

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพประกอบ	ฉ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	5
บทที่ 2 หลักการและเหตุผล	7
2.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของการอพยพไมซ์	7
2.2 อนุกรมของเทเลอร์	8
2.3 วิธีลำดับโปรแกรมเชิงเส้นของการอพยพไมซ์รูปร่าง	8
2.4 ตัวแปรออกแบบของการอพยพไมซ์รูปร่างและการตรวจสอบการลู่เข้า	9
2.5 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขคอนสเตรนซ์ของการอพยพไมซ์ชิ้นงาน	11
2.6 การหาคำตอบของระบบสมการเชิงเส้นด้วยวิธีซิมเพล็กซ์	13
2.7 สมการเส้นขอบโค้งของชิ้นงาน	14
2.8 ฟังก์ชันแม่ปึงของเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์	18
2.9 วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชัน	22
2.10 การวิเคราะห์ความไว	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.2 การคำนวณเมตริกซ์ของจาโคเบียน	29
3.3 การทำงานของโปรแกรม p -FEM ภายหลังการเพิ่มการออฟทิไมซ์รูปร่าง	37
บทที่ 4 ผลและการวิจารณ์	41
4.1 การออกแบบขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้าง ในแนวแกน	41
4.2 การออกแบบขอบโค้งของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	56
4.3 การออกแบบขอบโค้งภายในของชิ้นงานรูปตัวยู	71
4.4 การออกแบบขอบโค้งของรูที่เจาะบนคานฝังรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	83
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุป	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
บรรณานุกรม	96
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การคำนวณความเค้นของชิ้นงานตัวอย่าง	98
ภาคผนวก ข เมตริกซ์เบซิเอร์และเมตริกซ์บี-สไปไลน์	103
ภาคผนวก ค การใช้โปรแกรม p -FEM และรายละเอียดของไฟล์อินพุต	110
ประวัติผู้เขียน	119

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ความเค้น von Mises ภายหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของ การวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้าง ในแนวแกน	46
4.2 ความเค้น von Mises ภายหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ของ การวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้าง ในแนวแกน	52
4.3 ความเค้น von Mises ภายหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของ การวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	61
4.4 ความเค้น von Mises ภายหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ของ การวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	66
4.5 เปรียบเทียบผลการออฟทีไมซ์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกันของ การวิจัยนี้และผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้อง	70
4.6 ความเค้น von Mises ภายหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของ การวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	75
4.7 ความเค้น von Mises ภายหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ของ การวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	80
4.8 ความเค้น von Mises ที่รอบการคำนวณต่างๆ ของการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบ เบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไฟลน์ของการวิเคราะห์คานฝังรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	88

สารบัญภาพประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรออกแบบที่รอบการคำนวณ ω และรอบการคำนวณ $\omega+1$	9
2.2 รูปแบบชิ้นงานและตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้น von Mises มากสุด	11
2.3 เส้นโค้งเบซิเอร์จากกลุ่มของจุดควบคุมจำนวนสี่จุด	14
2.4 อิลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่มีทุกขอบเป็นขอบโค้ง	20
2.5 ฟังก์ชันขอบโค้งของขอบชิ้นงานและขอบอิลิเมนต์	20
3.1 การคำนวณเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของเส้นขอบเบซิเอร์และบี-สไปไลน์	30
3.2 ลำดับขั้นตอนการคำนวณตำแหน่งของเส้นขอบและอนุพันธ์ของเส้นขอบ	36
3.3 แผนภาพลำดับขั้นตอนการออฟทิไมซ์รูปร่าง	39
4.1 รูปร่างชิ้นงานและรูปแบบวิธีการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน	43
4.2 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปดโดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์สำหรับกรณีการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน	45
4.3 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปดโดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์สำหรับกรณีการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน	45
4.4 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทิไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์ของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน	47
4.5 รูปร่างขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกนที่รอบการคำนวณศูนย์ถึงสี่ของการออฟทิไมซ์โดยใช้กำลัง $p=8$	48
4.6 รูปร่างขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกนภายหลังการออฟทิไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์	48
4.7 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่ออฟทิไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน	49
4.8 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสามถึงแปดโดยใช้เส้นขอบบี-สไปไลน์สำหรับกรณีการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน	51

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับ สามถึงแปด โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ สำหรับกรณีการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน	51
4.10 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทิมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ของ แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน	53
4.11 รูปร่างขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกนภายหลัง การออฟทิมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์	54
4.12 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่ออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปด โดยใช้เส้นขอบ บี-สไฟลน์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน	54
4.13 เปรียบเทียบรูปร่างขอบโค้งของการออฟทิมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และบี-สไฟลน์ สำหรับกรณีการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน	55
4.14 รูปร่างชิ้นงานและรูปแบบวิธีการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	58
4.15 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับห้าถึงแปด โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ สำหรับกรณีการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	60
4.16 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับห้าถึงแปด โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ สำหรับกรณีการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	60
4.17 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทิมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของ แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	61
4.18 รูปร่างขอบโค้งของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกันภายหลังการออฟทิมซ์ โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์	63
4.19 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่ออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหก โดยใช้เส้นขอบ เบซิเออร์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน	63
4.20 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปด โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ สำหรับกรณีการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	65

