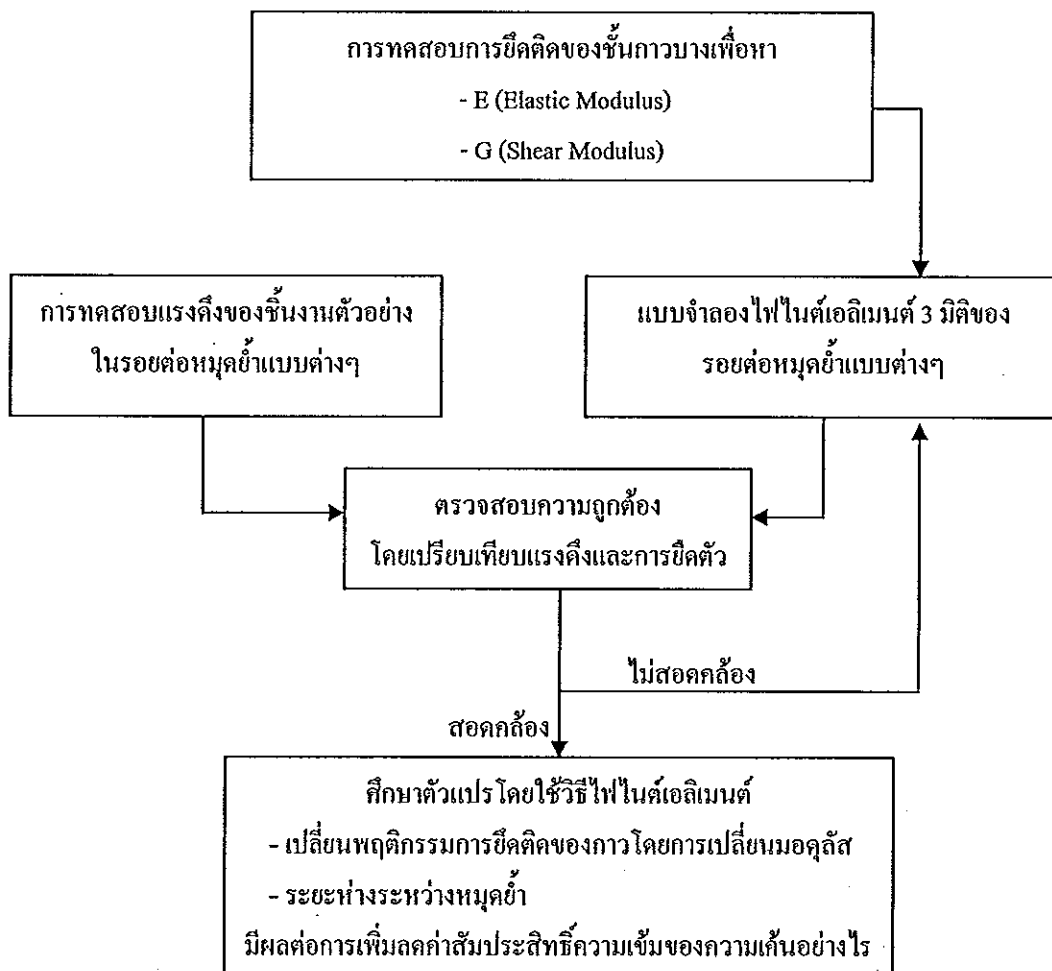
กิจกรรมที่ 1: การทดสอบการยึดติดของชั้นกาวบาง ได้แก่ การทดสอบหาค่าการยึดติดภายใต้แรงดึง เพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (E) ของชั้นกาวบาง และการทดสอบหาค่าการยึดติดภายใต้แรงเฉือน เพื่อหาค่ามอดูลัสเฉือน (G) ของชั้นกาวบาง ค่า E และ G ดังกล่าวจะเป็นข้อมูลในการกำหนดความแข็งแรงของการยึดติดของชั้นกาวบางด้วยสปริงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ กาวที่ใช้ได้แก่ กาวยาง (rubber glue) ยี่ห้อ ACT No. 354H กาวอีพอกซี (epoxy adhesive) ยี่ห้อ Araldite Standard เหล็กแท่งกลมตันดังรูปที่ 3.2 และเหล็กแผ่นรีดเย็นดังรูปที่ 3.4

กิจกรรมที่ 2: การทดสอบแรงดึงและการยึดตัวของรอยต่อภายใต้แรงดึงนั้นๆ ของชิ้นงานตัวอย่างที่มีการใช้กาวแบบต่างๆ และระยะห่างระหว่างหมุดยึดแบบต่างๆ เพื่อยืนยันความถูกต้อง ชิ้นงานตัวอย่างประกอบด้วย แผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ (aluminum alloy 7075-T6) ขนาดแสดงดังรูปที่ 3.8-3.10 และหมุดยึด (aluminum alloy 2117-T4) ขนาดแสดงดังรูปที่ 3.15

กิจกรรมที่ 3: การจำลองชิ้นงาน 3 มิติของรอยต่อหมุดยึด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยึดตัวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ วัตถุประสงค์ของกิจกรรมนี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกต้องให้สอดคล้องกับชิ้นงานตัวอย่าง

กิจกรรมที่ 4: การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ วัตถุประสงค์ของกิจกรรมนี้จัดทำขึ้น เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างผลลัพธ์ที่ได้รับจาก กิจกรรมที่ 2 กับกิจกรรมที่ 3 เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อนที่จะนำ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไปศึกษาตัวแปรต่างๆต่อไป

กิจกรรมที่ 5: การศึกษาตัวแปรต่างๆ (parametric study) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการยืนยันความถูกต้องจากกิจกรรมที่ 4 ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาตัวแปร คือมอดูลัสของ กาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อ และระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ ว่ามีผลอย่างไรต่อ ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดย้ำ



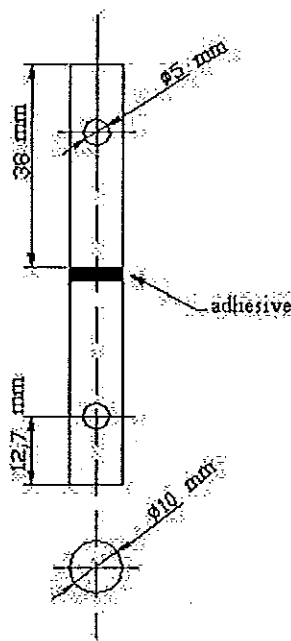
รูปที่ 3.1 แผนผังดำเนินกิจกรรม

3.2 การทดสอบการยึดติดของชั้นกาวบาง

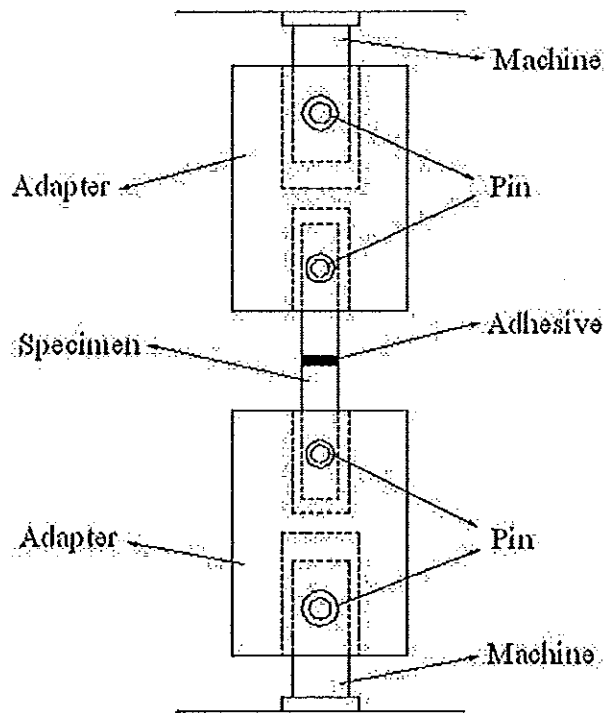
3.2.1 การทดสอบการยึดติดของชั้นกาวภายใต้แรงดึง

กิจกรรมนี้เป็นการศึกษาการยึดติดของชั้นกาวในแนวตั้งฉากกับผิวกาวภายใต้แรงดึง เพื่อหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (E) ของชั้นกาวบาง สำหรับเป็นข้อมูลในการกำหนดค่าความแข็งของสปริงในแนวตั้งฉาก (k_n) ของชั้นกาวบางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างตามมาตรฐาน JIS (Japan Industrial Standard) K6849-1994: Testing methods for tensile strength of adhesive bonds ดังแสดงในรูปที่ 3.2 มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเหล็กแท่งกลมตันมาขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดที่บริเวณผิวสัมผัสที่เชื่อมต่อกับกาว หลังจากนั้นทำความสะอาดด้วยอะซิโตน เพื่อล้างคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกออก
2. นำเหล็กแท่งกลมตันที่ทำความสะอาดมาประกบกันแบบชน (butt joint) ซึ่งชั้นกาวทดสอบอยู่ระหว่างชั้นประกบทั้งสอง โดยใช้เครื่องควบคุมความหนาของชั้นกาวบางในการควบคุมความหนากาวให้มีความหนาประมาณ 200 ไมครอน
3. ทำการทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ในแต่ละประเภทของกาว ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ โดยติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดึงดังรูปที่ 3.3 ด้วยอัตราการดึงคงที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบจนกระทั่งรอยต่อหลุดออกจากกัน
4. ทำการบันทึกขนาดของแรงดึง และค่าการยึดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 การต่อแบบชน (butt joint)



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ทดสอบแรงดึง

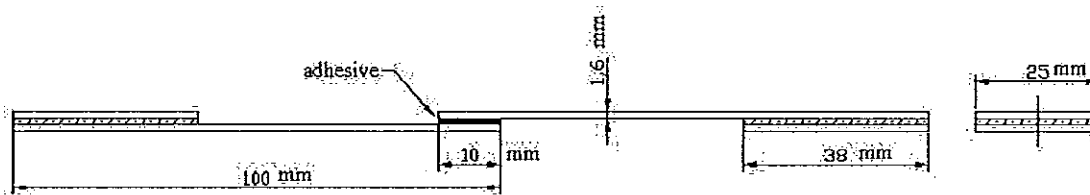
3.2.2 การทดสอบการยึดติดของชั้นกาวภายใต้แรงเฉือน

กิจกรรมนี้เป็นการศึกษาการยึดติดของชั้นกาวในแนวสัมผัสหรือแนวขนานกับผิวกาวภายใต้แรงเฉือน เพื่อหาค่ามอดุลัสเฉือน (G) ของชั้นกาวบาง สำหรับเป็นข้อมูลในการกำหนดค่าความแข็งของสปริงในแนวเฉือน (k_p) ของชั้นกาวบางในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างตามมาตรฐาน JIS K6850-1994: Testing methods for shear strength of adhesive bonds by tensile loading ดังแสดงในรูปที่ 3.4 มีขั้นตอนดังนี้

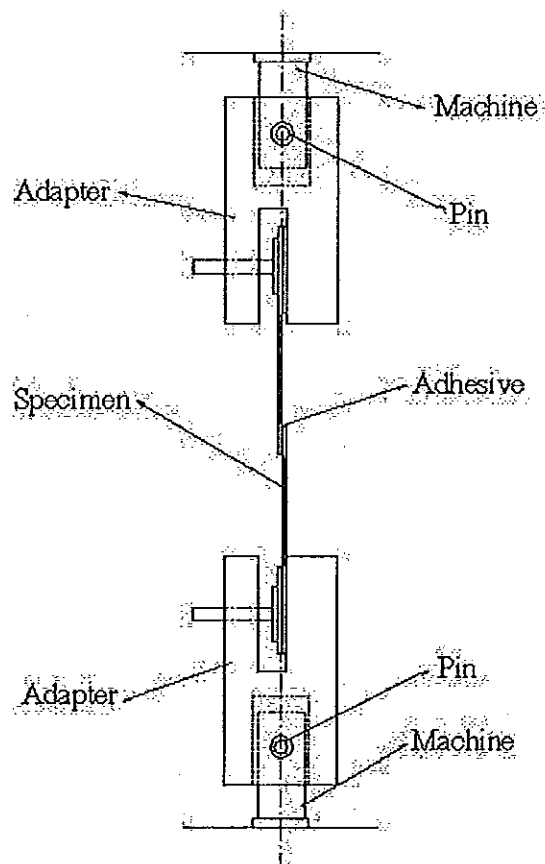
1. นำเหล็กแผ่นมาขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดที่บริเวณผิวสัมผัสที่เชื่อมต่อกับกาว หลังจากนั้นทำความสะอาดด้วยอะซิโตน เพื่อล้างคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกออก
2. นำเหล็กแผ่นที่ทำความสะอาดมาประกบกันแบบเกย (single lap joint) แต่มีการรับภาระในแนวเดียวกัน ซึ่งชั้นกาวทดสอบอยู่ระหว่างชั้นประกบทั้งสอง โดยทำการทดสอบกาวที่มีความหนาประมาณ 100 ไมครอน โดยใช้แผ่นฟิล์มบางๆเป็นตัวสร้างความหนาของชั้นกาวบาง และใช้ซีแล็กในการยึดจับ

3. ทำการทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ในแต่ละประเภทของกาว ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ โดยติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนดังรูปที่ 3.5 ด้วยอัตราการดึงคงที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบจนกระทั่งรอยต่อหลุดออกจากกัน

4. ทำการบันทึกขนาดของแรงดึง และค่าการยืดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 การต่อแบบเกย (single lap joint)



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือน

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบการยึดติดของชั้นกาวภายใต้แรงดึง และแรงเฉือน โดยมีการเปลี่ยนชนิดของกาวตามแบบต่างๆ

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของชิ้นงานทดสอบการยึดติดของชั้นกาวภายใต้แรงดึง และแรงเฉือน

รหัสชิ้นงาน	ชั้นที่	การต่อ	ทดสอบแรง	ชนิดของกาว	ความหนาของชั้นกาว
TBR-0-01-Exp	1	แบบชน	แรงดึง	กาวยาง	0.2 mm
TBR-0-02-Exp	2	แบบชน	แรงดึง	กาวยาง	0.2 mm
TBR-0-03-Exp	3	แบบชน	แรงดึง	กาวยาง	0.2 mm
TBR-0-04-Exp	4	แบบชน	แรงดึง	กาวยาง	0.2 mm
TBR-0-05-Exp	5	แบบชน	แรงดึง	กาวยาง	0.2 mm
SLR-0-01-Exp	1	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวยาง	0.1 mm
SLR-0-02-Exp	2	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวยาง	0.1 mm
SLR-0-03-Exp	3	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวยาง	0.1 mm
SLR-0-04-Exp	4	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวยาง	0.1 mm
SLR-0-05-Exp	5	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวยาง	0.1 mm
TBE-0-01-Exp	1	แบบชน	แรงดึง	กาวอีพอกซี	0.2 mm
TBE-0-02-Exp	2	แบบชน	แรงดึง	กาวอีพอกซี	0.2 mm
TBE-0-03-Exp	3	แบบชน	แรงดึง	กาวอีพอกซี	0.2 mm
TBE-0-04-Exp	4	แบบชน	แรงดึง	กาวอีพอกซี	0.2 mm
TBE-0-05-Exp	5	แบบชน	แรงดึง	กาวอีพอกซี	0.2 mm
SLE-0-01-Exp	1	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวอีพอกซี	0.1 mm
SLE-0-02-Exp	2	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวอีพอกซี	0.1 mm
SLE-0-03-Exp	3	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวอีพอกซี	0.1 mm
SLE-0-04-Exp	4	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวอีพอกซี	0.1 mm
SLE-0-05-Exp	5	แบบเกย	แรงเฉือน	กาวอีพอกซี	0.1 mm

3.2.3 การวิเคราะห์การยืดติดของกาว

การพิจารณาการยืดติดของชั้นกาวในแง่ของมอดูลัสทำได้โดยนำข้อมูลระหว่างแรงที่ใช้ดึงกับการเปลี่ยนรูปของชั้นกาวในแนวแรงมาวิเคราะห์ โดยสามารถหาค่ามอดูลัสของกาวได้ดังนี้

สำหรับมอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, E) ทำโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain) ตามสมการที่ (3.1) และ (3.2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship) ดังรูปที่ 3.7 [16] ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ในช่วง AB ซึ่งเรียกว่าช่วงพิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้ช่วงพิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอีลาสติก (Elastic Behavior) สามารถหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นได้ดังสมการที่ (3.3)

$$\sigma_t = \frac{F}{A_o} \quad (3.1)$$

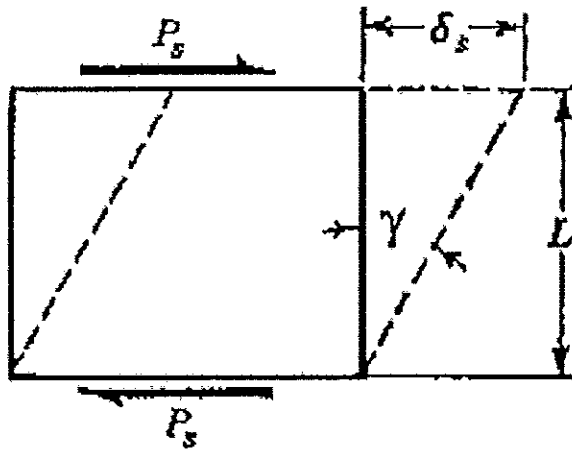
$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (3.2)$$

$$E = \frac{\Delta \sigma_t}{\Delta \varepsilon_t} \quad (3.3)$$

เมื่อ σ_t คือความเค้น F คือแรงดึง A_o คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น ε_t คือความเครียด l_o คือความยาวเริ่มต้น Δl คือความยาวที่เปลี่ยนไปเนื่องจากแรงดึง $\Delta \sigma_t$ คือความเค้นที่เปลี่ยนไป $\Delta \varepsilon_t$ คือความเครียดที่เปลี่ยนไป E คือมอดูลัสยืดหยุ่น

สำหรับมอดูลัสเฉือน (Shear Modulus, G) ทำโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) กับความเครียดเฉือน (shear strain) ตามสมการที่ (3.4)-(3.6) โดยที่ความเครียดเฉือน หมายถึงมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของด้านสองด้าน ซึ่งทำมุมอยู่เดิม 90° ในทำนองเดียวกันกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเครียดเฉือนในช่วงยืดหยุ่น สามารถหาค่ามอดูลัสเฉือนได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\tau = \frac{P_s}{A_o} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.6 การเสียรูปเนื่องจากแรงเฉือน

พิจารณารูปที่ 3.6 วัตถุมีขนาดความสูง L มีแรง P_s มากกระทำ และทำให้ผิวบนของวัตถุเคลื่อนที่ไป δ_s ในแนวแรงจะได้ว่า

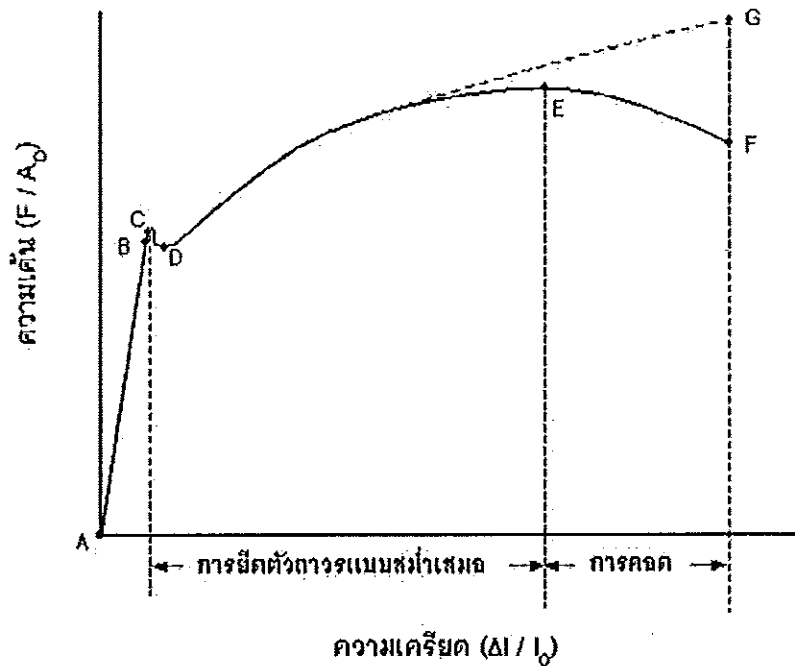
$$\tan \gamma = \frac{\delta_s}{L} \quad (3.5)$$

โดยที่ γ มีค่าน้อยมาก $\tan \gamma \cong \gamma$ ดังนั้นความเครียดเฉือนสามารถหาได้จาก

$$\gamma = \frac{\delta_s}{L} \quad (3.6)$$

$$G = \frac{\Delta \tau}{\Delta \gamma} \quad (3.7)$$

เมื่อ τ คือความเค้นเฉือน P_s คือแรงเฉือน A_s คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น γ คือความเครียดเฉือน δ_s คือความยาวที่เปลี่ยนไปเนื่องจากแรงเฉือน $\Delta \tau$ คือความเค้นเฉือนที่เปลี่ยนไป $\Delta \gamma$ คือความเครียดเฉือนที่เปลี่ยนไป G คือมอดุลัสเฉือน

