

บทที่ 4

ผลและการวิจารณ์

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่กล่าวมาในตอนต้น คือ เพื่อศึกษาความแม่นยำของการออปติไมซ์รูปร่าง โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์แสดงขอบโค้งของชิ้นงาน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงผลและการวิจารณ์การวิจัยโดยทำการออปติไมซ์ชิ้นงานตัวอย่างจำนวนสี่ตัวอย่าง ในแต่ละตัวอย่างจะแสดงผลการคำนวณทั้งการออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์แสดงขอบชิ้นงานบริเวณขอบโค้งที่ต้องการออกแบบและทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเส้นขอบทั้งสอง

4.1 การออกแบบขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างจะรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน

4.1.1 โมเดลและการวิเคราะห์

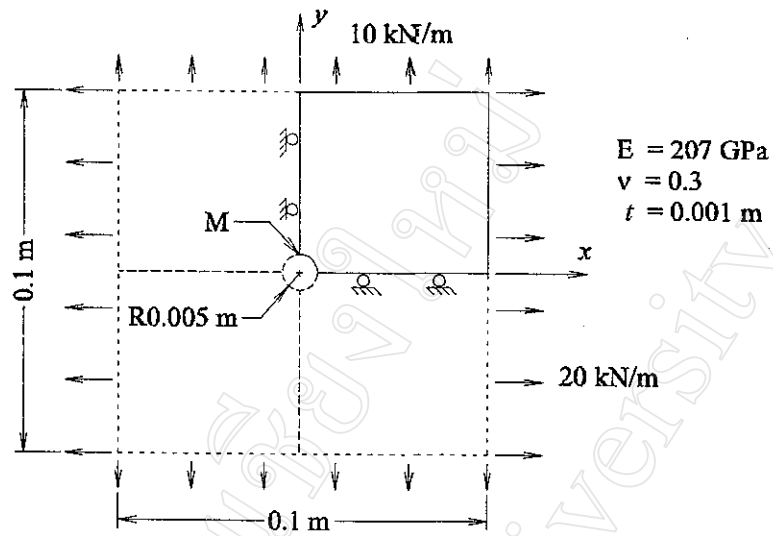
การออกแบบชิ้นงานเบื้องต้นเป็นการวิเคราะห์แผ่นกว้างสี่เหลี่ยมขนาด 0.1×0.1 ตารางเมตร หนา 0.001 เมตร และเจาะรูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เมตรตรงกลางแผ่น ชิ้นงานดังกล่าวทำจากวัสดุที่มีค่าโมดูลัสของยังค 207 GPa และมีอัตราส่วนปัวซอง 0.3 ภาระแรงที่กระทำเป็นแรงดึงกระจายกระทำด้านข้างของขอบชิ้นงานทั้งสองด้านในแนวแกนและมีสัดส่วนเป็นสองเท่าซึ่งกันและกัน โดยตัวอย่างการคำนวณนี้กำหนดให้แรงดึงกระจายมีขนาด 20 kN ต่อเมตร และ 10 kN ต่อเมตรตามลำดับ

การวิเคราะห์ชิ้นงานจะทำการสร้างโมเดลทางไฟไนต์อิลิเมนต์ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.1 เนื่องจากชิ้นงานวิเคราะห์มีลักษณะสมมาตรทั้งสองด้านของแนวแกน ดังนั้นการวิเคราะห์จะเลือกวิเคราะห์เพียงหนึ่งในสี่ส่วนของชิ้นงาน โดยกำหนดเงื่อนไขที่ขอบสมมาตรเป็นการเลื่อนแบบถูกกึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และสร้างโมเดลทางไฟไนต์อิลิเมนต์โดยแบ่งชิ้นงานวิเคราะห์ดังกล่าวออกเป็นหกอิลิเมนต์และมีโหนดที่มุมอิลิเมนต์ 12 โหนดดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข) ลำดับของโหนดที่มุมอิลิเมนต์หนึ่งถึงหกคือ 2-6-5-1, 3-7-6-2, 4-8-7-3, 6-10-9-5, 7-11-10-6 และ 8-12-11-7 ตามลำดับ การกำหนดลักษณะเส้นขอบของอิลิเมนต์แบ่งเป็นสองชนิด ได้แก่ เส้นขอบอิลิเมนต์ที่เป็นขอบตรง และเส้นขอบอิลิเมนต์ที่เป็นขอบโค้ง โดยเส้นขอบอิลิเมนต์ที่เป็นขอบโค้งและไม่ใช่ขอบที่ทำการออกแบบจะกำหนดเส้นขอบโค้งนี้ด้วยเส้นขอบวงกลม และสำหรับขอบโค้งที่ทำการออกแบบจะกำหนดเส้นขอบโค้งด้วยเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์ด้วยวิธีการ

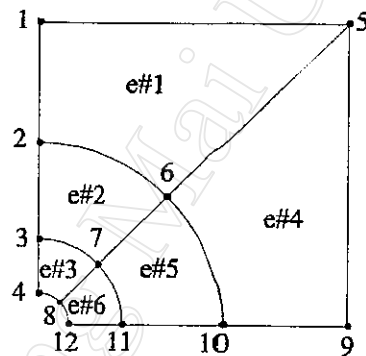
แมปอิลิเมนต์ระหว่างระบบพิกัดคาร์ทีเซียนและระบบพิกัดธรรมชาติโดยใช้วิธีฟังก์ชันเบลนดัดตั้งดัง
ได้อธิบายในหัวข้อ 2.8

การวิเคราะห์ชิ้นงานนี้จะใช้เส้นขอบเบซิเอร์กำลังสี่และเส้นขอบบี-สไปไลน์กำลัง
สามที่สร้างจากจุดควบคุมจำนวนห้าจุด ได้แก่ c_0 , c_1 , c_2 , c_3 และ c_4 การกำหนดตำแหน่งของจุด
ควบคุมของชิ้นงานเริ่มต้นกำหนดให้แนวเชื่อมต่อของจุดควบคุม c_0 กับ c_1 และแนวเชื่อมต่อของจุด
ควบคุม c_3 กับ c_4 ตั้งฉากกับเส้นขอบสมมาตรเพื่อให้ขอบโค้งมีความต่อเนื่องอย่างสมบูรณ์ที่ขอบ
สมมาตร วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ p เออร์ชันจะใช้กำลัง p เริ่มต้นที่มีค่าไม่น้อยกว่า
กำลังของโพลีโนเมียลที่ใช้แสดงขอบของชิ้นงาน ดังนั้นการวิเคราะห์จะใช้กำลัง p เริ่มต้นเท่ากับสี่
และสามสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเส้นขอบเบซิเอร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์ตามลำดับ โดยกำลัง p
สูงสุดที่ใช้ในการวิเคราะห์คือกำลัง p เท่ากับแปด

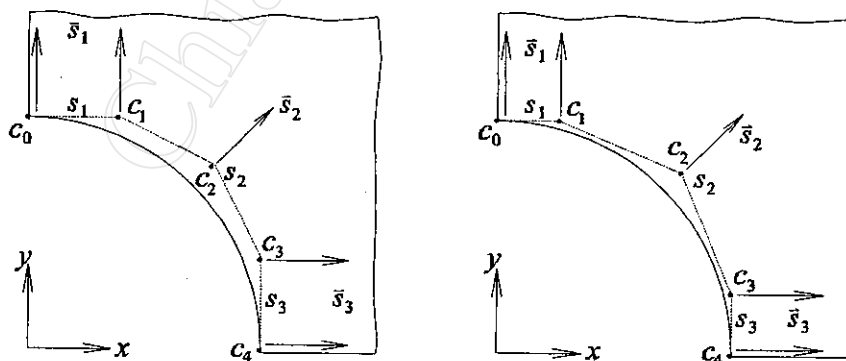
การออฟทิมิซชิ้นงานกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความเค้น von Mises ที่
คำนวณ ณ ตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นมากที่สุดของชิ้นงานเริ่มต้น โดยมีเงื่อนไขคอนสเตรนซ์ของการ
ออฟทิมิซ ได้แก่ ค่าความเค้น von Mises มากสุดของแต่ละรอบการคำนวณมีค่าลดลงดังสมการ
(2.12) โดยกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมการเข้าสู่ของคำตอบ () มีค่าเท่ากับ 0.85 และการกำหนด
ให้ปริมาตรของชิ้นงานมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณเพื่อจำกัดขนาดของรูเนื่องจากความเค้นในชิ้นงาน
จะมีค่าน้อยสุดและมีค่าเท่ากับความเค้นปกติในชิ้นงานเมื่อชิ้นงานไม่มีรู จากการคำนวณทางทฤษฎี
ดังแสดงในภาคผนวก ก พบว่าตำแหน่งบนชิ้นงานที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดคือตำแหน่ง
 M ในรูปที่ 4.1(ก) ตัวแปรออกแบบของการออฟทิมิซมีสามตัวแปร ได้แก่ s_1 , s_2 และ s_3 ซึ่งเป็น
ตำแหน่งพิกัดของจุดควบคุม c_0 กับ c_1 , c_2 และ c_3 กับ c_4 โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแปร
ออกแบบ , และ ทำมุม 90° , 45° และ 0° เทียบกับแกน ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาตาม
ลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.1(ค) และ 4.1(ง) การกำหนดตัวแปรออกแบบ s_1 และ s_3 เป็นตำแหน่งพิกัด
ของจุดควบคุมจำนวนสองจุด ซึ่งจุดควบคุมทั้งสองจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกันเนื่องจากต้องการรักษา
ความต่อเนื่องของขอบรูที่ขอบสมมาตร การคำนวณการออฟทิมิซจะทำการคำนวณทั้งหมด 15
รอบเพื่อตรวจสอบการเข้าสู่ของคำตอบ โดยรูปร่างชิ้นงานที่รอบการคำนวณที่มีค่าความเค้น von Mises
มากที่สุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นของการวิเคราะห์ด้วยแต่ละกำลัง p จะนำมาวิเคราะห์ใหม่ด้วย
กำลัง p เท่ากับแปดเพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้น von Mises ของรูปร่างชิ้นงานสุดท้ายด้วยกำลัง p
และจำนวนองศาอิสระที่เท่ากัน



(ก) หนึ่งในสี่ส่วนของชิ้นงานวิเคราะห์และเงื่อนไขที่ขอบ



(ข) โมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์



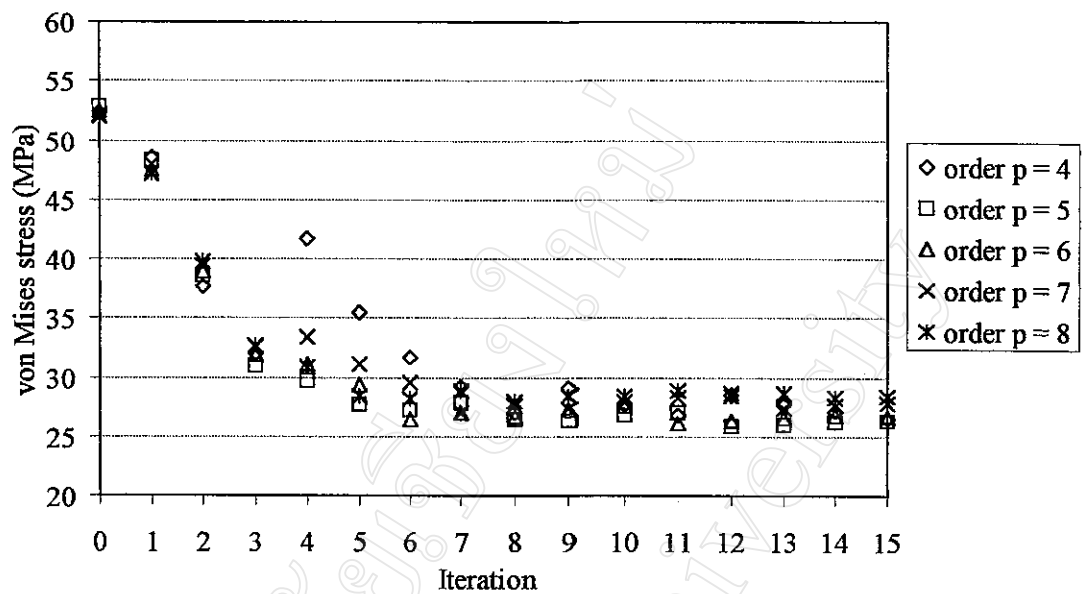
(ค) ตำแหน่งจุดควบคุม และตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบของเส้นขอบเบซิเอร์(ซ้าย) และเส้นขอบบี-สไปไลน์(ขวา)

รูปที่ 4.1 รูปร่างชิ้นงานและรูปแบบวิธีการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน

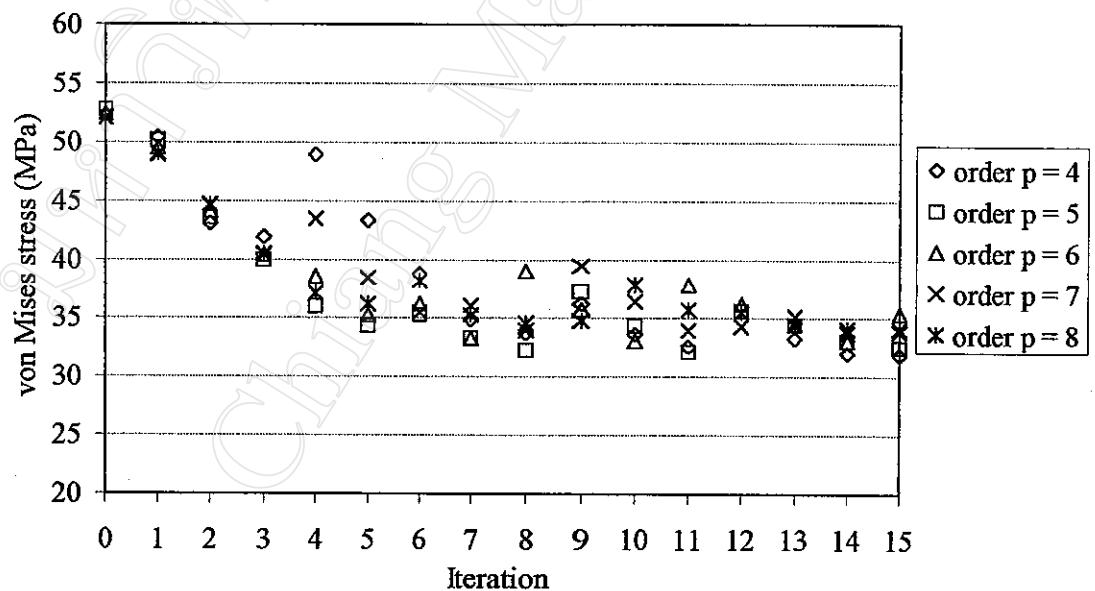
4.1.2 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์แสดงขอบโค้งของรู

ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือค่าความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ของการออฟทิมซ์จำนวน 15 รอบการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยทุกกำลัง p ให้ค่าความเค้นที่ตำแหน่ง M ลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ที่ใกล้เคียงกันในช่วง 25-30 MPa แสดงว่าการคำนวณมีการเข้าสู่ของคำตอบที่แน่นอน สำหรับค่าความเค้น von Mises มากสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานของแต่ละรอบการคำนวณซึ่งถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขคอนสเตรนท์ โดยตำแหน่งบนชิ้นงานที่เกิดความเค้นมากที่สุดจะเปลี่ยนไปทุกรอบการคำนวณ ค่าความเค้นดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าความเค้นมากสุดของการวิเคราะห์ด้วยทุกกำลัง p มีค่าลดลงและมีการเข้าสู่เช่นเดียวกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขคอนสเตรนท์ให้ความเค้น von Mises มีค่าลดลงและน้อยกว่าค่าความเค้นมากสุดในรอบการคำนวณนั้นๆ แต่การเข้าสู่ของคำตอบจะมีการแกว่งของข้อมูลเกิดขึ้นเนื่องจากในแต่ละรอบการคำนวณตำแหน่งที่คำนวณความเค้น von Mises มากสุดเปลี่ยนแปลงตลอดการคำนวณ

เมื่อนำข้อมูลในรูปที่ 4.3 มาวิเคราะห์เพื่อหารูปร่างชิ้นงานที่มีความเค้นมากสุดต่ำสุดของทุกกำลัง p โดยจะนำรูปร่างชิ้นงานในรอบการคำนวณที่มีความเค้นมากสุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นของแต่ละกำลัง p มาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปด ค่าความเค้นหลังการคำนวณแสดงดังตาราง 4.1 พบว่า ความเค้นมากสุดของชิ้นงานมีค่าน้อยสุดเมื่อออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และมีค่ามากที่สุดเมื่อออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปด แต่เมื่อนำรูปร่างชิ้นงานดังกล่าวมาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดพบว่า การออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดให้รูปร่างที่มีความเค้นต่ำสุดและมีค่าเท่ากับ 34.1 MPa ในขณะที่การออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p น้อยลงจะให้ความเค้นที่มีค่าสูงขึ้นโดยการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่ให้รูปร่างชิ้นงานที่มีความเค้นเท่ากับ 38.8 MPa ทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ความเค้นภายในชิ้นงานด้วยกำลัง p ที่สูงกว่าจะให้คำตอบที่ถูกต้องมากขึ้นและพบว่าการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกถึงแปดจะให้รูปร่างของชิ้นงานที่มีความเค้น von Mises ต่ำสุดโดยมีค่าเท่ากับ 34.4, 34.1 และ 34.1 MPa ตามลำดับหรือมีค่าลดลง 32.3, 34.5 และ 34.5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การออฟทิมซ์ด้วยทุกกำลัง p สามารถลดค่าความเค้นสูงสุดบนชิ้นงานได้และทำให้การกระจายความเค้นด้านสูงมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากขึ้น โดยก่อนการออฟทิมซ์ ชิ้นงานจะมีการกระจายของความเค้นด้านสูงหนาแน่นบริเวณตำแหน่ง M ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) ซึ่งหลังจากการออฟทิมซ์แล้วความเค้นหนาแน่นรอบขอบรูมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข) ถึง 4.4(ค)



รูปที่ 4.2 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง $p^{\dagger}$ เท้ากับสี่ถึงแปดโดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์
สำหรับการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน



รูปที่ 4.3 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท้ากับสี่ถึงแปดโดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์สำหรับ
การวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน

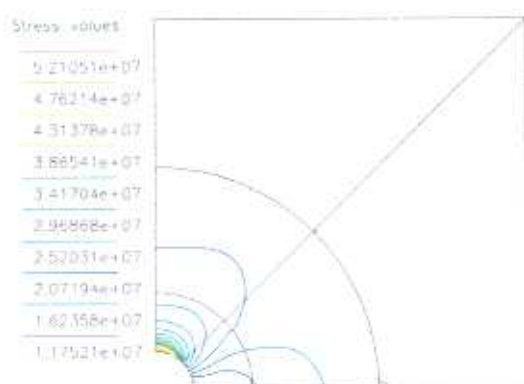
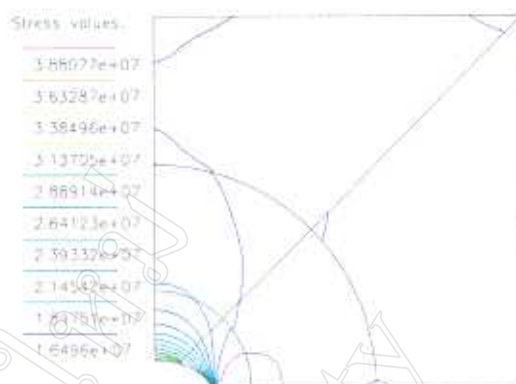
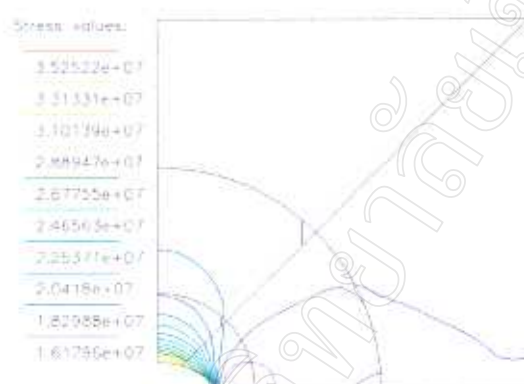
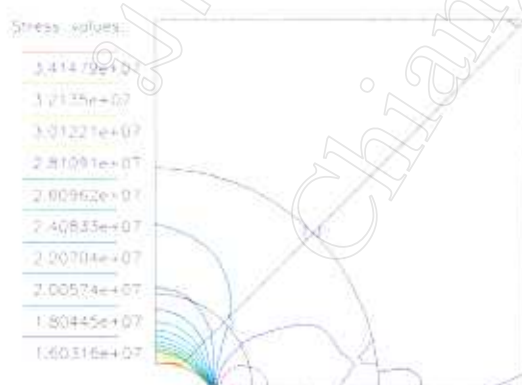
[†] กำลัง p หมายถึงกำลังโพลิโนเมียลของฟังก์ชันพื้นฐานของวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชัน

ตาราง 4.1 ความเค้น von Mises ภายหลังการอพทไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของการวิเคราะห์
แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน

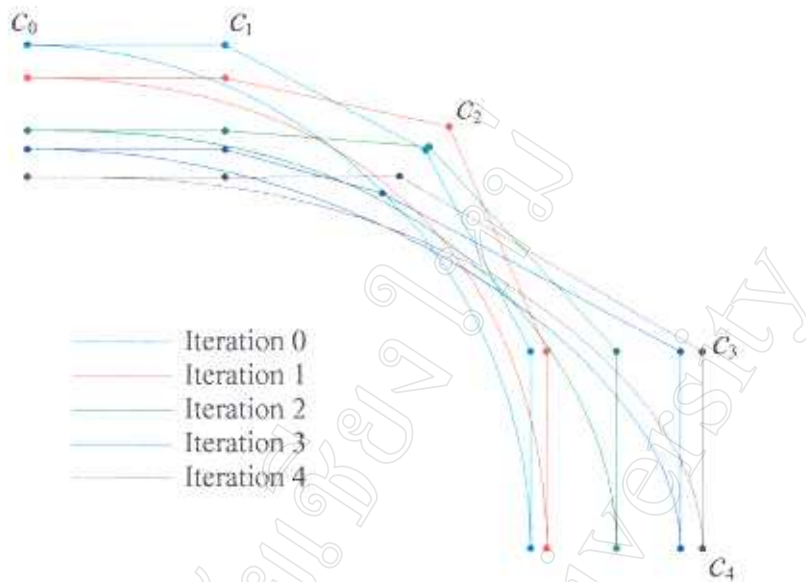
กำลัง p	ความเค้น von Mises (MPa) มากสุด		จำนวนรอบ การคำนวณ	ความเค้น von Mises ที่ $p = 8$ (MPa)
	ก่อนการวิเคราะห์	ค่าต่ำสุด		
4	52.3	31.9	15	38.8
5	52.8	32.2	11	35.3
6	52.4	33.1	10	34.4
7	52.0	33.8	14	34.1
8	52.1	34.1	15	-

รูปร่างขอบโค้งของชิ้นงานที่รอบการคำนวณศูนย์ถึงสี่ของการอพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าการคำนวณในรอบการคำนวณหนึ่งและสองนั้นรูปร่างขอบโค้งจะเปลี่ยนแปลงไปมากและในรอบการคำนวณถัดไปรูปร่างขอบโค้งจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเข้าสู่ของคำตอบของการอพทไมซ์เป็นอย่างดี และสำหรับการอพทไมซ์ด้วยกำลัง p อื่นก็มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขอบโค้งเช่นเดียวกับการอพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปด รูปร่างขอบโค้งสุดท้ายของการอพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปดแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่ารูปร่างขอบโค้งสุดท้ายของการอพทไมซ์มีรูปร่างขอบโค้งคล้ายขอบโค้งวงรีและมีรูปร่างขอบโค้งที่ใกล้เคียงกัน

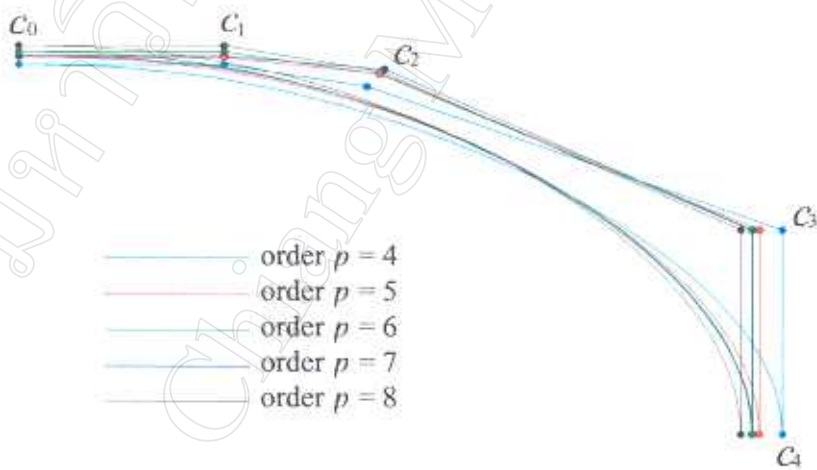
รูปร่างสุดท้ายของการอพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดได้นำไปเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความเค้น von Mises มากสุดบนชิ้นงานและลักษณะการกระจายความเค้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการแสดงเส้นขอบด้วยเส้นขอบเบซิเออร์ในวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชันโดยใช้อีลิเมนต์จำนวน 21515 อีลิเมนต์และมืองศาอิสระของการคำนวณเท่ากับ 43706 องศาอิสระ ซึ่งพบว่าค่าความเค้น von Mises มากสุดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันมีค่าแตกต่างกันไป 2.3 เปอร์เซ็นต์และมีลักษณะการกระจายเส้นระดับความเค้นที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.7

(ก) ชิ้นงานเริ่มต้นโดยวิเคราะห์ด้วยกำลัง $p=8$ (ข) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=4$ (ค) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=5$ (ง) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=6$ (จ) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=7$ (ฉ) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=8$

รูปที่ 4.4 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์ของแผ่นกว้าง
เจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน



รูปที่ 4.5 รูปร่างขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกนที่รอบการคำนวณ ศูนย์ถึงสี่ของการอพทไมซ์ด้วยกำลัง $p = 8$

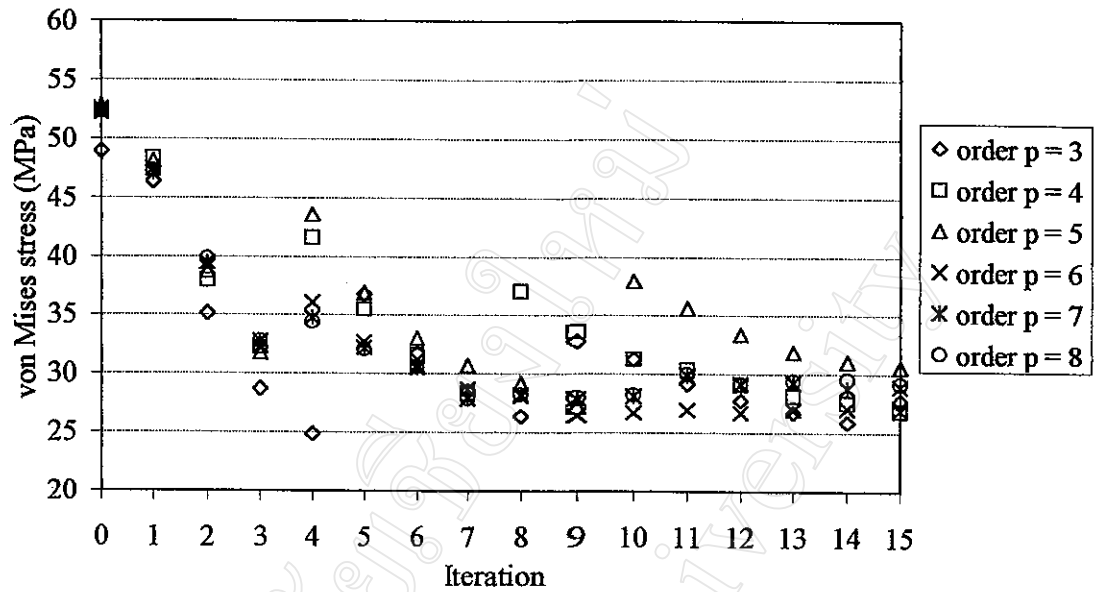


รูปที่ 4.6 รูปร่างขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกนภายหลัง การอพทไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์

