



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล	วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา	ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิในบริเวณสนามความเค้นเชิงกลาริตี
รอบจุดมุมรอยต่อในวัสดุต่างชนิดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Analysis of Thermal Residual Stress Singularity Field in Dissimilar Material Joint using
3D-FEM

نامผู้วิจัย นายชัยพล ทรงสิทธิโชค

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์อรรถพร วิเศษสินธุ์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงษ์ศรี พรหมบุตร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มทาวิตยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิในบริเวณสนามความเค้นซิงกูลาริตีที่รอบจุดมุม
รอยต่อในวัสดุต่างชนิดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Analysis of Thermal Residual Stress Singularity Field in Dissimilar Material Joint using 3D-FEM

โดย

นายชัยพล ทรงสิทธิโชค

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2557

ชัยพล ทรงสิทธิโชค 2557: การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิในบริเวณ
สนามความเค้นเชิงกลาริที่รอบจุดมรอยต่อในวัสดุต่างชนิดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ
3 มิติ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์อรรถพร วิเศษสินธุ์,
D.Eng. 77 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากความเค้นตกค้างจากอุณหภูมิและ
อิทธิพลของความหนาของชั้นวัสดุประสานบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่าง
กันมาก โดยคุณสมบัติเชิงกลที่กล่าวถึงนี้ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง, ค่าอัตราส่วน
ของปัวส์ซงและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ซึ่งบริเวณรอยต่อของวัสดุที่มีคุณสมบัติ
เชิงกลแตกต่างกันนี้เมื่อถูกนำไปรับภาระทางอุณหภูมิและภาระทางกลจะทำให้เกิดความเค้นเชิงกลา
ริที่สูงและเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายได้

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน
และจัดเรียงตัวในรูปแบบแซนด์วิช (Sandwich model) โดยใช้การคำนวณโดยระเบียบวิธีทางไฟ
ไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองขึ้นในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แล้วกำหนดภาระ
ทางอุณหภูมิและแรงดิ่งลงในแบบจำลองและทำการคำนวณโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์
จากนั้นทำการเก็บผลความเค้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพื่อนำมาวิเคราะห์โอกาสเสี่ยงต่อการ
เกิดความเสียหายโดยใช้ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริที่เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์

จากการศึกษาพบว่าภาระทางอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเค้นบริเวณรอยต่อ
ระหว่างวัสดุมีค่าสูง และจากการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณพบว่าความหนาของชั้น
วัสดุประสานมีผลต่อปริมาณความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุโดยความหนาของชั้นวัสดุ
ประสานที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 มิลลิเมตร

Chaiyapol Songsithichoke 2014: Analysis of Thermal Residual Stress Singularity Field in Dissimilar Material Joint using 3D-FEM. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Attaporn Wisessint, D.Eng. 77 pages.

The purpose of this research is to determine and analyze the effects of thermal residual stress and the impact from interlayer thickness of three bonded dissimilar materials. These materials differ greatly in Young's modulus coefficients, Poisson's ratio and thermal expansion coefficient. Because of the dissimilar properties of these materials, when exposed to thermal and mechanical load might cause damaged due to high level of stress (Stress Singularity Field).

In this study, the characteristic of stress singularity field around the interface of bonded dissimilar materials is determined by using 3D finite element method. To conduct, first is to create a finite element model that consists of three different materials. Second step is to assign the thermal and mechanical load to the model. Next is to determine the stress that occurs on the edge of interfacing materials by using finite element program. Finally, the intensity of stress value is estimated to analyze the risk assessment of interface fracture.

Ultimately, this paper proves that thermal loading is the main cause of the increasing of stress that occurs between dissimilar material joints. Moreover, the interlayer thickness is also affect the level of stress at the interface of bonded dissimilar material joints. The appropriate thickness of interlayer is between 1 to 2 millimeters.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. อรรถพร วิเศษสินธุ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ และ ผศ. ดร. พงศ์ธร พรหมบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ให้
คำปรึกษาและแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอดตั้งแต่เริ่มโครงการจนถึงงานวิจัยเสร็จ
สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์และบุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือการทำวิจัยชิ้นนี้ในด้านต่างๆ และขอขอบคุณ
เพื่อนและพี่น้องร่วมห้องปฏิบัติการทำวิจัยทุกคนที่คอยแนะนำและให้กำลังใจกันตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อทรงพล ทรงสิทธิโชค และคุณแม่รัศมี ทรงสิทธิโชคที่ได้อยู่
เคียงข้างคอยแนะนำและอบรมสั่งสอนในทุกๆเรื่อง รวมทั้งให้การสนับสนุนการศึกษาในทุกๆด้าน
ตลอดเวลาที่ผ่านมา

ชัยพล ทรงสิทธิโชค

มิถุนายน 2557

สารบัญ

หน้า

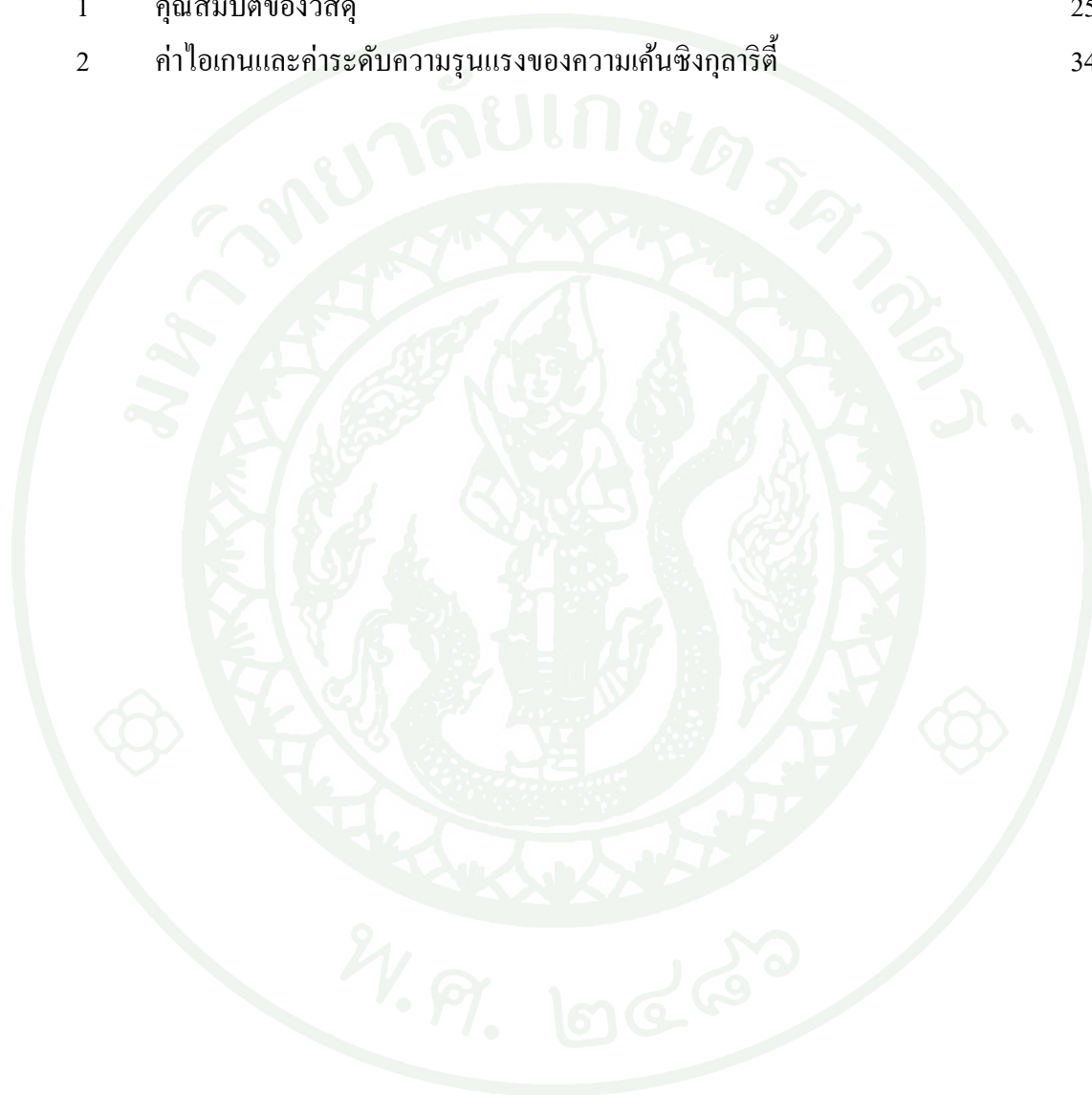
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	36
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	77

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

- | | | |
|---|---|----|
| 1 | คุณสมบัติของวัสดุ | 25 |
| 2 | ค่าไอเกนและค่าระดับความรุนแรงของความเค้นเชิงกลาริตี | 34 |



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 นิยามของความเค้นดึง	7
2 นิยามของความเค้นอัด	7
3 นิยามของความเค้นเฉือน	8
4 แสดงองค์ประกอบของความเค้น	9
5 แสดงองค์ประกอบของความเค้นในพิกัด xy และ $x'y'$	10
6 นิยามความเครียด	11
7 แสดงองค์ประกอบของความเครียด	11
8 นิยามอัตราส่วนปัวส์ซอง	13
9 แสดงความเค้นเชิงกลารัต	14
10 เอลิเมนต์ชนิดทรงหกหน้าชนิดกำลังหนึ่ง	18
11 แสดงความเครียดในทิศตั้งฉาก	20
12 แสดงความเครียดเฉือน	20
13 แสดงขนาดชิ้นงานจริงและขนาด 1 ใน 4 ส่วนของชิ้นงานจริง	22
14 แบบจำลองที่สร้างขึ้นในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	23
15 ระบบพิกัดทรงกลม (r, θ, ϕ)	24
16 แสดงเอลิเมนต์ตามแนวพิกัดทรงกลมจากจุดมูรอยต่อ (Singular Point)	24
17 แสดงค่าความยืดหยุ่นของยังที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของวัสดุเรซิน	26
18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของวัสดุเรซิน	26
19 ปัญหาค่าขอบเขตของแบบจำลอง	28
20 ภาระทางอุณหภูมิ	28
21 ภาระทางกล	29
22 แสดงค่าขอบเขตของแบบจำลองในการทดสอบเรซิน	30
23 ภาระทางอุณหภูมิที่รอบการคำนวณต่างๆ	30
24 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามรอบการคำนวณต่างๆ	31

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	แสดงความสัมพันธ์ของแกน x และ y ที่ใช้ในการเก็บผลการคำนวณ	32
26	แสดงกราฟการหาจำนวนอิเล็กตรอนที่เหมาะสม	37
27	ผลความเค้นของกรณีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนคงที่และไม่คงที่ตามรอบการคำนวณต่างๆ	38
28	แสดงการเปรียบเทียบผลความเค้นเมื่อมีภาระทางอุณหภูมิเพิ่มเข้ามา	39
29	การเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ของศาสตราจารย์โคะกุจิที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	40
30	การเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ของศาสตราจารย์โคะกุจิที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	41
31	ผลความเค้นกรณีภาระแรงดึงที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	42
32	ผลความเค้นกรณีภาระแรงดึงที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	43
33	ผลความเค้นกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	44
34	ผลความเค้นกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	45
35	ผลความเค้นกรณีภาระแรงดึงที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	46
36	ผลความเค้นกรณีภาระแรงดึงที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	47
37	ผลความเค้นกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	48
38	ผลความเค้นกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	48
39	ผลความเค้นตามแนวองศา ϕ ที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	49
40	ผลความเค้นตามแนวองศา ϕ ที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	50
41	ผลความเค้นตามองศา ϕ ที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	51
42	ผลความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	51
43	แสดงพิกัดมุม θ (ก) รอยต่อระหว่าง Resin – FR4.5 และ (ข) รอยต่อระหว่าง Silicon – Resin	52
44	ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของซิลิคอน	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
45 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของเรซิน	53
46 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของเรซิน	54
47 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของ FR4.5	54
48 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของซิลิคอน	55
49 ผลความเค้นที่รอยต่อซิลิคอนกับเรซินตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของเรซิน	56
50 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของเรซิน	56
51 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของ FR4.5	57
52 แสดงแบบจำลองแบบลามินารอยต่อ	58
53 แสดงผลความเค้นจากแบบจำลองลามินารอยต่อ	58
54 แสดงการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	60
55 แสดงการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	60
56 แนวโน้มค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	61
57 แนวโน้มค่าความเข้มของความเค้นซิลกลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	61
58 ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีของ 2 รอยต่อ	62
59 แสดงการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
60	แสดงการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	63
61	แนวโน้มค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	64
62	แนวโน้มค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	64
63	ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีของ 2 รอยต่อ	65
64	ความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	66
65	ความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	67
66	ความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน	68
67	ความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5	68
68	ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีตามองศา θ ต่างๆในกรณีภาระแรงดึง	69
69	ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีตามองศา θ ต่างๆในกรณีภาระอุณหภูมิแรงดึง	70

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

σ	= ความเค้น
σ_{xx}	= ความเค้นในทิศทางแกน x
σ_{yy}	= ความเค้นในทิศทางแกน y
$\sigma_{\theta\theta}$	= ความเค้นในทิศทาง θ
τ_{xy}	= ความเค้นเฉือนในระนาบแกน xy
ε	= ความเครียด
E	= ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง
ν	= ค่าอัตราส่วนปัวซอง
α	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
$K_{\theta\theta}$	= ค่าความเข้มของความเค้นในทิศทาง θ
λ	= ค่าระดับความรุนแรงของซิงกูลาริตี
θ	= มุมในระนาบ xy
ϕ	= มุมที่กระทำระหว่างระนาบ xy กับ แกน z
r	= รัศมีจากจุดมูรอยต่อระหว่างวัสดุ
L	= ความกว้างของแบบจำลอง
t	= ความหนาของชั้นวัสดุประสาน

การวิเคราะห์ความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิในบริเวณสนามความเค้นเชิงกลารัตริรอบ จุดมูรอยต่อในวัสดุต่างชนิดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Analysis of Thermal Residual Stress Singularity Field in Dissimilar Material Joint using 3D-FEM

คำนำ

เครื่องมือเครื่องใช้และอุปกรณ์รวมถึงโครงสร้างต่างๆในยุคสมัยปัจจุบันนี้จะเห็นได้ว่ามักประกอบด้วยวัสดุมากกว่าหนึ่งชนิดมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งประโยชน์ของการนำวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันมาประกอบกันก็คือการเพิ่มความสามารถหรือคุณสมบัติทางกลให้แก่อุปกรณ์หรือชิ้นงานนั้นๆ ยกตัวอย่างเช่น โครงสร้างของอาคารในประเทศที่อยู่ในเขตแผ่นดินไหว ตัวโครงสร้างของอาคารจะประกอบด้วยชิ้นของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงต่อเข้ากับวัสดุโครงสร้างหลักของอาคารที่มีความแข็งแรงมาก เพื่อให้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงช่วยรับแรงสั่นสะเทือนเมื่อเกิดแผ่นดินไหวทำให้โครงสร้างของอาคารสามารถทนต่อแรงสั่นสะเทือนได้ดีขึ้นผู้ที่อาศัยอยู่ในอาคารปลอดภัยมากขึ้น หรืออีกหนึ่งตัวอย่าง ได้แก่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆซึ่งภายในอุปกรณ์เหล่านี้จะประกอบด้วยชิปประมวลผลยึดติดอยู่กับแผงวงจร เพื่อทำให้เกิดการส่งผ่านข้อมูลหรือสัญญาณดิจิทัลระหว่างส่วนต่างๆของอุปกรณ์ เป็นต้น

การเชื่อมต่อกันระหว่างวัสดุต่างชนิดที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันจะทำให้เกิดความเค้นขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ ซึ่งปริมาณความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุบริเวณรอยต่อนั้น ยกตัวอย่างเช่นเมื่อเรานำวัสดุที่มีความแข็งแรงมากมาเชื่อมต่อกับวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยแล้วนำชิ้นงานนี้ไปรับภาระทางกลจะทำให้บริเวณรอยต่อของวัสดุเกิดความเค้นสูงขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องทำการศึกษาปัญหาความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดเพื่อหาวิธีการในการเพิ่มความแข็งแรงและป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์หรือชิ้นงานต่างๆ และจะเห็นได้ว่าในกระบวนการสร้างชิ้นงานต่างๆการที่จะเชื่อมต่อวัสดุเข้าด้วยกันนั้นจะต้องมีวัสดุอีกชนิดหนึ่งคือวัสดุประสานทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุ ซึ่งในกระบวนการเชื่อมมักต้องใช้ความร้อนสูงเพื่อหลอมละลายวัสดุประสานและเมื่อกระบวนการเชื่อมเสร็จสมบูรณ์ชิ้นงานจะถูกทำ

ให้เห็นตัวลง ด้วยเหตุนี้บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุจึงมีความเค้นตกค้างจากภาระทางอุณหภูมิเกิดขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัสดุลดลง

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณปัญหาทางวิศวกรรมที่ได้รับความนิยมและความเชื่อถือในปัจจุบัน เนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถใช้คำนวณความแข็งแรงและพฤติกรรมของปัญหาที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ดีรวมทั้งสามารถช่วยประหยัดเวลาและทรัพยากรณ์ในการสร้างชิ้นงานต้นแบบมาทดสอบ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการแบ่งรูปทรงของชิ้นงานออกเป็นชิ้นประกอบย่อยจำนวนหลายชิ้นประกอบเข้าด้วยกันและทำการคำนวณเชื่อมต่อกันไปเรื่อยๆจนได้ผลคำตอบ สิ่งที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คือแบบจำลองพฤติกรรมของชิ้นงานในขณะที่ใช้งานจริงซึ่งช่วยให้เข้าใจลักษณะของปัญหาได้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้เลือกวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ เพื่อวิเคราะห์ปัญหารอยต่อระหว่างวัสดุที่รับภาระทางอุณหภูมิและแรงดึง โดยทำการศึกษาในวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างมาก คุณสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาในที่นี้ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง (Young's Modulus), ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) โดยมุ่งประเด็นการศึกษาไปที่ความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุและความเป็นไปได้ต่อการเกิดความเสียหายของชิ้นงาน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประยุกต์ใช้เอลิเมนต์แบบ 3 มิติตามแนวพิกัดทรงกลม (Spherical Polar Coordinate) รอบจุดซิงกูลา (Singular Point) ในการศึกษาผลกระทบของค่าความเค้นตกค้างเนื่องจากภาระทางอุณหภูมิบริเวณสนามความเค้นซิงกูลาริตี้ ณ จุดมุมรอยต่อระหว่างวัสดุ
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โอกาสและแนวโน้มของทิศทางในการเกิดความเสียหายของรอยต่อระหว่างวัสดุที่รับภาระทางอุณหภูมิและแรงดึง

ขอบเขตของการวิจัย

1. แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันเชื่อมต่อกันแบบอุดมคติ
2. งานวิจัยชิ้นนี้ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาและวิเคราะห์ความเค้นในบริเวณสนามความเค้นซิงกูลาริตี้ที่เกิดจากหน้าสัมผัสระหว่างวัสดุสองชนิด
3. คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยชิ้นได้เป็นคุณสมบัติวัสดุในช่วงคุณสมบัติวัสดุแบบเชิงเส้นตรง (Linear Elastic Constant)
4. ภาระที่กระทำกับแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษามีภาระทางอุณหภูมิและแรงดึง
5. การคำนวณผลต่างๆทำภายใต้สมมติฐานแบบสถิตเพื่อตัดผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ออก

การตรวจเอกสาร

Koguchi (1996) ทำการศึกษาปัญหาเกี่ยวกับรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดโดยใช้วิธีบานด์อะรีเอลิเมนต์ (Boundary Element Method) ในการทำวิจัย แบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบจำลองที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดต่อกันแบบอุดมคติโดยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุสมมติประเภท Isotropic ผลที่ได้คือสามารถคำนวณได้ผลการกระจายตัวของความเค้นบริเวณรอบๆ รอยต่อของวัสดุ และจากนั้นได้ทำการศึกษาค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตี (Order of Stress Singularity) โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการคำนวณ ผลที่ได้คือได้ค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตีและสรุปได้ว่าค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตีจะมีค่าแปรผันตามลักษณะมุมของรอยต่อระหว่างวัสดุ

Yang and Munz (1996) ได้ทำการศึกษาปัญหารอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการทำการศึกษา โดยแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบจำลองชนิด 2 มิติซึ่งประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดนำไปปรับภาระทางอุณหภูมิและแรงดึง งานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณผลค่าความเค้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ โดยผลสุดท้ายของงานวิจัยชิ้นนี้ได้สมการการกระจายตัวของความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุที่มีพจน์ของภาระทางอุณหภูมิและภาระของแรงดึงอยู่ในสมการ

Qian and Akisanya (1998, 1999) ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการศึกษาปัญหาความเค้นบริเวณรอยต่อของวัสดุที่รับภาระชนิดแรงดึง โดยใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นแบบจำลองประเภท 2 มิติ ซึ่งได้ผลสรุปว่าการวิเคราะห์ความเสียหายบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดนั้นควรใช้ค่าความเข้มของความเค้น (Stress Intensity Factor) มาเป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์จะเหมาะสมมากกว่า และทำการศึกษาในหัวข้อค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตี (Order of Stress Singularity) โดยได้ข้อสรุปว่าค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตีนั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความแตกต่างกันของคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุบริเวณรอยต่อ

Koguchi and Muramoto (2000) ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ทำการศึกษาเพื่อคำนวณหาค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตี (Order of Stress Singularity) โดยแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์นั้นเป็นแบบจำลอง 3 มิติและทำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองชนิด 2 มิติ จากการศึกษาพบว่าค่าระดับความรุนแรงของ

ความเค้นเชิงกลที่ดีในแบบจำลอง 3 มิติมีค่ามากกว่าค่าระดับความรุนแรงของความเค้นเชิงกลที่ดีที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง 2 มิติ

Zhao (2005) ได้ทำการศึกษาความเสียหายที่บริเวณรอยต่อระหว่างซีพและแผงวงจรโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ควบคู่กับการทำการทดลอง โดยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกสร้างขึ้นนั้นเป็นแบบจำลองที่มีการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์อย่างหนาแน่นเพื่อใช้เทียบแนวโน้มของผลที่ได้จากการทดลอง โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้มุ่งประเด็นในการศึกษาไปที่รูปแบบของความเสียหายของรอยต่อระหว่างวัสดุ โดยสุดท้ายแล้วได้ข้อสรุปว่าผลที่ได้จากการทำการทดลองและผลการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกัน และรูปแบบของความเสียหายบริเวณรอยต่อของซีพและแผงวงจรมีลักษณะโค้งและบิดตัวโดยผู้วิจัยได้บอกสาเหตุของการโก่งบิดของรอยต่อนั้นเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุมีค่าไม่เหมาะสม

Koguchi and Nakajima (2010) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบแซนด์วิช (Sandwich model) ที่นำไปรับภาระทางแรงดึงโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และบาวนด์รีเอลิเมนต์ โดยมุ่งประเด็นที่จะทำการศึกษาไปที่ความเค้นบริเวณจุดมุมของรอยต่อระหว่างชั้นของวัสดุ และนำค่าความเค้นไปแปลงเป็นค่าความเข้มของความเค้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย จากนั้นได้ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุชั้นกลางเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับค่าความเข้มของความเค้น จนได้ข้อสรุปว่าเมื่อค่าความเข้มของความเค้นแปรผันตามกับความหนาของวัสดุชั้นกลาง

Koguchi *et al.* (2010) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการเกิดความเสียหายจากภาระทางอุณหภูมิและแรงดึงในวัสดุโครงสร้างแบบแซนด์วิช (Sandwich Model) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเค้นตกค้างซึ่งเกิดจากภาระทางอุณหภูมิภายในชิ้นงาน โดยการศึกษาได้ใช้วิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองทางบาวนด์รีเอลิเมนต์ที่ถูกสร้างขึ้นประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันนำมาเชื่อมต่อกัน และกำหนดภาระทางอุณหภูมิกระทำกับแบบจำลองในช่วงระยะเวลาแรกจากนั้นนำภาระทางอุณหภูมิออกและใส่ภาระทางแรงดึงให้กับแบบจำลองในช่วงเวลาที่สอง ผลที่ได้คือสามารถทราบค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในแบบจำลองและค่าความเข้มของความเค้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย

กิตติศักดิ์ และ อรรถพร (2554) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์การเสียหายของชิ้นงานที่มีโครงสร้างเป็นรูปแบบแซนด์วิช (Sandwich Model) ซึ่งมีสาเหตุจากการเชื่อมกันระหว่างวัสดุที่มี

คุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งการศึกษาเริ่มจากการสร้างแบบจำลองซึ่งประกอบด้วยวัสดุสองชนิดที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันนำมาเชื่อมต่อกันแบบอุดมคติแล้วกำหนดภาระแรงดึงกระทำที่บริเวณผิวด้านบนและล่างของแบบจำลอง จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นวัสดุเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นวัสดุกับความเสถียรต่อการเกิดความเสี่ยง โดยการศึกษาได้มุ่งเน้นที่จะวิเคราะห์โดยใช้ค่าความเข้มของความเค้นในบริเวณซิงกูลาริตีเป็นตัวแปรที่ใช้บ่งบอกเสี่ยงต่อการเกิดความเสี่ยง และสามารถสรุปได้ว่าในชิ้นงานที่ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันสูง ความเค้นจะมีค่าสูงขึ้นสู่อันตรกิริยาบริเวณจุดมุมระหว่างรอยต่อ และชิ้นงานที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดความเสี่ยงสูงขึ้นตามลำดับ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ความเค้น

ความเค้น (Stress) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณแรงต้านภายในเนื้อวัตถุที่เกิดจากการที่มีแรงภายนอกมากระทำต่อพื้นที่ผิวที่รับแรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของวัตถุที่ตั้งฉากกับแรงที่มากระทำ แต่เนื่องจากไม่สามารถวัดแรงต้านภายในเนื้อวัตถุได้จึงกำหนดให้แรงต้านภายในเนื้อวัตถุมีค่าเท่ากับแรงกระทำภายนอกเฉลี่ยที่ผิวของวัตถุ ดังนั้นความเค้นจึงมีค่าเท่ากับแรงเฉลี่ยที่กระทำต่อวัตถุหารด้วยพื้นที่ผิวในทิศตั้งฉากกับแรงภายนอกที่กระทำดังแสดงในสมการด้านล่าง

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

โดย

σ คือ ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น ปาสคาล (Pa)

F คือ แรงที่กระทำต่อวัตถุ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแรง F ที่กระทำ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

ความเค้นสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทตามชนิดของแรงที่มากระทำ คือ

1.1 ความเค้นดึง (Tensile Stress)

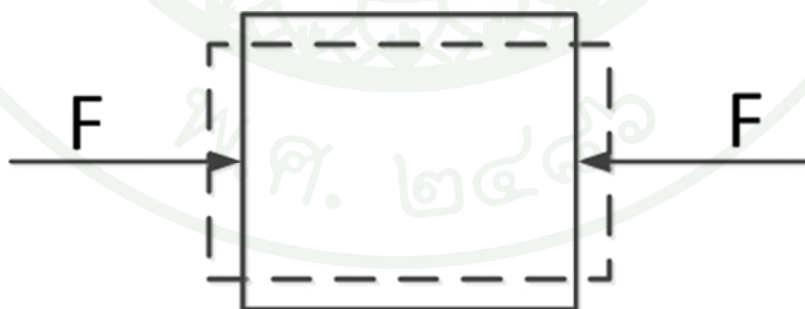
ความเค้นดึง คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดึงเฉลี่ยที่กระทำในทิศตั้งฉากกับหน้าตัดของวัตถุหารด้วยพื้นที่หน้าตัดด้านที่ตั้งฉากกับแรงกระทำ โดยสูตรคำนวณเป็นตามสมการที่ 1 และลักษณะของความเค้นดึงได้แสดงไว้ในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 นิยามของความเค้นดึง

1.2 ความเค้นอัด (Compressive Stress)

ความเค้นอัด คือ อัตราส่วนระหว่างแรงอัดเฉลี่ยที่กระทำในทิศตั้งฉากกับหน้าตัดของวัตถุหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของวัตถุด้านที่ตั้งฉากกับแรงที่มากระทำ โดยมีสูตรการคำนวณตามสมการที่ 1 ภาพที่ 2 ได้แสดงลักษณะแรงที่กระทำกับวัตถุในกรณีความเค้นอัด



ภาพที่ 2 นิยามของความเค้นอัด

1.3 ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

ความเค้นเฉือน คือ อัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนที่กระทำต่อวัตถุหารด้วยพื้นที่รับแรงเฉือน มีสูตรคำนวณดังแสดงในสมการที่ 2 โดยแรงที่กระทำต่อวัตถุในกรณีของความเค้นเฉือนนั้น จะเป็นแรงเฉือนที่กระทำต่อพื้นที่ดังแสดงในภาพที่ 3

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

โดย

τ คือ ความเค้นเฉือน (Stress) มีหน่วยเป็น ปาสคาล (Pa)

F คือ แรงเฉือนที่กระทำต่อวัตถุ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

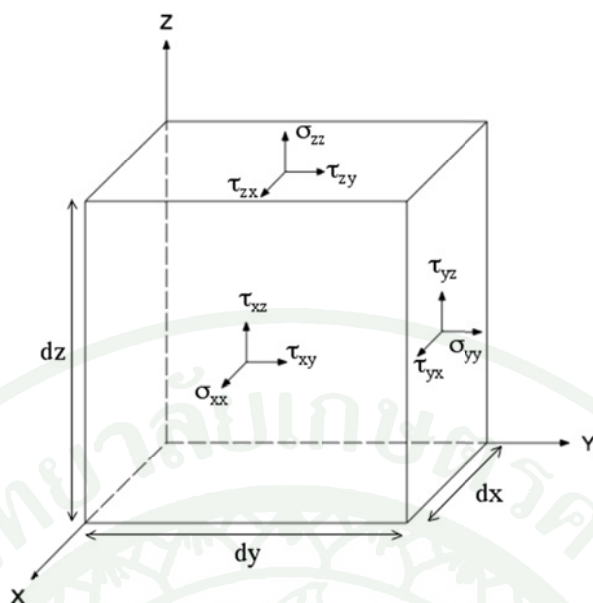
A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแรง F ที่กระทำ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)



ภาพที่ 3 นิยามของความเค้นเฉือน

1.4 องค์ประกอบของความเค้น

เนื่องจากความเค้นเป็นปริมาณเทนเซอร์ (Tensor) ซึ่งประกอบด้วยขนาด, ตำแหน่ง และทิศทาง ดังนั้นในระบบพิกัดแกน x, y, z จึงได้ระบุสัญลักษณ์และความหมายของความเค้นในทิศทางต่างๆเพื่อให้สามารถเข้าใจลักษณะของความเค้นต่างๆได้ดังแสดงในภาพที่ 4 จากภาพจะเห็นว่าด้านหลังของสัญลักษณ์ความเค้นนั้นจะมีตัวอักษรระบุตำแหน่งและทิศทางอยู่ 2 ตัวอักษร โดยตัวอักษรตัวแรกจะเป็นการระบุตำแหน่ง คือ ด้านที่ตั้งฉากกับความเค้นนั้นๆ และตัวอักษรตัวที่ 2 คือการระบุทิศทางของความเค้นนั้นว่ามีทิศทางไปตามแนวแกนใด