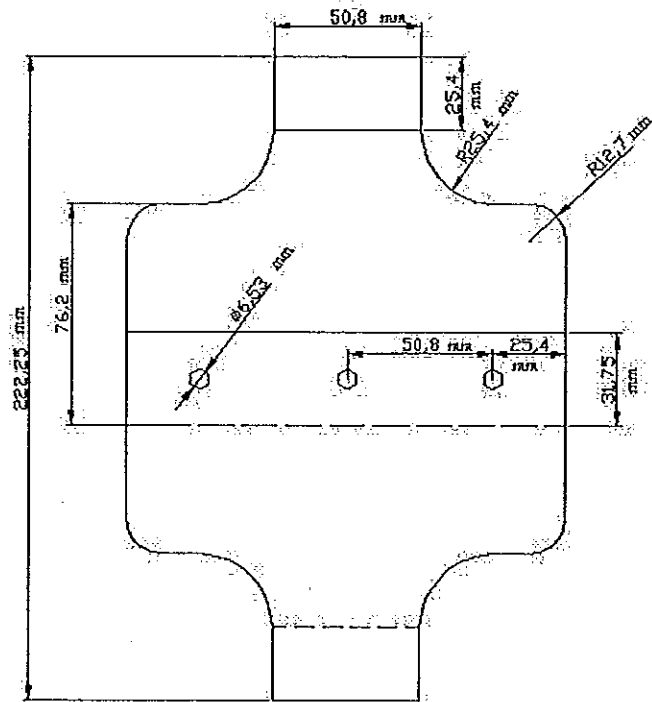


รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

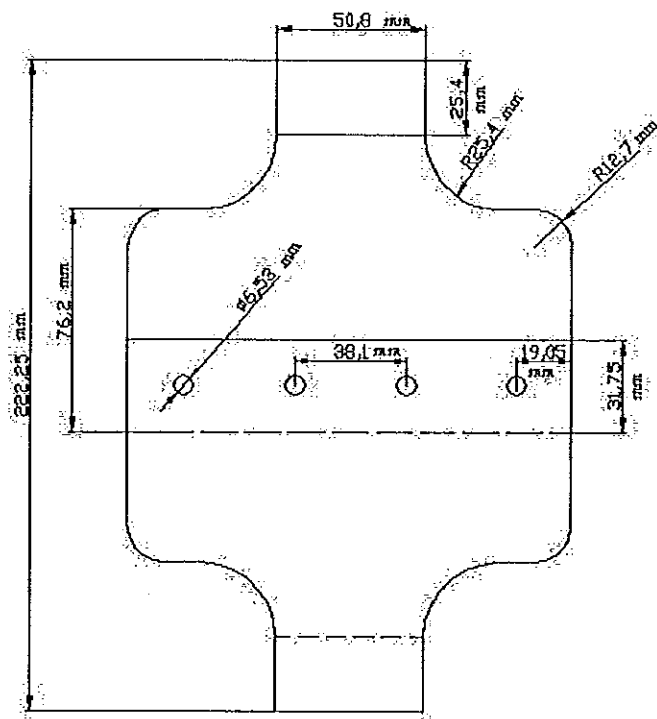
ที่มา: <http://www.isit.or.th/techinfo.asp> [16]

3.3 การทดสอบชิ้นงาน

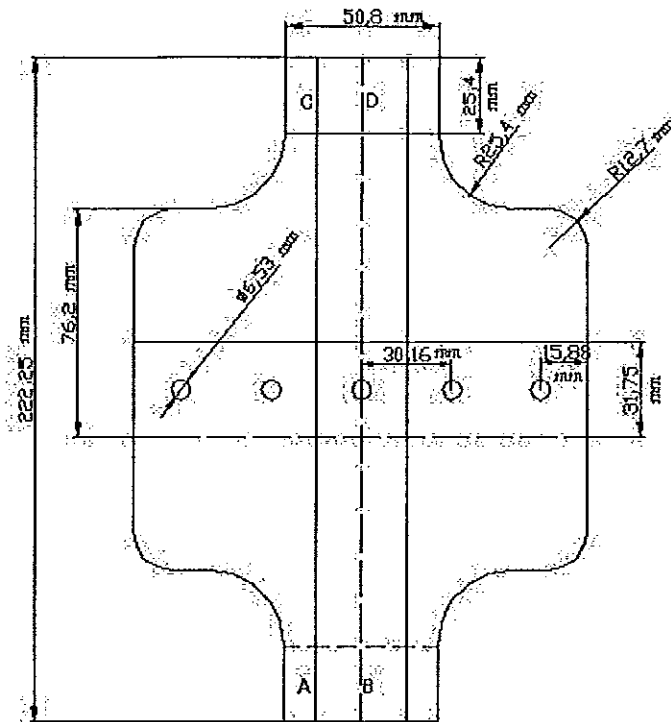
นำชิ้นงานตัวอย่างที่ต่อด้วยหมุดย้ำ และการร่วมกับหมุดย้ำมาทดสอบแรงดึง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของชิ้นงานตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้รับจากการคำนวณของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง ก่อนที่จะนำแบบจำลองไปศึกษาตัวแปร คือ มอดูลัสของกาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อ และระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ รูปที่ 3.8 ถึง 3.10 แสดงถึงขนาดของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ (A1 7075-T6) สองแผ่น มีความหนา 1.6 มิลลิเมตร เชื่อมต่อด้วยหมุดย้ำ (A1 2117-T4) 3, 4, และ 5 หมุด ซึ่งมีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยมีการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ และชนิดของกาว ตามแบบของแต่ละชิ้นงานตัวอย่าง ดังมีรายละเอียดต่างๆแสดงในตารางที่ 3.2 และนำชิ้นงานตัวอย่างมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องมือที่มียุทธศาสตร์ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุดังรูปที่ 3.11 และ 3.12 ด้วยอัตราการดึงคงที่ 10 มิลลิเมตรต่ออนาที โดยการทดสอบจะทำการดึงชิ้นงานตัวอย่างในช่วงยืดตัวน้อยๆ



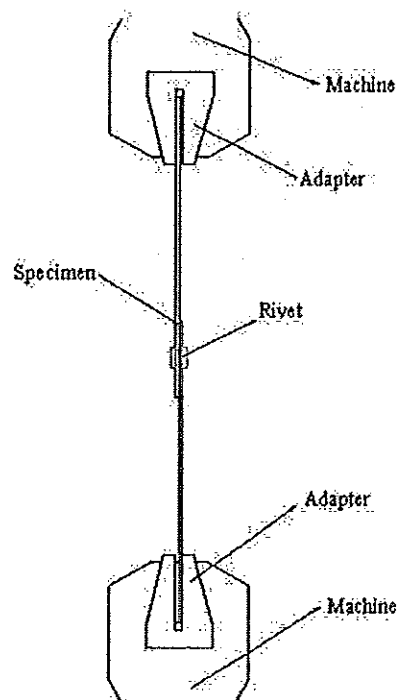
รูปที่ 3.8 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 50.8 มิลลิเมตร



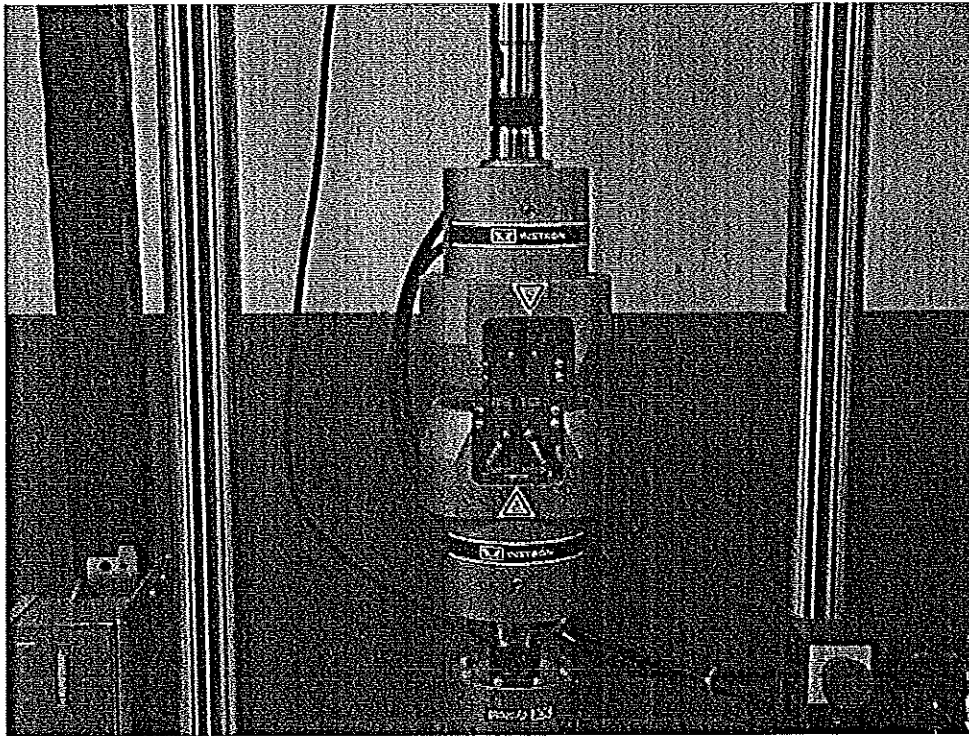
รูปที่ 3.9 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 ขนาดของชิ้นงานตัวอย่างที่มีระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 30.16 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่3.12 เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ

ตารางที่3.2 แสดงรายละเอียดของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแรงดึง

รหัสชิ้นงาน	ชั้นที่	จำนวนหมุด ยี่	ระยะห่าง ระหว่างหมุด	ชนิดของกาว	ความหนา ของชั้นกาว
TJF-50.8-01-Exp	1	3	50.80 mm	ไม่ทากาว	-
TJF-50.8-02-Exp	2	3	50.80 mm	ไม่ทากาว	-
TJF-50.8-03-Exp	3	3	50.80 mm	ไม่ทากาว	-
TJF-38.1-01-Exp	1	4	38.10 mm	ไม่ทากาว	-
TJF-38.1-02-Exp	2	4	38.10 mm	ไม่ทากาว	-
TJF-38.1-03-Exp	3	4	38.10 mm	ไม่ทากาว	-
TJF-30.16-01-Exp	1	5	30.16 mm	ไม่ทากาว	-
TJF-30.16-02-Exp	2	5	30.16 mm	ไม่ทากาว	-
TJF-30.16-03-Exp	3	5	30.16 mm	ไม่ทากาว	-

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

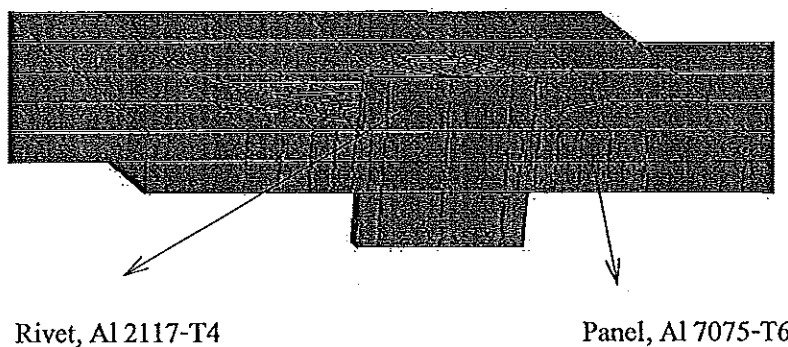
รหัสชิ้นงาน	ชั้นที่	จำนวนหมุด ย้า	ระยะห่าง ระหว่างหมุด	ชนิดของกาว	ความหนา ของชั้นกาว
TJR-50.8-01-Exp	1	3	50.80 mm	กาวยาง	0.11 mm
TJR-50.8-02-Exp	2	3	50.80 mm	กาวยาง	0.20 mm
TJR-50.8-03-Exp	3	3	50.80 mm	กาวยาง	0.08 mm
TJR-38.1-01-Exp	1	4	38.10 mm	กาวยาง	0.09 mm
TJR-38.1-02-Exp	2	4	38.10 mm	กาวยาง	0.20 mm
TJR-38.1-03-Exp	3	4	38.10 mm	กาวยาง	0.15 mm
TJR-30.16-01-Exp	1	5	30.16 mm	กาวยาง	0.22 mm
TJR-30.16-02-Exp	2	5	30.16 mm	กาวยาง	0.13 mm
TJR-30.16-03-Exp	3	5	30.16 mm	กาวยาง	0.07 mm
TJE-50.8-01-Exp	1	3	50.80 mm	กาวอีพอกซี	0.04 mm
TJE-50.8-02-Exp	2	3	50.80 mm	กาวอีพอกซี	0.08 mm
TJE-50.8-03-Exp	3	3	50.80 mm	กาวอีพอกซี	0.03 mm
TJE-38.1-01-Exp	1	4	38.10 mm	กาวอีพอกซี	0.02 mm
TJE-38.1-02-Exp	2	4	38.10 mm	กาวอีพอกซี	0.07 mm
TJE-38.1-03-Exp	3	4	38.10 mm	กาวอีพอกซี	0.13 mm
TJE-30.16-01-Exp	1	5	30.16 mm	กาวอีพอกซี	0.05 mm
TJE-30.16-02-Exp	2	5	30.16 mm	กาวอีพอกซี	0.12 mm
TJE-30.16-03-Exp	3	5	30.16 mm	กาวอีพอกซี	0.02 mm

จากรูปที่ 3.8 ถึง 3.10 ถ้าส่วนปลายของชิ้นงานตัวอย่างมีระยะความกว้าง 6 นิ้ว ซึ่งทำให้ชิ้นงานตัวอย่างมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม ทำให้การส่งถ่ายแรงมายังหมุดย้าเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของตัวจับของเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุมีระยะกว้างเพียง 2 นิ้ว จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปลงชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปร่างดังกล่าว

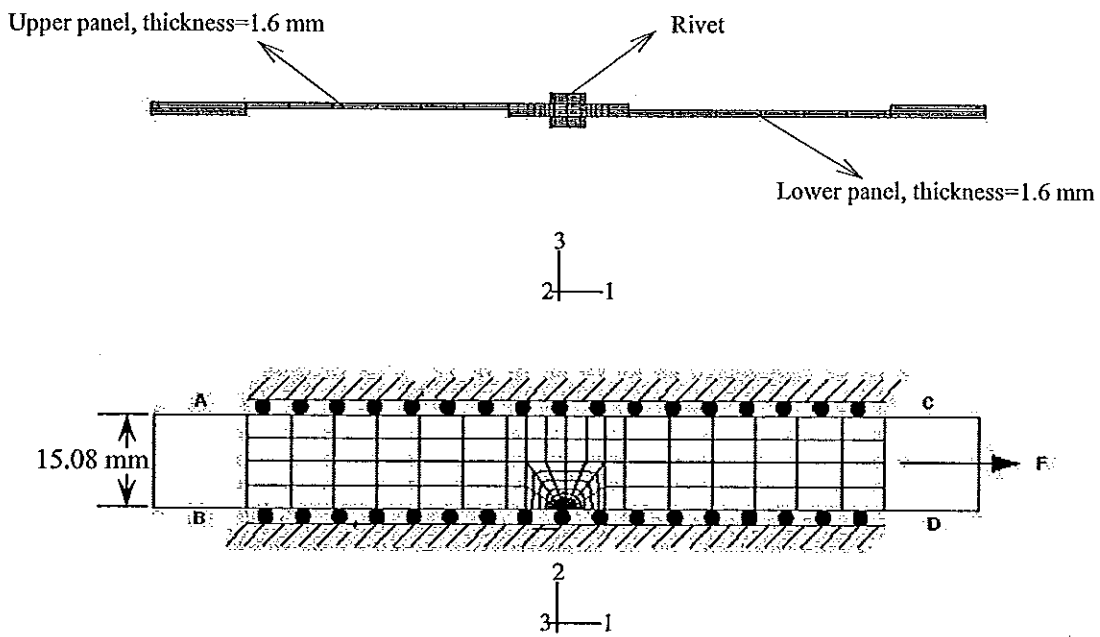
3.4 การจำลองชิ้นงาน (modeling)

3.4.1 การจำลองรอยต่อหมุดย้ำระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร

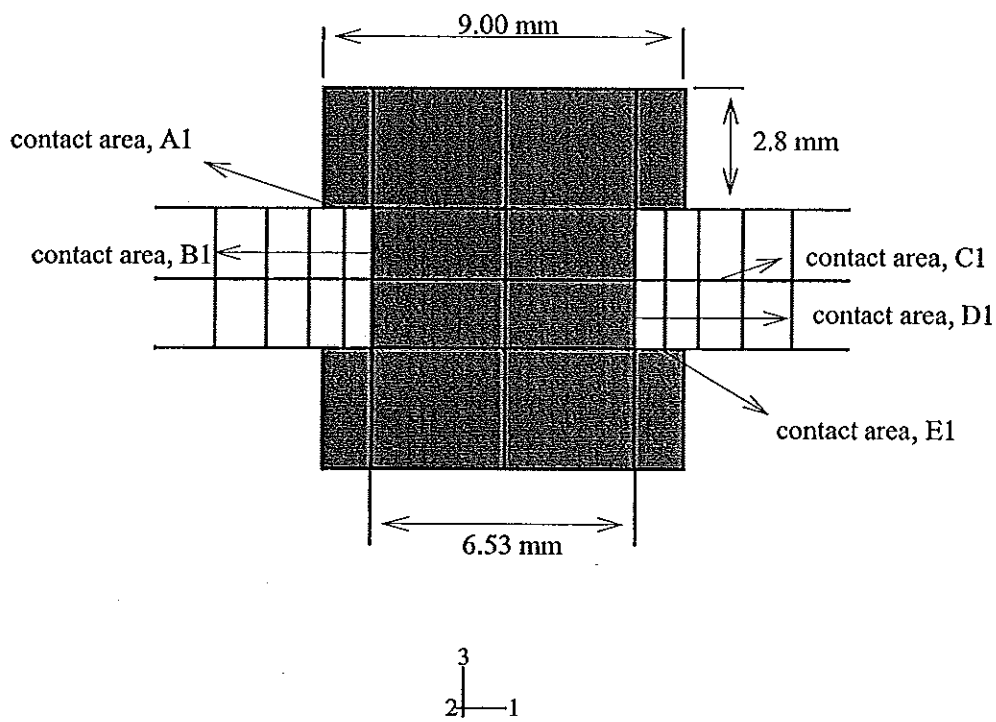
รอยต่อหมุดย้ำระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เป็นชิ้นงานทดสอบในหัวข้อ 3.3 ถูกสร้างขึ้นเป็นแบบจำลองสามมิติสำหรับใช้กับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองเฉพาะส่วนที่สมมาตรดังแสดงในรูปที่ 3.10 เนื่องจากบริเวณตรงกลางเป็นส่วนที่ส่งถ่ายแรงได้ดี จึงไม่จำเป็นต้องจำลองรอยต่อหมุดย้ำทั้งหมด โดยแบบจำลองรอยต่อหมุดย้ำมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.14 การเปลี่ยนระยะหมุดในแบบจำลองทำโดยการเปลี่ยนระยะ AB และ CD ตามระยะห่างระหว่างหมุด ในแบบจำลองประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ (Al 7075-T6) สองแผ่นประกบกัน และยึดติดกันด้วยหมุดย้ำ (Al 2117-T4) เอลิเมนต์แบบลูกบาศก์หกหน้า (27-node brick elements) ใช้สำหรับจำลองแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ และเอลิเมนต์แบบปริซึมห้าหน้า (15-node triangular prisms) ใช้สำหรับจำลองหมุดย้ำเพื่อต้องการให้หมุดย้ำมีความแข็งแรงสูงกว่าแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งเหมือนกับความเป็นจริง โดยมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 228 เอลิเมนต์ โดยเอลิเมนต์ที่อยู่บริเวณที่ต่อเกยกันมีจำนวนมาก เนื่องจากเป็นบริเวณที่ไม่ต่อเนื่องของชิ้นงาน ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 0.2 [9] ซึ่งมีขนาดรูปร่าง พื้นที่ผิวสัมผัสของหมุดย้ำดังแสดงในรูปที่ 3.15 และ 3.16 โมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของอลูมิเนียมอัลลอยด์และหมุดย้ำเท่ากับ 70 GPa อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, ν) เท่ากับ 0.25 โดยวิเคราะห์ผลรูปทรงเรขาคณิตเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (NLGEOM) [1] ใช้แรงดึงในช่วง 0-6000 N (แรงดึงประมาณ 3000 N มีค่าความเค้นดึงเท่ากับ 36.9 MPa) และไม่ให้มีการเคลื่อนที่ทุกทิศทางในระนาบ AB ส่วน AC และ BD ไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง 2 เมื่อได้แบบที่สมบูรณ์แล้วทำการคำนวณด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยตัวอย่าง ไฟล์ Input แสดงดังภาพผนวก ก.