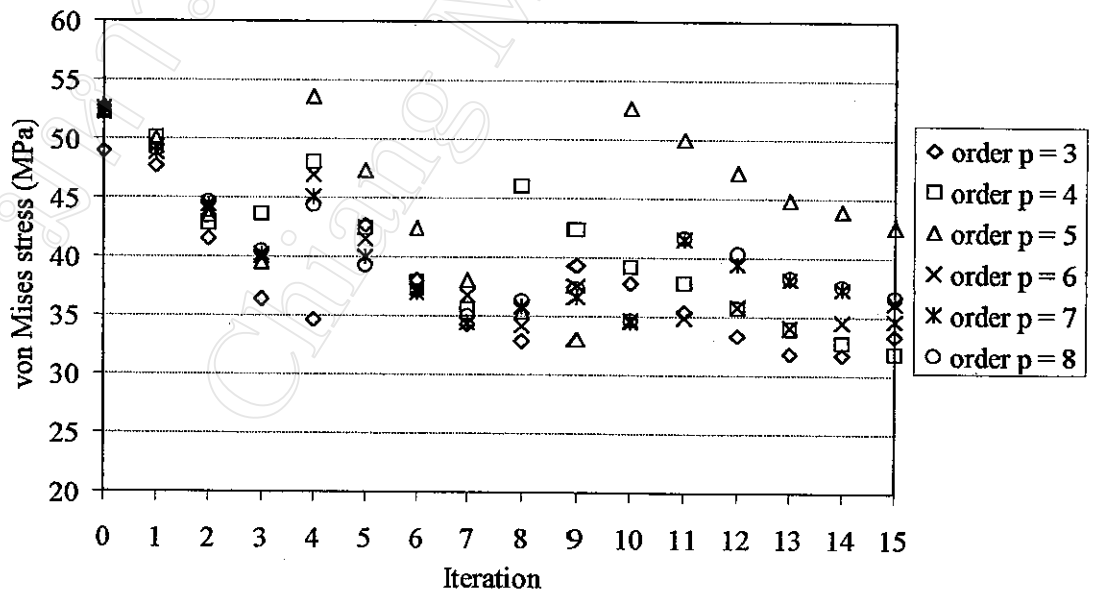
4.1.3 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบบี-สโพล์แสดงขอบโค้งงอ

ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ของการออฟทิมซ์จำนวน 15 รอบการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยทุกกำลัง p ให้ความเค้นที่ตำแหน่ง M อยู่เข้าสู่ค่าคงที่ โดยการวิเคราะห์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และห้าพบว่าค่าความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นก่อนที่จะมีการลู่เข้าของคำตอบ ค่าความเค้น von Mises มากสุดภายในชิ้นงานของแต่ละรอบการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าความเค้นมากสุดของการวิเคราะห์ด้วยทุกกำลัง p มีค่าลดลงเหมือนกัน แต่การลู่เข้าของคำตอบจะมีการแกว่งของข้อมูลเกิดขึ้นมาก และจากข้อมูลในรูปที่ 4.9 จะนำรูปร่างชิ้นงานของรอบการคำนวณที่มีความเค้นมากสุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นของแต่ละกำลัง p มาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยค่าความเค้นที่ได้หลังการคำนวณแสดงดังตาราง 4.2 พบว่าการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสามและสี่จะให้ค่าความเค้น von Mises มากสุดมีค่าต่ำกว่าการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p ที่สูงขึ้น แต่เมื่อนำรูปร่างชิ้นงานดังกล่าวมาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดพบว่าให้ค่าความเค้นที่สูงกว่าการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับห้าถึงแปด โดยการออฟทิมซ์ที่กำลัง p เท่ากับเจ็ดและแปดให้รูปร่างชิ้นงานหลังการออฟทิมซ์ที่มีความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 34.8 และ 34.6 MPa หรือมีค่าลดลง 33.5 และ 33.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ดี การออฟทิมซ์ด้วยทุกกำลัง p สามารถลดค่าความเค้นสูงสุดบนชิ้นงานได้ โดยเส้นระดับความเค้นของชิ้นงานก่อนการออฟทิมซ์และหลังการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสามถึงแปดแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าการกระจายความเค้นด้านสูงของการออฟทิมซ์ด้วยทุกกำลัง p มีค่าสม่ำเสมอมากขึ้น

รูปร่างขอบโค้งสุดท้ายของการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสามถึงแปดแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า รูปร่างขอบโค้งสุดท้ายของการออฟทิมซ์มีรูปร่างขอบโค้งคล้ายขอบโค้งวงรีโดยการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับห้าถึงแปดให้รูปร่างขอบโค้งที่ใกล้เคียงกันซึ่งสอดคล้องกับความเค้นของรูปร่างชิ้นงานสุดท้ายดังแสดงในตาราง 4.2



รูปที่ 4.8 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสามถึงแปด โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์
สำหรับการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงค้ำด้านข้างในแนวแกน

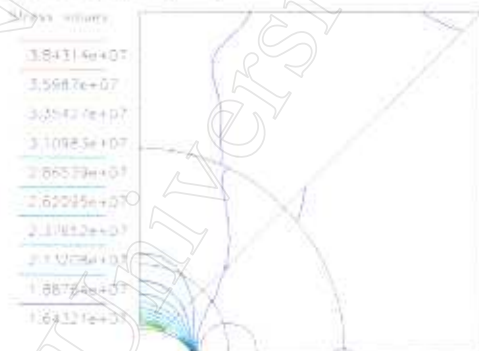
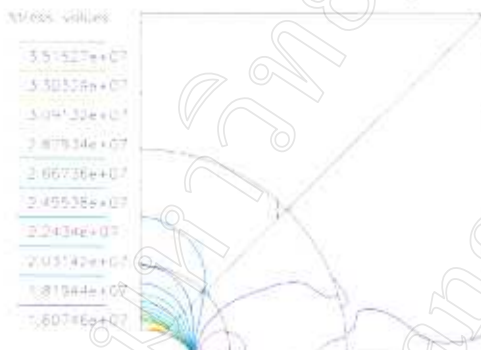
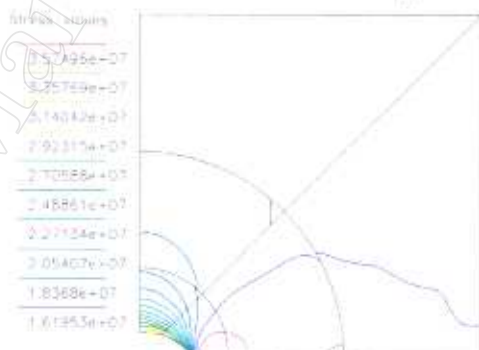
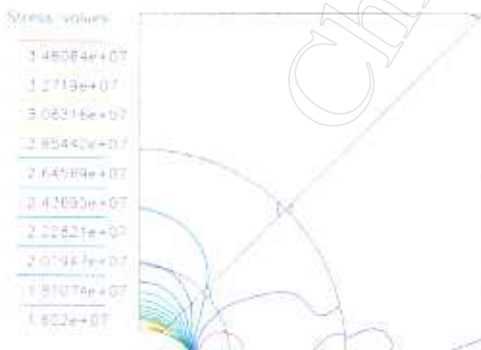
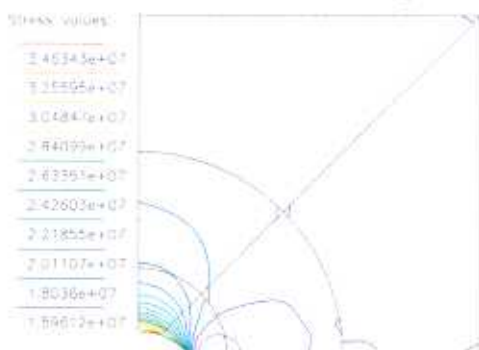


รูปที่ 4.9 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับสามถึงแปด โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์
สำหรับการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงค้ำด้านข้างในแนวแกน

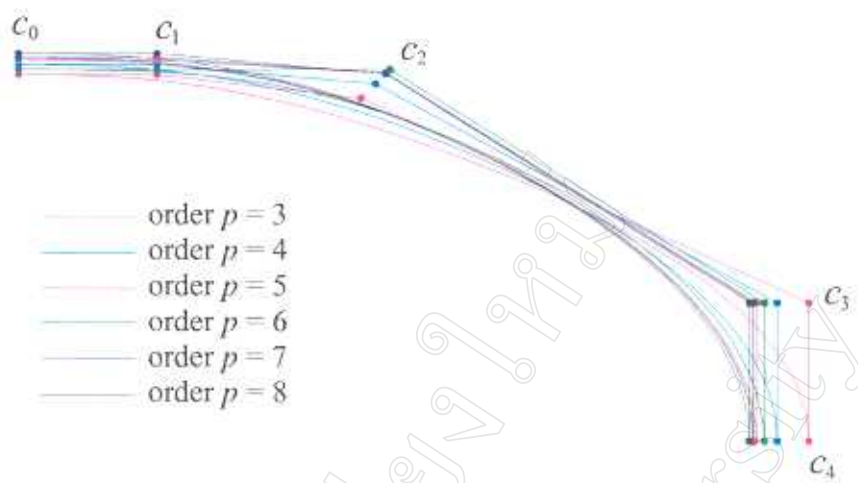
ตาราง 4.2 ความเค้น von Mises ภายหลังการอพทิมัธโดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ของการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงคังด้านข้างในแนวแกน

กำลัง p	ความเค้น von Mises (MPa) มากสุด		จำนวนรอบการคำนวณ	ความเค้น von Mises ที่ $p = 8$ (MPa)
	ก่อนการวิเคราะห์	ค่าต่ำสุด		
3	48.9	31.8	14	43.4
4	52.2	31.8	15	38.4
5	52.8	33.0	9	35.2
6	52.5	34.1	13	35.7
7	52.2	34.4	7	34.8
8	52.3	34.6	10	-

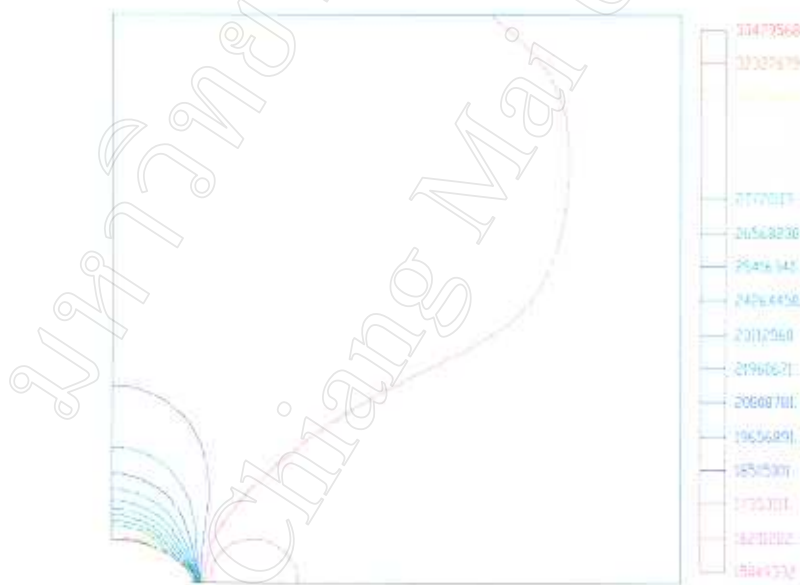
รูปร่างชิ้นงานของการอพทิมัธด้วยกำลัง p เท่ากับแปดได้นำไปเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความเค้น von Mises มากสุดบนชิ้นงานและลักษณะการกระจายความเค้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชันโดยใช้อีลิเมนต์จำนวน 21544 อีลิเมนต์และมืองศาอิสระของการคำนวณเท่ากับ 43770 องศาอิสระ ซึ่งพบว่าค่าความเค้น von Mises มากสุดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันมีค่าแตกต่างไป 7.1 เปอร์เซนต์และมีลักษณะการกระจายเส้นระดับความเค้นที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.12

(ก) ชิ้นงานเริ่มต้นโดยวิเคราะห์ด้วยกำลัง $p=8$ (ข) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=3$ (ค) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=4$ (ง) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=5$ (จ) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=6$ (ฉ) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=7$ (ช) หลังการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง $p=8$

รูปที่ 4.10 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สโพล์ของแผ่นกวี้งเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน

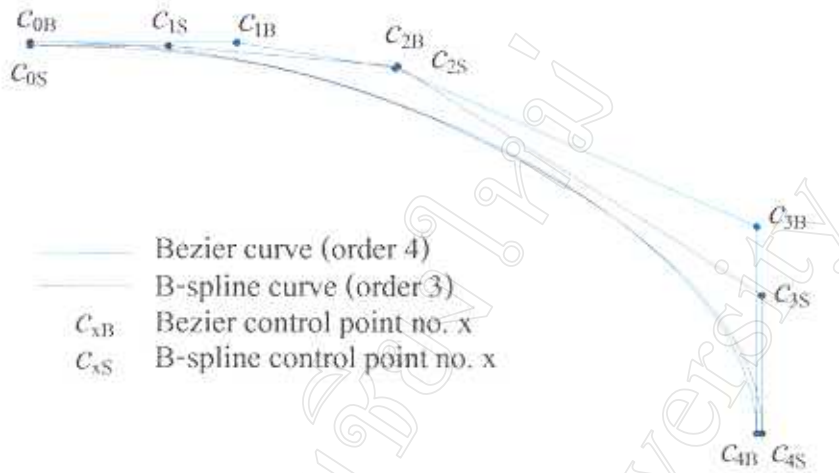


รูปที่ 4.11 รูปร่างขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกนภายหลังการอพติไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไพลน์



รูปที่ 4.12 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่อพติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยใช้เส้นขอบบี-สไพลน์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน

4.1.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบรูปร่างขอบโค้งของการอพทที่ไม่ซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และบี-สไปไลน์
สำหรับการวิเคราะห์แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน

การอพทที่ไม่ซ์รูปร่างขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน พบว่า การอพทที่ไม่ซ์ชิ้นงาน โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์จะให้รูปร่างชิ้นงานที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 34.1 MPa หรือมีค่าลดลง 34.5 เปอร์เซ็นต์โดยใช้การวิเคราะห์ที่กำกับ p เท่ากับแปด และสำหรับการอพทที่ไม่ซ์ชิ้นงาน โดยใช้เส้นขอบบี-สไปไลน์พบว่าจะให้รูปร่างชิ้นงานที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 34.6 MPa หรือมีค่าลดลง 33.8 เปอร์เซ็นต์โดยใช้การวิเคราะห์ที่กำกับ p เท่ากับแปด การลดลงของความเค้นที่ตำแหน่งมากสุดของชิ้นงานเริ่มต้น พบว่า การอพทที่ไม่ซ์โดยใช้เส้นขอบทั้งสองชนิดมีแนวโน้มการลดลงที่เหมือนกันแม้ว่าเส้นขอบบี-สไปไลน์ที่ใช้จะมีกำกับของโพลิโนเมียลน้อยกว่าเส้นขอบเบซิเออร์ก็ตาม

รูปร่างเส้นขอบของชิ้นงานสุดท้ายของการอพทที่ไม่ซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์ที่วิเคราะห์ด้วยกำกับ p เท่ากับแปดแสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า การอพทที่ไม่ซ์ด้วยเส้นขอบทั้งสองชนิดจะให้รูปร่างเส้นขอบของชิ้นงานมีรูปร่างที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นการอพทที่ไม่ซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์หรือเส้นขอบบี-สไปไลน์ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ขอบโค้งของรูของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน

4.2 การออกแบบขอบโค้งของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดแตกต่างกัน