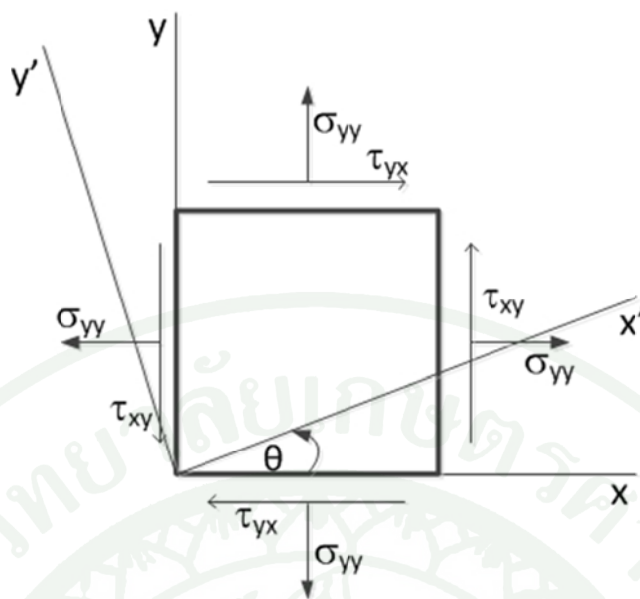


ภาพที่ 4 แสดงองค์ประกอบของความเค้น

จากภาพที่ 4 เป็นการแสดงปริมาณของความเค้นในระบบพิกัด x, y, z ปกติ แต่เมื่อเกิดการบิดมุม θ ใดๆของรูปทรงลูกบาศก์โดยมุม θ คือมุมที่กระทำกับระนาบของแกน x เดิม ทำให้เกิดแกนใหม่ขึ้นมาคือแกน x' และ y' ดังแสดงในภาพที่ 5 ความเค้นตามทิศทางแกน x' และ y' เมื่อพิจารณาแบบ 2 มิติสามารถหาได้จากสมการที่ 3 และ 4

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (4)$$



ภาพที่ 5 แสดงองค์ประกอบของความเค้นในพิกัด xy และ $x'y'$

2. ความเครียด

ความเครียด คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไปหลังถูกแรงกระทำหารด้วยความยาวของวัตถุก่อนถูกแรงกระทำดังแสดงในภาพที่ 6 และมีสูตรการคำนวณตามสมการที่ 5

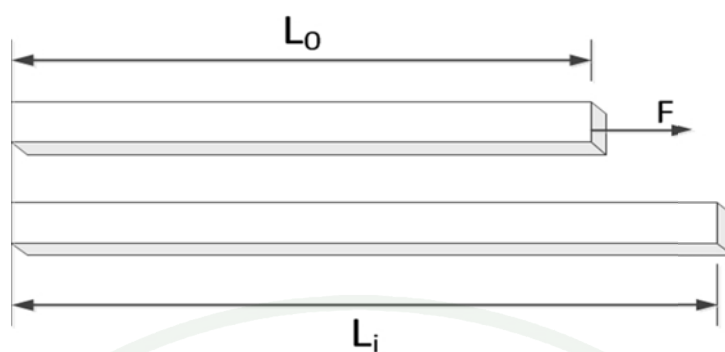
$$\varepsilon = \frac{(L_i - L_0)}{L_0} \quad (5)$$

โดย

ε คือ ความเครียด (Strain) เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย

L_i คือ ความยาวของวัตถุหลังถูกแรงกระทำ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

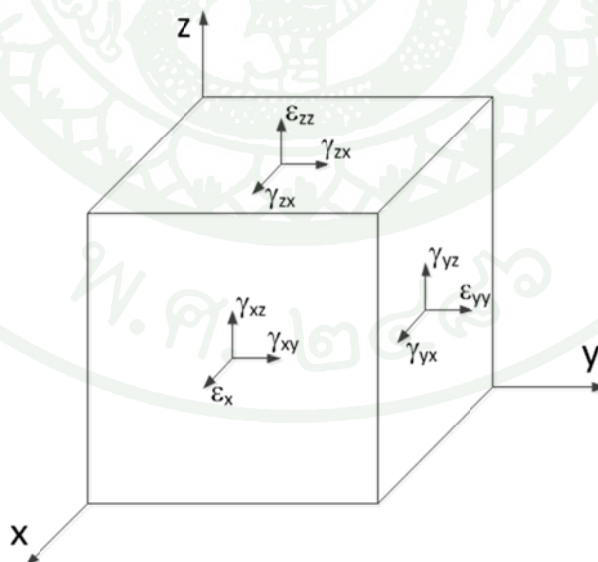
L_0 คือ ความยาวของวัตถุก่อนถูกแรงกระทำ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)



ภาพที่ 6 นิยามความเครียด

2.1 องค์ประกอบของความเครียด

องค์ประกอบของความเครียดในด้านต่างๆตามพิกัดแกน x, y, z ได้แสดงไว้ในภาพที่ 7 โดยตัวอักษรที่ระบุตำแหน่งและทิศทางของความเครียดนั้นมีหลักการเช่นเดียวกับองค์ประกอบของความเค้น คือ ตัวอักษรตัวแรกจะเป็นการบ่งบอกตำแหน่งที่เกิดความเครียด และตัวอักษรตัวที่ 2 คือการบ่งบอกทิศทางของความเครียด โดยความเครียดในทิศทางตั้งฉากพื้นที่หน้าตัดจะแสดงด้วยสัญลักษณ์ ϵ และความเครียดเฉือนจะแสดงด้วยสัญลักษณ์ γ



ภาพที่ 7 แสดงองค์ประกอบของความเครียด

3. คุณสมบัติของวัสดุ

3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง (Young's Modulus)

ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง คือ ค่าที่บอกถึงลักษณะความแข็ง (Stiffness) ของวัสดุในช่วงคุณสมบัติวัสดุเชิงเส้นตรง (Linear Elastic) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยังสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามสมการที่ 6 ด้านล่าง

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6)$$

โดย

E คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง

σ คือ ความเค้น

ϵ คือ ความเครียด

3.2 ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio)

ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง คือ ค่าอัตราส่วนที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุในการเปลี่ยนแปลงความเครียดในทิศตั้งฉากกับทิศแรงที่กระทำต่อความเครียดในทิศทางเดียวกับที่แรงกระทำดังแสดงในภาพที่ 8 และมีสูตรในการคำนวณเป็นตามสมการที่ 7

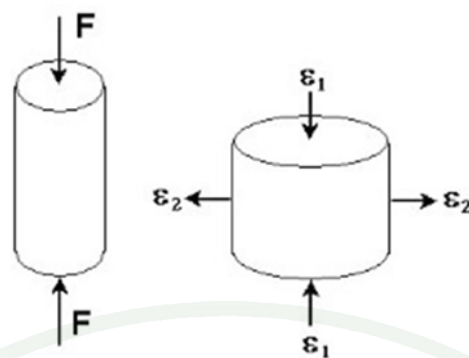
$$\nu = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (7)$$

โดย

ν คือ อัตราส่วนปัวส์ซอง

ϵ_2 คือ ความเครียดในทิศตามแนวแรงกระทำ

ϵ_1 คือ ความเครียดในทิศตั้งฉากแรงกระทำ



ภาพที่ 8 นิยามอัตราส่วนปัวส์ซอง

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion, CTE)

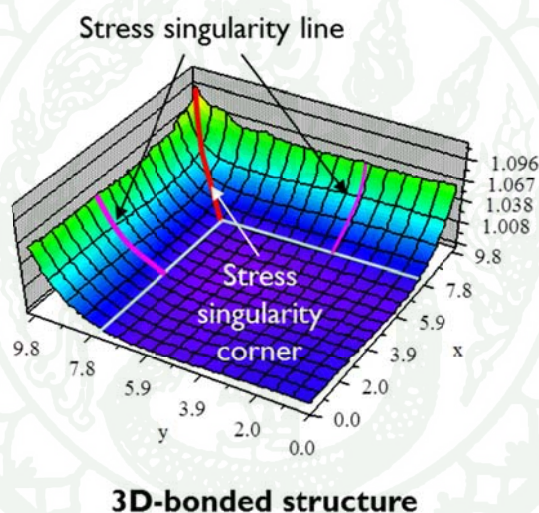
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน คือ ค่าที่บ่งบอกพฤติกรรมของวัสดุในด้านการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือปริมาตรเมื่อเนื้อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละวัสดุ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบการลดอุณหภูมิดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุจากอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนในที่นั้นนั้นจึงเป็นพฤติกรรมการหดตัวของแต่ละวัสดุ ซึ่งในแต่ละวัสดุนั้นมีอัตราการหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่เท่ากันจึงเป็นผลให้เกิดความเค้นสูงขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุหรือเรียกว่าความเค้นตกค้างจากภาระอุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนมีหน่วย คือ K^{-1}

3.4 วัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic Material)

วัสดุไอโซทรอปิก คือ วัสดุเนื้อเดียวที่มีคุณสมบัติเชิงกลเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's Law) โดยวัสดุจะมีค่าคุณสมบัติเชิงกลคงที่และทุกๆจุดในเนื้อวัสดุจะมีค่าคุณสมบัติเชิงกลที่เท่ากันในทุกทิศทาง หรือกล่าวได้ว่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นไม่ขึ้นกับทิศทาง เป็นผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุไม่ขึ้นกับทิศทางการจัดเรียงตัวของเนื้อวัสดุนั้นๆ วัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุไอโซทรอปิก ได้แก่ แก้ว, โลหะที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นต้น

3.5 ความเค้นซิงกูลาริตี (Stress Singularity)

ความเค้นซิงกูลาริตี คือ ความเค้นที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วงพื้นที่เล็กๆ โดยมีค่าสูงสุดของความเค้นนั้นมีค่าสู่อันันต์ ความเค้นซิงกูลาริตีนี้มักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อกันของวัสดุต่างชนิดที่มีคุณสมบัติเชิงกลต่างกันมากๆ หรือบริเวณที่รูปทรงของวัตถุมีความไม่สม่ำเสมอ เช่น เกิดการหักมุม, มีรูเจาะที่ขวางทิศทางการเค้น เป็นต้น ซึ่งบริเวณดังกล่าวนี้จะทำให้มีความเค้นสะสมตัวอยู่เป็นปริมาณมากจึงทำให้บริเวณนี้เป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายได้ค่อนข้างสูง ภาพที่ 9 แสดงลักษณะของความเค้นซิงกูลาริตีที่เกิดขึ้นบริเวณจุดมุมรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดที่มีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันสูง โดยลักษณะของความเค้นซิงกูลาริตีจะมีลักษณะตามเส้นที่แดง



ภาพที่ 9 แสดงความเค้นซิงกูลาริตี

ที่มา: กิตติศักดิ์ (2553)

3.6 ค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี (Intensity of Stress Singularity)

ค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี คือ ค่าที่ใช้บ่งบอกถึงลักษณะการรวมตัวหรือการกระจุกตัวของความเค้นในบริเวณพื้นที่เล็กๆ บริเวณหนึ่งที่มีความเค้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยสามารถเรียกบริเวณดังกล่าวนี้ว่าสนามความเค้นซิงกูลาริตี (Stress Singularity Field) ซึ่งค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีนี้จะใช้อธิบายถึงปริมาณความหนาแน่นของความเค้นภายในสนาม

ความถี่เชิงกลที่ดี ดังนั้นค่าความเข้มของความถี่เชิงกลที่ดีจึงสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการคาดคะเนบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายได้ โดยที่บริเวณใดมีค่าความเข้มของความถี่เชิงกลที่ดีสูงกว่าบริเวณนั้นจะเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายสูงนั่นเอง

4. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ กระบวนการเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหารูปแบบของปัญหาที่มีความซับซ้อนเกินกว่าที่จะใช้วิธีการคำนวณตามทฤษฎีพื้นฐานคำนวณได้ ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาลักษณะ เช่น ปัญหาทางวิศวกรรมโครงสร้าง, ปัญหาทางความร้อนและของไหล รวมทั้งปัญหาการแพทย์ก็สามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยคำนวณได้เช่นกัน โดยมีหลักการพื้นฐาน คือ การแบ่งรูปทรงของปัญหาที่มีความซับซ้อนออกเป็นพื้นที่ปิดหรือก้อนปริมาตรปิดย่อยๆที่มีความสมมาตรจำนวนหลายชิ้นแล้วนำชิ้นประกอบ (Element) ที่ได้นี้มาประกอบกันเป็นรูปทรงของปัญหา แล้วจึงทำการคำนวณตามทฤษฎีพื้นฐานในแต่ละชิ้นประกอบ โดยชิ้นประกอบทุกชิ้นจะทำการส่งค่าคำตอบที่คำนวณไปต่อไปให้ชิ้นประกอบที่อยู่ข้างเคียงผ่านทางจุดเชื่อมต่อ (Node) ระหว่างชิ้นเพื่อใช้เป็นค่าตั้งต้นในการคำนวณของชิ้นประกอบถัดไป กระบวนการนี้จะทำต่อไปจนครบทุกชิ้นและทำการคำนวณรอบซ้ำไปซ้ำมาจนได้ผลคำตอบ โดยผลสุดท้ายจะได้คำตอบของปัญหาดังกล่าวออกมาแต่คำตอบที่ได้ออกมานั้นเป็นเพียงคำตอบโดยประมาณซึ่งมีความใกล้เคียงกับคำตอบจริงเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในกระบวนการแบ่งชิ้นประกอบ โดยความคลาดเคลื่อนนี้สามารถลดลงได้โดยการแบ่งชิ้นประกอบให้มีความละเอียดมากขึ้น

4.1 กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

กระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งหลักๆได้ทั้งหมด 3 ขั้นตอนหลัก คือ

1. Preprocessing Process

ในขั้นตอน Preprocessing นี้จะเป็นการเตรียมรูปแบบของปัญหาให้พร้อมสำหรับการคำนวณทำขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนนี้จะเริ่มจากการแบ่งชิ้นวัตถุที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็นชิ้นประกอบย่อยๆ จากนั้นจะทำการเลือกสมการที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ลงในชิ้นประกอบย่อยให้ครบทุกชิ้น และ

สุดท้ายเป็นการกำหนดค่าขอบเขตรวมทั้งภาระกรรมต่างๆที่กระทำต่อชิ้นงานตามสภาวะการณ์จริงที่ต้องการวิเคราะห์ปัญหา

2. Solution Process

Solution Process คือ ขั้นตอนคำนวณผลคำตอบของปัญหาที่กำลังทำการวิเคราะห์ โดยการคำนวณผลโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้จะมีวิธีการในการคำนวณผล 3 รูปแบบคือ

2.1 วิธีแม่นยำตรง (Direct Method)

วิธีการแม่นยำตรง คือ วิธีการคำนวณอย่างตรงไปตรงมาโดยสมการพื้นฐานทั่วไป วิธีนี้มีข้อดีคือคำตอบที่ได้จะมีความแม่นยำของผลคำตอบมากที่สุด แต่วิธีนี้จะสามารถคำนวณผลได้ในเฉพาะกรณีที่รูปแบบของปัญหามีความสมมาตรหรือมีความซับซ้อนน้อยเท่านั้น

2.2 วิธีพลังงานศักย์รวมต่ำที่สุด (Minimum Total Potential Energy)

วิธีการพลังงานศักย์รวมต่ำที่สุด คือ วิธีที่มองรูปแบบของปัญหาในรูปของงานและพลังงาน โดยมีหลักการว่าเมื่อมีแรงมากระทำกับวัตถุหนึ่งแล้ววัตถุนั้นเกิดการเสียรูป แรงที่กระทำกับวัตถุนี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานความเครียด (Strain Energy) และกักเก็บไว้ในเนื้อวัตถุ และที่จุดสมดุลนั้นพลังงานความเครียดภายในเนื้อวัตถุจะมีค่าเท่ากับงานที่เกิดจากแรงภายนอกที่กระทำต่อวัตถุนั้นแล้วทำให้วัตถุนั้นเสียรูป หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า ณ จุดสมดุลพลังงานศักย์รวมของระบบจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$\pi = U + W \quad (8)$$

โดย

π คือ พลังงานศักย์รวมของระบบ

U คือ พลังงานความเครียดภายในเนื้อวัตถุ (Strain Energy)

W คือ งานที่เกิดจากแรงภายนอก

2.3 วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weight Residual)

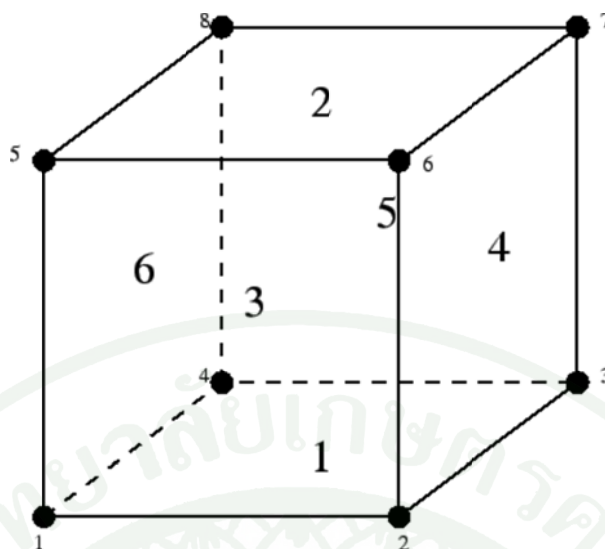
วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการ คือ การสมมติค่าคำตอบของปัญหาขึ้นมาค่าหนึ่งแล้วนำไปแทนในตัวสมการของระบบ ซึ่งจากการที่คำตอบที่แทนเข้าไปในระบบนั้นเป็นคำตอบที่ถูกสมมติขึ้นมาจึงเป็นผลทำให้เมื่อทำการคำนวณแล้วทำให้สมการของระบบไม่เป็นจริงกล่าวคือเมื่อคำนวณเสร็จแล้วจะเกิดเศษที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ขึ้น จากนั้นระบบจะทำการสมมติคำตอบใหม่แทนเข้าไปในสมการของระบบเพื่อคำนวณเศษเหลือเช่นนี้เรื่อยๆจนเศษที่เหลือจากการคำนวณมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด ซึ่งคำตอบของระบบก็คือคำตอบ ณ จุดที่เศษมีค่าเท่ากับหรือเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด

3. Postprocessing Process

Postprocessing Process คือ กระบวนการตีความหมายและทำความเข้าใจผลคำตอบที่ได้จากการคำนวณ โดยทั่วไปแล้วผลคำตอบที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะอยู่ในรูปของระยะการเคลื่อนที่ของจุดต่อ (Node) แต่ละจุด ซึ่งระยะการเคลื่อนที่ของจุดต่อต่างๆนี้สามารถนำไปแปลงเป็นค่าต่างๆที่ต้องการได้ อาทิเช่น ความเค้น, พลังงาน, แรงปฏิกิริยา ฯลฯ ซึ่งทำโดยการนำค่าระยะการเคลื่อนที่ของแต่จุดต่อกลับเข้าไปแทนในสมการควบคุมของปัญหานั้นๆที่กำลังทำการวิเคราะห์แล้วคำนวณค่าตัวแปรที่ต้องการทราบค่าออกมา และ ณ ปัจจุบันนี้โปรแกรมคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการพัฒนาอย่างมาก ได้มีฟังก์ชันอำนวยความสะดวกเพิ่มเข้ามาในตัวโปรแกรมอย่างมากมาช่วยในการนำเสนอผลการคำนวณให้ออกมาในรูปของกราฟหรือสีต่างๆบนแบบจำลองเพื่อแสดงระดับความรุนแรงของค่าผลการคำนวณในแต่ละบริเวณของชิ้นงานทำให้ผู้ใช้โปรแกรมสามารถเข้าใจผลคำตอบได้ดียิ่งขึ้น

4.2 รูปแบบของเอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการพัฒนารูปแบบของการวิเคราะห์ปัญหาความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิด โดยมุ่งเน้นในการวิเคราะห์ในระดับ 3 มิติเพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงพฤติกรรมจริงของวัตถุมากยิ่งขึ้น ดังนั้นแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้สร้างจากชนิดของเอลิเมนต์แบบ 3 มิติแบบทรงหกหน้าชนิดกำลังหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งเอลิเมนต์ชนิดนี้จะประกอบด้วยด้านทั้งหมด 6 ด้านและจุดต่อทั้งหมด 8 จุดต่อ



ภาพที่ 10 เอลิเมนต์ชนิดทรงหกหน้าชนิดกำลังหนึ่ง

4.3 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์พื้นฐานสำหรับการคำนวณมักสร้างบนพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด และความสัมพันธ์ความเครียดกับระยะการกระจัดของเอลิเมนต์ ในหัวข้อนี้จึงขอกล่าวถึงการสร้างเมทริกซ์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพื้นฐานสำหรับการคำนวณปัญหาความเค้นใน 3 มิติ เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านที่จะทำให้เข้าใจที่มาของการคำนวณได้ดียิ่งขึ้น

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดโดยทั่วไปจะรูปในรูปของ $\{\sigma\} = [E] \times \{\epsilon\} + \{\sigma_0\}$ โดย $\{\sigma\}$ คือ เมทริกซ์ของความเค้น, $[E]$ คือ เมทริกซ์ของค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ, $\{\epsilon\}$ คือ เมทริกซ์ของความเครียด และ $\{\sigma_0\}$ คือ เมทริกซ์ของค่าความเค้นตั้งต้น

สำหรับในกรณีของการวิเคราะห์แบบ 3 มิตินั้นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ตามสมการที่ 9

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} & E_{15} & E_{16} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & E_{24} & E_{25} & E_{26} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & E_{34} & E_{35} & E_{36} \\ E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} & E_{45} & E_{46} \\ E_{51} & E_{52} & E_{53} & E_{54} & E_{55} & E_{56} \\ E_{61} & E_{62} & E_{63} & E_{64} & E_{65} & E_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

จากสมการที่ 9 เมทริกซ์ $[E]$ มีคุณสมบัติเป็นเมทริกซ์สมมาตร ดังนั้นค่าคุณสมบัติตัวที่ E_{ij} จะมีค่าเท่ากับค่าคุณสมบัติตัวที่ E_{ji} และสำหรับกรณีวัสดุไอโซทรอปิกที่มีค่าความเครียดตั้งต้นที่มาจากภาระทางอุณหภูมินั้น ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ตำแหน่งต่างๆ ในเมทริกซ์ $[E]$ และค่าความเครียดตั้งต้นจากภาระอุณหภูมิสามารถหาได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} E_{11} = E_{22} = E_{33} &= \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ E_{44} = E_{55} = E_{66} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \\ E_{12} = E_{21} = E_{13} = E_{31} = E_{23} = E_{32} &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{x0} &= \alpha \Delta T \\ \epsilon_{y0} &= \alpha \Delta T \\ \epsilon_{z0} &= \alpha \Delta T \end{aligned} \quad (11)$$

โดย

E คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง

ν คือ ค่าอัตราส่วนปัวซอง

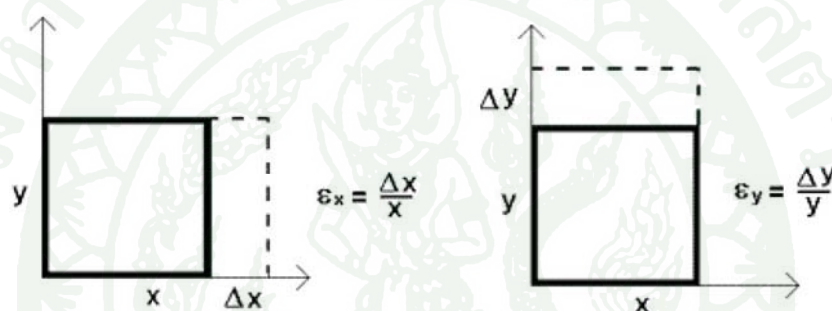
α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

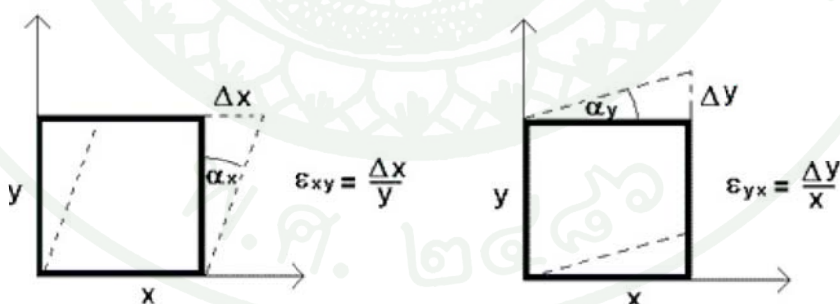
สมการที่ 10 และ 11 ด้านบนได้แสดงค่าคุณสมบัติเชิงกล ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเมทริกซ์ $[E]$ และค่าความเครียดตั้งต้นที่เกิดจากภาระอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเมทริกซ์ $\{\epsilon\}$ โดยค่า ณ ตำแหน่งอื่นๆ ที่ไม่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2 และ 3 นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะการกระจัดของเอลิเมนต์

ระยะการกระจัดของเอลิเมนต์ที่เปลี่ยนไปเมื่อมีภาระแรงมากระทำต่อเอลิเมนต์สามารถนำมาใช้อธิบายการเสวยรูปของวัตถุได้ หรือกล่าวได้ว่าระยะการกระจัดของเอลิเมนต์สามารถนำไปแปลงเป็นความเครียดของวัตถุได้ โดยความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นประกอบด้วย 2 ลักษณะ คือ ความเครียดแนวตั้งฉากและความเครียดเฉือน ความเครียดในแนวตั้งฉากสามารถคำนวณได้โดยการนำการกระจัดของเอลิเมนต์ที่เปลี่ยนไปหารด้วยระยะการกระจัดของเอลิเมนต์ตั้งต้นดังแสดงในภาพที่ 11 และความเครียดเฉือนสามารถหาได้จากมุมที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวด้านตั้งต้นดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 11 แสดงความเครียดในทิศตั้งฉาก



ภาพที่ 12 แสดงความเครียดเฉือน

สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ใน 3 มิตินั้นระยะการกระจัดของเอลิเมนต์ในพิกัดแกน x, y, z นั้นจะถูกแทนด้วยตัวอักษร u, v, w ตามลำดับ ดังนั้นความเครียดในแนวตั้งฉากและความเครียดเฉือนในทิศทางต่างๆสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (13)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังแสดงในสมการที่ 14

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (14)$$

อุปกรณ์และวิธีการ

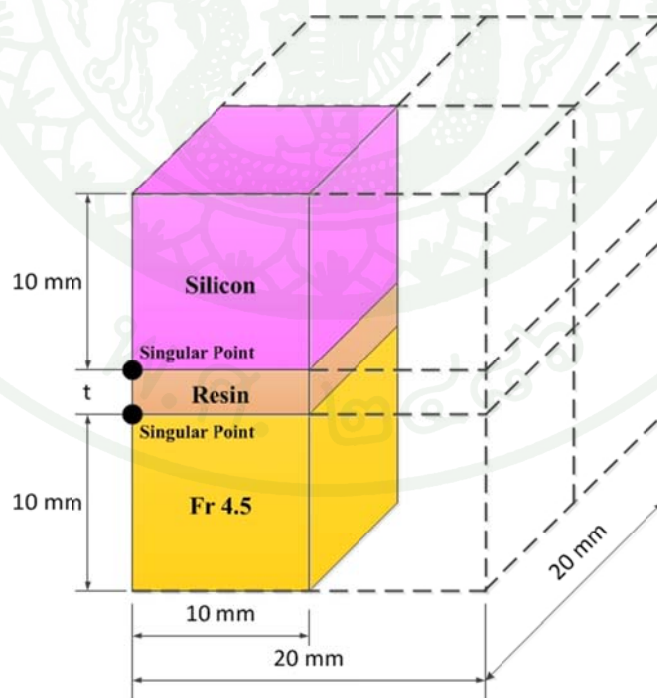
อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถภาพในการคำนวณและหน่วยความจำสูง
2. โปรแกรมสำหรับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Marc Mentat 2005
3. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์กราฟและประมาณค่าตัวแปร

วิธีการ

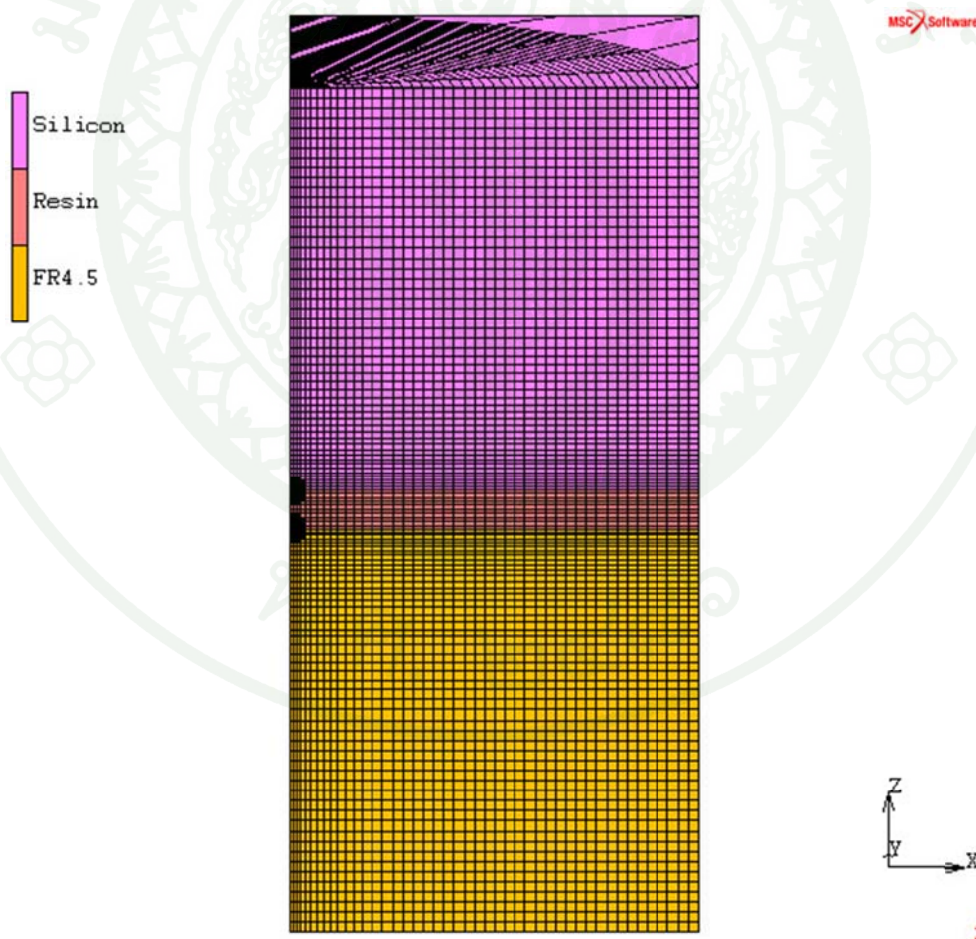
1. การสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ทำการสร้างแบบจำลองขึ้นในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยสร้างแบบจำลองตามรูปแบบของชิ้นงานจริง ซึ่งชิ้นงานจริงมีขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร, ยาว 20 มิลลิเมตร และสูง $20 + t$ มิลลิเมตร โดยที่ t คือความหนาของชั้นวัสดุประสานตามภาพที่ 13