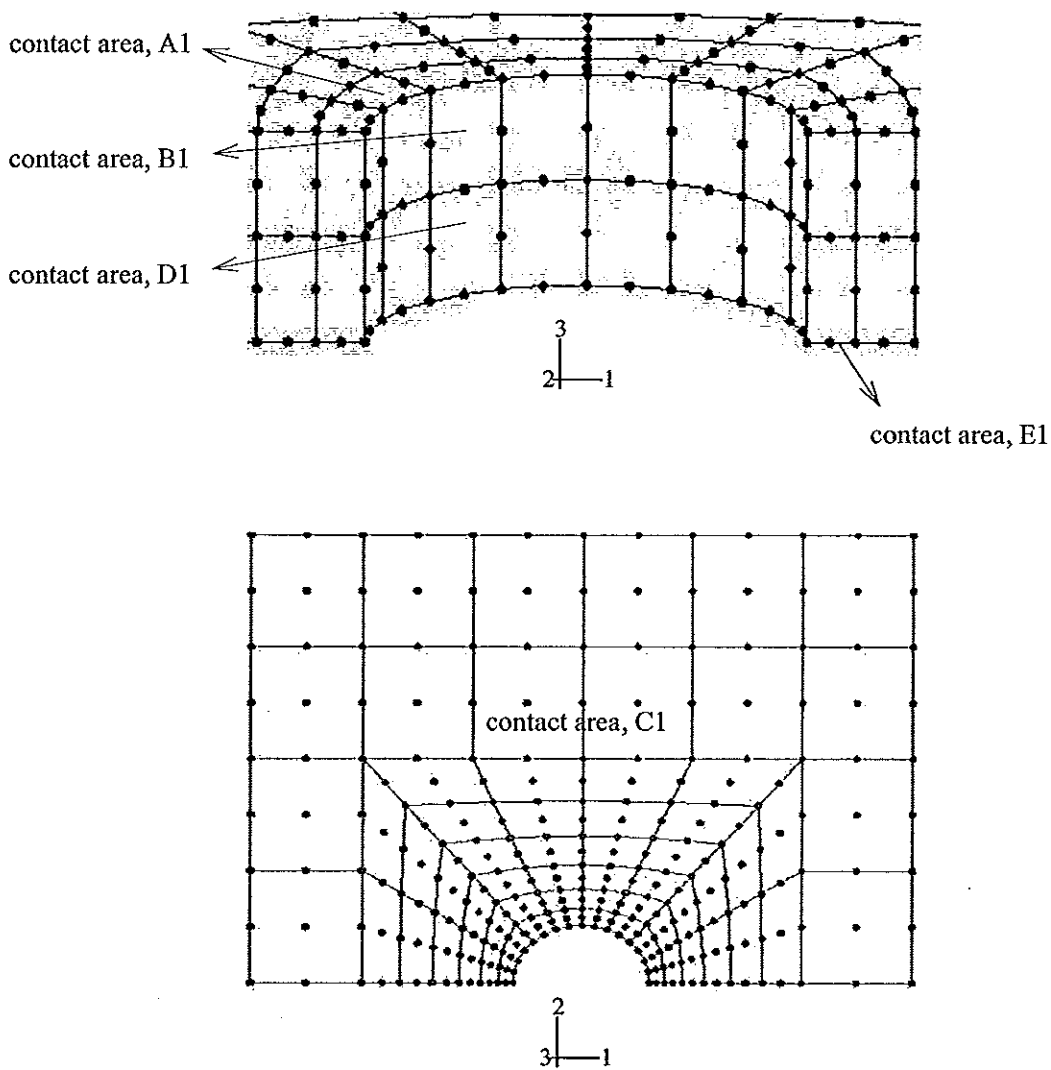
รูปที่ 3.13 ลักษณะเอลิเมนต์ของแบบจำลองรอยต่อหมุดย้ำ



รูปที่ 3.14 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อหมุดย้ำ



รูปที่ 3.15 ขนาดรูปร่างของหมุดย้ำ



รูปที่ 3.16 พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของหมุดย้ำและแผ่นอลูมิเนียมอัลลอยด์

3.4.2 การจำลองรอยต่อหมุดย้ำร่วมกับกาวระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร

การจำลองรอยต่อหมุดย้ำร่วมกับกาวระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร สามารถสร้างแบบจำลองชิ้นงานดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยในส่วนของชั้นกาวบางเมื่อนำมาใช้ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาใช้โดยหลักการที่เรียกว่า TALA ในงานวิจัยครั้งนี้สมมุติให้กาวบางมีเฉพาะในบริเวณส่วนที่ต่อเกยกันระหว่างอลูมิเนียมอัลลอยด์แผ่นบนกับล่าง (contact area, C1) เท่านั้น โดยชั้นกาวบางจะถูกเปลี่ยนเป็นสปริงเอลิเมนต์หลายๆตัวที่สามารถจำลองพฤติกรรมเชิงกลของชั้นกาวบางในสามทิศทาง ประกอบด้วยทิศตั้งฉากกับพื้นที่ผิวและขนานกับผิวสัมผัส ซึ่งมีจำนวนของสปริงเอลิเมนต์ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ความเค้น ความเครียด ที่เกิดขึ้นใน

ชั้นกาวบางจะถูกเปลี่ยนเป็นแรงและการยึดตัวระหว่างผิวที่ต่อติดกันด้วยกาว เมื่อได้แบบที่สมบูรณ์แล้วทำการคำนวณด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยตัวอย่างไฟล์ Input แสดงดังภาคผนวก ก.

ตารางที่ 3.3 จำนวนสปริงเอลิเมนต์ที่เชื่อมต่อผิวสัมผัสทั้งหมด

Contact area	No. of linear springs	
	Normal direction	Shear direction
A1	0	0
B1	0	0
C1	293	586
D1	0	0
E1	0	0
Total for two standard rivet	293	586

3.5 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำได้โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยึดตัวของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับชิ้นงานตัวอย่าง เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ก่อนที่จะนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไปศึกษาตัวแปร กือมอดูลัสของกาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อ และระยะห่างระหว่างหมุดยึด โดยในตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานที่ทำการยืนยันกับการทดลองจริง

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ทำการยืนยันกับการทดลองจริง

รหัสแบบจำลอง	ระยะห่างระหว่างหมุดยึด (มม.)	ประเภทกาว
TJF-50.8-MO-FEM	50.8	ไม่ทากาว
TJR-50.8-MO-FEM	50.8	กาวยาง
TJE-50.8-MO-FEM	50.8	กาวอีพอกซี
TJF-38.1-MO-FEM	38.1	ไม่ทากาว

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

แบบจำลอง	ระยะห่างระหว่างหมุดยึด (มม.)	ประเภททากาว
TJR-38.1-MO-FEM	38.1	กาวยาง
TJE-38.1-MO-FEM	38.1	กาวอีพอกซี
TJF-30.16-MO-FEM	30.16	ไม่ทากาว
TJR-30.16-MO-FEM	30.16	กาวยาง
TJE-30.16-MO-FEM	30.16	กาวอีพอกซี

3.6 การศึกษาตัวแปร (parametric study)

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการยืนยันความถูกต้องแล้ว จะถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาตัวแปร คือ มอดูลัสของทากาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อ และระยะห่างระหว่างหมุดยึด ว่ามีผลอย่างไรต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยึด โดยในตารางที่ 3.5 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานทั้งหมด

ตารางที่ 3.5 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานทั้งหมด

Adhesive	Pitch distance (mm)			
	30.16	38.10	50.80	76.20
No adhesive	○	○	○	△
rubber glue (E=1.128MPa, G=0.154 MPa)	○	○	○	△
adhesive A (E=10 MPa, G=3.84 MPa)	△	△	△	△
epoxy adhesive (E=23.147 MPa, G=9.385 MPa)	○	○	○	△
adhesive B (E=100 MPa, G=38.46 MPa)	△	△	△	△

○ คือแบบจำลองที่ได้รับการยืนยันความถูกต้องจากการทดลองจริง

△ คือแบบจำลองที่นำไปใช้ในการศึกษาตัวแปร (ไม่มีการทดลองจริง)

โดยที่มอดูลัสที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อของกาวยาง (rubber glue) และกาวอีพอกซี (epoxy adhesive) ได้ข้อมูลจากการทดสอบการยึดติดของชั้นกาวบางตามมาตรฐาน JIS K6849 และ K6850 ส่วนมอดูลัสที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อของกาว adhesive A, adhesive B, และค่าระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ 76.20 มิลลิเมตร ได้จากการปรับข้อมูลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าดังกล่าวข้างต้นต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรูเจาะหมุดย้ำ

จากหัวข้อ 2.2 การวิเคราะห์ชั้นกาวบางหรือที่เรียกว่าวิธี TALA จะมีเฉพาะ σ_z, τ_{zx} และ τ_{zy} เกิดขึ้นเมื่อรอยต่อส่งผ่านแรงมาถึงชั้นกาว ให้กาว adhesive A และ adhesive B วัสดุเป็นแบบไอโซโทรปิก (isotropic) ค่ามอดูลัสเหนียวได้จากสมการที่ (3.8) ดังนี้

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.8)$$

เมื่อ E คือมอดูลัสยืดหยุ่น G คือมอดูลัสเฉือน ν คืออัตราส่วนปัวซอง

ในส่วนของแบบจำลองที่นำไปใช้ในการศึกษาตัวแปร (ไม่มีการทดลองจริง) จะใช้ค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.33 [17] ดังแสดงในภาคผนวก ข. ซึ่งสมมุติให้กาว adhesive A และ adhesive B เป็นกาวประเภทอีพอกซี และความหนาของชั้นกาวได้จากการเฉลี่ยชั้นกาวทั้งหมดจากชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.10 มิลลิเมตร ค่าเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในแบบจำลองที่นำไปใช้ในการศึกษาตัวแปร

3.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้มีเครื่องมือและอุปกรณ์ดังนี้ คือ

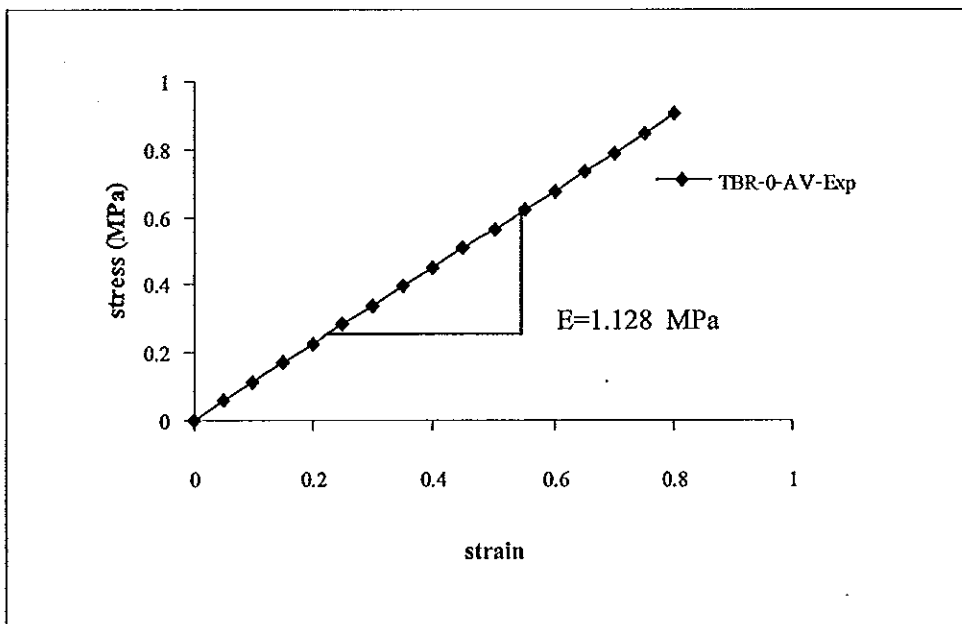
- 1) โปรแกรม ABAQUS
- 2) เครื่องมือทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 8872 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- 3) เครื่องควบคุมความหนาของชั้นกาว
- 4) ชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงดึงและแรงเฉือน

บทที่ 4

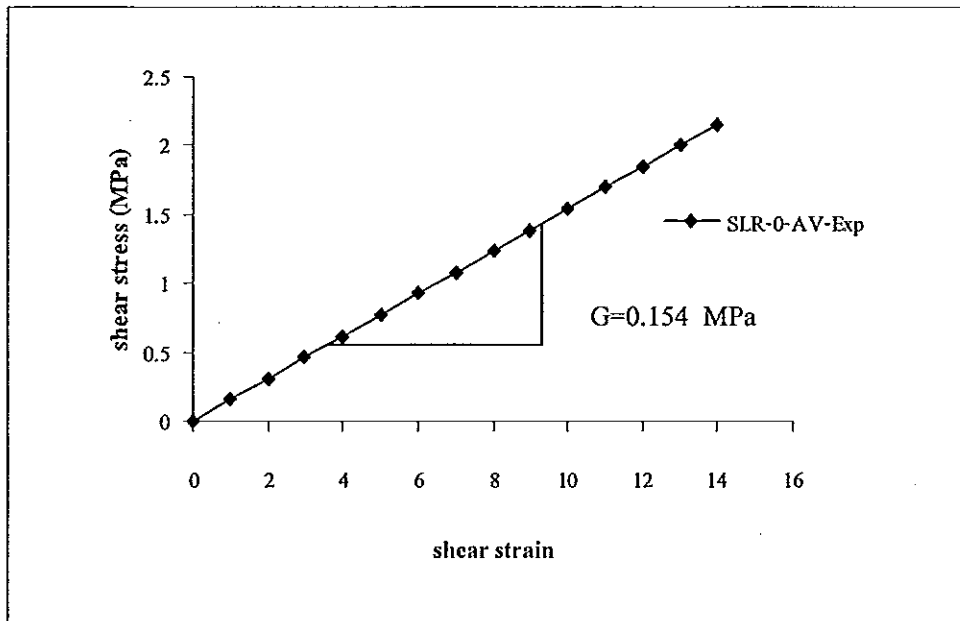
ผลและการอภิปรายผล

4.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมในการยืดติดของชั้นกาว

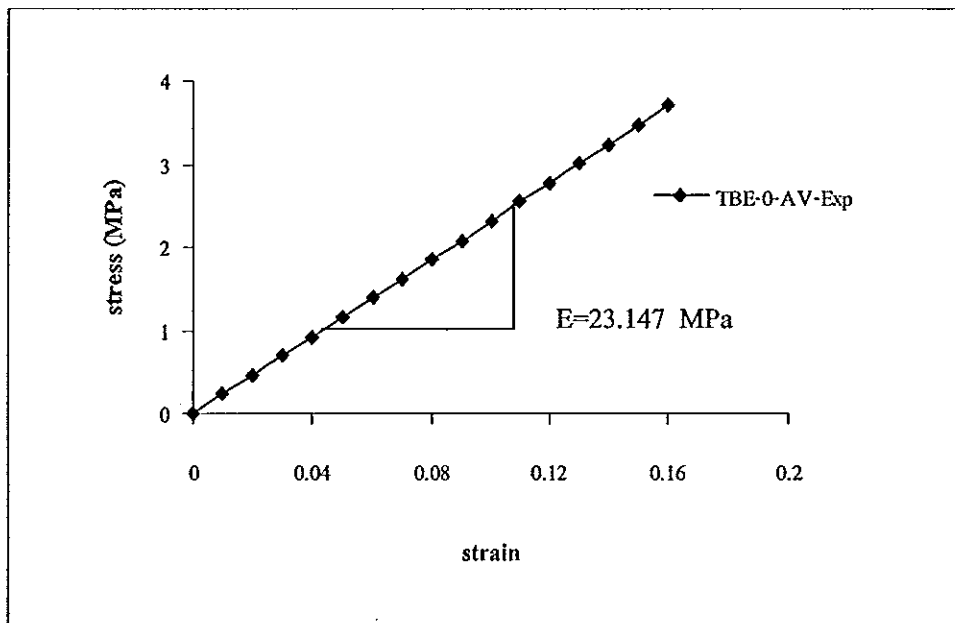
รูปที่ 4.1 ถึง 4.4 เป็นผลการทดสอบพฤติกรรมการยืดติดของชั้นกาวบางในแนวต่างๆ แสดงในรูปของความเค้นและความเครียด ซึ่งค่าทั้งสองจะถูกเปลี่ยนเป็นมอดูลัสสำหรับใช้กับสปริงเอลิเมนต์ต่อไป การทดสอบแต่ละแบบใช้ชิ้นงาน 5 ตัวอย่าง ที่ความหนาของชั้นกาวเดียวกันในแต่ละประเภทการทดสอบ



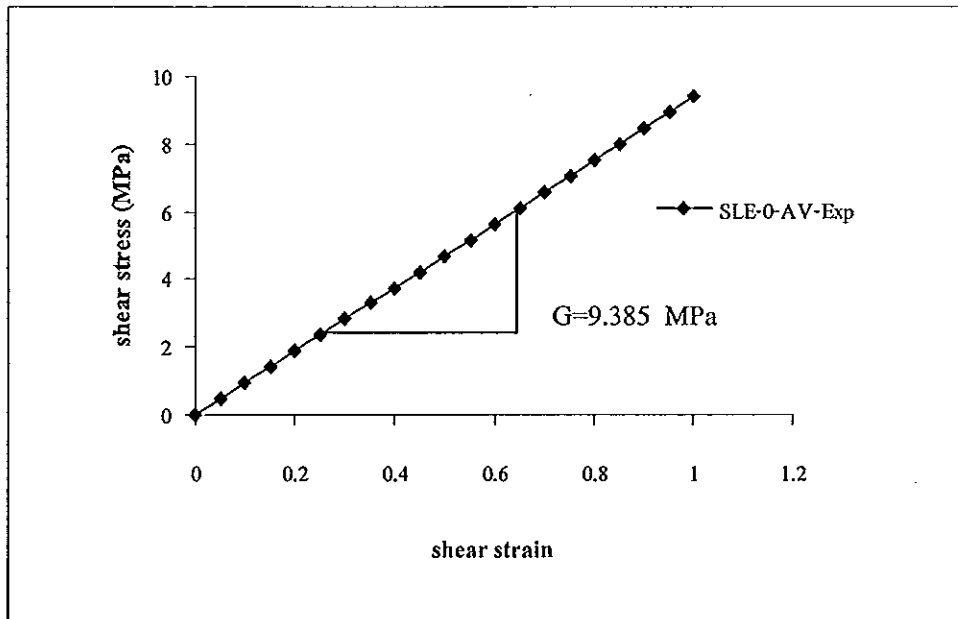
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงพฤติกรรมการยืดติดในแนวตั้งฉากกับผิวกาวภายใต้แรงดึงของชั้นกาวยาง ยี่ห้อ ACT No. 354 H



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงพฤติกรรมการยืดหดในแนวเฉือนภายใต้แรงเฉือนของชั้นกาวยางอีพ็อกซี ACT No. 354 H



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงพฤติกรรมการยืดหดในแนวตั้งฉากกับผิวกาวภายใต้แรงดึงของชั้นกาวอีพ็อกซี ยี่ห้อ Araldite Standard



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงพฤติกรรมการยืดหดในแนวเฉือนภายใต้แรงเฉือนของชั้นกาวอีพอกซี ยี่ห้อ Araldite Standard

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของการยืดหดของกาวทั้งสองชนิด แสดงดังในตารางที่ 4.1 พบว่ากาวอีพอกซีมีความแข็งแรงในการยืดหดมากกว่ากาวยาง

ตารางที่ 4.1 ความแข็งแรงในการยืดหดของกาวในรูปของมอดูลัสเพื่อใช้กับสปริงเอลิเมนต์

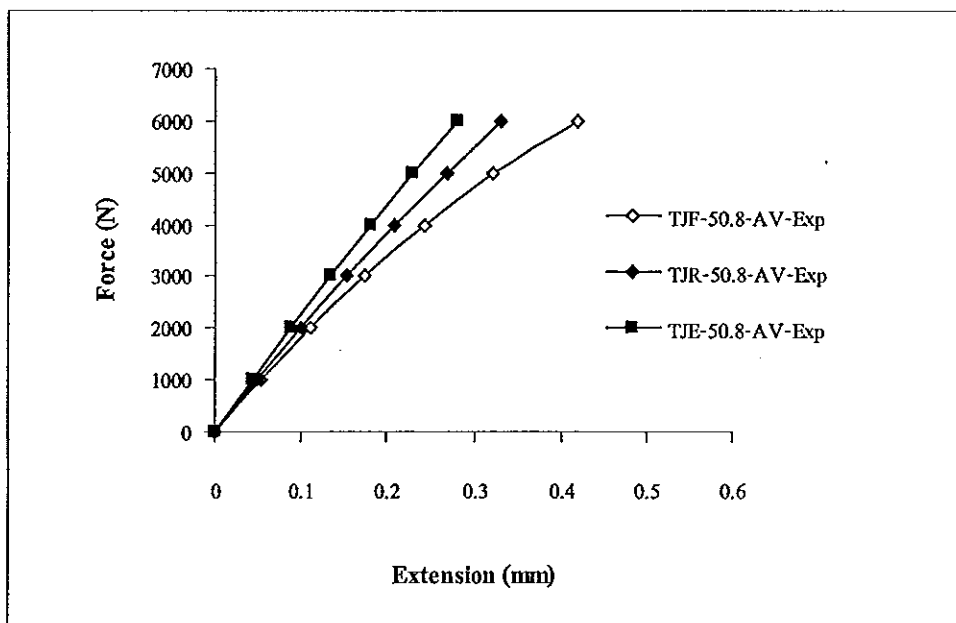
กาว (adhesive)	Elastic Modulus, E (MPa)	Shear Modulus, G (MPa)
กาวยาง (rubber glue) ยี่ห้อ ACT No. 354 H	1.128	0.154
กาวอีพอกซี (epoxy adhesive) ยี่ห้อ Araldite Standard	23.147	9.385

จากนั้นค่าความแข็งแรงในการยืดหดของกาวทั้งสองชนิด ถูกนำไปใช้สำหรับเป็นข้อมูลในการกำหนดความแข็งแรงในการยืดหดของชั้นกาวบางด้วยสปริงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

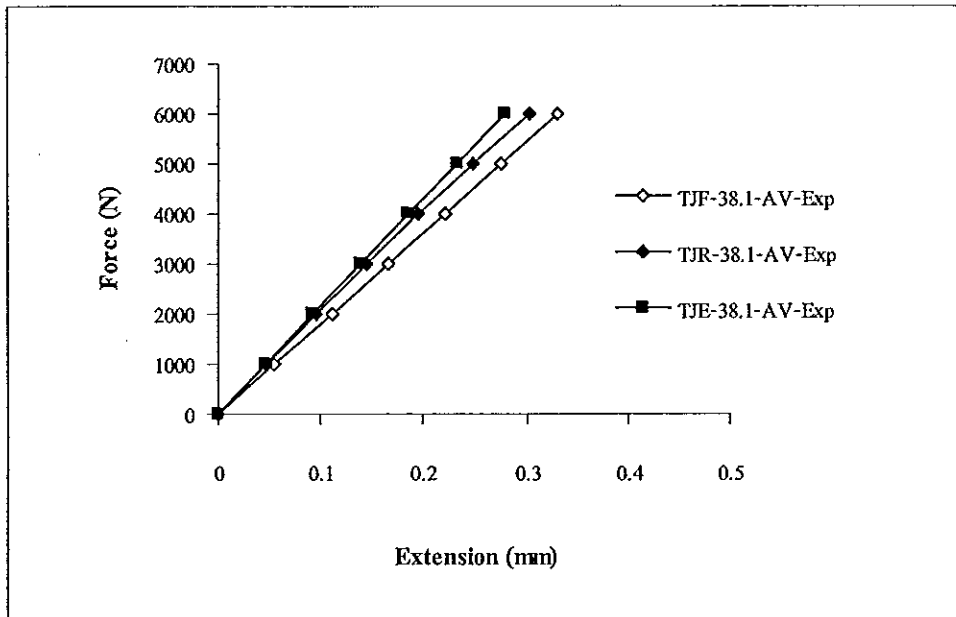
4.2 ผลการทดสอบรอยต่อหมุดย้า

การทดสอบรอยต่อหมุดย้าในการรับแรงดึงมีการทดสอบทั้งสิ้น 27 ชิ้นงาน ตัวอย่าง โดยทำการทดสอบทุกกรณี รวมทั้งหมด 9 กรณี กรณีละ 3 ตัวอย่าง (ดูรายละเอียดดังตารางที่ 3.2) โดยทำการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างในช่วงยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นใช้หลักการทดสอบแบบควบคุมแรงดึงเป็นหลัก เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวในแนวแกนที่ปลายบริเวณของชิ้นงานตัวอย่าง ผลการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร แสดงดังกราฟรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 พบว่ารอยต่อหมุดย้าที่ทากาวอีพอกซีมีค่าความแข็งดึง (stiffness) สูงสุด และรองลงมาได้แก่ รอยต่อที่ทากาวยาง และไม่ทากาว ตามลำดับ

