



สำนักพิมพ์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย

กลศาสตร์ของวัสดุคอมโพสิต

Mechanics of Composite Materials



ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ



กลศาสตร์ของวัสดุคอมโพสิต

Mechanics of Composite Materials

ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ

เลขทะเบียน **M 0150804**

วันลงทะเบียน **๕7 ค.ย. 2560**

เลขเรียกหนังสือ

680.118

พ ๔๑๒๓

25๖๑



สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2559

680.-



ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ

กลศาสตร์ของวัสดุคอมโพสิต / ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ

1. วัสดุเชิงประกอบ 2. วัสดุ - สมบัติทางกล.

629.118

ISBN 978-974-03-3437-8

พ.พ. 2019



ศูนย์ศูนย์วิชาการ *สู่สังคม*

www.ChulaPress.com

Knowledge to All

ลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 1,000 เล่ม พ.ศ. 2559

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้นต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้จัดทำน่าย ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

สาขา

ศาลาพระเกี้ยว โทร. 0-2218-7000-3 โทรสาร 0-2255-4441

สยามสมเคาร์ โทร. 0-2218-9881-2 โทรสาร 0-2254-9495

ม.นเรศวร จ.พิษณุโลก โทร. 0-5526-0162-4 โทรสาร 0-5526-0165

ม.เทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา โทร. 0-4421-6131-4 โทรสาร 0-4421-6135

ม.บูรพา จ.ชลบุรี โทร. 0-3839-4855-9 โทรสาร 0-3839-3239

โรงเรียนนายร้อย จปร. จ.นครนายก โทร. 0-3739-3023 โทรสาร 0-3739-3023

ม.พะเยา จ.พะเยา โทร. 0-5446-6799-800 โทรสาร 0-5446-6798

จัตุรัสจามจุรี (CHAMCHURI SQUARE) ชั้น 4 โทร. 0-2160-5301-2 โทรสาร 0-2160-5304

รัตนธิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9 โทรสาร 0-2950-5405

ม.เทคโนโลยีราชมงคลธัญชน จ.นครราชสีมา โทร. 0-4492-2662-3 โทรสาร 0-4492-2664

มือถือ 08-6392-7785

ศูนย์บริการวิชาการ

Call Center (จัดส่งทั่วประเทศ) โทร. 0-2255-4433 <http://www.chulabook.com>

และเครือข่าย

ร้านค้า หนังสือเข้าชั้นเรียน ติดต่อแผนกขายส่ง สาขารัตนธิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9

โทรสาร 0-2950-5405

มีจำหน่ายที่ ร้านสี่แฉกทุกสาขา ร้านนายอินทร์ทุกสาขา และร้านหนังสือชั้นนำทั่วประเทศ

กองบรรณาธิการ : เกษิษฐา กิตติคุณ

พิสูจน์อักษร : ปุณณิศา บุญเปี่ยม

ฮอตาแบบปก : Manjari

ออกแบบรูปเล่ม : รศ. ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ

พิมพ์ที่ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [5903-163]

โทร. 0-2218-3557 โทรสาร 0-2215-3612

คำนำ

งานทางวิศวกรรมหลาย ๆ ประเภทมีการนำวัสดุคอมโพสิตที่มีส่วนประกอบของเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงและพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักเบามาใช้เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน วัสดุคอมโพสิตถูกนำมาใช้ในงานวิศวกรรมขั้นสูง เช่น อุตสาหกรรมการอากาศยาน เรือและยานยนต์ งานโครงสร้างในวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมโยธา ไปจนถึงผลิตภัณฑ์ที่พบได้ในชีวิตประจำวันอย่างอุปกรณ์กีฬา ความเข้าใจในกลศาสตร์ของวัสดุคอมโพสิตช่วยให้วิศวกรและผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์สามารถนำวัสดุดังกล่าวมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หนังสือเอกสารอ้างอิงวัสดุคอมโพสิตเล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 9 บท คือ บทบทก่อนเนื้อหาที่เป็นความรู้พื้นฐานทางกลศาสตร์ ไปจนถึงทฤษฎีลามินาชั้น และพฤติกรรมเชิงกลของแผ่นคอมโพสิต เนื้อหาในบทแรกเป็นการกล่าวถึงข้อบ่งชี้และนิยามของวัสดุคอมโพสิต รวมทั้งกระบวนการขึ้นรูปและการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิต บทที่ 2 เป็นการทบทวนกลศาสตร์ของวัสดุไอโซทรอปิก โดยมีการทบทวนนิยามและการหาความเค้น ความเครียด และการแปลงความเค้นและความเครียด เนื้อหาในส่วนของบทเป็นการทบทวนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุไอโซทรอปิก บทที่ 3 กล่าวถึงสมบัติของวัสดุรวมทั้งการทดสอบวัสดุเพื่อหาสมบัติเชิงกลที่มีทั้งความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง และสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม เนื้อหาในบทนี้ขบลงถึงการหาค่าสมบัติของวัสดุโดยใช้กฎของส่วนผสมสม บทที่ 4 เป็นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการหาความเค้นและความเครียดในชั้นลามินา โดยพิจารณาความเครียดที่เกิดจากภาระทางกลและการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม เนื้อหาในส่วนนี้พิจารณาความเค้นและความเครียดทั้งโมเมนต์และนอร์มัลที่กิดที่หลักของวัสดุ รวมทั้งสมบัติยังผลของวัสดุคอมโพสิตที่สทางเดียว