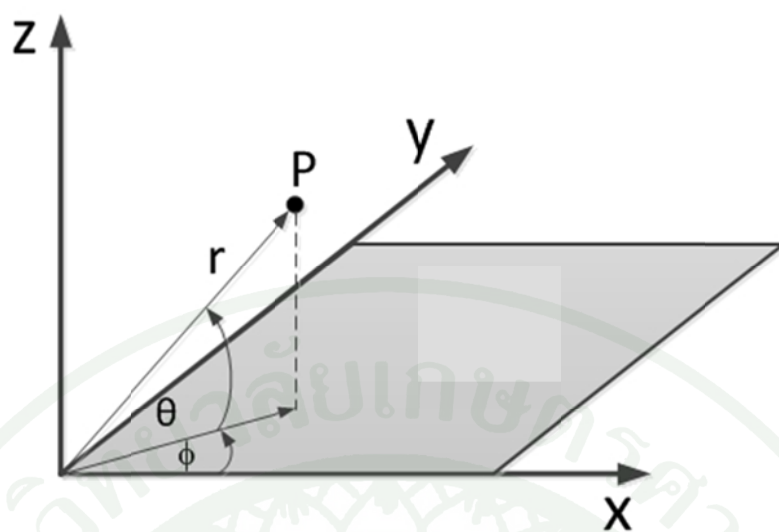


ภาพที่ 13 แสดงขนาดชิ้นงานจริงและขนาด 1 ใน 4 ส่วนของชิ้นงานจริง

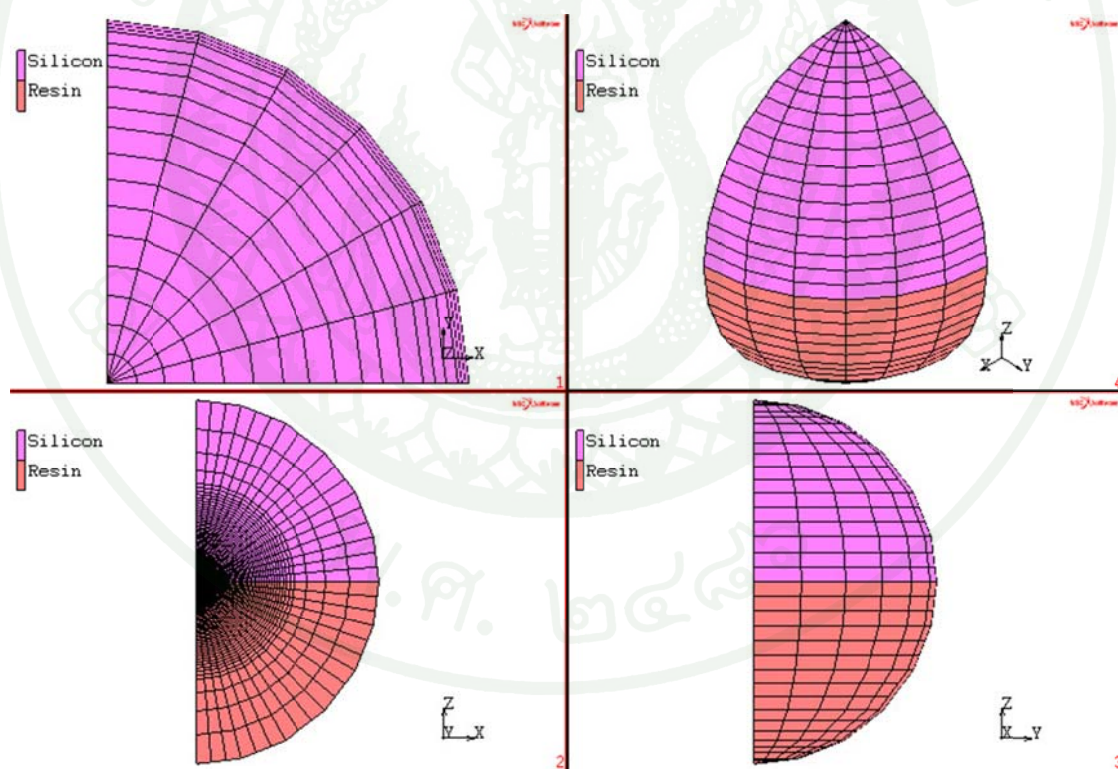
เนื่องจากชิ้นงานจริงมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน z ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองขึ้นในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จึงสามารถสร้างแบบจำลองเพียง 1 ใน 4 ของขนาดชิ้นงานจริงและทำการกำหนดค่าขอบเขตในแต่ละด้านของแบบจำลองให้เหมาะสมได้เพื่อประหยัดทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์และลดระยะเวลาในการคำนวณผลโดยแบบจำลองจริงที่สร้างขึ้นในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แสดงในภาพที่ 14 แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ระบบพิกัดทรงกลม (Spherical Polar Coordinate) (r , θ และ ϕ) ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยบริเวณจุดมุมรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดซึ่งเป็นบริเวณที่ให้ความสนใจมากที่สุดในการทำวิจัยชิ้นนี้เนื่องจากเป็นบริเวณของสนามความเค้นซึ่งสูงที่สุด บริเวณดังกล่าวนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองให้รูปทรงของเอลิเมนต์เป็นแบบตามแนวพิกัดทรงกลม เอลิเมนต์แบบตามแนวพิกัดทรงกลมนี้เป็นรูปแบบของเอลิเมนต์ที่สามารถแสดงพฤติกรรมของความเค้นบริเวณสนามความเค้นซึ่งสูงที่สุดได้ดี ภาพที่ 16 แสดงลักษณะของเอลิเมนต์แบบตามแนวพิกัดทรงกลม



ภาพที่ 14 แบบจำลองที่สร้างขึ้นในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 15 ระบบพิกัดทรงกลม (r, θ, ϕ)



ภาพที่ 16 แสดงเอลิเมนต์ตามแนวพิกัดทรงกลมจากจุดมุมรอยต่อ (Singular Point)

2. กำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

แบบจำลองที่สร้างขึ้นในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ ซิลิคอน (Silicon), เรซิน (Resin), และ FR4.5 โดยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ในการทำวิจัยชิ้นนี้ ประกอบด้วย 3 คุณสมบัติ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง (Young's Modulus), ค่าอัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) คุณสมบัติของแต่ละวัสดุได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยในการทำวิจัยได้แบ่งการกำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลของเรซินออกเป็น 2 แบบ คือ

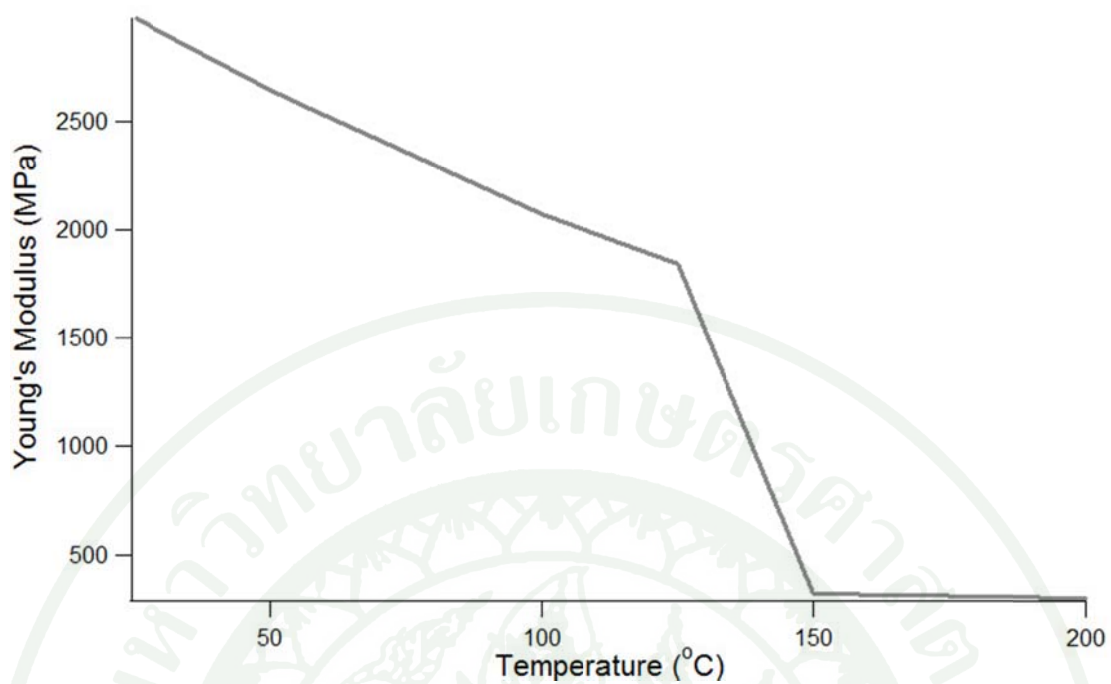
1. การกำหนดคุณสมบัติของเรซินแบบค่าคงที่
2. การกำหนดคุณสมบัติของเรซินแบบเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

การกำหนดคุณสมบัติของเรซินในช่วงแรกของการทำวิจัยนั้นได้กำหนดเป็นแบบคุณสมบัติเชิงกลมีค่าคงที่ แต่ภายหลังได้ทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของเรซินให้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเนื่องจากต้องการให้ผลการคำนวณที่ได้มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมของเรซินจริงมากยิ่งขึ้น โดยคุณสมบัติเชิงกลของเรซินที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยัง (Young's Modulus) และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) ดังแสดงในภาพที่ 17 และ 18

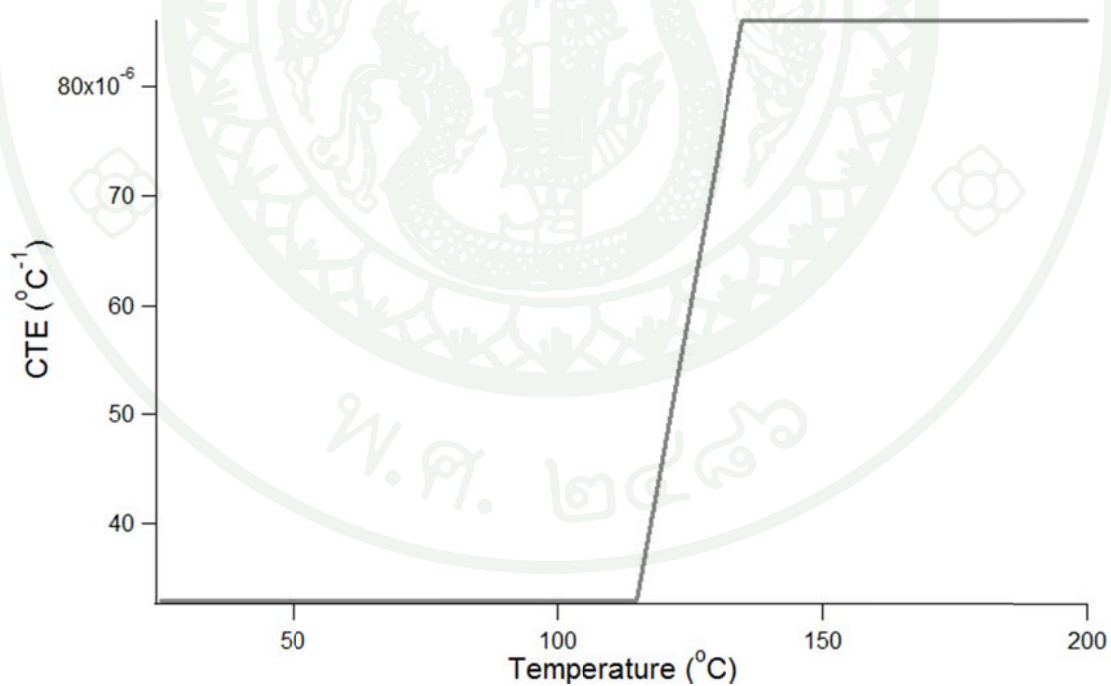
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

Material	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Thermal Expansion [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]
Silicon	166.0	0.26	3.0
Resin	0.3 – 2.97	0.38	33.0 – 86.0
FR-4.5	15.34	0.15	14.0

ที่มา: Koguchi (2010)



ภาพที่ 17 แสดงค่าความยืดหยุ่นของยังที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของวัสดุเรซิน



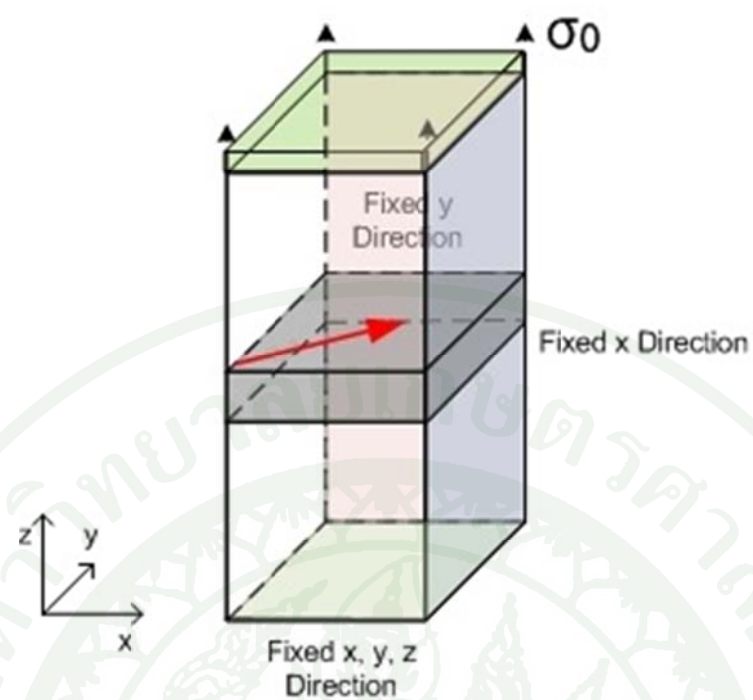
ภาพที่ 18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของวัสดุเรซิน

3. ค่าขอบเขตและภาระที่กระทำต่อแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

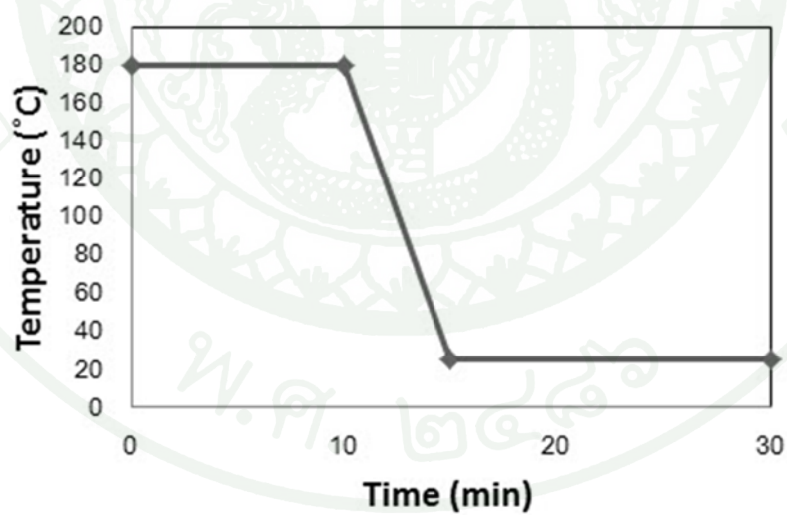
ทำการกำหนดปัญหาค่าขอบเขตที่เหมาะสมและภาระต่างๆลงในกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมมีขนาด 1 ใน 4 ของขนาดชิ้นงานจริง ดังนั้นจึงต้องกำหนดปัญหาค่าขอบเขตโดยกำหนดให้พื้นที่ด้านหลังของแบบจำลองไม่ให้เคลื่อนที่ตามแนวแกน y พื้นที่ด้านขวาของแบบจำลองไม่ให้เคลื่อนที่ตามแนวแกน x และพื้นที่ด้านล่างของแบบจำลองไม่ให้เคลื่อนที่ทั้งแนวแกน x, y และ z ตามภาพที่ 19

ภาระที่กระทำต่อแบบจำลองมีทั้งหมด 2 ภาระ คือ ภาระทางกลคือแรงดึงและภาระทางอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 20 และ 21 โดยภาระทางกลจะเป็นแรงดึงในทิศตามแนวแกน z จะกระทำที่ทุกๆจุดต่อบริเวณพื้นที่ด้านบนของแบบจำลองและภาระทางอุณหภูมิจะกระทำที่ทุกๆจุดต่อของแบบจำลอง โดยจะเริ่มจากกำหนดอุณหภูมิของทุกๆจุดต่อของแบบจำลองเท่ากับ 180 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจะลดอุณหภูมิของแบบจำลองลงมาที่ 25 องศาเซลเซียสโดยใช้เวลาในการลดอุณหภูมิ 5 นาทีและคงอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียสจนจบการทดลอง โดยการทดลองทั้งหมดใช้เวลา 30 นาที ภาระทางกลจะกระทำที่แบบจำลองที่นาฬิกาที่ 15 ของการทดลองซึ่งที่เวลาดังกล่าวคือเวลาที่แบบจำลองมีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

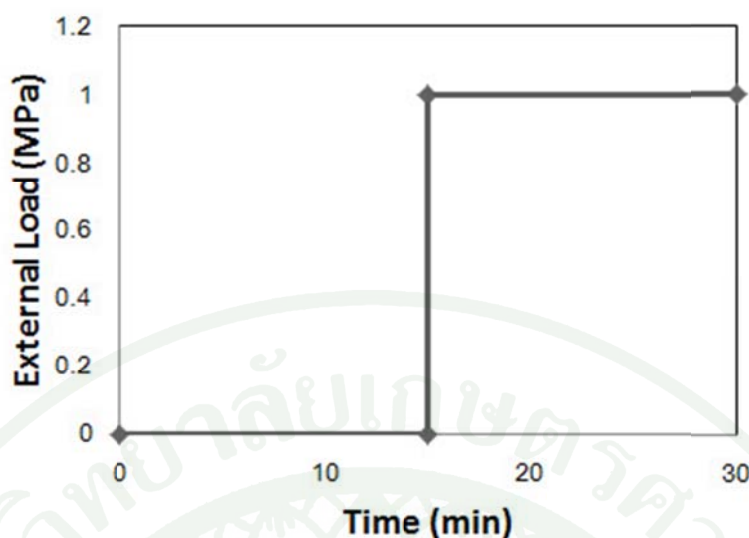
การคำนวณโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้เลือกวิธีการที่ใช้ในการคำนวณเป็นแบบวิธีการคล้ายสถิตย์ (Quasi – Static method) โดยวิธีการคำนวณแบบวิธีคล้ายสถิตย์นั้นจะทำการคำนวณในแต่ละรอบการคำนวณโดยใช้สมมติฐานแบบสถิตย์ (Static) แล้วส่งถ่ายผลการคำนวณที่ได้ไปใช้ในการคำนวณในรอบการคำนวณใช้ช่วงเวลาถัดไป จำนวนรอบของการคำนวณได้กำหนดไว้ที่ 60 รอบ กล่าวคือจากภาพที่ 20 และ 21 จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณตลอดการทดลอง คือ 30 นาที ซึ่งการเลือกจำนวนรอบเท่ากับ 60 รอบนั้นหมายถึงการแบ่งให้ในเวลา 1 นาทีของกราฟภาระกระทำนั้นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการคำนวณ 2 รอบ ซึ่งการเลือกจำนวนรอบในการคำนวณดังกล่าวนี้ได้ผ่านขั้นตอนการทดลองพิสูจน์ความเสถียรของผลการคำนวณมาแล้ว โดยขั้นตอนการพิสูจน์ความเสถียรของผลการคำนวณทำโดยทดลองให้โปรแกรมทำการคำนวณโดยเลือกความละเอียดของจำนวนรอบในการคำนวณต่างๆ แล้วทำการเก็บผลการคำนวณจากแต่ละการทดลองมาเปรียบเทียบผลกัน พบว่าผลการคำนวณจะเริ่มมีความเสถียรที่จำนวนรอบการคำนวณตั้งแต่ 30 รอบเป็นต้นได้ ดังนั้นจึงได้เลือกจำนวนรอบในการคำนวณเท่ากับ 60 รอบเพื่อความเสถียรของผลการคำนวณ



ภาพที่ 19 ปัญหาค่าขอบเขตของแบบจำลอง



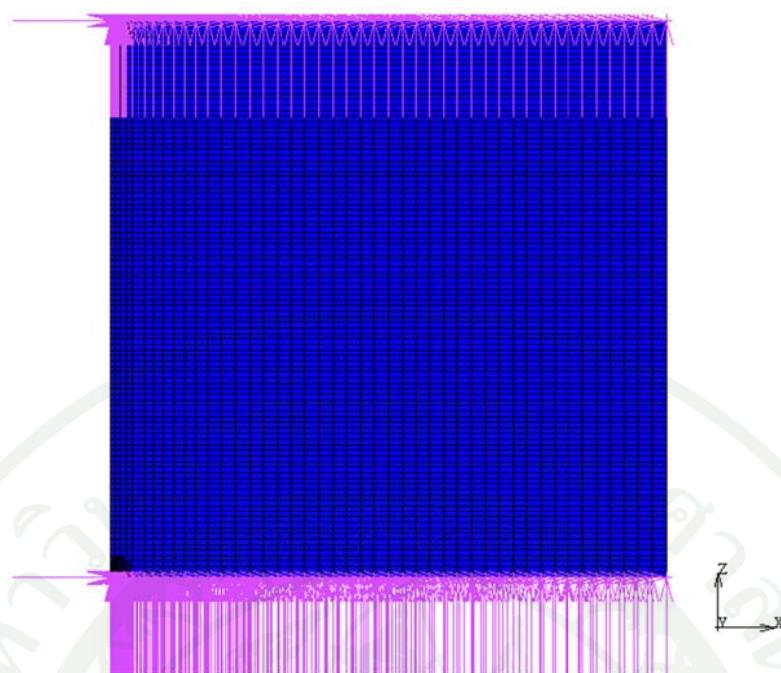
ภาพที่ 20 ภาระทางอุณหภูมิ



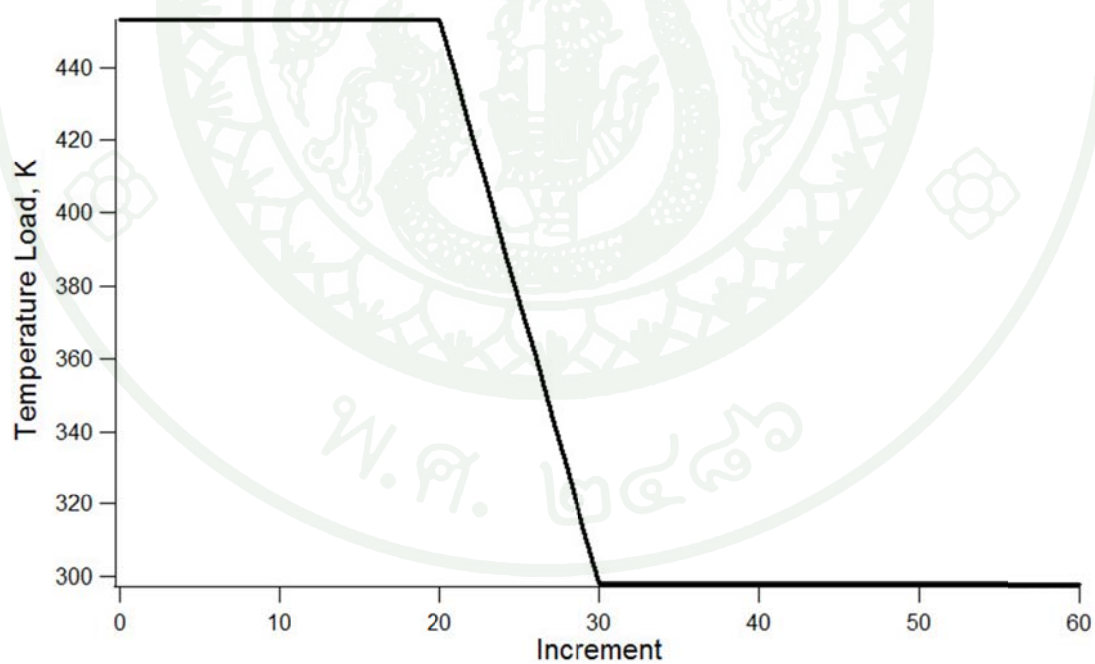
ภาพที่ 21 ภาระทางกล

4. การพิสูจน์ความเค้นในวัสดุเรซินที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

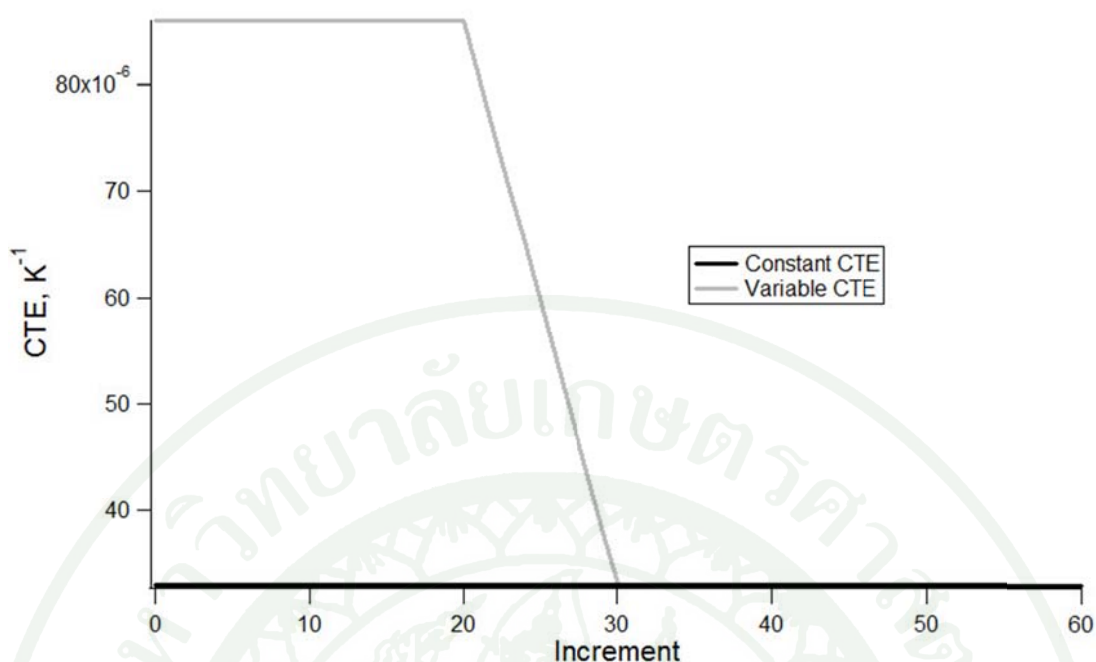
ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ผลปริมาณความเค้นที่ได้จากกรณีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิว่ามีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนหรือไม่ ทำการทดลองโดยเลือกทำการคำนวณเฉพาะบริเวณของวัสดุประเภทเรซินโดยเลือกความหนาของเรซินเท่ากับ 10 มิลลิเมตรเพื่อให้เห็นผลการคำนวณที่ชัดเจนมากที่สุด จากนั้นทำการกำหนดค่าขอบเขตให้ที่บริเวณพื้นที่ด้านบนและล่างถูกกำจัดการเคลื่อนที่ในทิศทาง x , y , และ z ดังแสดงในภาพที่ 22 แล้วกำหนดภาระทางอุณหภูมิกระทำที่ทุกๆจุดต่อของแบบจำลองโดยภาระทางอุณหภูมิที่กระทำต่อแบบจำลองตามรอบการคำนวณต่างๆได้แสดงในภาพที่ 23 แล้วทำการคำนวณและเก็บผลความเค้นในทิศทางแกน z ที่จุดมุมด้านบนของแบบจำลองและทำการนำผลการคำนวณที่เก็บได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากกรณีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนคงที่ที่ตำแหน่งเดียวกันในแบบจำลอง ภาพที่ 24 ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของทั้งกรณีเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและกรณีค่าคงที่ตามรอบการคำนวณต่างๆ



ภาพที่ 22 แสดงค่าขอบเขตของแบบจำลองในการทดสอบเรซิน



ภาพที่ 23 ภาระทางอุณหภูมิที่รอบการคำนวณต่างๆ



ภาพที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามรอบการคำนวณต่างๆ

5. การแบ่งกรณีในการทำการศึกษา

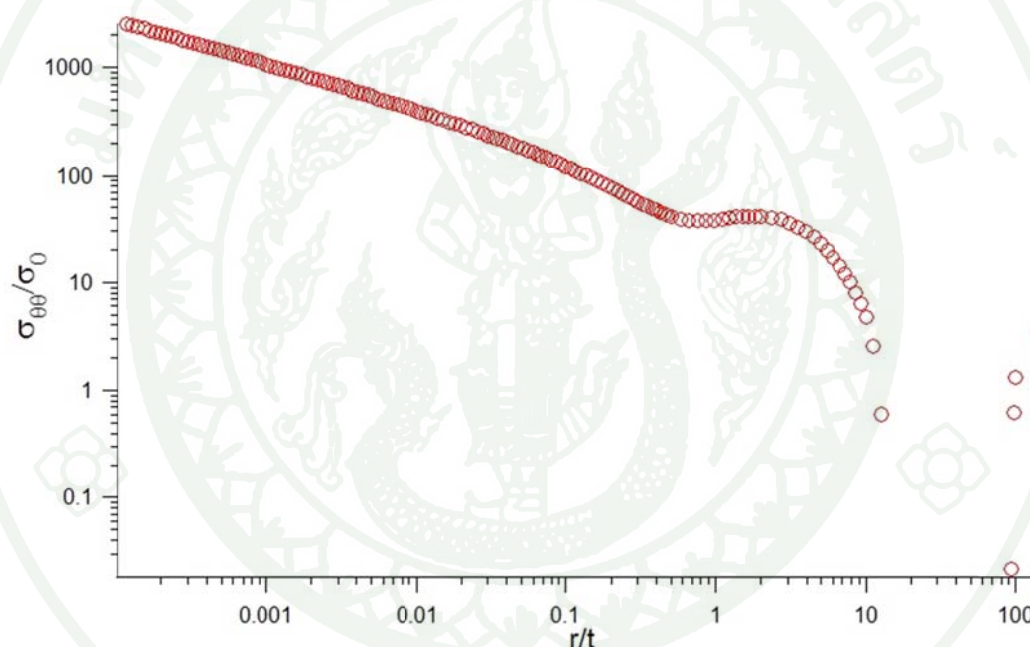
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นภาระที่กระทำต่อแบบจำลองประกอบด้วยภาระทางกลและภาระทางอุณหภูมิ โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเค้นตกค้างเนื่องจากภาระทางอุณหภูมิและผลกระทบของภาระทางอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิด ดังนั้นจึงได้ดำเนินการทำวิจัยโดยแบ่งกรณีในการศึกษาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