4.2.1 โมเดลและวิธีการวิเคราะห์

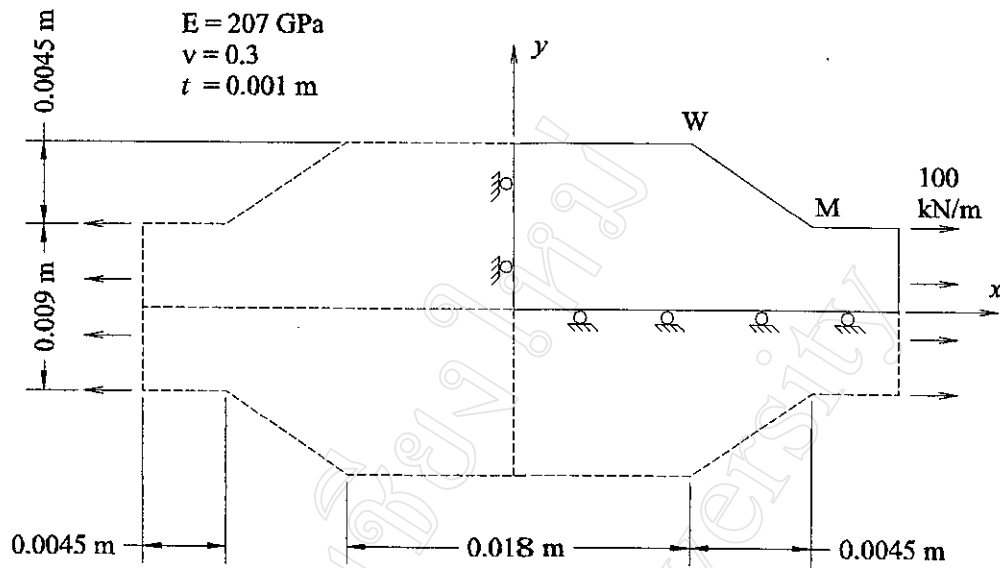
แผ่นรับแรงดึงที่มีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกันโดยมีความกว้างของปลายหน้าตัดด้านแคบ 0.009 เมตร ความกว้างของหน้าตัดด้านกว้าง 0.018 เมตร และหนา 0.001 เมตรเท่ากันตลอดชิ้นงาน โดยขอบเชื่อมต่อระหว่างหน้าตัดเป็นขอบตรง ชิ้นงานดังกล่าวทำจากวัสดุที่มีค่าโมดูลัสของยังค 207 GPa และมีอัตราส่วนปัวซอง 0.3 การกระทำเป็นแรงดึงกระจายกระทำด้านข้างของขอบชิ้นงานเพียงด้านเดียวขนาด 100 kN ต่อเมตร

การสร้างโมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์มีรูปแบบชิ้นงานดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.14 เนื่องจากชิ้นงานวิเคราะห์มีลักษณะสมมาตร ดังนั้นการวิเคราะห์จะเลือกวิเคราะห์เพียงหนึ่งในสี่ส่วนของชิ้นงาน โดยกำหนดเงื่อนไขที่ขอบสมมาตรเป็นการเลื่อนแบบถูกกึ่งดังแสดงในรูปที่ 4.14(ก) การสร้างโมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์จะแบ่งชิ้นงานวิเคราะห์ออกเป็นหกอีลิเมนต์และมีโหนดที่มุมอีลิเมนต์ 14 โหนดดังแสดงในรูปที่ 4.14(ข) ลำดับของโหนดที่มุมอีลิเมนต์หนึ่งถึงหกคือ 1-2-13-14, 2-3-12-13, 3-4-11-12, 4-5-10-11, 5-6-9-10 และ 6-7-8-9 ตามลำดับ การกำหนดลักษณะเส้นขอบ WM ซึ่งเป็นขอบที่ทำการออกแบบจะกำหนดเส้นขอบด้วยเส้นขอบเบซิเอร์และเส้นขอบบี-สไปรอน์โดยเส้นขอบของชิ้นงานเริ่มต้นเป็นขอบตรง

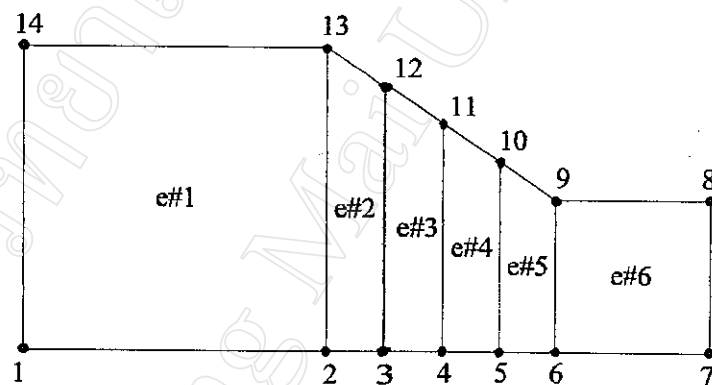
การวิเคราะห์ชิ้นงานนี้ใช้เส้นขอบเบซิเอร์กำลังห้าและเส้นขอบบี-สไปรอน์กำลังสี่ที่สร้างจากจุดควบคุมจำนวนหกจุดได้แก่ c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 และ c_5 และเนื่องจากชิ้นงานเริ่มต้นมีขอบ WM เป็นขอบตรงดังนั้นการกำหนดตำแหน่งของจุดควบคุมของชิ้นงานเริ่มต้นกำหนดให้แนวเชื่อมต่อของจุดควบคุมทั้งหมดอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันจะใช้กำลัง p เริ่มต้นที่มีค่าไม่น้อยกว่ากำลังของโพลิโนเมียลที่ใช้แสดงขอบของชิ้นงาน ดังนั้นการวิเคราะห์จะใช้กำลัง p เริ่มต้นเท่ากับห้าและสี่สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเส้นขอบเบซิเอร์และเส้นขอบบี-สไปรอน์ตามลำดับ กำลัง p สูงสุดที่ใช้ในการวิเคราะห์คือกำลัง p เท่ากับแปด

การอพทิมัซชิ้นงานกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความเค้น von Mises ที่คำนวณที่ตำแหน่ง M ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเค้นมากที่สุดของชิ้นงานเริ่มต้น โดยมีเงื่อนไขคอนสเตรนธ์ของการอพทิมัซ คือ การกำหนดให้ความเค้น von Mises มากสุดของแต่ละรอบการคำนวณมีค่าลดลงดังสมการ (2.12) โดยกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมการเข้าสู่ของคำตอบ (κ) มีค่าเท่ากับ 0.85 ในการอพทิมัซชิ้นงานนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขคอนสเตรนธ์ของปริมาตรของชิ้นงานเนื่องจากปลายของขอบ WM ถูกกำหนดให้อยู่ที่ตำแหน่งเดิมจึงไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของขอบโค้ง ตัวแปรออกแบบของการอพทิมัซนี้มีสี่ตัวแปร ได้แก่ s_1, s_2, s_3 และ s_4 ซึ่งเป็นตำแหน่งพิกัดของจุดควบคุม c_1, c_2, c_3 และ c_4 โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบ $\bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_3$

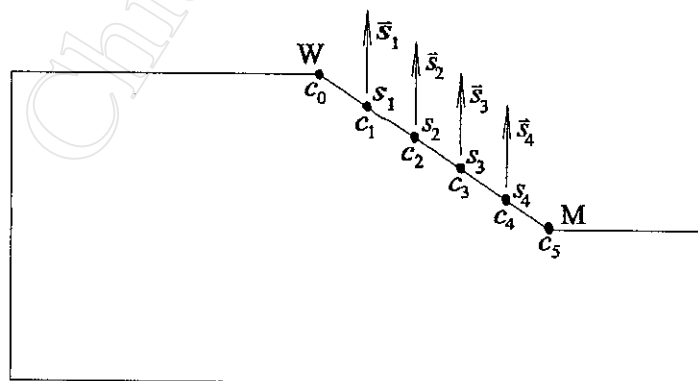
และ $\bar{r}_4$ ทำมุม 90° กับแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาดังแสดงในรูปที่ 4.14(ค) การคำนวณการ
 ออฟทีไมซ์จะใช้การคำนวณทั้งหมด 15 รอบเพื่อตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบ โดยรูปร่างชิ้นงานที่
 รอบการคำนวณที่ให้มีความเค้น von Mises มากสุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นของการวิเคราะห์ด้วย
 แต่ละกำลัง p จะนำมาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดเพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้น von Mises
 ของรูปร่างชิ้นงานสุดท้ายด้วยกำลัง p และจำนวนองศาอิสระที่เท่ากัน



(ก) หนึ่งในสี่ส่วนของชิ้นงานวิเคราะห์และเงื่อนไขที่ขอบ



(ข) โมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์



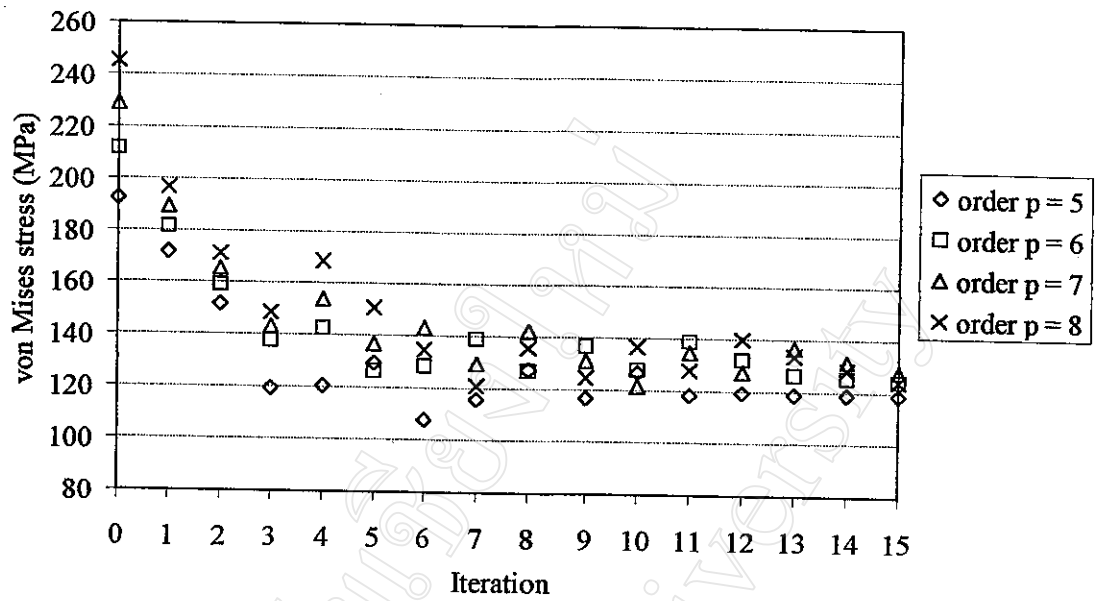
(ค) ตำแหน่งของจุดควบคุม และตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบ
รูปที่ 4.14 รูปร่างชิ้นงานและรูปแบบวิธีการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

4.2.2 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์แสดงขอบโค้งของชิ้นงาน

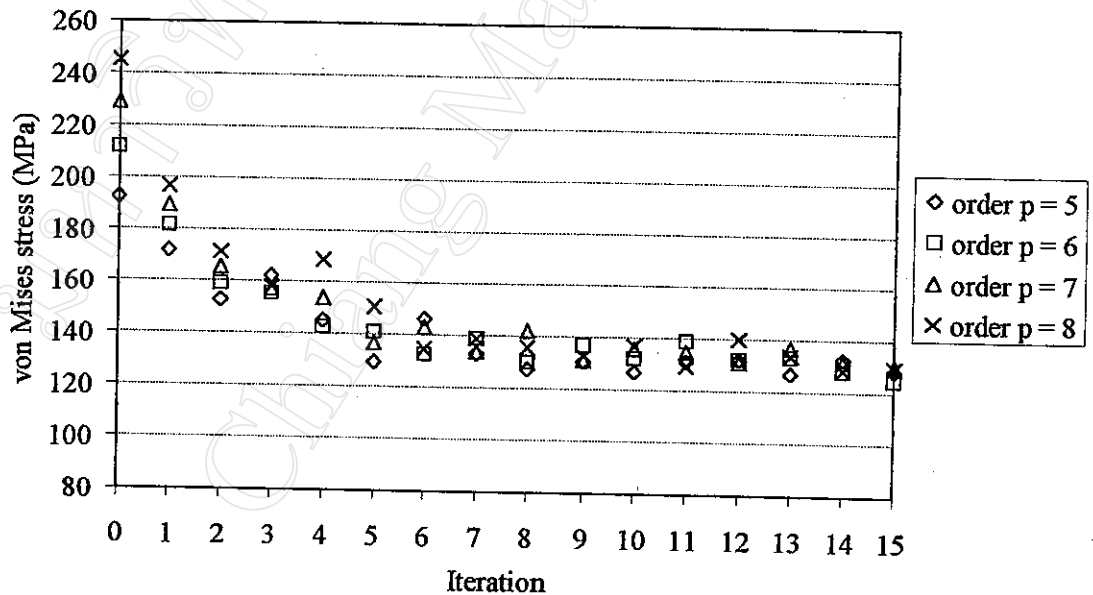
ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ของการออฟทิมซ์จำนวน 15 รอบการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยทุกกำลัง p ให้ความเค้นที่ตำแหน่ง M มีค่าลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ ในขณะที่เดียวกันค่าความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานที่แต่ละรอบการคำนวณมีค่าลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และพบว่าความเค้นที่ตำแหน่ง M มีค่าใกล้เคียงกับความเค้นมากสุดของแต่ละรอบการคำนวณ โดยที่ตำแหน่ง M เป็นตำแหน่งที่เกิดความเค้นมากสุดของชิ้นงานเริ่มต้น และเมื่อนำรูปร่างชิ้นงานของรอบการคำนวณที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นของแต่ละกำลัง p มาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปด โดยรายละเอียดแสดงดังตาราง 4.3 พบว่า การออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับห้าถึงแปดจะให้รูปร่างที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 128.6, 126.0, 130.9 และ 128.6 MPa หรือมีค่าลดลง 47.6, 48.7, 46.7 และ 47.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยมีค่าความเค้นหนาแน่นเท่ากับ 1.29, 1.26, 1.31 และ 1.29 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกให้ค่าความเค้นมากสุดของรูปร่างชิ้นงานที่มีค่าต่ำสุด อย่างไรก็ตาม พบว่าการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับห้าถึงแปดให้ค่าความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานที่มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น กำลัง p ไม่มีผลต่อการออฟทิมซ์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกันโดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์แสดงขอบโค้งของชิ้นงาน