เนื้อหาบทที่ 5 กล่าวถึงความแข็งแรงของชั้นลามินาที่รับภาระในรูปแบบต่าง ๆ บทนี้แนะนำเกณฑ์ความเสียหายแบบต่าง ๆ ของชั้นลามินา เกณฑ์ความเสียหายดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าความแข็งแรงของชั้นลามินาได้ เนื้อหาในบทที่ 6 ซึ่งเกี่ยวข้องกับทฤษฎีลามินาชั้นฉือ เป็นเนื้อหาที่สำคัญที่สุดสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของแผ่นลามิเนต ส่วนเนื้อหาของบทนี้กล่าวถึงการระบุมุมของเส้นใยในแผ่นลามิเนต นิยามและการหาความเค้นลัฟร์และโมเมนต์ลัฟร์ในแผ่นคอมโพสิต การเปลี่ยนรูป ความเค้นและความเครียดในแผ่นบางตามทฤษฎีแผ่นบางที่ใช้กับวัสดุไอโซทรอปิก เนื้อหาสำคัญของบทนี้อยู่ในหัวข้อ ทฤษฎีลามินาชั้นแบบคลาสสิก ซึ่งเป็นหัวข้อที่แสดง

ที่มาของมทริกซ์ ABD ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ความถี่และความถี่ในแผ่นลามิเนตต่อไป ใน ส่วนท้ายของบทนำเสนอผลของการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม รวมทั้งสมบัติเชิงผลและความ แข็งแรงของแผ่นลามิเนต บทที่ 7 วิเคราะห์การ โกงของคานคอมโพสิต โดยใช้ทฤษฎีลามิเนชันแบบ คลาสสิกที่แสดงในบทที่ 6 ในขณะที่บทที่ 8 กล่าวถึงการวิเคราะห์ปัญหาการ โกง การโค้งเคาะและ การสั่นสะเทือนของแผ่นคอมโพสิต โดยพิจารณาหาผลเฉลยแม่นยำจากสมการครอบคลุม ส่วนต้น ของบทนี้แสดงการหาสมการสมดุลและการจำลองเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา ปัญหาการ โกงเคาะ และการสั่นสะเทือนของแผ่นลามิเนตที่มีรูแบบทั่ว ๆ ไปไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำได้ จะต้อง ใช้หลักการทางพลังงานซึ่งในที่นี้เลือกใช้หลักการพลังงานศักย์ร่วมต่ำสุดในการ หาผลเฉลย โดยประมาณ บทที่ 9 กล่าวถึงพลังงานประเภทต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อแผ่นลามิเนตรับภาระภายนอก การ ใช้ระเบียบวิธีวิธีหาค่าเหมาะที่สุดวิธีแบบโทโรวิชในการแก้ปัญหาการ โกงเคาะและการสั่นสะเทือนของ แผ่นลามิเนต ในส่วนท้ายของบทกล่าวถึงการทดลองและการประยุกต์ใช้ทฤษฎีความคล้ายในการ แก้ปัญหาการ โกงเคาะของแผ่นลามิเนต