1. ภาระที่กระทำต่อแบบจำลองคือภาระทางกลเท่านั้น
2. ภาระที่กระทำต่อแบบจำลองคือภาระทางอุณหภูมิและภาระทางกล

เมื่อทำการคำนวณผลของปริมาณความเค้นได้สำเร็จจากทั้ง 2 กรณี ในลำดับต่อไปก็จะนำผลที่ได้จากทั้ง 2 กรณีมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเพื่อหาผลกระทบของภาระทางอุณหภูมิ

6. การเก็บผลการคำนวณ

การเก็บผลการคำนวณค่าความเค้นจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 รอยต่อ โดยขั้นแรกจะเก็บผลที่มุม $\theta = 90^\circ$ และมุม $\phi = 45^\circ$ จากจุดมุมระหว่างรอยต่อของวัสดุเข้าไปในชิ้นงานดังแสดงตามเส้นลูกศรสีแดงในภาพที่ 19 และนำผลของความเค้นที่ได้ไปกำหนดจุดลงในกราฟโดยให้แกน x คือระยะรัศมีจากจุดมุมรอยต่อหารด้วยความหนาของชิ้นวัสดุประสาน และแกน y คือความเค้นตามแนวการเก็บผลหารด้วยความเค้นของภาระแรงดึงที่กระทำต่อแบบต่อแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 25 และในลำดับถัดไปจะทำการเก็บผลตามแนวองศา θ และ ϕ ต่างๆ เพื่อหาทิศทางที่มีปริมาณความเค้นสูงสุดต่อไป



ภาพที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ของแกน x และ y ที่ใช้ในการเก็บผลการคำนวณ

7. การเปรียบเทียบผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลจากวิธีบาว์นเคลีเอลิเมนต์

ทำการนำผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากำหนดจุดลงในกราฟความสัมพันธ์โดยให้แกน y คือค่าความเค้นตามทิศทางการเก็บผลหารด้วยความเค้นของภาระทางแรงดึง และแกน x คือระยะรัศมีหารด้วยความหนาของชิ้นวัสดุประสาน จากนั้นกำหนดจุดที่ได้จากผลการคำนวณโดยวิธีบาว์นเคลีเอลิเมนต์ที่ได้จากบทความทางวิชาการของศาสตราจารย์โคกูชิ ที่ได้ตีพิมพ์ไว้เมื่อปี ค.ศ. 2010 ลงได้กราฟเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของผลที่ได้จากวิธีไฟ

ในต์เอลิเมนต์รวมทั้งพิสูจน์ความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้น

8. การเปลี่ยนแปลงความหนาของวัสดุประสาน

แบบจำลองตั้งต้นที่ใช้ในการทำงานวิจัยชิ้นนี้คือแบบจำลองที่มีความหนาของชั้นวัสดุประสานเท่ากับ 1 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการที่จะศึกษาผลกระทบของความหนาของชั้นวัสดุประสานที่มีผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัสดุ ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองเพิ่มขึ้นโดยเปลี่ยนความหนาของชั้นวัสดุประสานไปโดยแบบจำลองที่ถูกสร้างเพิ่มขึ้นนี้ประกอบด้วยแบบจำลองที่มีชั้นวัสดุประสานหนา 0.1, 0.4, 0.7, 2, 4 และ 10 มิลลิเมตร เมื่อสร้างแบบจำลองเสร็จได้ทำการศึกษาตามกระบวนการที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นเช่นเดียวกัน

9. การประมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี

ทำการประมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี (Intensity of Singularity) โดยนำผลการคำนวณความเค้นที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ไปกำหนดจุดลงในกราฟตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อการเก็บผลการคำนวณ จากนั้นนำกราฟที่ได้ไปใส่ในโปรแกรมวิเคราะห์กราฟ เพื่อทำการประมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีด้วยวิธีกำลังสองถดถอย (Least Square Method) โดยสมการที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีคือสมการที่ 15 ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีนั้นประกอบด้วยค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณและค่าระดับความรุนแรงของซิงกูลาริตี โดยค่าระดับความรุนแรงของซิงกูลาริตีสามารถคำนวณได้จากความแตกต่างของคุณสมบัติเชิงกลของบริเวณรอยต่อนั้นๆ

$$\frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_0} = K_{\theta\theta} + K_{\theta\theta 1} \left(\frac{r}{t} \right)^{-\lambda} + K_{\theta\theta 2} \ln \left(\frac{r}{t} \right) + K_{\theta\theta 3} \ln \left(\frac{r}{t} \right)^2 \quad (15)$$

ค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีตัวที่สนใจ คือ $K_{\theta\theta 1}$ เนื่องจากเป็นค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีตัวที่ได้รับอิทธิพลจากผลของค่าระดับความรุนแรงของซิงกูลาริตี (λ) และสัญลักษณ์และตัวแปรต่างๆในสมการที่ 15 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- $\sigma_{\theta\theta}$ คือ ค่าความเค้นในตั้งฉากกับรัศมีของการเก็บผล (r)
- σ_0 คือ ค่าความเค้นของภาระแรงดึงที่กระทำต่อแบบจำลอง
- $K_{\theta 0}$ คือ ค่าคงที่ของความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีตัวที่ 0
- $K_{\theta 0_1}$ คือ ค่าคงที่ของความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีตัวที่ 1
- $K_{\theta 0_2}$ คือ ค่าคงที่ของความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีตัวที่ 2
- $K_{\theta 0_3}$ คือ ค่าคงที่ของความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีตัวที่ 3
- λ คือ ค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตี
- r คือ ระยะรัศมีในทิศทางการเก็บผลจากจุดมุมรอยต่อระหว่างวัสดุ

ค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตีนั้นได้แสดงในตารางที่ 2 ด้านล่าง โดยค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตีนี้สามารถคำนวณได้จากคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุบริเวณรอยต่อนั้นๆ จากตารางที่ 2 จะพบว่าภายในตารางจะประกอบด้วยค่าทั้งหมด 2 ค่า คือ ค่าไอเกน (p) และ ค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตี (λ) ซึ่งในแต่ละรอยต่อของวัสดุจะมีค่าอยู่ทั้งหมด 4 ชุด ทำให้ในสมการที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีนั้นจะประกอบด้วยพจน์ทั้งหมด 4 พจน์ดังแสดงในสมการที่ 15 ค่าไอเกนและค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตีมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในสมการที่ 16

$$p + \lambda = 1 \quad (16)$$

ตารางที่ 2 ค่าไอเกนและค่าระดับความรุนแรงของความเค้นซิงกูลาริตี

Silicon – Resin Interface		Resin – FR4.5 Interface	
p	λ	p	λ
1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
0.605	0.395	0.781	0.219

ที่มา: Koguchi (2010)

10. ค่าความเข้มของความเค้นที่แนวองศา θ และ ϕ ต่างๆ

ทำการเก็บผลความเค้นจากจุดมุมระหว่างรอยต่อของวัสดุไปในทิศทางขององศา θ และ ϕ ต่างๆ จากนั้นทำการประมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี (Intensity of Singularity) เพื่อดูแนวโน้มของความเสียหายต่อการเกิดความเสียหายว่าบริเวณใดของชิ้นงานที่มีโอกาสเกิดความเสียหายก่อนและทิศทางของความเสียหายจะไปในทิศทางใดจากจุดมุมระหว่างรอยต่อของวัสดุ

11. การทดลองสร้างแบบจำลองเพื่อลดปริมาณความเค้นที่จุดมุมรอยต่อ

เนื่องจากพบว่าความเค้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุมีค่าสูงมากซึ่งทำให้ค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตี (Intensity of Singularity) มีค่าสูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงคิดวิธีเพื่อลดความเค้นดังกล่าวลงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับรอยต่อระหว่างวัสดุของชิ้นงาน โดยได้ตั้งสมมติฐานว่าหากมุมระหว่างรอยต่อของวัสดุมีความโค้งมนขึ้นจะสามารถทำให้ความเค้นที่รอยต่อลดลงได้ จากนั้นจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีมุมระหว่างรอยต่อของวัสดุมีความโค้งมนแล้วจึงนำไปปรับภาระอุณหภูมิและแรงดึงเช่นเดียวกับแบบจำลองปกติ แล้วทำการเก็บผลปริมาณความเค้นที่รอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 รอยต่อเพื่อมาวิเคราะห์ในลำดับถัดไป

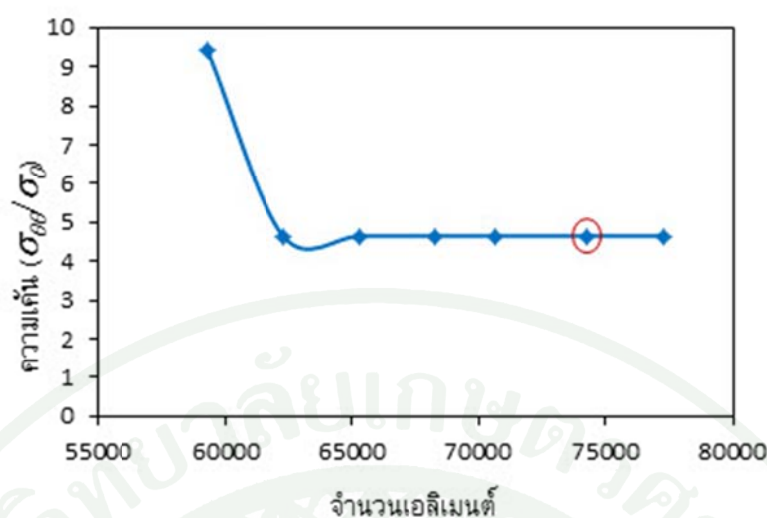
ผลและวิจารณ์

1. ผลการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.1 จำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นแบบจำลองที่ถูกปรับปรุงมาจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยของนายกิตติศักดิ์ ทวีรัตนผล ซึ่งได้ผ่านการทำกระบวนการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่สามารถให้ผลการคำนวณมีความเสถียรและแม่นยำมาแล้ว โดยกระบวนการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมของแบบจำลองทำโดยสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นในตัวโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์โดยให้ความละเอียดของการแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองไม่เท่ากัน จากนั้นทำการคำนวณผลของความเค้นที่เกิดขึ้น โดยจะเก็บผลการคำนวณค่าความเค้นที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ณ ตำแหน่งที่ 2 ไมโครเมตรในทุกๆ แบบจำลอง แล้วนำผลความเค้นที่ได้มากำหนดจุดลงในกราฟความสัมพันธ์ที่แกน y คือค่าความเค้น และแกน x คือจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองต่างๆดังแสดงในภาพที่ 26 จากภาพจะเห็นได้ว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่ให้ผลการคำนวณมีความเสถียรจะเริ่มต้นที่ความละเอียดของเอลิเมนต์เท่ากับ 65,000 เอลิเมนต์ และเพื่อความแม่นยำและความเสถียรของผลการคำนวณแบบจำลองที่ใช้ในการทำวิจัยของนายกิตติศักดิ์ ทวีรัตนผลจึงได้เลือกความละเอียดของการจำนวนเอลิเมนต์อยู่ที่ 74,000 เอลิเมนต์

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นจำนวนเอลิเมนต์ที่เลือกใช้ในแบบจำลองนี้คือ 74,000 เอลิเมนต์ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนี้เป็นแบบจำลองของนายกิตติศักดิ์ ทวีรัตนผลซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้ทำการศึกษาความเค้นที่เกิดบริเวณจุดมุมของรอยต่อที่รับภาระทางแรงดึงระหว่างวัสดุ 2 ชนิด ซึ่งในงานวิจัยได้สร้างแบบจำลองให้มีขนาด 1 ใน 8 ของขนาดชิ้นงานจริง แต่ในงานวิจัยที่กำลังทำการศึกษาอยู่ในขณะนี้ได้ทำการเพิ่มวัสดุเข้าไปอีก 1 ชนิดทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัสดุเพิ่มขึ้นอีก 1 รอยต่อ ดังนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะมีขนาด 1 ใน 4 ของขนาดชิ้นงานจริงตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในส่วนของวิธีการ ดังนั้นจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้จะมีจำนวนเท่ากับ 126,000 เอลิเมนต์ที่แบบจำลองที่มีความหนาของวัสดุประสานเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ซึ่งที่จำนวนเอลิเมนต์ดังกล่าวนี้สามารถให้ผลการคำนวณที่สามารถเชื่อถือได้

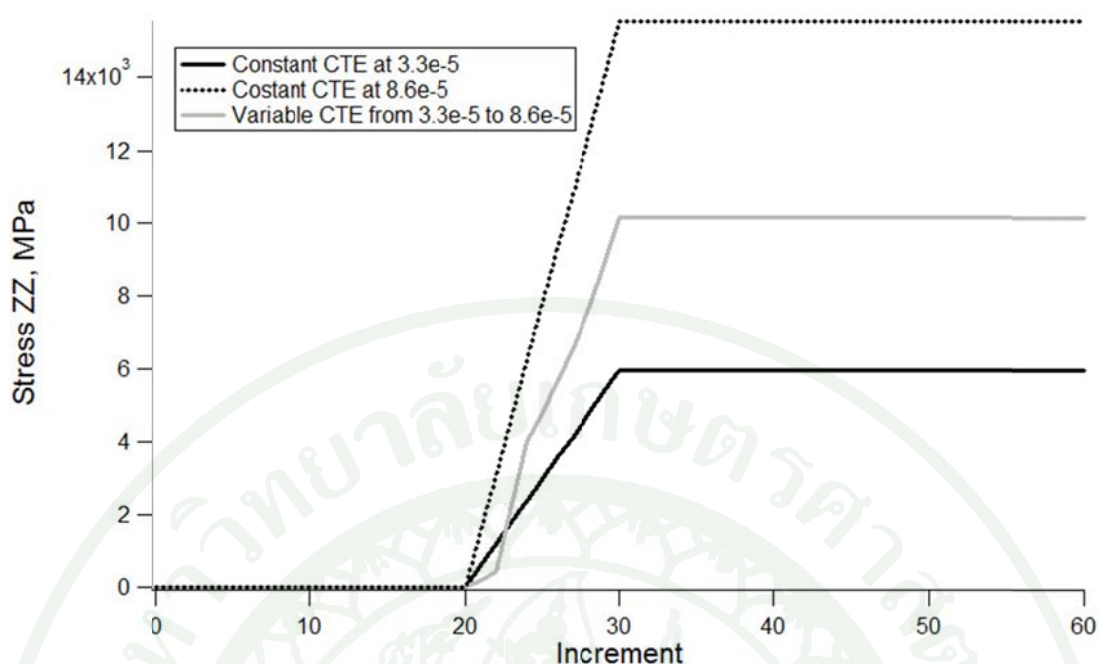


ภาพที่ 26 แสดงกราฟการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

ที่มา: กิตติศักดิ์ (2553)

2. ผลการพิสูจน์ความเค้นในวัสดุเรซินที่คุณสมบัติวัสดุเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

จากภาพที่ 27 จะเห็นได้ว่าในกรณีของผลการคำนวณความเค้นที่ได้จากแบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนคงที่นั้น อัตราการเพิ่มความเค้นซึ่งเกิดจากการหดตัวเนื่องจากการลดอุณหภูมิจะมีค่าคงที่หรือกราฟของความเค้นมีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยเมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 0.000086 จะได้ผลการคำนวณตามเส้นประสีดำ โดยผลความเค้นจะมีปริมาณสูงที่สุดเนื่องจากวัสดุมีการหดตัวสูงที่สุด ส่วนในกรณีกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ 0.000033 นั้นผลความเค้นที่ได้จะเป็นตามเส้นทึบสีดำ ซึ่งผลความเค้นจะมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากวัสดุเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ซึ่งแตกต่างกับผลการคำนวณความเค้นในกรณีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนไม่คงที่ โดยในกรณีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนไม่คงที่นั้นความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงตามเส้นทึบสีเทา โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงความเค้นที่รอบการคำนวณต่างๆจะมีค่าไม่คงที่โดยเมื่อลดอุณหภูมิมายังอุณหภูมิห้อง คือ 25 องศาเซลเซียสนั้นผลความเค้นในกรณีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนไม่คงที่จะมีค่าอยู่ระหว่างผลความเค้นที่ได้จากกรณีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ทั้ง 2 กรณี ซึ่งเป็นการพิสูจน์ได้ว่าความเค้นมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป

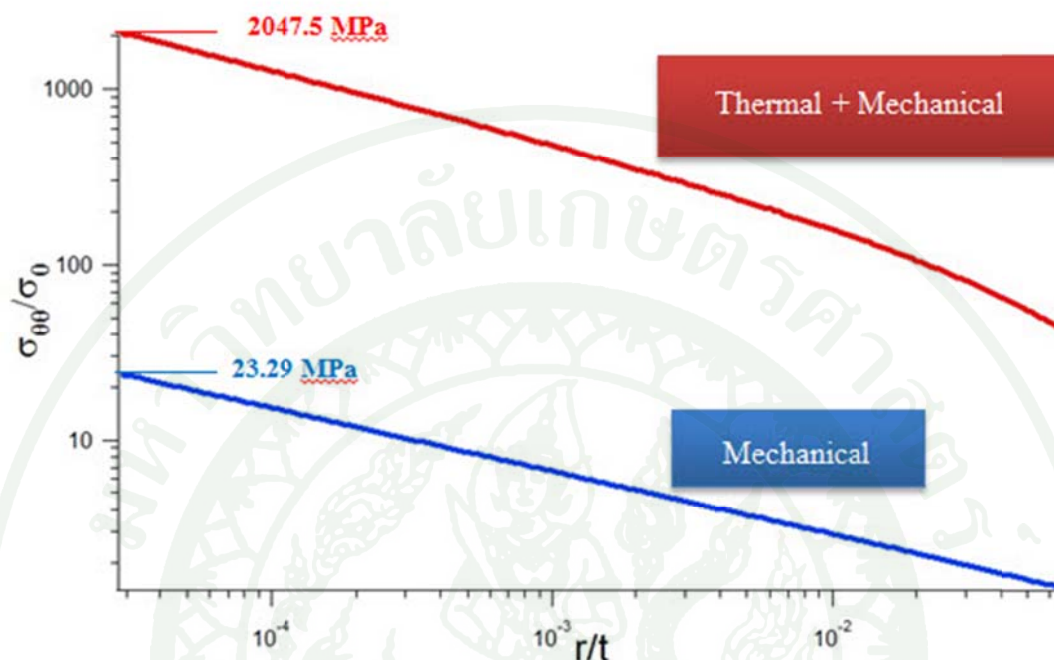


ภาพที่ 27 ผลความเค้นของกรณีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนคงที่และไม่คงที่ตามรอบการคำนวณต่างๆ

3. ผลจากการแบ่งกรณีการศึกษา

จากการที่ได้ทำการแบ่งกลุ่มกรณีการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มีเฉพาะภาระทางแรงดึง และกรณีที่มีทั้งภาระทางอุณหภูมิและแรงดึง โดยการเก็บผลการคำนวณนั้นจะเก็บผลการคำนวณที่นาทีที่ 30 ของการทดลองตามภาพที่ 20 และ 21 โดยนาทีที่ 30 คือ เวลาที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียสและมีภาระทางแรงดัดขนาด 1 เมกะปาสคาลกระทำที่ผิวด้านบนของแบบจำลอง ผลการคำนวณที่เก็บได้ได้แสดงในภาพที่ 28 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการแบบกลุ่มกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณีทำให้สามารถแสดงผลกระทบของภาระทางอุณหภูมิได้อย่างชัดเจน โดยจากภาพเส้นสีแดงคือผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองที่รับภาระทางอุณหภูมิก่อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องจากนั้นรับภาระทางแรงดึง และเส้นสีฟ้า คือ เส้นของผลการคำนวณความเค้นจากกรณีภาระทางแรงดึงเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบผลจากทั้ง 2 กรณีจะเห็นได้ว่าผลความเค้นที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเมื่อมีภาระทางอุณหภูมิกระทำมีค่ามากกว่าอย่างชัดเจน โดยในที่นี้เพิ่มจาก 23.29 เมกะปาสคาลในกรณีที่มีเฉพาะภาระทางแรงดึง (เส้นสีฟ้า) เป็น 2,047.5 เมกะปาสคาล จึงสามารถตีความได้ว่าภาระทางอุณหภูมิที่กระทำกับวัสดุทำให้เกิดความเค้นสูงเนื่องจากการหดตัว

ตามค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแต่ละวัสดุที่มีค่าไม่เท่ากันบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ

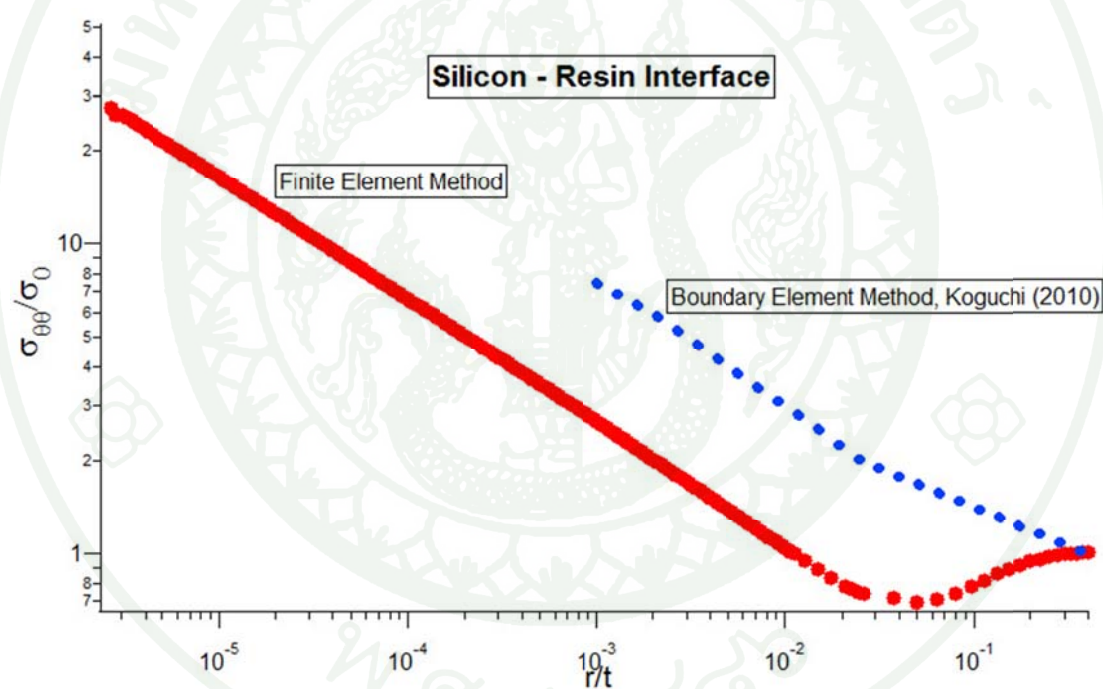


ภาพที่ 28 แสดงการเปรียบเทียบผลความเค้นเมื่อมีภาระทางอุณหภูมิเพิ่มเข้ามา

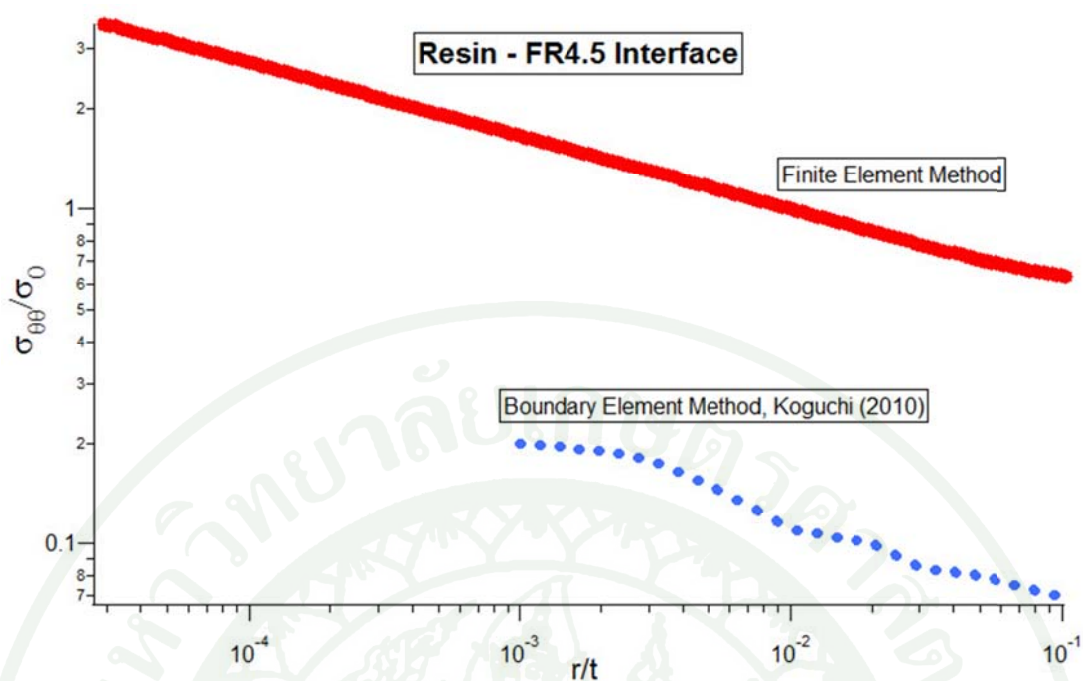
4. ผลการเปรียบเทียบผลจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลจากวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์

จากการนำผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มากำหนดจุดลงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นตามแนวทิศทางการเก็บผลหารด้วยความเค้นจากภาระแรงดึงกับระยะรัศมีจากจุดมุมรอยต่อหารด้วยความหนาของชิ้นวัสดุประสานได้ผลดังแสดงในภาพที่ 29 และ 30 โดยในภาพที่ 29 จะเป็นผลการคำนวณที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซิน และภาพที่ 30 เป็นผลการคำนวณที่รอยต่อของเรซินกับ FR4.5 จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลสอดคล้องกับผลการคำนวณที่ได้จากวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ที่เคยมีผู้ทำวิจัยไว้ในอดีต จึงเป็นการแสดงให้เห็นได้ว่าแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการทำวิจัยชิ้นนี้ให้ผลการคำนวณอยู่ในระดับที่สามารถเชื่อถือได้และสามารถพิสูจน์ได้ว่าแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้มีความถูกต้อง ทั้งนี้จากภาพที่ 29 และ 30 จะเห็นได้ว่าเส้นผลการคำนวณจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีระยะห่างกับเส้นผลการคำนวณจากวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ค่อนข้างสูงเนื่องจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นนี้มีความละเอียดของเอลิเมนต์บริเวณสนามความเค้นจึง

คุณาริต์ที่สูงมาก จึงทำให้ค่าความเค้นที่ได้นั้นเป็นค่าความเค้นในระดับความละเอียดที่สูงกว่าซึ่งจากหลักการทฤษฎีการแตกร้าวได้กล่าวไว้ว่าเมื่อระยะร้าวมีเข้าใกล้จุดมุมระหว่างรอยต่อของวัสดุหรือจุดปลายรอยแตกร้าวความเค้นที่บริเวณดังกล่าวจะมีปริมาณสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความเค้นที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีค่าสูงกว่าความเค้นจากแบบจำลองบาวนด์รีเอลิเมนต์แบบจำลองของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะมีความละเอียดของจุดต่อ (node) และ จำนวนเอลิเมนต์ที่มากกว่าวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์อย่างมากและบริเวณสนามความเค้นซึ่งคุณาริต์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้ทำการสร้างเอลิเมนต์ตามแนวพิกัดทรงกลม ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าความเค้นที่คำนวณได้มีความแม่นยำสูงขึ้นและทำให้สามารถเข้าไปศึกษาพฤติกรรมของความเค้นในระดับความละเอียดที่สูงขึ้นได้และทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมรวมทั้งความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายได้ใกล้เคียงความจริงมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ของศาสตราจารย์โคกุจิที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีบาวนด์รีเอลิเมนต์ของ ศาสตราจารย์โคะกุจิที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

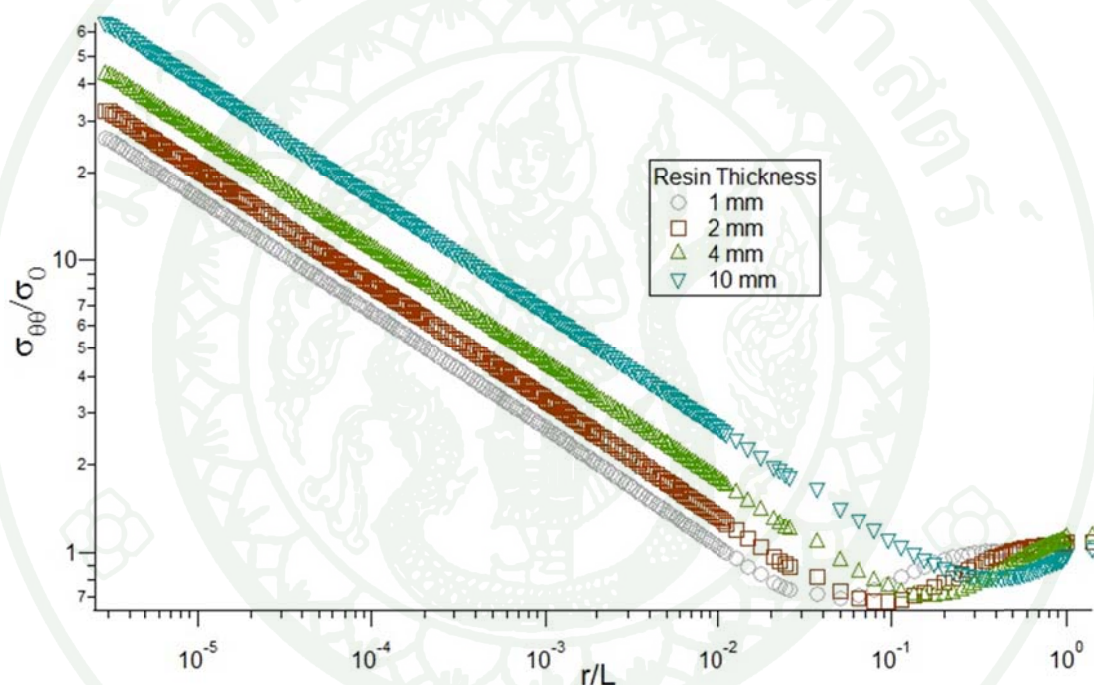
5. ผลความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุในทุกความหนาของชั้นวัสดุประสาน