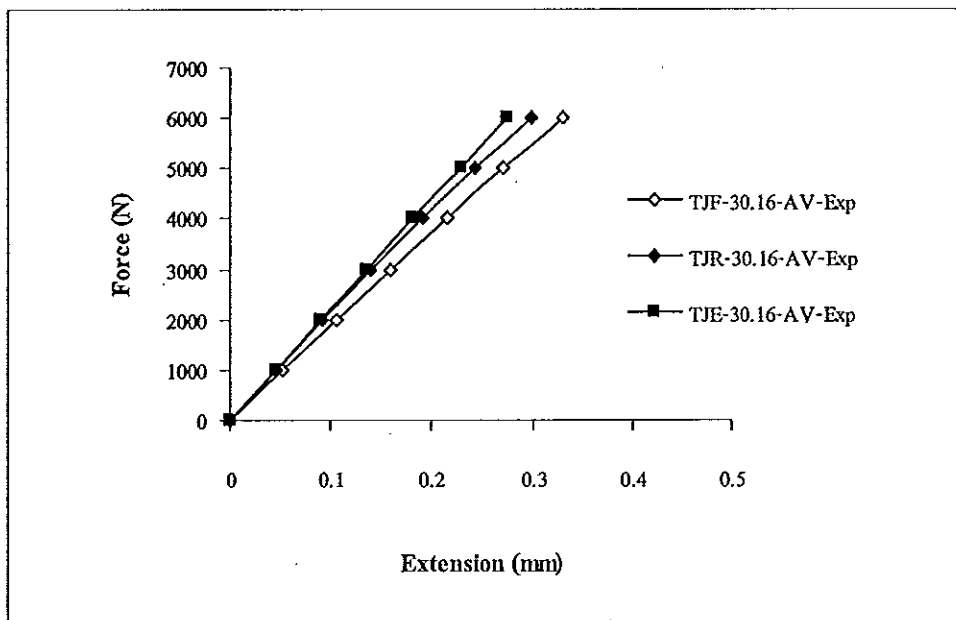
ส่วนกราฟรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลอง คือรอยต่อหมุดย้าที่ทากาวอีพอกซีมีค่าความแข็งดึง (stiffness) สูงสุด และรองลงมาได้แก่ รอยต่อที่ทากาวยาง และไม่ทากาว ตามลำดับ



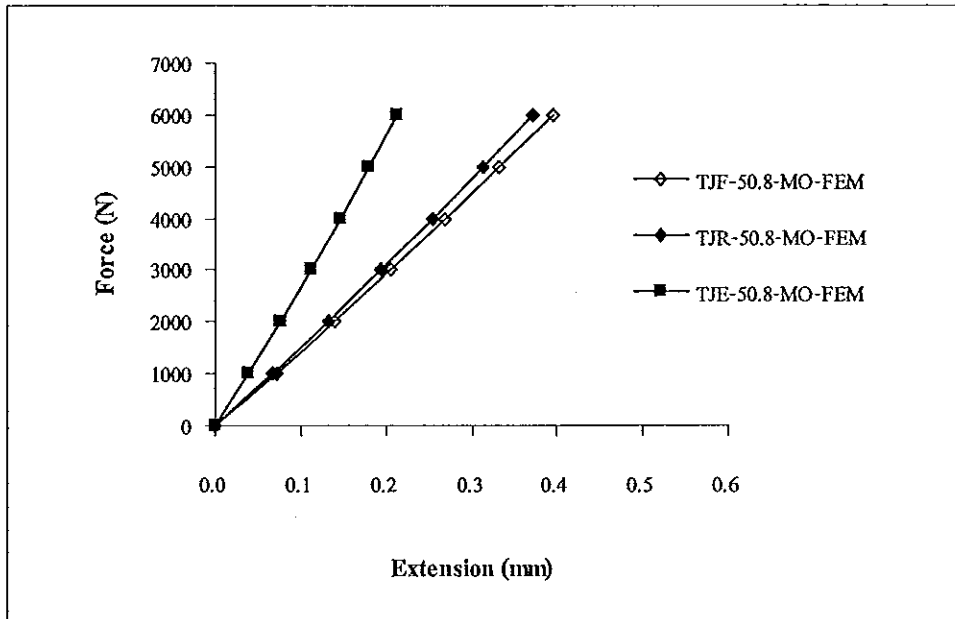
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองจริง สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดย้าเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



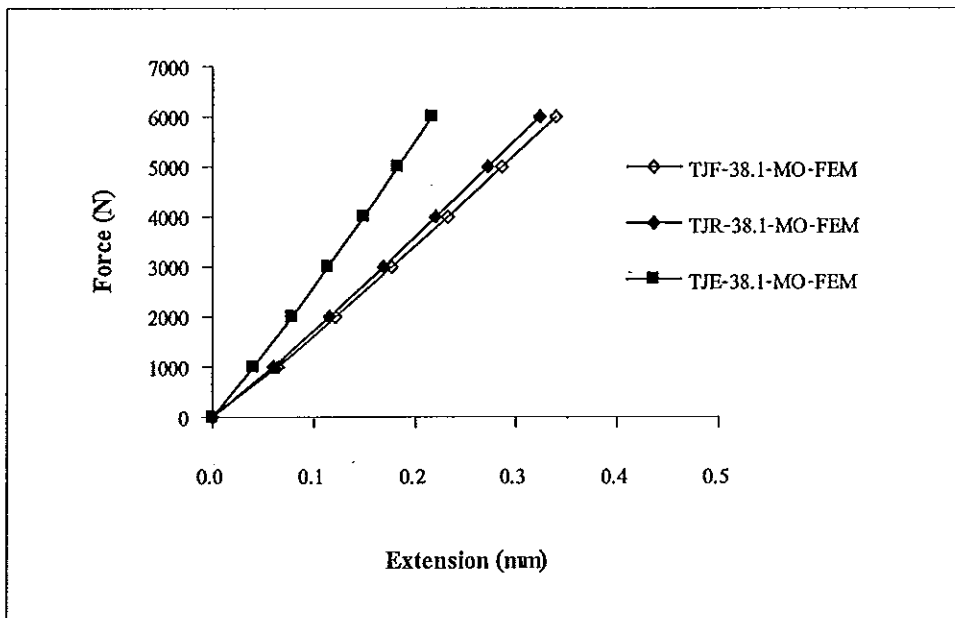
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อเกลียวที่ได้จากการทดลองจริง สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



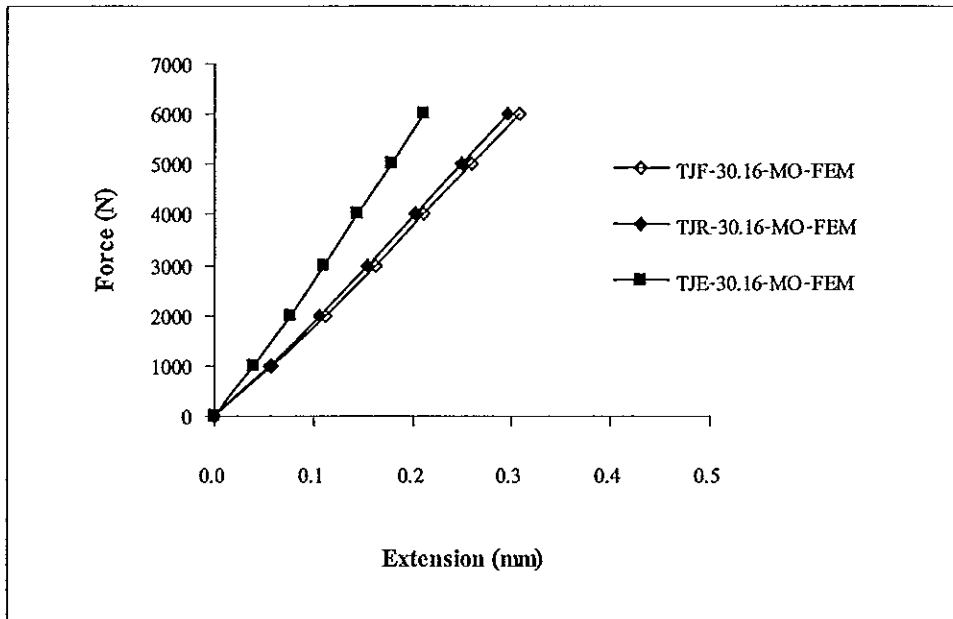
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อเกลียวที่ได้จากการทดลองจริง สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร

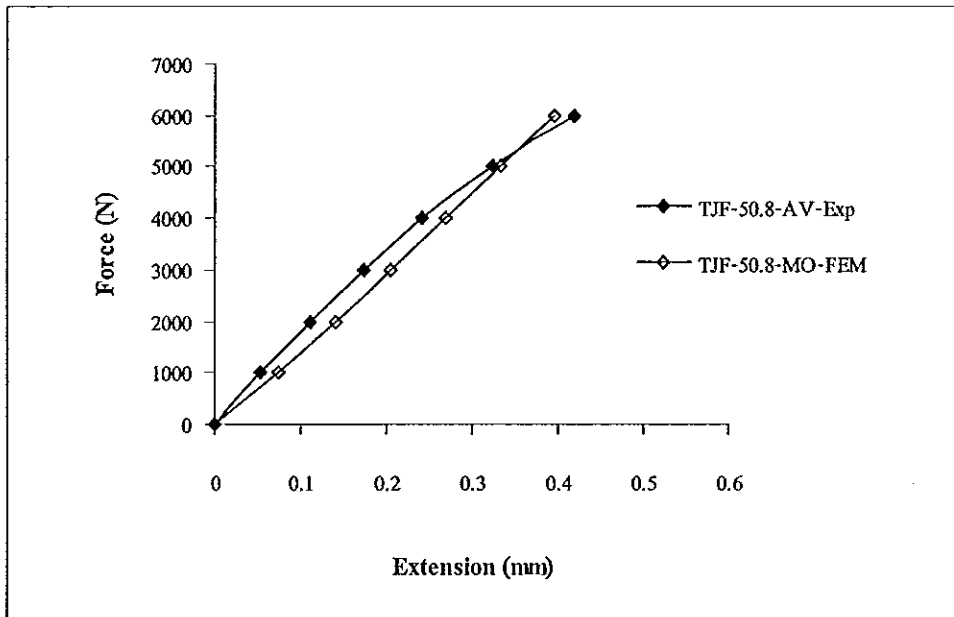
4.3 ผลการยืนยันความถูกต้อง

4.3.1 ผลการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

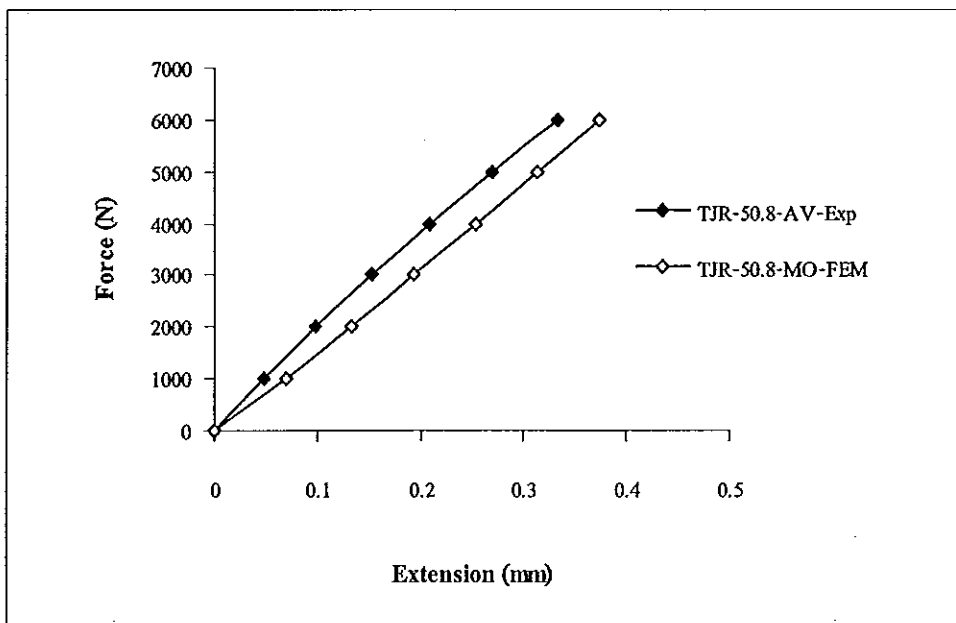
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวของรอยต่อเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างนำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเปรียบเทียบที่แรงดึงเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึง 4.19 จากนั้นวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการทดลองกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงจากเปอร์เซ็นต์ (%) ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการยืดตัวที่แรงดึงต่างๆ [18] โดยมีนิยามดังสมการที่ (4.1)

$$\text{Average value of \% Difference} = \frac{\sum |\Delta U_{F,FEM} - \Delta U_{F,Exp}|}{\text{Total no. of calculated force}} \times 100 \quad (4.1)$$

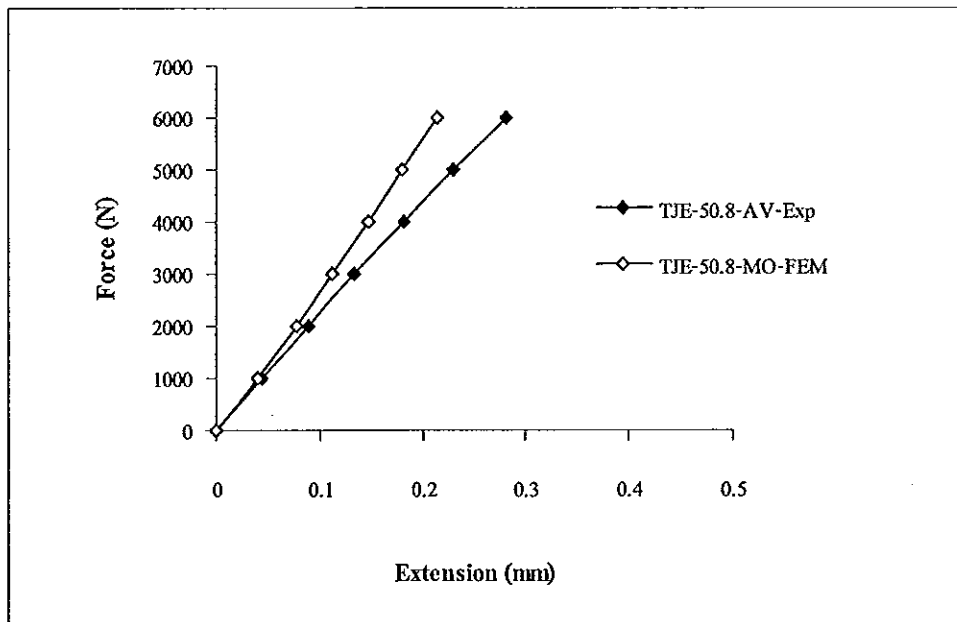
เมื่อ $\Delta U_{F,FEM}$ คือการยืดตัวที่เปลี่ยนไปเมื่อแรงดึงต่างกันที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ $\Delta U_{F,Exp}$ คือการยืดตัวที่เปลี่ยนไปเมื่อแรงดึงต่างกันที่ได้จากการทดลอง



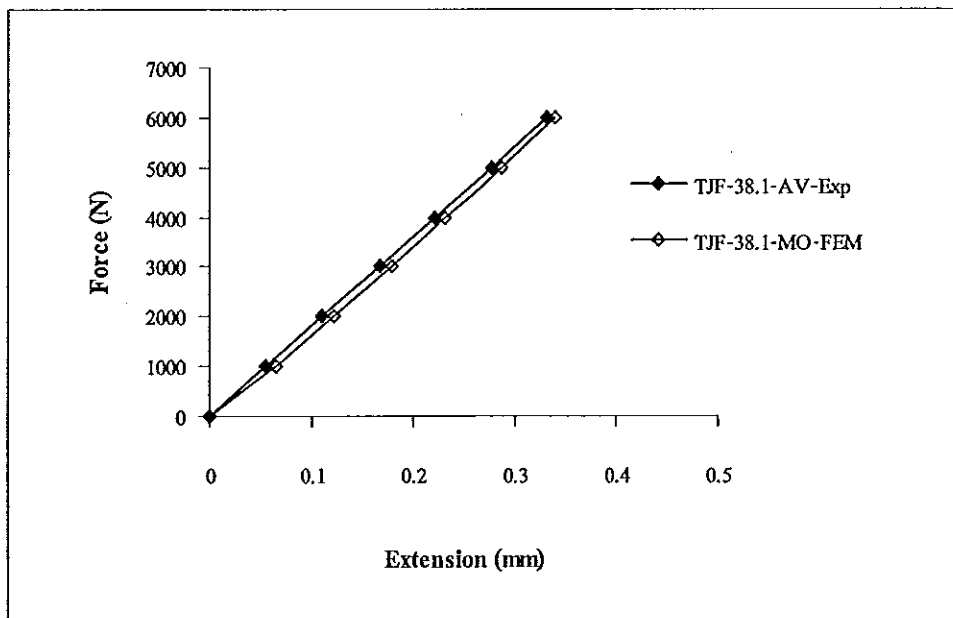
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีไม่ทากาว ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



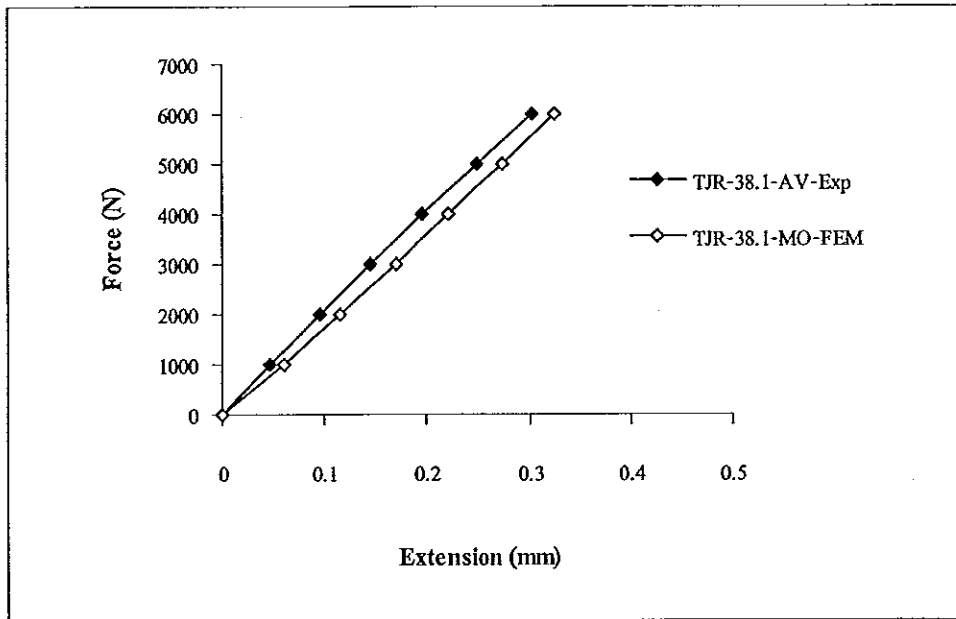
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีทากาวยาง ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



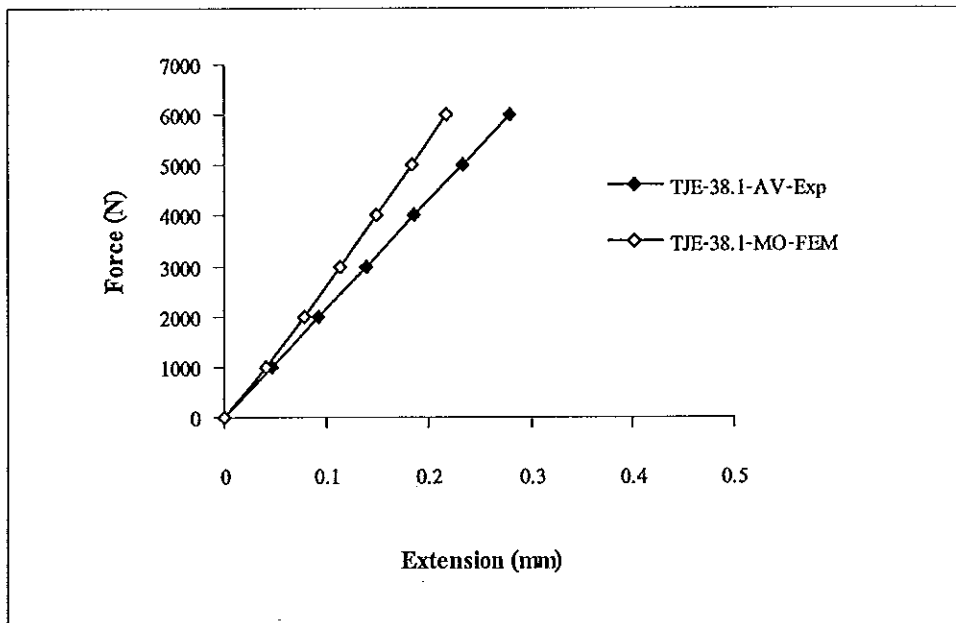
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีทากาวอีพอกซี ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



