



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

ปริญญา

วิศวกรรมการบินและอวกาศ

วิศวกรรมการบินและอวกาศ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาเชิงทดสอบและคำนวณของตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแซนด์วิชภายใต้ การดึงทดสอบนอกระนาบ

An Experimental and Numerical Study of Metallic Insert in Sandwich Structures under Pull-out Test

นามผู้วิจัย นายปฏิญญา กุ่มตันเทียะ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรภรณ์ บุญยานิชกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ประพจน์ ขุนทอง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ศานติ วิริยะวิทย์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเชิงทดสอบและคำนวณของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช
ภายใต้การดึงทดสอบนอกระนาบ

An Experimental and Numerical Study of Metallic Insert in Sandwich Structures
under Pull-out Test

โดย

นายปฏิญญา กุ่มสันเทียะ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปฏิญญา กุมนันทีเยะ 2553: การศึกษาเชิงทดสอบและคำนวณของตัวสอดแทรกโลหะใน
โครงสร้างแซนด์วิชภายใต้การดึงทดสอบนอกระนาบ ปฏิญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมการบินและอวกาศ) สาขาวิศวกรรมการบินและอวกาศ ภาควิชาวิศวกรรมการ
บินและอวกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
พัชรภรณ์ บุญวานิชกุล, Ph.D. 69 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะใน
โครงสร้างแซนด์วิช โดยตัวสอดแทรกประเภทนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการยึดติดผนังของ
เฮลิคอปเตอร์ที่เป็นวัสดุประกอบทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยแกนรวงผึ้งนอเม็กซ์และแผ่นผิวแผ่น
ประกอบคาร์บอน โดยทั่วไป ตัวสอดแทรกในเรซินหล่อถูกนำมาใช้เพราะมีความสามารถในการ
ยึดตัวสอดแทรก แกน และแผ่นผิวเข้ากันได้ดี โดยการศึกษาเชิงตัวเลขด้วยการจำลองสมาชิกจำกัด
ของตัวสอดแทรก 3 รูปแบบ ได้แก่ ตัวสอดแทรกตลอดความหนาของเรซินหล่อ ตัวสอดแทรกไม่
ตลอดความหนาของเรซินหล่อ และตัวสอดแทรกพร้อมหัวตลอดความหนาของเรซินหล่อ พบว่า
ตัวสอดแทรกพร้อมหัวมีความเค้นเฉพาะตำแหน่งน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวสอดแทรก
ประเภทอื่นๆ สำหรับการศึกษาเชิงทดสอบของตัวสอดแทรกโลหะภายใต้การดึงทดสอบนอก
ระนาบ พบว่าความเสียหายเริ่มปรากฏจากการโก่งงอ การพับและย่นของผนังแกนรวงผึ้งที่ได้รับความ
เสียหายจากการส่งผ่านความเค้นเฉือนของเรซินหล่อ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างแซนด์วิช
ยังคงสภาพการเชื่อมต่อและต้านทานต่อภาระกรรม โดยอาศัยคุณสมบัติความยืดหยุ่นที่เหลือของ
วัสดุต่างๆ ที่ประกอบเป็นโครงสร้างแซนด์วิช โดยความเสียหายสุดท้ายปรากฏการหลุดออก
ของเรซินหล่อกับแผ่นผิวด้านล่างและการฉีกขาดอย่างรวดเร็วของผนังแกนรวงผึ้งที่ได้รับความ
เสียหายจากการส่งผ่านความเค้นดึงของตัวสอดแทรกที่ภาระกรรมดึงนอกระนาบวิกฤต ความ
เสียหายเชิงกลเหล่านี้ถูกนำไปศึกษาด้วยวิธีการทดสอบเฉพาะของแต่ละส่วนประกอบและกำหนด
ไปยังแบบจำลองสมาชิกจำกัด ซึ่งผลการจำลองมีความสอดคล้องกันดีกับผลการทดสอบ โดยค่า
ภาระกรรมวิกฤตที่ได้รับมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Patinya Kumsantia 2010: An Experimental and Numerical Study of Metallic Insert in Sandwich Structures under Pull-out Test. Master of Engineering (Aerospace Engineering), Major Field: Aerospace Engineering, Department of Aerospace Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Phacharaporn Bunyawanichakul, Ph.D. 69 pages.

The purpose of this research is to study the pull-out strength of metallic insert in composite sandwich structures. This type of insert is widely used in the attachment for helicopter skin which is commonly composed of Nomex[®] honeycomb core and carbon epoxy composite face skins. In general, the molded-in insert is used because of its ability to bond the insert, core and face skins into one rigid unit. Three types of insert form were numerically studied : through-the-thickness insert, non through-the-thickness insert and through-the-thickness insert with head. The results from finite element modeling have shown that the insert with head has lowest local stress comparing to the other insert types. The experimental study of metallic insert under pull-out test have shown that the failure initially occurred by buckling, folding and wrinkling of the honeycomb cell wall attributed to a transverse shear failure adjacent to the potting mass. However, the whole structures are still attached together and resist the load by the intact components. The last failure is the interfacial failure of potting/lower face skin and followed by a rapid rip of the honeycomb core attributed to a tension failure at the ultimate load. These failure mechanisms are investigated by specific test of each components and implemented into the finite element modeling. Good agreement with the experiment is observed by a slightly different of ultimate load about 3%.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัทธภรณ์ บุญวานิชกุล ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. ประพนธ์ ขุนทอง กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้ความรู้ทั้งทางทฤษฎีและการปฏิบัติ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University Research and Development Institute: KURDI) และความร่วมมือระหว่างประเทศไทย - ฝรั่งเศส สำหรับเงินทุนการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งได้รับการสนับสนุนชิ้นงานทั้งหมดจากบริษัทยูโรคอปเตอร์ สำหรับการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการ LGMT (Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse) สถาบันวิจัย ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace) มหาวิทยาลัยตูลูส ประเทศฝรั่งเศส จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณนาวาอากาศโท ดร. ณัฐพล นิยมไทย ประธานการสอบ และนาวาอากาศโท ดร. พนม อินทรศรีศรี ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาใช้เวลาในการสอบวิทยานิพนธ์และยังกรุณาให้คำแนะนำสำหรับการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในโครงการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการบินและอวกาศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และโรงเรียนนายเรืออากาศ กองทัพอากาศ ที่ได้ให้ทั้งความรู้และข้อแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่ประสบความสำเร็จหากปราศจากการสนับสนุนและแรงบัลดาลใจที่สำคัญยิ่งจากบิดา มารดา และน้องชาย รวมถึงญาติๆ และเพื่อนๆ ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ จนทำให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ปฎิญา กุมสันเทียะ

สิงหาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	11
การตรวจเอกสาร	12
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	35
วิธีการ	40
ผลและวิจารณ์	50
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
สรุป	64
ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางเปรียบเทียบความต้านทานการตัด การ โกงตัว และน้ำหนักระหว่างคานคองรูปกับคานแซนคั๊วช	5
2 ค่าภาระกรรมวิฤตของตัวสอดแทรกโลหะสำหรับการทดสอบประเภทต่างๆ	9
3 ตารางคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข	24
4 ตารางคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของตัวสอดแทรกประเภทต่างๆ	42
5 ตารางคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลองการตัด 3 จุด	45
6 ตารางคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลองตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนคั๊วช	49

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วัสดุที่ใช้ทำแผ่นผิวและแกน และส่วนประกอบของโครงสร้างแซนดวิช	1
2	รูปร่างลักษณะและขั้นตอนการผลิตแกนรวงผึ้ง (corrugation process)	2
3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนและความหนาแน่นของแกนรวงผึ้ง อลูมิเนียมผสม 5052	3
4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความหนาแน่น (ภาพซ้าย) และกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับความหนาแน่น (ภาพขวา) ของแกน แซนดวิชชนิดต่างๆ	4
5	การประยุกต์ใช้โครงสร้างแซนดวิชกับใบพัดหลักของเฮลิคอปเตอร์รุ่น Sea King	5
6	ตัวสอดแทรกในเรซินหล่อและติดตั้งด้วยแรง	6
7	การติดตั้งตัวสอดแทรกในเรซินหล่อแบบปกติและแบบตัดแกนรวงผึ้งเพิ่มเติม (undercut)	7
8	รูปแบบของภาระกรรมต่างๆ ที่กระทำกับตัวสอดแทรกใน โครงสร้างแซนดวิช	8
9	การทดสอบความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะด้วยวิธีการต่างๆ	9
10	ผลการทดสอบภาระกรรมเหมือนเปรียบเทียบกับภาระกรรมดึงสำหรับตัวสอดแทรก โลหะประเภท SL602-3-500S	10
11	วัสดุประกอบสำหรับส่วนประกอบต่างๆ ของเฮลิคอปเตอร์	12
12	รูปแบบการกระจายความเค้นในคานแซนดวิชของการตัด 3 จุด	13
13	รูปแบบความเสียหายภายใต้ความเค้นดึงของคานแซนดวิชสำหรับการตัด 3 จุด	14
14	การเชื่อมต่อประเภทต่างๆ สำหรับโครงสร้างแซนดวิช	15
15	ลักษณะการติดตั้งตัวสอดแทรกประเภทต่างๆ สำหรับโครงสร้างแซนดวิช	16
16	สภาวะขอบของตัวสอดแทรกทั้งสองประเภทใน โครงสร้างแซนดวิชแบบสมมาตร	17
17	การกระจายความเค้นภายในแกนแซนดวิชของตัวสอดแทรกทั้งสองประเภท	18
18	การทำนายภาระกรรมวิกฤตของ โครงสร้างแซนดวิชด้วยตัวแปร k_3	19
19	กราฟพิจารณาค่าคงที่ k_3	20
20	การทำนายตำแหน่งวิกฤตของ โครงสร้างแซนดวิช	21

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขของการกระจายความเค้นเฉือนในแกนแซนดวิช เปรียบเทียบกับทดสอบด้วยภาระกรรมกดของเครื่องทดสอบมาตรฐาน	23
22 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณเชิงตัวเลขของการกระจายความเค้นเฉือนในแกน รวงผึ้ง	25
23 การคำนวณสภาวะครากของโครงสร้างแซนดวิช	27
24 ภาพตัดขวางของตัวสอดแทรกประเภท NAS 1833 (a) และ NAS 1835 (b)	28
25 เครื่องมือสำหรับการทดสอบนอกระนาบ (a) และการทดสอบในระนาบ (b)	29
26 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการจำลองสมาชิกจำกัดสำหรับการดึงทดสอบ นอกระนาบและในระนาบ	30
27 ภาพตัดขวางของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนดวิชประเภทต่างๆ	31
28 รูป 3 มุมของตัวสอดแทรกโลหะประเภท DIN65307- 0615D	31
29 รูปแบบความเสียหายเชิงกลของตัวอย่างขึ้นทดสอบประเภทที่ 3	32
30 การฉีกขาดและการหลุดออกของแผ่นผิวของตัวอย่างขึ้นทดสอบประเภทที่ 3	32
31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมและการโก่งตัวของแผ่นผิวของ ตัวอย่างขึ้นทดสอบประเภทที่ 3	33
32 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	34
33 ขั้นตอนการเตรียมเรซินหล่อสำหรับขึ้นทดสอบต่างๆ	35
34 ขั้นตอนการเตรียมขึ้นทดสอบเรซินหล่อสำหรับการทดสอบด้วยภาระกรรมกด	36
35 โครงร่างของขึ้นทดสอบตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนดวิช	37
36 รูป 3 มุมของตัวสอดแทรกโลหะ	37
37 ภาพตัดขวางของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนดวิช	38
38 ลักษณะทั่วไปของขึ้นทดสอบตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนดวิช	38
39 รูป 3 มุมของอุปกรณ์จับยึดขึ้นทดสอบตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนดวิช	39
40 ขนาดและรูปร่างของตัวสอดแทรกประเภทที่ 1	40
41 ขนาดและรูปร่างของตัวสอดแทรกประเภทที่ 2	41

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
42	ขนาดและรูปร่างของตัวสอดแทรกประเภทที่ 3	41
43	รูป 3 มุมของตัวสอดแทรกประเภทที่ 3	42
44	แบบจำลอง 1 ใน 4 แบบสมมาตร 3 มิติ ของแบบจำลองตัวสอดแทรกประเภท ต่างๆ	42
45	การติดตั้งชิ้นทดสอบตัวสอดแทรกโลหะสำหรับการดึงทดสอบนอกระนาบ	43
46	ระบบการเชื่อมต่อสำหรับการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากการดึงทดสอบนอก ระนาบ	44
47	การทดสอบการคัด 3 จุด สำหรับคานแซนคั้วชี	45
48	แบบจำลอง 2 มิติ แบบสมมาตรของคานแซนคั้วชี	46
49	การหาค่าภาระกรรมที่สอดคล้องกับความเสียหายของแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอล โดยการจำลองสมาชิกจำกัด	46
50	การหาค่าภาระกรรมที่สอดคล้องกับความเสียหายของแกนรวงผึ้งแนวระนาบ ดับเบิลยูโดยการจำลองสมาชิกจำกัด	47
51	การติดตั้งชิ้นทดสอบเรซินหล่อสำหรับการทดสอบด้วยภาระกรรมกนอกระนาบ	48
52	แบบจำลอง 1 ใน 4 แบบสมมาตร 3 มิติ ของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้าง แซนคั้วชี	49
53	การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อ XY ของเรซินหล่อในแบบจำลอง ประเภทที่ 1	51
54	การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อ XY ของเรซินหล่อในแบบจำลอง ประเภทที่ 2	51
55	การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อ XY ของเรซินหล่อในแบบจำลอง ประเภทที่ 3	52
56	การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อ YZ ของเรซินหล่อในแบบจำลอง ประเภทที่ 3	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

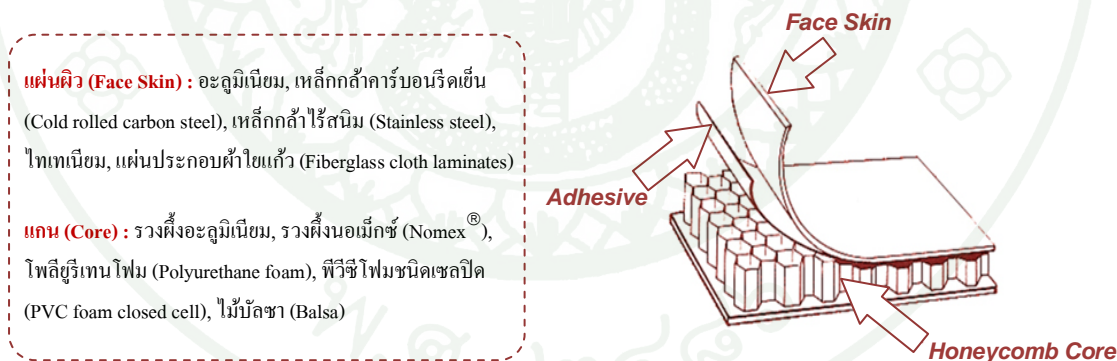
ภาพที่	หน้า
57 การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อของเรซินหล่อในแบบจำลองประเภทต่างๆ	53
58 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดิ่งทดสอบนอกระนาบของชิ้นทดสอบต่างๆ	54
59 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดิ่งทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชของชิ้นทดสอบที่ 1	55
60 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดิ่งทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชของชิ้นทดสอบที่ 2	55
61 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดิ่งทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชของชิ้นทดสอบที่ 3	56
62 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดิ่งทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชของชิ้นทดสอบที่ 4	56
63 การตัดพิสูจน์กลไกความเสียหายของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช	57
64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมและระยะเคลื่อนที่ของตัวสอดแทรกโลหะ	58
65 การโก่งงอของแผ่นผิวล่างที่เป็นผลมาจากความเสียหายเชิงกลของแกนรวงผึ้ง	58
66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของแกนรวงผึ้ง	60
67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของเรซินหล่อ	60
68 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมและระยะเคลื่อนที่ของตัวสอดแทรกโลหะที่ได้รับจากการทดสอบและแบบจำลองสมาชิกจำกัด	63
69 ความเค้นวอนมิสเซสของเรซินหล่อที่ภาระกรรมนอกระนาบสูงสุด	63

การศึกษาเชิงทดสอบและคำนวณของตัวสอดแทรกโลหะ ในโครงสร้างแซนด์วิชภายใต้การดึงทดสอบนอกระนาบ

An Experimental and Numerical Study of Metallic Insert in Sandwich Structures under Pull-out Test

คำนำ

โครงสร้างแซนด์วิช (sandwich structure) ประกอบขึ้นด้วยแผ่นบางสองแผ่น (face skin) ประกบกับแกน (core) โดยแผ่นผิวของแซนด์วิชเชื่อมต่อกับแกนได้ด้วยกาว (adhesive) ดังภาพที่ 1 วัสดุที่ใช้สำหรับทำแผ่นผิวโดยทั่วไปเป็นวัสดุแผ่นบาง ซึ่งมีความสำคัญในการสร้างความต้านทานโมเมนต์คด (flexural moment resistance) เช่นเดียวกับโครงสร้างรูปตัวไอ (I) วัสดุที่นำมาใช้สำหรับแผ่นผิวมีได้หลายชนิด เช่น แผ่นประกอบ (laminates) และแผ่นโลหะชนิดต่างๆ โดยเลือกจากวัสดุที่มีความแข็งแรง (stiffness) ในระนาบสูง

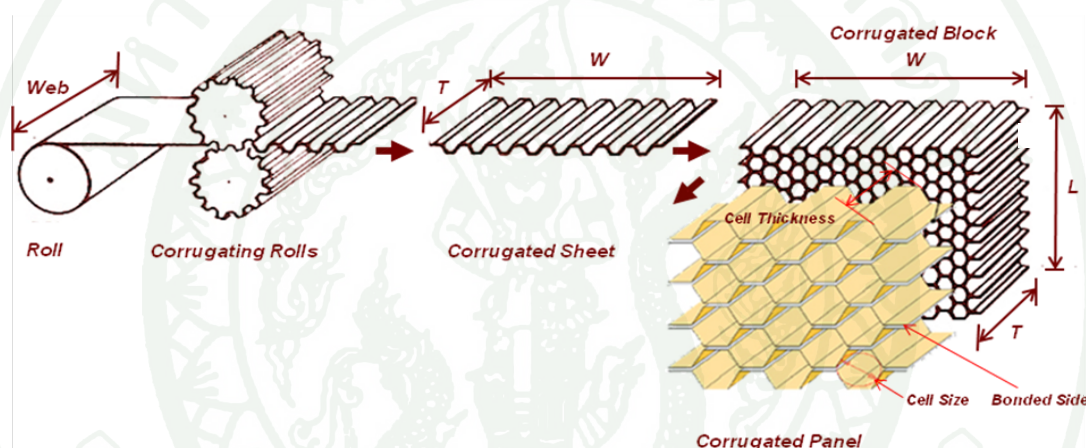


ภาพที่ 1 วัสดุที่ใช้ทำแผ่นผิวและแกน และส่วนประกอบของโครงสร้างแซนด์วิช

ที่มา: M.C. Gill Corporation (1997); Shur-Lok Corporation (1981)

แกนของโครงสร้างแซนด์วิช ทำหน้าที่พยุงแผ่นผิวให้มีความคงตัว ไม่โก่ง คด หรือหักงอขณะใช้งาน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของแผ่นผิวยังคงตัวอยู่ในระนาบได้มากที่สุด การเลือกวัสดุมา

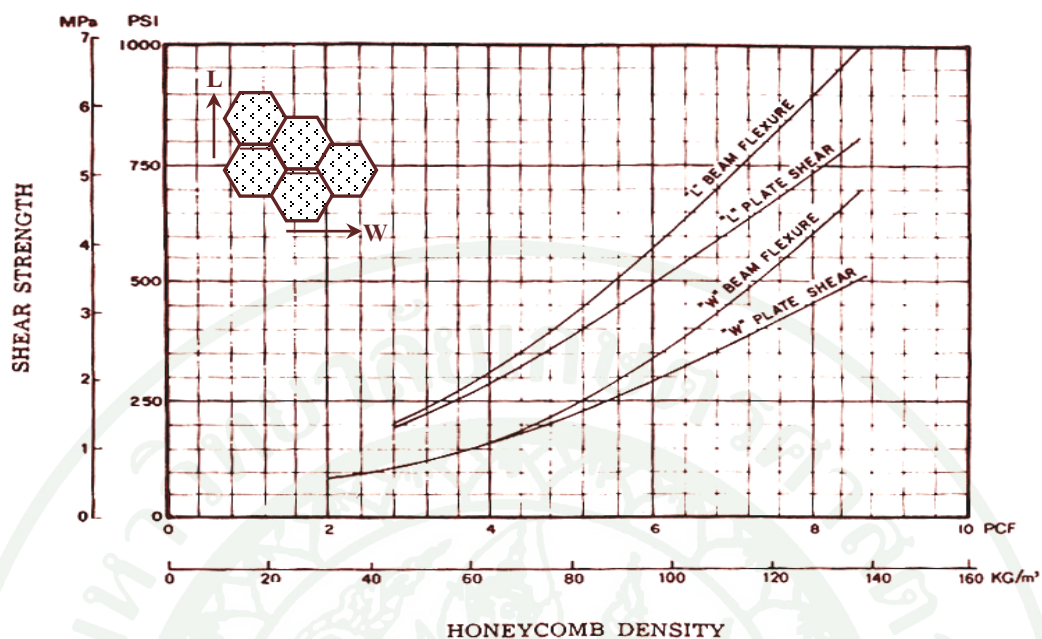
ใช้ทำแกนขึ้นอยู่กักลักษณะการใช้งาน โดยเน้นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เช่น โฟม ไม้ หรือรังผึ้ง (honeycomb) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 1 แกนรังผึ้งที่นิยมใช้งานในโครงสร้างอากาศยานและดาวเทียมโดยทั่วไปมีรูปร่างหน่วยเซลล์เป็นรูปหกเหลี่ยม (\hexagon) ขึ้นรูปจากอลูมิเนียมแผ่นบางด้วยการเชื่อมหรือใช้กาวยึดติดกันระหว่างแผ่นกระดาษ ซึ่งแกนรังผึ้งมีรูปร่างลักษณะอสมมาตรใน 2 แนวแกน ดังภาพที่ 2 ส่งผลให้จะต้องพิจารณาความแข็งแรงของแกนรังผึ้งเป็นวัสดุแบบอโททรอปิก ซึ่งคุณสมบัติจะมีความแตกต่างกันตามตำแหน่งของภาระกรรมที่กระทำบนผนังแกนแผ่นบางตามแกนรังผึ้งแนวระนาบคืบเบิลยู (W) และผนังแกนตามแนวการขึ้นรูปของแกนรังผึ้งแนวระนาบแอล (L)



ภาพที่ 2 รูปร่างลักษณะและขั้นตอนการผลิตแกนรังผึ้ง (corrugation process)

ที่มา: Lubin (1982)

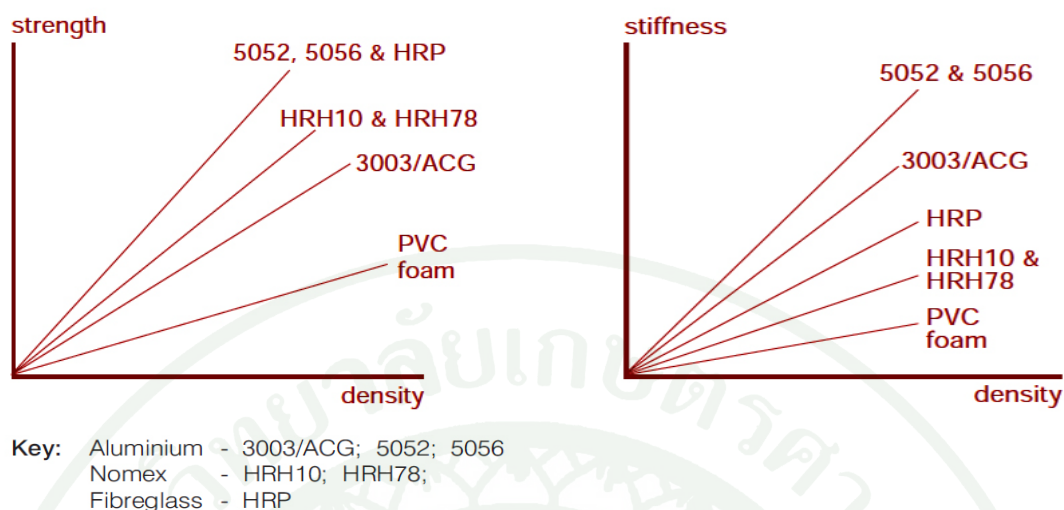
ดังนั้นสมบัติเชิงกลในการต้านทานความเค้นเฉือนของแกนรังผึ้งทั้งสองแนวระนาบจึงแตกต่างกันไปด้วย ดังเห็นได้จากผลการเปรียบเทียบกำลังเฉือน (shear strength) ของแกนรังผึ้งอลูมิเนียมผสม 5052 (alloy 5052) ทั้งสองแนวระนาบที่ความหนาแน่นต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3 ตัวอย่างเช่น แกนรังผึ้งอลูมิเนียมผสม 5052 ที่มีความหนาแน่น 80 กก./ม.³ พบว่าแกนรังผึ้งแนวระนาบแอลสามารถรับภาระกรรมเฉือน (shear force) บนแนวระนาบได้ดีกว่าแกนรังผึ้งแนวระนาบคืบเบิลยูประมาณ 1.77 เท่า และแกนรังผึ้งแนวระนาบแอลสามารถต้านทานการโก่งตัว (flexural rigidity) ของคานได้ดีกว่าแกนรังผึ้งแนวระนาบคืบเบิลยูประมาณ 1.83 เท่า เป็นต้น (Lubin, 1982)



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนและความหนาแน่นของแกนรวงผึ้งอลูมิเนียมผสม 5052

ที่มา: Lubin (1982)

โดยทั่วไปคุณสมบัติเด่นของแกนรวงผึ้ง คือ น้ำหนักเบา สามารถรับความเค้นเฉือน (shear stress) และภาระกรรมอัด (compressive force) ได้ดี ดังในภาพที่ 4 (ภาพซ้าย) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง (strength) กับความหนาแน่นของแกนรวงผึ้งที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่างๆ ได้แก่ อลูมิเนียม กระดาษนอเม็กซ์ และผ้าใยแก้ว เปรียบเทียบกับแกนโฟมพีวีซี พบว่าแกนรวงผึ้งอลูมิเนียมผสม 5052 อลูมิเนียมผสม 5056 และผ้าใยแก้ว เป็นแกนรวงผึ้งที่มีกำลังจำเพาะ (specific strength = กำลัง / ความหนาแน่น) มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแกนโฟมพีวีซีที่มีค่าน้อยกว่าถึงประมาณ 3.78 เท่า และภาพที่ 4 (ภาพขวา) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรง (stiffness) กับความหนาแน่นของแกนรวงผึ้งที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่างๆ ข้างต้น เปรียบเทียบกับแกนโฟมพีวีซี พบว่าแกนรวงผึ้งอลูมิเนียมผสม 5052 และอลูมิเนียมผสม 5056 เป็นแกนรวงผึ้งที่มีความแข็งแรงจำเพาะ (specific stiffness = ความแข็งแรง / ความหนาแน่น) มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแกนโฟมพีวีซีที่มีค่าน้อยกว่าถึงประมาณ 5.80 เท่า (Hexcel Composites, 2000)



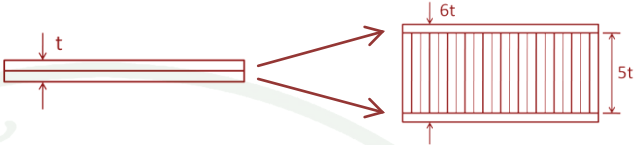
ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับความหนาแน่น (ภาพซ้าย) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับความหนาแน่น (ภาพขวา) ของแกนแซนดิวิชชนิดต่างๆ

ที่มา: Hexcel Composites (2000)

โครงสร้างแซนดิวิชที่ประกอบด้วยแกนรวงผึ้งเป็น โครงสร้างหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในงานด้านโครงสร้าง เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงจำเพาะและค่าความแข็งแรงสูง ดังเห็นได้จากผลการคำนวณของการทดสอบการคด 3 จุด (3-point flexure test) ซึ่งเปรียบเทียบคานคงรูป (solid beam) ที่ทำจากอลูมิเนียมผสม 2024 ที่มีความหนาแน่น 2700 กก./ม.³ หนา t กับคานแซนดิวิชที่ประกอบด้วยแผ่นผิวอลูมิเนียมผสม 2024 และแกนกระดาษรวงผึ้งนอเม็กซ์ที่มีความหนาแน่น 48 กก./ม.³ โดยมีความหนาทั้งหมดของคานเป็น 6t ด้วยภาระกรรมกดสูงสุด 700 นิวตัน บนแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอลและ 600 นิวตัน บนแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู (Bunyawanchakul, 2005) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าคานแซนดิวิชมีความแข็งแรงการคดเพิ่มขึ้นร้อยละ 91 และการโก่งตัว (deflection) ในแกนรวงผึ้งทั้งสองแนวระนาบลดลงถึงประมาณร้อยละ 99 เมื่อน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 9 (Hexcel Composites, 2000) ด้วยคุณสมบัติความแข็งแรงและน้ำหนักเบาของโครงสร้างแซนดิวิช ทำให้ถูกนำมาใช้งาน โดยมากในอากาศยาน เช่น ส่วนประกอบต่างๆ ของเฮลิคอปเตอร์ ได้แก่ แผ่นผิวของลำตัว (fuselage skin) ส่วนเชื่อมต่อลำตัวและหาง (boom and tail section) และใบพัดหลัก (main rotor blades) เป็นต้น (Hexcel Composites, 1998) โดยภาพที่ 5 แสดงภาพใบพัดหลักของเฮลิคอปเตอร์รุ่น Sea King ที่ประกอบขึ้นจากแผ่นประกอบผ้าใยแก้วสองแผ่นประกบกับแกนรวงผึ้ง (Leite *et al.* , 2004)