เส้นระดับความเค้นของรูปร่างชิ้นงานก่อนการออฟทิมซ์และหลังการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับห้าถึงแปดแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าการกระจายความเค้นของรูปร่างก่อนการออฟทิมซ์มีการกระจายของความเค้นด้านสูงหนาแน่นที่ตำแหน่ง M ซึ่งเป็นตำแหน่งขอบหักของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.17(ก) ในขณะที่หลังการออฟทิมซ์พบว่ามีการกระจายความเค้นด้านสูงมีการกระจายสม่ำเสมอมากขึ้นและมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.17(ข) ถึง 4.17(จ) โดยรูปร่างขอบโค้งของการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับห้าถึงแปดแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าตำแหน่งของจุดควบคุมอยู่ตำแหน่งที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามรูปร่างขอบโค้งของชิ้นงานที่แต่ละกำลัง p ยังคงมีรูปร่างขอบโค้งที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้ค่าความเค้นของการออฟทิมซ์ที่ทุกกำลัง p มีค่าไม่แตกต่างกันมากดังแสดงในตารางที่ 4.3

รูปร่างสุดท้ายของการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกได้นำไปเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความเค้น von Mises มากสุดบนชิ้นงานและลักษณะการกระจายความเค้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชันโดยใช้อีลิเมนต์จำนวน 23034 อีลิเมนต์และมอดูลีการคำนวณเท่ากับ 46802 องศาอิสระ ซึ่งพบว่าค่าความเค้น von Mises มากสุดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันมีค่าแตกต่างไป 0.8 เปอร์เซ็นต์และมีลักษณะการกระจายเส้นระดับความเค้นที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.19



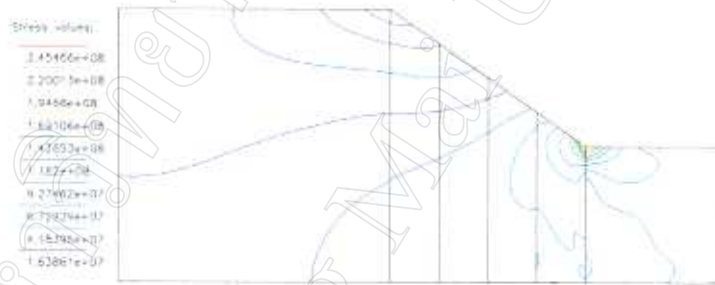
รูปที่ 4.15 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับห้าถึงแปด โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์
สำหรับการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน



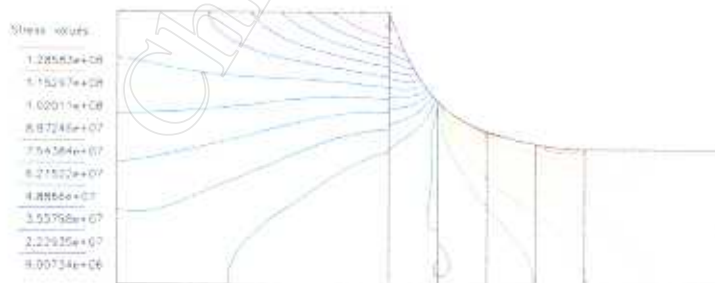
รูปที่ 4.16 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับห้าถึงแปด โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์สำหรับ
การวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

ตาราง 4.3 ความเค้น von Mises ภายหลังการอพทไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของการวิเคราะห์
แผ่นรับแรงค้ำที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

กำลัง p	ความเค้น von Mises (MPa) มากสุด		จำนวนรอบ การคำนวณ	ความเค้น von Mises ที่ $p = 8$ (MPa)
	ก่อนการวิเคราะห์	ค่าต่ำสุด		
5	192.4	127.1	13	128.6
6	211.5	124.8	15	126.0
7	228.7	130.0	15	130.9
8	245.5	128.6	14	-

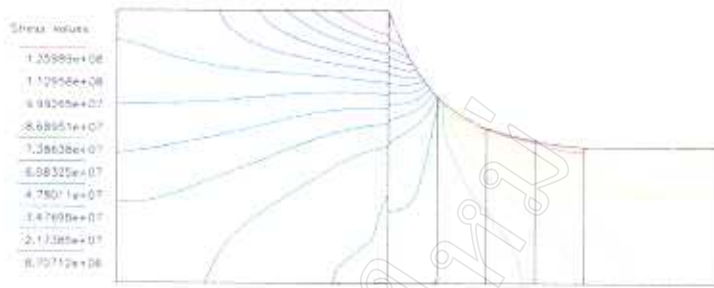
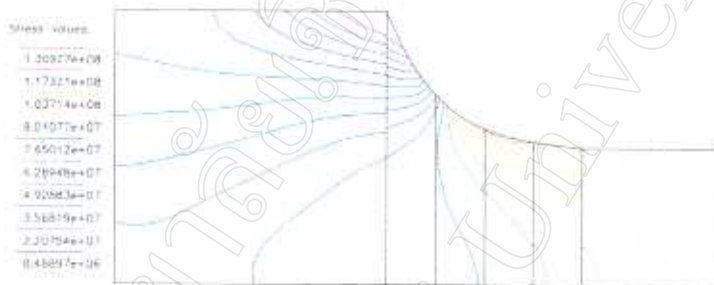
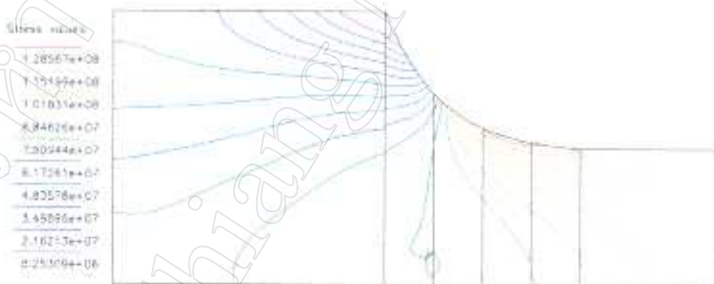


(ก) ชิ้นงานเริ่มต้น โดยวิเคราะห์ด้วยกำลัง $p = 8$

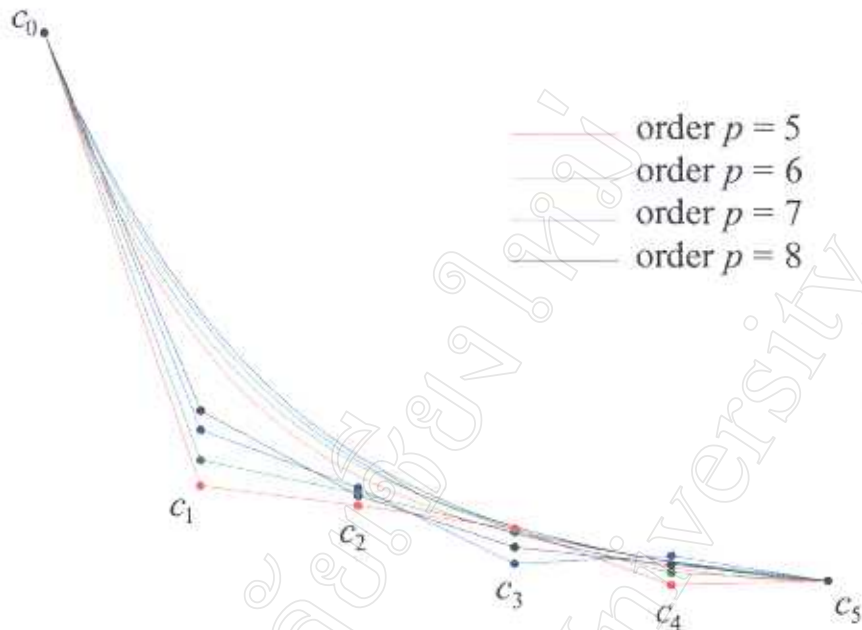


(ข) ภายหลังการอพทไมซ์ด้วยกำลัง $p = 5$

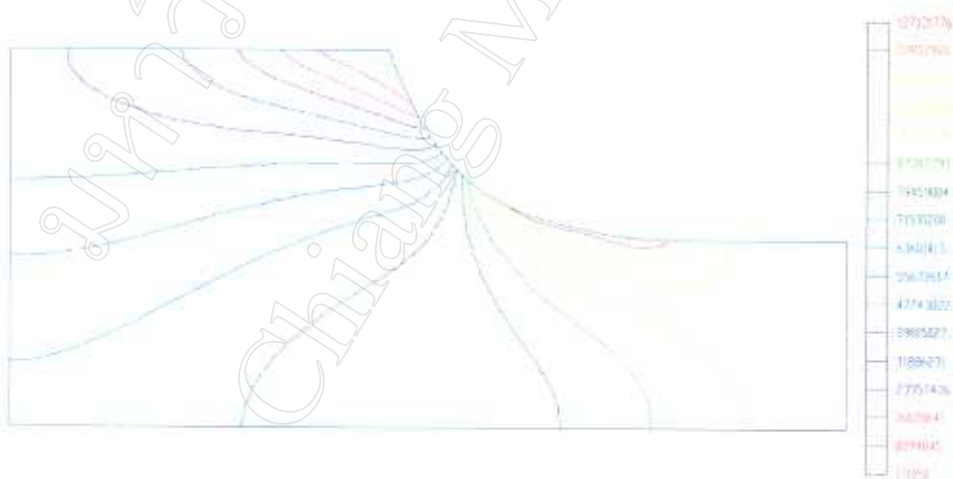
รูปที่ 4.17 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการอพทไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของ
แผ่นรับแรงค้ำที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

(ค) หลังการอพทที่ไม่ใช่ด้วยกำลัง $p=6$ (ง) หลังการอพทที่ไม่ใช่ด้วยกำลัง $p=7$ (จ) หลังการอพทที่ไม่ใช่ด้วยกำลัง $p=8$

รูปที่ 4.17(ต่อ) เห็นระดับความเค้นก่อนและหลังการอพทที่ไม่ใช่ด้วยเส้นขอบเบซิเออร์ของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน



รูปที่ 4.18 รูปร่างขอบโค้งของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกันภายหลังการอพทไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์

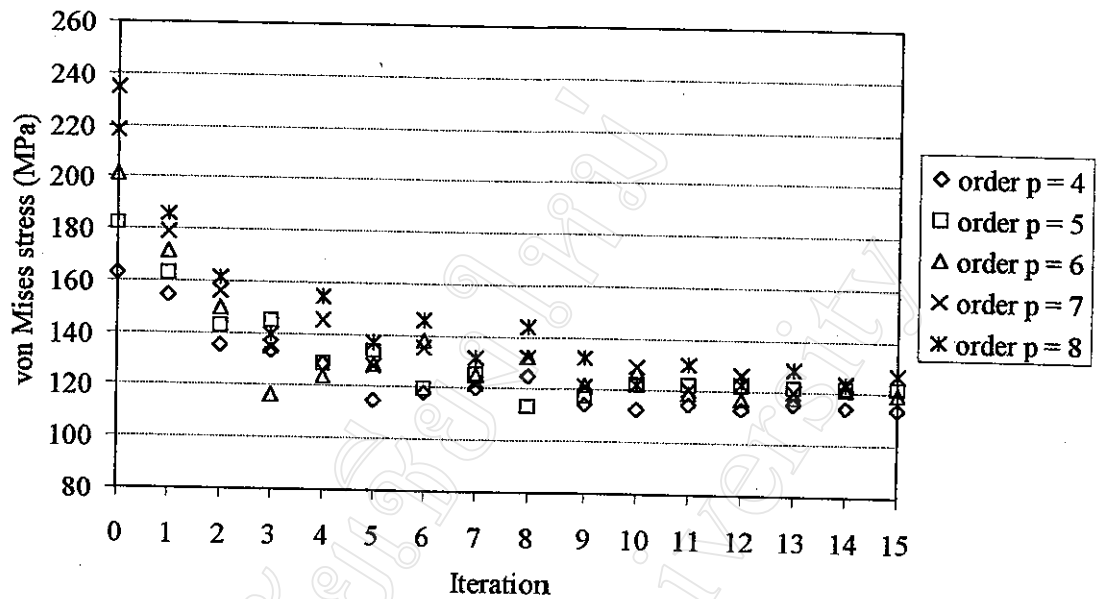


4.2.3 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบปี-สไฟพล์แสดงขอบโค้งของชิ้นงาน

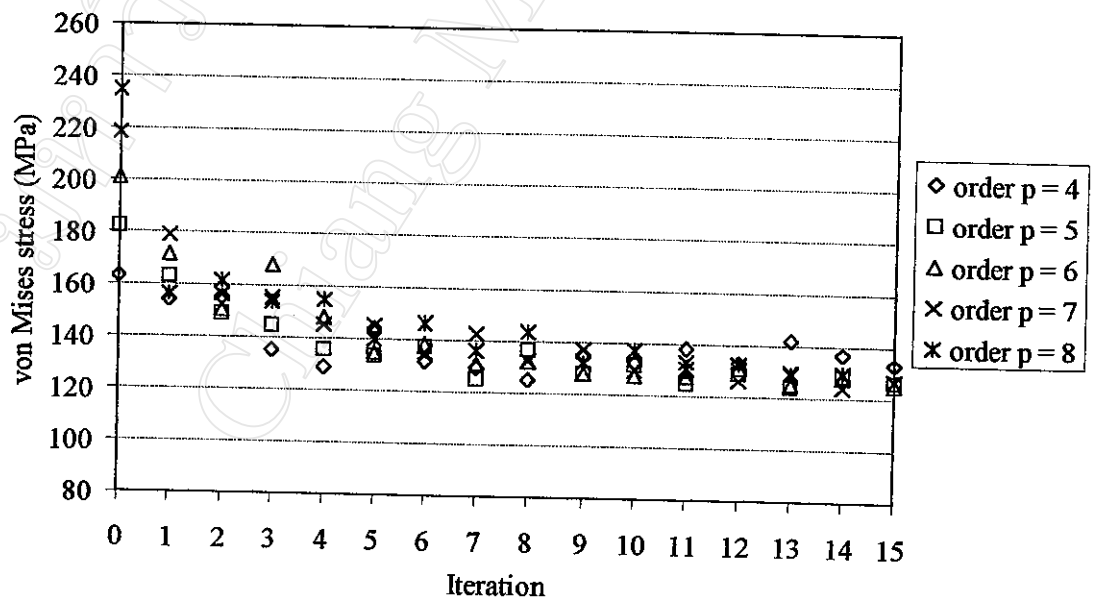
ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ของการออฟทิมซ์จำนวน 15 รอบการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่ามีการลดลงของค่าความเค้นและมีการเข้าสู่ค่าคงที่เช่นเดียวกันกับการออฟทิมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ ในขณะเดียวกันความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานในแต่ละรอบการคำนวณมีค่าลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่เช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.21 และเมื่อนำรูปร่างชิ้นงานของการออฟทิมซ์ด้วยแต่ละกำลัง p ที่รอบการคำนวณที่ชิ้นงานมีความเค้นมากที่สุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นมาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปด โดยความเค้นหลังการคำนวณแสดงดังตาราง 4.4 พบว่า การออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปดจะให้รูปร่างชิ้นงานที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 134.4, 132.7, 127.9, 125.4 และ 127.0 MPa หรือมีค่าลดลง 42.7, 43.4, 45.5, 46.6 และ 45.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยมีค่าความเค้นหนาแน่นเท่ากับ 1.34, 1.33, 1.28, 1.25 และ 1.27 ตามลำดับ และพบว่าการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกถึงแปดให้รูปร่างของชิ้นงานที่มีความเค้นมากที่สุดต่ำกว่าการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และห้า