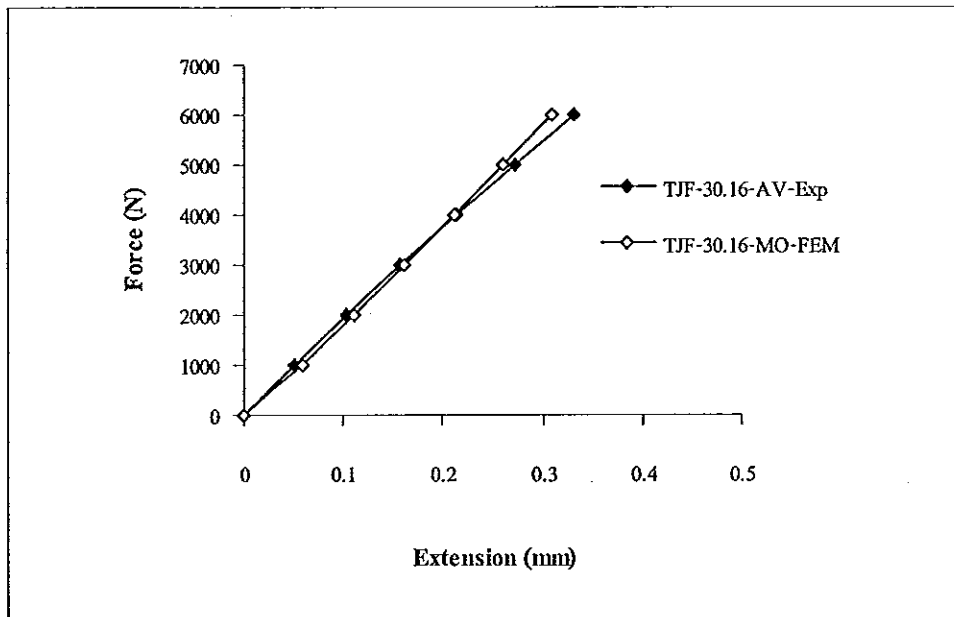
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีไม่ทากาว ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



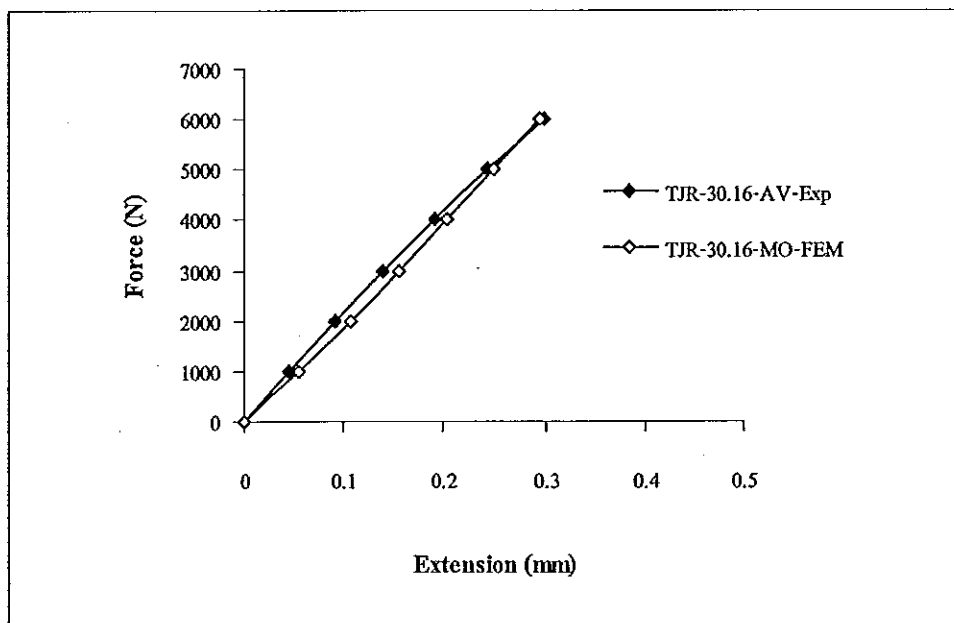
รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีทากาวยาง ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



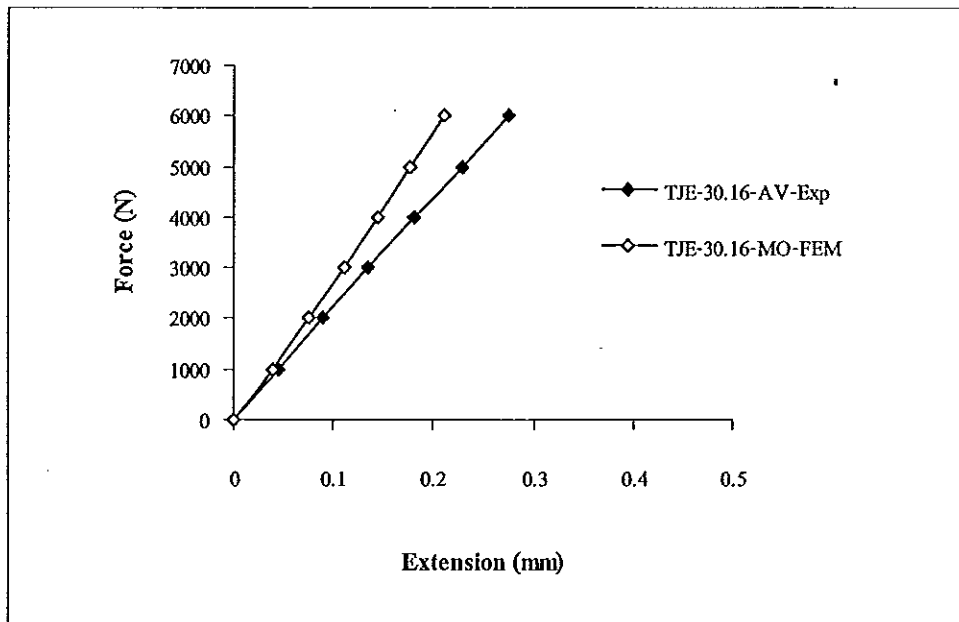
รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีทากาวอีพอกซี ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีไม่ทากาว ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีทากาวยาง ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.19 กราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีทาकाอิพอกซี ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.19 เป็นผลการเปรียบเทียบกราฟระหว่างการทดลองจริงกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงจากเปอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการยึดตัวที่แรงดึงต่างๆ ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของการทดลองกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Pitch distance (mm)	Average value of % Difference		
	no-adhesive	rubber glue	epoxy adhesive
50.8	14.8 %	22.1 %	14.4 %
38.1	6.3 %	13.9 %	15.6 %
30.16	5.2 %	8.8 %	15.9 %

คังนั้นอาจสรุปแยกพิจารณาผลการเปรียบเทียบเป็นประเด็นใหญ่ๆดังนี้

1. แบบจำลองรอยต่อหมุดยี่าระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร สามารถทำนายพฤติกรรมของรอยต่อหมุดยี่าได้นำเชื่อถือระดับหนึ่ง โดยมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) เท่ากับ 14.8 %, 6.3 %, และ 5.2 % ตามลำดับ
2. แบบจำลองรอยต่อหมุดยี่าร่วมกับกาวระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร (กรณีทากาวยาง) สามารถทำนายพฤติกรรมของรอยต่อหมุดยี่าร่วมกับกาวได้นำเชื่อถือระดับหนึ่ง โดยมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) เท่ากับ 22.1 %, 13.9 %, และ 8.8 % ตามลำดับ
3. แบบจำลองรอยต่อหมุดยี่าร่วมกับกาวระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร (กรณีทากาวอีพอกซี) สามารถทำนายพฤติกรรมของรอยต่อหมุดยี่าร่วมกับกาวได้นำเชื่อถือระดับหนึ่ง โดยมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) เท่ากับ 14.4 %, 15.6 %, และ 15.9 % ตามลำดับ

4.3.2 สาเหตุของร้อยละความแตกต่าง

สาเหตุของร้อยละความแตกต่างมีผลมาจากสาเหตุใหญ่ๆดังนี้

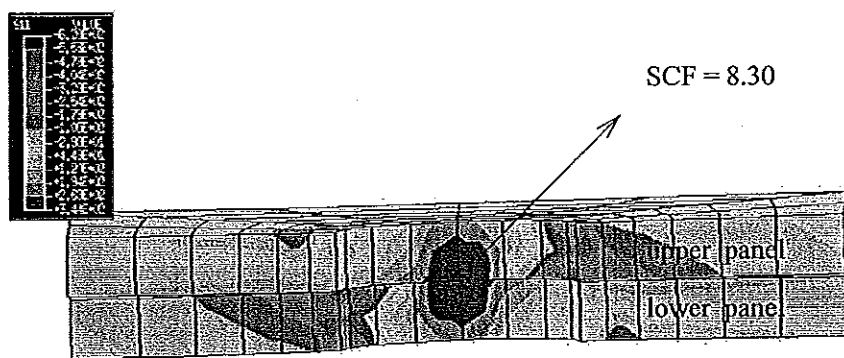
1. รูปทรงของชิ้นงานตัวอย่างมีลักษณะไม่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยม เพราะตัวจับของเครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุมีระยะความกว้างยึดจับที่ส่วนปลายของชิ้นงานตัวอย่างเพียง 2 นิ้ว จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปลงชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปทรงคังรูปที่ 3.8 ถึง 3.10 ทำให้การยึดตัวที่ส่วนปลายของชิ้นงานตัวอย่างมีการยึดตัวสูง เนื่องจากตรงบริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นส่วน โค้งเว้าตลอดจนไม่สามารถควบคุมความหนาของชั้นกาวบางของรอยต่อหมุดยี่าได้
2. สมบัติเชิงกลของชั้นกาวบาง ถูกเปลี่ยนเป็นสปริงเอลิเมนต์ โดยการวิจัยครั้งนี้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน JIS K6849 และ K6850 เพื่อศึกษาการยึดติดของชั้นกาวในแง่ของมอดูลัสยืดหยุ่น และมอดูลัสเฉือน โดยค่ามอดูลัสที่นำมาใช้จะเป็นค่าเชิงเส้นคงที่ แต่ในพฤติกรรมจริงของชั้นกาวบางจะแสดงพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) และพฤติกรรมของสปริงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสจะแสดงทั้งการยึดตัวและการหดตัว

4.4 ผลการศึกษาตัวแปร (parametric study)

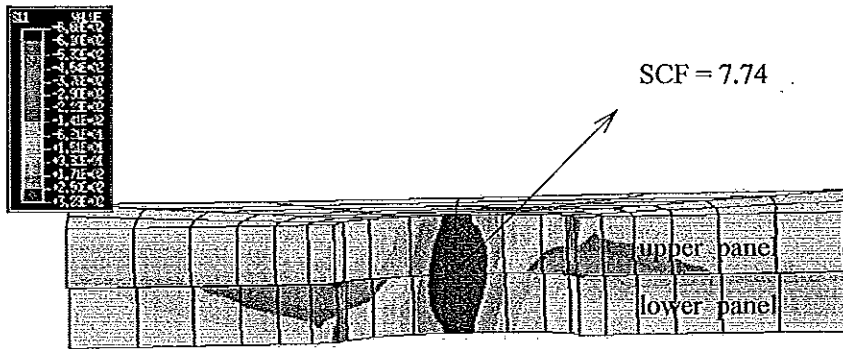
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านการยืนยันความถูกต้องถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาตัวแปร คือ มอดูลัสของกาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสในรอยต่อ และระยะห่างระหว่างหมุดย้ำว่ามีผลต่อการเพิ่มลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นอย่างไร

4.4.1 ผลการศึกษาตัวแปรจากแบบจำลองที่ได้รับการยืนยันความถูกต้องจากการทดลองจริง

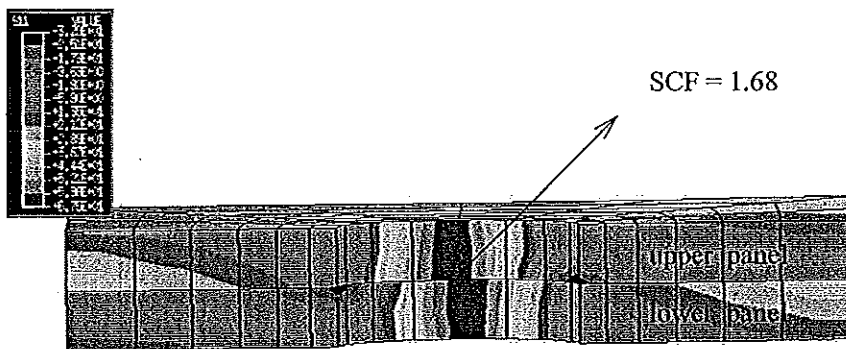
การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น ซึ่งหาค่าได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8 มิลลิเมตร กรณีไม่ทากาว ทากาวยาง และทากาวอีพอกซีมีค่า 8.30, 7.74, และ 1.68 ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 38.1 มิลลิเมตร กรณีไม่ทากาว ทากาวยาง และทากาวอีพอกซีมีค่า 6.48, 6.14, และ 1.99 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 30.16 มิลลิเมตร กรณีไม่ทากาว ทากาวยาง และทากาวอีพอกซีมีค่า 5.41, 5.17, และ 1.88 ตามลำดับ ดังแสดงตำแหน่งการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อหมุดย้ำในรูปที่ 4.20 ถึง 4.28 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการทากาวที่ผิวสัมผัสของรอยต่อหมุดย้ำ ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรูหมุดย้ำลดลง ในกรณีทากาวอีพอกซี พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเกือบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงในทุกค่าของระยะห่างระหว่างหมุดย้ำ



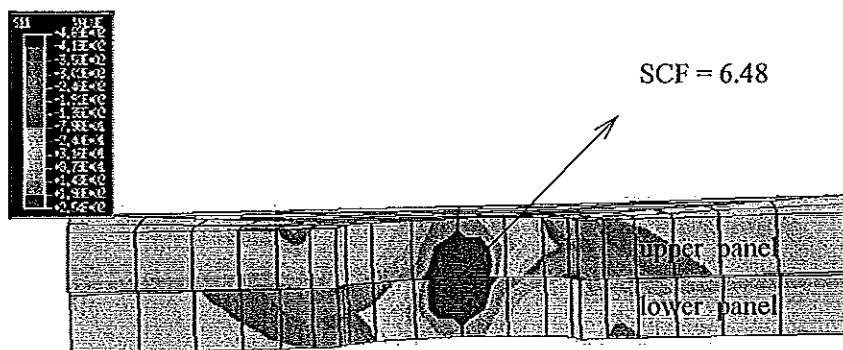
รูปที่ 4.20 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีไม่ทากาว ระยะห่างระหว่างหมุดย้ำเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



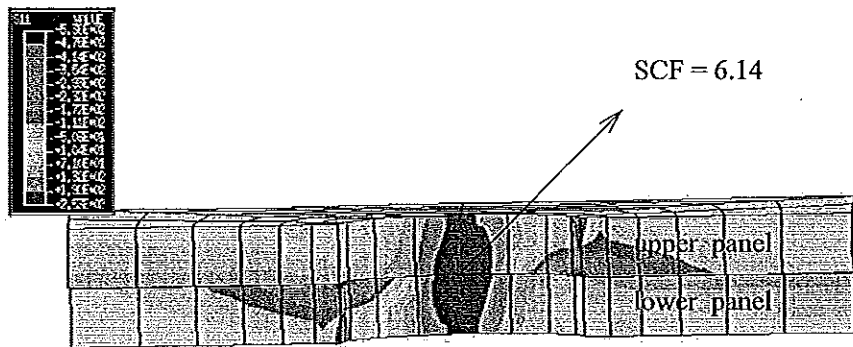
รูปที่ 4.21 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทาากวาง ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



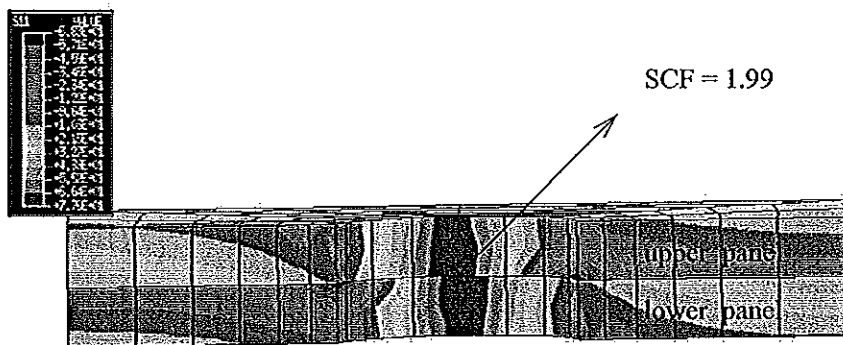
รูปที่ 4.22 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทาากวางอีพอกซี ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



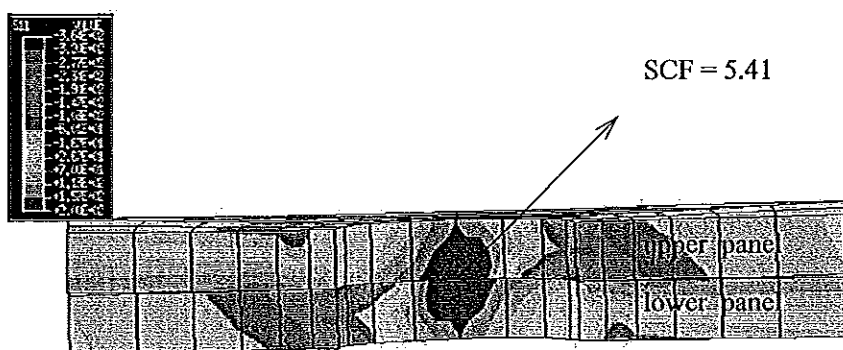
รูปที่ 4.23 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีไม้ทาากวาง ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



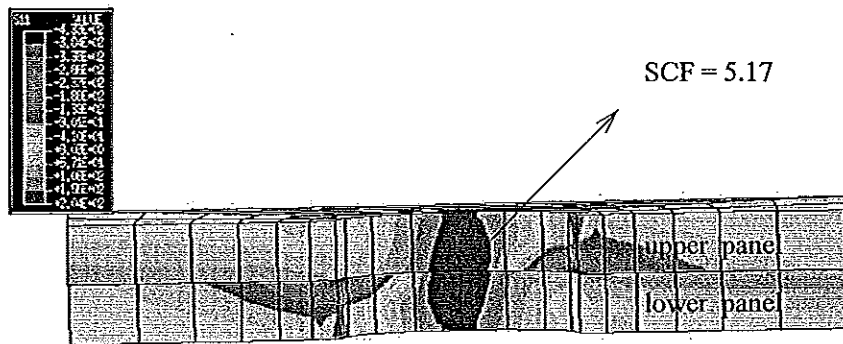
รูปที่ 4.24 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กระจกไฟเบอร์ คาร์บอน ระยะเวลาห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



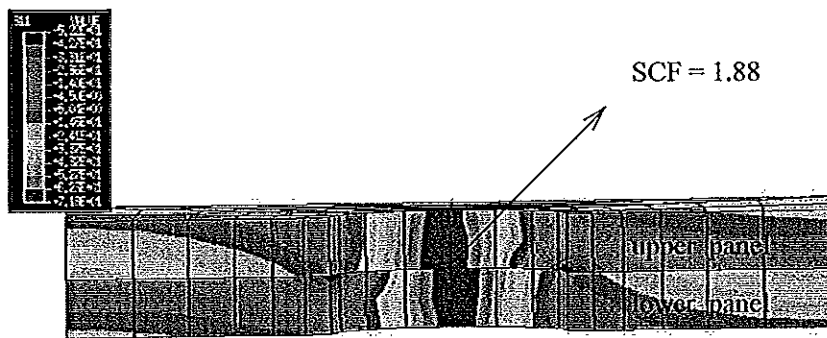
รูปที่ 4.25 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กระจกไฟเบอร์ คาร์บอน อีพอกซี ระยะเวลาห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.26 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กระจกไฟเบอร์ คาร์บอน ระยะเวลาห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.27 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาวยาง ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร

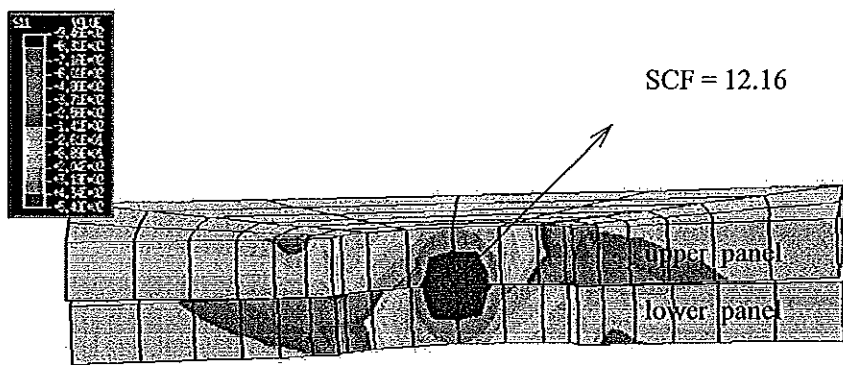


รูปที่ 4.28 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาวอีพอกซี ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร

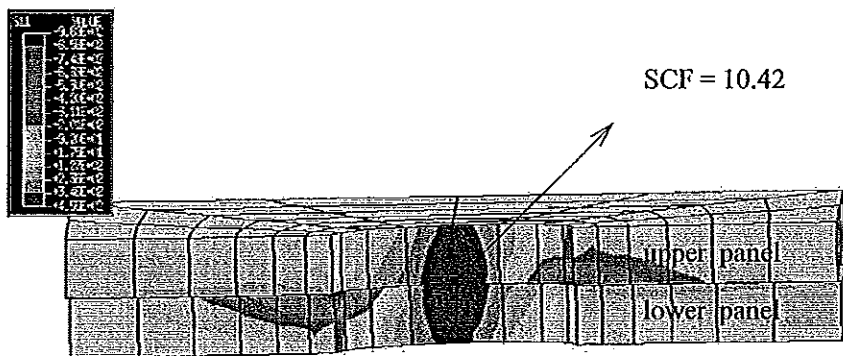
4.4.2 ผลการศึกษาตัวแปรจากแบบจำลองที่นำไปใช้ในการศึกษาตัวแปร (ไม่มีการทดลองจริง)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น ซึ่งหาค่าได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 76.20 มิลลิเมตร กรณีไม่ทากาว ทากาวยาง ทากาว adhesive A ทากาวอีพอกซี และทากาว adhesive B มีค่า 12.16, 10.42, 3.53, 2.19 และ 1.35 ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 50.8 มิลลิเมตร กรณีทากาว adhesive A และทากาว adhesive B มีค่า 3.49 และ 1.41 ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มีระยะห่างระหว่างหมุด 38.1 มิลลิเมตร กรณีทากาว adhesive A และทากาว adhesive B มีค่า 3.34 และ 1.43 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดยึดที่มี