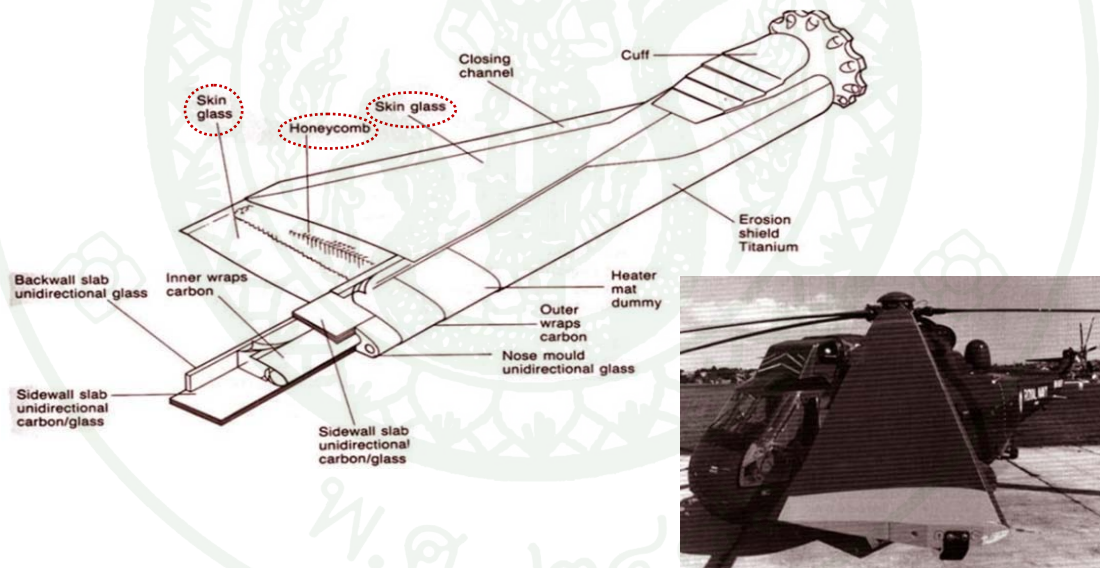
ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบความต้านทานการตัด การโก่งตัว และน้ำหนักระหว่างคานทรงรูปกับคานแซนด์วิช

Relative values



	Solid beam (Alloy 2024)	Sandwich beam (Nomex [®])
Flexural rigidity	1.0	90.7500
Deflection from bending moment	1.0	(L) 0.0129, (W) 0.0110
Weight	1.0	1.0889

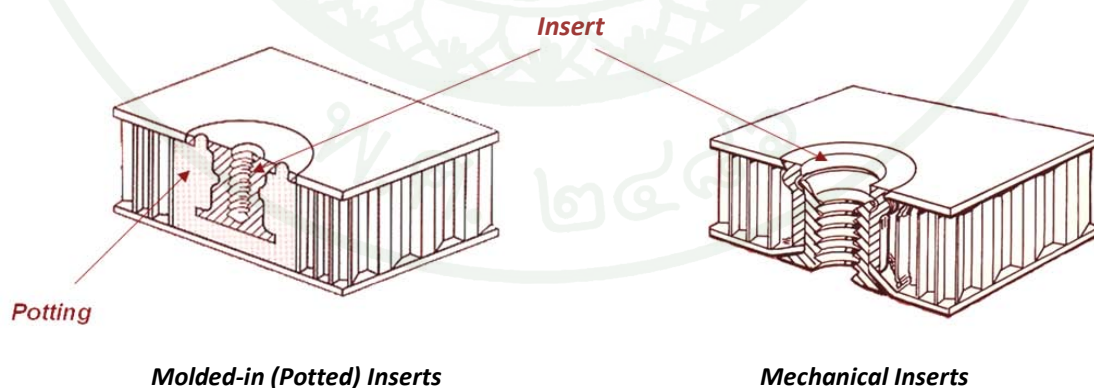
ที่มา: Hexcel Composites (2000)



ภาพที่ 5 การประยุกต์ใช้โครงสร้างแซนด์วิชกับใบพัดหลักของเฮลิคอปเตอร์รุ่น Sea King

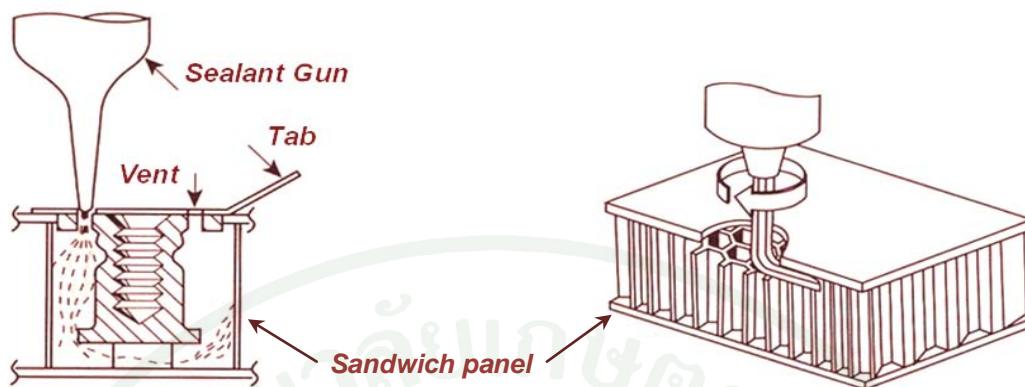
ที่มา: Leite *et al.* (2004)

ถึงแม้สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับน้ำหนักของโครงสร้างแกนค้ำจะเป็จุดเด่นสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้าน โครงสร้าง แต่มีข้อจำกัด คือ ความอ่อนแอของแกนแกนค้ำ โดยเฉพาะในกรณีที่เชื่อมต่อโครงสร้างแกนค้ำกับโครงสร้างอื่นๆ ซึ่งทำให้เกิดความเค้นเฉพาะตำแหน่ง (stress concentration) สูง และสามารถสร้างความเสียหายให้แก่โครงสร้างทั้งหมดได้ ดังนั้นผู้ใช้งาน โครงสร้างแกนค้ำจึงคิดค้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว ซึ่งมีหลายวิธี โดยวิธีการหนึ่งที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพในการใช้งาน คือ การใช้ตัวสอดแทรก (insert) ในเรซินหล่อ (molded-in potted) และติดตั้งด้วยแรง (mechanical) แสดงดังภาพที่ 6 โดยตัวสอดแทรกในเรซินหล่อเป็นวิธีการที่นิยมมากกว่า เนื่องจากเรซินหล่อ (potting) มีความสามารถในการยึดตัวสอดแทรก แกน และแผ่นผิวแกนค้ำเข้าด้วยกันได้ดี ส่งผลให้สามารถกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นไปยังโครงสร้างอื่นๆ ได้เป็นอย่างดี (Shur-Lok Corporation, 1981) ซึ่งเกี่ยวข้องกับหัวข้องานวิจัยนี้โดยตรงและจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป สำหรับขั้นตอนการติดตั้งตัวสอดแทรกในเรซินหล่อ จะเริ่มต้นจากการนำ โครงสร้างแกนค้ำที่ต้องการศึกษามาเจาะรูในตำแหน่งที่ต้องการเชื่อมต่อกับ โครงสร้างอื่นๆ จากนั้นวางตัวสอดแทรกให้อยู่ในตำแหน่งเสมอแผ่นผิวแกนค้ำด้านบนด้วย Shur-Tap[®] จากนั้นอัดเรซินหล่อซึ่งผสมรอไว้ในสถานะของเหลวด้วยปืนซิลแลนท์ (sealant gun) จนกระทั่งเรซินหล่อไหลออกทางรูตรงกันข้าม จากนั้นปล่อยให้เรซินหล่อบ่มตัวที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 °C แสดงดังภาพที่ 7 (ซ้าย) ในกรณีที่ต้องการให้การเชื่อมต่อมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่รับภาระกรรมเนื่องของเรซินหล่อด้วยการตัดแกนรูวงผึ้งให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเพิ่มเติมจากการติดตั้งตามปกติ (undercut) แสดงดังภาพที่ 7 (ขวา)



ภาพที่ 6 ตัวสอดแทรกในเรซินหล่อและติดตั้งด้วยแรง

ที่มา: Shur-Lok Corporation (1981)



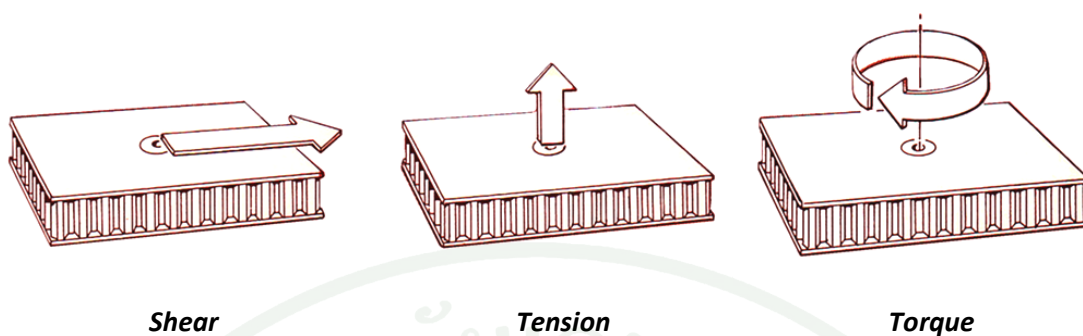
Shur-Tab® Potting Operation

Typical Core Undercut for Molded-in (Potted) Inserts

ภาพที่ 7 การติดตั้งตัวสอดแทรกในเรซินหล่อแบบปกติและแบบตัดแกนรูฟุ้งเพิ่มเติม (undercut)

ที่มา: Shur-Lok Corporation (1981)

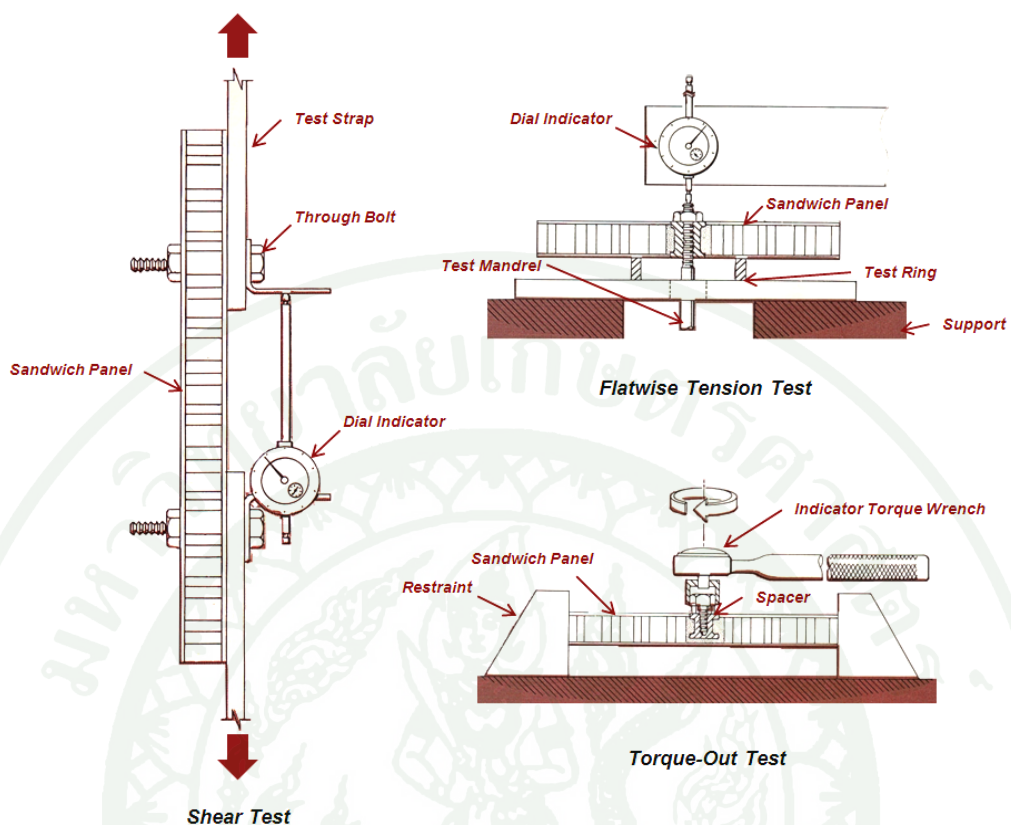
การประยุกต์ใช้ตัวสอดแทรกโลหะ (metallic insert) ในโครงสร้างแซนด์วิชมีตัวแปรหลายตัวที่เกี่ยวข้อง ตั้งแต่วัสดุต่างๆ ที่ใช้ประกอบเป็นโครงสร้างแซนด์วิช วิธีการติดตั้งตัวสอดแทรก รูปแบบและขนาดของตัวสอดแทรก และทิศทางของภาระกรรมที่ส่งผ่านจากตัวสอดแทรกไปสู่โครงสร้างแซนด์วิช เป็นต้น เพื่อให้งานวิจัยชิ้นนี้มีขอบเขตที่ชัดเจน ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชชนิดแผ่นผิวแผ่นประกอบคาร์บอนและแกนรูฟุ้งนอเม็กซ์ สำหรับวิธีการติดตั้งแบบมีการตัดแกนรูฟุ้งเพิ่มเติมของตัวสอดแทรกโลหะที่มีรูปแบบและขนาดตามการใช้งานในเฮลิคอปเตอร์ ส่วนภาระกรรมที่ส่งผ่านที่มีทิศทางที่แตกต่างกันตามเอกสารอ้างอิง สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 3 ประเภท ดังภาพที่ 8 ซึ่งคล้ายคลึงกันกับการใช้งานน็อตหรือหมุดย้ำที่ต้องพิจารณาภาระกรรมดึง (tension force) และภาระกรรมเฉือน สำหรับภาระกรรมบิด (torque) ต้องมีการศึกษาเพื่อใช้ในการติดตั้งที่อาจต้องมีการขันน็อตให้แน่น ซึ่งอาจสร้างความเสียหายให้แก่เรซินหล่อได้



ภาพที่ 8 รูปแบบของภาระกรรมต่างๆ ที่กระทำกับตัวสอดแทรกใน โครงสร้างแซนดวิช

ที่มา: Shur-Lok Corporation (1981)

เพื่อให้ทราบว่าการณีของภาระกรรมประเภทใดที่ควรเลือกศึกษา บริษัทผู้ผลิต (Shur-Lok corporation) จึงมีการทดสอบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 9 ประกอบด้วย การทดสอบด้วยการกระทำกรรมเฉือน (shear test) การทดสอบด้วยการกระทำกรรมดึง (flatwise tension test) และการทดสอบด้วยการกระทำกรรมบิด (torque-out test) สำหรับโครงสร้างแซนดวิชประเภทเดียวกันประกอบด้วยแผ่นผิวอลูมิเนียมผสม 2024-T3 และแกนรวงผึ้งอลูมิเนียมผสม 5052 ($\frac{1}{4} \times .002$) สำหรับตัวสอดแทรกโลหะ SL602-3-500S ที่มีวิธีการติดตั้งตัวสอดแทรกในเรซินหล่อแบบปกติด้วยเรซินหล่อ SLE3001 ตลอดความหนาของโครงสร้างแซนดวิช เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้ง 3 ประเภท แสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 10 พบว่าภาระกรรมดึงเป็นภาระกรรมวิกฤตสำหรับการใช้งานตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนดวิช เนื่องจากภาระกรรมดึงวิกฤตมีค่าน้อยกว่าค่าภาระกรรมเฉือนวิกฤตถึงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การเพิ่มพื้นที่รับภาระกรรมเฉือนของเรซินหล่อด้วยการตัดแกนรวงผึ้งให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น ถึงแม้จะสามารถทำให้ภาระกรรมดึงวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อน้ำหนักหลังการติดตั้งตัวสอดแทรกเพิ่มขึ้นประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ แต่ยังคงมีค่าแตกต่างกับค่าภาระกรรมเฉือนวิกฤตเพียง 5 เปอร์เซ็นต์ และจะสังเกตผลการทดสอบต่างๆ ได้ว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นสูงสุดถึงประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากความแข็งแรงของโครงสร้างแซนดวิชแต่ละชิ้นที่มีขั้นตอนการติดตั้งตัวสอดแทรกแตกต่างกัน อีกทั้งวัสดุที่ประกอบเป็นโครงสร้างแซนดวิชมีหลายชนิดและองค์ความรู้การใช้งานตัวสอดแทรกที่มีค่อนข้างน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นด้วยการศึกษาการดึงนอกระนาบเป็นสำคัญ



ภาพที่ 9 การทดสอบความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะด้วยวิธีการต่างๆ

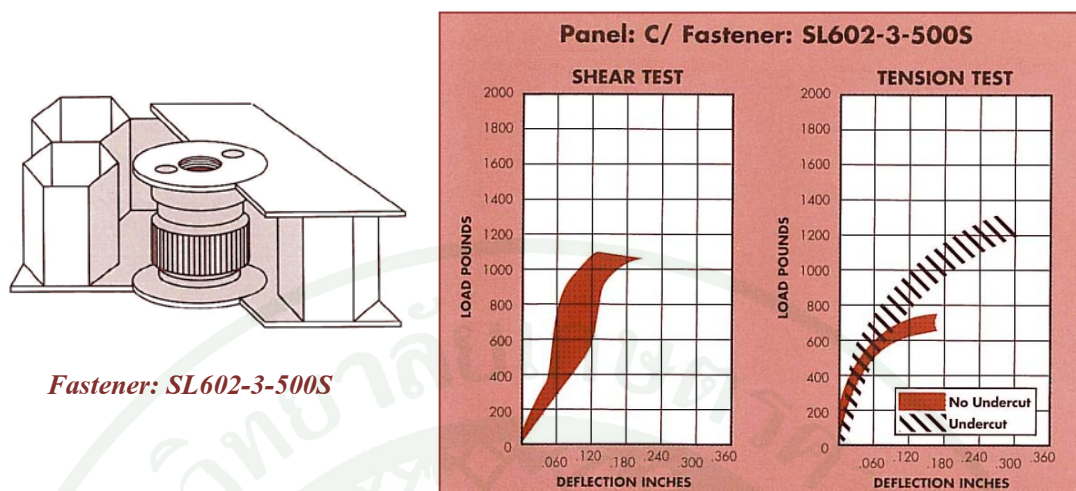
ที่มา: Shur-Lok Corporation (1981)

ตารางที่ 2 ค่าภาระกรรมวิกฤตของตัวสอดแทรกโลหะสำหรับการทดสอบประเภทต่างๆ

Ultimate loads at failure			
Shear test	Tension test		Torque-out test
	No undercut	Undercut	
4.87 kN	2.92 kN	5.14 kN	9.60 N·m
4.83 kN	3.25 kN	5.56 kN	8.47 N·m
5.32 kN	3.22 kN	5.20 kN	9.04 N·m

Installed weights: No undercut 8.87 gr., Undercut 13.77 gr.

ที่มา: Shur-lok corporation. (1981)



ภาพที่ 10 ผลการทดสอบภาระกรรมเฉือนเปรียบเทียบกับภาระกรรมดึงสำหรับตัวสอดแทรกโลหะ ประเภท SL602-3-500S

ที่มา: Shur-Lok Corporation (1981, 1987)

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้โครงสร้างแซนด์วิชสำหรับงานโครงสร้างมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างของยานพาหนะประเภทต่างๆ แต่ยังมีข้อจำกัดอยู่ที่ความอ่อนแอของแกนที่ทำให้การเชื่อมต้อมีแนวโน้มจะเป็นจุดวิกฤตของการใช้งาน ผู้ใช้จึงต้องมีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับการส่งผ่านภาระกรรม และกลไกการพัง ในกรณีที่ใช้ตัวสอดแทรกเป็นตัวช่วยเสริมความแข็งแรง ซึ่งมีตัวแปรหลายตัวที่เกี่ยวข้องในการศึกษา ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงจำกัดตัวแปรต่างๆ ด้วยการมุ่งเน้นศึกษาการส่งผ่านภาระกรรม กลไกการพัง และความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะที่ใช้สำหรับการยึดติดโครงสร้างแซนด์วิชของผนังเฮลิคอปเตอร์ โดยใช้ความเข้าใจคุณลักษณะและรูปแบบความเสียหายขององค์ประกอบต่างๆ ของชิ้นทดสอบด้วยแบบจำลองสมาชิกจำกัด (Finite Element Modeling: FEM)

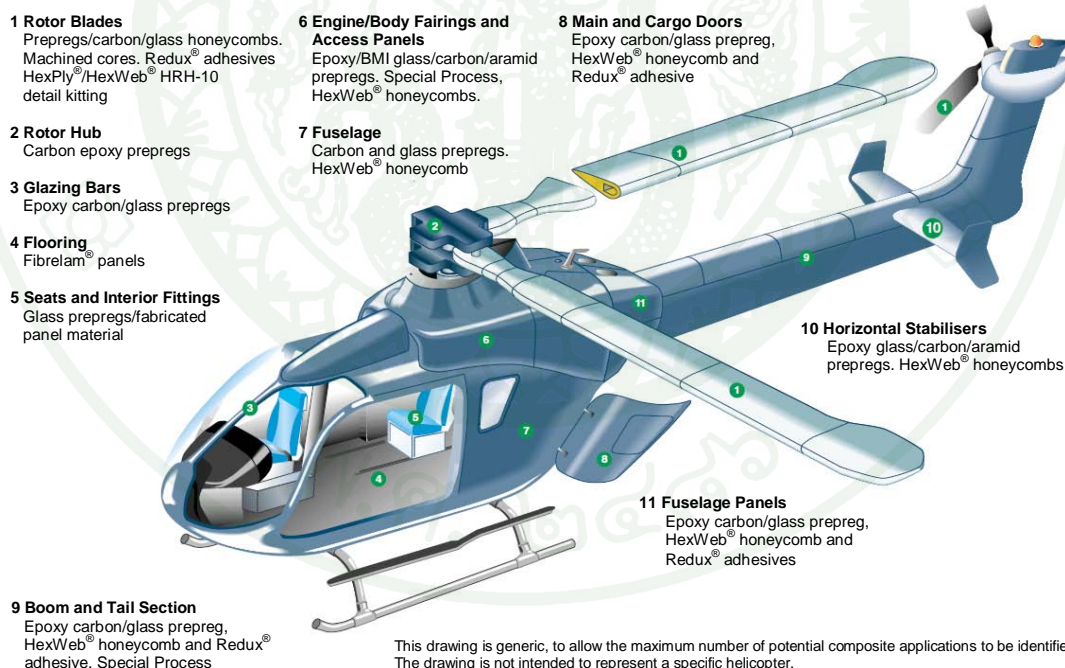
วัตถุประสงค์

1. จำลองการส่งผ่านภาระกรรมที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของตัวสอดแทรกลักษณะต่างๆ ในเรซินหล่อโดยใช้แบบจำลองสมาชิกจำกัด
2. สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวสอดแทรกลักษณะต่างๆ ได้
3. ทดสอบความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช เพื่อศึกษากลไกความเสียหายภายใต้การดึงทดสอบนอกระนาบ
4. จำลองกลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลองสมาชิกจำกัด
5. สามารถทำนายภาระกรรมสูงสุดที่ตัวสอดแทรกโลหะสามารถรับได้

การตรวจเอกสาร

หลักการพื้นฐานที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างอากาศยาน จะให้ความสำคัญกับเรื่องน้ำหนักที่เบาเป็นหลัก โดยวัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างยังคงคุณลักษณะเฉพาะตัว สามารถใช้งานได้ อย่างปลอดภัยและไม่เกิดความเสียหายขณะใช้งาน การพัฒนาความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber - Reinforced Plastic: CFRP) ที่มีคุณสมบัติแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา ทำให้วัสดุ ประกอบ (composite material) เข้ามามีส่วนในการสร้างอากาศยานมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งวัสดุ ประกอบเริ่มเข้ามาทดแทนโลหะ เช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม เหล็กกล้า และอื่นๆ ในอากาศยาน อาทิเช่น โบอิง 787 กว่า 50 เปอร์เซ็นต์ หรือในเฮลิคอปเตอร์รุ่น NH-90 ที่ผลิตโดยบริษัทยูโรคอปเตอร์ ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตเฮลิคอปเตอร์ที่ใหญ่ที่สุดในโลกด้วยวัสดุประกอบทั้งหมด เป็นต้น

1. โครงสร้าง และวัสดุสำหรับลำตัวเฮลิคอปเตอร์

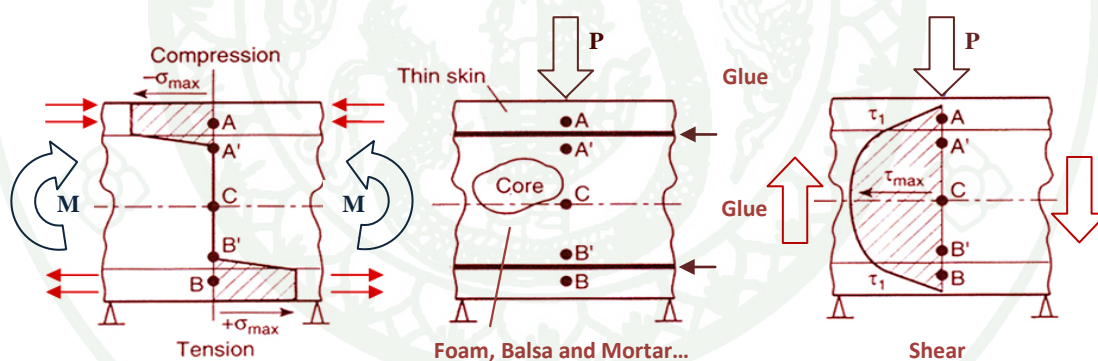


ภาพที่ 11 วัสดุประกอบสำหรับส่วนประกอบต่างๆ ของเฮลิคอปเตอร์

ที่มา: Hexcel Composites (1998)

พัฒนาการของโครงสร้างเสลิกอปเตอร์ในปัจจุบันมีการนำวัสดุประกอบมาใช้มากขึ้น เช่นเดียวกับการใช้ในอากาศยาน เนื่องจากข้อได้เปรียบของความแข็งแรงเมื่อเทียบกับน้ำหนักเป็นหลัก เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเสลิกอปเตอร์วัสดุประกอบถูกนำมาใช้ในการขึ้นรูปของโครงลำตัวหรือแม่เตโอบัด แสดงดังภาพที่ 11 ตัวอย่างเช่น โครงลำตัวจะใช้โครงรอบนอกแบบกระดาษรังผึ้งร่วมกับแผ่นผิวแผ่นประกอบคาร์บอน - อีพ็อกซี โดยเสลิกอปเตอร์บางประเภทจะใช้แผ่นผิวแผ่นประกอบแบบลายขัด (plain weave) ที่มีลักษณะการทอเส้นใยแบบขัดสลับกันระหว่างแนวตั้งและแนวนอน ซึ่งทำมุมตั้งฉากต่อกันเพียงแค่ 2 ชั้น เรียงกันแบบ [0,90] ความหนาสุทธิประมาณ 0.45 มิลลิเมตร หรือในเสลิกอปเตอร์บางประเภทจะใช้แผ่นผิวประกบที่มีความหนาไม่เท่ากันประกบกับแกน เรียกว่าเป็นโครงสร้างแซนด์วิชขอสมาศ เนื่องจากข้อจำกัดด้านน้ำหนักและความต้องการของผู้ออกแบบในการใช้วัสดุเท่าที่ต้องการ โดยแผ่นผิวที่หนากว่าจะทำหน้าที่ส่งผ่านภาระกรรมเป็นหลัก ส่วนแผ่นผิวที่บางกว่าจะเป็นเพียงส่วนช่วยเสริมความต้านทานในการโค้งให้แก่โครงสร้างเท่านั้น

2. หลักการส่งผ่านภาระกรรมของโครงสร้างแซนด์วิช



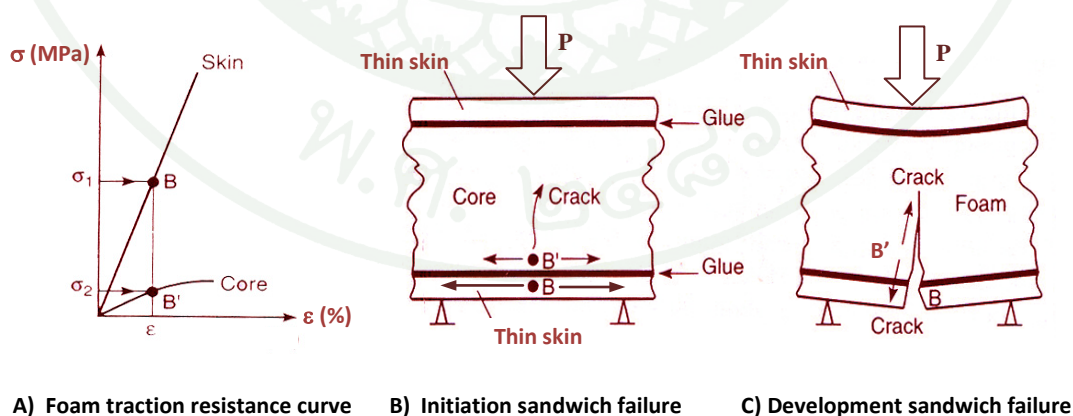
ภาพที่ 12 รูปแบบการกระจายความเค้นในคานแซนด์วิชของการตัด 3 จุด

ที่มา: Geier (1994)

การพิจารณาสมมูลของคานแซนด์วิชภายใต้ภาระกรรมคดนอกระนาบของการตัด 3 จุด จะแสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถในการต้านทานภาระกรรมคดโค้งต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ดังภาพที่ 12 เมื่อวัสดุได้รับภาระกรรมคดมากกระทำบนคานตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับทั้งสอง จะทำให้คานเกิดการแอ่นไปตามทิศทางที่ภาระกรรมมากกระทำ ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการหดเข้าของคานบริเวณด้านบนเนื่องจากความเค้นอัด (compressive stress) ที่มีค่าสูงสุดที่

ตำแหน่ง A ของแผ่นผิวหนังและเกิดการยืดออกของคานบริเวณด้านล่างเนื่องจากความเค้นดึง (tensile stress) ที่มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง B ของแผ่นผิวหนัง ซึ่งต่างเป็นผลมาจากโมเมนต์ของภาระกรรมคัต โดยตำแหน่งของแกนสะเทิน (neutral axis) จะมีค่าความเค้นเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่มีการหดเข้าหรือยืดออกของคาน แต่บริเวณดังกล่าวมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ตำแหน่ง C ของแกน ซึ่งเป็นผลมาจากภาระกรรมคัตมากระทำบนคาน ในกรณีที่แกนและแผ่นผิวหนังมีการเชื่อมต่อแบบสมบูรณ์ภายใต้ภาระกรรมคัตโค้ง จะเกิดการกระจายความเค้นอัดที่เกิดขึ้นจากแผ่นผิวหนังไปยังแกนที่ตำแหน่ง A' และความเค้นดึงที่เกิดขึ้นจากแผ่นผิวหนังไปยังแกนที่ตำแหน่ง B' แสดงดังภาพที่ 12