นอกจากหนังสือเล่มนี้จะสามารถใช้เป็นตำราประกอบการเรียนในระดับปริญญาบัณฑิต ตอนปลายหรือระดับบัณฑิตศึกษาแล้ว หนังสือเล่มนี้ยังเหมาะกับนิสิตนักศึกษาที่ทำวิจัยในหัวข้อที่ เกี่ยวข้องกับวัสดุและ โครงสร้างคอมโพสิต ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนการเขียนตำราเล่มนี้ ขอขอบคุณนิสิตในที่ ปรีक्षाของผู้เขียนทุกท่านที่มีส่วนร่วมและเป็นผู้ช่วยวิจัย ทำให้เกิดองค์ความรู้ในสาขาวิชาที่สมบูรณ์ มากขึ้น ขอพระคุณกองบรรณาธิการของสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในการพิสูจน์อักษรต้นฉบับหนังสือเล่มนี้เป็นอย่างดี

ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มกราคม 2559

สารบัญ

คำนำ	
สารบัญ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 นิยามของวัสดุคอมโพสิต	2
1.2 พอลิเมอร์และเส้นใย	3
1.3 กระบวนการขึ้นรูป	13
1.4 การใช้งานวัสดุคอมโพสิต	20
1.4.1 อุตสาหกรรมอากาศยาน	21
1.4.2 อุตสาหกรรมยานยนต์	23
1.4.3 งานวิศวกรรมโยธาและโครงสร้าง	26
1.4.4 อุปกรณ์กีฬาและผลิตภัณฑ์อื่น ๆ	30
แบบฝึกหัด	31
เอกสารอ้างอิง	32
บทที่ 2 การหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ	37
2.1 ความเค้น	37
2.1.1 ความหมายของความเค้น	38
2.1.2 ความเค้นที่จุด	39
2.1.3 การแปลงความเค้น	42
2.1.4 ความเค้นหลักและความเค้นเฉือนในระนาบสองชุด	47
2.1.5 การแปลงความเค้นใน 3 มิติ	52
2.2 ความเครียด	54
2.2.1 ความหมายของความเครียด	54
2.2.2 ความเครียดที่จุด	55
2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการเคลื่อนที่	57
2.2.4 การแปลงความเครียด	60
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด	63

2.3.1	สมบัติเชิงกลของวัสดุ	64
2.3.2	กฎของฮุกสำหรับวัสดุไอโซทรอปิก	66
2.4	บทสรุป	71
	แบบฝึกหัด	71
	เอกสารอ้างอิง	75
บทที่ 3	ประเภทและสมบัติของวัสดุ	77
3.1	วัสดุแอนไอโซทรอปิก	78
3.2	การทดสอบวัสดุ	81
3.2.1	การทดสอบแรงดึงตามแนวแกน	82
3.2.2	การทดสอบแรงกด	84
3.2.3	การทดสอบแรงเฉือน	86
3.3	สมบัติที่เกี่ยวกับความแข็งแรง	89
3.4	ความแข็งแรงของวัสดุออร์โททรอปิกและวัสดุไอโซทรอปิกความยาว	96
3.5	สมบัติด้านความแข็งแรง	101
3.6	สมบัติที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น	108
3.6.1	ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยน	108
3.6.2	ความเครียดเนื่องจากปริมาณความชื้นเปลี่ยน	111
3.7	สมบัติของวัสดุตามกฎของส่วนผสม	113
3.7.1	ความหนาแน่น ρ_c	114
3.7.2	มอดูลัสตามแนวเส้นใย E_1	117
3.7.3	มอดูลัสตามแนวขวางเห็นใย E_{22}	118
3.7.4	มอดูลัสเฉือน G_{12}	120
3.7.5	อัตราส่วนปัวซอง ν_{12}	121
3.8	บทสรุป	123
	แบบฝึกหัด	124
	เอกสารอ้างอิง	127
บทที่ 4	ความเค้นและความเครียดในชั้นลามิเนต	131
4.1	ความเครียดที่เกิดจากภาระทางกล	131