5.1 ผลความเค้นกรณีคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคงที่

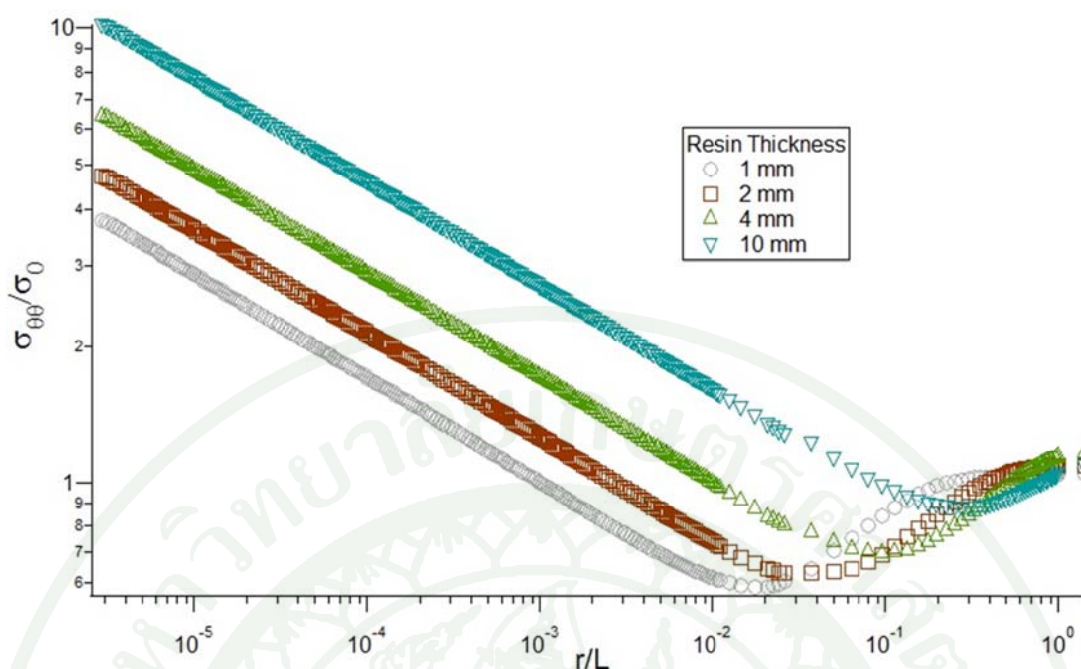
5.1.1 กรณีรับภาระแรงดึง

ผลของความเค้นในกรณีภาระแรงดึงได้แสดงไว้ในภาพที่ 31 และ 32 โดยการเก็บผลความเค้นในกรณีนี้จะทำการเก็บผลโดยให้แกน y เป็นค่าความเค้นตามแนวตั้งจากทิศทางการเก็บผลหารด้วยความเค้นจากภาระแรงดึง และแกน x เป็นระยะรัศมีจากจุดมุมรอยต่อหารด้วยความกว้างของแบบจำลองเนื่องจากในกรณีภาระแรงดึงนั้นด้านกว้างของแบบจำลองเป็นด้านที่มีผลต่อปริมาณแรงที่กระทำต่อแบบจำลอง จะเห็นว่าที่ทั้งสองรอยต่อความเค้นจะมีค่าสูงสุดที่จุดมุมของรอยต่อจากนั้นความเค้นจะลดลงตามลำดับเมื่อระยะรัศมีเพิ่มมากขึ้น โดยสาเหตุที่ความเค้นมีค่าสูงสุดที่จุดมุมระหว่างรอยต่อนั้นเกิดจากบริเวณจุดมุมรอยต่อระหว่างวัสดุเป็นจุดที่เกิดการดึงของเนื้อวัสดุประสานซึ่งเป็นผลจากการที่ชิ้นงานรับแรงดึงภายนอกทำให้เกิดการเสียรูปในทิศตั้งฉากแรงดึงในบริเวณวัสดุประสานซึ่งการเสียรูปในทิศทางตั้งฉากนี้ของวัสดุประสานทำให้เกิดแรง

ดิ่งสูงที่บริเวณจุดมุมรอยต่อ และจากการต่อกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิดซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลแตกต่างกันสูงประกอบกับบริเวณรอยต่อมีลักษณะเป็นมุมแหลมซึ่งทำให้การกระจายตัวของความเค้นทำได้ไม่ดีจึงเกิดบริเวณที่ความเค้นสะสมตัวทำให้ความเค้นมีค่าสูง และสำหรับภาระแรงดิ่งจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความหนาของวัสดุประสานจะมีผลทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นที่รอยต่อทั้ง 2 มีค่าสูงขึ้นจึงเป็นการแสดงให้เห็นได้ว่าความหนาของชั้นวัสดุประสานมีผลต่อปริมาณความเค้นที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างวัสดุ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 รอยต่อจะพบว่าที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินจะมีปริมาณความเค้นสูงกว่าที่รอยต่อของเรซินกับ FR4.5 ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของยังระหว่างซิลิคอนกับเรซินมีค่ามากกว่าเรซินกับ FR4.5



ภาพที่ 31 ผลความเค้นกรณีภาระแรงดิ่งที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน

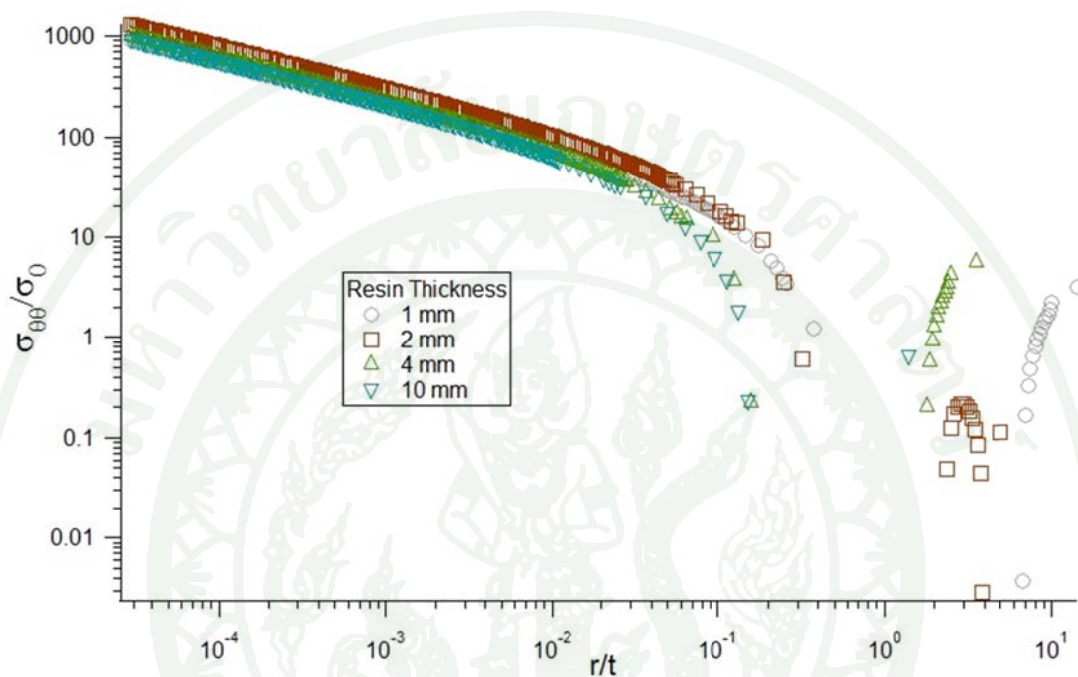


ภาพที่ 32 ผลความเค้นกรณีภาระแรงดึงที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

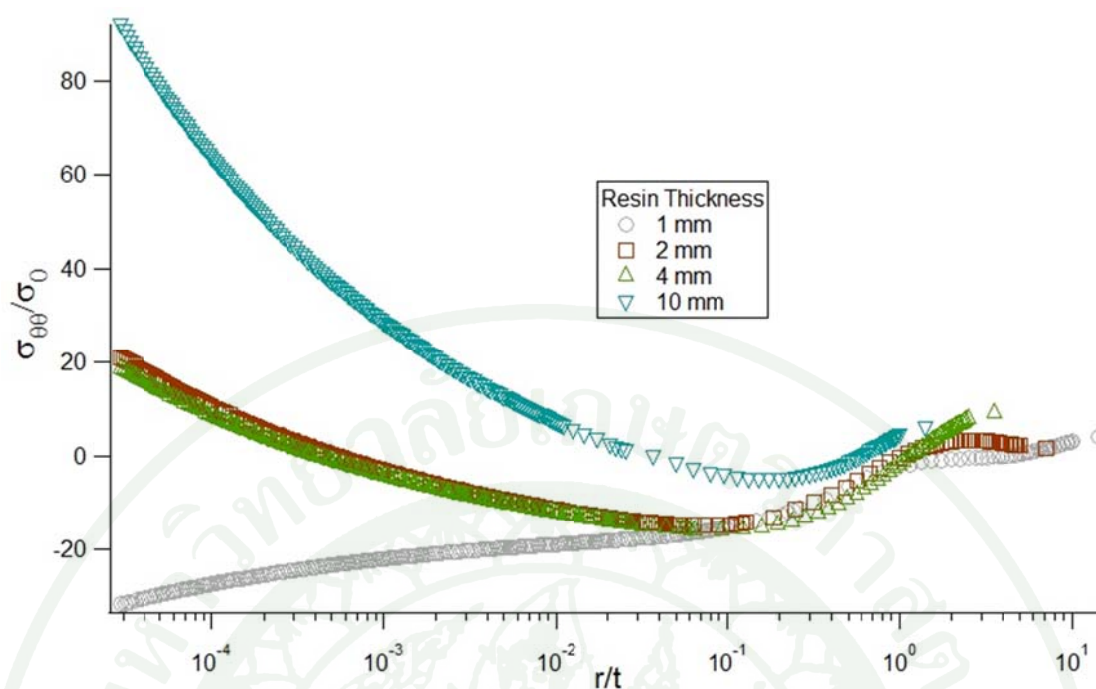
5.1.2 กรณีรับภาระอุณหภูมิและแรงดึง

การเก็บผลในกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงจะทำการเก็บผลโดยให้แกน y เป็นค่าความเค้นตามแนวตั้งฉากทิศทางการเก็บผลหารด้วยความเค้นจากภาระแรงดึง และแกน x เป็นระยะรัศมีจากจุดมุมรอยต่อหารด้วยความหนาของชั้นวัสดุประสานเนื่องจากในกรณีของภาระอุณหภูมิและแรงดึงนั้นด้านที่มีผลต่อปริมาณความเค้นคือด้านความหนาของชั้นวัสดุประสาน และเพื่อเป็นการปรับให้สนามความเค้นเชิงกลูริดีให้ทุกความหนามีขนาดเท่ากันเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลของความเค้นได้ โดยผลของความเค้นได้แสดงในภาพที่ 33 และ 34 จากภาพจะเห็นว่าปริมาณความเค้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดมุมของรอยต่อระหว่างวัสดุและความเค้นจะลดลงตามลำดับเมื่อระยะรัศมีเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความเค้นกับกรณีภาระแรงดึงพบว่าเมื่อมีภาระทางอุณหภูมิกระทำก่อนที่จะรับภาระแรงดึงนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นทั้ง 2 รอยต่อจะมีค่าสูงขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้เป็ผลมาจากการยึดและหดตัวของวัสดุทั้งสามชนิดขณะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมีค่าไม่เท่ากันทำให้เมื่อวัสดุเกิดการหดตัวจากการลดอุณหภูมิจึงเกิดการดึงกันของเนื้อวัสดุบริเวณรอยต่อ และเมื่อพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความหนาจะพบว่า ที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินนั้นการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นวัสดุประสานยังไม่สามารถแสดงแนวโน้มของผลออกมาได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับรอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 โดยที่รอยต่อ

ระหว่างเรซินกับ FR4.5 จะเห็นว่าแนวโน้มของความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นสาเหตุมาจากค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ใช้ในการคำนวณ ณ ขั้นตอนนี้ยังเป็นคุณสมบัติเชิงกลที่มีค่าคงที่ของทุกวัสดุ ซึ่งในลำดับต่อไปจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเรซินให้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเพื่อให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 33 ผลความเค้นกรณีการระอุณหภูมิและแรงดึงที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซิน



ภาพที่ 34 ผลความเค้นกรณีการระอุณหภูมิและแรงดึงที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

5.2 ผลความเค้นกรณีคุณสมบัติเชิงกลของเรซินเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

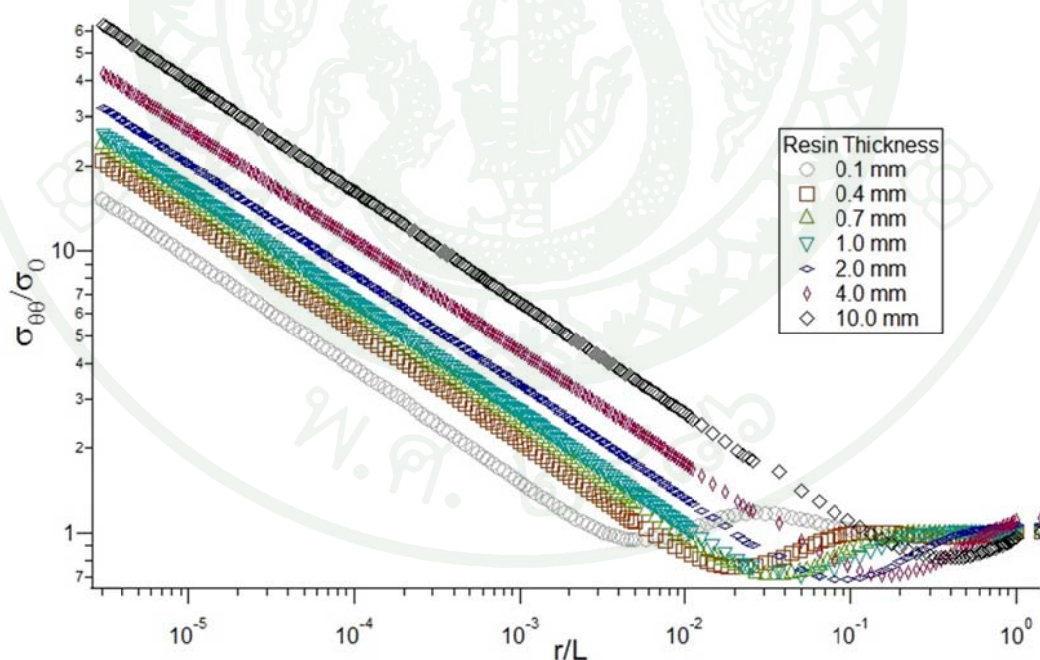
ทำการเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุเรซินให้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและสร้างแบบจำลองที่มีความหนาของชั้นวัสดุประสานลดลงอีก 3 แบบจำลอง โดยมีความหนาของชั้นวัสดุประสาน 0.1, 0.4 และ 0.7 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาพฤติกรรมของความเค้นเมื่อลดความหนาของชั้นวัสดุประสาน

5.2.1 กรณีรับภาระแรงดึง

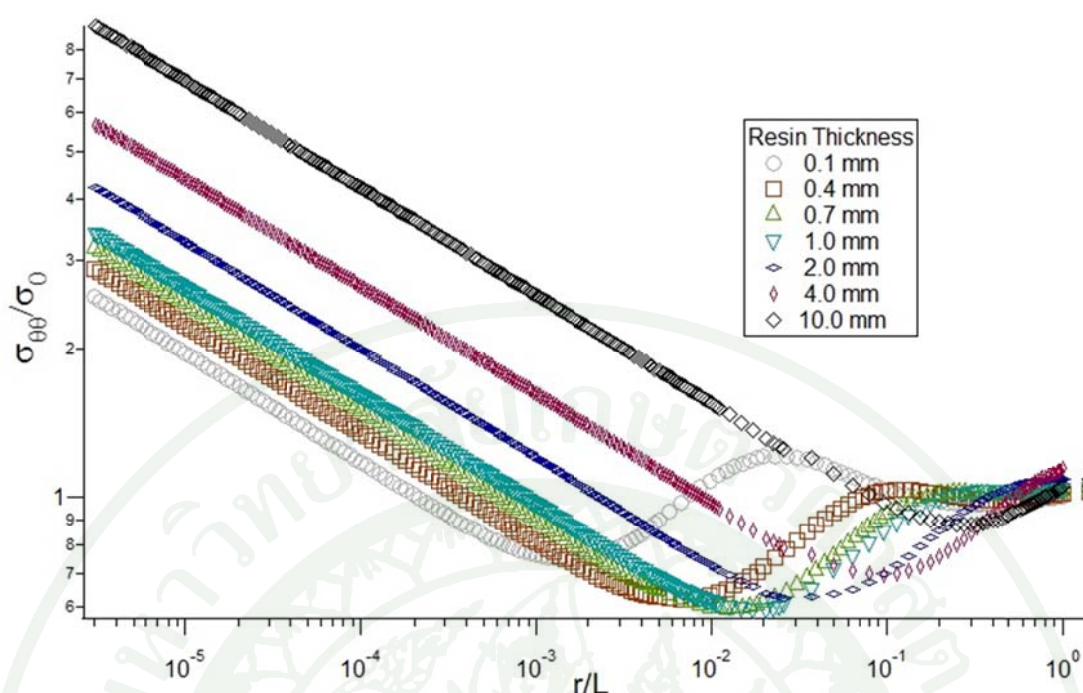
ผลความเค้นกรณีการแรงดึงเมื่อทำการเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงกลของเรซินให้มีความเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมทั้งนี้เป็นสาเหตุจากการที่ไม่มีภาระทางอุณหภูมิมากระทำกับแบบจำลอง จึงทำให้ผลของค่าความยืดหยุ่นของยังที่นำไปคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมที่ใช้ตอนที่คำนวณแบบคุณสมบัติเชิงกลมีค่าคงที่

ผลจากการสร้างแบบจำลองที่มีความหนาของชั้นวัสดุประสานลดลง จะเห็นได้จากภาพที่ 35 และ 36 ว่าลักษณะพฤติกรรมของความเค้นที่ทั้ง 2 รอยต่อวัสดุมีลักษณะเหมือนเดิม

คือจะมีความเค้นสูงสุดอยู่ที่จุดมุมของรอยต่อและลดลงเมื่อระยะรัศมีเพิ่มขึ้น และความเค้นจะมีค่าน้อยที่สุดในแบบจำลองที่มีความหนาของชั้นวัสดุประสาน 0.1 มิลลิเมตร โดยความเค้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นวัสดุประสานเพิ่มขึ้นและที่ความหนาของชั้นวัสดุประสานเท่ากับ 10 มิลลิเมตรจะมีความเค้นสูงสุดเนื่องจากที่ความหนาของวัสดุประสาน 10 มิลลิเมตรวัสดุประสานเกิดการเสียรูปในทิศตั้งฉากแรงกระทำมากที่สุดจึงเกิดแรงดึงที่จุดมุมรอยต่อสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความเค้นระหว่างรอยต่อพบว่าที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินจะมีความเค้นสูงกว่าที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 โดยสาเหตุที่ทำให้ที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินมีความเค้นมากกว่าที่รอยต่อของเรซินกับ FR4.5 เนื่องจากความแตกต่างของคุณสมบัติเชิงกลระหว่างซิลิคอนกับเรซินมีมากกว่าเรซินกับ FR4.5 และจากภาพที่ 31 และ 32 จะเห็นว่าพฤติกรรมของความเค้นบริเวณรอยต่อทั้ง 2 รอยต่อนั้นมีลักษณะลดลงและเพิ่มขึ้นในช่วงระยะ 0.001 ถึง 0.1 นั้นเป็นผลมาจากการที่ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็วบริเวณจุดมุมของรอยต่อ จึงทำให้ที่บริเวณระยะ 0.001 ถึง 0.1 นั้นเกิดช่วงที่มีความเค้นต่ำกว่า 1 เพื่อเป็นการชดเชยกับช่วงความเค้นสูงบริเวณจุดมุมรอยต่อซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นไปตามหลักการของการอนุรักษ์พลังงานหรือหลักการสมดุลแรงในบริเวณใกล้เคียงของรอยต่อ



ภาพที่ 35 ผลความเค้นกรณีภาระแรงดึงที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน

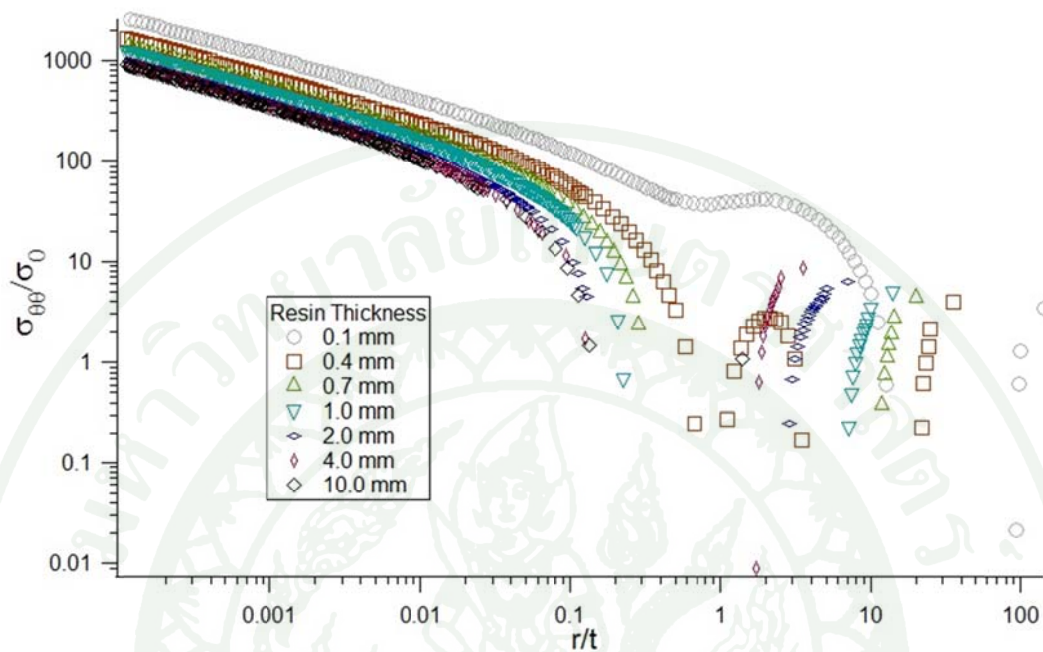


ภาพที่ 36 ผลความเค้นกรณีภาระแรงดึงที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

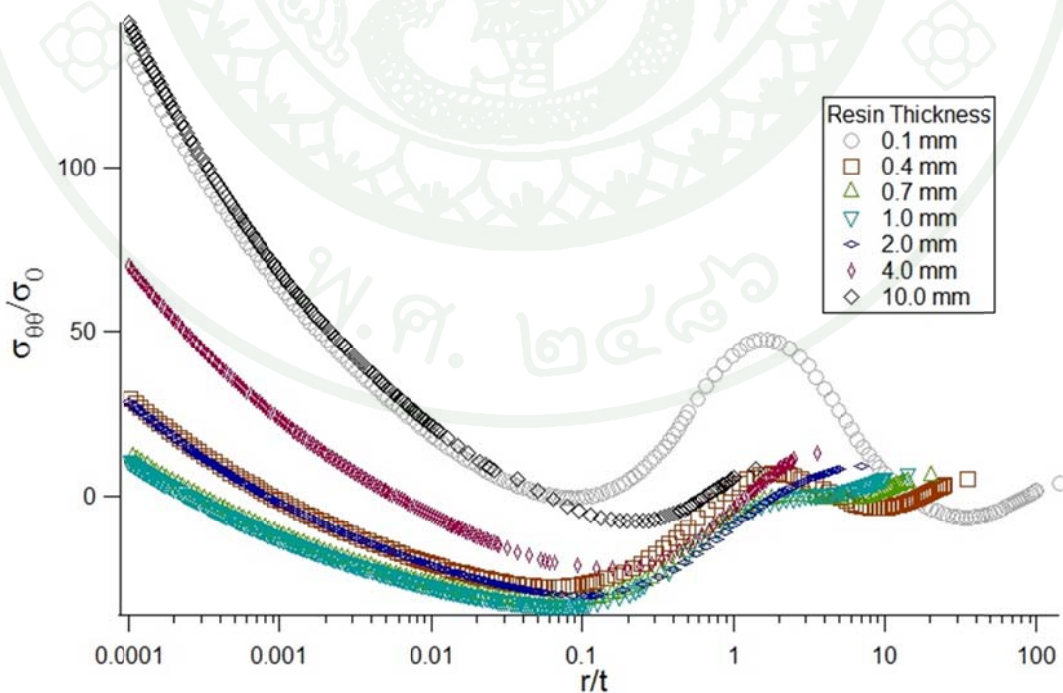
5.2.2 กรณีรับภาระอุณหภูมิและแรงดึง

ผลจากกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงได้แสดงไว้ในภาพที่ 37 และ 38 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงกลของเรซินให้เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแล้วพบว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละความหนาของชั้นวัสดุประสานสามารถแสดงความแตกต่างออกมาให้เห็นได้ชัดเจน โดยที่บริเวณรอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินพบว่าแบบจำลองที่ให้ความหนาของชั้นวัสดุประสาน 0.1 มิลลิเมตรจะมีความเค้นสูงที่สุดและความเค้นจะลดลงตามลำดับเมื่อความหนาของชั้นวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การวิเคราะห์ความเค้นที่ได้กล่าวมานี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยการที่ใช้อัตราส่วนรัศมีต่อความหนาของชั้นวัสดุประสานมีค่าเท่ากัน และในบริเวณรอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ความเค้นจะมีค่าสูงสุดที่ความหนาของชั้นวัสดุประสาน 10 มิลลิเมตร และความเค้นมีค่าน้อยที่สุดที่ความหนาของชั้นวัสดุประสาน 1 มิลลิเมตร ทั้งนี้เป็นสาเหตุมาจากในช่วงความหนาของชั้นวัสดุประสานที่ 0.1 ถึง 1 มิลลิเมตรนั้นรอยต่อระหว่างสองวัสดุมีระยะห่างระหว่างรอยต่อน้อยมากจึงทำให้ความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินแพร่กระจายลงมารอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 เป็นผลทำให้ความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ในช่วงความหนาเรซินที่ 0.1 ถึง 1 มิลลิเมตรมีค่าสูง แต่หลังจากความหนา 2 มิลลิเมตรเป็นต้นไปอิทธิพลของความเค้นของรอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินที่แพร่กระจายลงมามีค่าลดลง ทำให้ความเค้นที่รอยต่อระหว่างเร-

ชั้นกับ FR4.5 ในช่วงความหนาเรซิน 2 มิลลิเมตรเป็นต้น ไปกลับมามีค่าสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมความเค้นจากภาระแรงดึง



ภาพที่ 37 ผลความเค้นกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซิน



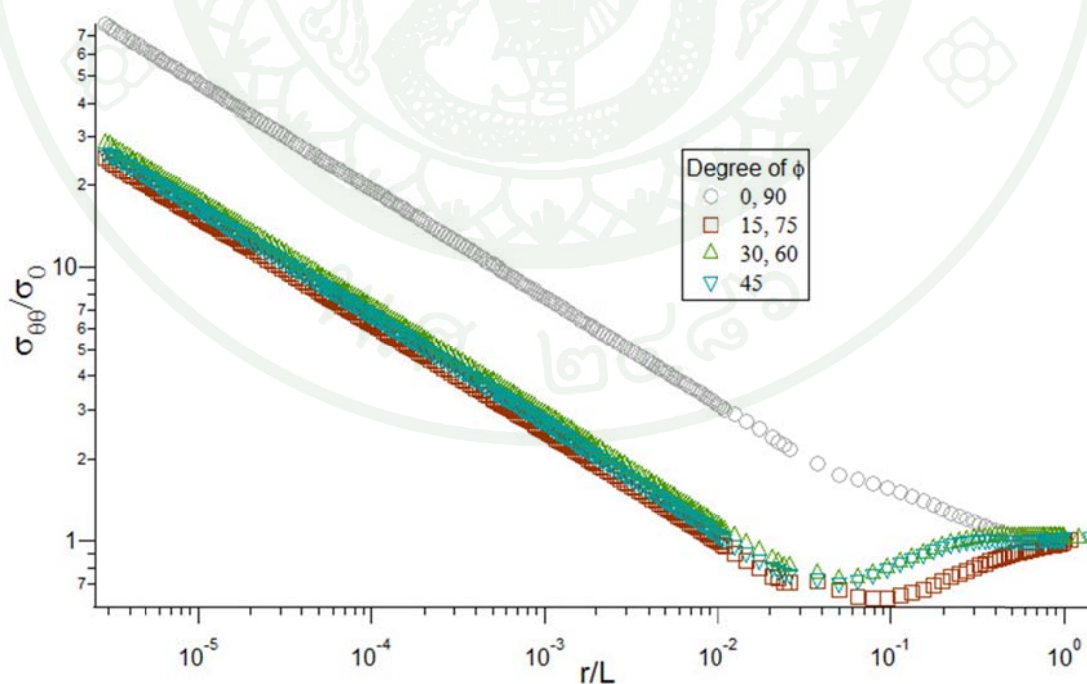
ภาพที่ 38 ผลความเค้นกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

5.3 ผลของความเค้นตามแนวองศา ϕ ต่างๆ

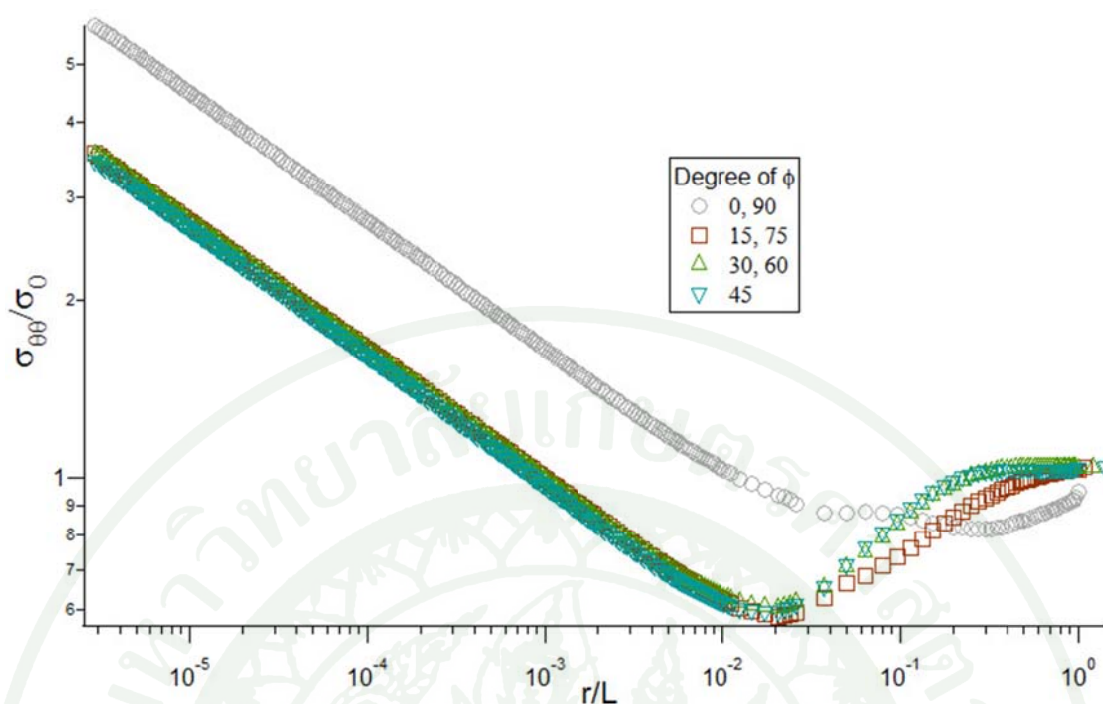
จากผลความเค้นที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้นเป็นผลความเค้นที่ทำการเก็บผลในแนวองศา ϕ เท่ากับ 45 องศา และองศา θ เท่ากับ 90 องศา โดยในส่วนหัวข้อนี้จะแสดงผลความเค้นตามแนวองศา ϕ ต่างๆ โดยยังคงใช้ค่าองศา θ เท่ากับ 90 องศาเช่นเดิม การเก็บผลที่แสดงในหัวข้อนี้ได้ทำขึ้นเพื่อหาแนวทิศองศาบริเวณตลอดหน้าสัมผัสของรอยต่อที่เกิดความเค้นขึ้นสูงที่สุดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