จากคุณสมบัติในการต้านทาน โมเมนต์คัตของแกนที่มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นผิว จะทำให้แกนบริเวณรอยต่อกับแผ่นผิวเกิดความเสียหาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของคานแซนด์วิชที่ควรจะได้รับ ดังนั้นจึงควรเลือกแกนที่มีคุณสมบัติในการรับภาระกรรมเฉือนบนระนาบควบคู่ไปกับคุณสมบัติในการต้านทานการโก่งตัวของคานได้ดี เช่น แกนรวงผึ้ง เป็นต้น โดยภาพที่ 13 แสดงตัวอย่างความเสียหายของคานแซนด์วิชที่มีการเชื่อมต่อแบบสมบูรณ์สำหรับแกนชนิดโฟมและแผ่นผิวแบบบางภายใต้ภาระกรรมคัตโค้งที่มีสาเหตุมาจากความเค้นดึง ซึ่งจะสังเกตได้ว่าความเสียหายจะเริ่มเกิดขึ้นที่แกนบริเวณตำแหน่ง B' ด้วยความเค้นดึงวิกฤต (σ_2) เนื่องจากความสามารถในการต้านทานความเค้นดึง (traction resistance) ของแกนมีค่าน้อยกว่าแผ่นผิวหนังมาก ($\sigma_2 \ll \sigma_1$) จากนั้นความเสียหายจะขยายตัวจากแกนไปยังแผ่นผิวหนังด้านล่าง จนกระทั่งแผ่นผิวเกิดความเสียหายเนื่องจากค่าความเค้นดึงวิกฤต (σ_1) (Gay *et al.*, 2003; Geier, 1994)

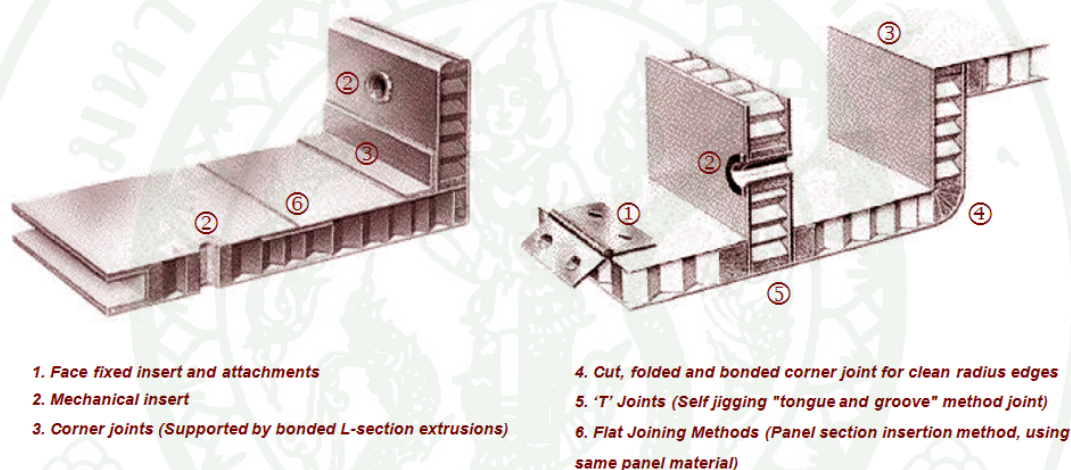


ภาพที่ 13 รูปแบบความเสียหายภายใต้ความเค้นดึงของคานแซนด์วิชสำหรับการคัต 3 จุด

ที่มา: Geier (1994)

3. การเชื่อมต่อ (jointing) ด้วยตัวสอดแทรกสำหรับโครงสร้างแซนด์วิช

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเชื่อมต่อสำหรับโครงสร้างแซนด์วิชมีหลายประเภท ได้แก่ การเชื่อมต่อด้วยสลักเกลียว (self-tapping screw) หรือหมุดยึด (rivet) การเชื่อมต่อด้วยตัวสอดแทรก การเข้ามุดด้วยแผ่นยึดรูปตัวแอล การเข้ามุดโดยตัดแผ่นผิวแซนด์วิชบางส่วนออกแล้วพับโครงสร้างตามมุมที่ต้องการ (cut and fold fabrication) การเชื่อมต่อในรูปแบบตัวที ('T' joints) และการเชื่อมต่อระนาบด้วยการแทนที่ของโครงสร้างแซนด์วิช (flat jointing method) เป็นต้น (Ayeh, 2002; Hexcel Composites, 1997) แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 14

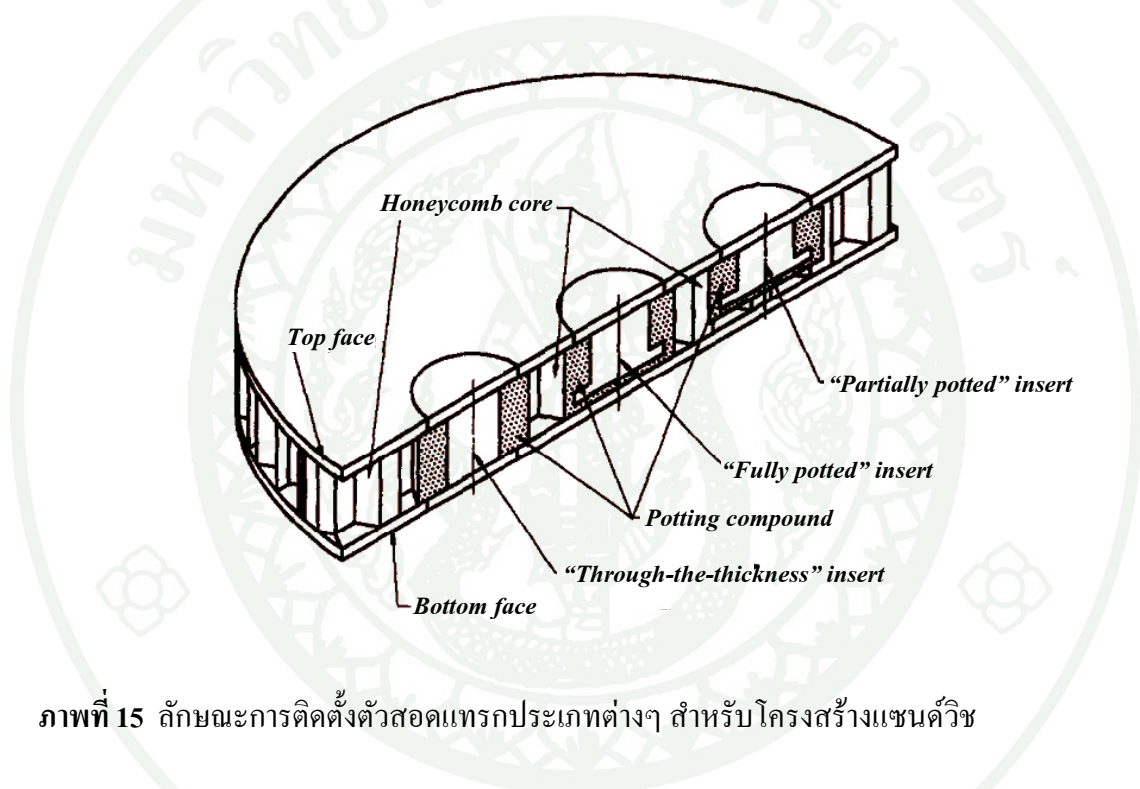


ภาพที่ 14 การเชื่อมต่อประเภทต่างๆ สำหรับโครงสร้างแซนด์วิช

ที่มา: Milton and Grove (1997)

การเชื่อมต่อด้วยตัวสอดแทรกเป็นวิธีการเชื่อมต่อที่นิยมมากสำหรับโครงสร้างแซนด์วิช เนื่องจากสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้บริเวณที่มีความเค้นสูงในแกน โดยการทดแทนแกนด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่า ส่งผลทำให้การกระจายความเค้นเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งตัวสอดแทรกสามารถติดตั้งได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ ตัวสอดแทรกตลอดความหนา (through-the-thickness insert) ที่มีการติดตั้งทั้งตัวสอดแทรกและเรซินหล่อตลอดความหนาของโครงสร้างแซนด์วิช ตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนา (fully potted insert) ที่มีการติดตั้งตัวสอดแทรกไม่ตลอดความหนาแต่เติมเรซินหล่อให้เต็มตลอดความหนาของโครงสร้างแซนด์วิช และตัวสอดแทรกในเรซินหล่อไม่เต็มความหนา (partially potted insert) ที่มีการติดตั้งทั้งตัวสอดแทรกและเรซินหล่อไม่ตลอดความ

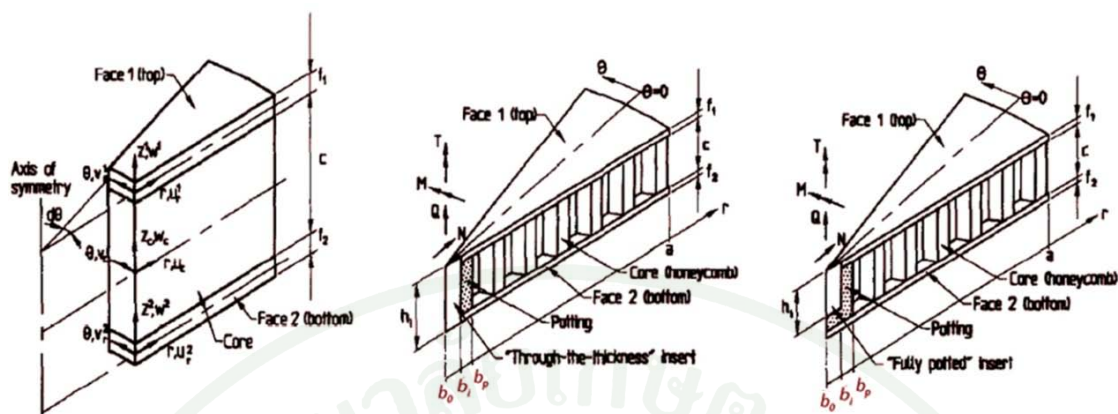
หนาของโครงสร้างแซนดวิช แสดงดังภาพที่ 15 โดยทั่วไป ตัวสอดแทรกตลอดความหนาเป็นที่ยอมรับว่ามีความแข็งแรงมากกว่าตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนา เนื่องจากตัวสอดแทรกประเภทแรกสามารถส่งผ่านภาระกรรมที่เกิดขึ้นไปยังแผ่นผิวทั้งสองที่เกิดการแอ่นไปพร้อมกับโครงสร้างตามทิศทางของภาระกรรมกระทำนอกระนาบ โดย Thomsen (1998) ได้แสดงการวิเคราะห์ตัวสอดแทรกทั้งสองประเภทข้างต้นด้วยทฤษฎี high-order โดยเน้นให้เห็นถึงการกระจายความเค้นบริเวณรอยต่อต่างๆ ได้แก่ ตัวสอดแทรกกับเรซินหล่อและเรซินหล่อกับแกนรวงผึ้ง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากความเข้มข้นของความเค้นเฉพาะตำแหน่ง



ภาพที่ 15 ลักษณะการติดตั้งตัวสอดแทรกประเภทต่างๆ สำหรับ โครงสร้างแซนดวิช

ที่มา: Thomsen (1998)

ทฤษฎี high-order เป็นทฤษฎีที่ได้รับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมมติฐานอย่างง่าย คือ แผ่นผิวจะมีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้นและเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันที่มีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิกเช่นเดียวกับเรซินหล่อและแกนรวงผึ้งภายใต้ภาระกรรมนอกระนาบ โดยภาพที่ 16 แสดงลักษณะของตัวสอดแทรกประเภทต่างๆ ใน โครงสร้างแซนดวิช ซึ่งกำหนดให้ b_i คือ รัศมีของตัวสอดแทรก และ b_p คือ รัศมีของเรซินหล่อ

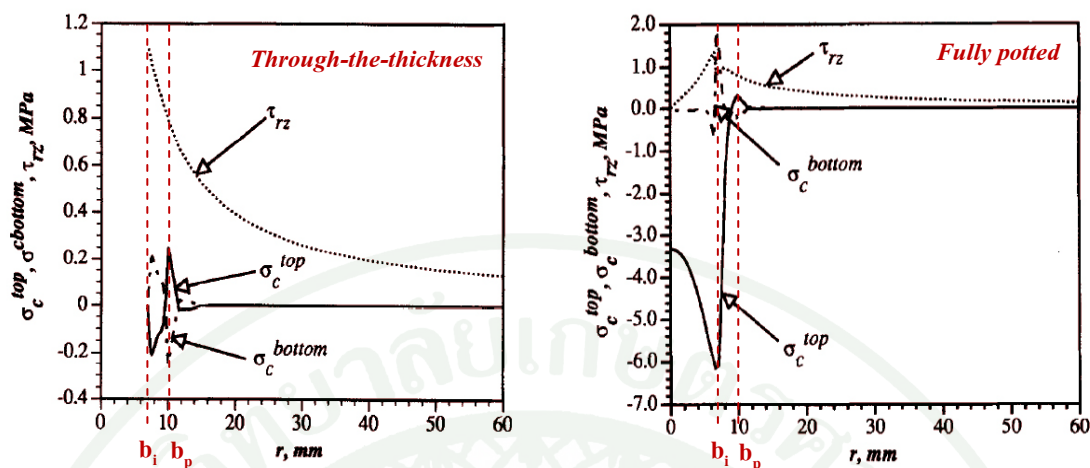


ภาพที่ 16 สภาวะขอบของตัวสอดแทรกทั้งสองประเภทใน โครงสร้างแซนด์วิชแบบสมมาตร

ที่มา: Thomsen (1998)

ภาพที่ 17 แสดงผลการคำนวณเชิงตัวเลขของ การกระจายความเค้นเฉือนและความเค้นรัศมี (radius stress) ที่เกิดขึ้นภายในแกนแซนด์วิชที่ประกอบด้วยตัวสอดแทรกทั้งสองประเภทรัศมี (b_1) 7 มิลลิเมตร เรซินหล่อรัศมี (b_p) 10 มิลลิเมตร และแกนรวงผึ้งอูมิเนียมรัศมี 60 มิลลิเมตร ด้วยภาระกรรมคดนอกระนาบ 1 กิโลนิวตัน พบว่าตัวสอดแทรกทั้งสองประเภทต่างมีค่าความเค้นเฉือน (τ_{rz}) สูงสุดบริเวณรอยต่อของตัวสอดแทรกกับเรซินหล่อประมาณ 1-1.5 เมกะปาสคาล และมีแนวโน้มของค่าลดลงเข้าไปใกล้ศูนย์บริเวณขอบภายนอกของแกนแซนด์วิช ส่วนค่าความเค้นรัศมีที่ได้รับจากรอยต่อของแผ่นผิวอูมิเนียมด้านบนกับตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนาและเรซินหล่อ (σ_c^{top}) มีค่ามากกว่าความเค้นรัศมีที่ได้รับจากรอยต่อดังกล่าวกับตัวสอดแทรกตลอดความหนาถึงประมาณ 30 เท่า ซึ่งมีสาเหตุมาจากการคดเฉพาะที่ (local bending) ของแผ่นผิวด้านบนของตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนา ดังนั้นในกรณีที่ภาระกรรมภายนอกมีค่าสูง ควรเลือกใช้ตัวสอดแทรกตลอดความหนามากกว่าตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนา

แต่อย่างไรก็ตาม จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปทรงของตัวสอดแทรกจริงมีความแตกต่างจากทฤษฎีที่เป็นทรงกระบอก แสดงดังภาพที่ 15 ดังนั้นการกระจายความเค้นภายในแกนบริเวณรอยต่อต่างๆ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีความแตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเริ่มต้นด้วยการศึกษาและเปรียบเทียบความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของตัวสอดแทรกลักษณะต่างๆ ตามจริงในเรซินหล่อ โดยใช้แบบจำลองสมาชิกจำกัด เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะที่แท้จริงของตัวสอดแทรกลักษณะต่างๆ



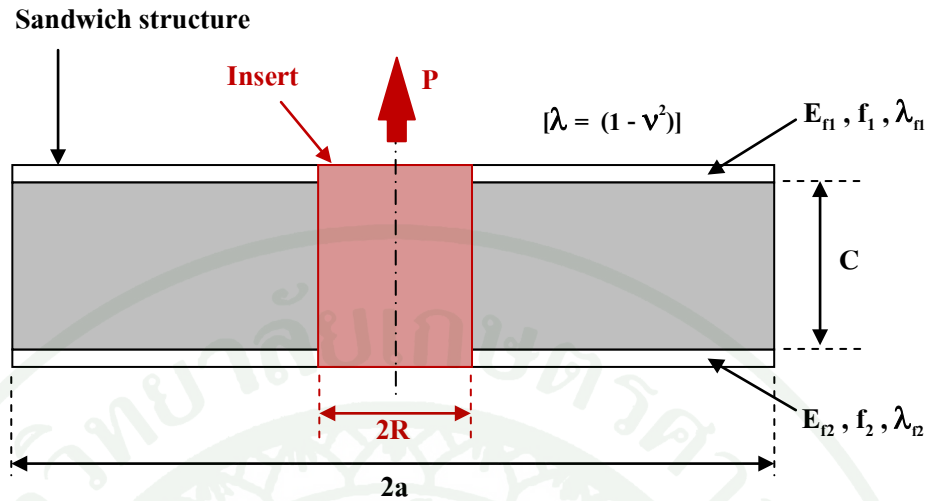
ภาพที่ 17 การกระจายความเค้นภายในแกนแซนดวีชของตัวสอดแทรกทั้งสองประเภท

ที่มา: Thomsen (1998)

4. หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างแซนดวีช

4.1 ภาวะกรรมวิกฤต (critical load) ของโครงสร้างแซนดวีช

การทำนายภาวะกรรมวิกฤตด้วยสมมติฐานอย่างง่ายถูกนำเสนอโดย André (1996) ว่าด้วยความเค้นเฉือนเป็นผลมาจากภาวะกรรมที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดที่รับภาวะกรรมเฉือน คือ $\tau_{max} = \frac{P_{crit}}{S}$ โดย S คือ พื้นที่หน้าตัดในส่วนต่อระหว่างตัวสอดแทรกและแกนแซนดวีชมีค่าเท่ากับ $2\pi RC$ เมื่อ R คือ รัศมีของตัวสอดแทรก และ C คือ ความหนาของแกนแซนดวีช ผลการคำนวณที่ได้พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ อันเนื่องมาจากผลกระทบจากการโค้งงอของชิ้นทดสอบ ดังนั้น Kuenzi (1947) จึงมีการเพิ่มตัวแปร k_3 แสดงดังสมการที่ 1 โดยใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงสถานะความเสียหายของการโค้งงอที่มีผลต่อภาวะกรรมวิกฤต ซึ่งกำหนดให้พิจารณาจากอัตราส่วนของระยะโค้งงอเนื่องจากความเค้นเฉือนและการดัด ($\frac{\delta_{shear}}{\delta_{bending}}$) ประกอบกัน โดยตัวแปร k_3 จะมีผลก็ต่อเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่า 915



ภาพที่ 18 การทำนายภาระกรรมวิกฤตของโครงสร้างแซนด์วิชด้วยตัวแปร k_3

$$P_{crit} = \frac{2\pi RC\tau_{max}}{k_3} \quad (1)$$

$$\phi_a = a\sqrt{\frac{CG}{D}} \quad (2)$$

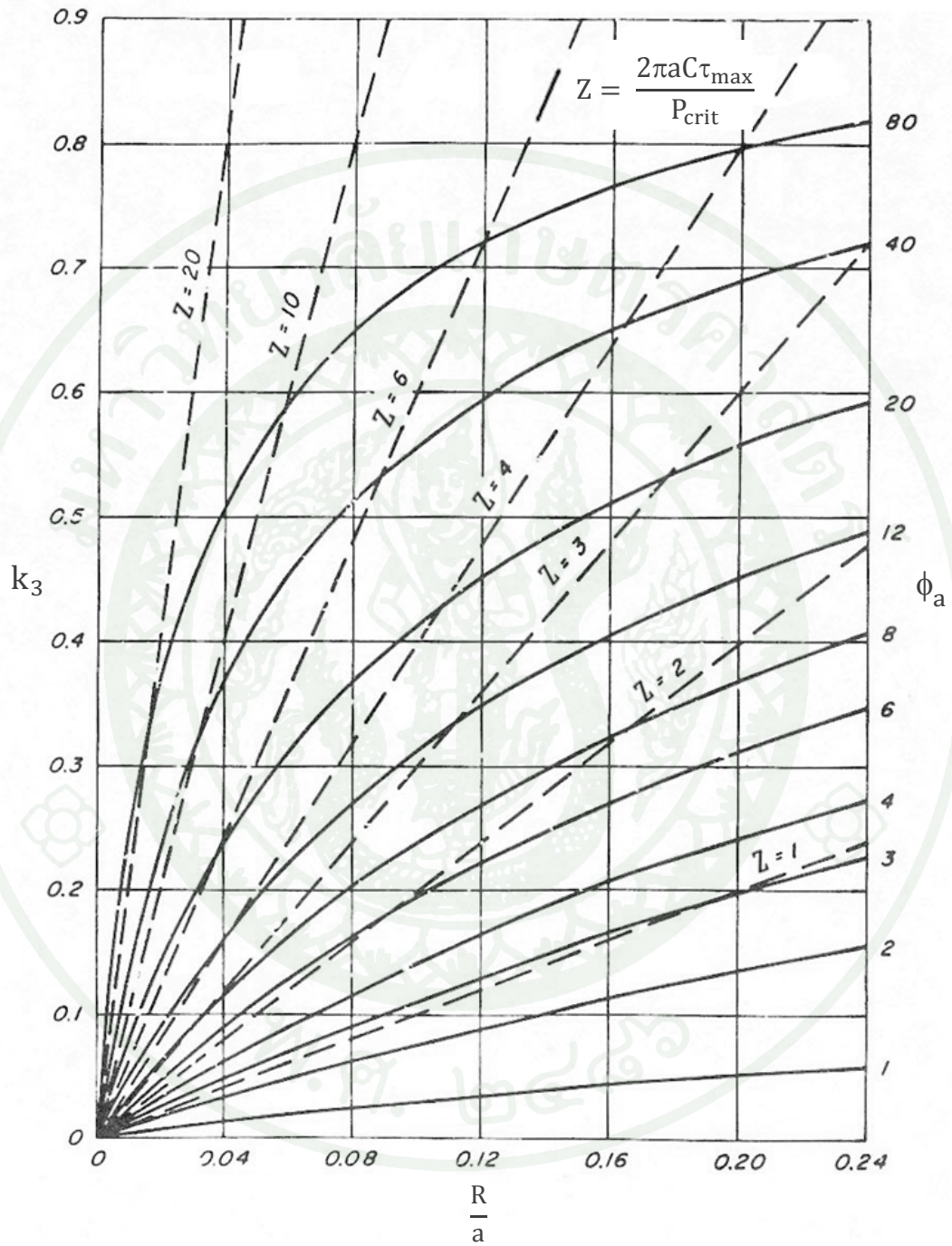
$$D = \frac{1}{12} \left(\frac{E_{f1} f_1^3}{\lambda_{f1}} + \frac{E_{f2} f_2^3}{\lambda_{f2}} \right) \quad (3)$$

$$\lambda = (1 - \nu^2) \quad (4)$$

- เมื่อ G คือ โมดูลัสเฉือน หรือ โมดูลัสความแข็งเกร็งของแกนแซนด์วิช
 E_{11}, E_{12} คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น หรือ โมดูลัสของยังของแผ่นผิวบนและล่าง
 f_1, f_2 คือ ความหนาของแผ่นผิวบนและล่าง
 ν_1, ν_2 คือ อัตราส่วนปัวส์ซองของแผ่นผิวบนและล่าง

(Military Handbook, 1974; Kuenzi, 1947)

MIL-HDBK-23A
19 June 1974

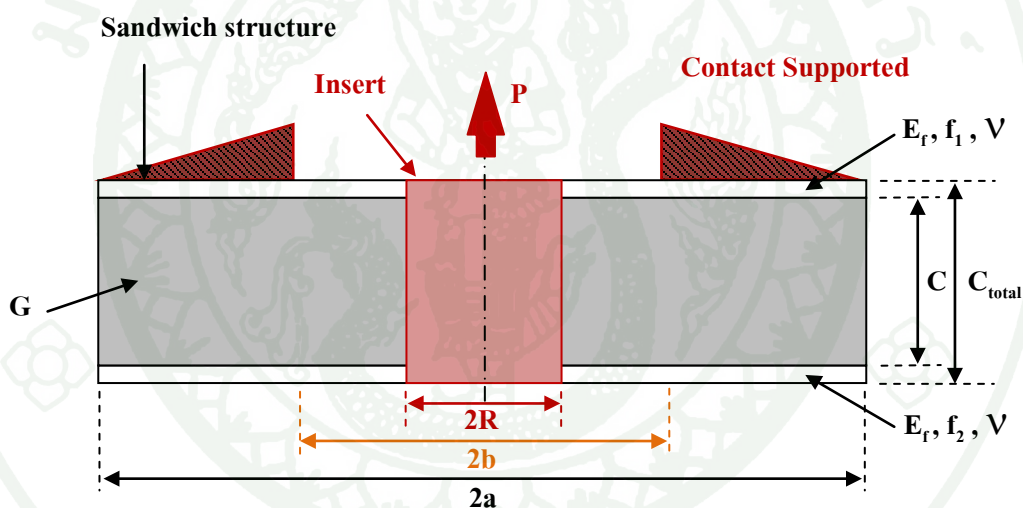


ภาพที่ 19 กราฟพิจารณาค่าคงที่ k_3

ที่มา: Military Handbook23A (1974); Kuenzi (1947)

4.2 ตำแหน่งวิกฤตของโครงสร้างแซนด์วิช

Youngquist และ Kuenzi (1955) ได้ศึกษาการกระจายความเค้นในแกนของโครงสร้างแซนด์วิชด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์ซึ่งถูกพัฒนาสำหรับ โครงสร้างแซนด์วิชภายใต้ภาระกรรมกระทำนอกระนาบ แสดงดังสมการที่ 5 - 11 เปรียบเทียบกับการทดสอบด้วยภาระกรรมกด (concentrated load test) สำหรับตัวสอดแทรกอลูมิเนียมภายใต้ลูกเหล็กทรงกลม (steel ball) ผ่านแผ่นรองรับรัศมี (radius support) 9 นิ้ว โดยขึ้นทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ แกนไม้บัลซาและแกนไม้ก๊อกลซึ่งใช้แผ่นประกบเป็นแผ่นอลูมิเนียม ผลการเปรียบเทียบความเค้นเฉือนกึ่งกลางแกนตามระยะรัศมีระหว่างทฤษฎีกับผลการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 21 พบว่าแกนไม้บัลซาสอดคล้องกันดี แต่สำหรับแกนไม้ก๊อกลมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 20 การทำนายตำแหน่งวิกฤตของโครงสร้างแซนด์วิช

$$\tau(a) = \frac{PI_m}{\pi (C_{total} + C) I} \quad (5)$$

$$I_m = \frac{f_1 f_2 (C_{total} + C)^2}{4 (C_{total} - C)} \quad (6)$$

$$I = I_m + I_f \quad (7)$$

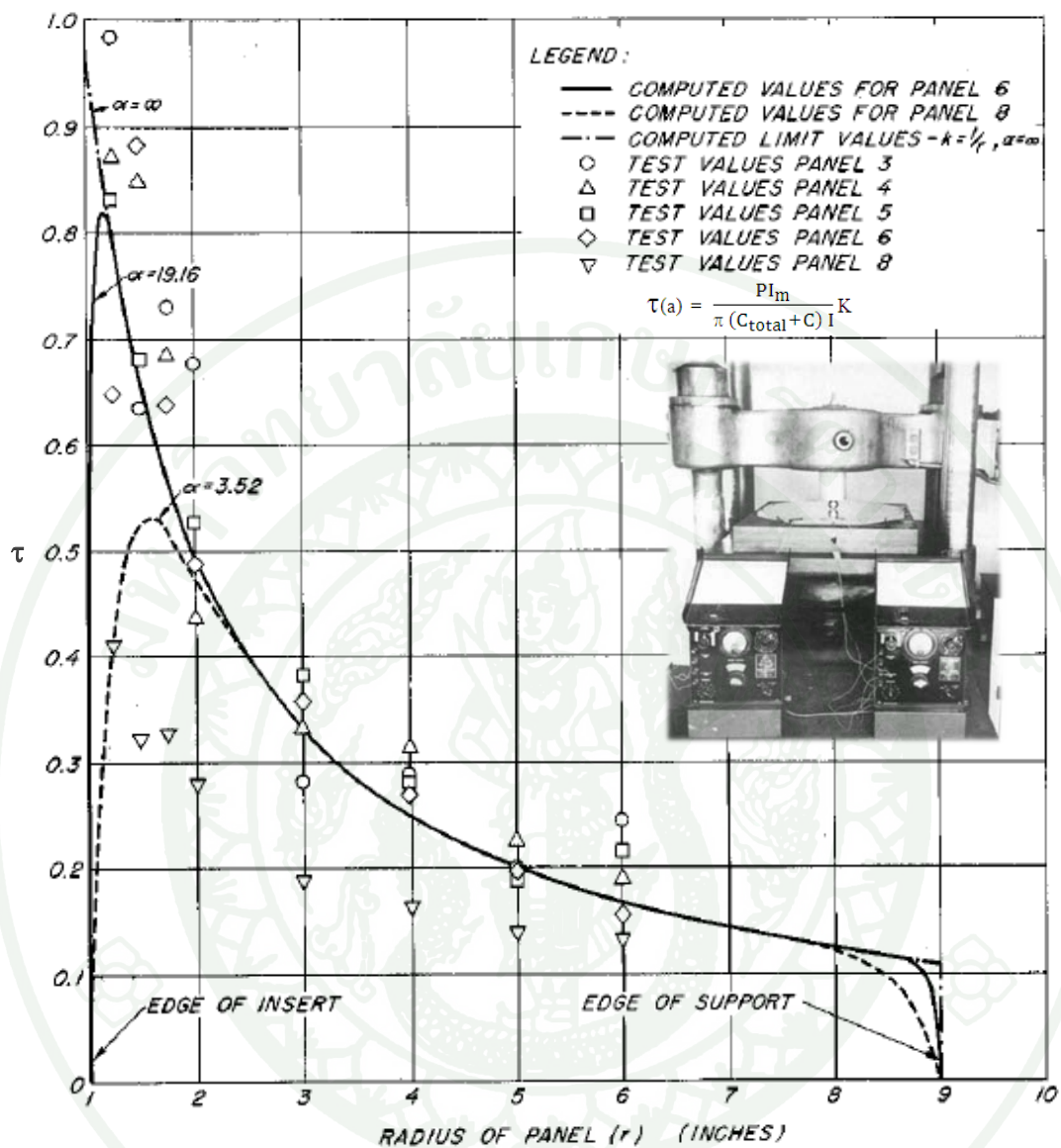
$$I_f = \frac{f_1^3 + f_2^3}{12} \quad (8)$$

$$K = \frac{1}{a} \left[1 - \sqrt{a} \frac{\sqrt{R} \sinh \alpha (a - R) + \sqrt{b} \sinh \alpha (b - a)}{\sqrt{Rb} \sinh \alpha (b - R)} \right] \quad (9)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{G (C_{\text{total}} - C) I}{E C f_1 f_2 I_f}} \quad (10)$$

$$E = \frac{E_f}{1 - v^2} \quad (11)$$

เมื่อ	$T(a)$	คือ	ความเค้นเฉือนในแกนแกนดัดที่รัศมีใดๆ
	P	คือ	ภาระกรรมนอกระนาบสำหรับการทดสอบ
	C	คือ	ความหนาของแกนแกนดัด
	C_{total}	คือ	ความหนารวมของโครงสร้างแกนดัด
	a	คือ	รัศมีของโครงสร้างแกนดัด
	f_1, f_2	คือ	ความหนาของแผ่นผิวด้านบนและล่าง
	b	คือ	รัศมีของแผ่นรองรับ
	R	คือ	รัศมีของตัวสอดแทรก
	G	คือ	โมดูลัสเฉือน หรือ โมดูลัสความแข็งแรงแรงของแกนแกนดัด
	E_f	คือ	โมดูลัสความยืดหยุ่น หรือ โมดูลัสของยังของแผ่นผิว
	v	คือ	อัตราส่วนปัวส์ซองของแผ่นผิว