เส้นระดับความเค้นของรูปร่างชิ้นงานก่อนและหลังการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปดแสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าการกระจายความเค้นของรูปร่างก่อนการวิเคราะห์มีการกระจายของความเค้นด้านสูงหนาแน่นที่ตำแหน่ง M ซึ่งเป็นตำแหน่งขอบหักของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.22(ก) ในขณะที่หลังการออฟทิมซ์พบว่าการกระจายความเค้นด้านสูงมีการกระจายสม่ำเสมอมากขึ้นและมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.22(ข) ถึง 4.22(ฉ) โดยรูปร่างขอบโค้งของการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปดแสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่ารูปร่างขอบโค้งของชิ้นงานที่แต่ละกำลัง p มีรูปร่างขอบโค้งที่แตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งมีผลทำให้ความเค้นของชิ้นงานมีค่าที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.4

รูปร่างชิ้นงานของการออฟทิมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดได้นำไปเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความเค้น von Mises มากสุดบนชิ้นงานและลักษณะการกระจายความเค้นด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชันโดยใช้อีลิเมนต์จำนวน 23444 อีลิเมนต์และม็อดูลัสของการคำนวณเท่ากับ 47636 องศาอิสระ ซึ่งพบว่าค่าความเค้น von Mises มากสุดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันมีค่าแตกต่างไป 3.8 เปอร์เซ็นต์และมีลักษณะการกระจายเส้นระดับความเค้นที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.24



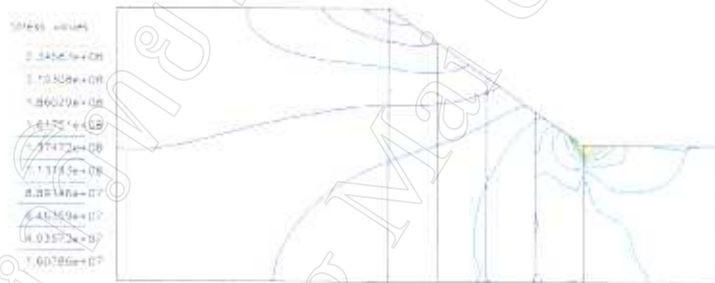
รูปที่ 4.20 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปดโดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์
สำหรับการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน



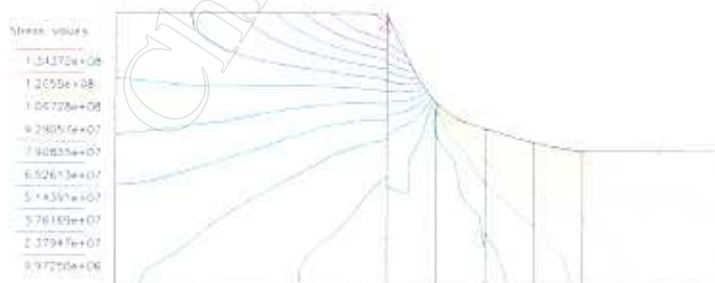
รูปที่ 4.21 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปดโดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์สำหรับ
การวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

ตาราง 4.4 ความเค้น von Mises ภายหลังการอพติไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-ส ไพลน์ของการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

กำลัง p	ความเค้น von Mises (MPa) มากสุด		จำนวนรอบการคำนวณ	ความเค้น von Mises ที่ $p = 8$ (MPa)
	ก่อนการวิเคราะห์	ค่าต่ำสุด		
4	163.0	125.2	8	134.4
5	182.3	124.3	13	132.7
6	201.1	125.4	15	127.9
7	218.2	124.4	14	125.4
8	234.6	127.0	15	-

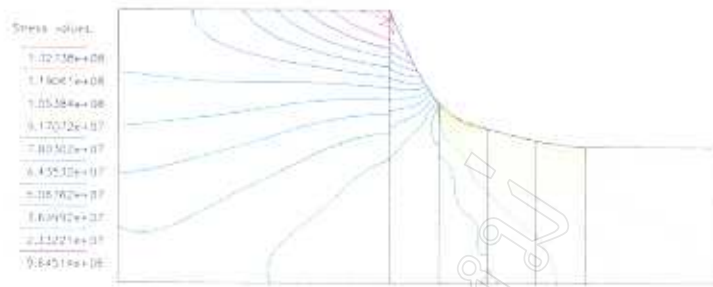
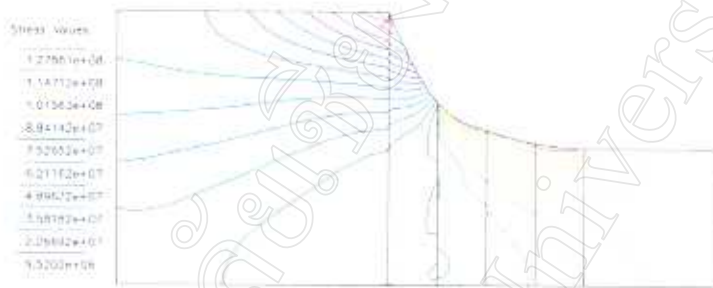
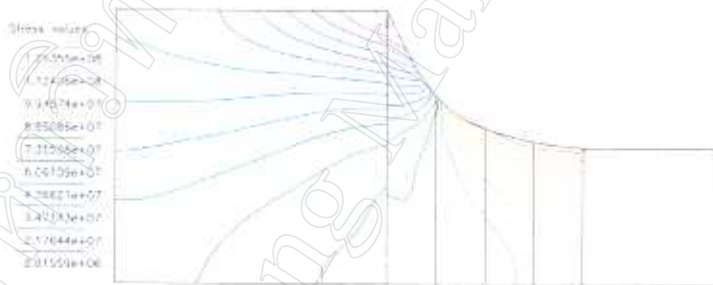
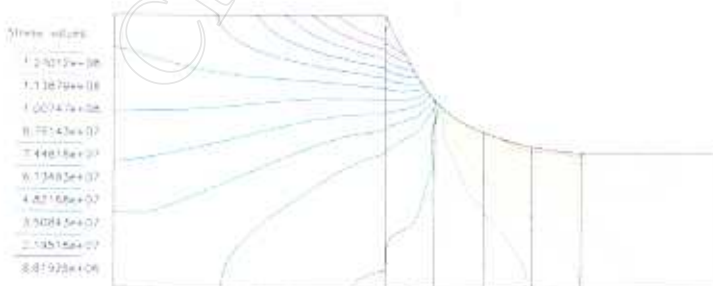


(ก) ชิ้นงานเริ่มต้นโดยวิเคราะห์ด้วยกำลัง $p = 8$

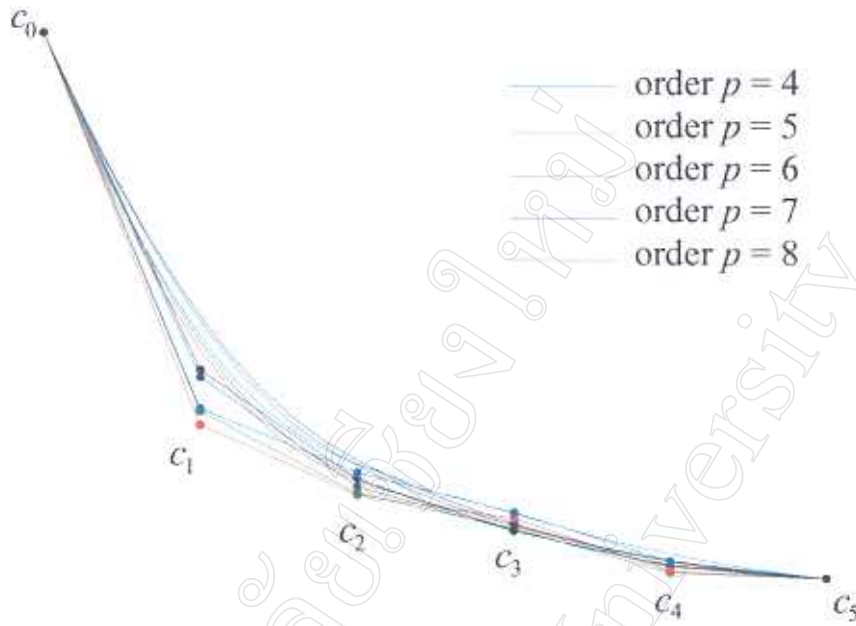


(ข) ภายหลังการอพติไมซ์ด้วยกำลัง $p = 4$

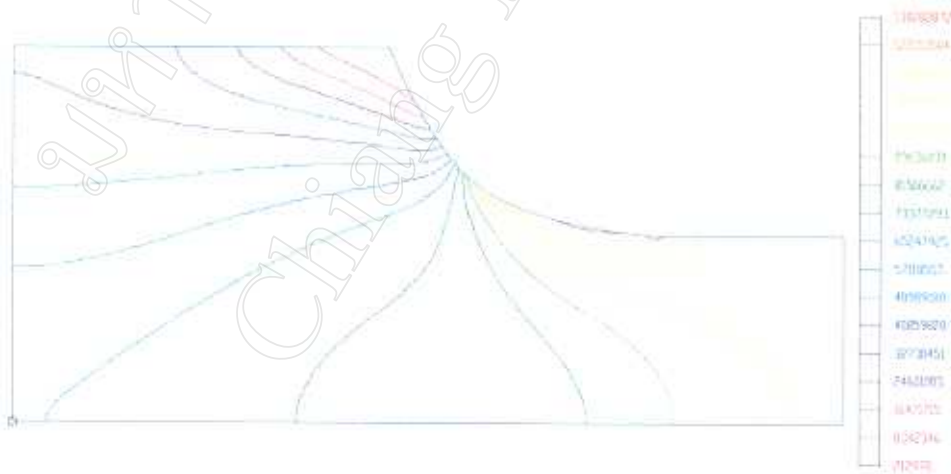
รูปที่ 4.22 เห็นระดับความเค้นก่อนและหลังการอพติไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-ส ไพลน์ของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

(ค) หลังการอพยพไม้ด้วยกำลัง $p = 5$ (ง) หลังการอพยพไม้ด้วยกำลัง $p = 6$ (จ) หลังการอพยพไม้ด้วยกำลัง $p = 7$ (ฉ) หลังการอพยพไม้ด้วยกำลัง $p = 8$

รูปที่ 4.22(ต่อ) เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการอพยพไม้โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน



รูปที่ 4.23 รูปร่างขอบโค้งของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกันภายใต้การอพทไมซ์ โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์



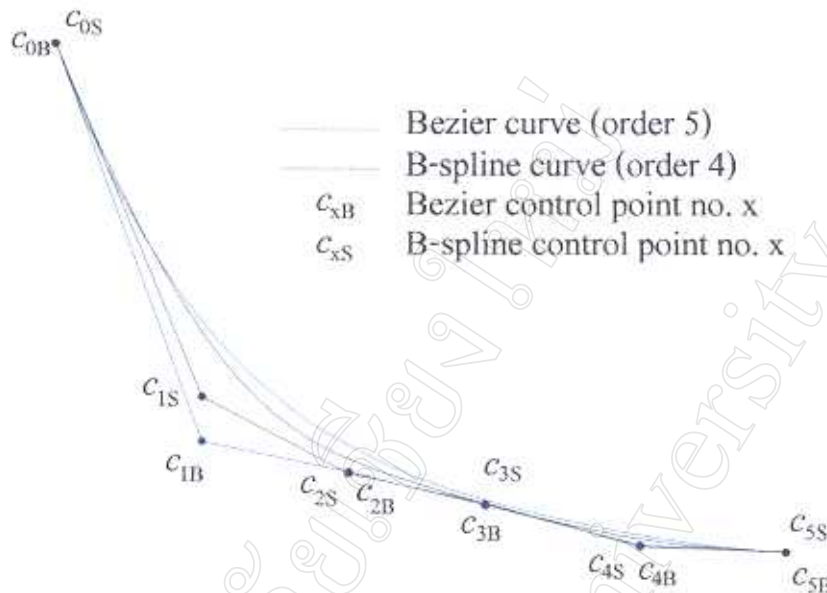
รูปที่ 4.24 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่อพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดโดยใช้เส้นขอบ บี-สไฟลน์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน

4.2.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไฟลน์

การออปติไมซ์รูปร่างขอบโค้งของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน พบว่า การออปติไมซ์ชิ้นงานโดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์จะให้รูปร่างของชิ้นงานมีค่าความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 126.0 MPa โดยใช้การวิเคราะห์ที่ค่า p เท่ากับหก และสำหรับการออปติไมซ์ชิ้นงานโดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์พบว่าจะให้รูปร่างของชิ้นงานมีค่าความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 125.4 MPa โดยใช้การวิเคราะห์ที่ค่า p เท่ากับเจ็ด การลดลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์พบว่า การออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบทั้งสองชนิดมีแนวโน้มการลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ที่ใกล้เคียงกัน แม้ว่าเส้นขอบบี-สไฟลน์ที่ใช้จะมีค่า p ของโพลีโนเมียลน้อยกว่าเส้นขอบเบซิเออร์ก็ตาม

รูปร่างเส้นขอบของชิ้นงานสุดท้ายของการออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ที่วิเคราะห์ด้วยค่า p เท่ากับหก และรูปร่างเส้นขอบสุดท้ายของการออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ที่วิเคราะห์ด้วยค่า p เท่ากับเจ็ดแสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่า รูปร่างเส้นขอบผลลัพธ์ของการออปติไมซ์ด้วยเส้นขอบทั้งสองชนิดมีรูปร่างที่แตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ค่าความเค้นมากสุดของชิ้นงานยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์หรือเส้นขอบบี-สไฟลน์จึงไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ขอบโค้งของแผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

นอกจากนี้ ได้เปรียบเทียบค่าความเค้นหนาแน่นของการออปติไมซ์กับผลงานตีพิมพ์ของ Shyy *et al.* (1988) โดยรายละเอียดแสดงในตาราง 4.5 พบว่า ค่าความเค้นหนาแน่นที่ได้จากการออปติไมซ์ด้วยค่า p เท่ากับห้าโดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และการออปติไมซ์ด้วยค่า p เท่ากับสี่และห้าโดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์ของการวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าผลงานวิจัยของ Shyy *et al.* โดยค่าความเค้นหนาแน่นต่ำสุดของการออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไฟลน์ของการวิจัยนี้มีค่าแตกต่างจากผลงานตีพิมพ์ของ Shyy *et al.* 3.3 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบรูปร่างเส้นขอบการอพยพไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และบี-สไปไลน์
สำหรับการวิเคราะห์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกัน

ตาราง 4.5 เปรียบเทียบผลการอพยพไมซ์แผ่นรับแรงดึงที่มีความกว้างหน้าตัดต่างกันของการวิจัยนี้
และผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้อง

กำลัง p	ความเค้นหนาแน่น		
	เส้นขอบเบซิเออร์	เส้นขอบบี-สไปไลน์	Shyy <i>et al.</i> (1988) [†]
4	-	1.34	1.41
5	1.29	1.33	1.33
6	1.26	1.28	1.24
7	1.31	1.25	1.23
8	1.29	1.27	1.22

[†] ผลลัพธ์ที่แสดงเป็นการอพยพไมซ์ด้วยเส้นขอบเบซิเออร์ เนื่องจาก Shyy *et al.* (1988) ศึกษาการอพยพไมซ์
ชิ้นงานด้วยเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์แต่แสดงผลการคำนวณเพียงการอพยพไมซ์โดยใช้เส้นขอบ
เบซิเออร์เท่านั้น

4.3 การออกแบบขอบโค้งภายในของชิ้นงานรูปตัวยู

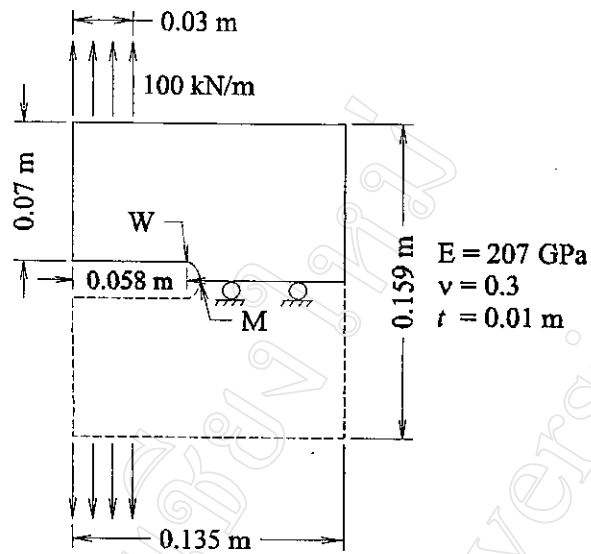
4.3.1 โมเดลและวิธีการวิเคราะห์

ชิ้นงานรูปตัวยูรับแรงดึงที่ปลายโดยชิ้นงานมีความกว้าง 0.07 เมตร หนา 0.01 เมตร วัสดุที่ใช้มีค่าโมดูลัสของยังค์ 207 GPa และมีอัตราส่วนปัวซอง 0.3 ภาระแรงที่กระทำเป็นแรงดึงกระจายกระทำที่ปลายทั้งสองข้างและมีขนาด 100 kN ต่อเมตร

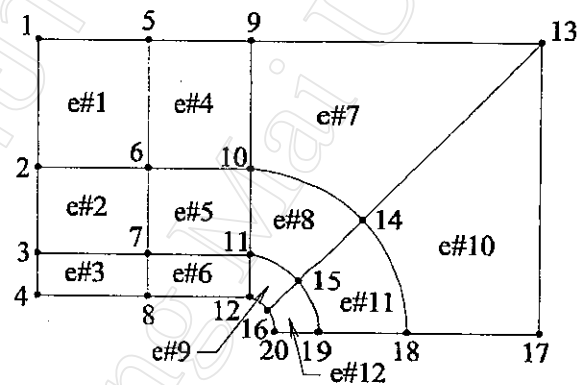
การสร้างโมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์มีรูปแบบชิ้นงานดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.26 เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะสมมาตรดังนั้นการวิเคราะห์จะวิเคราะห์เพียงครึ่งหนึ่งของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.26(ก) โดยที่เส้นขอบของชิ้นงานที่ทำการออกแบบคือเส้นขอบ WM การสร้างโมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์จะแบ่งชิ้นงานวิเคราะห์ดังกล่าวออกเป็น 12 อีลิเมนต์และมีโหนดที่มุมอีลิเมนต์ 20 โหนดดังแสดงในรูปที่ 4.26(ข) การกำหนดลักษณะเส้นขอบที่ทำการออกแบบกำหนดด้วยเส้นขอบเบซิเอร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์

การวิเคราะห์ชิ้นงานจะใช้เส้นขอบเบซิเอร์กำลังสามและเส้นขอบบี-สไปไลน์กำลังสองที่สร้างจากจุดควบคุมจำนวนสี่จุดได้แก่ c_0 , c_1 , c_2 และ c_3 ตำแหน่งจุดควบคุมและรูปร่างขอบโค้งเริ่มต้นของเส้นขอบแสดงในรูปที่ 4.26(ค) โดยรูปร่างเส้นขอบเริ่มต้นของการวิเคราะห์กำหนดให้เป็นรูปร่างขอบโค้งที่ไม่ใช่ขอบโค้งวงกลม วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันจะใช้กำลัง p เริ่มต้นมีค่าไม่น้อยกว่ากำลังของโพลีโนเมียลที่ใช้แสดงขอบของชิ้นงาน ดังนั้นการวิเคราะห์จะใช้กำลัง p เริ่มต้นเท่ากับสามและสองสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเส้นขอบเบซิเอร์และบี-สไปไลน์ตามลำดับ โดยที่กำลัง p สูงสุดของการวิเคราะห์คือกำลัง p เท่ากับแปด

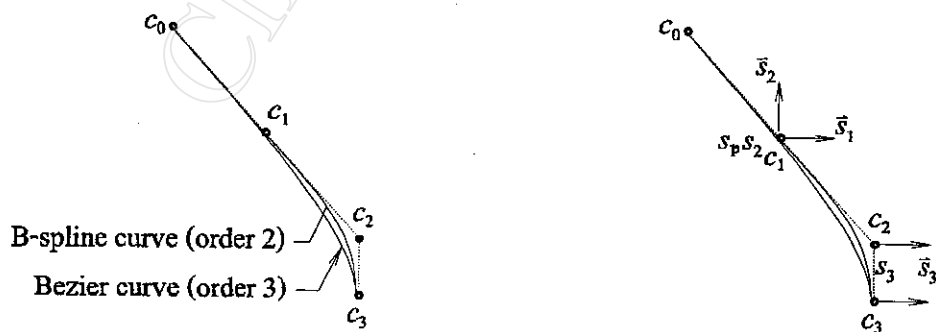
การอพทิมัซชิ้นงานกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือค่าความเค้น von Mises ที่คำนวณ ณ ตำแหน่ง M ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานเริ่มต้น โดยมีเงื่อนไขคอนสเตรนตคือ ความเค้น von Mises มากสุดของแต่ละรอบการคำนวณมีค่าลดลงถึงสมการ (2.12) โดยกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมการลู่เข้าของคำตอบ (κ) มีค่าเท่ากับ 0.85 ตัวแปรออกแบบของการอพทิมัซมีสามตัวแปร ได้แก่ s_1 , s_2 และ s_3 โดยตัวแปรออกแบบ s_1 และ s_2 เป็นตำแหน่งพิกัดของจุดควบคุม c_2 และตัวแปรออกแบบ s_3 เป็นตำแหน่งพิกัดของจุดควบคุม c_3 ถึง c_4 โดยมีทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบ s_1 และ s_3 ทำมุม 0° กับแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาและทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบ s_2 ทำมุม 90° กับแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 4.26(ง) การคำนวณการอพทิมัซจะใช้การคำนวณทั้งหมด 20 รอบเพื่อตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบ โดยรูปร่างชิ้นงานของรอบการคำนวณที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นจะนำมาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดเพื่อเปรียบเทียบค่าความเค้น von Mises ของรูปร่างชิ้นงานด้วยกำลัง p และจำนวนองศาอิสระที่เท่ากัน



(ก) รูปแบบชิ้นงานวิเคราะห์



(ข) โมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์



(ค) ตำแหน่งจุดควบคุม

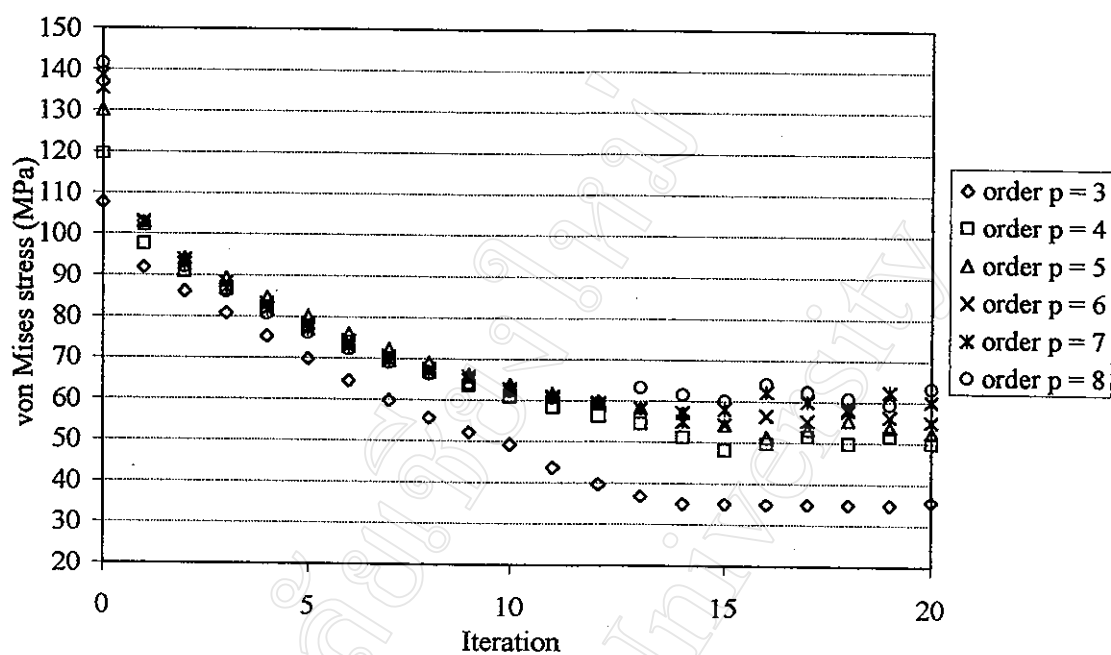
(ง) ตัวแปรออกแบบ

รูปที่ 4.26 รูปร่างชิ้นงานและรูปแบบวิธีการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู

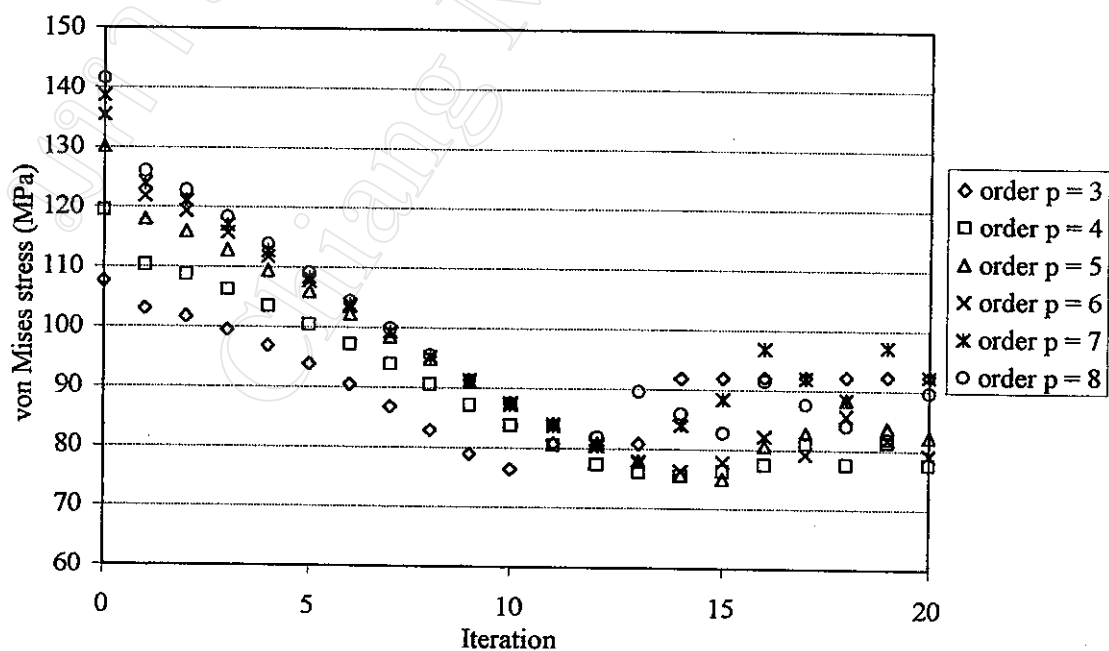
4.3.2 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์แสดงขอบโค้งของชิ้นงาน

ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M และความเค้น von Mises มากสุดของแต่ละรอบการคำนวณของการออปติไมซ์จำนวน 20 รอบแสดงดังรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ พบว่าการออปติไมซ์ด้วยทุกกำลัง p ให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และค่าความเค้นมากสุดของแต่ละรอบการคำนวณเข้าสู่ค่าคงที่ในรอบการคำนวณที่ 13 ถึง 15 โดยมีการแกว่งของข้อมูลเล็กน้อยเนื่องจากไม่มีการกำหนดเงื่อนไขคอนสเตรนธ์ของปริมาตรและไม่มีการบีบปลายทั้งสองข้างของเส้นขอบโค้งทำให้ขอบโค้งมีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 34.9 MPa ที่วิเคราะห์ด้วยกำลัง p เท่ากับสามและมีความเค้นมากสุดเท่ากับ 59.5 MPa ที่กำลัง p เท่ากับแปด ในขณะที่ความเค้นมากสุดของแต่ละรอบการคำนวณมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 75.1 MPa ที่กำลัง p เท่ากับห้าและมีความเค้นมากสุดเท่ากับ 81.9 MPa ที่กำลัง p เท่ากับแปด