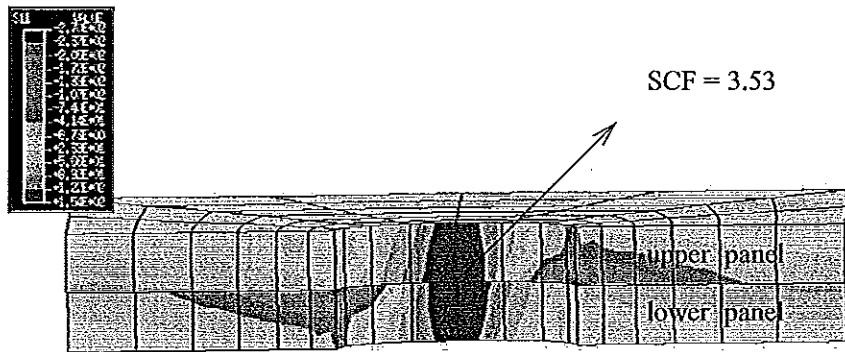
ระยะห่างระหว่างหมุด 30.16 มิลลิเมตร กรณีทากาว adhesive A และทากาว adhesive B มีค่า 3.18 และ 1.45 ตามลำดับ ดังแสดงตำแหน่งการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อหมุดยึดใน รูปที่ 4.29 ถึง 4.39 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการทากาวที่ผิวสัมผัสของรอยต่อหมุดยึด ทำให้ค่าการ เปลี่ยนแปลงของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรูหมุดยึดลดลง ในกรณีทากาว adhesive A และทากาว adhesive B พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเกือบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงในทุกค่าของ ระยะห่างระหว่างหมุดยึด



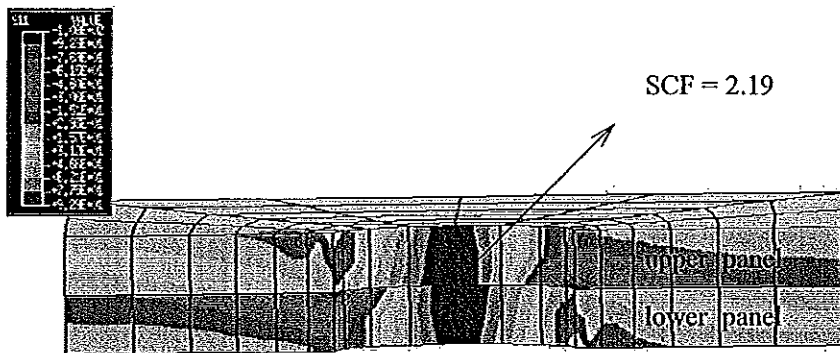
รูปที่ 4.29 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีไม่ทากาว ระยะห่างระหว่าง หมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร



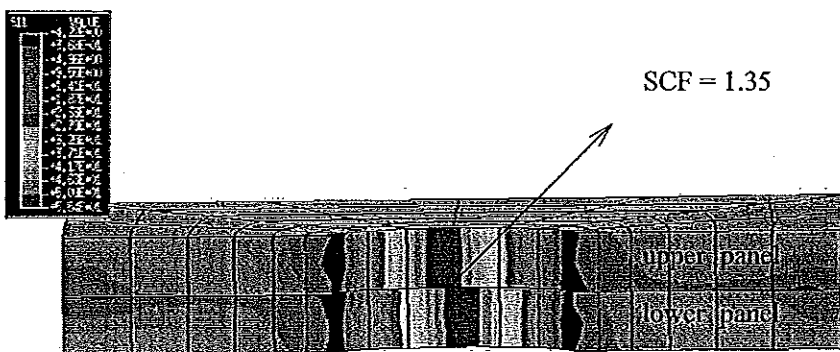
รูปที่ 4.30 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทากาวยาง ระยะห่าง ระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร



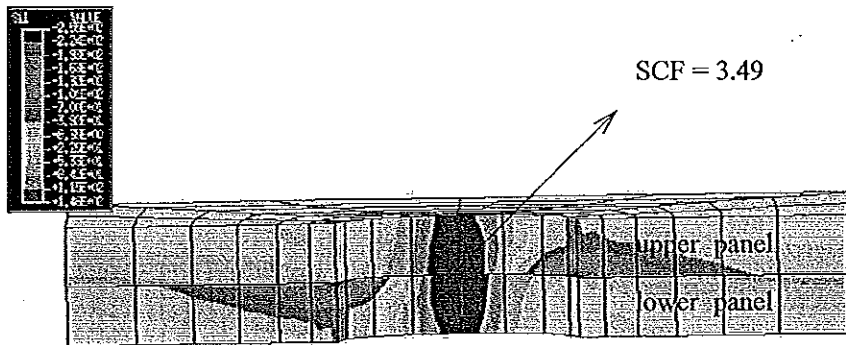
รูปที่ 4.31 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทาขาว adhesive A ($E=10$ MPa, $G=3.84$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร



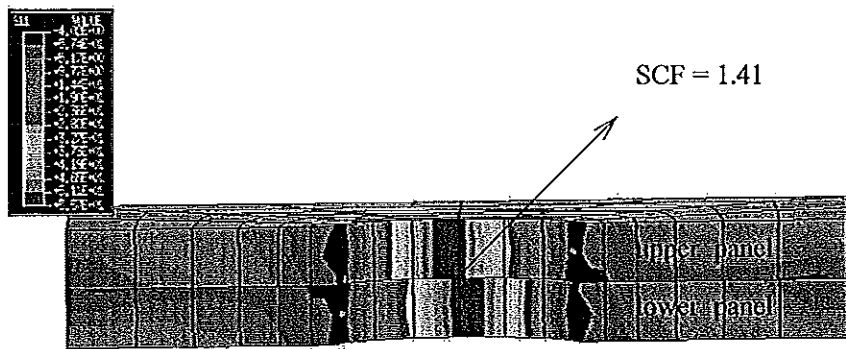
รูปที่ 4.32 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทาขาวอีพอกซี ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร



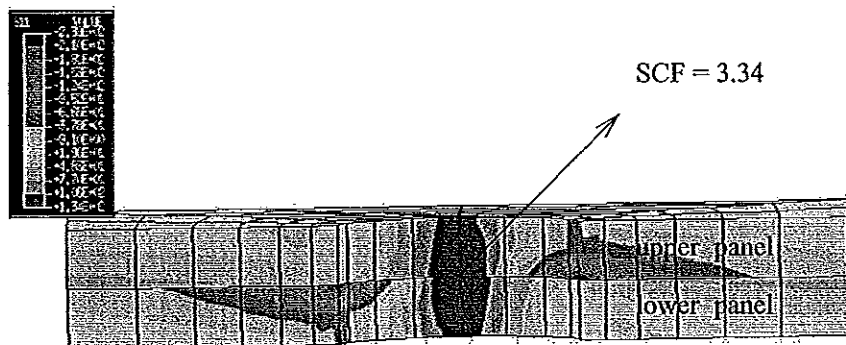
รูปที่ 4.33 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีทาขาว adhesive B ($E=100$ MPa, $G=38.46$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 76.2 มิลลิเมตร



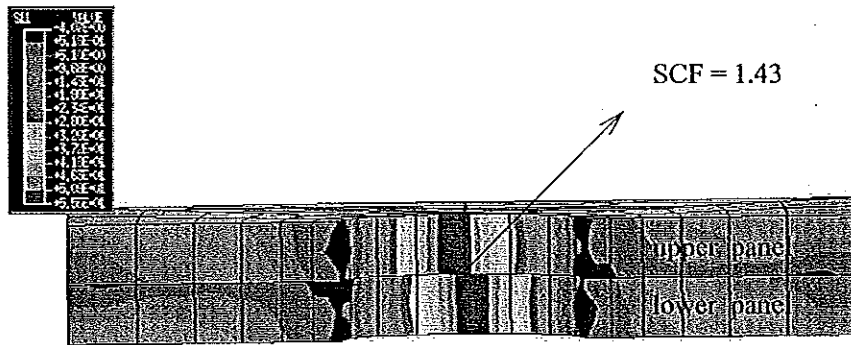
รูปที่4.34 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีใช้กาว adhesive A ($E=10$ MPa, $G=3.84$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



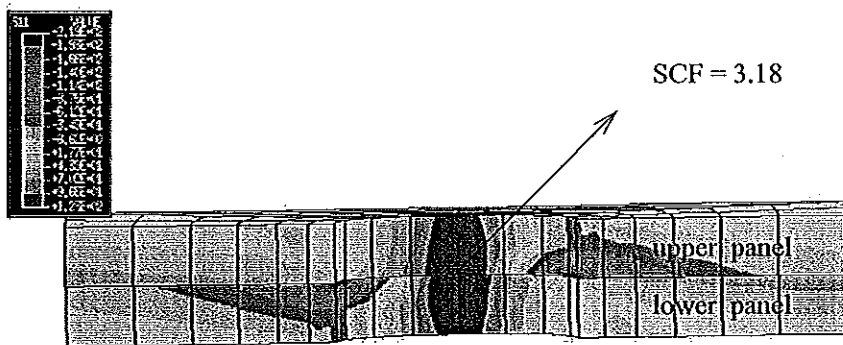
รูปที่4.35 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีใช้กาว adhesive B ($E=100$ MPa, $G=38.46$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 50.8 มิลลิเมตร



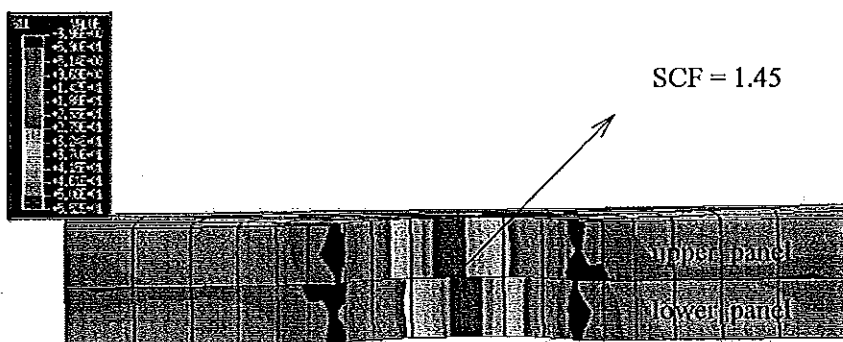
รูปที่4.36 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีใช้กาว adhesive A ($E=10$ MPa, $G=3.84$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.37 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีเทากาว adhesive B ($E=100$ MPa, $G=38.46$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 38.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.38 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีเทากาว adhesive A ($E=10$ MPa, $G=3.84$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร



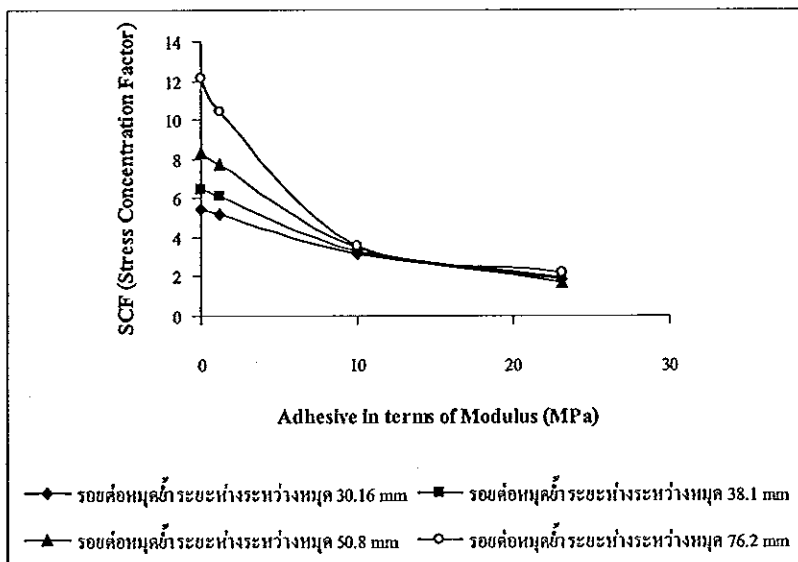
รูปที่ 4.39 แสดงการกระจายของความเค้นในแนวแกนของรอยต่อ กรณีเทากาว adhesive B ($E=100$ MPa, $G=38.46$ MPa) ระยะห่างระหว่างหมุดยึดเท่ากับ 30.16 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.39 นำเสนอค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นในรอยต่อหมุดย้ำให้อยู่ในรูปของตารางดังแสดงในตารางที่ 4.3 และกราฟแสดงค่ามอดูลัสของกาว และระยะห่างระหว่างหมุดย้ำมีผลต่อการเพิ่มลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นแสดงดังรูปที่ 4.40

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งหมด

Adhesive in terms of Modulus	Pitch distance (mm)			
	76.20	50.80	38.10	30.16
	SCF	SCF	SCF	SCF
No adhesive	12.16	8.30	6.48	5.41
rubber glue * (E=1.128MPa, G=0.154 MPa)	10.42	7.74	6.14	5.17
adhesive A (E=10 MPa, G=3.84 MPa)	3.53	3.49	3.34	3.18
epoxy adhesive * (E=23.147 MPa, G=9.385 MPa)	2.19	1.68	1.99	1.88
adhesive B (E=100 MPa, G=38.46 MPa)	1.35	1.41	1.43	1.45

หมายเหตุ * หมายถึงค่ามอดูลัสได้จากการทดสอบพฤติกรรมในการยึดติดของชั้นกาวบางตามมาตรฐาน JIS K6849 และ K6850



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่ามอดูลัสของกาว และระยะห่างระหว่างหมุดย้ำมีผลต่อการเพิ่มลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น ในรอยต่อหมุดย้ำ

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.40 สรุปค่ามอดูลัสของกาว และระยะห่างระหว่างหมุด มีผลต่อการเพิ่มลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นเป็นประเด็นใหญ่ๆ ดังนี้

1. แบบจำลองรอยต่อหมุดยี่ที่มีระยะห่างระหว่างหมุดเพิ่มมากขึ้น (กรณีไม่ทา กาว) มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยี่มีค่ามากขึ้นตาม ไปด้วย เนื่องจากความแข็งแรงของรอยต่อจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างหมุด คือระยะห่างระหว่างหมุดน้อย หมายถึงมีจำนวนของหมุดยี่ที่ใช้ยึดชิ้นงานมาก ส่วนระยะห่างระหว่างหมุดมากหมายถึงมีจำนวน ของหมุดยี่ที่ใช้ยึดชิ้นงานน้อย ในช่วงที่มีความยาวจำกัดของชิ้นงานเท่ากัน ดังนั้นชิ้นงานที่มี จำนวนหมุดยี่มากกว่า ส่งผลทำให้เกิดความเค้นคัดในรูเจาะของแผ่นอลูมิเนียมน้อยกว่าชิ้นงานที่มี จำนวนหมุดยี่น้อยกว่า

2. แบบจำลองรอยต่อหมุดยี่ที่มีระยะห่างระหว่างหมุดเพิ่มมากขึ้น (กรณีทา กาว มอดูลัสต่ำ ได้แก่ rubber glue) มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยี่มี ค่ามากขึ้นตาม ไปด้วย เนื่องจากความแข็งแรงของรอยต่อขึ้นกับจำนวนหมุดยี่มากกว่าความ แข็งแรงในการยึดติดของกาว จึงทำให้ระยะห่างระหว่างหมุดมีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อ มากกว่าการทา กาวที่มีค่ามอดูลัสต่ำ

3. แบบจำลองรอยต่อหมุดยี่ที่มีระยะห่างระหว่างหมุดเพิ่มมากขึ้น (กรณีทา กาว มอดูลัสสูง ได้แก่ adhesive A, epoxy adhesive และ adhesive B) มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้ม ของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยี่มีค่าค่อนข้างคงที่ทุกๆ ระยะห่างระหว่างหมุดยี่ แสดงว่าการต่อ แผ่นโลหะด้วยหมุดยี่ร่วมกับกาวมอดูลัสสูง สามารถลดจำนวนหมุดยี่ลงได้

4. แบบจำลองรอยต่อหมุดยี่ระยะห่างระหว่างหมุดเท่ากัน (กรณีทา กาวทุก ประเภท) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยี่มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ตามความยืดหยุ่นของกาว คือกาวที่มีค่ามอดูลัสสูงกว่าย่อมส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของ ความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยี่มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากกาวที่มีค่ามอดูลัสสูงกว่าย่อมทำให้การคืบตัวของ แผ่นอลูมิเนียมลดลงมากกว่า จึงทำให้เกิดความเค้นคัดในรูเจาะลดลงมากกว่ากาวที่มีค่ามอดูลัสต่ำ กว่า

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดตัวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้รับจากการทดสอบของชิ้นงานตัวอย่าง พบว่า แบบจำลองรอยต่อหมุดยี่าระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) สูงสุดประมาณ 15 % ส่วนแบบจำลองรอยต่อหมุดยี่าร่วมกับการระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร (กรณีทาขาวายาง) มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) สูงสุดประมาณ 22 % และแบบจำลองรอยต่อหมุดยี่าร่วมกับการระยะห่างระหว่างหมุด 50.8, 38.1, และ 30.16 มิลลิเมตร (กรณีทาขาวีพอกซี) มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความแตกต่างตลอดช่วงแรงดึง (0-6000 N) สูงสุดประมาณ 16 % แสดงว่าแบบจำลองและการทดสอบจริงมีความใกล้เคียงกันในระดับหนึ่งในช่วงการยืดตัวในระยะน้อยๆ ซึ่งอยู่ในช่วงของการยืดตัวแบบเชิงเส้น ดังนั้นแบบจำลองจึงมีความเชื่อถือได้ระดับหนึ่งในช่วงที่มีการยืดตัวน้อยๆ เนื่องจากสาเหตุความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากรอยเว้าของชิ้นงาน และการควบคุมความหนาของชั้นกาวบาง

2. การลดระยะห่างระหว่างหมุดยี่า ช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะ (กรณีไม่ทาขาว) เนื่องจากระยะห่างระหว่างหมุดมีผลต่อการส่งถ่ายแรงมายังตัวหมุดยี่าทำให้หมุดยี่ารับแรงไปบางส่วนด้วย ดังนั้นการต่อแผ่นโลหะด้วยหมุดยี่าที่มีระยะห่างระหว่างหมุดน้อยกว่าย่อมมีจำนวนหมุดยี่ามากกว่าจะสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นลดลงได้

3. การเพิ่มความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาว ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยี่าลดลง ทั้งนี้ชั้นกาวที่ยึดติดแข็งแรงขึ้นสามารถช่วยลดการตัดตัวของรอยต่อ ส่งผลให้ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการคัดในรูเจาะลดลง

4. การทาขาวชั้นบางในรอยต่อหมุดยี่า สามารถช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดยี่าลง เป็นการทำนายอายุการใช้งานของรอยต่อภายใต้ภาระแรงดึงสลับ การเพิ่มค่ามอดุลัสของกาวมากขึ้น (≥ 10 MPa) ทำให้ค่าระยะห่างระหว่างหมุดยี่าไม่มีผลต่อการลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้น เนื่องจากการทาขาวที่มีค่ามอดุลัสสูงส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อมากกว่าระยะห่างระหว่างหมุด ในแต่ละประเภทของกาว ค่าสัมประสิทธิ์ความ

เข้มของความเค้นมีแนวโน้มคงที่ทุกระยะห่างระหว่างหมุด แสดงว่าการต่อแผ่น โลหะด้วยหมุดย้ำ ร่วมกับค้ำมอดุลีสูง สามารถลดจำนวนหมุดย้ำลงได้ ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง

5.2 วิจารณ์ผล

1. การทากาวชั้นบางในรอยต่อหมุดย้ำ สามารถช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดย้ำลง เนื่องจากกาวจะทำหน้าที่ในการยึดติดแผ่นอลูมิเนียมให้เป็นชิ้นเดียวกัน จึงทำให้ชิ้นงานเกิดการตัดตัวน้อยลง

2. กาวที่มีค่ามอดุลียืดหยุ่น และมอดุลีสเถือนต่างกัน ย่อมส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นมีค่าต่างกัน เนื่องจากค่ามอดุลีสจะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงในการยึดติดของชั้นกาวบาง ดังนั้นกาวที่มีค่ามอดุลีสมากกว่าย่อมมีความแข็งแรงในการยึดติดมากกว่ากาวที่มีค่ามอดุลีสน้อยกว่า

3. ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นงานที่มีการเชื่อมต่อด้วยหมุดย้ำร่วมกับกาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.40 คือถ้าต้องการลดจำนวนหมุดย้ำแต่ความแข็งแรงของชิ้นงานยังคงเดิม สามารถใช้กาวที่มีค่ามอดุลีสสูงร่วมกับหมุดย้ำ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดย้ำลดลง

5.3 ข้อเสนอแนะ

การใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำ มีข้อเสนอแนะและควรปรับปรุงดังนี้

1. ในการวิจัยครั้งนี้ไม่พิจารณาผลของความหนาของชั้นกาวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไปควรที่จะควบคุมความหนาของชั้นกาวในรอยต่อหมุดย้ำ

2. ควรมีการทดสอบการล้า (fatigue test) ของชิ้นงาน เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นบริเวณรูเจาะหมุดย้ำ ไปทำนายอายุในการใช้งานของชิ้นงานได้

3. ควรมีการวัดค่าระยะเปิดบริเวณส่วนที่เกยของรอยต่อ และมุมเอียงของหมุดย้ำ เพราะค่าเหล่านี้สามารถอธิบายค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นที่เกิดขึ้นในรอยต่อหมุดย้ำมีสองกรณีคือ ความเค้นจากการดัดผสมกับความเค้นจากการค้ำของแผ่นอลูมิเนียม ซึ่งกาวจะไปช่วยในการยึดติดแผ่นอลูมิเนียมทั้งสองไว้ด้วยกัน ทำให้การค้ำตัวของชิ้นงานลดลง

บรรณานุกรม

- [1] C. Dechwayukul, "Analysis of the Effects of Thin Sealant Layers in Aircraft Structural Joints," AIAA JOURNAL, Vol. 41, No. 11, 2003, pp. 2216-2228.
- [2] Y.F. Cheng, "Stress-Concentration Factors for a Countersunk Hole in a Flat Bar in Tension and Transverse Bending," Journal of Applied Mechanics, Vol. 45, 1978, pp. 929-932.
- [3] S. Chutima, and A.P. Blackie, "Effect of pitch distance, row spacing, end distance and bolt diameter on multi-fastened composite joints," Composite Part A, Vol. 27A, No. 2, 1996, pp. 105-110.
- [4] G.R. Wooley, and D.R. Carver, "Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joints," Journal of Aircraft, Vol. 8, 1971, pp. 817-820.
- [5] M. Goland, and E. Reissner, "The Stresses in Cemented Joints," Journal of Applied Mechanics, Vol. 11, 1944, pp. A17-A27.
- [6] M.R. Barker, and F.Hatt, "Analysis of Bonded Joints in Vehicular Structures," AIAA JOURNAL, Vol. 11(12), 1973, pp. 1650-1654.
- [7] H.A. Raul, A.D. David, and M.H. Siegfried, "Two-and Three-Dimensional Geometrical Nonlinear Finite Elements for Analysis of Adhesive Joints," International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol.21, 2001, pp.17-34.
- [8] K. Iyer, M. Xue, P.C. Bastias, C.A. Rubin, and G.T. Hahn, "Analysis of fretting and fretting corrosion in Airframe riveted connections," AGARD conference procedeeding 589, Tribology for Aerospace Systems, North Atlantic treaty organization, 1996, pp. 13.1-13.12
- [9] K. Iyer, "Three-Dimensional Finite Element Analyses of the Local Mechanical Behavior of Riveted Lap Joints," Ph.D. Dissertation, Vanderbilt University, Nashville TN, 1997.
- [10] J. Liu, and T. Sawa, "Stress analysis and strength evaluation of single lap adhesive joints combining rivets subjected to external bending moments," DE-Vol. 105, Reliability, Stress Analysis and Failure Prevention Issues in Adhesive and Bolted Connections, ASME, 1999, pp. 51-63.
- [11] T. Fongsamootr, "The Dilation and Compressive Properties of a Polymer Sealant and Analyses of the Distortion and Fatigue of Sealed Riveted Lap Joints," Ph.D. Dissertation, Vanderbilt University, Nashville TN, 2001.