4.2	ความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม	137
4.3	ความเครียดในวัสดุอุดรีโทพราซีติกและไดไฮดรอกซีฟอสเฟตตามขวาง	141
4.4	คอมโพสิททิคทางเสีวรับความเค้นระนาบ	151
4.5	ความเค้นและความเครียดบนอกระบบพิกัดหลักของวัสดุ	158
4.6	สมบัติเชิงผลของวัสดุคอมโพสิททิคสองเฉด	173
	แบบฝึกหัด	181
	เอกสารอ้างอิง	183
บทที่ 5	เกณฑ์ความเสียหายของลามิเนต	185
5.1	แนวคิดพื้นฐาน	186
5.2	เกณฑ์ความเค้นสูงสุด	190
5.3	เกณฑ์ความเครียดสูงสุด	198
5.4	เกณฑ์ของฮิลล์	204
5.5	เกณฑ์ของไซ-ฮิลล์	205
5.6	เกณฑ์ของไซ-วู	211
	แบบฝึกหัด	220
	เอกสารอ้างอิง	223
บทที่ 6	ทฤษฎีลามิเนชัน	225
6.1	แผ่นลามิเนต	226
6.2	ความเค้นฉัฟท์และ โมเมนต์ฉัฟท์	228
6.3	การเปลี่ยนรูปและความเครียดในแผ่นบาง	233
6.4	ความเค้นในชั้นลามิเนต	241
6.5	ทฤษฎีลามิเนชันแบบคลาสสิก	248
6.6	เมทริกซ์ ABD สำหรับลามิเนตแบบต่าง ๆ	259
6.6.1	วัสดุไฮโซทรอปิก	259
6.6.2	วัสดุไฮโซทรอปิกตามขวาง	261
6.6.3	ลามิเนตแบบสมมาตร	263
6.6.4	ลามิเนตแบบขวาง	264
6.6.5	ลามิเนตแบบสมมูล	265

6.6.6	ลามีเนตทำมุมแบบสมดุค	266
6.6.7	ลามีเนตแบบไอโซทรอปิกเสริมอน,	267
6.6.8	ลามีเนตแบบทริสมมาตร	269
6.7	ผลของการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม	271
6.8	สมบัติข้งผลของแผ่นลามีเนต	284
6.9	ความแข็งแรงของแผ่นลามีเนต	291
6.9.1	ความแข็งแรงของแผ่นลามีเนต โดย CLT	292
6.9.2	ดีลามีเนชันจากความเค้นระหว่างชั้นลามีนา	301
	แบบฝึกหัด	305
	เอกสารอ้างอิง	311
บทที่ 7	คานคอมโพสิค	313
7.1	บทนำ	313
7.2	คานไอโซทรอปิก	316
7.3	คานคอมโพสิครับแรงในแนวแกน	320
7.4	คานคอมโพสิครับโมเมนต์ดัด	323
7.4.1	สมบัติข้งผลภายใต้การะดัด	323
7.4.2	ความเครียดในคานคอมโพสิครับโมเมนต์ดัด	326
7.5	ระยะโค้งของคานคอมโพสิค	328
	แบบฝึกหัด	336
	เอกสารอ้างอิง	338
บทที่ 8	การวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นบาง	339
8.1	บทนำ	339
8.2	การะที่กระทำบนแผ่นบาง	340
8.3	สมการสมดุค	345
8.4	เงื่อนไขขอบเขต	351
8.5	การโค้งของแผ่นคอมโพสิค	359
8.6	การโค้งเคาะของแผ่นคอมโพสิค	364
8.7	การสันสะเทือนของแผ่นคอมโพสิค	379

แบบฝึกหัด	388
เอกสารอ้างอิง	390
บทที่ 9 หลักการพลังงานและเทคนิคการทดลอง	391
9.1 บทนำ	392
9.2 หลักการพลังงานศักย์รวมต่ำสุด	392
9.2.1 พลังงานความเครียดจากความเค้นลัพธ์และ โมเมนต์ลัพธ์	393
9.2.2 พลังงานความเครียดจากการ โท่งเนื่องจากความเค้นลัพธ์ในระนาบ	397
9.2.3 พลังงานจลน์ของแผ่นลามิเนต	399
9.2.4 งานเนื่องจากแรงตามขวาง	400
9.3 ระเบียบวิธีริทซ์	401
9.3.1 การโค้งงอของแผ่นลามิเนต	401
9.3.2 การสันสะท้อนของแผ่นลามิเนต	408
9.3.3 หึ่งกั้นการเคลื่อนที่นอกระนาบ	414
9.4 ระเบียบวิธีแกนโทไววิช	418
9.5 ระเบียบวิธีการทดลอง	423
9.5.1 การระบุภาระโค้งงอ	425
9.5.2 ชุดทดลองการ โท่งตะ	430
9.5.3 รูปร่างการ โท่งตะ	433
9.5.4 ทฤษฎีความคล้าย	436
แบบฝึกหัด	440
เอกสารอ้างอิง	441
ภาคผนวก	445
บรรณานุกรม	455
ดัชนี	457
ประวัติผู้เขียน	463