ภาพที่ 21 ผลการคำนวณเชิงตัวเลขของการกระจายความเค้นเฉือนในแกนแซนดวิชเปรียบเทียบกับ การทดสอบด้วยภาระกรรมกดของเครื่องทดสอบมาตรฐาน

ที่มา: Youngquist and Kuenzi (1955)

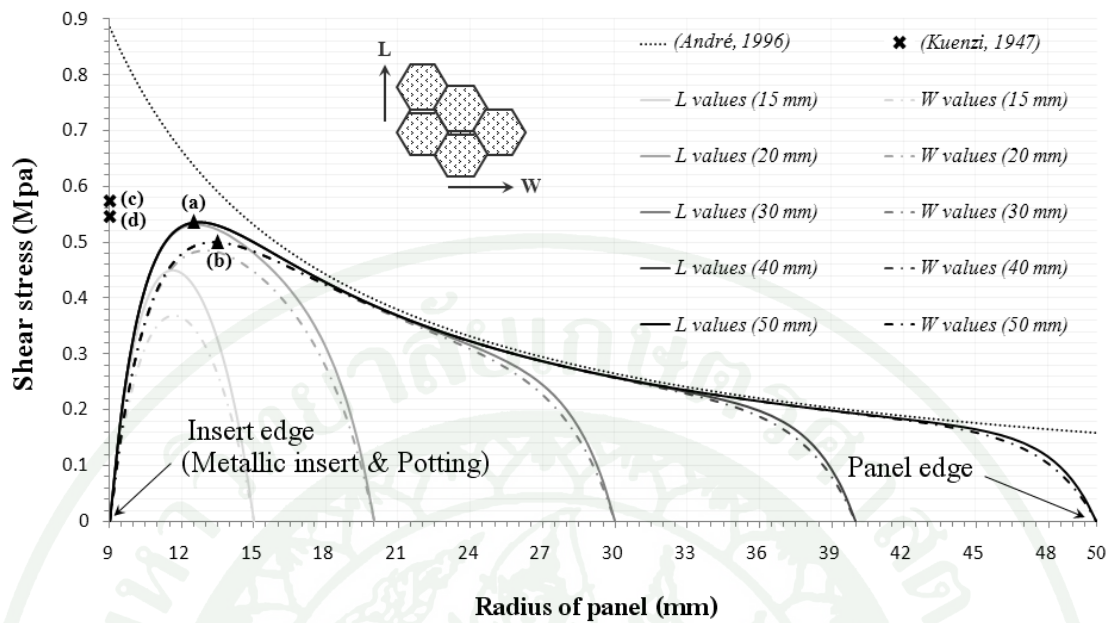
นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณการกระจายความเค้นเฉือนในแกนของโครงสร้างแซนด์วิชขนาด $100 \times 100 \times 21.1$ มิลลิเมตร³ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นผิวแผ่นประกอบคาร์บอนแผ่นบางหนา 0.55 มิลลิเมตร ประกอบกับแกนรวงผึ้งกระดาษนอเม็กซ์หนา 20 มิลลิเมตร ด้วยภาระกรรมดิ่งนอกระนาบขนาด 1000 นิวตัน ผ่านตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนาที่ติดตั้งตามการใช้งานขนาดรัศมี 9 มิลลิเมตร โดยคำนวณตามทฤษฎีการกระจายความเค้นเฉือนในแกนของ Youngquist and Kuenzi (1955) ผ่านแผ่นรองรับรัศมี 15, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร และเปรียบเทียบแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับผลการคำนวณตามทฤษฎีอื่นๆ โดยใช้คุณสมบัติเชิงเส้น (linear property) ของวัสดุต่างๆ ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข

Part	Young's Modulus (MPa)	Shear Modulus (MPa)	Poisson's ratio
skin	$E_x = E_z = 52000, E_y = 5000$	$G_{xz} = 32424, G_{xy} = G_{yz} = 3500$	$\nu_{xz} = 0.09, \nu_{xy} = \nu_{yz} = 0.29$
core	$E_x = E_z = 1, E_y = 94$	$G_{xz} = 1, G_{yz} = 17, G_{xy} = 26$	$\nu_{xz} = 0.3, \nu_{xy} = \nu_{yz} = 0.02$

ที่มา: Bunyawichakul (2005)

ผลการคำนวณภายใต้ทฤษฎีของ Youngquist and Kuenzi (1955) ที่ระยะรองรับต่างๆ พบว่าที่รัศมีของระยะรองรับมากกว่ารอยต่อประมาณ 3 เท่า ได้แก่ 30, 40 และ 50 มิลลิเมตร มีตำแหน่งของค่าความเค้นเฉือนสูงสุดในแกนแซนด์วิชคงที่จากระยะขอบของรอยต่อประมาณ 1.5 เท่า แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 22 โดยตำแหน่ง (a) แสดงค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบนแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอล และตำแหน่ง (b) แสดงค่าความเค้นเฉือนสูงสุดบนแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู โดยมีแนวโน้มของค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์บริเวณขอบภายนอกของแผ่นรองรับ ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายความเค้นเฉือนในแกนของการคำนวณด้วยสมมติฐานอย่างง่าย (André, 1996) ในช่วงประมาณ 2-5 เท่าของรัศมีของตัวสอดแทรกที่มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ แต่ด้วยข้อจำกัดทางคณิตศาสตร์ของ Youngquist และ Kuenzi (1955) ทำให้ไม่สามารถแสดงค่าความเค้นเฉือนบนรอยต่อระหว่างเรซินหล่อและแกนรวงผึ้งได้ ดังนั้นจึงแสดงค่าดังกล่าวด้วยทฤษฎีของ Kuenzi (1947) โดยตำแหน่ง (c) แสดงค่าความเค้นเฉือนที่ตัวสอดแทรกส่งผ่านไปยังแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอล และตำแหน่ง (d) แสดงค่าความเค้นเฉือนที่ตัวสอดแทรกส่งผ่านไปยังแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าตำแหน่งวิกฤตต่างๆ ของโครงสร้างแซนด์วิชจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของเรซินหล่อกับแกนรวงผึ้งที่มีสาเหตุมาจากความเค้นเฉพาะตำแหน่ง



ภาพที่ 22 ผลการเปรียบเทียบการคำนวณเชิงตัวเลขของการกระจายความเค้นเฉือนในแกนวงผึ้ง

4.3 การออกแบบโครงสร้างแซนด์วิช

4.3.1 มาตรฐานการออกแบบ

Thomsen (1998) ได้แสดงข้อแนะนำในการออกแบบโครงสร้างแซนด์วิชที่ปรับปรุงและอ้างอิงมาจาก European Space Agency (1987) ซึ่งสามารถใช้ได้เฉพาะกับโครงสร้างแซนด์วิชที่มีการเชื่อมต่อด้วยตัวสอดแทรกตลอดความหนาและตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนา โดยได้ข้อสรุปต่างๆ ดังนี้

1. รัศมีของเรซินหล่อส่วนที่ต่อออกไปควรมีค่าน้อย 0.5 เท่าของรัศมีตัวสอดแทรก ซึ่งจะช่วยลดความเค้นดัด (bending stress) ของแผ่นผิวได้มากที่สุด และยังทำให้การส่งผ่านภาระกรรมของเรซินหล่อเป็นไปอย่างสมบูรณ์

2. อัตราส่วนความเค้นระหว่างเรซินหล่อและแกนรังผึ้ง (E_p/E_n) ควรมีค่าโดยประมาณ 3 - 4 ซึ่งจะช่วยให้มีการกระจายภาระกรรมระหว่างรอยต่อของแผ่นผิวด้านบนกับเรซินหล่อและแกนรังผึ้งมีค่าสูงสุด

3. การใช้งานตัวสอดแทรก ควรหลีกเลี่ยงการใช้งานหลายๆ ตัวพร้อมกัน เนื่องจากการส่งผ่านภาระกรรมนอกระนาบของตัวสอดแทรกแต่ละตัว จะทำให้เกิดโมเมนต์ค้ำขึ้นในโครงสร้างแซนด์วิช

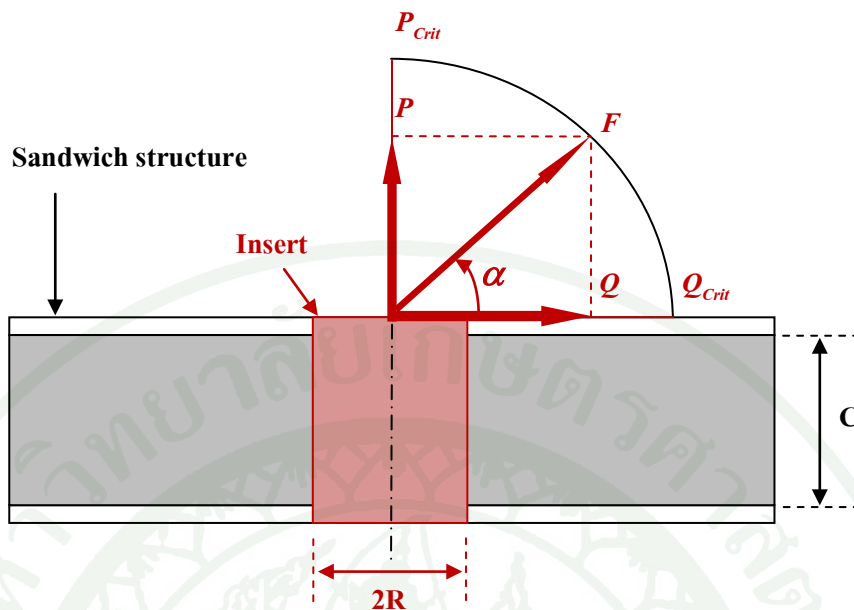
4. ในกรณีที่ต้องการให้แผ่นผิมีความสามารถในการต้านทานต่อการค้ำและความเค้นเฉือนใกล้เคียงกับตัวสอดแทรก การเสริมความแข็งแรงให้กับแผ่นผิวบริเวณรอยต่อกับตัวสอดแทรก สามารถกระทำได้โดยการทำให้แผ่นผิมีความหนาเพิ่มมากขึ้นหรืออาจใช้วัสดุประกอบทิศทางเดียวหรือหลายทิศทางตามความเหมาะสม

5. ความเสียหายระหว่างรอยต่อของเรซินหล่อกับแกนรังผึ้งเป็นความเสียหายอย่างหนึ่งให้เห็นได้อย่างเด่นชัด ดังนั้นระหว่างรอยต่อควรเลือกใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงเพื่อบรรเทาความเข้มข้นของความเค้นในตำแหน่งดังกล่าว

4.3.2 ทฤษฎีความเสียหาย

ภาระกรรมวิกฤตที่ได้รับจากการทดสอบแกนเดียว (uniaxial testing) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการดึงนอกระนาบหรือในระนาบของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช ถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ของความเสียหาย (failure criteria) ด้วยผลรวมของอัตราส่วนยกกำลังสองของภาระกรรมใดๆ กับภาระกรรมวิกฤตที่ส่งผ่านด้วยตัวสอดแทรก โดยความเสียหายของโครงสร้างจะเริ่มต้นเมื่อผลรวมดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 แสดงดังสมการที่ 12

$$\left(\frac{P}{P_{\text{Crit}}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_{\text{Crit}}}\right)^2 \leq 1 \quad (12)$$



ภาพที่ 23 การคำนวณสถานะครากของโครงสร้างแซนด์วิช

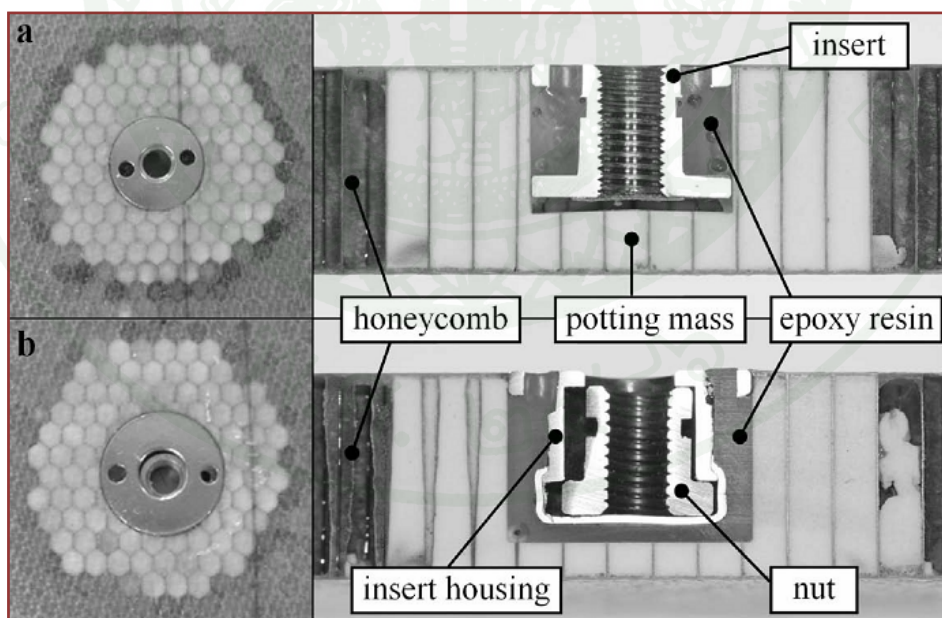
ในกรณีที่พิจารณาสถานะครากภายใต้โมเมนต์คัตและภาระกรรมบิด จะได้ว่า

$$\left(\frac{P}{P_{Crit}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_{Crit}}\right)^2 + \left(\frac{M}{M_{Crit}}\right)^2 + \left(\frac{T}{T_{Crit}}\right)^2 \leq 1 \quad (13)$$

เมื่อโมเมนต์คัตวิกฤตมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างรัศมีของตัวสอดแทรกกับภาระกรรมนอกระนาบวิกฤต ($M_{Crit} = R \cdot P_{Crit}$) และภาระกรรมบิดวิกฤตมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างค่าคงที่ 4π รัศมีของตัวสอดแทรกยกกำลังสอง สัมประสิทธิ์ความต้านทานความเค้นเฉือนของแกนแซนด์วิช และความหนาของแกนแซนด์วิช ($T_{Crit} = 4\pi \cdot R^2 \cdot \tau_0 \cdot C$) โดยความเสียหายของโครงสร้างจะเริ่มต้นเมื่อผลรวมดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 เช่นเดียวกับเกณฑ์ของความเสียหายข้างต้น (European Space Agency, 1987)

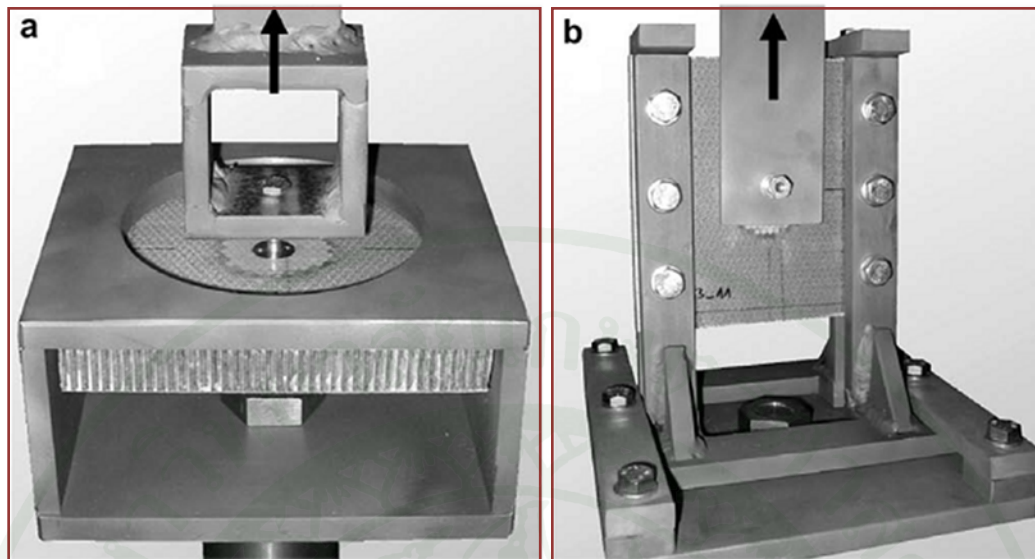
5. การทำนายความแข็งแรงของตัวสอดแทรกในโครงสร้างแซนด์วิชด้วยการจำลองสมาชิกจำกัด

Heimbs and Pein (2009) ได้ศึกษาความแข็งแรงของโครงสร้างแซนด์วิชชนิดแผ่นผิวแผ่นประกอบ Stesalit PHG 600-68-50 ที่มีลักษณะการทอเส้นใยแบบลายต่วน (satin weave) เพียงแค่ 1 ชั้น ความหนาสุทธิประมาณ 0.24 มิลลิเมตร และแกนรวงผึ้งกระดาษนอเม็กซ์ชนิด Schütz Cormaster C1-3.2-48 สำหรับตัวสอดแทรกโลหะในเรซินหล่อตลอดความหนาที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ NAS 1833-C3-370 และ NAS 1835-C3-430 ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่มีวิธีการติดตั้งแบบปกติ คือ การเจาะรูในทิศทางจากแผ่นผิวด้านบนของโครงสร้างลงมา โดยวางตัวสอดแทรกโลหะให้อยู่ในตำแหน่งเสมอผิวบนของโครงสร้างแซนด์วิช จากนั้นทำการยึดตัวสอดแทรกกับโครงสร้างแซนด์วิชด้วยเรซินหล่อประเภท Huntsman Araldite[®] 2011 ผ่านรูของตัวสอดแทรกและเสริมความแข็งแรงให้กับการเชื่อมต่อด้วยเรซินหล่อประเภท Cytec BR[®] 632 P4 ภายในเซลล์ของแกนรวงผึ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 24 ภายใต้การดึงทดสอบนอกระนาบ (pull-out test) ผ่านแผ่นรองรับเส้นผ่านศูนย์กลางรู 100 มิลลิเมตรและการดึงทดสอบในระนาบ (shear-out test) แสดงดังภาพที่ 25



ภาพที่ 24 ภาพตัดขวางของตัวสอดแทรกประเภท NAS 1833 (a) และ NAS 1835 (b)

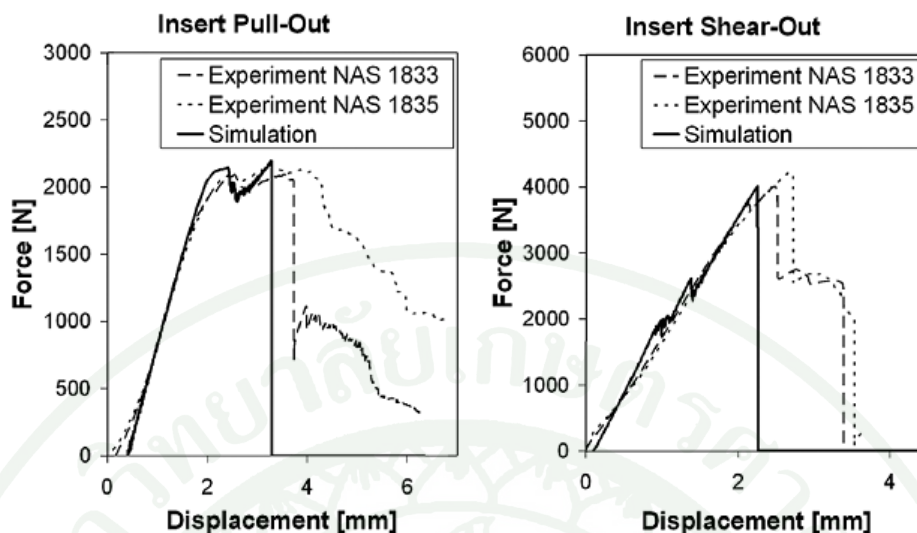
ที่มา: Heimbs and Pein (2009)



ภาพที่ 25 เครื่องมือสำหรับการทดสอบนอกระบบ (a) และการทดสอบในระบบ (b)

ที่มา: Heimbs and Pein (2009)

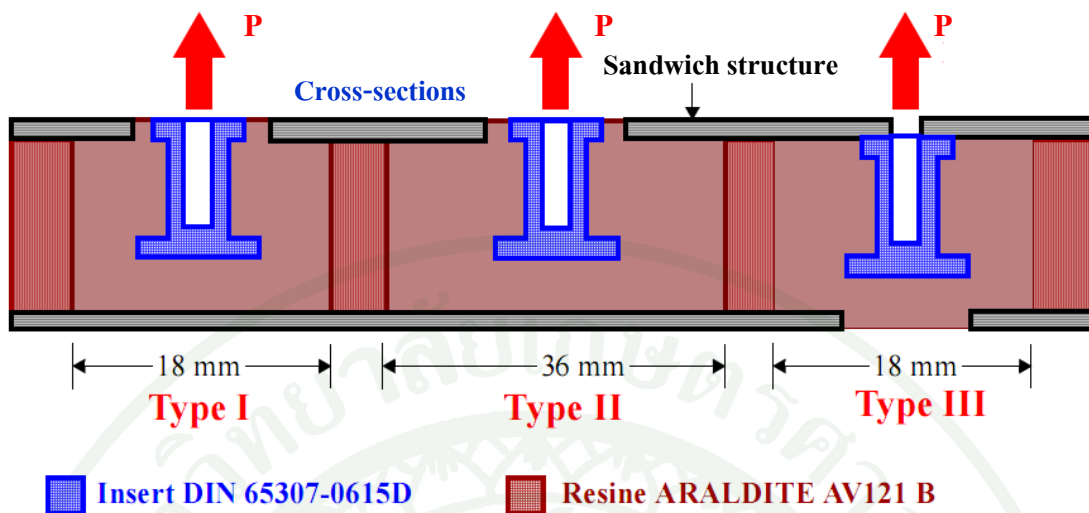
ผลของภาวะกรรมวิฤติที่ได้จากการดึงทดสอบนอกระบบแบบสถิตย์ (static) ด้วยอัตราความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที และแบบจลน์ (dynamic) ด้วยอัตราความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที ถูกนำมาใช้ในการทำนายความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะแต่ละประเภทด้วยการจำลองสมาชิกจำกัดแบบชัดแจ้ง (Explicit Finite Element Modeling: EFEM) ผ่าน โปรแกรม LS-DYNA สำหรับแบบจำลองมาตราส่วนแบบหยาบ (macro-scale) ของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช โดยกำหนดเกณฑ์ของความเสียหาย แสดงดังสมการที่ 12 ลงในแบบจำลองที่กำหนดให้แผ่นผิวเชื่อมต่อกับแกนภายใต้สถานะเงื่อนไขการสัมผัสแบบเชื่อมเป็นจุด (spotweld) ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกันดีกับการทดสอบตัวสอดแทรกโลหะทั้งสองประเภท แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 26 อย่างไรก็ตาม องค์ความรู้ในการออกแบบโครงสร้างแซนด์วิชข้างต้นยังไม่เพียงพอที่จะทำนายรูปแบบความเสียหายต่างๆ ที่เกิดขึ้น จากการส่งผ่านภาระกรรมด้วยตัวสอดแทรกได้อย่างชัดเจน เนื่องจากความแข็งแรงของการส่งผ่านภาระกรรมเข้าสู่โครงสร้างแซนด์วิชแต่ละประเภทมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้นตอนการติดตั้งตัวสอดแทรกและวัสดุที่ประกอบเป็นโครงสร้างแซนด์วิช



ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการจำลองสมาชิกจำกัดสำหรับการดึงทดสอบนอก
ระนาบและในระนาบ

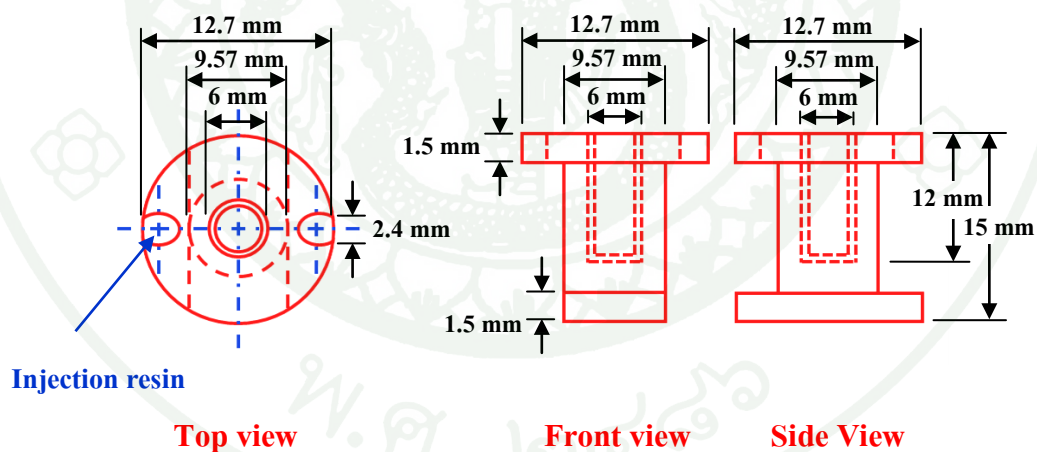
ที่มา: Heimbs and Pein (2009)

ดังนั้น Bunyawichakul (2005) จึงมุ่งเน้นศึกษาหารูปแบบความเสียหายของโครงสร้าง
แกนดัดชนิดแผ่นผิวคาร์บอนและแกนรวงผึ้งกระดาษนอเม็กซ์ สำหรับตัวสอดแทรกโลหะใน
เรซินหล่อตลอดความหนาตำแหน่งกึ่งกลางคานที่มีวิธีการติดตั้งแบบปกติ 2 รูปแบบ แต่ขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน คือ 18 และ 36 มิลลิเมตร และอีก 1 รูปแบบการติดตั้งในทิศทางตรงกัน
ข้ามกับวิธีปกติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 27 ภายใต้การดึง
ทดสอบนอกระนาบผ่านแผ่นรองรับเส้นผ่านศูนย์กลางรู 60 มิลลิเมตร โดยการติดตั้งตัวสอดแทรก
โลหะไปยังชิ้นทดสอบโครงสร้างแกนดัดด้วยวิธีตรงข้าม จะมีลักษณะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย
กับการติดตั้งด้วยวิธีปกติ กล่าวคือ การติดตั้งด้วยวิธีตรงข้ามจะเจาะรูของชิ้นทดสอบในทิศทางจาก
แผ่นผิวด้านล่างของโครงสร้างขึ้นไป โดยวางตัวสอดแทรกโลหะให้อยู่ในตำแหน่งเสมอแผ่นผิวบน
ด้านในของโครงสร้างแกนดัดและเจาะรูแผ่นผิวด้านบนของชิ้นทดสอบเพื่อเชื่อมต่อ โครงสร้าง
แกนดัดกับเครื่องทดสอบวัสดุเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) โดยผลการดึง
ทดสอบนอกระนาบปรากฏความเสียหายเชิงกลที่มีสาเหตุต่างๆ ได้แก่ การเริ่มต้นของการโก่งงอ
ของผนังแกนแกนดัด (core shear buckling) และต่อเนื่องด้วยการหลุดออกของแผ่นผิวด้านล่างกับ
เรซินหล่อหรือการหลุดออกของแผ่นผิวบนกับเรซินหล่อหรือการฉีกขาดของผนังแกนและแผ่นผิว
บนที่มีสาเหตุมาจากความเค้นดึง เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 29 - 30



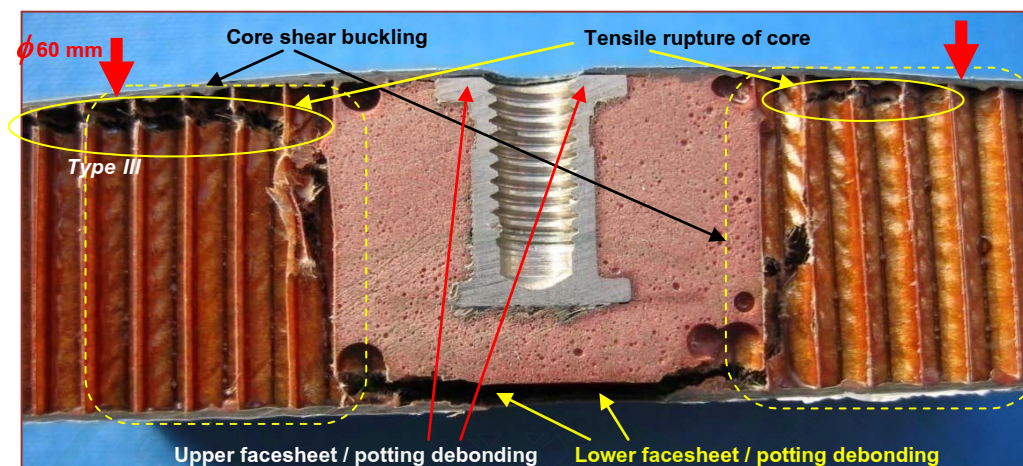
ภาพที่ 27 ภาพตัดขวางของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชประเภทต่างๆ

ที่มา: Bunyawanichakul (2005)