- [12] M. Imanaka, "Fatigue Strength of Adhesive/Rivet Combined Lap Joints", *Journal of Adhesion*, Vol. 49, 1995, pp. 197-209.
- [13] J.E. Shigley, C.R. Mischke, and R.G. Budynas. 2003. Mechanical Engineering Design, Seventh Edition. New York : McGraw-Hill.
- [14] เศษ พุทธเจริญทอง. 2541. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.
- [15] ABAQUS Users Manual, Version 5.8.2, Hibbit, Karlsson&Sorensen, Inc., 2000.
- [16] <http://www.isit.or.th/techinfo.asp>
- [17] N.E. Dowling. 1993. Mechanical behavior materials : engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. New Jersey : Prentice-Hall.
- [18] วิไลพร ลักขมีวานิชย์ และ มนัส แซ่ด่าน. 2545. "การวิเคราะห์พฤติกรรมการกดของอิลาสติกแบบรีงด้วยเทคนิคไฟไนต์เอลิเมนต์", รายงานวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมศาสตร์ฉบับสมบูรณ์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างไฟล์ Input สำหรับการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

ก.1 ตัวอย่างไฟล์ Input กรณีไม่ทากาว

*HEADING

**Test TENSION

**UPPER

*NODE

2417,-15.875,25.4,0.

2401,-15.875,0.,0.

17,-85.725,25.4,0.

1,-85.725,0.,0.

22417,-15.875,25.4,1.6

22401,-15.875,0.,1.6

20017,-85.725,25.4,1.6

20001,-85.725,0.,1.6

*NGEN, NSET=BLEFT1

1,17,2

*NGEN, NSET=BRIGHT1

2401,2417,2

*NFILL,NSET=BOTTOM1

BLEFT1,BRIGHT1,12,200

*NGEN, NSET=TLEFT1

20001,20017,2

*NGEN, NSET=TRIGHT1

22401,22417,2

*NFILL,NSET=TOP1

TLEFT1,TRIGHT1,12,200

*NFILL,NSET=BT1

BOTTOM1, TOP1,2,10000

*ELEMENT,TYPE=C3D27,ELSET=UPPER1

201, 1,401,405,5,20001,20401,20405,20005,

201,403,205,3,20201,20403,20205,20003,10001,

10401,10405,10005,10203,203,20203,10201,10403,
10205,10003
*ELGEN,ELSET=UPPER1
201, 6,400,1,4,4,10
*SOLID SECTION, ELSET=UPPER1,MATERIAL=ALU1
*MATERIAL,NAME=ALU1
*ELASTIC
70.E3, 0.25
*NODE
2417,-15.875,25.4,0.
2401,-15.875,0.,0.
4817,15.875,25.4,0.
4801,15.875,0.,0.
22417,-15.875,25.4,1.6
22401,-15.875,0.,1.6
24817,15.875,25.4,1.6
24801,15.875,0.,1.6
*NGEN, NSET=BLEFT2
2401,2417,2
*NGEN, NSET=BRIGHT2
4801,4817,2
*NFILL,NSET=BOTTOM2
BLEFT2,BRIGHT2,12,200
*NGEN, NSET=TLEFT2
22401,22417,2
*NGEN, NSET=TRIGHT2
24801,24817,2
*NFILL,NSET=TOP2
TLEFT2,TRIGHT2,12,200
*NFILL,NSET=BT2

BOTTOM2, TOP2, 2, 10000

*ELEMENT, TYPE=C3D27, ELSET=UPPER2

101, 2401, 2444, 2440, 2405, 22401, 22444, 22440, 22405,
2601, 2442, 2605, 2403, 22601, 22442, 22605, 22403, 12401,
12444, 12440, 12405, 12603, 2603, 22603, 12601, 12442,
12605, 12403

111, 2405, 2440, 2436, 2409, 22405, 22440, 22436, 22409, 2605, 2438,
2609, 2407, 22605, 22438, 22609, 22407, 12405, 12440, 12436, 12409,
12607, 2607, 22607, 12605, 12438, 12609, 12407

121, 2409, 2436, 2813, 2413, 22409, 22436, 22813, 22413, 2609, 2811,
2613, 2411, 22609, 22811, 22613, 22411, 12409, 12436, 12813, 12413,
12611, 2611, 22611, 12609, 12811, 12613, 12411

122, 2436, 2432, 3213, 2813, 22436, 22432, 23213, 22813, 2434, 3211,
3013, 2811, 22434, 23211, 23013, 22811, 12436, 12432, 13213, 12813,
13011, 3011, 23011, 12434, 13211, 13013, 12811

123, 2432, 2428, 3613, 3213, 22432, 22428, 23613, 23213, 2430, 3611,
3413, 3211, 22430, 23611, 23413, 23211, 12432, 12428, 13613, 13213,
13411, 3411, 23411, 12430, 13611, 13413, 13211

124, 2428, 2424, 4013, 3613, 22428, 22424, 24013, 23613, 2426, 4011,
3813, 3611, 22426, 24011, 23813, 23611, 12428, 12424, 14013, 13613,
13811, 3811, 23811, 12426, 14011, 13813, 13611

125, 2424, 2420, 4413, 4013, 22424, 22420, 24413, 24013, 2422, 4411,
4213, 4011, 22422, 24411, 24213, 24011, 12424, 12420, 14413, 14013,
14211, 4211, 24211, 12422, 14411, 14213, 14011

126, 2420, 4809, 4813, 4413, 22420, 24809, 24813, 24413, 4609, 4811,
4613, 4411, 24609, 24811, 24613, 24411, 12420, 14809, 14813, 14413,
14611, 4611, 24611, 14609, 14811, 14613, 14411

116, 2416, 4805, 4809, 2420, 22416, 24805, 24809, 22420, 4605, 4807,
4609, 2418, 24605, 24807, 24609, 22418, 12416, 14805, 14809, 12420,
14607, 4607, 24607, 14605, 14807, 14609, 12418

106, 2412,4801,4805,2416,22412,24801,24805,22416,4601,4803,
4605,2414,24601,24803,24605,22414,12412,14801,14805,12416,
14603,4603,24603,14601,14803,14605,12414

131, 2413,2813,2817,2417,22413,22813,22817,22417,2613,2815,
2617,2415,22613,22815,22617,22415,12413,12813,12817,12417,
12615,2615,22615,12613,12815,12617,12415

*ELGEN,ELSET=UPPER2

131, 6,400,1

*SOLID SECTION, ELSET=UPPER2,MATERIAL=ALU2

*MATERIAL,NAME=ALU2

*ELASTIC

70.E3, 0.25

*NODE

2436,-10.583,12.7,0.

2444,-10.583,0.,0.

2420,10.583,12.7,0.

2412,10.583,0.,0.

22436,-10.583,12.7,1.6

22444,-10.583,0.,1.6

22420,10.583,12.7,1.6

22412,10.583,0.,1.6

*NODE,SYSTEM=C

12,3.265,0.,0.

20,3.265,45.,0.

36,3.265,135.,0.

44,3.265,180.,0.

20012,3.265,0.,1.6

20020,3.265,45.,1.6

20036,3.265,135.,1.6

20044,3.265,180.,1.6

*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE1
12,20,2,,0.,0.,0.,0.,1.
*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE2
20,36,2,,0.,0.,0.,0.,1.
*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE3
36,44,2,,0.,0.,0.,0.,1.
*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE4
20012,20020,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.
*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE5
20020,20036,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.
*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE6
20036,20044,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.
*NGEN, NSET=BLEFT3
2436,2444,2
*NGEN, NSET=BUPPER3
2420,2436,2
*NGEN, NSET=BRIGHT3
2412,2420,2
*NFILL,NSET=BOTTOM3,BIAS=1.1
BLEFT3,HOLE3,12,-200
*NFILL,NSET=BOTTOM4,BIAS=1.1
BUPPER3,HOLE2,12,-200
*NFILL,NSET=BOTTOM5,BIAS=1.1
BRIGHT3,HOLE1,12,-200
*NGEN, NSET=TLEFT3
22436,22444,2
*NGEN, NSET=TUPPER3
22420,22436,2
*NGEN, NSET=TRIGHT3
22412,22420,2


```
*NFILL,NSET=TOP3,BIAS=1.1
TLEFT3,HOLE6,12,-200
*NFILL,NSET=TOP4,BIAS=1.1
TUPPER3,HOLE5,12,-200
*NFILL,NSET=TOP5,BIAS=1.1
TRIGHT3,HOLE4,12,-200
*NFILL,NSET=BT3
BOTTOM3, TOP3,2,10000
*NFILL,NSET=BT4
BOTTOM4, TOP4,2,10000
*NFILL,NSET=BT5
BOTTOM5, TOP5,2,10000
*ELEMENT,TYPE=C3D27,ELSET=UPPER3
1, 12,412,416,16,20012,20412,20416,20016,
212,414,216,14,20212,20414,20216,20014,10012,
10412,10416,10016,10214,214,20214,10212,10414,
10216,10014
*ELGEN,ELSET=UPPER3
1, 6,400,1,8,4,10
*SOLID SECTION, ELSET=UPPER3,MATERIAL=ALU3
*MATERIAL,NAME=ALU3
*ELASTIC
70.E3, 0.25
**
**
**RIVET UPPER
*NODE
5001,0.,0.,0.
15001,0.,0.,0.8
25001,0.,0.,1.6
```

```
35001,0.,0.,3.0
45001,0.,0.,4.4
*NODE,SYSTEM=C
5401,1.6325,0.,0.
5801,3.265,0.,0.
6201,4.5,0.,0.
5433,1.6325,180.,0.
5833,3.265,180.,0.
6233,4.5,180.,0.
25401,1.6325,0.,1.6
25801,3.265,0.,1.6
26201,4.5,0.,1.6
25433,1.6325,180.,1.6
25833,3.265,180.,1.6
26233,4.5,180.,1.6
45401,1.6325,0.,4.4
45801,3.265,0.,4.4
46201,4.5,0.,4.4
45433,1.6325,180.,4.4
45833,3.265,180.,4.4
46233,4.5,180.,4.4
*NSET,NSET=FACE1
25801,25805,45801,45805
*NGEN,LINE=C,NSET=BIN
5401,5433,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.
*NGEN,LINE=C,NSET=BMED
5801,5833,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.
*NGEN,LINE=C,NSET=BOUT
6201,6233,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.
*NGEN,LINE=C,NSET=TMEDIN
```

25401,25433,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TMEDMED

25801,25833,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TMEDOUT

26201,26233,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TIN

45401,45433,2,,0.,0.,4.4,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TMED

45801,45833,2,,0.,0.,4.4,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TOUT

46201,46233,2,,0.,0.,4.4,0.,0.,1.

*NFILL,NSET=BOTTOM11

BIN,BMED,2,200

*NFILL,NSET=TOP11

TMEDIN,TMEDMED,2,200

*NFILL,NSET=TOP12

TIN,TMED,2,200

*NFILL,NSET=BT11

BOTTOM11,TOP11,2,10000

*NFILL,NSET=BT12

TOP11,TOP12,2,10000

*NFILL,NSET=BOTTOM12

BMED,BOUT,2,200

*NFILL,NSET=TOP13

TMEDMED,TMEDOUT,2,200

*NFILL,NSET=TOP14

TMED,TOUT,2,200

*NFILL,NSET=BT13

BOTTOM12,TOP13,2,10000

*NFILL,NSET=BT14

TOP13, TOP14, 2, 10000

*ELEMENT, TYPE=C3D27, ELSET=RIVET

2011, 25801, 26201, 26205, 25805, 45801, 46201, 46205, 45805, 26001, 26203,
26005, 25803, 46001, 46203, 46005, 45803, 35801, 36201, 36205, 35805,
36003, 26003, 46003, 36001, 36203, 36005, 35803

*ELGEN, ELSET=RIVET

2011, 8, 4, 1

*ELEMENT, TYPE=C3D15V, ELSET=RIVET1

3011, 25805, 25001, 25801, 45805, 45001, 45801, 25405, 25401, 25803, 45405,
45401, 45803, 35805, 35001, 35801, 35405, 35401, 35803

3012, 25809, 25001, 25805, 45809, 45001, 45805, 25409, 25405, 25807, 45409,
45405, 45807, 35809, 35001, 35805, 35409, 35405, 35807

3013, 25813, 25001, 25809, 45813, 45001, 45809, 25413, 25409, 25811, 45413,
45409, 45811, 35813, 35001, 35809, 35413, 35409, 35811

3014, 25817, 25001, 25813, 45817, 45001, 45813, 25417, 25413, 25815, 45417,
45413, 45815, 35817, 35001, 35813, 35417, 35413, 35815

3015, 25821, 25001, 25817, 45821, 45001, 45817, 25421, 25417, 25819, 45421,
45417, 45819, 35821, 35001, 35817, 35421, 35417, 35819

3016, 25825, 25001, 25821, 45825, 45001, 45821, 25425, 25421, 25823, 45425,
45421, 45823, 35825, 35001, 35821, 35425, 35421, 35823

3017, 25829, 25001, 25825, 45829, 45001, 45825, 25429, 25425, 25827, 45429,
45425, 45827, 35829, 35001, 35825, 35429, 35425, 35827

3018, 25833, 25001, 25829, 45833, 45001, 45829, 25433, 25429, 25831, 45433,
45429, 45831, 35833, 35001, 35829, 35433, 35429, 35831

3001, 5805, 5001, 5801, 25805, 25001, 25801, 5405, 5401, 5803, 25405,
25401, 25803, 15805, 15001, 15801, 15405, 15401, 15803

3002, 5809, 5001, 5805, 25809, 25001, 25805, 5409, 5405, 5807, 25409,
25405, 25807, 15809, 15001, 15805, 15409, 15405, 15807

3003, 5813, 5001, 5809, 25813, 25001, 25809, 5413, 5409, 5811, 25413,
25409, 25811, 15813, 15001, 15809, 15413, 15409, 15811

3004, 5817,5001,5813,25817,25001,25813,5417,5413,5815,25417,
25413,25815,15817,15001,15813,15417,15413,15815

3005, 5821,5001,5817,25821,25001,25817,5421,5417,5819,25421,
25417,25819,15821,15001,15817,15421,15417,15819

3006, 5825,5001,5821,25825,25001,25821,5425,5421,5823,25425,
25421,25823,15825,15001,15821,15425,15421,15823

3007, 5829,5001,5825,25829,25001,25825,5429,5425,5827,25429,
25425,25827,15829,15001,15825,15429,15425,15827

3008, 5833,5001,5829,25833,25001,25829,5433,5429,5831,25433,
25429,25831,15833,15001,15829,15433,15429,15831

*SOLID SECTION, ELSET=RIVET,MATERIAL=ALU7

*MATERIAL,NAME=ALU7

*ELASTIC

70.E3, 0.25

*SOLID SECTION, ELSET=RIVET1,MATERIAL=ALU8

*MATERIAL,NAME=ALU8

*ELASTIC

70.E3, 0.25

**

**

**GRID

*NODE

50,-111.125,0.,-1.6

90,-85.725,0.,-1.6

94,-85.725,25.4,-1.6

54,-111.125,25.4,-1.6

40050,-111.125,0.,1.6

40090,-85.725,0.,1.6

40094,-85.725,25.4,1.6

40054,-111.125,25.4,1.6

```
*NGEN, NSET=GBLEFT1
50,54,2
*NGEN, NSET=GBRIGHT1
90,94,2
*NFILL, NSET=GRIDB1
GBLEFT1,GBRIGHT1,2,20
*NGEN, NSET=GTLEFT1
40050,40054,2
*NGEN, NSET=GTRIGHT1
40090,40094,2
*NFILL, NSET=GTOP1
GTLEFT1,GTRIGHT1,2,20
*NFILL, NSET=GBT1
GRIDB1,GTOP1,4,10000
*ELEMENT, TYPE=C3D27, ELSET=GRID1
10001, 50,90,94,54,20050,1,17,20054,70,92,
74,52,20070,9,20074,20052,10050,10090,10094,10054,
10072,72,20072,10070,10092,10074,10052
10002, 20050,1,17,20054,40050,20001,20017,40054,20070,9,
20074,20052,40070,20009,40074,40052,30050,10001,10017,30054,
30072,20072,40072,30070,10009,30074,30052
**SOLID SECTION, ELSET=GRID1, MATERIAL=ALU100
**MATERIAL, NAME=ALU100
**ELASTIC
70.E3, 0.25
**
**
**CONTACT DEFINITION
**SURFACE DEFINITION, NAME=SURFUP, TRIM=YES
101,S1
```

106,S1

111,S1

116,S1

121,S1

122,S1

123,S1

124,S1

125,S1

126,S1

131,S1

132,S1

133,S1

134,S1

135,S1

136,S1

UPPER3,S1

*SURFACE DEFINITION,NAME=SURFLO,TRIM=NO

1101,S2

1106,S2

1111,S2

1116,S2

1121,S2

1122,S2

1123,S2

1124,S2

1125,S2

1126,S2

1131,S2

1132,S2

1133,S2

1134,S2
1135,S2
1136,S2
LOWER3,S2
*CONTACT PAIR,INTERACTION=FRIC,SMALL SLIDING
SURFUP,SURFLO
*SURFACE INTERACTION,NAME=FRIC
*FRICTION
0.2
*STEP,INC=100,NLGEOM
*STATIC
0.001,1.0,0.0005,0.1
*CONTROLS,PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
,,,,,,24,
*BOUNDARY
217,2,,0.
417,2,,0.
617,2,,0.
817,2,,0.
1017,2,,0.
1217,2,,0.
1417,2,,0.
1617,2,,0.
1817,2,,0.
2017,2,,0.
2217,2,,0.
2417,2,,0.
2617,2,,0.
2817,2,,0.
3017,2,,0.

3217,2,,0.

3417,2,,0.

3617,2,,0.

3817,2,,0.

4017,2,,0.

4217,2,,0.

4417,2,,0.

4617,2,,0.

4817,2,,0.

50,ENCASTRE

52,ENCASTRE

54,ENCASTRE

10050,ENCASTRE

10052,ENCASTRE

10054,ENCASTRE

20050,ENCASTRE

20052,ENCASTRE

20054,ENCASTRE

30050,ENCASTRE

30052,ENCASTRE

30054,ENCASTRE

40050,ENCASTRE

40052,ENCASTRE

40054,ENCASTRE

101,2,3,,0.

103,2,3,,0.

105,2,3,,0.

107,2,3,,0.

109,2,3,,0.

111,2,3,,0.

113,2,3,,0.

115,2,3,,0.

117,2,3,,0.

10101,2,3,,0.

10103,2,3,,0.

10105,2,3,,0.

10107,2,3,,0.

10109,2,3,,0.

10111,2,3,,0.

10113,2,3,,0.

10115,2,3,,0.

10117,2,3,,0.

20101,2,3,,0.

20103,2,3,,0.

20105,2,3,,0.

20107,2,3,,0.

20109,2,3,,0.

20111,2,3,,0.

20113,2,3,,0.

20115,2,3,,0.

20117,2,3,,0.

30051,2,3,,0.

30053,2,3,,0.

30055,2,3,,0.

40051,2,3,,0.

40053,2,3,,0.

40055,2,3,,0.

*CLOAD

40051,1,27.7778

40053,1,27.7778

40055,1,27.7778

40071,1,27.7778

40073,1,27.7778

40075,1,27.7778

40091,1,27.7778

40093,1,27.7778

40095,1,27.7778

20101,1,27.7778

20109,1,27.7778

20117,1,27.7778

71,1,27.7778

73,1,27.7778

75,1,27.7778

91,1,27.7778

93,1,27.7778

95,1,27.7778

*RESTART,WRITE,FREQUENCY=100

*NODE PRINT

U

RF

*EL PRINT

S

*END STEP

ก.2 ตัวอย่างไฟล์ Input กรณีทากาว

*HEADING

**Test TENSION

**UPPER

*NODE

2417,-15.875,25.4,0.