5.3.1 กรณีรับภาระแรงดึง

จากการเก็บผลความเค้นในแนวองศา ϕ ต่างๆในกรณีภาระทางแรงดึงนั้นพบว่าแนวองศาที่มีปริมาณความเค้นสูงที่สุดคือที่องศา 0 และ 90 ส่วนที่แนวองศาอื่นๆนั้นความเค้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากที่องศา 0 และ 90 นั้นเป็นบริเวณขอบของชิ้นงานซึ่งเป็นบริเวณที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าส่วนอื่น โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 รอยต่อพบว่าผลความเค้นที่ได้จากทั้ง 2 รอยต่อมีความสอดคล้องกันแต่ความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินจะมีปริมาณมากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 39 และ 40



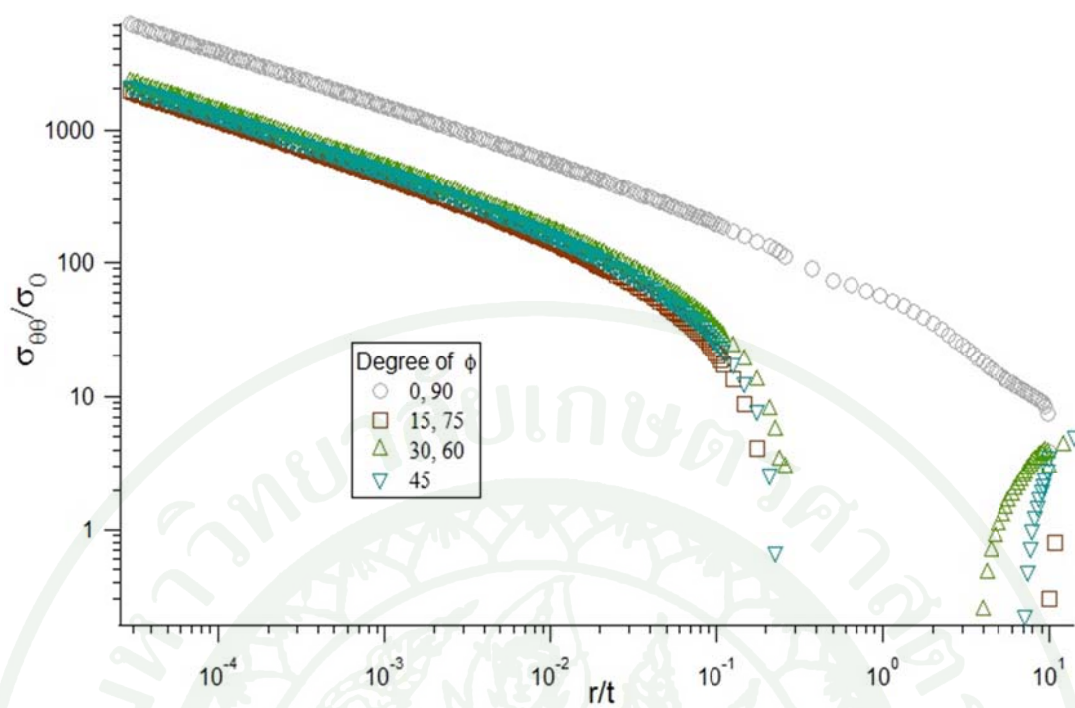
ภาพที่ 39 ผลความเค้นตามแนวองศา ϕ ที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน



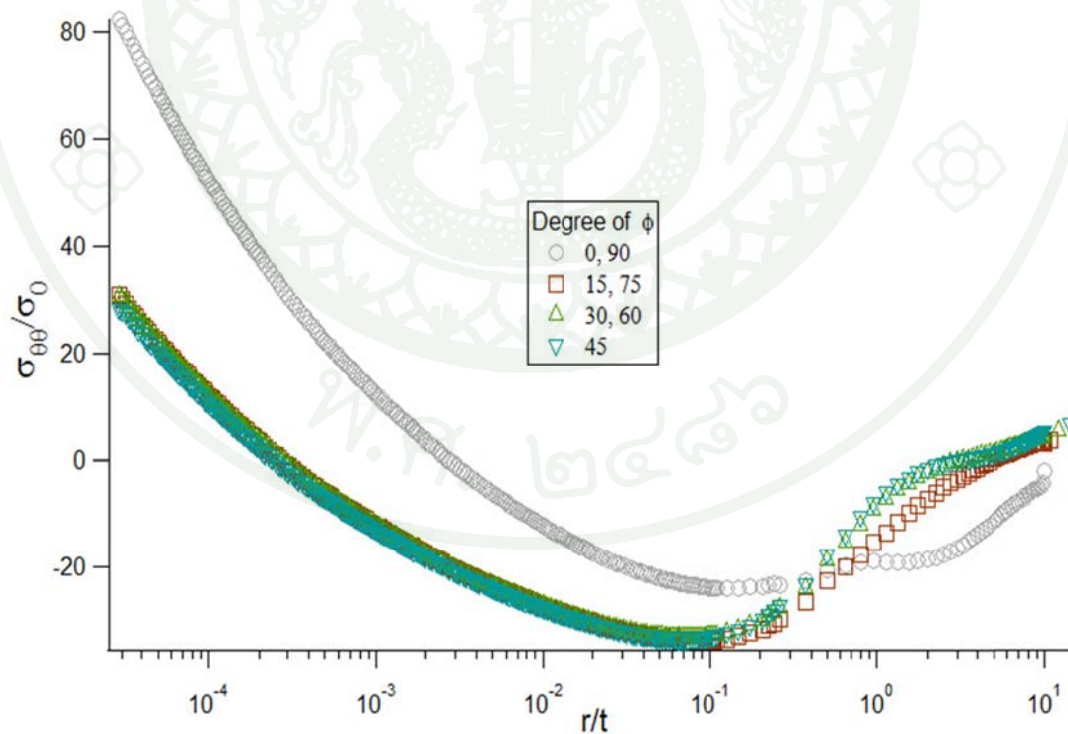
ภาพที่ 40 ผลความเค้นตามแนวองศา ϕ ที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

5.3.2 กรณีรับภาระอุณหภูมิและแรงดึง

ผลความเค้นตามแนวองศา ϕ ต่างๆในกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงได้แสดงไว้ในภาพที่ 41 และ 42 จะสามารถเห็นได้ว่าลักษณะพฤติกรรมของความเค้นจะเหมือนกับในกรณีภาระทางแรงดึง คือความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่แนวองศา 0 และ 90 ซึ่งเป็นบริเวณขอบของชิ้นงาน แต่ความเค้นในกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงนั้นจะมีปริมาณความเค้นที่มากกว่ากรณีภาระแรงดึงอย่างชัดเจน และที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ในภาพที่ 42 พบว่าความเค้นที่รอยต่อนั้นมีค่าเป็นลบหรือเกิดความเค้นอัดเกิดขึ้น ซึ่งสาเหตุที่เกิดความเค้นอัดนั้นคาดว่ามาจากขณะที่ชิ้นงานถูกลดอุณหภูมิลงวัสดุทั้งสามชิ้นได้เกิดการหดตัวในอัตราส่วนที่ไม่เท่ากันทำให้รอยต่อเกิดการโก่งคดขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้เกิดบริเวณอัดเกิดขึ้น และเมื่อนำไปปรับภาระแรงดึงต่อนั้นทำให้เกิดความเค้นดึงขึ้นในชิ้นงาน แต่ความเค้นดึงที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 นี้มีปริมาณน้อยกว่าความเค้นอัดจึงทำให้เกิดบริเวณที่เป็นความเค้นอัดขึ้น



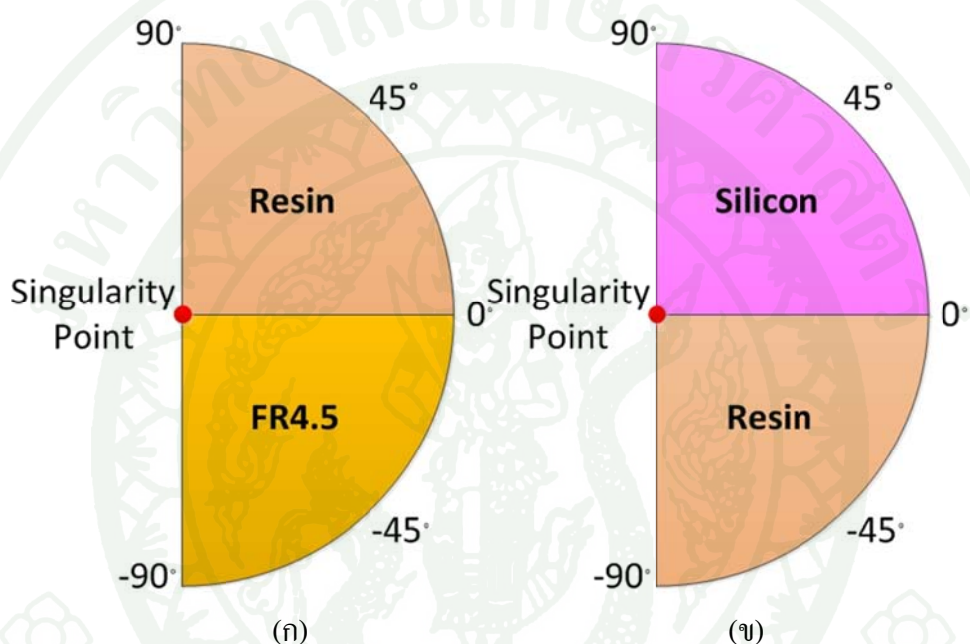
ภาพที่ 41 ผลความเค้นตามองศา ϕ ที่รอยต่อระหว่างซีตคอนกรีตกับเรซิน



ภาพที่ 42 ผลความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

5.4 ผลของความเค้นตามแนวองศา θ ต่างๆ

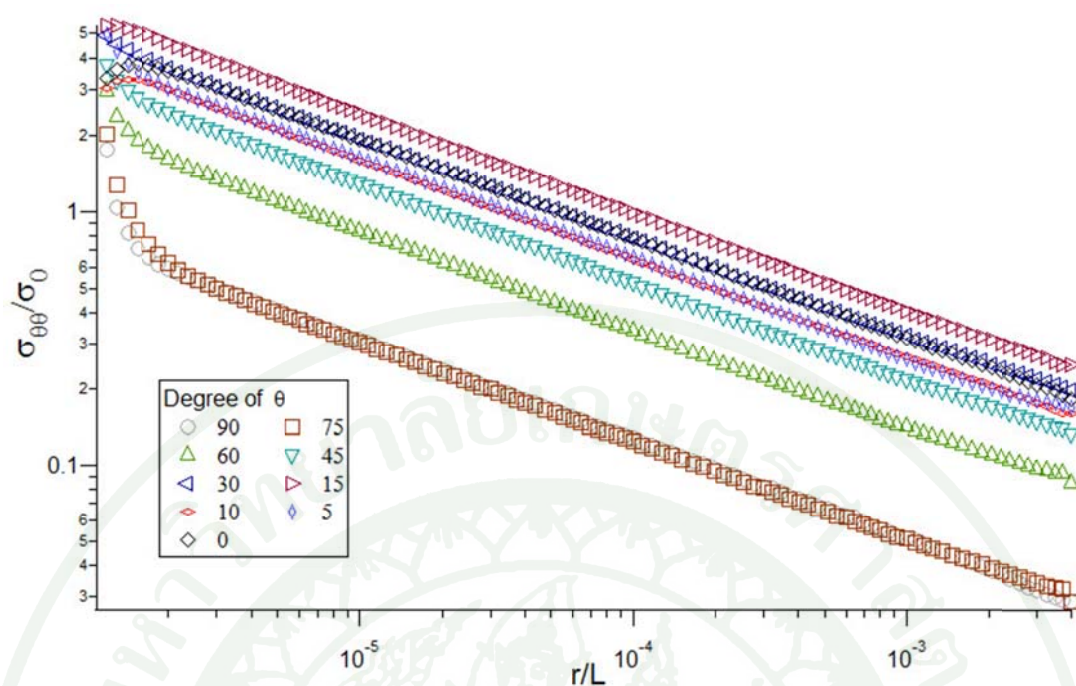
จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3 แนวองศา ϕ ที่มีความเค้นมากที่สุดคือ 0 และ 90 องศา ดังนั้นจึงได้เลือกแนวองศา ϕ ที่ 0 องศาวิเคราะห์ความเค้นตามแนวองศา θ ต่างๆต่อไป เพื่อหาทิศทางที่มีความเค้นสูงที่สุดซึ่งน่าจะเป็นทิศทางในการเริ่มการแตกร้าวได้ ภาพที่ 43 ได้อธิบายรูปแบบการเรียงตัวขององศา θ ต่างๆ



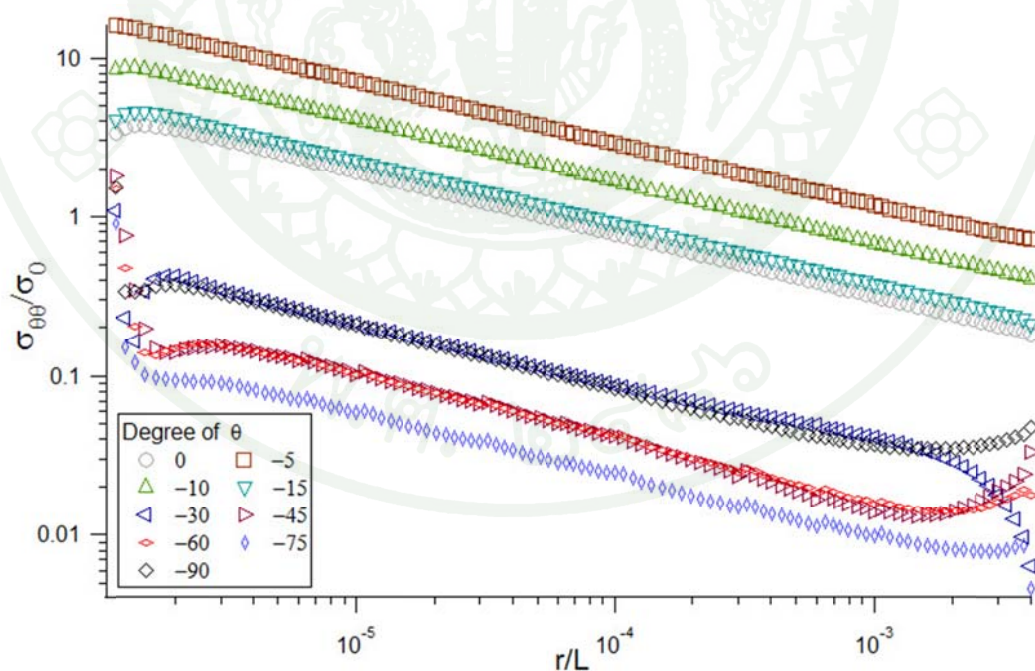
ภาพที่ 43 แสดงพิกัดมุม θ (ก) รอยต่อระหว่าง Resin – FR4.5 และ (ข) รอยต่อระหว่าง Silicon – Resin

5.4.1 กรณีรับภาระทางแรงดึง

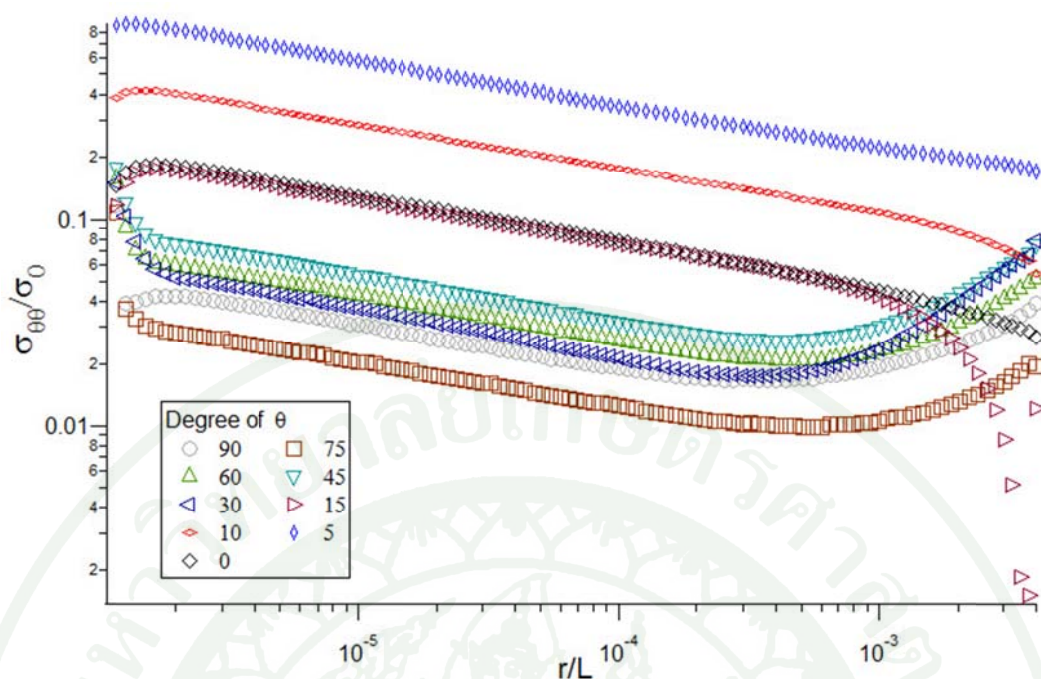
ผลความเค้นตามแนวองศา θ ต่างๆทั้ง 2 รอยต่อได้แสดงในภาพที่ 44 ถึง 47 จากภาพพบว่าที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนและเรซินทิศทางตามแนวองศา θ ที่มีปริมาณความเค้นมากที่สุดคือที่องศา θ เท่ากับ -5° องศา คือบริเวณที่เข้าไปในส่วนของวัสดุเรซิน และที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ทิศทางที่มีความเค้นสูงที่สุดคือ 5° องศาคือทิศทางที่อยู่ในส่วนของวัสดุซิลิคอนเช่นเดียวกัน



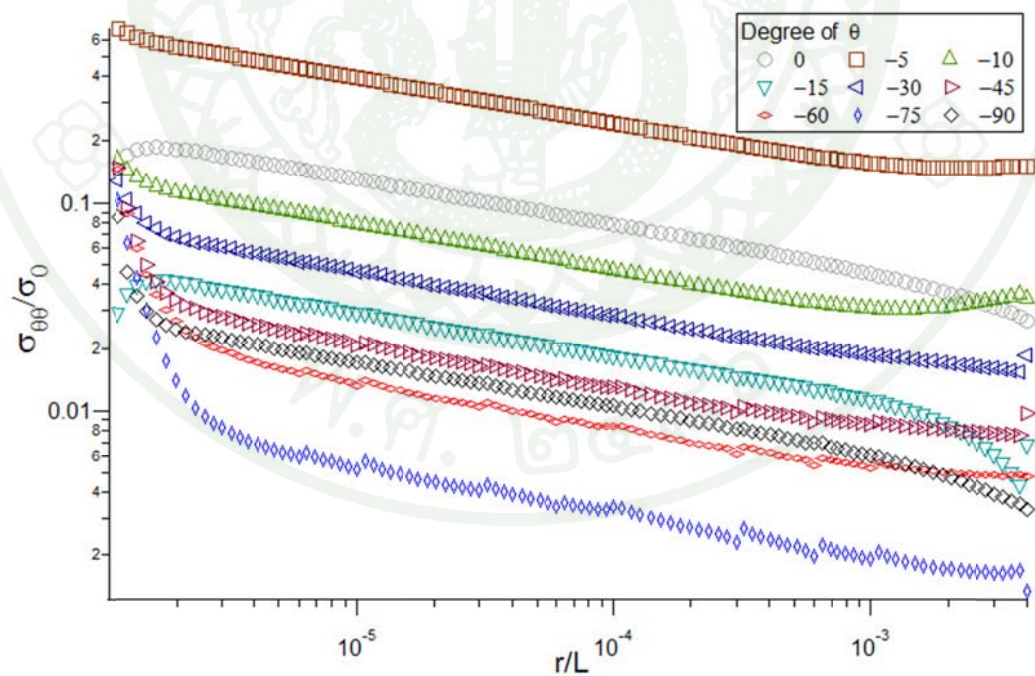
ภาพที่ 44 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของซิลิคอน



ภาพที่ 45 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของเรซิน



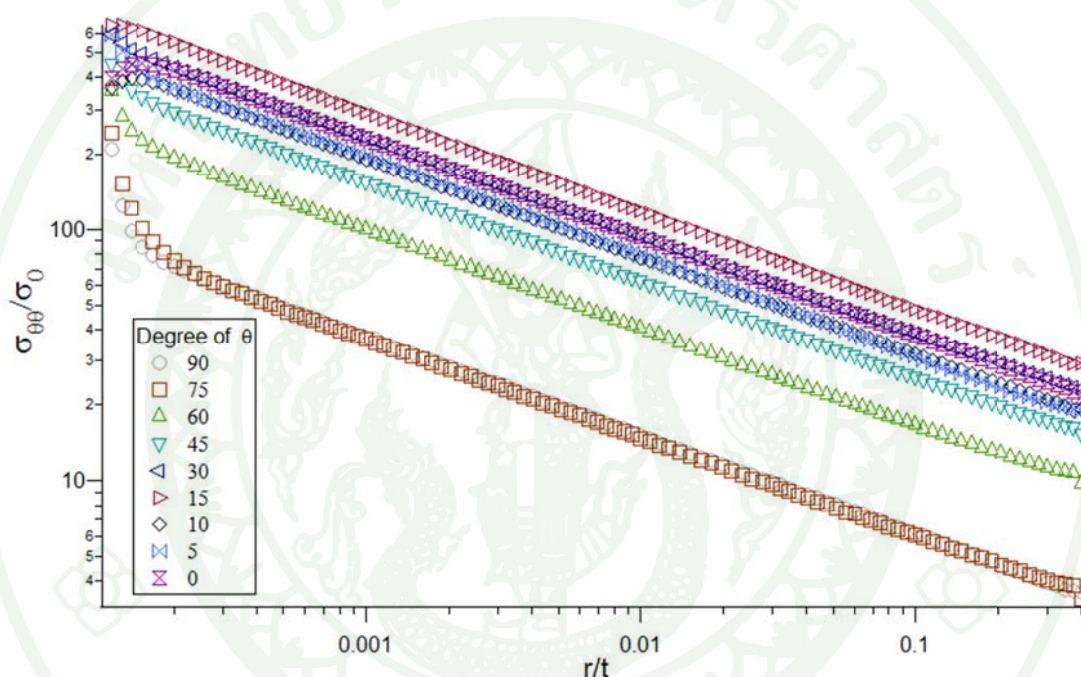
ภาพที่ 46 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของเรซิน



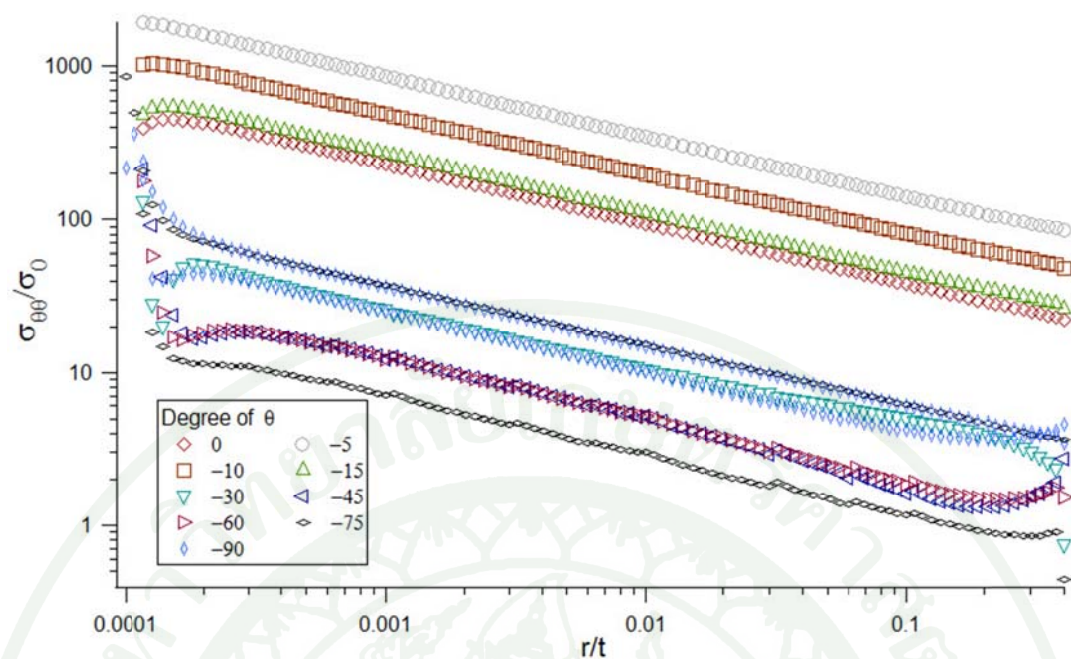
ภาพที่ 47 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของ FR4.5

5.4.2 กรณีรับภาระอุณหภูมิและแรงดึง

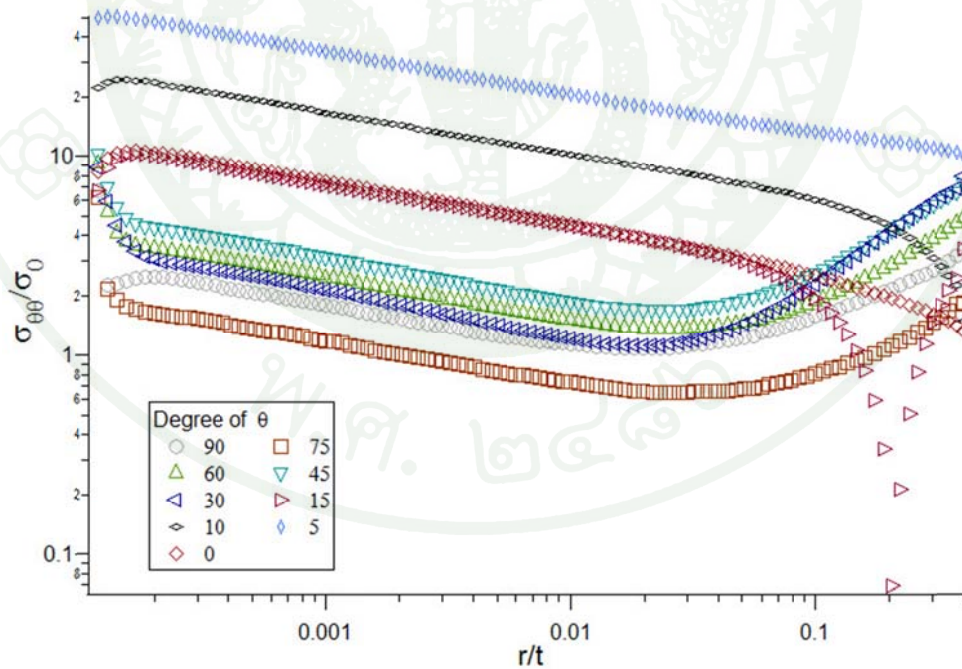
ผลความเค้นตามแนวองศา θ ต่างๆในกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงได้แสดงไว้ในภาพที่ 48 ถึง 51 จากภาพจะพบว่าทิศทางที่มีความเค้นสูงที่สุดของทั้ง 2 รอยต่อ คือทิศทางที่ -5 องศาในรอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน และทิศ 5 องศาที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ซึ่งทิศทางทั้ง 2 คือทิศทางที่ทำมุม 5 องศากับแนวรอยต่อเข้าไปในเนื้อวัสดุเรซิน เช่นเดียวกันกับในกรณีของภาระแรงดึง



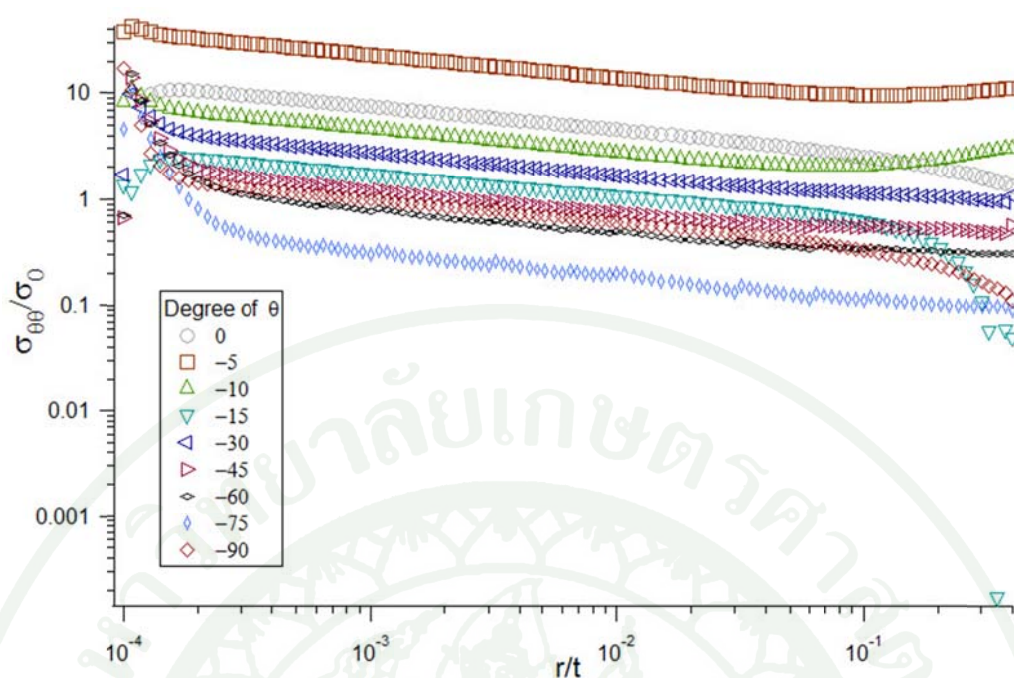
ภาพที่ 48 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของซิลิคอน



ภาพที่ 49 ผลความเค้นที่รอยต่อซิลิกอนกับเรซินตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของเรซิน



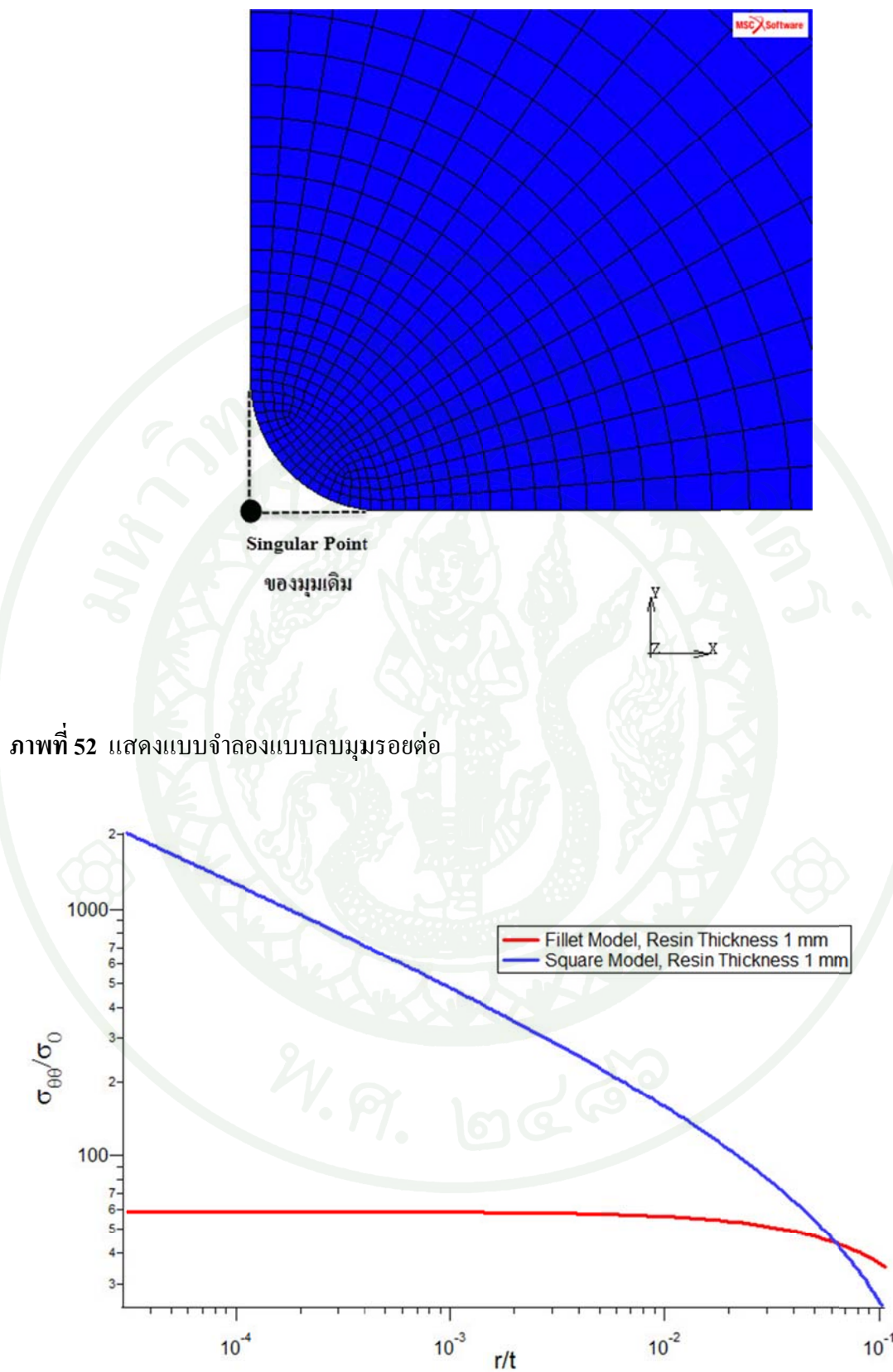
ภาพที่ 50 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ตามองศา θ ต่างๆและมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของเรซิน



ภาพที่ 51 ผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ตามองศา θ ต่างๆ และมุม $\phi = 0^\circ$ ในบริเวณของ FR4.5

5.5 ผลความเค้นของแบบจำลองลบมุมรอยต่อ

จากการศึกษาที่ผ่านมาทั้งหมดพบว่าเมื่อมีภาระทางอุณหภูมิเพิ่มเข้ามจะทำให้ความเค้นเพิ่มขึ้นสูงอย่างชัดเจนซึ่งเป็นผลให้มีโอกาสเกิดความเสียหายต่อชิ้นงานได้สูง ดังนั้นจึงได้พยายามหาวิธีเพื่อลดปริมาณความเค้นที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ โดยได้ทดลองสร้างแบบจำลองที่ทำการลบมุมของรอยต่อดังแสดงในภาพที่ 52 โดยในภาพจะเป็นจากมุมมองด้านบนซึ่งจะเห็นได้ว่าบริเวณมุมของแบบจำลองจะถูกทำให้มนขึ้นโดยมีรัศมีความโค้งเท่ากับ 0.5 ไมโครเมตร จากนั้นนำแบบจำลองนี้ไปปรับภาระทางอุณหภูมิและแรงดึงเช่นเดิม และได้ผลความเค้นที่รอยต่อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 53 ปริมาณความเค้นจากแบบจำลองแบบลบมุมมีค่าน้อยกว่าปริมาณความเค้นจากแบบจำลองเดิมอย่างมากโดยความเค้นสูงสุดมีค่าเพียง 60 เมกะปาสคาลเท่านั้น

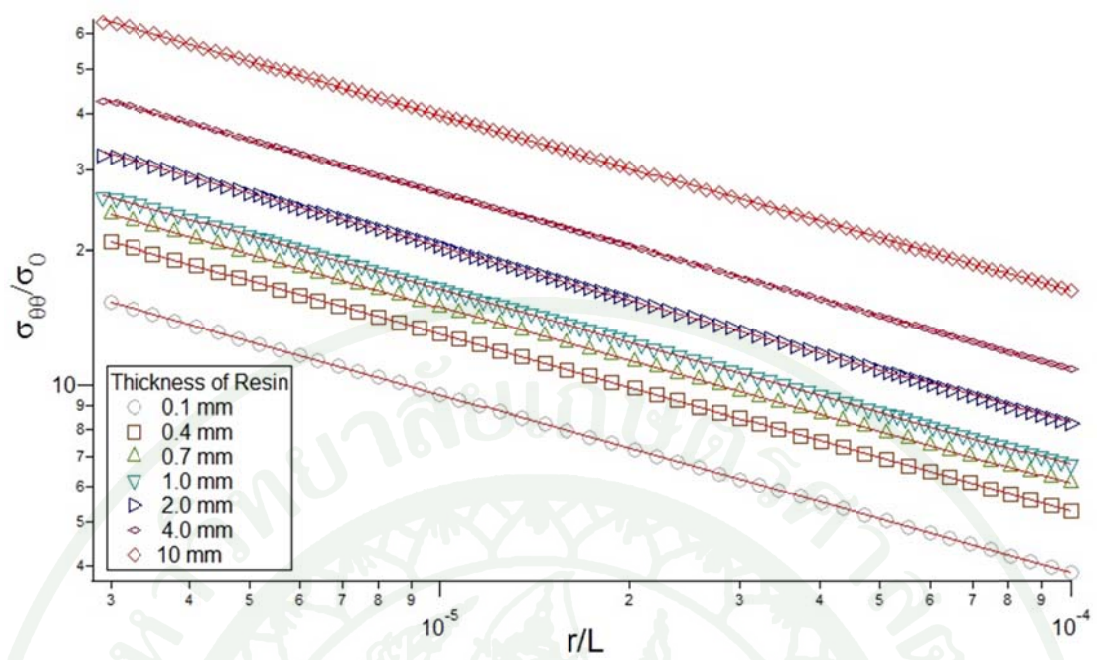


ภาพที่ 53 แสดงผลความเค้นจากแบบจำลองลบมุมรอยต่อ

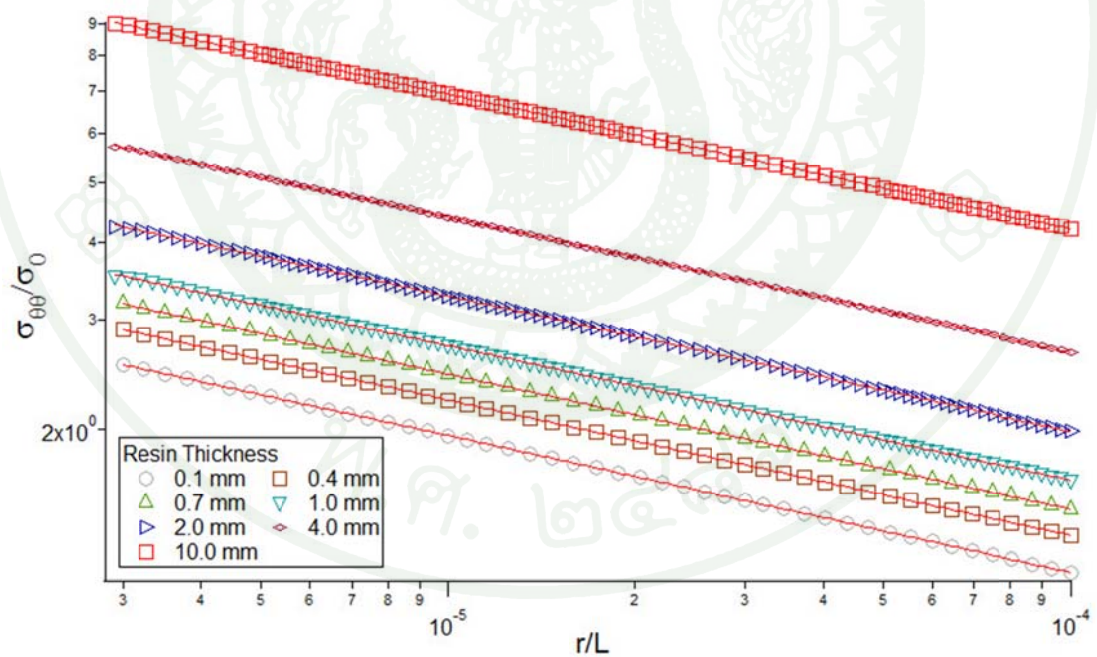
6. ผลค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตี

6.1 กรณีรับภาระแรงดึง

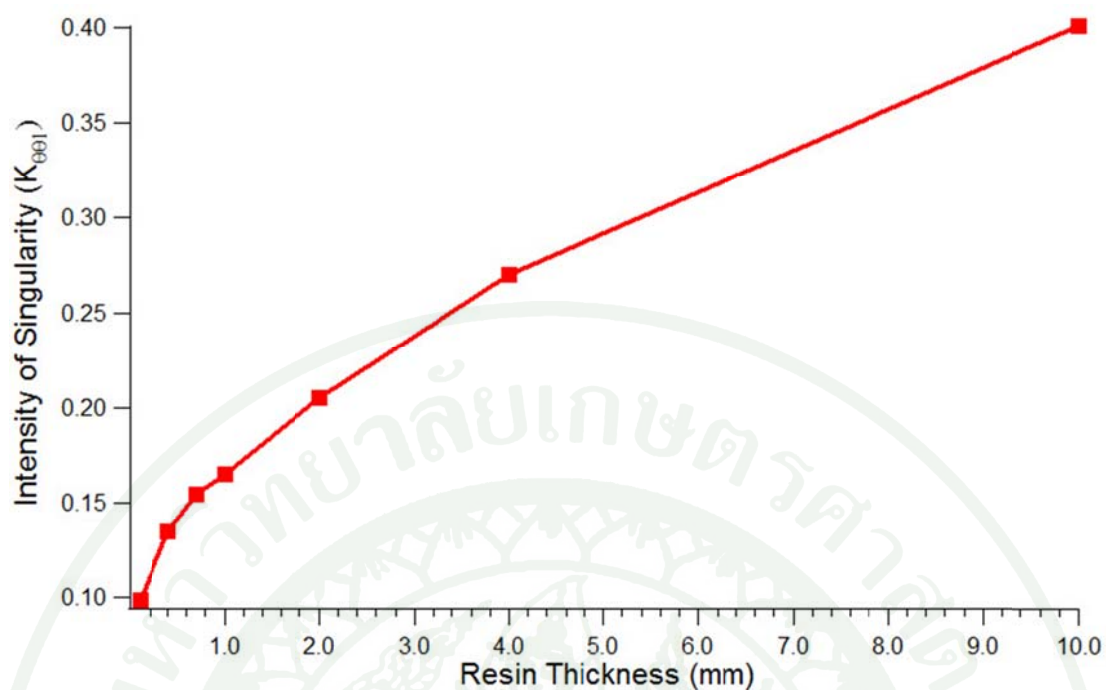
ผลจากการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีในกรณีภาระแรงดึงนั้นได้แสดงในภาพที่ 54 และ 55 เส้นสีแดงที่เชื่อมต่อระหว่างจุดที่แสดงในรูปคือเส้นที่ได้จากการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตี จะเห็นได้ว่าเส้นที่เกิดจากการประมาณนั้นจะผ่านทุกจุดของผลการคำนวณจึงทำให้ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่ได้จากการประมาณนั้นมีความเที่ยงตรงและสามารถเชื่อถือได้ และปริมาณค่าความเข้มของความเค้นในแต่ละความหนาของชั้นวัสดุประสานได้แสดงไว้ในภาพที่ 56 ถึง 58 จากภาพจะพบว่าเมื่อความหนาของชั้นวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 รอยต่อแล้วจะพบว่า ที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 จะมีปริมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่สูงกว่ารอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซินในทุกๆความหนาของชั้นวัสดุประสาน จึงเป็นการบ่งชี้ได้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 มีค่าสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซิน แต่ในการวิเคราะห์โอกาสเกิดความเสียหายของรอยต่อระหว่างวัสดุนั้นควรคำนึงถึงปริมาณความเค้นสูงสุดที่จุดมุมรอยต่อด้วย จะเห็นได้ว่าที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ปริมาณความเค้นสูงสุดที่จุดมุมรอยต่อนั้นมีค่าน้อยกว่าที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซินอย่างมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปได้ว่ารอยต่อใดจะเกิดความเสียหายก่อนเมื่อขึ้นงานไปรับภาระแรงดึง แต่สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความหนาของวัสดุประสานมากขึ้นจะเป็นผลทำให้ทั้ง 2 รอยต่อนั้นมีโอกาสเกิดความเสียหายสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความหนาของวัสดุประสานเพิ่มสูงขึ้นทำให้เมื่อขึ้นงานได้รับภาระแรงดึงจากแรงภายนอกจะทำให้บริเวณเนื้อวัสดุประสานเกิดการเสียรูปมากขึ้น จึงเป็นผลทำให้เกิดแรงดึงที่จุดมุมรอยต่อระหว่างวัสดุสูงขึ้น



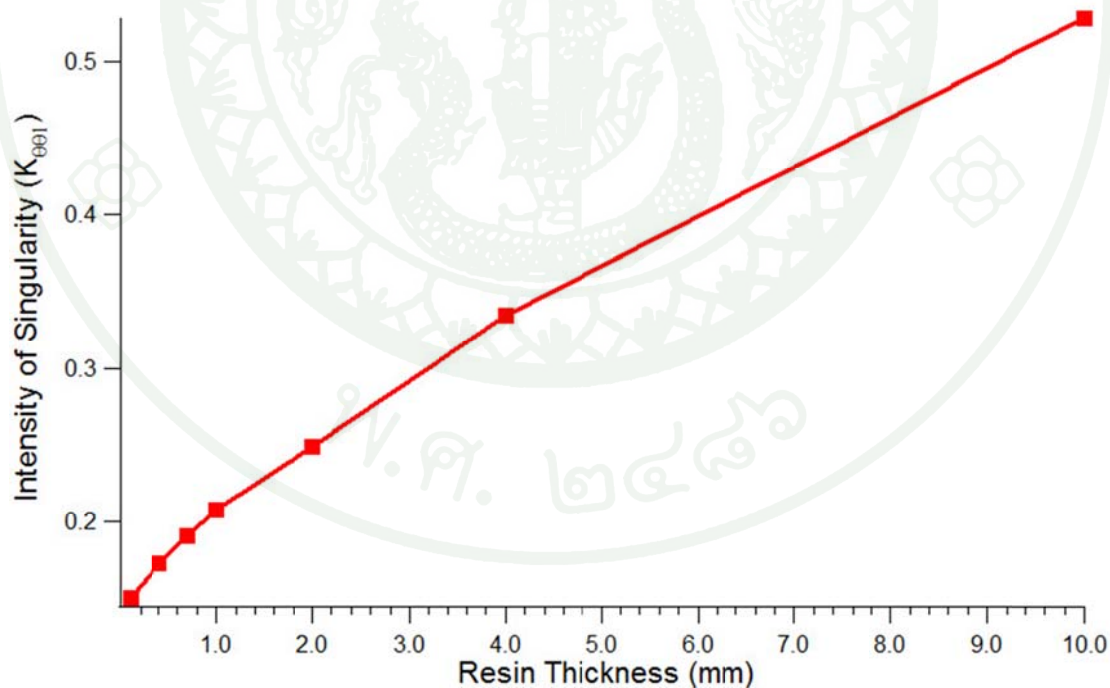
ภาพที่ 54 แสดงการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน



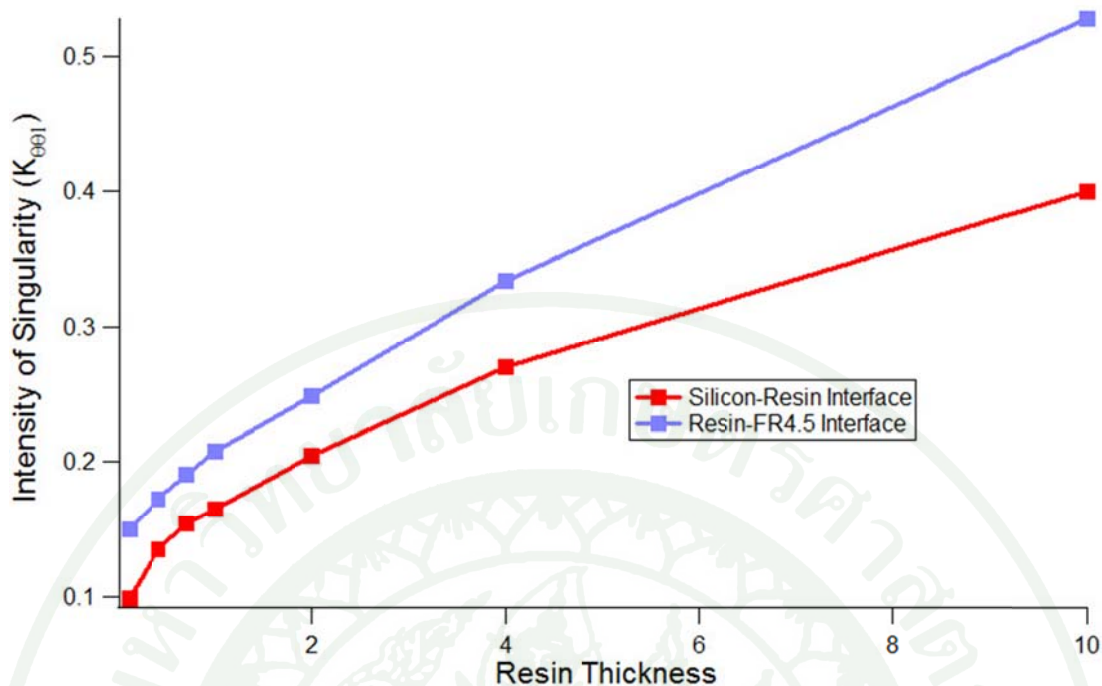
ภาพที่ 55 แสดงการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5



ภาพที่ 56 แนวโน้มค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซิน



ภาพที่ 57 แนวโน้มค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

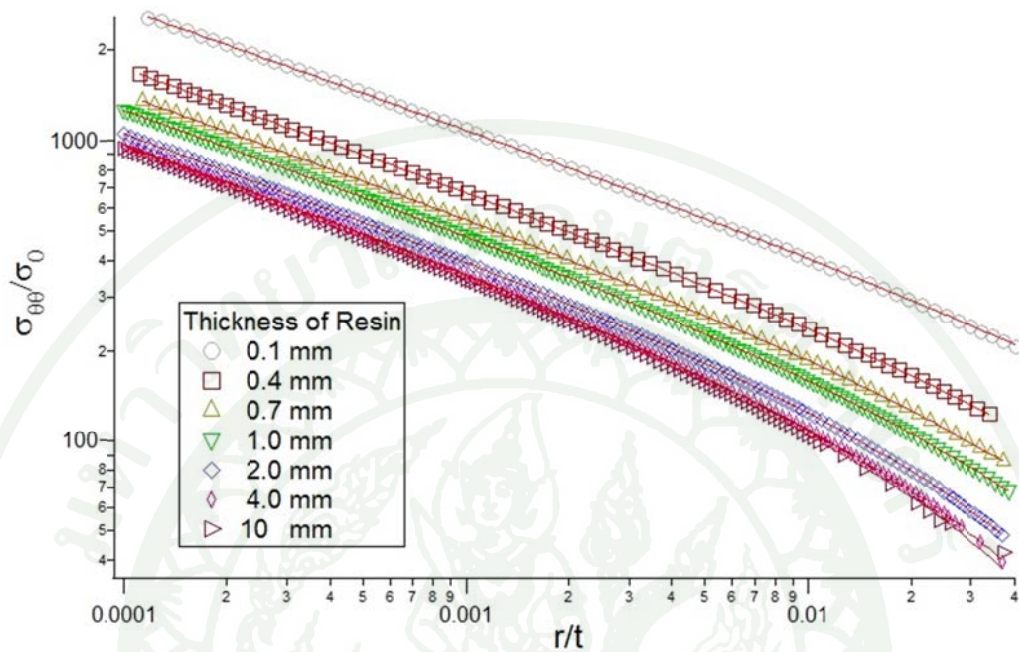


ภาพที่ 58 ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีของ 2 รอยต่อ

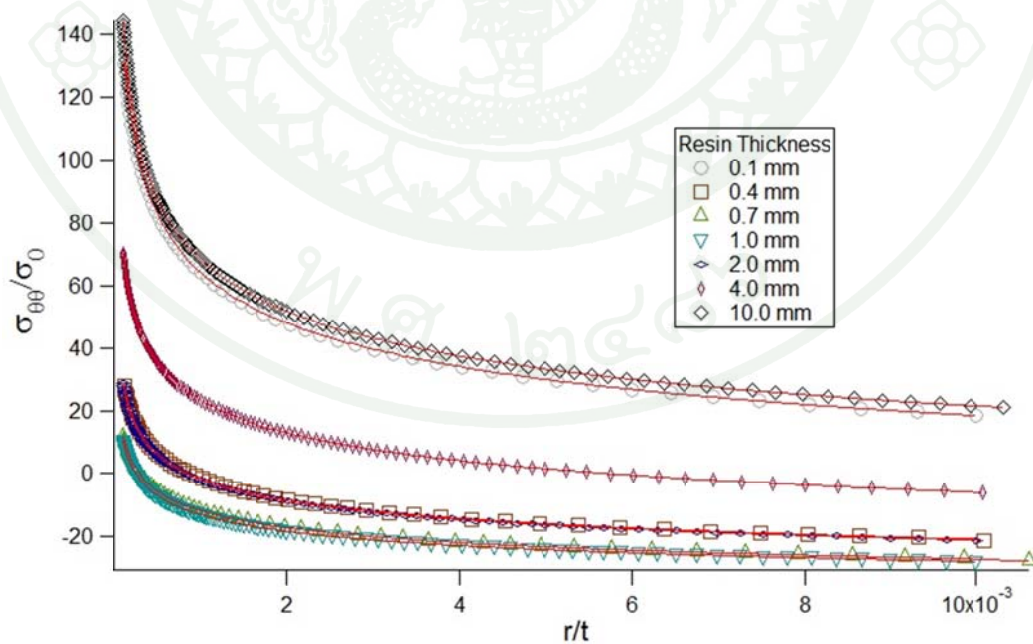
6.2 กรณีรับภาระอุณหภูมิและแรงดึง

สำหรับในกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงผลการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีได้แสดงในภาพที่ 59 และ 60 เส้นสีแดงที่เกิดจากการประมาณโดยใช้โปรแกรมผ่านทุกจุดของผลการคำนวณ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้มีความละเอียดของเอลิเมนต์บริเวณสนามความเค้นเชิงกลาริตีสูงจึงเป็นประโยชน์ในการใช้ประมาณค่าความเข้มของความเค้น ทำให้ได้ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่แม่นยำและสามารถเชื่อถือได้ ภาพที่ 61 ถึง 63 เป็นการแสดงผลปริมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีในทุกๆ ความหนาของชั้นวัสดุประสาน จะเห็นได้ว่าในกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงนั้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของเรซินเพิ่มขึ้น โดยลักษณะการลดลงของความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงของความหนาเรซิน 0.1 ถึง 2 มิลลิเมตร และจากความหนา 2 มิลลิเมตรขึ้นไปอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีจะมีค่าน้อยลงตามลำดับ ส่วนที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มของความเค้นในช่วงของความหนาเรซิน 0.1 ถึง 1 มิลลิเมตรค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ในช่วงความหนาเรซินตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรเป็น

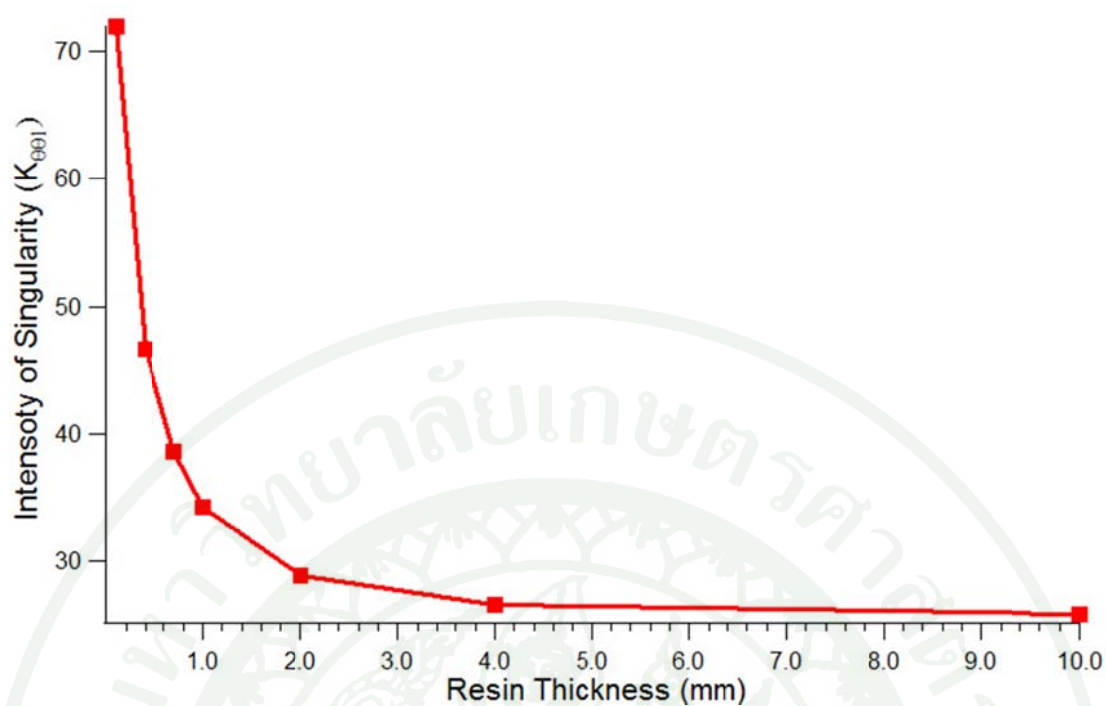
ต้นไปค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความหนาของเรซินซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเค้นที่เพิ่มสูงขึ้น



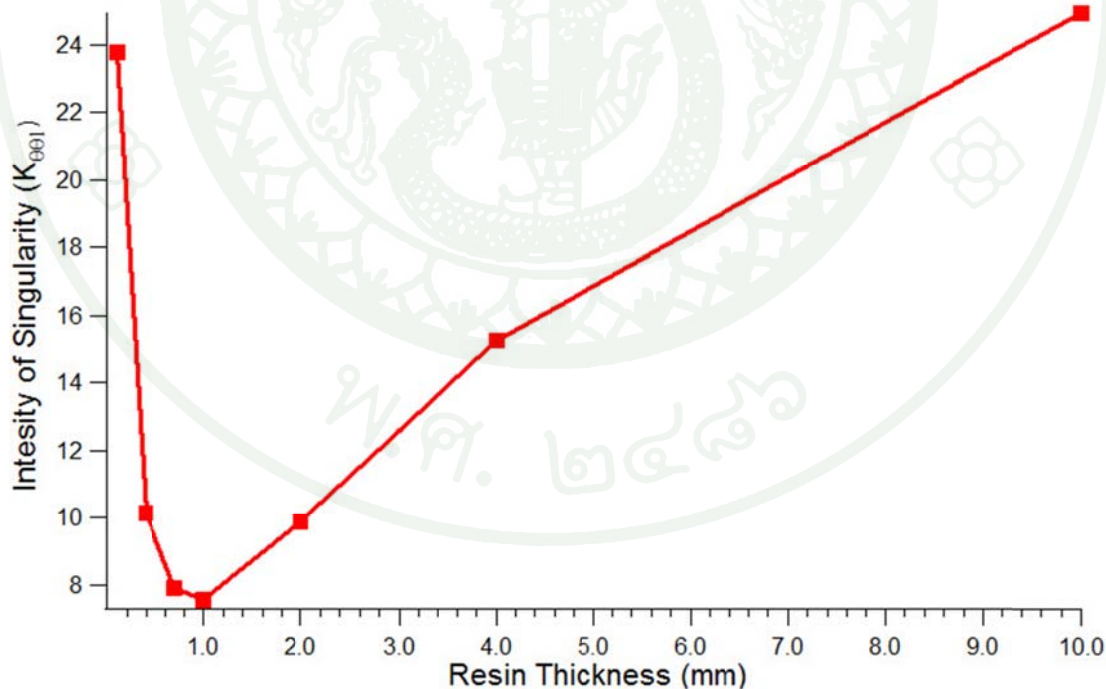
ภาพที่ 59 แสดงการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซิน



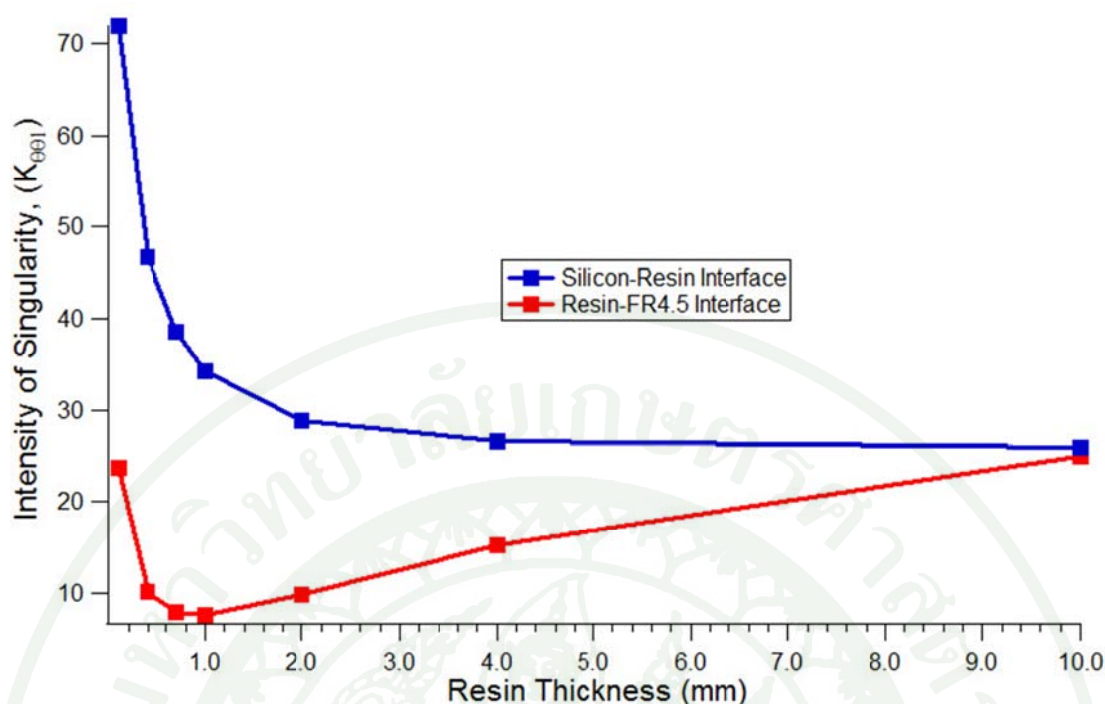
ภาพที่ 60 แสดงการประมาณค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5



ภาพที่ 61 แนวโน้มค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูบริตี้ที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซิน



ภาพที่ 62 แนวโน้มค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูบริตี้ที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5



ภาพที่ 63 ค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีของ 2 รอยต่อ

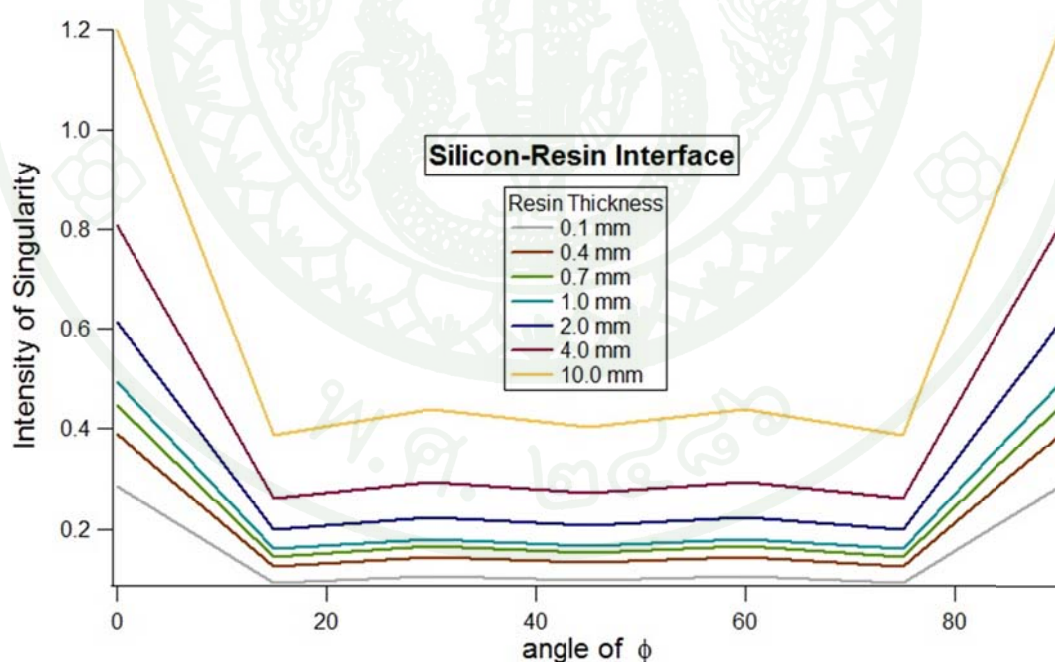
6.3 ความหนาของชั้นวัสดุประสานที่เหมาะสม

จากภาพที่ 58 และ 63 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบปริมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีใน 2 รอยต่อ พบว่าในกรณีภาระแรงดึงตามภาพที่ 58 นั้นความหนาของชั้นวัสดุประสานที่ทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุดคือที่ความหนา 0.1 มิลลิเมตรเนื่องจากที่ความหนานี้ทั้ง 2 รอยต่อมีค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีน้อยที่สุด สำหรับกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงนั้นจากภาพที่ 63 จะพบว่าความหนาของชั้นวัสดุประสานที่ทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุของชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงที่สุดจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 2 มิลลิเมตร เนื่องจากค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนและเรซินมีค่าเริ่มที่จะคงที่ และค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 เริ่มมีค่ากลับขึ้นมาสูงขึ้นแต่ปริมาณยังคงน้อยกว่าค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีในรอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน

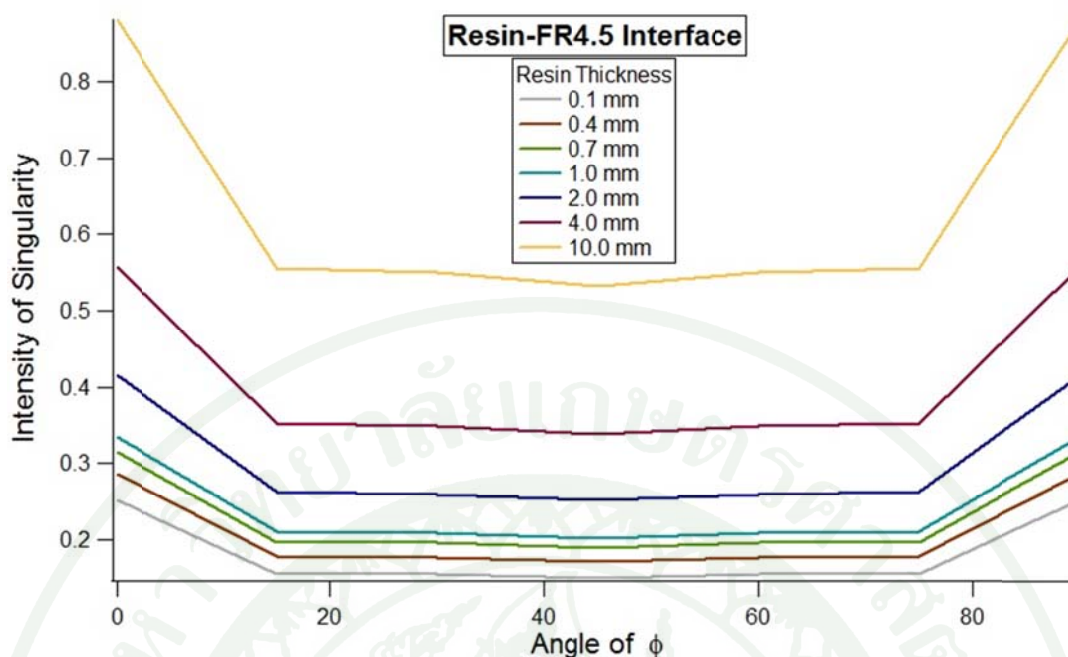
6.4 ผลค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูริดีในองศา ϕ ต่างๆ

6.4.1 กรณีรับภาระแรงดึง

ผลค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูริดีตามทิศขององศา ϕ ต่างๆสำหรับกรณีภาระแรงดึงได้แสดงไว้ในภาพที่ 64 และ 65 โดยภาพที่ 64 จะเป็นผลที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน และภาพที่ 65 เป็นผลที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 จากภาพทั้ง 2 รอยต่อมีลักษณะของค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูริดีคล้ายคลึงกันคือทิศทางที่มีค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูริดีสูงที่สุดคือที่ทิศทาง 0 และ 90 องศา ϕ ส่วนในองศา ϕ อื่นๆจะมีค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูริดีที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นทิศทางตามแนวองศา ϕ ที่มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายก่อนคือที่ทิศ 0 และ 90 องศา และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 รอยต่อพบว่าผลค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูริดีที่องศา ϕ เท่ากับ 0 และ 90 องศาที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินจะมีค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลูริดีสูงกว่าที่รอยต่อของเรซินกับ FR4.5 เป็นผลให้ที่ผิวด้านข้างของชิ้นงานบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินมีโอกาสเกิดความเสียหายก่อนรอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5



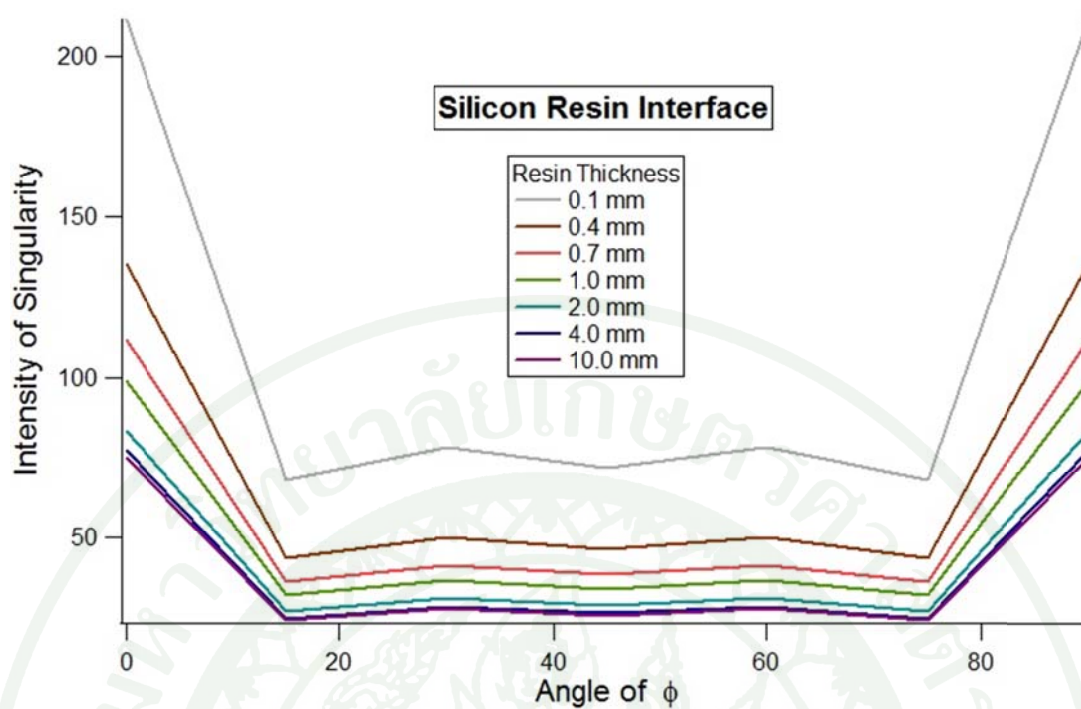
ภาพที่ 64 ความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน



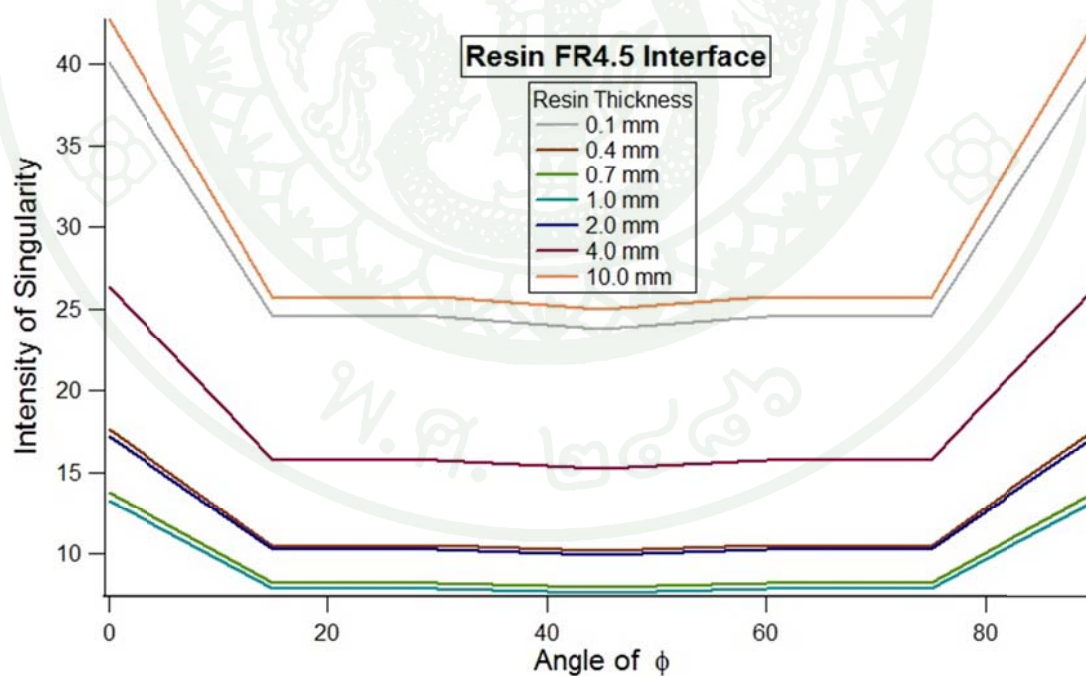
ภาพที่ 65 ความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

6.4.2 กรณีรับภาระอุณหภูมิและแรงดึง

สำหรับกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงนั้นลักษณะค่าความเข้มของความเค้นซึ่งถูกริเค้นตามทิศทางองศา ϕ ต่างๆได้แสดงในภาพที่ 66 และ 67 จากภาพจะเห็นว่าลักษณะของกราฟจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับในกรณีภาระแรงดึง กล่าวคือมีค่าความเข้มของความเค้นซึ่งถูกริเค้นที่สูงที่สุดอยู่ที่ขอบของชิ้นงานหรือที่องศา ϕ เท่ากับ 0 และ 90 องศา แต่จะมีปริมาณค่าความเข้มของความเค้นซึ่งถูกริเค้นที่มากกว่ากรณีภาระแรงดึง จากทั้ง 2 ภาพเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มของความเค้นซึ่งถูกริเค้นที่ความหนาของชั้นวัสดุประสาน 0.1 มิลลิเมตรแล้วจะพบว่าที่ผิวของชิ้นงานบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิโคนกับเรซินมีค่าความเข้มของความเค้นซึ่งถูกริเค้นที่สูงมาก ดังนั้นที่บริเวณดังกล่าวนี้จึงเป็นบริเวณที่มีโอกาสเกิดความเสียหายเป็นอันดับแรก



ภาพที่ 66 ความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน



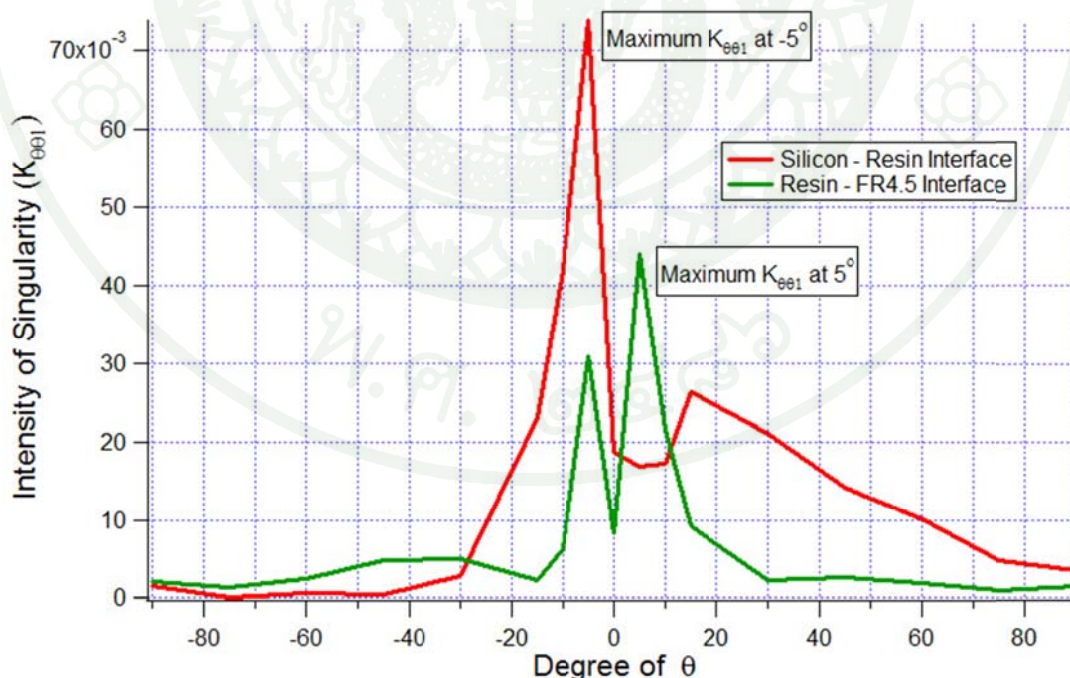
ภาพที่ 67 ความเค้นตามองศา ϕ ต่างๆที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5

6.5 ผลค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีในองศา θ ต่างๆ

จากที่ได้ทราบมาแล้วในหัวข้อที่ 5.4 ทิศทางองศา ϕ ที่มีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายมากที่สุดคือที่องศา ϕ เท่ากับ 0 และ 90 องศา ดังนั้นจึงได้เลือกองศา ϕ ที่ 0 องศาในกรณีของการระดมหมุมและแรงดึงนำมาวิเคราะห์ต่อในหัวข้อนี้ เพื่อหาทิศทางขององศา θ ที่มีค่าความเข้มของความเค้นสูงที่สุดเพื่อเป็นประโยชน์ในการทำนายทิศทางการเริ่มต้นของรอยแตกร้าว

6.5.1 กรณีรับภาระแรงดึง

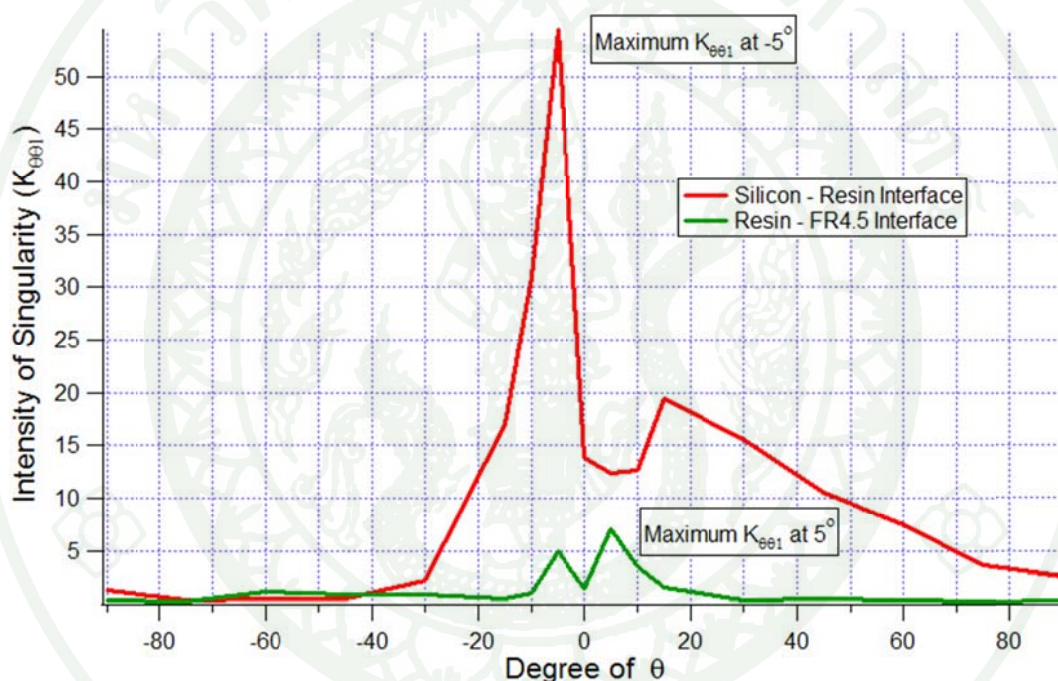
ผลค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีตามทิศทางองศา θ ต่างๆกรณีภาระแรงดึงได้แสดงในภาพที่ 68 โดยเส้นสีแดงคือผลที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน และเส้นสีเขียวคือผลที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 จากภาพจะเห็นว่ามุมขององศา θ ที่มีค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีสูงที่สุดคือ -5 องศาของผลความเค้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซิน ซึ่งมุมดังกล่าวนี้เป็นมุมที่ทำกับรอยต่อ ดังนั้น -5 องศาจะเป็นมุมที่มีทิศทางพุ่งเข้าไปในเนื้อของวัสดุเรซิน ที่มุมนี้จะเป็นมุมที่มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายก่อนเป็นลำดับแรก



ภาพที่ 68 ค่าความเข้มของความเค้นเชิงกลาริตีตามองศา θ ต่างๆในกรณีภาระแรงดึง

6.5.2 กรณีรับภาระอุณหภูมิและแรงดึง

สำหรับกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงผลค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีในองศา θ ต่างๆ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 69 จากภาพจะเห็นว่าปริมาณค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 อย่างชัดเจน และมุมองศา θ ที่มีค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีสูงสุดคือ -5° องศาที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินเช่นเดียวกับในกรณีภาระแรงดึง ดังนั้นที่มุมดังกล่าวนี้จะเป็นมุมที่รอยแตกร้าวมีโอกาสเริ่มก่อตัวขึ้นสูงที่สุด



ภาพที่ 69 ค่าความเข้มของความเค้นซิงกูลาริตีตามองศา θ ต่างๆ ในกรณีภาระอุณหภูมิแรงดึง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาความเค้นตกค้างจากภาระอุณหภูมิบริเวณรอยต่อวัสดุต่างชนิดที่มีการจัดเรียงตัวในรูปแบบแซนด์วิชและรับภาระทางอุณหภูมิและแรงดึง รวมทั้งวิเคราะห์โอกาสเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายของรอยต่อระหว่างวัสดุงานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณผลความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ โดยจากการทำวิจัยชิ้นนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. วิธีการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งใช้เอลิเมนต์แบบ 3 มิติตามแนวพิกัดทรงกลมบริเวณสนามความเค้นซึ่งกลุ่กริดที่สามารถนำมาใช้ศึกษาและวิเคราะห์ความเค้นตกค้างจากภาระทางอุณหภูมิบริเวณสนามความเค้นซึ่งกลุ่กริดที่รอบจุดมมรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดได้ โดยสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าความเค้นตกค้างจากภาระทางอุณหภูมิเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเมื่อมีภาระภายนอกมากระทำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

2. การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุประสานในกรณีภาระทางแรงดึงจะทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 รอยต่อมีโอกาสเกิดความเสียหายสูงขึ้น และการเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุประสานในกรณีภาระทางอุณหภูมิและแรงดึงจะทำให้ที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินมีโอกาสเกิดความเสียหายลดลง แต่ที่รอยต่อระหว่างเรซินกับ FR4.5 การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุประสานทำให้โอกาสเกิดความเสียหายมีค่าสูงขึ้น โดยทิศทางการเริ่มต้นความเสียหายจากทั้งกรณีภาระทางแรงดึงและกรณีภาระทางอุณหภูมิและแรงดึงนั้นความเสียหายจะเริ่มเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างซิลิคอนกับเรซินและทิศทางการแตกร้าจะตามมุม 5 องศากับรอยต่อวัสดุเข้าไปในเนื้อของวัสดุเรซิน

3. ภาระทางอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นสูง และเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุของชิ้นงานมีโอกาสเกิดความเสียหายมากกว่าภาระทางแรงดึง

4. จากกลุ่มการทดลองทั้งหมดพบว่าสำหรับกรณีภาระแรงดึงความหนาของชั้นวัสดุประสานที่ทำให้รอยต่อระหว่างวัสดุทั้ง 2 รอยต่อมีโอกาสเกิดความเสียหายน้อยที่สุด คือ 0.1 มิลลิเมตร

5. จากกลุ่มการทดลองทั้งหมดพบว่าสำหรับกรณีภาระอุณหภูมิและแรงดึงความหนาของชั้นวัสดุประสานที่ทำให้รอยต่อมีโอกาสเกิดความเสียหายน้อยที่สุด คือ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร

ข้อเสนอแนะ

สำหรับผู้ที่มีความสนใจที่จะทำการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับปัญหาความเค้นในบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุต่างชนิดต่อนั้น ทางผู้วิจัยได้มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. ควรศึกษาในประเด็นที่ทำการปรับเปลี่ยนค่าวัสดุประสานในที่นี้คือเรซินนั้นให้มีคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุมีคุณสมบัติในด้านการคลายตัวของความเค้น (Stress Relaxation) คาดว่าหากสามารถกำหนดคุณสมบัติของวัสดุประสานให้สามารถคลายตัวความเค้นได้แล้วจะทำให้ผลของความเค้นที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงพฤติกรรมจริงได้มากยิ่งขึ้น
2. ในการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์หากสามารถทำการแบ่งย่อยของ ϕ และ θ ให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นจะสามารถทำให้ทราบถึงทิศทางที่มีความเค้นสูงและมีโอกาสเกิดความเสียหายก่อนได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น
3. ควรเพิ่มเติมประเด็นในการวิเคราะห์ในด้านคุณสมบัติวัสดุช่วงพลาสติก (Plasticity) เข้าไปในคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดในโปรแกรมเพื่อลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติวัสดุจากช่วงอีลาสติกเป็นช่วงพลาสติกในบริเวณจุดมุมของรอยต่อระหว่างวัสดุ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตติศักดิ์ ทวีรัตนผล และ อรรถพร วิเศษสินธุ์. 2554. การวิเคราะห์ค่าความเข้มของความเค้นซึ่ง
 กุลาริตีรอบจุดมุมของรอยต่อวัสดุ 2 ชนิดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์
 ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เดช พุทธเจริญทอง. 2548. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพฯ. กรุงเทพฯ.
- อรรถพร วิเศษสินธุ์ และ ฮิเดะโอะ โคะกุจิ. 2554. การวิเคราะห์ความเข้มของค่าซึ่งกุลาริตีของ
 สนามความเค้นในจุดต่อของวัสดุต่างชนิดกันโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ.
 การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 49, 1 – 4 กุมภาพันธ์ 2554.
- Attaporn, W. 2009. **3D-Enriched FEM Analysis for Intensity of Singular Stress Field in Dissimilar Material Joints**. D.eng Thesis, Nagaoka University of Technology.
- Attaporn, W. and H. Koguchi. 2009. Intensity of stress singularity at a vertex and along the free edges of the interface in 3D-dissimilar material joints using 3D-enriched FEM. **CMES: Computer Modelling in Engineering and Sciences** 39: 237-262.
- DIMITROV, A., H. ANDRÄ and E. SCHNACK. 2002. Singularity near three-dimension corners in composite laminates. **International Journal of Fracture** 115: 316-375.
- Haung, C.S. and M.J. Chang. 2007. Corner stress singularity in an FGM thin plate. **International Journal of Solids and Structures** 44 (9): 2802-2819.
- Irving, H. S. and A. Franics 1992. **Elastic and Inelastic Stress Analysis**. Prentice-Hall, Inc., New jersey.

- Ioka, S., K. Masuda and S. Kubo. 2007. Singular stress field near the edge of interface of bonded dissimilar materials with an interlayer. **Internaltional Journal of Solids and Structures** 44: 6232-6238.
- Koguchi, H. 1996. Stress Singularity analysis in three-dimension bonded structure. **Int. Journal of Solid Structure** 34: 461-480.
- Koguchi, H. 2006. Stress Singularity analysis in three-dimensional bonded structure. **Transactions of the JSME** 72(724-A): 2058-2065.
- Koguchi, H. and Joviano Antonio da Costa. 2010. Analysis of stress singularity field at a vertex in 3D-bonded structures having a slantedside surface. **International Journal of Solids and Structures** 47 (22-23): 3131-3140.
- Koguchi, H. and M. Nakajima. 2010. Influence of interlayer thickness on the intensity of singular stress field in 3D three-layered joints under external load. **Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering** 4(7).
- Koguchi, H. and M.Nakajima. 2010. Influence of angle between side surface on singular stress field in 3D joints under a tensile loading. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering** 10: 012159.
- Koguchi, H., M. Nakajima and Y. Saito. Effect of interlayer thickness on stress singularity field near a vertex in three-dimensional joints under thermal and mechanical loadings. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering** 10: 012154.
- Koguchi, H. and T. Muramoto. 2000. The order of stress singularity near the vertex in three-dimensional joint. **International Journal of Solids and Structures** 37 (35): 4737-4762.

- Koguchi, H. and T. Taniguchi. 2007. Evaluation of interface strength at the 3D-corner in si-resin joint considering residual thermal stresses. **ASME InterPack'07**. July 8-12, 2007, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Monchai, P. and H. Koguchi. 2005. Stress singularity analysis around the singular point on the stress singularity line in three-dimensional joints. **International Journal of Solids and Structures** 42: (11-12): 3059-3074.
- Pageau, S., P.F. Joseph and S.B. Biggers Jr. 1995. Finite element analysis of anisotropic materials with singular in plane stress field. **Int. Journal of Solids Structures** 32: 571-591.
- Pageau, S., P.F. Joseph and S.B. Biggers Jr. 1996. A finite element approach to three-dimensional singular stress states in anisotropic multi-material wedges and junctions. **Int. Journal of Solids Structures** 33: 33-47.
- Pei Chi Chou and Nicholas J. Pagano. 1967. **Elasticity Tensor, Dyadic, and Engineering Approaches**. Dover edition, D. Van Nostrand Company, Inc., New York.
- Qian, Z.Q., and A.R. Akisanya. 1998. An investigation of the stress singularity near the free edge of scarf joints. **Eur. J. Mech. A/Solids** 18: 443-463.
- Qian, Z.Q. and A.R. Akisanya. 1999. Wedge corner stress behavior of bonded dissimilar materials. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics** 32: 209-222.
- Rössle, A., A.M. Sändig. 1996. Stress singularities in bonded dissimilar materials under mechanical and thermal loading. **Computational Materials Science** 7: 48-45.
- Robert, D. Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha and Robert J. Witt. 2002. **Concept and Application of Finite Element Analysis**. 4th edition, John Wiley & Sons. Inc., United States.

Wu, Z. 2008. Stress concentration analyses of bi-material bonded joints without in-plane stress singularities. **International Journal of Mechanical Sciences** 50: 64-648.

Yang, Y.Y. and D. Munz. 1996. Stress singularities in a dissimilar materials joint with edge tractions under mechanical and thermal loading. **Int. J. Solids Structures** 34(10): 1199-1216.

Zhao, J.H. 2005. Application of virtual crack closure integral method for interface cracks in low-k integrated circuit devices under thermal load. **Engineering Fracture Mechanics** 72: 1361-1382.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายชัยพล ทรงสิทธิโชค
เกิดวันที่	23 ตุลาคม พ.ศ. 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-