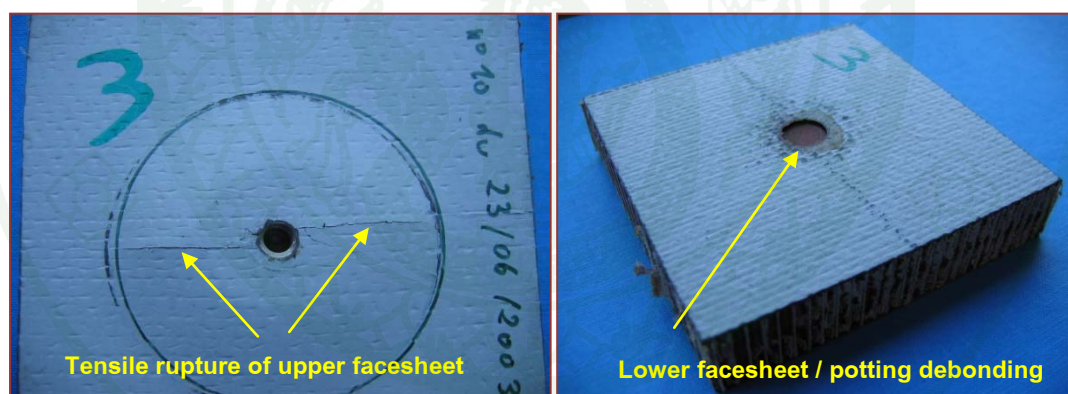
ภาพที่ 28 รูป 3 มุมของตัวสอดแทรกโลหะประเภท DIN65307- 0615D

ที่มา: Bunyawanichakul (2005)



ภาพที่ 29 รูปแบบความเสียหายเชิงกลของตัวอย่างชิ้นทดสอบประเภทที่ 3

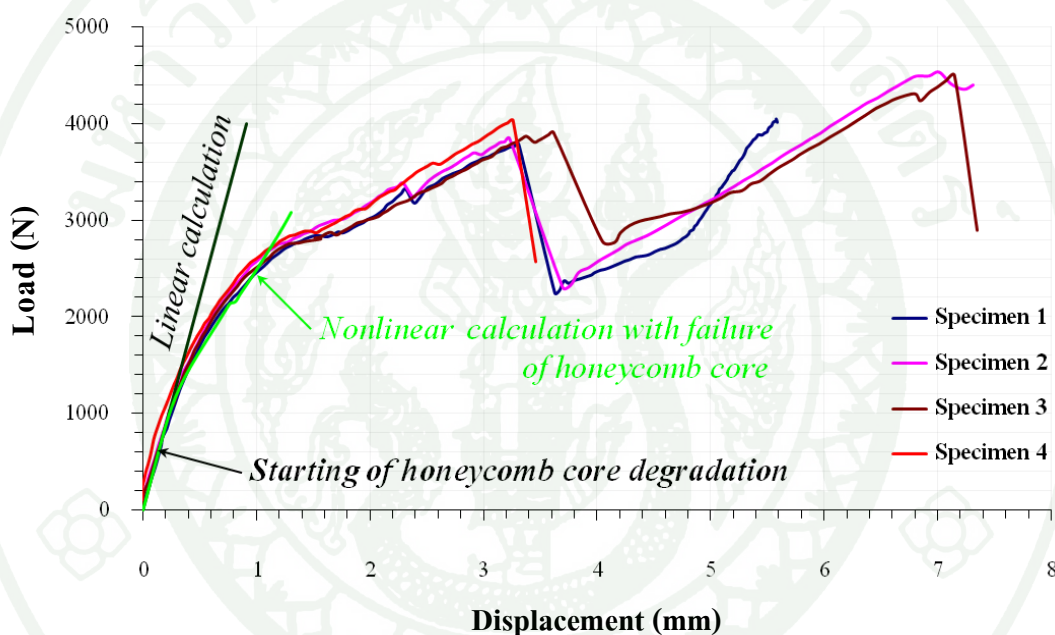
ที่มา: Bunyawanicakul (2005)



ภาพที่ 30 การฉีกขาดและการหลุดออกของแผ่นผิวของตัวอย่างชิ้นทดสอบประเภทที่ 3

ที่มา: Bunyawanicakul (2005)

การจำลองความเสียหายเชิงกลของโครงสร้างแซนด์วิชรูปแบบแรก คือ ความเสียหายเนื่องจากภาระกรรมเนียนของผนังแกนรวงผึ้งผ่านโปรแกรม Samcef พบว่าภาระกรรมและการโก่งตัวของแผ่นผิวแซนด์วิชในช่วงแรกแปรผันตรงต่อกันและความเสียหายแรกสามารถจำลองให้เกิดขึ้นได้แต่ยังไม่สมบูรณ์ แสดงดังภาพที่ 31 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพยายามที่จะศึกษาการส่งผ่านภาระกรรม กลไกการพัง และความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะ โดยใช้ความเข้าใจคุณลักษณะและรูปแบบความเสียหายขององค์ประกอบต่างๆ ของชิ้นทดสอบด้วยแบบจำลองสมาชิกจำกัด เพื่อให้ได้ภาระกรรมสูงสุดที่ตัวสอดแทรกสามารถต้านทานได้ โดยศึกษาเทียบเคียงจากผลการทดสอบ

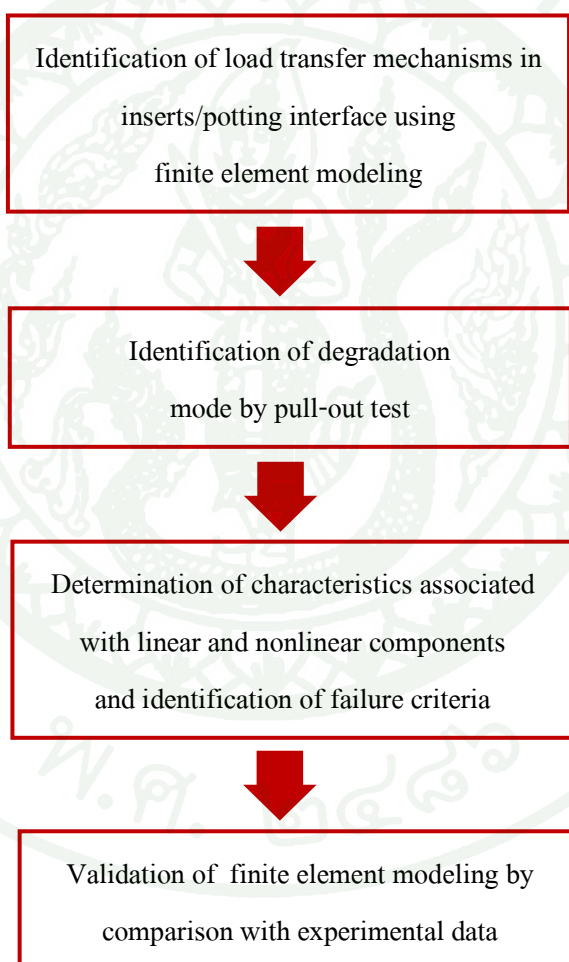


ภาพที่ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมและการโก่งตัวของแผ่นผิวของตัวอย่างชิ้นทดสอบประเภทที่ 3

ที่มา: Bunyawanichakul (2005)

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้แบ่งการทำงานออกเป็น 4 ส่วน คือ การศึกษาและเปรียบเทียบการส่งผ่านภาระกรรมที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของตัวสอดแทรกลักษณะต่างๆ ในเรซินหล่อโดยใช้แบบจำลองสมาชิกจำกัด การศึกษาความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดึงทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกสำหรับใช้กำหนดเป็นเกณฑ์ของความเสียหายและสร้างแบบจำลองที่สอดคล้องกับความเสียหายโดยสมบูรณให้กับตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์

1. วัสดุ อุปกรณ์และกระบวนการเตรียมขึ้นทดสอบต่างๆ

1.1 เรซินหล่อประเภท Araldite AV121B มีส่วนผสมทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ STRUCTIL[®] ชนิด EA 9396 Part A, Part B และผงไมโครบอลูน (microballoon epoxy) โดยผสมให้เข้ากันด้วยอัตราส่วน 100 : 30 : 13 ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 °C เพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดสามารถฉีดเข้าไปหล่อในบริเวณรอยๆ ของตัวสอคแทรกโลหะได้ แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 33

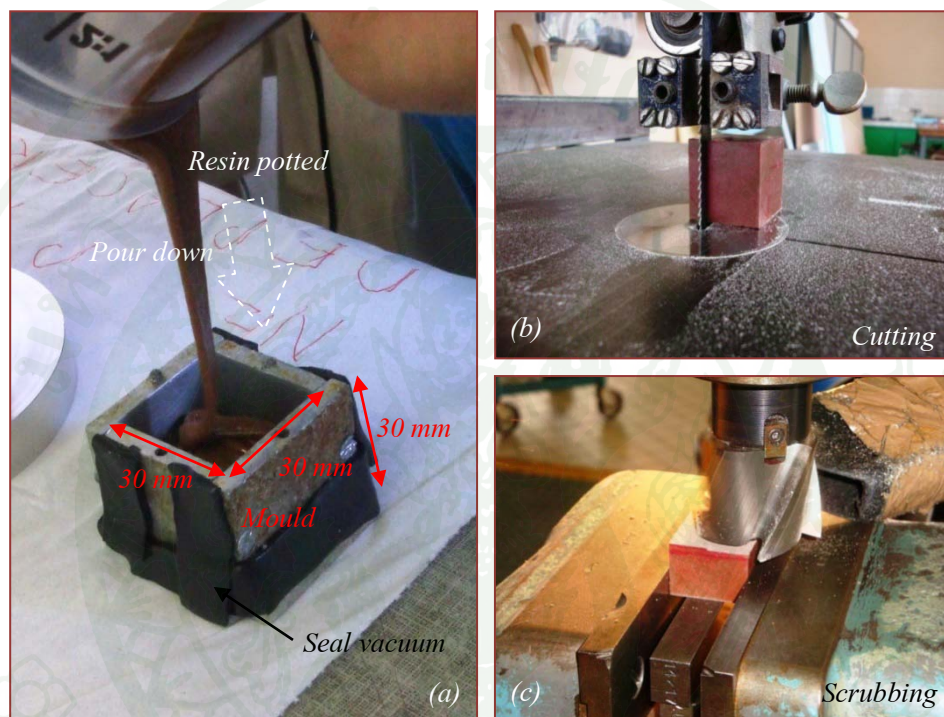


ภาพที่ 33 ขั้นตอนการเตรียมเรซินหล่อสำหรับขึ้นทดสอบต่างๆ

1.1.1 ขึ้นทดสอบเรซินหล่อ

การเตรียมขึ้นทดสอบเริ่มต้นโดยการนำเรซินหล่อประเภท Araldite AV121B เทลงในแม่พิมพ์อลูมิเนียมประกอบทรงลูกบาศก์ขนาด 30 มิลลิเมตร³ ที่เคลือบน้ำยาถอดแบบ (mould release agent) ยี่ห้อ RenLease[®] รุ่น QZ 5111 และป้องกันรอยรั่วบริเวณขอบของแม่พิมพ์ด้วยแถบกาวยุคญากาศ (seal vacuum) ยี่ห้อ Aerovac[®] รุ่น LTS90 โดยค่อยๆ เทส่วนผสมเพื่อการกระจายตัวที่ดีสำหรับป้องกัน

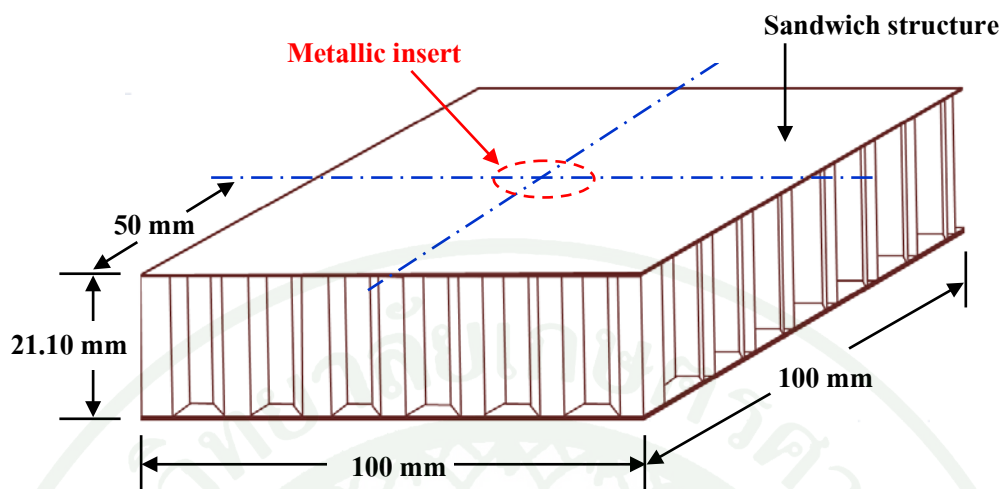
ช่องอากาศ (void) ที่อาจเกิดขึ้นหลังส่วนผสมแข็งตัว แสดงดังภาพที่ 34 (a) จากนั้นบ่มให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นนำชิ้นงานไปอบสำหรับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องจนถึงประมาณ 60 °C ระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปรับแต่งชิ้นงานให้ได้ขนาดตามกำหนด คือ 20 x 20 x 30 มิลลิเมตร³ แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 34 (b) และ (c) จำนวน 3 ชิ้น



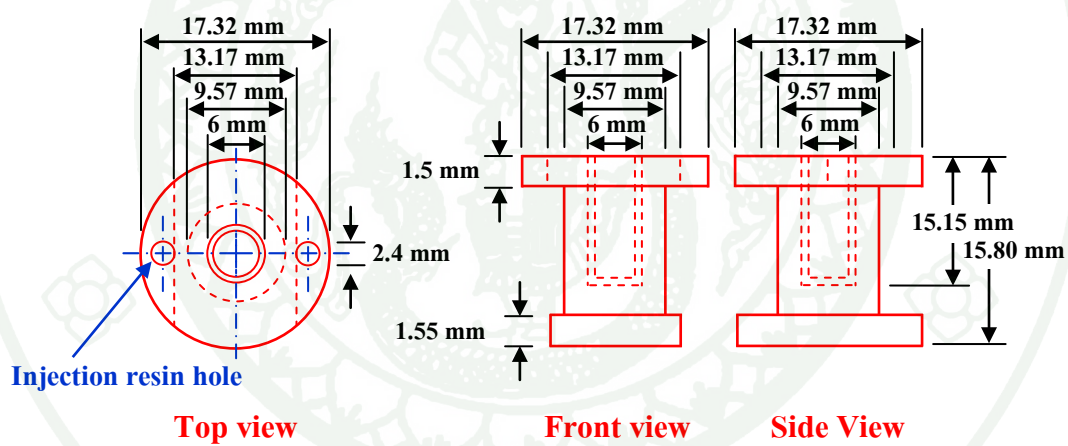
ภาพที่ 34 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบเรซินหล่อสำหรับการทดสอบด้วยภาระกรรมกด

1.1.2 การติดตั้งตัวสอดแทรก

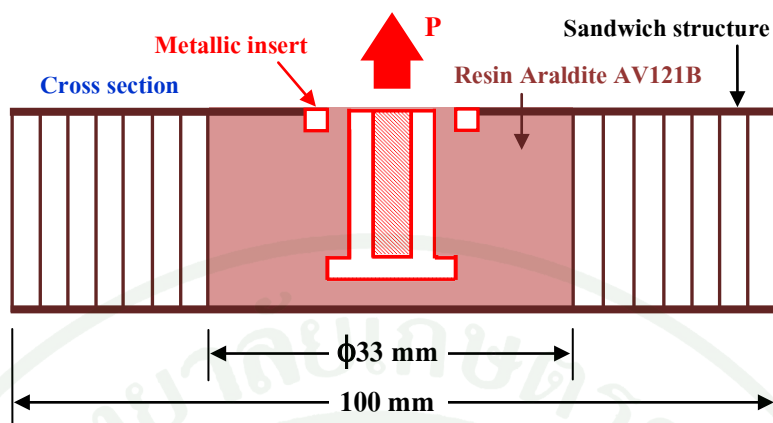
ชิ้นงานแผ่นแซนดวิชขนาด 100 x 100 x 21.10 มิลลิเมตร³ ที่ประกอบด้วยแผ่นฟิวคาร์บอน - อีพ็อกซี (G939/145.8) แบบลายขัดเรียงกันแบบ [0,90] หนา 0.55 มิลลิเมตร ประกบกับแกนรวงผึ้งกระดาษนอเม็กซ์ ความหนาแน่น 48 กก./ม.³ เส้นผ่านศูนย์กลางหน่วยเซลล์รูปหกเหลี่ยมขนาด 3.2 มิลลิเมตร หนา 20 มิลลิเมตร โดยแผ่นผิวเชื่อมต่อกับแกนได้ด้วยกาวแผ่นบางยี่ห้อ ReduxTM และเสริมความแข็งแรงให้กับตัวสอดแทรกโลหะตำแหน่งกึ่งกลางคานด้วยเรซินหล่อประเภท Araldite AV121B ตามวิธีการติดตั้งตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนาแบบปกติ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 35 - 38 จำนวน 4 ชิ้น



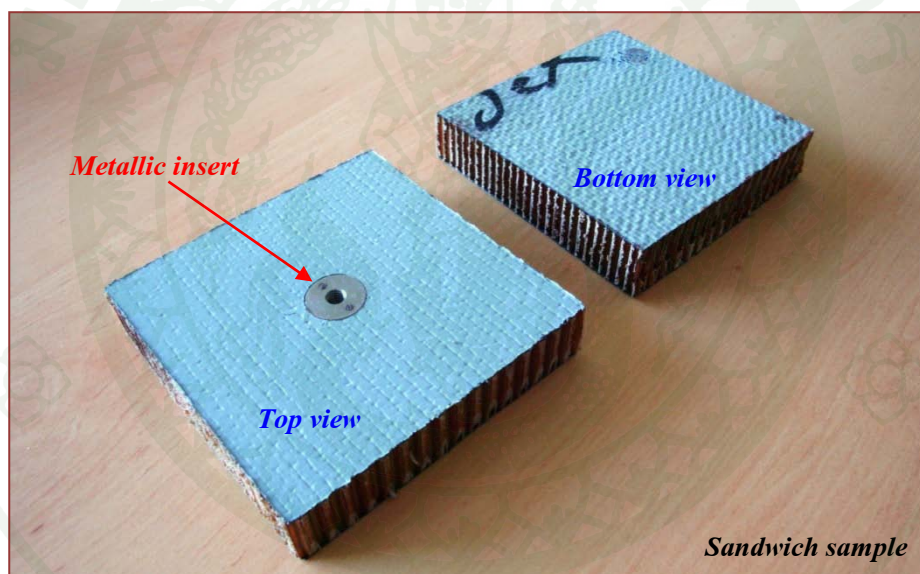
ภาพที่ 35 โครงร่างของชั้นทดสอบตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช



ภาพที่ 36 รูป 3 มุมของตัวสอดแทรกโลหะ



ภาพที่ 37 ภาพตัดขวางของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช

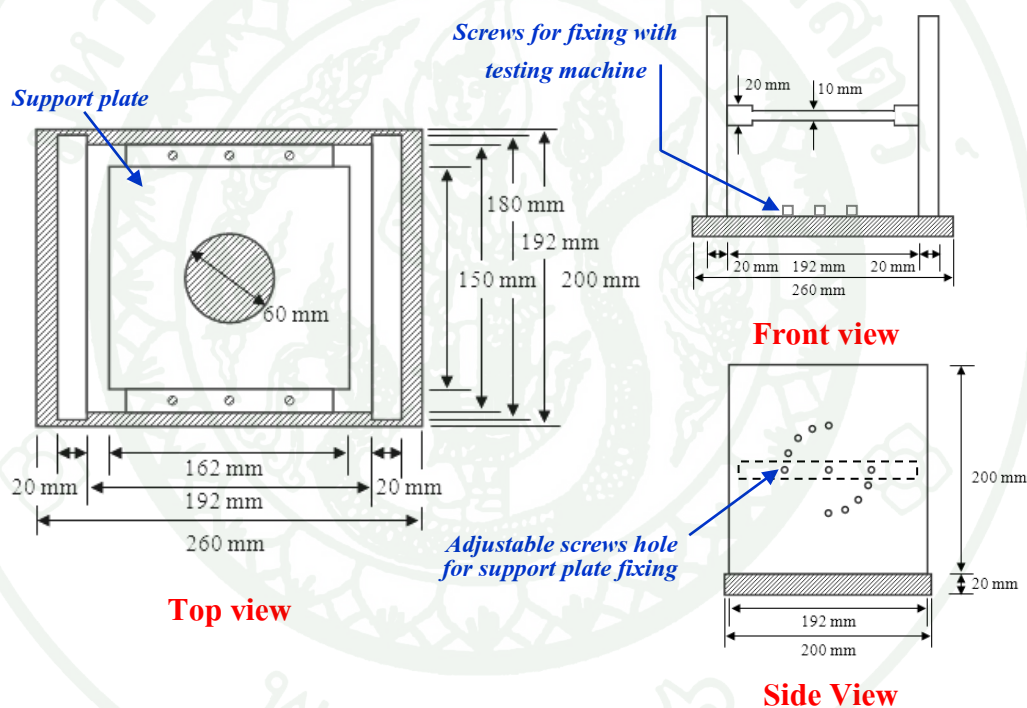


ภาพที่ 38 ลักษณะต่างๆ ไปของชิ้นทดสอบตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช

1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดสอบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

1.2.1 การทดสอบด้วยภาระกรรมกด (compressive test) ประกอบด้วย เครื่องทดสอบวัสดุเอนกประสงค์ยี่ห้อ HOUNSFIELD[®] รุ่น H50KS มาตรฐานวัดระยะเคลื่อนตัว (dial gage) ยี่ห้อ MOORE& WRIGHT[®] และขาตั้งชนิดแม่เหล็ก (magnetic holder) ยี่ห้อ INSIZE[®]

1.2.2 การติดตั้งทดสอบนอกระบบ ประกอบด้วย เครื่องทดสอบวัสดุอเนกประสงค์ยี่ห้อ Instron[®] รุ่น 4206 อุปกรณ์วัดระยะการโก่งตัวชนิดเลเซอร์ (laser displacement sensor) เครื่องประมวลผลชนิดดิจิทัล (digital oscilloscope) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DL708E ขาดังชนิดแม่เหล็ก เครื่องตัดชิ้นงานยี่ห้อ ISOMET[®] รุ่น 500 และอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นเหล็กจำนวน 4 แผ่น โดยมีแผ่นเหล็กด้านบนทำหน้าที่เป็นแผ่นรองรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ซึ่งถูกประกบและยึดเข้ากับแผ่นเหล็กด้านข้างด้วยน็อตที่สามารถปรับมุมต่างๆ ได้ คือ 0°, 30°, 45°, 60° และ 90° โดยการติดตั้งทดสอบนอกระบบจะปรับแผ่นรองรับให้ขนานกับฐานของอุปกรณ์จับยึด ซึ่งถูกยึดเข้ากับฐานของเครื่องทดสอบวัสดุอเนกประสงค์ด้วยน็อต แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 รูป 3 มุมของอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแซนด์วิช

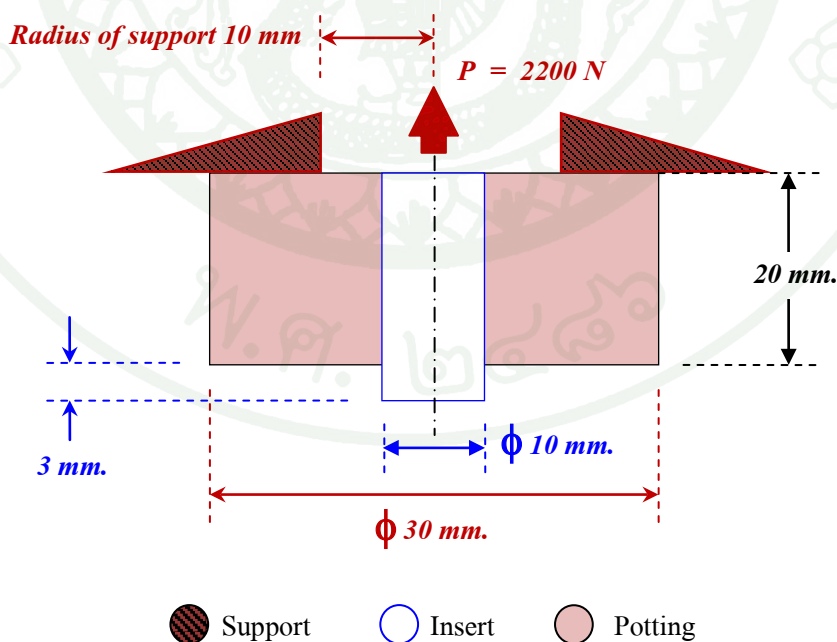
2. การจำลองสมาชิกจำกัด

เครื่องคอมพิวเตอร์เทคโนโลยีการประมวลผล Intel[®] 1366 core I7 920 (2.66 กิกะเฮิรตซ์) เมนบอร์ด 1366 Asus P6T DCOM หน่วยประมวลผลกราฟิก VGA Gigabyte PCI-E GF-9600GT/512 เมกกะไบต์ หน่วยความจำหลัก DDR-RAM 3072/1333 Kingston พร้อมด้วยระบบปฏิบัติการ Windows XP Professional Service Pack 3 (32 บิต) และ โปรแกรมการต่างๆ ได้แก่ MSC.Patran v.2005r2 และ MSC.Marc v.2005r3

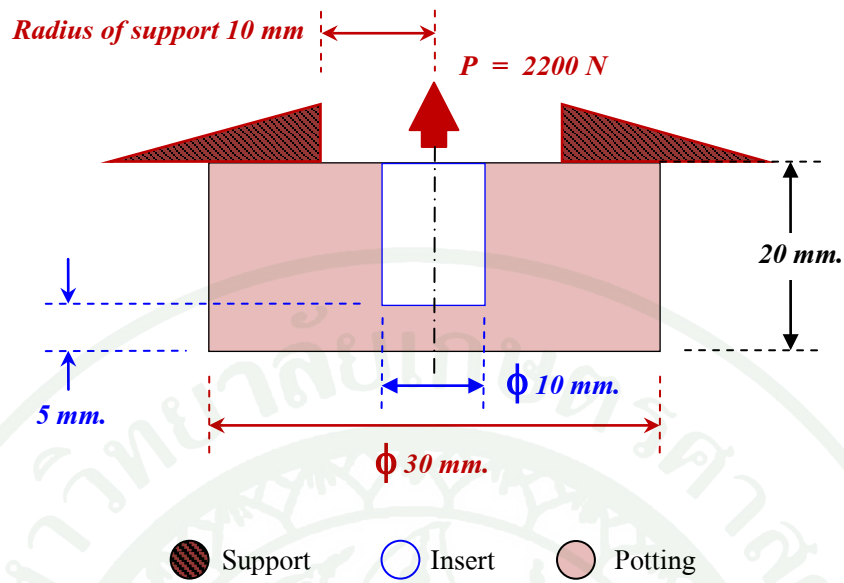
วิธีการ

1. ศึกษาและเปรียบเทียบการส่งผ่านภาระกรรมที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของตัวสอดแทรก ลักษณะต่างๆ ในเรซินหล่อโดยใช้แบบจำลองสมาชิกจำกัด

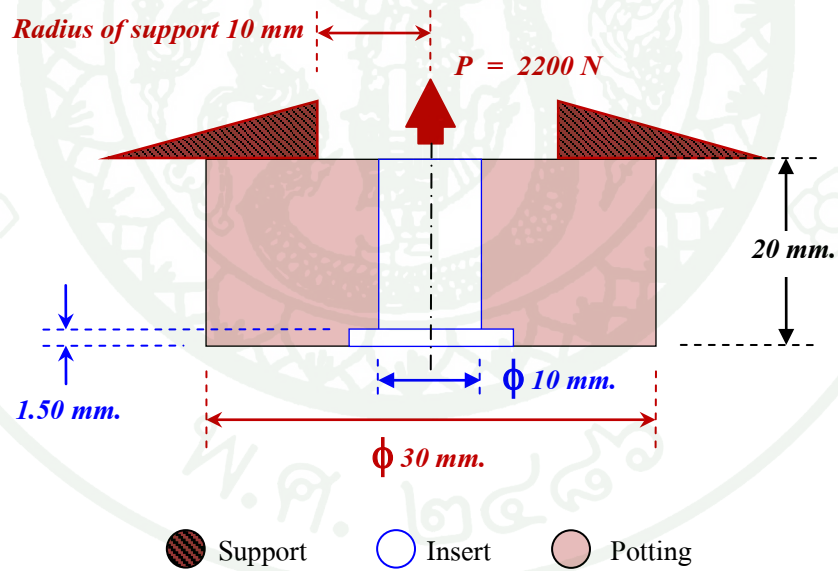
เนื่องจากรูปทรงของตัวสอดแทรกจริงมีความแตกต่างจากทางทฤษฎีที่เป็นทรงกระบอก ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงเสนอลักษณะของตัวสอดแทรก 3 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 ตัวสอดแทรกตลอดความหนาของเรซินหล่อ (through-the-thickness insert) ประเภทที่ 2 ตัวสอดแทรกไม่ตลอดความหนาของเรซินหล่อ (non through-the-thickness insert) และประเภทที่ 3 ตัวสอดแทรกพร้อมหัวตลอดความหนาของเรซินหล่อ (through-the-thickness insert with head) แสดงดังภาพที่ 40-43 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนระนาบรอยต่อของเรซินหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ภายใต้ภาระกรรมดึงนอกระนาบ 2200 นิวตัน ผ่านแผ่นรองรับขนาดรัศมี 10 มิลลิเมตร ด้วยแบบจำลอง 1 ใน 4 แบบสมมาตร 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ชนิด 8 โหนด แบบต่อเนื่องของตัวสอดแทรกโลหะและเรซินหล่อประเภท Araldite AV121B แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 44 ที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุเป็นแบบไอโซทรอปิก แสดงในตารางที่ 4



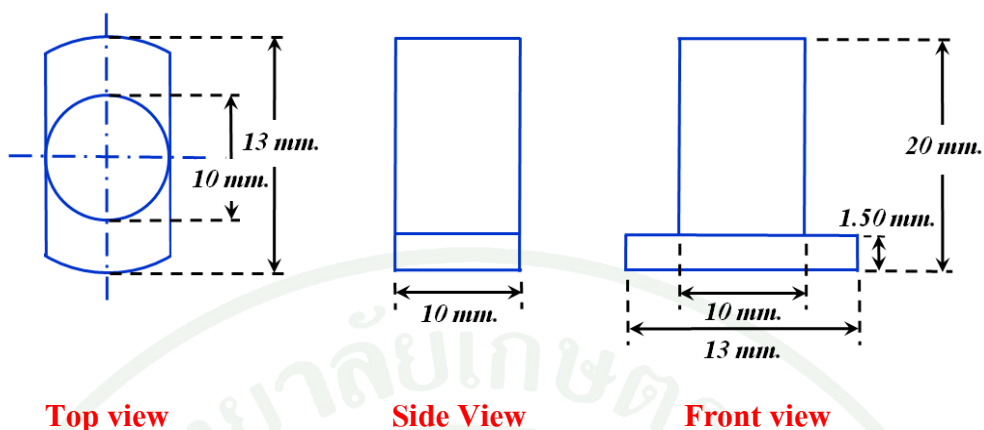
ภาพที่ 40 ขนาดและรูปร่างของตัวสอดแทรกประเภทที่ 1