2401,-15.875,0.,0.

17,-85.725,25.4,0.

1,-85.725,0.,0.

22417,-15.875,25.4,1.6

22401,-15.875,0.,1.6

20017,-85.725,25.4,1.6

20001,-85.725,0.,1.6

*NGEN, NSET=BLEFT1

1,17,2

*NGEN, NSET=BRIGHT1

2401,2417,2

*NFILL,NSET=BOTTOM1

BLEFT1,BRIGHT1,12,200

*NGEN, NSET=TLEFT1

20001,20017,2

*NGEN, NSET=TRIGHT1

22401,22417,2

*NFILL,NSET=TOP1

TLEFT1,TRIGHT1,12,200

*NFILL,NSET=BTI

BOTTOM1,TOP1,2,10000

*ELEMENT,TYPE=C3D27,ELSET=UPPER1

201, 1,401,405,5,20001,20401,20405,20005,

201,403,205,3,20201,20403,20205,20003,10001,

10401,10405,10005,10203,203,20203,10201,10403,
10205,10003
*ELGEN,ELSET=UPPER1
201, 6,400,1,4,4,10
*SOLID SECTION, ELSET=UPPER1,MATERIAL=ALU1
*MATERIAL,NAME=ALU1
*ELASTIC
70.E3, 0.25
*NODE
2417,-15.875,25.4,0.
2401,-15.875,0.,0.
4817,15.875,25.4,0.
4801,15.875,0.,0.
22417,-15.875,25.4,1.6
22401,-15.875,0.,1.6
24817,15.875,25.4,1.6
24801,15.875,0.,1.6
*NGEN, NSET=BLEFT2
2401,2417,2
*NGEN, NSET=BRIGHT2
4801,4817,2
*NFILL,NSET=BOTTOM2
BLEFT2,BRIGHT2,12,200
*NGEN, NSET=TLEFT2
22401,22417,2
*NGEN, NSET=TRIGHT2
24801,24817,2
*NFILL,NSET=TOP2
TLEFT2,TRIGHT2,12,200
*NFILL,NSET=BT2

BOTTOM2, TOP2, 2, 10000

*ELEMENT, TYPE=C3D27, ELSET=UPPER2

101, 2401, 2444, 2440, 2405, 22401, 22444, 22440, 22405,
2601, 2442, 2605, 2403, 22601, 22442, 22605, 22403, 12401,
12444, 12440, 12405, 12603, 2603, 22603, 12601, 12442,
12605, 12403

111, 2405, 2440, 2436, 2409, 22405, 22440, 22436, 22409, 2605, 2438,
2609, 2407, 22605, 22438, 22609, 22407, 12405, 12440, 12436, 12409,
12607, 2607, 22607, 12605, 12438, 12609, 12407

121, 2409, 2436, 2813, 2413, 22409, 22436, 22813, 22413, 2609, 2811,
2613, 2411, 22609, 22811, 22613, 22411, 12409, 12436, 12813, 12413,
12611, 2611, 22611, 12609, 12811, 12613, 12411

122, 2436, 2432, 3213, 2813, 22436, 22432, 23213, 22813, 2434, 3211,
3013, 2811, 22434, 23211, 23013, 22811, 12436, 12432, 13213, 12813,
13011, 3011, 23011, 12434, 13211, 13013, 12811

123, 2432, 2428, 3613, 3213, 22432, 22428, 23613, 23213, 2430, 3611,
3413, 3211, 22430, 23611, 23413, 23211, 12432, 12428, 13613, 13213,
13411, 3411, 23411, 12430, 13611, 13413, 13211

124, 2428, 2424, 4013, 3613, 22428, 22424, 24013, 23613, 2426, 4011,
3813, 3611, 22426, 24011, 23813, 23611, 12428, 12424, 14013, 13613,
13811, 3811, 23811, 12426, 14011, 13813, 13611

125, 2424, 2420, 4413, 4013, 22424, 22420, 24413, 24013, 2422, 4411,
4213, 4011, 22422, 24411, 24213, 24011, 12424, 12420, 14413, 14013,
14211, 4211, 24211, 12422, 14411, 14213, 14011

126, 2420, 4809, 4813, 4413, 22420, 24809, 24813, 24413, 4609, 4811,
4613, 4411, 24609, 24811, 24613, 24411, 12420, 14809, 14813, 14413,
14611, 4611, 24611, 14609, 14811, 14613, 14411

116, 2416, 4805, 4809, 2420, 22416, 24805, 24809, 22420, 4605, 4807,
4609, 2418, 24605, 24807, 24609, 22418, 12416, 14805, 14809, 12420,
14607, 4607, 24607, 14605, 14807, 14609, 12418

106, 2412,4801,4805,2416,22412,24801,24805,22416,4601,4803,
4605,2414,24601,24803,24605,22414,12412,14801,14805,12416,
14603,4603,24603,14601,14803,14605,12414

131, 2413,2813,2817,2417,22413,22813,22817,22417,2613,2815,
2617,2415,22613,22815,22617,22415,12413,12813,12817,12417,
12615,2615,22615,12613,12815,12617,12415

*ELGEN,ELSET=UPPER2

131, 6,400,1

*SOLID SECTION, ELSET=UPPER2,MATERIAL=ALU2

*MATERIAL,NAME=ALU2

*ELASTIC

70.E3, 0.25

*NODE

2436,-10.583,12.7,0.

2444,-10.583,0.,0.

2420,10.583,12.7,0.

2412,10.583,0.,0.

22436,-10.583,12.7,1.6

22444,-10.583,0.,1.6

22420,10.583,12.7,1.6

22412,10.583,0.,1.6

*NODE,SYSTEM=C

12,3.265,0.,0.

20,3.265,45.,0.

36,3.265,135.,0.

44,3.265,180.,0.

20012,3.265,0.,1.6

20020,3.265,45.,1.6

20036,3.265,135.,1.6

20044,3.265,180.,1.6

*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE1

12,20,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE2

20,36,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE3

36,44,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE4

20012,20020,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE5

20020,20036,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=HOLE6

20036,20044,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN, NSET=BLEFT3

2436,2444,2

*NGEN, NSET=BUPPER3

2420,2436,2

*NGEN, NSET=BRIGHT3

2412,2420,2

*NFILL,NSET=BOTTOM3,BIAS=1.1

BLEFT3,HOLE3,12,-200

*NFILL,NSET=BOTTOM4,BIAS=1.1

BUPPER3,HOLE2,12,-200

*NFILL,NSET=BOTTOM5,BIAS=1.1

BRIGHT3,HOLE1,12,-200

*NGEN, NSET=TLEFT3

22436,22444,2

*NGEN, NSET=TUPPER3

22420,22436,2

*NGEN, NSET=TRIGHT3

22412,22420,2


```
*NFILL,NSET=TOP3,BIAS=1.1
TLEFT3,HOLE6,12,-200
*NFILL,NSET=TOP4,BIAS=1.1
TUPPER3,HOLE5,12,-200
*NFILL,NSET=TOP5,BIAS=1.1
TRIGHT3,HOLE4,12,-200
*NFILL,NSET=BT3
BOTTOM3,TOP3,2,10000
*NFILL,NSET=BT4
BOTTOM4,TOP4,2,10000
*NFILL,NSET=BT5
BOTTOM5,TOP5,2,10000
*ELEMENT,TYPE=C3D27,ELSET=UPPER3
1, 12,412,416,16,20012,20412,20416,20016,
212,414,216,14,20212,20414,20216,20014,10012,
10412,10416,10016,10214,214,20214,10212,10414,
10216,10014
*ELGEN,ELSET=UPPER3
1, 6,400,1,8,4,10
*SOLID SECTION, ELSET=UPPER3,MATERIAL=ALU3
*MATERIAL,NAME=ALU3
*ELASTIC
70.E3, 0.25
**
**
**RIVET UPPER
*NODE
5001,0.,0.,0.
15001,0.,0.,0.8
25001,0.,0.,1.6
```

35001,0.,0.,3.0

45001,0.,0.,4.4

*NODE,SYSTEM=C

5401,1.6325,0.,0.

5801,3.265,0.,0.

6201,4.5,0.,0.

5433,1.6325,180.,0.

5833,3.265,180.,0.

6233,4.5,180.,0.

25401,1.6325,0.,1.6

25801,3.265,0.,1.6

26201,4.5,0.,1.6

25433,1.6325,180.,1.6

25833,3.265,180.,1.6

26233,4.5,180.,1.6

45401,1.6325,0.,4.4

45801,3.265,0.,4.4

46201,4.5,0.,4.4

45433,1.6325,180.,4.4

45833,3.265,180.,4.4

46233,4.5,180.,4.4

*NSET,NSET=FACE1

25801,25805,45801,45805

*NGEN,LINE=C,NSET=BIN

5401,5433,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=BMED

5801,5833,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=BOU

6201,6233,2,,0.,0.,0.,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TMEDIN

25401,25433,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TMEDMED

25801,25833,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TMEDOUT

26201,26233,2,,0.,0.,1.6,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TIN

45401,45433,2,,0.,0.,4.4,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TMED

45801,45833,2,,0.,0.,4.4,0.,0.,1.

*NGEN,LINE=C,NSET=TOUT

46201,46233,2,,0.,0.,4.4,0.,0.,1.

*NFILL,NSET=BOTTOM11

BIN,BMED,2,200

*NFILL,NSET=TOP11

TMEDIN,TMEDMED,2,200

*NFILL,NSET=TOP12

TIN,TMED,2,200

*NFILL,NSET=BT11

BOTTOM11,TOP11,2,10000

*NFILL,NSET=BT12

TOP11,TOP12,2,10000

*NFILL,NSET=BOTTOM12

BMED,BOUT,2,200

*NFILL,NSET=TOP13

TMEDMED,TMEDOUT,2,200

*NFILL,NSET=TOP14

TMED,TOUT,2,200

*NFILL,NSET=BT13

BOTTOM12,TOP13,2,10000

*NFILL,NSET=BT14

TOP13, TOP14, 2, 10000

*ELEMENT, TYPE=C3D27, ELSET=RIVET

2011, 25801, 26201, 26205, 25805, 45801, 46201, 46205, 45805, 26001, 26203,
26005, 25803, 46001, 46203, 46005, 45803, 35801, 36201, 36205, 35805,
36003, 26003, 46003, 36001, 36203, 36005, 35803

*ELGEN, ELSET=RIVET

2011, 8, 4, 1

*ELEMENT, TYPE=C3D15V, ELSET=RIVET1

3011, 25805, 25001, 25801, 45805, 45001, 45801, 25405, 25401, 25803, 45405,
45401, 45803, 35805, 35001, 35801, 35405, 35401, 35803

3012, 25809, 25001, 25805, 45809, 45001, 45805, 25409, 25405, 25807, 45409,
45405, 45807, 35809, 35001, 35805, 35409, 35405, 35807

3013, 25813, 25001, 25809, 45813, 45001, 45809, 25413, 25409, 25811, 45413,
45409, 45811, 35813, 35001, 35809, 35413, 35409, 35811

3014, 25817, 25001, 25813, 45817, 45001, 45813, 25417, 25413, 25815, 45417,
45413, 45815, 35817, 35001, 35813, 35417, 35413, 35815

3015, 25821, 25001, 25817, 45821, 45001, 45817, 25421, 25417, 25819, 45421,
45417, 45819, 35821, 35001, 35817, 35421, 35417, 35819

3016, 25825, 25001, 25821, 45825, 45001, 45821, 25425, 25421, 25823, 45425,
45421, 45823, 35825, 35001, 35821, 35425, 35421, 35823

3017, 25829, 25001, 25825, 45829, 45001, 45825, 25429, 25425, 25827, 45429,
45425, 45827, 35829, 35001, 35825, 35429, 35425, 35827

3018, 25833, 25001, 25829, 45833, 45001, 45829, 25433, 25429, 25831, 45433,
45429, 45831, 35833, 35001, 35829, 35433, 35429, 35831

3001, 5805, 5001, 5801, 25805, 25001, 25801, 5405, 5401, 5803, 25405,
25401, 25803, 15805, 15001, 15801, 15405, 15401, 15803

3002, 5809, 5001, 5805, 25809, 25001, 25805, 5409, 5405, 5807, 25409,
25405, 25807, 15809, 15001, 15805, 15409, 15405, 15807

3003, 5813, 5001, 5809, 25813, 25001, 25809, 5413, 5409, 5811, 25413,
25409, 25811, 15813, 15001, 15809, 15413, 15409, 15811

3004, 5817,5001,5813,25817,25001,25813,5417,5413,5815,25417,
25413,25815,15817,15001,15813,15417,15413,15815
3005, 5821,5001,5817,25821,25001,25817,5421,5417,5819,25421,
25417,25819,15821,15001,15817,15421,15417,15819
3006, 5825,5001,5821,25825,25001,25821,5425,5421,5823,25425,
25421,25823,15825,15001,15821,15425,15421,15823
3007, 5829,5001,5825,25829,25001,25825,5429,5425,5827,25429,
25425,25827,15829,15001,15825,15429,15425,15827
3008, 5833,5001,5829,25833,25001,25829,5433,5429,5831,25433,
25429,25831,15833,15001,15829,15433,15429,15831
*SOLID SECTION, ELSET=RIVET,MATERIAL=ALU7
*MATERIAL,NAME=ALU7
*ELASTIC
70.E3, 0.25
*SOLID SECTION, ELSET=RIVET1,MATERIAL=ALU8
*MATERIAL,NAME=ALU8
*ELASTIC
70.E3, 0.25
**
**
**GRID
*NODE
50,-111.125,0.,-1.6
90,-85.725,0.,-1.6
94,-85.725,25.4,-1.6
54,-111.125,25.4,-1.6
40050,-111.125,0.,1.6
40090,-85.725,0.,1.6
40094,-85.725,25.4,1.6
40054,-111.125,25.4,1.6

```
*NGEN, NSET=GBLEFT1
50,54,2
*NGEN, NSET=GBRIGHT1
90,94,2
*NFILL, NSET=GRIDB1
GBLEFT1,GBRIGHT1,2,20
*NGEN, NSET=GTLEFT1
40050,40054,2
*NGEN, NSET=GTRIGHT1
40090,40094,2
*NFILL, NSET=GTOP1
GTLEFT1,GTRIGHT1,2,20
*NFILL, NSET=GBT1
GRIDB1,GTOP1,4,10000
*ELEMENT, TYPE=C3D27, ELSET=GRID1
10001, 50,90,94,54,20050,1,17,20054,70,92,
74,52,20070,9,20074,20052,10050,10090,10094,10054,
10072,72,20072,10070,10092,10074,10052
10002, 20050,1,17,20054,40050,20001,20017,40054,20070,9,
20074,20052,40070,20009,40074,40052,30050,10001,10017,30054,
30072,20072,40072,30070,10009,30074,30052
*SOLID SECTION, ELSET=GRID1, MATERIAL=ALU100
*MATERIAL, NAME=ALU100
*ELASTIC
70.E3, 0.25
**
**
**SPRING ELEMENT
*ELEMENT, TYPE=SPRING2, ELSET=SPR1
1000001,12,112
```

*SPRING,ELSET=SPR1

1,1

10.34227

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR2

1000002,12,112

*SPRING,ELSET=SPR2

2,2

10.34227

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR3

1000003,12,112

*SPRING,ELSET=SPR3

3,3

25.507994

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR4

1000004,212,312

*SPRING,ELSET=SPR4

1,1

25.80875

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR5

1000005,212,312

*SPRING,ELSET=SPR5

2,2

25.80875

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR6

1000006,212,312

*SPRING,ELSET=SPR6

3,3

63.65425

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR7

1000007,412,512

*SPRING,ELSET=SPR7

1,1

33.24167

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR8

1000008,412,512

*SPRING,ELSET=SPR8

2,2

33.24167

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR9

1000009,412,512

*SPRING,ELSET=SPR9

3,3

81.986674

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR10

1000010,612,712

*SPRING,ELSET=SPR10

1,1

42.43897

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR11

1000011,612,712

*SPRING,ELSET=SPR11

2,2

42.43897

*ELEMENT,TYPE=SPRING2,ELSET=SPR12

1000012,612,712

*SPRING,ELSET=SPR12

3,3

104.670734

**

**

****CONTACT DEFINITION*****SURFACE DEFINITION,NAME=SURFUP,TRIM=YES**

101,S1

106,S1

111,S1

116,S1

121,S1

122,S1

123,S1

124,S1

125,S1

126,S1

131,S1

132,S1

133,S1

134,S1

135,S1

136,S1

UPPER3,S1

***SURFACE DEFINITION,NAME=SURFLO,TRIM=NO**

1101,S2

1106,S2

1111,S2

1116,S2

1121,S2

1122,S2

1123,S2

1124,S2

1125,S2

1126,S2

1131,S2
1132,S2
1133,S2
1134,S2
1135,S2
1136,S2
LOWER3,S2
*CONTACT PAIR,INTERACTION=FRIC,SMALL SLIDING
SURFUP,SURFLO
*SURFACE INTERACTION,NAME=FRIC
*FRICTION
0.2
*STEP,INC=100,NLGEOM
*STATIC
0.001,1.0,0.0005,0.1
*CONTROLS,PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
,,,,,,24,
*BOUNDARY
217,2,,0.
417,2,,0.
617,2,,0.
817,2,,0.
1017,2,,0.
1217,2,,0.
1417,2,,0.
1617,2,,0.
1817,2,,0.
2017,2,,0.
2217,2,,0.
2417,2,,0.

2617,2,,0.

2817,2,,0.

3017,2,,0.

3217,2,,0.

3417,2,,0.

3617,2,,0.

3817,2,,0.

4017,2,,0.

4217,2,,0.

4417,2,,0.

4617,2,,0.

4817,2,,0.

50,ENCASTRE

52,ENCASTRE

54,ENCASTRE

10050,ENCASTRE

10052,ENCASTRE

10054,ENCASTRE

20050,ENCASTRE

20052,ENCASTRE

20054,ENCASTRE

30050,ENCASTRE

30052,ENCASTRE

30054,ENCASTRE

40050,ENCASTRE

40052,ENCASTRE

40054,ENCASTRE

101,2,3,,0.

103,2,3,,0.

105,2,3,,0.

107,2,3,,0.
109,2,3,,0.
111,2,3,,0.
113,2,3,,0.
115,2,3,,0.
117,2,3,,0.
10101,2,3,,0.
10103,2,3,,0.
10105,2,3,,0.
10107,2,3,,0.
10109,2,3,,0.
10111,2,3,,0.
10113,2,3,,0.
10115,2,3,,0.
10117,2,3,,0.
20101,2,3,,0.
20103,2,3,,0.
20105,2,3,,0.
20107,2,3,,0.
20109,2,3,,0.
20111,2,3,,0.
20113,2,3,,0.
20115,2,3,,0.
20117,2,3,,0.
30051,2,3,,0.
30053,2,3,,0.
30055,2,3,,0.
40051,2,3,,0.
40053,2,3,,0.
40055,2,3,,0.

*CLOAD

40051,1,27.7778

40053,1,27.7778

40055,1,27.7778

40071,1,27.7778

40073,1,27.7778

40075,1,27.7778

40091,1,27.7778

40093,1,27.7778

40095,1,27.7778

20101,1,27.7778

20109,1,27.7778

20117,1,27.7778

71,1,27.7778

73,1,27.7778

75,1,27.7778

91,1,27.7778

93,1,27.7778

95,1,27.7778

*RESTART,WRITE,FREQUENCY=100

*NODE PRINT

U

RF

*EL PRINT

S

*END STEP

ภาคผนวก ข.
Elastic Constants

TABLE 4.2 ELASTIC CONSTANTS FOR VARIOUS MATERIALS AT AMBIENT TEMPERATURE

Material	Elastic Modulus		Poisson's Ratio
	E, GPa	(10 ³ ksi)	ν
(a) Metals			
Aluminum	70.3	(10.2)	0.345
Brass, 70Cu-30Zn	101	(14.6)	0.350
Copper	130	(18.8)	0.343
Iron; mild steel	212	(30.7)	0.293
Lead	16.1	(2.34)	0.44
Magnesium	44.7	(6.48)	0.291
Stainless steel, 2Ni-18Cr	215	(31.2)	0.283
Steel, hard 0.75C	201	(29.2)	0.296
Titanium	120	(17.4)	0.361
Tungsten	411	(59.6)	0.280
(b) Polymers			
ABS plastic	2.5	(0.36)	-
Epoxy	3.5	(0.51)	0.33
High impact polystyrene	1.65	(0.24)	0.34
Nylon 6	2.6	(0.38)	-
Nylon 6 with 33% glass fibers	9.3	(1.35)	-
PEEK	4.0	(0.58)	0.37
Unsaturated polyester	3.45	(0.50)	-
(c) Ceramics and glasses			
Alumina, Al ₂ O ₃	400	(58.0)	0.22
Magnesia, MgO	300	(43.5)	0.18
Silicon carbide, SiC	396	(57.4)	0.22
Fused silica glass	70	(10.2)	0.18
Soda-lime glass	69	(10.0)	0.20
Type E glass	72.4	(10.5)	0.22

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายจักร์ชัย สุวรรณเนา

รหัสประจำตัวนักศึกษา 4512010

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)	มหาวิทยาลัยแม่โจ้	2543

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

1. ทุนยกเว้นค่าหน่วยกิต จากคณะวิศวกรรมศาสตร์
2. ทุนผู้ช่วยสอน จากคณะวิศวกรรมศาสตร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

จักร์ชัย สุวรรณเนา, เจริญยุทธ เดชวายุกุล, วิริยะ ทองเรือง และ ธงชัย ฟองสมุทร. “ผลกระทบของระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุด ย้ำ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 3, 8-9 ธันวาคม 2547, สงขลา, ประเทศไทย.

จักร์ชัย สุวรรณเนา, เจริญยุทธ เดชวายุกุล, วิริยะ ทองเรือง และ ธงชัย ฟองสมุทร. “ผลกระทบของชั้นกาวบาง และระยะห่างระหว่างหมุดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของความเค้นของรอยต่อหมุดย้ำ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548, ภูเก็ต, ประเทศไทย.