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปด โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ สำหรับการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	65
4.22 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ของ แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	66
4.23 รูปร่างขอบโค้งของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกันภายหลังการออฟทีไมซ์ โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์	68
4.24 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่ออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ด โดยใช้เส้นขอบ บี-สไฟลน์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน	68
4.25 เปรียบเทียบรูปร่างเส้นขอบของการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบชีเออร์และบี-สไฟลน์ สำหรับการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน	70
4.26 รูปร่างชิ้นงานและรูปแบบวิธีการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	72
4.27 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสามถึงแปด โดยใช้เส้นขอบเบชีเออร์ สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	74
4.28 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับสามถึงแปด โดยใช้เส้นขอบเบชีเออร์ สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	74
4.29 รูปร่างเส้นขอบที่ออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกถึงแปดและเส้นขอบวงกลม สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	75
4.30 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานรูปตัวยูที่มีขอบโค้งวงกลมและชิ้นงานหลังการออฟทีไมซ์	76
4.31 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่ออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ด โดยใช้เส้นขอบ เบชีเออร์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน	77
4.32 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสองถึงแปดของเส้นขอบบี-สไฟลน์ สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	79
4.33 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับสองถึงแปดของเส้นขอบบี-สไฟลน์ สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	79

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 รูปร่างเส้นขอบที่ออฟทิไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และแปดและเส้นขอบวงกลม สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู	80
4.35 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานรูปตัวยูหลังการออฟทิไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และแปด	81
4.36 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่ออฟทิไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่โดยใช้เส้นขอบ บี-สโพล์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟในคัลลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน	81
4.37 รูปร่างชิ้นงานและรูปแบบวิธีการวิเคราะห์คานฝัງเจาะรู	85
4.38 รูปร่างเส้นขอบของรูที่เจาะบนคานฝัງรูปสี่เหลี่ยมคางหมูก่อนและหลังการออฟทิไมซ์	89
4.39 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทิไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยใช้เส้นขอบ เบซิเออร์ของคานฝัງรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	90
4.40 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทิไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดโดยใช้เส้นขอบ บี-สโพล์ของคานฝัງรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	91
4.41 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทิไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยใช้เส้นขอบ บี-สโพล์ของคานฝัງรูปสี่เหลี่ยมคางหมู	92

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
b	กำลังโพลีโนเมียลของเส้นขอบบี-สไฟลน์	
c_m	ลำดับของจุดควบคุม	
c_x	พิกัดของจุดควบคุมในแนวแกน x	m
c_y	พิกัดของจุดควบคุมในแนวแกน y	m
d_i	การจัดที่โหนด	m
d_h	การจัดแบบ p	m
f	ฟังก์ชันใด ๆ	
f_i	แรงกระทำที่โหนด	N
f_h	แรงกระทำแบบ p	N
g_j	เงื่อนไขคอนสเตรนที่ลำดับที่ j	
i, j, m	ตัวแปรแสดงลำดับหมายเลขใด ๆ	
k_{ii}	เมตริกซ์ความแข็งแกร่งของอีลิเมนต์กำลังหนึ่ง	
k_{ih}, k_{hh}	เมตริกซ์ความแข็งแกร่งของอีลิเมนต์แบบ p	
n	จำนวนของจุดควบคุมลบหนึ่ง	
p	กำลังโพลีโนเมียลของฟังก์ชันพื้นฐาน	
q	จำนวนของตัวแปรออกแบบ	
s_i	ตัวแปรออกแบบลำดับที่ i	
$\bar{s}_i$	ทิศทางเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบลำดับที่ i	
$s_i^{(\omega)}$	ตัวแปรออกแบบลำดับที่ i ที่รอบการคำนวณ ω	
Δs_i	การเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวแปรออกแบบลำดับที่ i	m
t	ความหนาของชิ้นงาน	m
u	สนามการขจัด	m
x, y	ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน	
x_i, y_i	ฟังก์ชันขอบโค้งในระบบพิกัด x และ y ของอีลิเมนต์ที่ขอบ i	

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
z	ตัวแปรใด ๆ	
C	สมการเส้นขอบเบซิเออร์และบี-สไปไลน์	
D	การจัดของระบบรวม	
E	โมดูลัสของยังค์	N/m^2
F	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	
G	สัมประสิทธิ์ทวินาม	
K	เมตริกซ์ความแข็งแรงของระบบรวม	
M	ตำแหน่งที่เกิดความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานเริ่มต้น	
N_i	ฟังก์ชันสัดฐาน	
N_h	ฟังก์ชันสัดฐานแบบ p	
Q	ตำแหน่งที่เกิดความเค้น von Mises มากสุดของแต่ละรอบการคำนวณ	
R	แรงกระทำจากภายนอกของระบบรวม	
V	ปริมาตรของชิ้นงาน	m^3
W	ตำแหน่งใด ๆ บนชิ้นงาน	
X_i, Y_i	พิกัด โหนดที่มุมของอิเลิเมนต์	m
χ_{BEZ}	เมตริกซ์เบซิเออร์	
χ_{B1}, χ_{B2}	เมตริกซ์บี-สไปไลน์	
κ	พารามิเตอร์ควบคุมการลู่เข้าของคำตอบ	
ε_s	ค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้	%
σ_{VM}	ความเค้น von Mises	N/m^2
σ_x	ความเค้นนอร์มัลในแนวแกน x	N/m^2
σ_y	ความเค้นนอร์มัลในแนวแกน y	N/m^2
$(\sigma)_M$	ความเค้นที่ตำแหน่ง M	N/m^2
τ_{xy}	ความเค้นเฉือนที่ตั้งฉากกับแกน x และมีทิศทางตามแกน y	N/m^2

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ν	อัตราส่วนปัวซอง	
ω	ลำดับรอบการคำนวณของการอพยพไมซ์	
ξ, η	ระบบพิกัดธรรมชาติ	
ψ	พารามิเตอร์ของเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์	
ψ_1, ψ_2	พารามิเตอร์ของเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์ที่มุมของขอบอิลิเมนต์	