ภาพที่ 41 ขนาดและรูปร่างของตัวสอดแทรกประเภทที่ 2

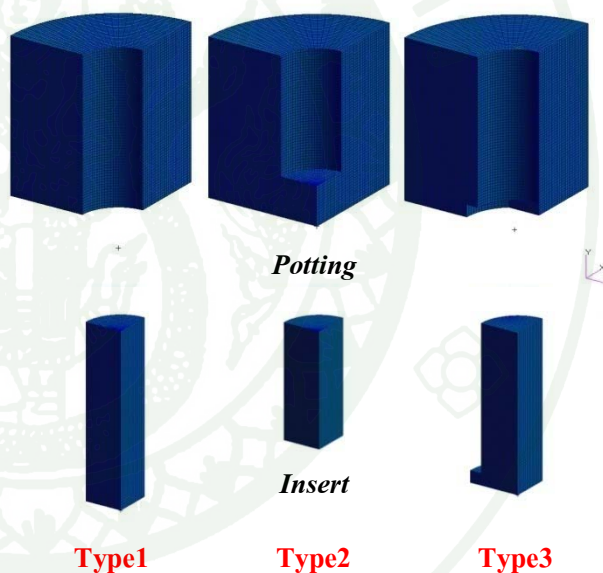


ภาพที่ 42 ขนาดและรูปร่างของตัวสอดแทรกประเภทที่ 3



ภาพที่ 43 รูป 3 มุมของตัวสอดแทรกประเภทที่ 3

- All parts meshed with 8-node solid elements with isotropic material model were used.
- Contact between all parts
 - Specimen part is a MSC.Marc deformable contact body, analytic definition.
 - Contact supported part is a MSC.Marc rigid contact body, position controlled.
- Boundary conditions
 - YZ - symmetry $u_x = \theta_y = \theta_z = 0$
 - XY - symmetry $u_z = \theta_x = \theta_y = 0$



ภาพที่ 44 แบบจำลอง 1 ใน 4 แบบสมมาตร 3 มิติ ของแบบจำลองตัวสอดแทรกประเภทต่างๆ

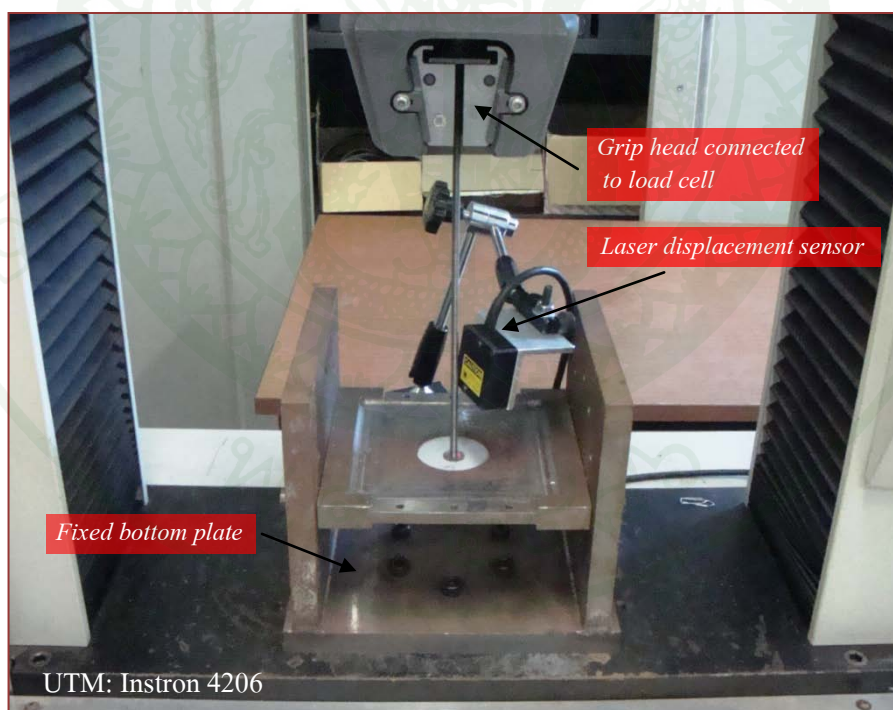
ตารางที่ 4 ตารางคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของตัวสอดแทรกประเภทต่างๆ

Part	Young's Modulus (MPa)	Poisson's ratio
insert	220000	0.3
potting	1312	0.3

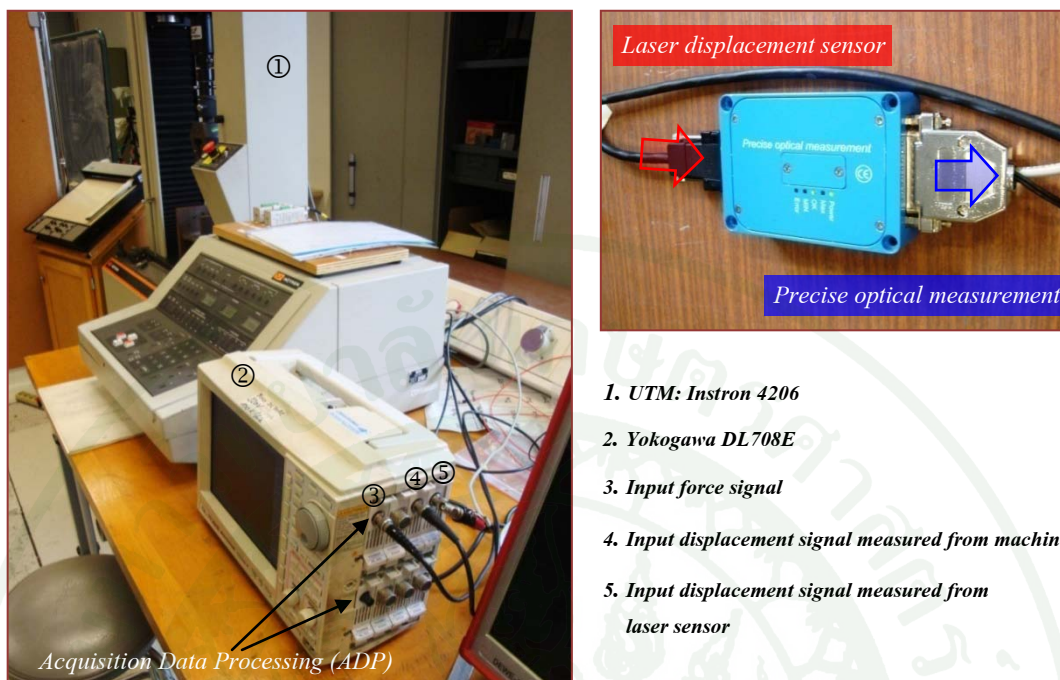
ที่มา: Bunyawanichakul (2005)

2. ศึกษาความเสียหายเชิงกลของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช

ศึกษาความเสียหายเชิงกลของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชภายใต้การดึงทดสอบนอกระบบแบบสถิตย์ที่มีอัตราความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที ผ่านแผ่นรองรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 60 มิลลิเมตร ในระหว่างการดึงทดสอบภาระกรรมจะได้รับการวัดจากหัวจับของเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (load measuring) และระยะเคลื่อนที่จะได้รับการวัดผ่านอุปกรณ์วัดระยะการโก่งตัวชนิดเลเซอร์บริเวณตำแหน่งบนหัวของตัวสอดแทรก ซึ่งต่างถูกเชื่อมต่อไปยังเครื่องสำหรับใช้ในการประมวลผลข้อมูลที่เกิดขึ้นในขณะนั้น แสดงดังภาพที่ 45 - 46 โดยการดึงทดสอบนอกระบบสำหรับตัวสอดแทรกโลหะชั้นที่ จะได้รับการทดสอบ จนกระทั่งมีความเสียหาย 3 - 1 ที่จะหยุดการทดสอบเมื่อตัวสอดแทรกโลหะมีระยะ 4 เกิดขึ้น ยกเว้นแต่การทดสอบสำหรับชั้นที่ มิลลิเมตร 1.9 การเคลื่อนที่เท่ากับ ซึ่ง เป็นจุดที่ชั้นทดสอบอื่นๆ เริ่มปรากฏความเสียหายที่ได้รับการสังเกตในระหว่างการทดสอบ



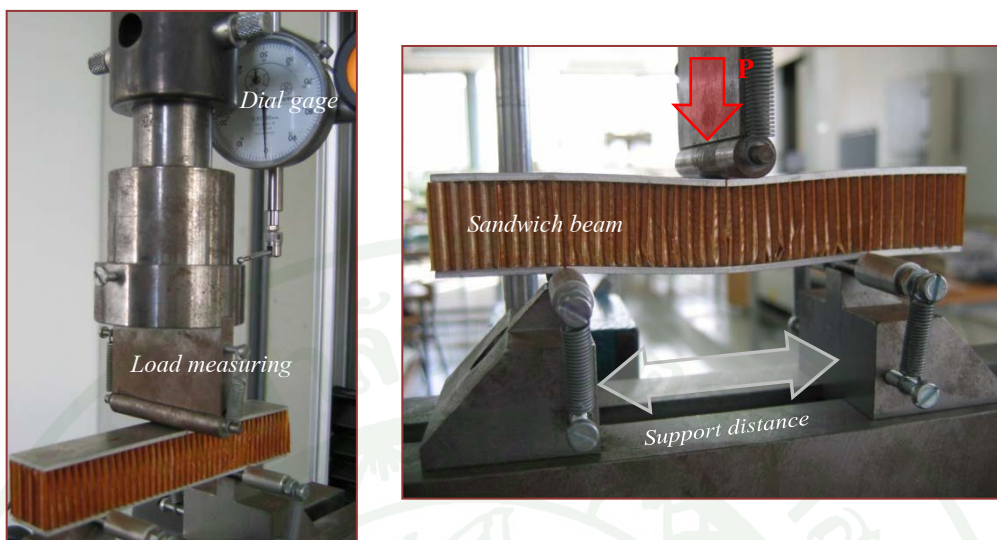
ภาพที่ 45 การติดตั้งชิ้นทดสอบตัวสอดแทรกโลหะสำหรับการดึงทดสอบนอกระบบ



ภาพที่ 46 ระบบการเชื่อมต่อสำหรับการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากการดึงทดสอบนอกระบบ

3. ศึกษาความเสียหายเชิงกลที่เกิดขึ้นของตัวสอดแทรกโลหะสำหรับกำหนดเป็นเกณฑ์ของความเสียหายลักษณะต่างๆ

3.1 จำลองการโค้งงอของผนังแกนรวงผึ้งที่ได้รับจากการทดสอบการตัด 3 จุด ผ่านตัวค้ำขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ที่มีระยะค้ำขนาด 80 มิลลิเมตร สำหรับคานแซนดวิชขนาด 20 x 140 x 24 มิลลิเมตร³ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นฟิวลูมินีเยมผสม 2024 ประกบกับแกนรวงผึ้งกระดาษนอเม็กซ์หนา 20 มิลลิเมตร ภายใต้ภาระกรรมคานนอกระบบกึ่งกลางคานที่มีอัตราความเร็วคงที่ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอลและดับเบิลยู ในระหว่างการทดสอบภาระกรรมจะได้รับการวัดจากหัวกดของเครื่องทดสอบวัสดุอเนกประสงค์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และระยะการโค้งตัวจะได้รับการวัดผ่านมาตรวัดระยะเคลื่อนตัว แสดงดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 การทดสอบการคด 3 จุด สำหรับคานแซนด์วิช

ที่มา: Bunyawanichakul (2005)

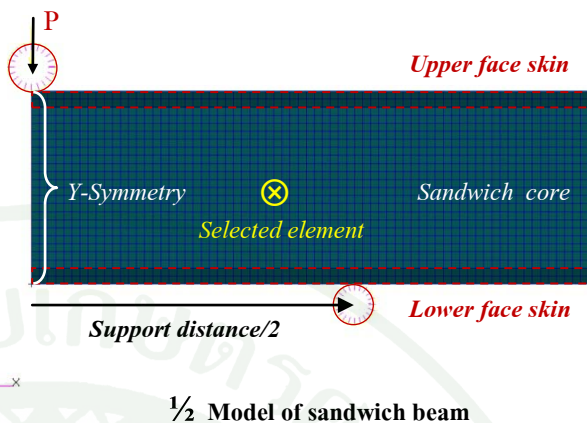
การลดค่าโมดูลัสความแข็งแรง (G) ของแกนแซนด์วิชทั้งสองแนวระนาบ ถูกใช้เพื่อหาค่าการกระกรรมที่สอดคล้องกับการโก่งงอของผนังแกนด้วยแบบจำลองสมมาตร 2 มิติ อย่างง่าย ซึ่งประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ชนิด 4 โหนด แบบต่อเนื่องของแผ่นผิวและแกนที่มีคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุแสดงในตารางที่ 5 โดยพฤติกรรมความเสียหายของผนังแกนรูวงผึ้งทั้งสองแนวระนาบ จะได้รับจากความเค้นเฉือน (τ_{xy}) และความเครียดเฉือน (δ_{xy}) บนตำแหน่งของเอลิเมนต์ที่ไม่มีผลกระทบของความเค้นเฉพาะตำแหน่งในแบบจำลองสมมาตร 2 มิติ อย่างง่าย ภายใต้การกระกรรมที่สอดคล้องกับการโก่งงอของผนังแกน แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 48 - 50

ตารางที่ 5 ตารางคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลองการคด 3 จุด

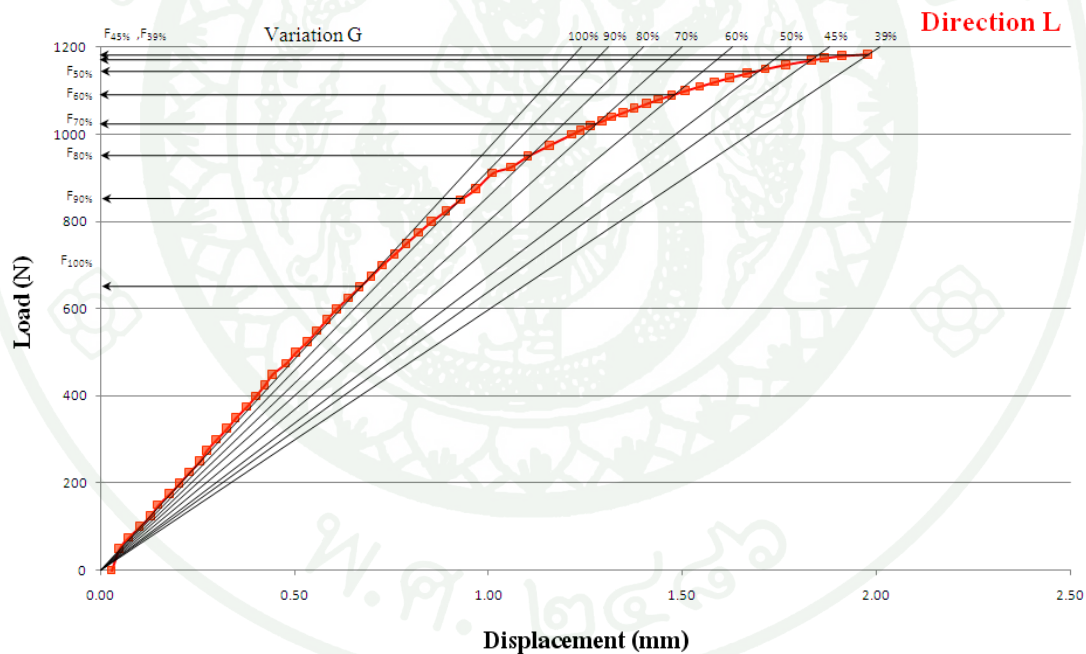
Part	Young's Modulus (MPa)	Shear Modulus (MPa)	Poisson's ratio
skin	73100	-	0.33
core	$E_x = E_z = 1, E_y = 94$	$G_{xz} = 1, G_{yz} = 17, G_{xy} = 26$	$\nu_{xz} = 0.3, \nu_{xy} = \nu_{yz} = 0.02$

ที่มา: Bunyawanichakul (2005)

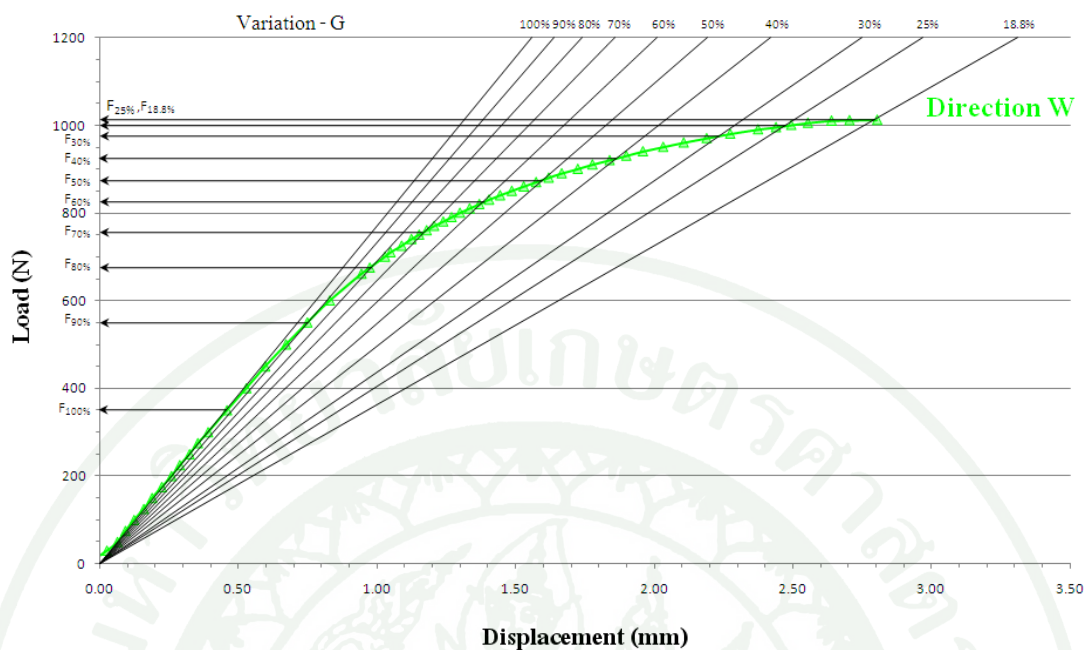
- All parts meshed with 4-node solid elements with isotropic material model for face skin and orthotropic for sandwich core were used.
- Contact between all parts
 - Specimen part is a MSC.Marc deformable contact body, Analytic definition.
 - Contact supported part is a MSC.Marc rigid contact body, position controlled for pin and force/moment for punch.
- Boundary conditions
 - Y-symmetry $u_x = \theta_y = \theta_z = 0$



ภาพที่ 48 แบบจำลอง 2 มิติ แบบสมมาตรของคานแซนด์วิช

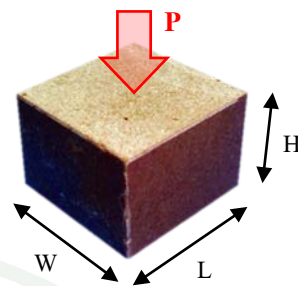
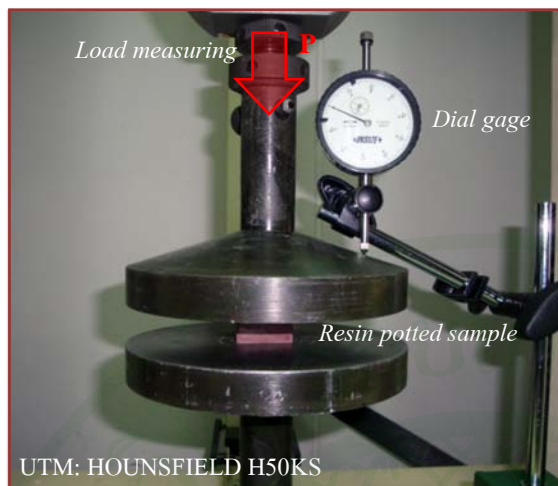


ภาพที่ 49 การหาค่าภาระกรรมที่สอดคล้องกับความเสียหายของแกนรังผึ้งแนวระนาบแอล โดยการจำลองสมาชิกจำกัด



ภาพที่ 50 การหาค่าภาระกรรมที่สอดคล้องกับความเสียหายของแกนรังผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู โดยการจำลองสมาชิกจำกัด

3.2 ทดสอบหาขีดจำกัดความแข็งแรงของเรซินหล่อขนาด 20 x 20 x 30 มิลลิเมตร³ จำนวน 3 ชิ้น ภายใต้ภาระกรรมกดนอกระนาบกึ่งกลางชั้นทดสอบของเครื่องทดสอบวัสดุเอนกประสงค์ที่มี อัตราความเร็วคงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ในระหว่างการทดสอบภาระกรรมจะได้รับการวัดจากหัวกด ของเครื่องทดสอบวัสดุเอนกประสงค์และระยะการโก่งตัวจะได้รับการวัดผ่านมาตรวัดระยะเคลื่อน ตัว โดยความเสียหายเชิงกลของเรซินหล่อจะได้รับจากสมมติฐานอย่างง่ายว่าด้วยความเค้นกดเป็น ผลมาจากภาระกรรมที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดที่รับภาระกรรมกด คือ $\sigma = \frac{P}{A}$ เมื่อ A มีค่าเท่ากับผล คูณระหว่างความกว้างและความยาวของเรซินหล่อ ($A=W \times L$) และความเครียดกดหรือการผิดรูปใน แนวภาระกรรมเป็นผลมาจากระยะหดตัวต่อระยะเดิมของเรซินหล่อ คือ $\epsilon = \frac{\Delta H}{H}$ แสดงรายละเอียด ดังภาพที่ 51



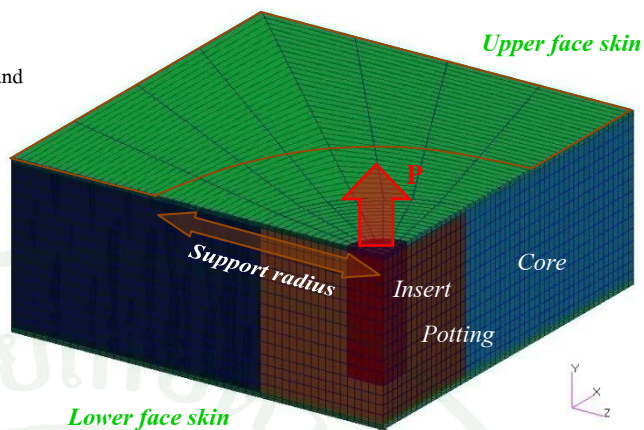
$$\sigma = \frac{P}{(W \times L)} \quad \epsilon = \frac{\Delta H}{H}$$

ภาพที่ 51 การติดตั้งชิ้นทดสอบเรซินหล่อสำหรับการทดสอบด้วยภาวะกรรมกดนอกระนาบ

4. ศึกษาความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะตามสภาพที่ติดตั้งตามการใช้งาน

โดยทั่วไป การสร้างแบบจำลองแบบละเอียด (meso-scale) สำหรับตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช จะใช้เวลามากในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีสมาชิกจำกัด จึงเป็นการยากที่จะใช้ในการจำลองสำหรับโครงสร้างแซนด์วิชที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างแบบจำลองที่สอดคล้องกับความเสียหายโดยสมบูรณ์ที่พบจากการทดสอบต่างๆ ข้างต้น ด้วยแบบจำลอง 1 ใน 4 แบบสมมาตร 3 มิติ อย่างง่าย (macro-scale) ซึ่งประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ชนิด 8 โหนด แบบต่อเนื่องขององค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ตัวสอดแทรก เรซินหล่อ แกนรวงผึ้ง และแผ่นผิว ภายใต้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี adaptive arc length ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาอย่างหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองไม่เชิงเส้นที่มีความซับซ้อนหรือแบบจำลองที่มีลักษณะของการโก่งงอภายหลัง (post-buckling) แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 52 โดยใช้คุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ แสดงในตารางที่ 6 ที่แกนรวงผึ้งทั้งสองแนวระนาบได้รับการทดสอบการตัด 3 จุด แสดงดังภาพที่ 47 และคุณสมบัติเชิงเส้นของเรซินหล่อได้รับการทดสอบด้วยภาวะกรรมกดนอกระนาบ แสดงดังภาพที่ 51

- All parts meshed with 8-node solid elements with isotropic material model for insert and potting and orthotropic for sandwich panel were used.
- Contact between all parts
 - Specimen part is a MSC.Marc deformable contact body, Analytic definition.
 - Contact supported part is a MSC.Marc rigid contact body, position controlled.
- Boundary conditions
 - YZ - symmetry $u_x = \theta_y = \theta_z = 0$
 - XY - symmetry $u_z = \theta_x = \theta_y = 0$



1/4 Macro-scale model of insert pull-out in honeycomb

ภาพที่ 52 แบบจำลอง 1 ใน 4 แบบสมมาตร 3 มิติ ของตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแซนดวิช

ตารางที่ 6 ตารางคุณสมบัติเชิงเส้นของวัสดุต่างๆ ที่ใช้สำหรับแบบจำลองตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแซนดวิช

Part	Young's Modulus (MPa)	Shear Modulus (MPa)	Poisson's ratio
insert	220000	-	0.3
potting	940	-	0.35
skin	$E_x = E_z = 52000, E_y = 5000$	$G_{xz} = 32424, G_{xy} = G_{yz} = 3500$	$\nu_{xz} = 0.09, \nu_{xy} = \nu_{yz} = 0.29$
core	$E_x = E_z = 1, E_y = 94$	$G_{xz} = 1, G_{yz} = 17, G_{xy} = 26$	$\nu_{xz} = 0.3, \nu_{xy} = \nu_{yz} = 0.02$

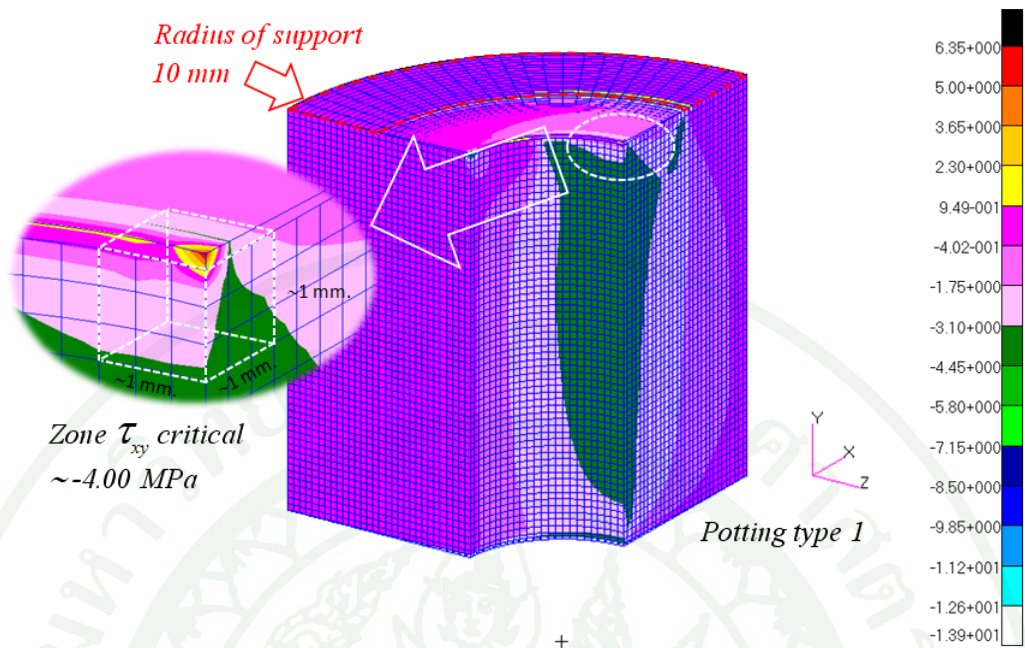
ที่มา: Bunyawichakul (2005)

ผลและวิจารณ์

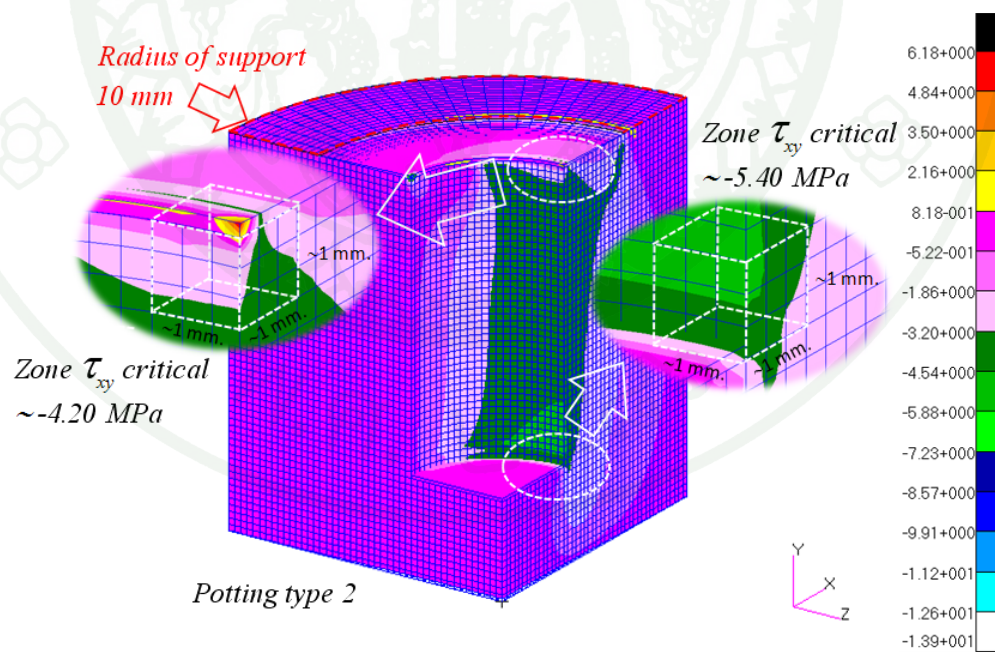
1. ศึกษาและเปรียบเทียบการส่งผ่านภาระกรรมที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของตัวสอดแทรก ลักษณะต่างๆ ในเรซินหล่อโดยใช้แบบจำลองสมาชิกจำกัด

ผลการศึกษากการกระจายความเค้นเฉือนที่ได้รับจากรอยต่อของตัวสอดแทรกลักษณะต่างๆ ในเรซินหล่อ ดังภาพที่ 40 - 42 โดยการจำลองสมาชิกจำกัด ดังภาพที่ 44 พบว่าตัวสอดแทรกทุกๆ ประเภทมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ตำแหน่งประมาณ 1 มิลลิเมตรแรก บนระนาบรอยต่อของเรซินหล่อ แสดงดังภาพที่ 53 - 56 โดยมีแนวโน้มของค่าลดลงตามแนวของรอยต่อและมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยบริเวณรอยต่อด้านล่าง แสดงดังภาพที่ 57 ยกเว้นแต่ตัวสอดแทรกประเภทที่ 2 คือ ตัวสอดแทรกไม่ตลอดความหนาของเรซินหล่อ ซึ่งรอยต่อมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้การกระจายความเค้นเฉือนไปยังเรซินหล่อไม่ดีเท่าที่ควร โดยค่าความเค้นเฉือนบริเวณรอยต่อด้านล่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ตำแหน่งดังกล่าวแตกต่างกับค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้รับจากรอยต่อของตัวสอดแทรกประเภทแรก คือ ตัวสอดแทรกตลอดความหนาของเรซินหล่อประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าแตกต่างกับค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้รับจากรอยต่อของตัวสอดแทรกประเภทที่ 3 คือ ตัวสอดแทรกพร้อมหัวตลอดความหนาของเรซินหล่อทั้งสองแนวระนาบถึงประมาณ 46 เปอร์เซ็นต์

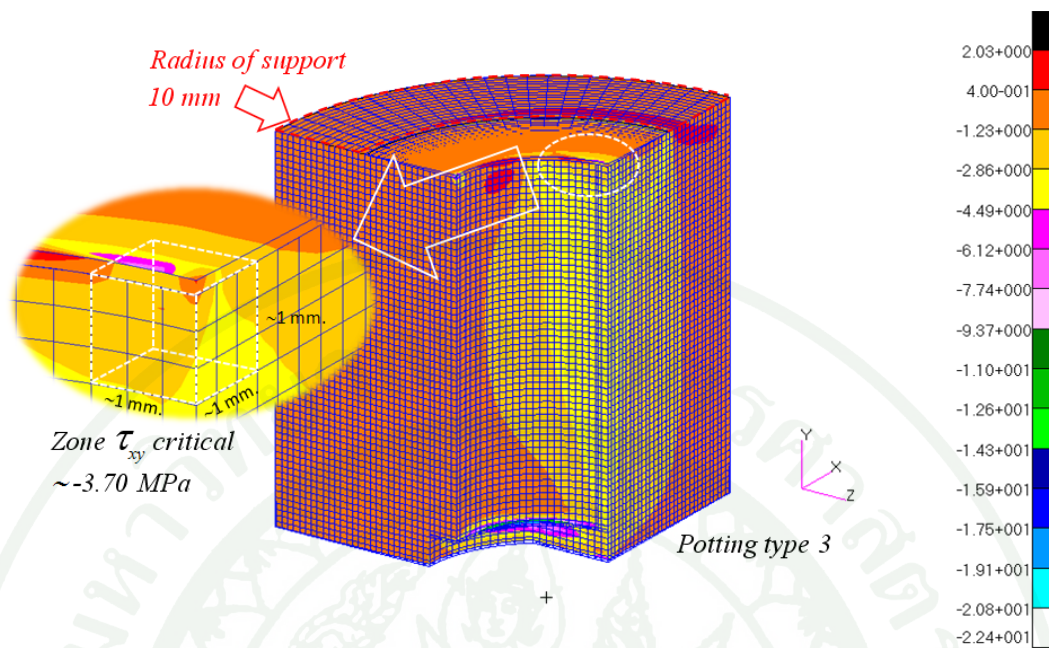
เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของตัวสอดแทรกประเภทแรก ถึงแม้ว่าจะมีความแข็งแรงมากกว่าตัวสอดแทรกประเภทที่ 2 แต่การติดตั้งตัวสอดแทรกประเภทแรกในโครงสร้างแซนดวิชหรือตัวสอดแทรกตลอดความหนาตามสภาพการใช้งานจริง แสดงดังภาพที่ 15 ที่มีความสามารถในการส่งผ่านภาระกรรมที่เกิดขึ้นไปยังแผ่นผิวทั้งสองที่เกิดการแอ่นไปพร้อมกับโครงสร้างตามทิศทางของภาระกรรมกระทำนอกระนาบ จะต้องเจาะแผ่นผิวด้านบนและล่าง ซึ่งจะทำให้แผ่นผิวสูญเสียความต้านทานโมเมนต์ดัดบริเวณตำแหน่งการเชื่อมต่อโครงสร้างแซนดวิช อีกทั้งยังทำให้แกนบริเวณรอยตอดังกล่าวเกิดความเสียหายจากความเค้นเฉพาะตำแหน่งที่ได้รับจากแผ่นผิว ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของการเชื่อมต่อโครงสร้างแซนดวิชที่ควรจะได้รับ



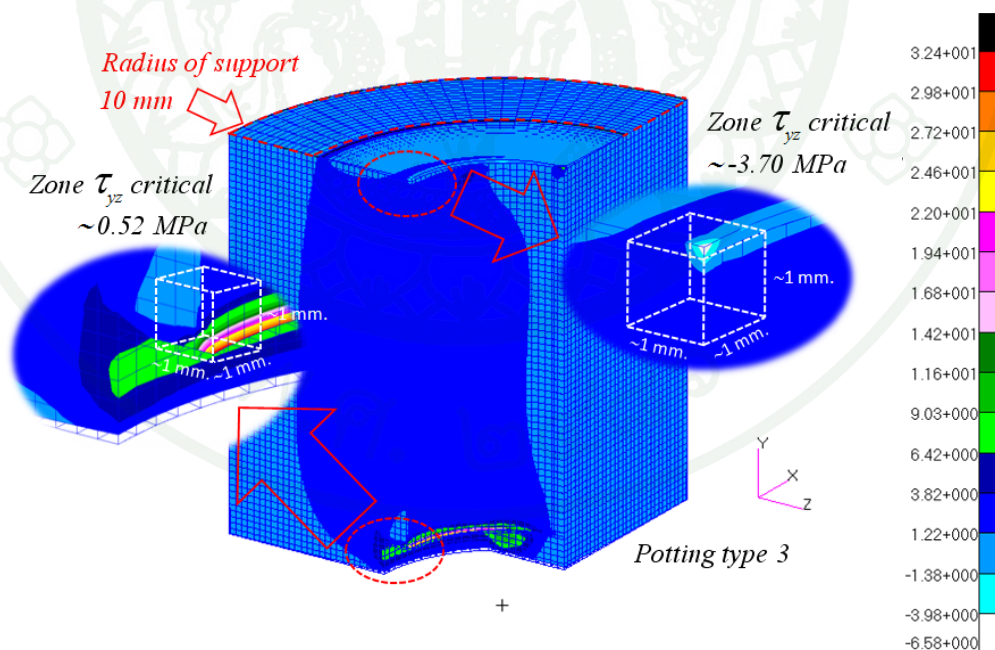
ภาพที่ 53 การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อ XY ของเรซินหล่อในแบบจำลองประเภทที่ 1



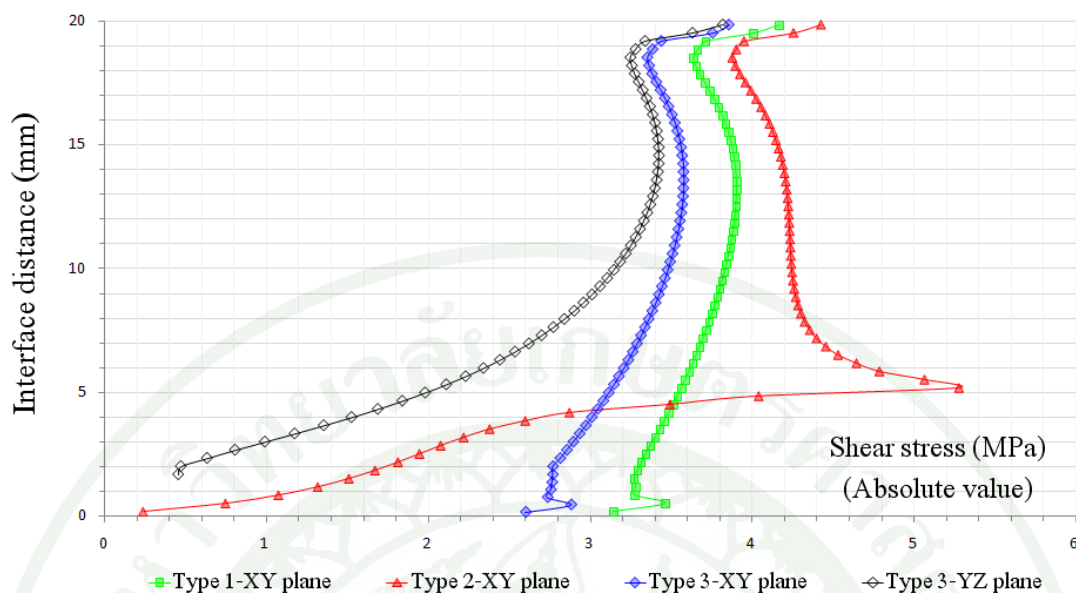
ภาพที่ 54 การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อ XY ของเรซินหล่อในแบบจำลองประเภทที่ 2



ภาพที่ 55 การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อ XY ของเรซินหล่อในแบบจำลองประเภทที่ 3



ภาพที่ 56 การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อ YZ ของเรซินหล่อในแบบจำลองประเภทที่ 3



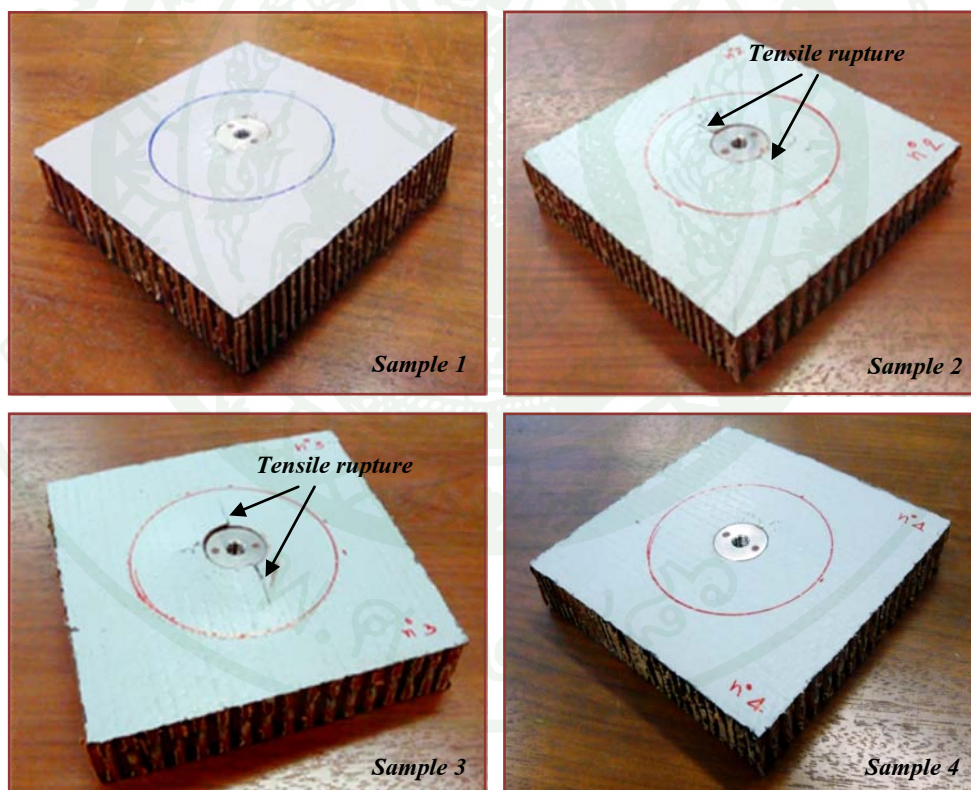
ภาพที่ 57 การกระจายความเค้นเฉือนบนระนาบรอยต่อของเรซินหล่อในแบบจำลองประเภทต่างๆ

ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ควรเลือกการเชื่อมต่อ โครงสร้างแซนด์วิชตามวิธีการติดตั้งของตัวสอดแทรกประเภทที่ 3 ที่มีความแข็งแรงมากกว่าตัวสอดแทรกประเภทที่ 2 สังเกตได้จากค่าความเค้นเฉือนที่ได้รับจากรอยต่อประเภทที่ 2 บริเวณรอยต่อด้านล่างมีค่ามากกว่ารอยต่อประเภทที่ 3 บนแนวระนาบ YZ ในตำแหน่งเดียวกันถึงประมาณ 2.45 เท่า เนื่องจากหัวของสอดแทรกประเภทที่ 3 สามารถกระจายความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี สังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีแนวโน้มของค่าลดลงอย่างชัดเจน

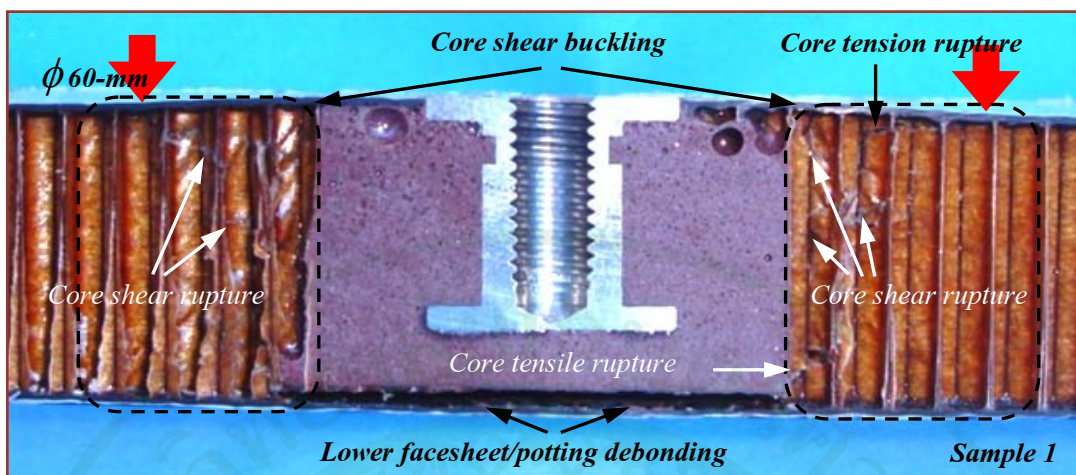
แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าตัวสอดแทรกประเภทที่ 3 จะมีความแข็งแรงมากกว่าตัวสอดแทรกประเภทที่ 2 แต่การติดตั้งตัวสอดแทรกประเภทที่ 3 ในโครงสร้างแซนด์วิชตามสภาพการใช้งานจริงจะไม่ยอมให้หัวของตัวสอดแทรกสัมผัสกับแผ่นผิวด้านล่าง เนื่องจากไม่มีพันธะระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งสอง ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงของการเชื่อมต่อของโครงสร้างแซนด์วิช ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวในกรณีที่ภาระกรรมภายนอกมีค่าสูง ควรเลือกใช้ตัวสอดแทรกประเภทที่ 2 พร้อมหัว หรือตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนา แสดงดังภาพที่ 15 โดยแน่ใจได้ว่ารอยต่อดังกล่าวมีพื้นที่เพียงพอสำหรับเรซินหล่อที่มีความยึดหยุ่นสูงใช้เป็นพันธะเชื่อมต่อตัวสอดแทรกกับแผ่นผิวด้านล่างและจะไม่เป็นสาเหตุหลักของความเสียหาย เนื่องจากความความเค้นเฉพาะตำแหน่งบริเวณตำแหน่งเดียวกันกับเรซินหล่อในตัวสอดแทรกประเภทที่ 2 สำหรับการศึกษิตตามส่วนที่ 2 ที่มีขนาดของตัวสอดแทรกตามการใช้งานในเฮลิคอปเตอร์ต่อไป

2. ศึกษาความเสียหายเชิงกลของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนดวิช

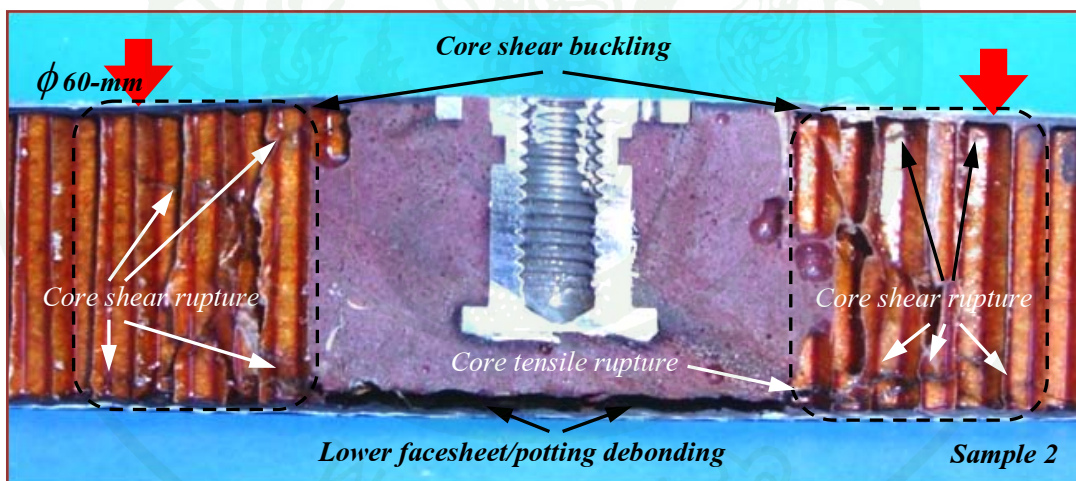
ผลการศึกษาความเสียหายเชิงกลของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนดวิช ภายใต้การดึงทดสอบนอกระนาบ ดังภาพที่ 45 แสดงความเสียหายเชิงกลหลังการทดสอบ ดังภาพที่ 58 พบการรื้อขาดของแผ่นผิวด้านบนของชิ้นทดสอบที่ 2 และ 3 และภาพที่ 59 - 62 แสดงความเสียหายเชิงกลของชิ้นทดสอบต่างๆ หลังถูกตัดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสอดแทรกโลหะ แสดงดังภาพที่ 63 พบว่าชิ้นทดสอบต่างๆ ปรากฏการโก่งงอ รอยพับและย่น และการรื้อขาดของผนังแกนรวงผึ้ง และการหลุดออกของเรซินหล่อกับแผ่นผิวด้านล่าง เป็นต้น นอกจากนี้ชิ้นทดสอบที่ 3 ยังปรากฏความเสียหายของเรซินหล่อบริเวณรอยต่อกับหัวของตัวสอดแทรกด้านบน และการหลุดออกของเรซินหล่อกับแผ่นผิวด้านบน แสดงดังภาพที่ 61



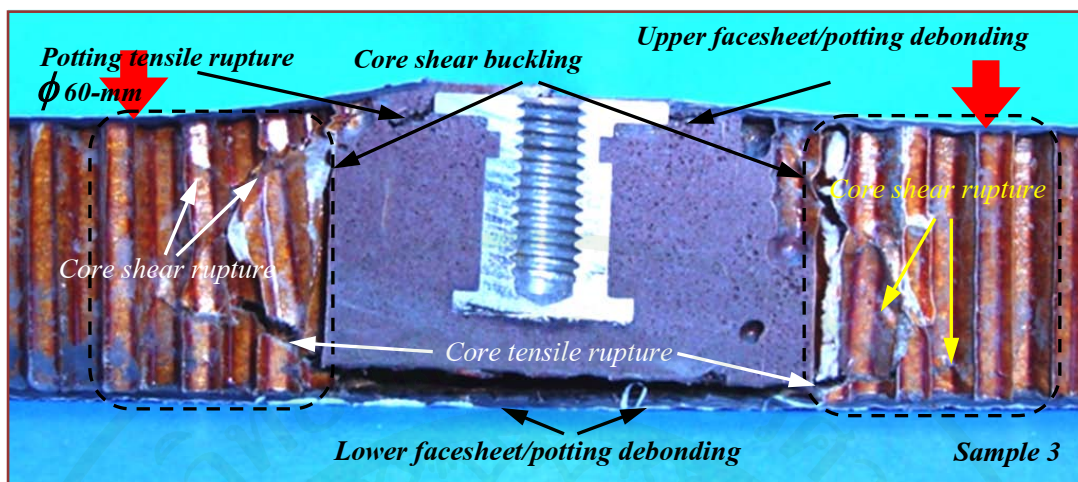
ภาพที่ 58 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดึงทดสอบนอกระนาบของชิ้นทดสอบต่างๆ



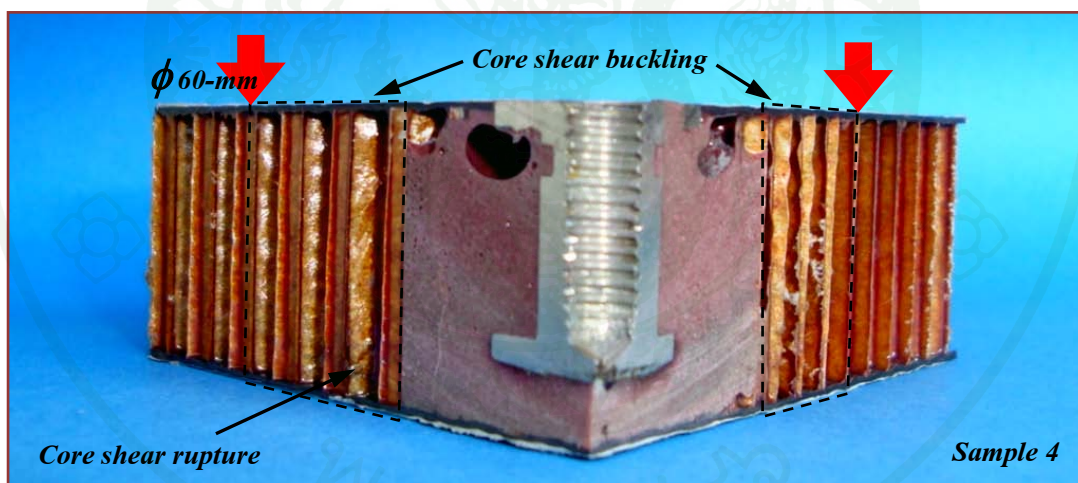
ภาพที่ 59 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดึงทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแกนค้ำของชิ้นทดสอบที่ 1



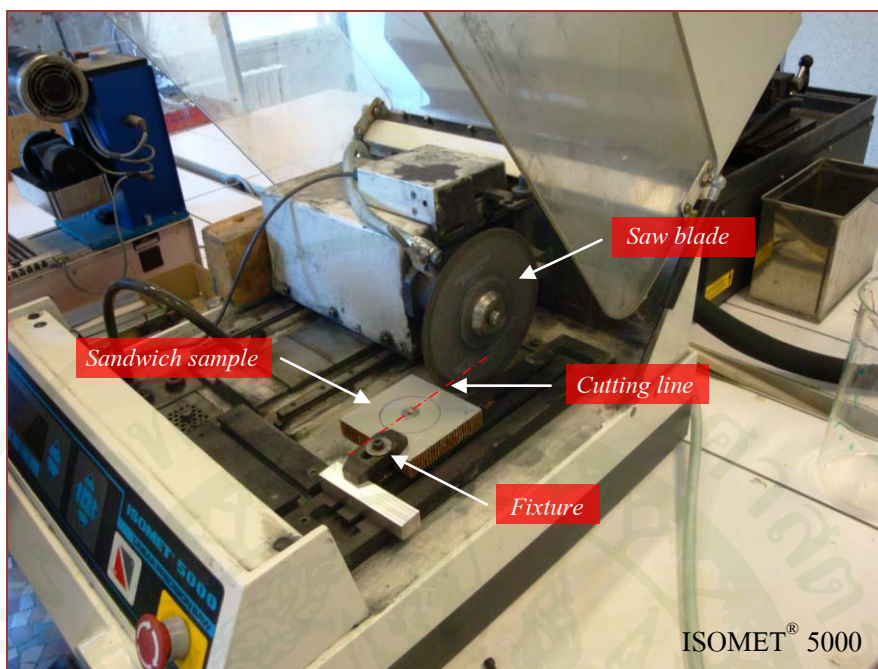
ภาพที่ 60 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดึงทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแกนค้ำของชิ้นทดสอบที่ 2



ภาพที่ 61 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดึงทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแกนค้ำของชิ้นทดสอบที่ 3

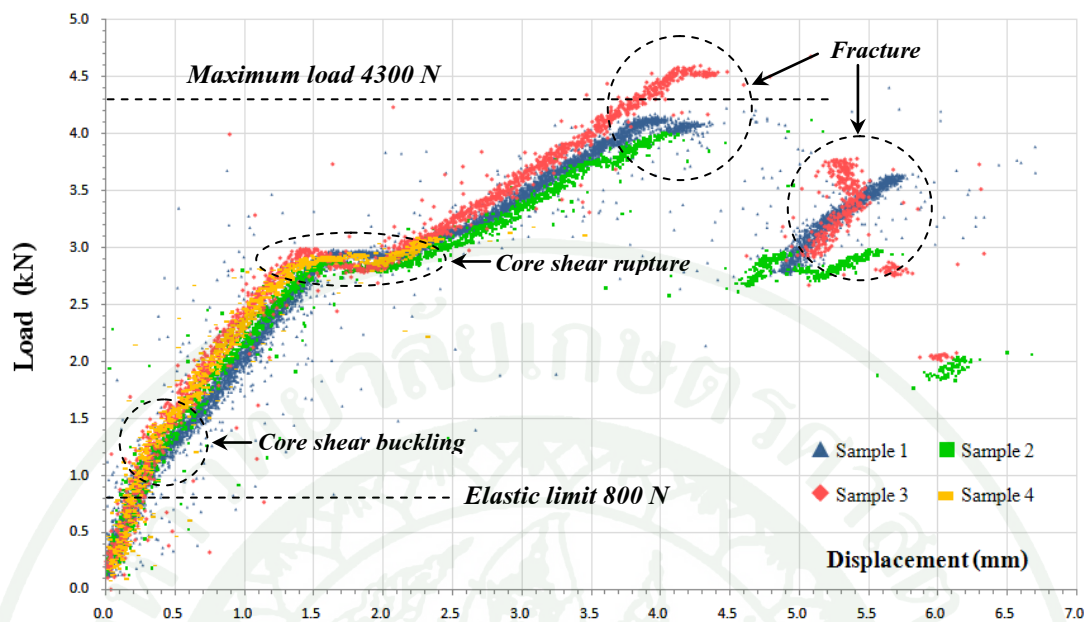


ภาพที่ 62 ความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจากการดึงทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแกนค้ำของชิ้นทดสอบที่ 4

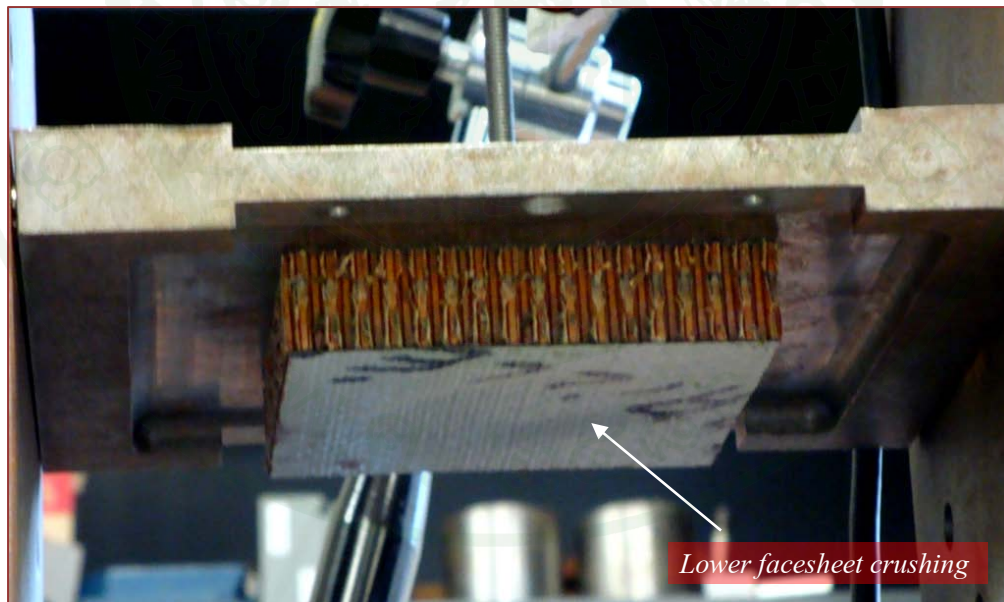


ภาพที่ 63 การติดตั้งชิ้นทดสอบสำหรับผ่าดูความเสียหายเชิงกลของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิช

การวิเคราะห์ความเสียหายเชิงกลที่เกิดขึ้นกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมและระยะเคลื่อนที่ ปรากฏกลไกความเสียหายจำนวน 4 จุด แสดงดังภาพที่ 64 เมื่อตัวสอดแทรกเริ่มรับภาระกรรมดิ่งนอกระนาบ จะเกิดการเคลื่อนที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับภาระกรรมที่เป็นผลมาจากสภาพยืดหยุ่นของวัสดุต่างๆ จนถึงภาระกรรมดิ่งนอกระนาบมีค่าประมาณ 800 นิวตัน ปรากฏความเสียหายเชิงกลจุดแรก คือ การโค้งงอของผนังแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู แสดงดังภาพที่ 59 - 62 โดยโครงสร้างยังคงเสถียรภาพของความเสียหายเชิงกลที่ได้รับจนภาระกรรมดิ่งนอกระนาบมีค่าประมาณ 2900 นิวตัน ปรากฏความเสียหายเชิงกลจุดที่ 2 คือ รอยพับและย่นของผนังแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู แสดงดังภาพที่ 62 ที่ได้จากการสังเกตระหว่างการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 65 ส่งผลให้โครงสร้างแซนด์วิชเกิดพฤติกรรมแบบ snap-through ซึ่งเป็นจุดที่โครงสร้างไม่สามารถรับภาระกรรมได้อีกต่อไป



ภาพที่ 64 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมและระยะเคลื่อนที่ของตัวสอดแทรกโลหะ

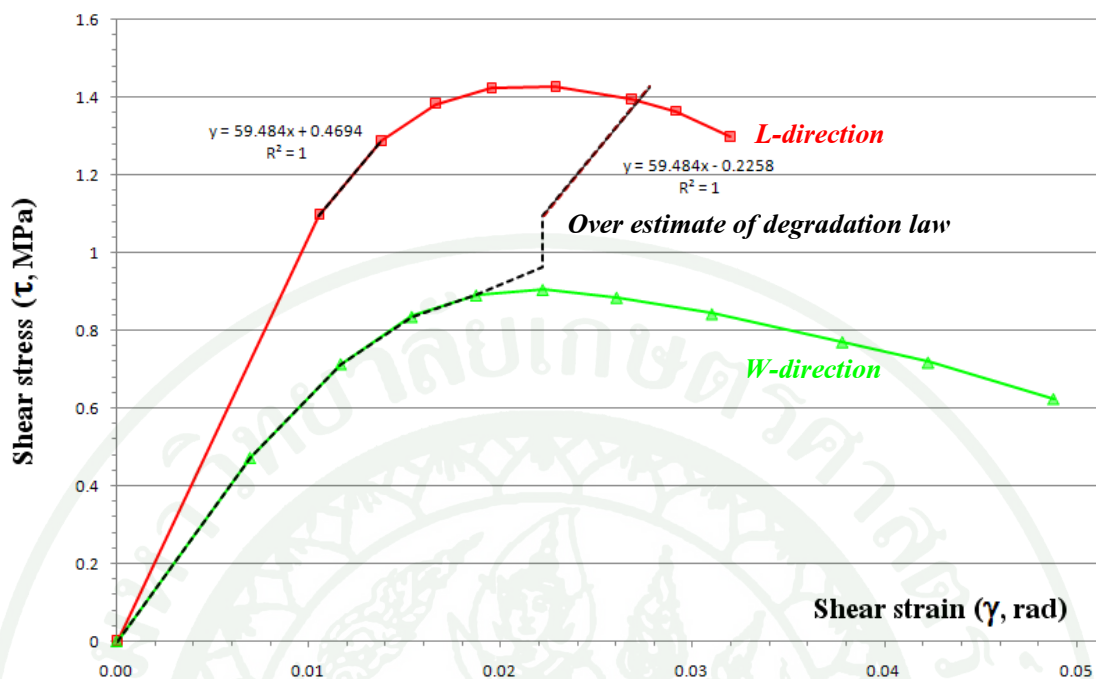


ภาพที่ 65 การโค้งงอของแผ่นผิวล่างที่เป็นผลมาจากความเสียหายเชิงกลของแกนรวงผึ้ง

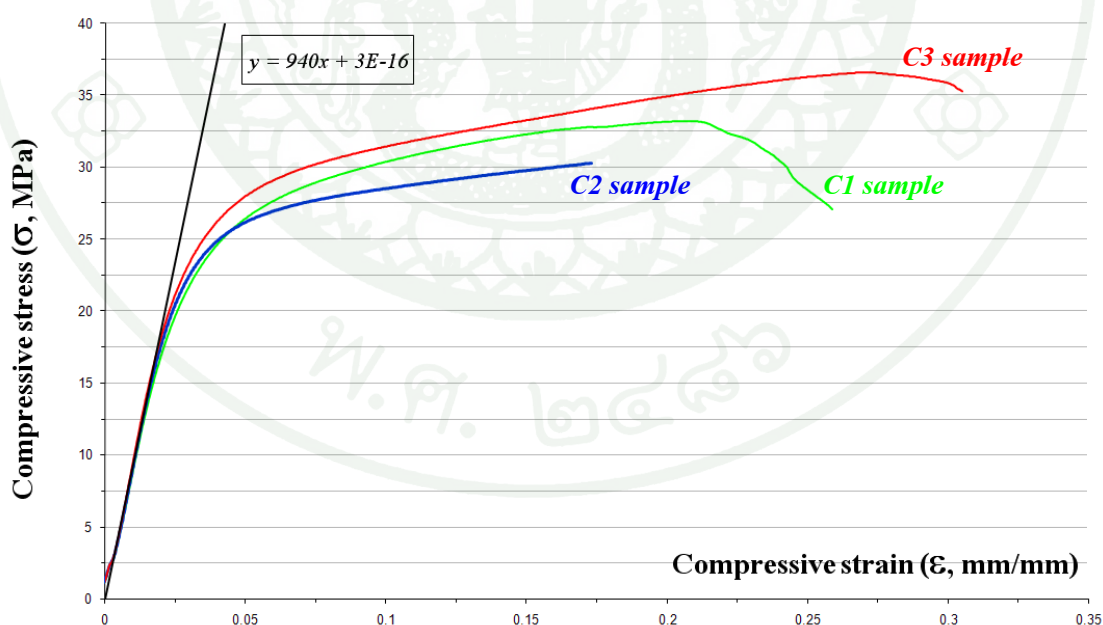
โครงสร้างจะพยายามกลับเข้าสู่เสถียรภาพอีกครั้งที่ตัวสอดแทรกมีระยะการเคลื่อนที่ประมาณ 1.9 มิลลิเมตร โดยอาศัยคุณสมบัติความยืดหยุ่นที่เหลือของวัสดุต่างๆ ที่ประกอบเป็นโครงสร้างแซนด์วิช ได้แก่ แกนรวงผึ้งแนวระนาบแอล เรซินหล่อ และพันธะการเชื่อมต่อระหว่างเรซินหล่อกับแผ่นผิวด้านล่าง เป็นต้น จนภาระกรรมดิ่งนอกระนาบมีค่าสูงสุด (maximum load) เฉลี่ยประมาณ 4300 นิวตัน ปรากฏความเสียหายเชิงกลจุดที่ 3 คือ การหลุดออกของเรซินหล่อกับแผ่นผิวด้านล่างพร้อมกับการฉีกขาดอย่างรวดเร็วของผนังแกนรวงผึ้งที่ได้จากการสังเกตความเสียหายเชิงกลของชิ้นทดสอบที่ 1 - 3 ส่งผลให้ภาระกรรมดิ่งนอกระนาบมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังภาพที่ 64 และโครงสร้างแซนด์วิชยังคงสภาพความต้านทานต่อภาระกรรมอีกครั้งด้วยคุณสมบัติความยืดหยุ่นของแผ่นผิวบน จนภาระกรรมนอกระนาบมีค่าประมาณ 3650 นิวตัน ปรากฏความเสียหายเชิงกลจุดที่ 4 คือ การฉีกขาดของแผ่นผิวแซนด์วิชด้านบน แสดงดังภาพที่ 58

3. ศึกษาความเสียหายเชิงกลที่เกิดขึ้นของตัวสอดแทรกโลหะสำหรับกำหนดเป็นเกณฑ์ของความเสียหายลักษณะต่างๆ

ผลการจำลองการโก่งงอของผนังแกนรวงผึ้งที่ได้รับจากการทดสอบการตัด 3 จุด ดังภาพที่ 47 โดยการจำลองสมาชิกจำกัด ดังภาพที่ 48 - 50 พบว่าแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอลเริ่มปรากฏการโก่งงอภายใต้ภาระกรรมกดสูงสุด 650 นิวตัน ที่ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับ 1.10 เมกะปาสคาล และแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยูเริ่มปรากฏการโก่งงอภายใต้ภาระกรรมกดสูงสุด 350 นิวตัน ที่ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับ 0.47 เมกะปาสคาล แสดงดังภาพที่ 66 และผลการศึกษาความแข็งแรงของเรซินหล่อภายใต้ภาระกรรมกดนอกระนาบ ดังภาพที่ 51 พบว่าเรซินหล่อเริ่มปรากฏความเสียหายที่ความเค้นกดมีค่าเท่ากับ 15 เมกะปาสคาล แสดงดังภาพที่ 67 โดยคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ที่ประกอบเป็นโครงสร้างแซนด์วิชในช่วงแรกจะกำหนดให้วัสดุมีการเคลื่อนที่น้อย (small displacement) เป็นไปตามคุณสมบัติเชิงเส้นที่ได้รับจากการทดสอบต่างๆ ข้างต้น แสดงในตารางที่ 6 ส่วนคุณสมบัติไม่เชิงเส้น (nonlinear property) ของวัสดุต่างๆ ได้แก่ แกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยูจะมีความเค้นเฉือนอยู่ระหว่าง 0.47 - 0.90 เมกะปาสคาล และคุณสมบัติไม่เชิงเส้นของแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอลจะมีความเค้นเฉือนอยู่ระหว่าง 1.10 - 1.43 เมกะปาสคาล แสดงดังภาพที่ 66 ส่วนคุณสมบัติไม่เชิงเส้นเฉลี่ยของเรซินหล่อที่ได้รับจากชิ้นทดสอบ C1 มีความเค้นกดอยู่ระหว่าง 12.90 - 33.18 เมกะปาสคาล แสดงดังภาพที่ 67



ภาพที่ 66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนของแกนรวงผึ้ง



ภาพที่ 67 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดและความเครียดอัดของเรซินหล่อ

แต่ด้วยข้อจำกัดของโปรแกรมที่ไม่สามารถกำหนดสมบัติทางกลไม่เชิงเส้นของแกนรวงผึ้งทั้งสองแนวระนาบเข้าไปในแบบจำลองได้พร้อมกัน ดังนั้นความเสียหายเชิงกลที่ปรากฏในจุดแรก คือ การโก่งงอของผนังแกนรวงผึ้ง จึงกำหนดให้พิจารณาพฤติกรรมความเสียหายเป็นไปตามคุณสมบัติไม่เชิงเส้นของแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยูที่มีคุณสมบัติในการต้านทานความเค้นเฉือนน้อยกว่าแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอล แสดงดังภาพที่ 66

เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ (motion) ที่อาจเกิดขึ้นของแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยูที่ตำแหน่งความเค้นเฉือนวิกฤต (ultimate shear stress) มีค่าประมาณ 0.90 เมกะปาสคาล จนนำไปสู่ความไม่เป็นเชิงเส้นเชิงรูปร่าง (geometry nonlinearity) ดังนั้นจึงกำหนดให้ความไม่เป็นเชิงเส้นเชิงวัสดุของแกนรวงผึ้งเป็นไปตามสมมติฐาน คือ ภาระกรรมจะไม่ส่งผลต่อการเสียรูปของวัสดุที่ตำแหน่งความเค้นเฉือนมีค่าประมาณ 0.96 เมกะปาสคาล และความเครียดเฉือนมีค่าประมาณ 0.02 เรเดียน และสิ้นสุดที่ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับ 1.10 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แกนรวงผึ้งแนวระนาบแอลเริ่มปรากฏคุณสมบัติไม่เชิงเส้นและเป็นตำแหน่งเดียวกันกับความเสียหายเชิงกลในจุดที่ 2 คือ รอยพับและยุบของผนังแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู โดยโครงสร้างเกิดความไร้เสถียรภาพต่อความต้านทานในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ ดังนั้นความไม่เป็นเชิงเส้นเชิงวัสดุของแกนรวงผึ้งในส่วนที่เหลือจึงกำหนดให้ขนานไปกับคุณสมบัติไม่เชิงเส้นของแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอลในช่วงความเค้นเฉือนมีค่าระหว่าง 1.10 - 1.29 เมกะปาสคาล และสิ้นสุดที่ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับ 1.43 เมกะปาสคาล ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันกับความเค้นเฉือนวิกฤตของแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอล แสดงดังภาพที่ 66

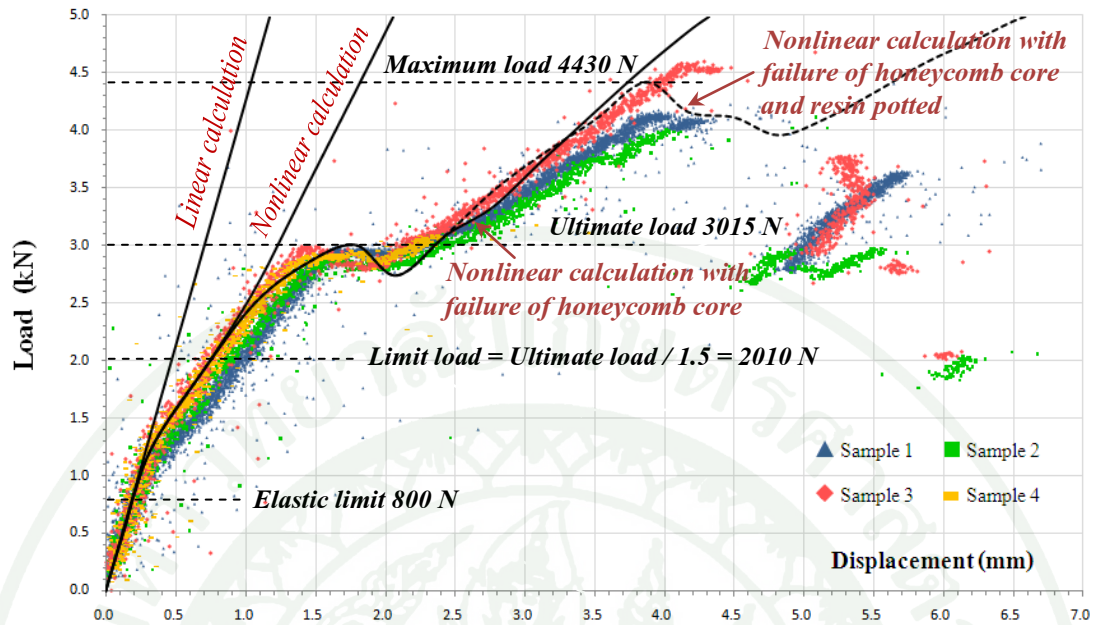
ความเสียหายเชิงกลในจุดที่ 3 ที่ได้จากการทดสอบ ดังภาพที่ 59 - 61 คือ การหลุดออกของเรซินหล่อกับแผ่นผิวล่าง ถูกกำหนดให้มีพฤติกรรมความเสียหายเป็นไปตามค่าความเค้นกดวิกฤต (ultimate compressive stress) ของเรซินหล่อที่ได้รับจากชั้นทดสอบ C1 มีค่าเท่ากับ 33.18 เมกะปาสคาล แสดงดังภาพที่ 67 ถึงแม้ว่าจะมีค่ามากกว่าความเค้นกดวิกฤตที่ได้รับจากชั้นทดสอบ C2 เนื่องจากขณะทำการทดสอบเรซินหล่อของชั้นทดสอบ C2 มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากสาเหตุการติดตั้งมาตรวัดระยะเคลื่อนตัว ส่งผลให้มีความจำเป็นในการหยุดทดสอบที่ความเค้นกดมีค่าเท่ากับ 30.29 เมกะปาสคาล ส่วนการฉีกขาดของผนังแกนรวงผึ้งจะเป็นผลต่อเนื่องมาจากความเสียหายเชิงกลในจุดที่ 2 (progressive failure) คือ รอยพับและยุบของผนังแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู นอกจากนี้ ความเสียหายเชิงกลในจุดที่ 4 คือ การฉีกขาดของแผ่นผิวแซนด์วิชด้านบน จะกำหนดเพียงคุณสมบัติเชิงเส้นของแผ่นผิวแซนด์วิชเท่านั้น อย่างไรก็ตาม กลไกความเสียหายเชิงกลที่

ปรากฏข้างต้นอาจเปลี่ยนแปลงไปตามความหลากหลายของวัสดุที่ประกอบเป็นโครงสร้างแซนด์วิช ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำลองความเสียหายเชิงกลที่เกิดขึ้นข้างต้นด้วยระเบียบวิธีสมาชิกจำกัดตามงานในส่วนนี้ เพื่อศึกษาความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะตามสภาพที่ติดตั้งตามการใช้งานตามส่วนที่ 4 สำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแซนด์วิชประเภทอื่นๆ ต่อไป

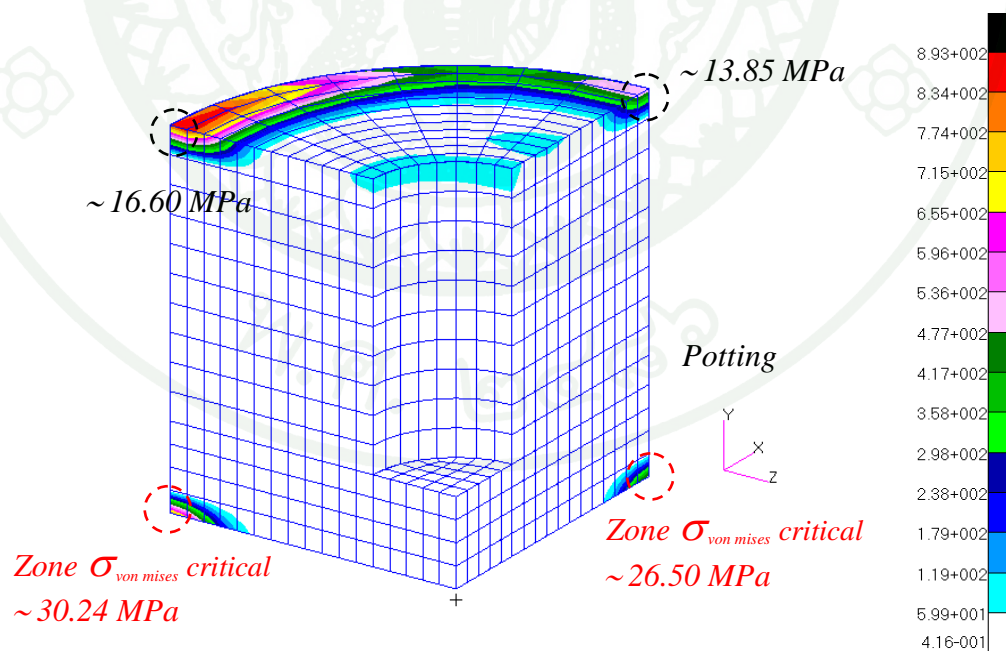
4. ศึกษาความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะตามสภาพที่ติดตั้งตามการใช้งาน

ผลการศึกษาความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะตามสภาพที่ติดตั้งตามการใช้งาน โดยการจำลองสมาชิกจำกัดด้วยแบบจำลองอย่างง่าย ดังภาพที่ 52 เปรียบเทียบกับผลการดึงทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแซนด์วิช แสดงดังภาพที่ 68 พบว่ามีความสอดคล้องกันดีและเพียงพอสำหรับใช้ทำนายภาระกรรมดึงนอกระนาบสูงสุดของตัวสอดแทรกโลหะที่มีสาเหตุมาจากความเค้นเฉพาะตำแหน่งบนรอยต่อระหว่างแผ่นผิวล่างและเรซินหล่อกับแกนรวงผึ้ง ดังภาพที่ 69 แสดงการพิจารณาความเสียหายของเรซินหล่อบนพื้นฐานของพลังงานการผิดรูป (distortion energy) พบว่าบริเวณรอยต่อดังกล่าวกับแผ่นผิวล่างมีค่าความเค้นวอนมิสเซส (von mises stress) มากกว่าบริเวณรอยต่อดังกล่าวกับแผ่นผิวบนประมาณถึง 2 เท่า ซึ่งเป็นสาเหตุของความเสียหายเชิงกลในจุดที่ 3 คือ การหลุดออกของเรซินหล่อกับแผ่นผิวล่างพร้อมกับการฉีกขาดอย่างรวดเร็วของผนังแกนรวงผึ้ง โดยภาระกรรมดึงนอกระนาบสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองอย่างง่าย มีค่าเท่ากับ 4430 นิวตัน ซึ่งแตกต่างจากค่าภาระกรรมดึงนอกระนาบสูงสุดเฉลี่ยของการดึงทดสอบ ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

แต่อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบอากาศยานจะคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าภาระกรรมจำกัด (limit load) ซึ่งจะต้องไม่ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายหรือการเสียรูปอย่างถาวร โดยการทดสอบความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะประเภทนี้ ปรากฏการโก่งตัวของแกนแซนด์วิชจนนำไปสู่การพับและยุบที่ภาระกรรมวิกฤต (ultimate load) ของแบบจำลองอย่างง่ายมีค่าเท่ากับ 3015 นิวตัน ซึ่งโดยทั่วไปค่าภาระกรรมวิกฤตจะมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างภาระกรรมจำกัดและตัวคูณค่าความปลอดภัยของภาระกรรม (safety factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.5 (ภาระกรรมวิกฤต = ภาระกรรมจำกัด x 1.5) ดังนั้นค่าภาระกรรมจำกัดสำหรับการใช้งานของตัวสอดแทรกโลหะประเภทนี้ จึงมีค่าเท่ากับ 2010 นิวตัน และในกรณีที่ผู้ใช้ต้องการเสริมความแข็งแรงให้กับตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแซนด์วิช โดยการบรรเทาความเค้นเฉพาะตำแหน่งในบริเวณรอยต่อข้างต้น ควรเลือกใช้เรซินหล่อที่มีความยืดหยุ่นสูงควบคู่ไปกับแกนแซนด์วิชที่มีค่ากำลังเฉือนสูงทั้งสองแนวระนาบ



ภาพที่ 68 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมและระยะเคลื่อนที่ของตัวสอดแทรกโลหะที่ได้รับจากการทดสอบและแบบจำลองสมาชิกจำกัด



ภาพที่ 69 ความเค้นวอนมิสของเรซินหล่อที่ภาระกรรมนอกระนาบสูงสุด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเชิงทดสอบและคำนวณของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชภายใต้การดึงทดสอบนอกระนาบ โดยเลือกศึกษาโครงสร้างแซนด์วิชชนิดแผ่นผิวแผ่นประกอบเส้นใยคาร์บอนและแกนรวงผึ้งนอเม็กซ์ สำหรับวิธีการติดตั้งตัวสอดแทรกในเรซินหล่อแบบมีการตัดแกนรวงผึ้งเพิ่มที่มีรูปแบบและขนาดตามการใช้งานในเฮลิคอปเตอร์ จากการศึกษาแบบจำลองการส่งผ่านภาระกรรมที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของตัวสอดแทรกลักษณะต่างๆ ในเรซินหล่อโดยใช้แบบจำลองสมาชิกจำกัด มีแนวโน้มว่าหัวของตัวสอดแทรกสามารถกระจายความเค้นเฉพาะตำแหน่งที่เกิดขึ้นบริเวณการเชื่อมต่อได้เป็นอย่างดี ซึ่งหัวของตัวสอดแทรกถูกนำไปประยุกต์ใช้กับตัวสอดแทรกในเรซินหล่อตลอดความหนา เพื่อศึกษากลไกความเสียหายของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชภายใต้การดึงทดสอบนอกระนาบ จากการสังเกตชิ้นงานระหว่างการทดสอบ ปรากฏความเสียหายเชิงกลของแกนรวงผึ้งแนวระนาบดับเบิลยู คือ การโก่งงอ การพับและข่นของผนังแกนที่ได้รับความเสียหายจากการส่งผ่านความเค้นเฉือนของเรซินหล่อ โดยโครงสร้างยังคงสภาพการเชื่อมต่อโดยอาศัยคุณสมบัติความยืดหยุ่นที่เหลือของวัสดุต่างๆ ที่ประกอบเป็นโครงสร้างแซนด์วิช ซึ่งความเสียหายเชิงกลเริ่มปรากฏอีกครั้ง เมื่อพันธะการเชื่อมต่อระหว่างเรซินหล่อและแผ่นผิวล่างมีค่าลดลง จนกระทั่งเกิดการหลุดออกของวัสดุระหว่างรอยต่อและการฉีกขาดอย่างรวดเร็วของผนังแกนรวงผึ้งทั้งสองแนวระนาบที่ได้รับความเสียหายจากการส่งผ่านความเค้นดึงของตัวสอดแทรกที่ภาระกรรมดึงนอกระนาบมีค่าสูงสุดและโครงสร้างยังคงสภาพการเชื่อมต่ออีกครั้งโดยอาศัยคุณสมบัติเชิงเส้นของแผ่นผิวจนกระทั่งเกิดการฉีกขาดของแผ่นผิวแซนด์วิชด้านบน

การจำลองความเสียหายเชิงกลที่เกิดขึ้นของแกนรวงผึ้งและเรซินหล่อด้วยระเบียบวิธีสมาชิกจำกัด เพื่อใช้ศึกษาความแข็งแรงของตัวสอดแทรกโลหะประเภทนี้ พบว่าผลการจำลองสมาชิกจำกัดด้วยแบบจำลองอย่างง่ายมีความสอดคล้องกันดีกับผลการดึงทดสอบนอกระนาบของตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชและเพียงพอสำหรับใช้ทำนายค่าภาระกรรมสูงสุดที่ตัวสอดแทรกโลหะสามารถรับได้ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการออกแบบตัวสอดแทรกโลหะในโครงสร้างแซนด์วิชประเภทอื่นๆ ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ในกรณีที่ต้องการให้การเชื่อมต่อ โครงสร้างแซนด์วิชกับ โครงสร้างอื่นๆ ด้วยตัวสอดแทรก ในเรซินหล่อตลอดความหนา มีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้ใช้ควรติดตั้งหัวของตัวสอดแทรกให้มีแนวระนาบเดียวกันกับแกนรวงผึ้งแนวระนาบคืบเบิลยูที่มีคุณสมบัติในการต้านทานความเค้นเฉือนน้อยกว่าแกนรวงผึ้งแนวระนาบแอล สำหรับใช้กระจายความเค้นเฉพาะตำแหน่งที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของเรซินหล่อกับแกนรวงผึ้ง ซึ่งเป็นตำแหน่งของความเสียหายอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นได้อย่างเด่นชัด โดยขณะติดตั้งตัวสอดแทรกผู้ใช้สามารถสังเกตหัวของตัวสอดแทรกด้านล่างจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับรูบนหัวของตัวสอดแทรกด้านบนที่ใช้สำหรับอัดเรซินหล่อ

นอกจากนี้ การหลุดออกของเรซินหล่อกับแผ่นผิวล่างยังเป็นกลไกความเสียหายเชิงกลอย่างหนึ่งที่สำคัญ เพื่อให้การเชื่อมต่อของ โครงสร้างแซนด์วิชมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น จึงควรมีการศึกษาขนาดของพันธะการเชื่อมต่องดกล่าว โดยมุ่งเน้นศึกษาการส่งผ่านภาระกรรมของตัวสอดแทรกโลหะในกรณีที่ยึดรอยต่อเสียหายเป็นหลัก โดยใช้ความเข้าใจคุณลักษณะและรูปแบบความเสียหายของรอยต่อด้วยแบบจำลองสมาชิกจำกัด

อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ตัวสอดแทรกโลหะใน โครงสร้างแซนด์วิชยังมีตัวแปรหลายตัวที่ยังไม่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ ทิศทางของภาระกรรมที่ส่งผ่านจากตัวสอดแทรกไปสู่โครงสร้างแซนด์วิช โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาระกรรมบิดในกรณีการติดตั้งตัวสอดแทรกโลหะที่อาจต้องมีการขันน็อตให้แน่น ซึ่งอาจสร้างความเสียหายให้แก่เรซินหล่อได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาการส่งผ่านภาระกรรมของตัวสอดแทรกโลหะในกรณีที่ยึดรอยต่อเสียหายเป็นหลักเช่นเดียวกับการศึกษาขนาดของพันธะการเชื่อมต่อข้างต้น เพื่อให้การติดตั้งตัวสอดแทรกไม่เป็นสาเหตุหลักของความเสียหายที่อาจส่งผลต่อความแข็งแรงที่ควรจะได้รับของการเชื่อมต่อของ โครงสร้างแซนด์วิชต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- André, S. 1996. **Synthèse du Programme d'Évaluation d'Inserts à Fortes Épaisseurs pour Application RTM.** La Recherche Aéronautique.
- Ayeh, S.R. 2002. **On the Strength of Bi-Material Interfaces.** Licentiate Thesis. Department of Aeronautics, Division of Lightweight Structures, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Bunyawanchakul, P. 2005. **Contribution à l'Étude du Comportement des Inserts dans les Structures Sandwichs Composites.** Ph. D. Thesis, Supaero, Toulouse.
- European Space Agency. 1987. **Insert Design Handbook,** ESA PSS 03-1202. European Space Agency (ESA), Paris.
- Gay, D., S.V. Hoa and S.W. Tsai. 2003. **Composite Materials Design and Applications.** CRC Press LLC, Florida. Translated from Gay, D. **Matériaux Composites.** 4th ed. Editions Hermès, Paris.
- Geier, M.H. 1994. **Quality handbook for composite materials.** Lorient University and Engineering School of the Ministry of Defence, London.
- Heimbs, S. and M. Pein. 2008. Failure Behaviour of Honeycomb Sandwich Corner Joints and Inserts. **Composite Structures.** 89 (2009): 575-588. **ScienceDirect Database.**
- Hexcel Composites. 1997. **Sandwich panel fabrication technology.** Pub. No. LTU 018. Hexcel Composites, Duxford.

- _____. 1998. **Hexcel's Composite Materials for the Aerospace Industry.**
European Airshow Issue. Hexcel Composites, Duxford.
- _____. 2000. **Honeycomb sandwich design technology.** Pub. No. AGU 075b.
Hexcel Composites, Duxford.
- Kuenzi, E.W. 1947. **Stability of a few curved panels subjected to shear.** Report No. 1571.
Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service,
University of Wisconsin, Wisconsin.
- Leite, M., M.D. Freitas and A. Sliva. 2004. **Sandwich Construction.** Instituto Superior
Técnico, Universidade Técnica de Lisboa (UTL), Lisboa.
- Marshall, A. 1982. Sandwich Construction, pp. 559-575. *In* Lubin, G. **Handbook of
Composites.** Van Nostrand Reinbold, New York.
- M.C. Gill Corporation. 1997. Simplified Sandwich Panel Design. **The M.C. Gill Doorway.**
3 (34): 1-7.
- Milton, S. and S.M. Grove. 1997. **Composite Sandwich Panel Manufacturing Concepts for a
Lightweight Vehicle Chassis.** APMC, University of Plymouth, Devon.
- Shur-Lok Corporation. 1981. **Fasteners for Sandwich Structure -Design Manual.** Shur-Lok
Corporation, California.
- _____. 1987. **Fasteners for Sandwich Structure.** 10th ed. Shur-Lok Corporation,
California.

Thomsen, O.T. 1998. Sandwich Plates with 'Through-the-Thickness' and 'Fully-Potted' Inserts : Evaluation of Differences in Structural Performance. **Composite Structures**. 40 (1998): 159-174. **ScienceDirect Database**.

Military Handbook, 1974. **United States Military Handbook 23A**, Design of Flat Circular Sandwich Panels Loaded at an Insert. Military Handbook, Missouri.

Youngquist, W.G. and E.W. Kuenzi. 1955. **Stresses Induced in a Sandwich Panel by Load Applied at an Insert**. Report No. 1845. Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service, University of Wisconsin, Wisconsin.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายปฏิญญา กุมสันเทียะ
เกิดวันที่	21 กันยายน 2528
สถานที่เกิด	อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยนเรศวร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-