เมื่อนำข้อมูลในรูปที่ 4.28 มาวิเคราะห์ใหม่ โดยนำรูปร่างชิ้นงานของรอบการคำนวณที่มีความเค้น von Mises มากสุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นของแต่ละกำลัง p มาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยค่าความเค้นหลังการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าการออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดให้รูปร่างของชิ้นงานที่มีความเค้นมากสุดต่ำที่สุดเท่ากับ 80.7 MPa โดยที่การออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกและแปดให้รูปร่างชิ้นงานที่มีความเค้นมากสุดเท่ากับ 81.4 และ 81.9 MPa ตามลำดับ จากการคำนวณทางทฤษฎีของรูปร่างชิ้นงานที่มีขอบโค้งเป็นส่วนโค้งของวงกลมและมีรัศมีของขอบโค้งเท่ากับ 0.01 เมตร ดังแสดงในภาคผนวก ก พบว่าความเค้นมากสุดของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 78.3 MPa โดยการออปติไมซ์ที่ได้มีความเค้นที่สูงกว่าทางทฤษฎีทั้งนี้เนื่องจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีกำหนดให้แรงกระทำที่ปลายชิ้นงานเป็นแรงกระทำที่ตำแหน่งเดียวไม่ใช่แรงกระจายเหมือนการวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างนี้ และเมื่อวิเคราะห์ชิ้นงานทางทฤษฎีที่มีขอบเป็นขอบโค้งวงกลมและแรงเป็นแรงกระจายด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้จำนวนเอลิเมนต์และองค์อิสระเท่ากันพบว่าความเค้นมากสุดของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 82.2 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าการออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกถึงแปด 1.1, 1.9 และ 0.3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยภาพแสดงการเปรียบเทียบเส้นขอบของรูปร่างชิ้นงานที่ออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกถึงแปดและเส้นขอบวงกลมแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าเส้นขอบของชิ้นงานมีลักษณะคล้ายส่วนของโค้งวงกลมแต่มีตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของขอบโค้งเปลี่ยนไปจากเดิม อย่างไรก็ตาม การกระจายความเค้นบริเวณเส้นขอบโค้งยังคงมีลักษณะเหมือนชิ้นงานที่มีขอบโค้งวงกลมดังแสดงในรูปที่ 4.30 ซึ่งเป็นภาพแสดงเส้นระดับความเค้นและภาพขยายบริเวณขอบโค้งของชิ้นงานที่มีเส้นขอบเป็นขอบโค้งวงกลมและชิ้นงานที่ออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกถึงแปด



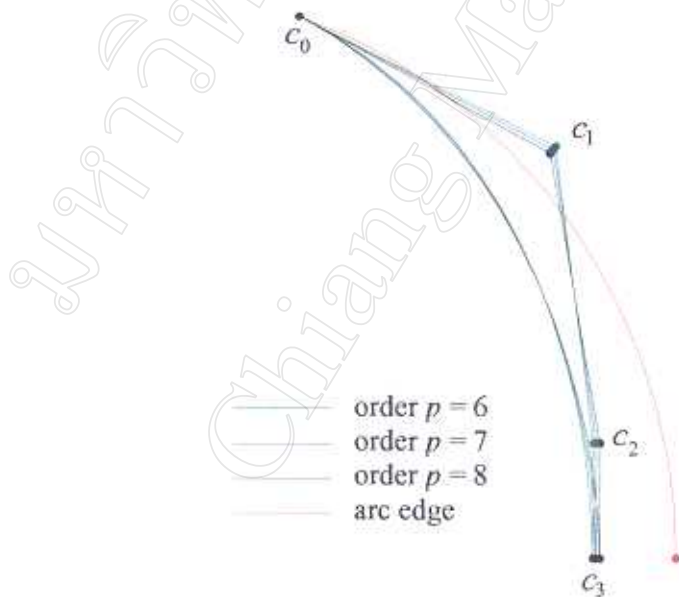
รูปที่ 4.27 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสามถึงแปด โดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์
สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปถ้วย



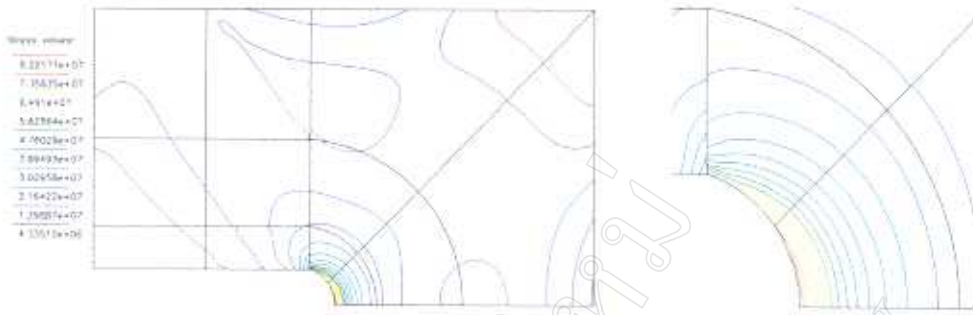
รูปที่ 4.28 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับสามถึงแปด โดยใช้เส้นขอบเบซิเอร์
สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปถ้วย

ตาราง 4.6 ความเค้น von Mises ภายหลังการอพทไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของการวิเคราะห์
ชิ้นงานรูปตัวยู

กำลัง p	ความเค้น von Mises (MPa) มากสุด		จำนวนรอบ การคำนวณ	ความเค้น von Mises ที่ $p = 8$ (MPa)
	ก่อนการวิเคราะห์	ค่าต่ำสุด		
3	107.7	76.4	10	86.5
4	119.5	75.5	14	90.4
5	130.1	75.1	15	89.6
6	135.4	76.4	14	81.4
7	138.7	77.9	13	80.7
8	141.6	81.9	12	-



รูปที่ 4.29 รูปร่างเส้นขอบที่อพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกถึงแปดและเส้นขอบวงกลมสำหรับ
กรณีการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู



(ก) เส้นขอบวงกลม

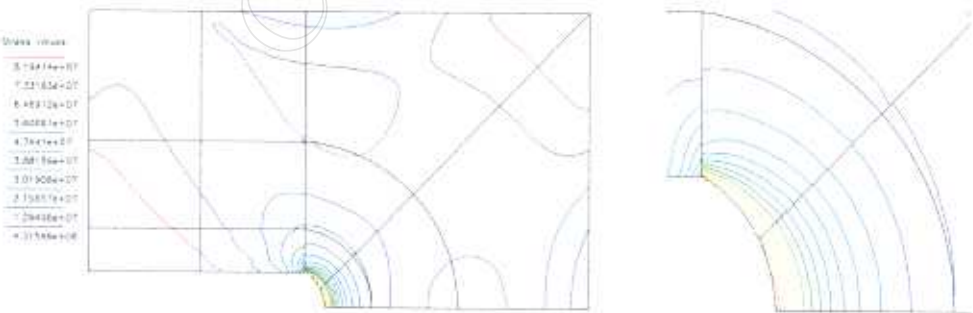
(ข) ภาพขยาย

(ค) หลังออฟทิมไนซ์ด้วยกำลัง $p=6$

(ง) ภาพขยาย

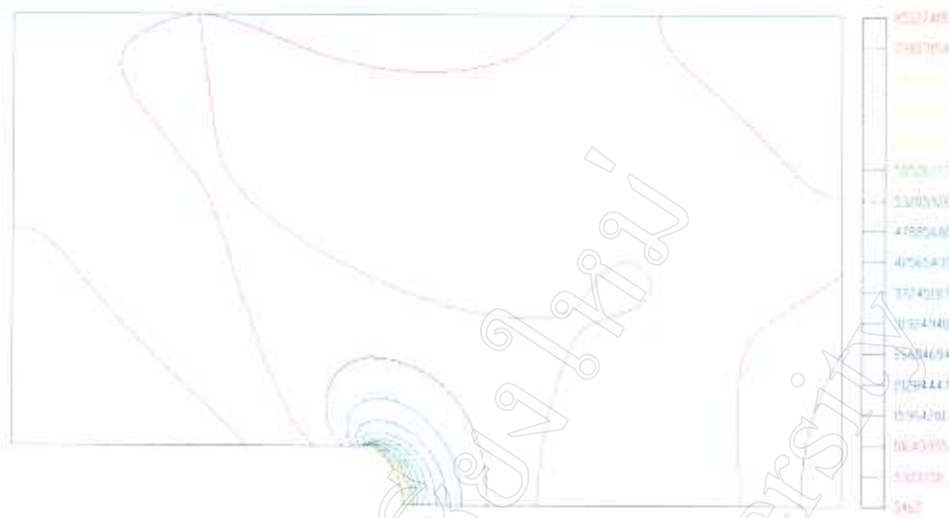
(จ) หลังออฟทิมไนซ์ด้วยกำลัง $p=7$

(ฉ) ภาพขยาย

(ช) หลังออฟทิมไนซ์ด้วยกำลัง $p=8$

(ซ) ภาพขยาย

รูปที่ 4.30 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานรูปตัวยูที่มีขอบโค้งวงกลมและชิ้นงานหลังการออฟทิมไนซ์



รูปที่ 4.31 เส้นระดับความเค้นของชิ้นงานที่ออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ด โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน

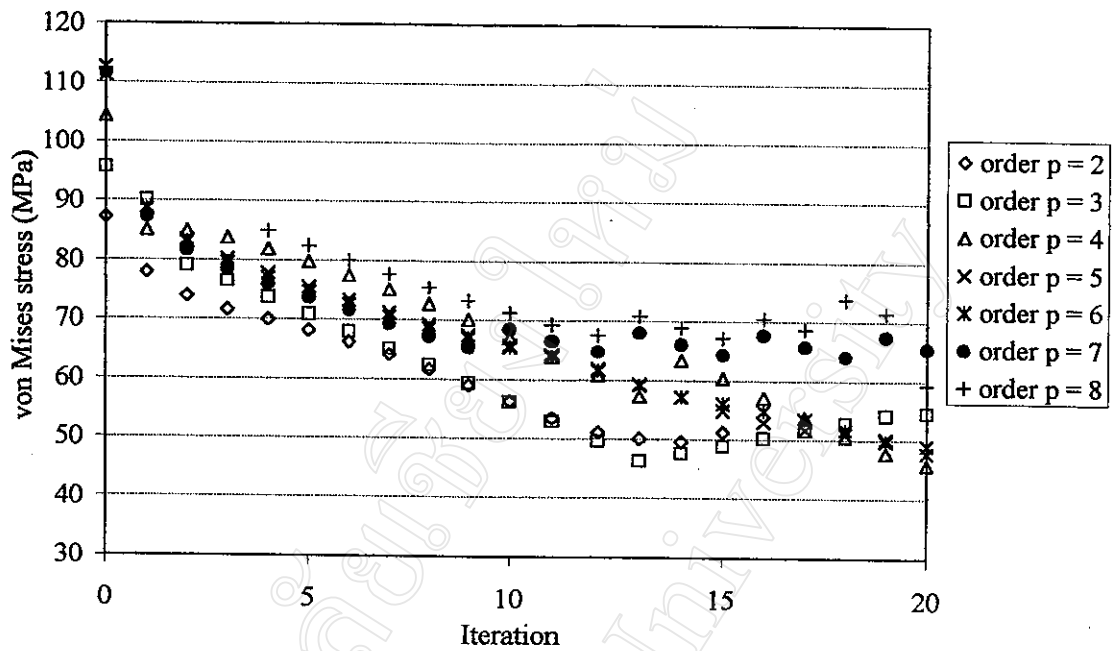
รูปร่างสุดท้ายของการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดได้นำไปเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความเค้น von Mises มากสุดบนชิ้นงานและลักษณะการกระจายความเค้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการแสดงเส้นขอบด้วยเส้นขอบเบซิเออร์ในวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชันโดยใช้อีลิเมนต์จำนวน 22546 อีลิเมนต์และมืองศาอิสระของการคำนวณเท่ากับ 45704 องศาอิสระ ซึ่งพบว่าค่าความเค้น von Mises มากสุดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันมีค่าแตกต่างกันไป 5.8 เปอร์เซ็นต์และมีลักษณะการกระจายเส้นระดับความเค้นที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.31

4.3.3 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์แสดงขอบโค้งของชิ้นงาน

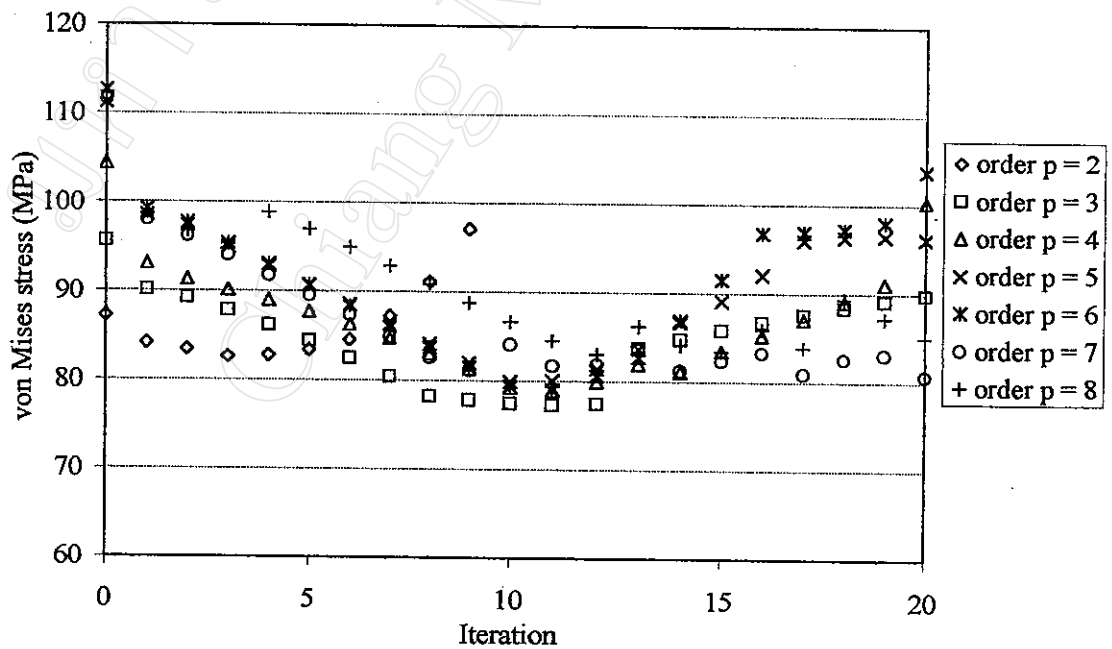
ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ของการออฟทีไมซ์จำนวน 20 รอบการคำนวณ แสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยทุกกำลัง p ให้ความเค้นที่ตำแหน่ง M มีค่าลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ภายหลังรอบการคำนวณที่ 12 โดยมีการแกว่งของข้อมูลเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความเค้น von Mises มากสุดของแต่ละรอบการคำนวณซึ่งแสดงในรูปที่ 4.33 พบว่ามีค่าลดลงและมีค่าเพิ่มขึ้น ภายหลังรอบการคำนวณที่ 12 ทั้งนี้เนื่องจากการไม่มีการกำหนดเงื่อนไขคอนสเตรนซ์ของปริมาตร โดยค่าความเค้นของแต่ละรอบการคำนวณมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 77.3 MPa ที่กำลัง p เท่ากับสามและมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 83.2 MPa ที่กำลัง p เท่ากับแปด โดยที่การออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสองมีค่าความเค้นลดลงในรอบการคำนวณสามรอบแรกและมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งพบว่าการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสองให้รูปร่างชิ้นงานที่มีความเค้น von Mises มากสุดเพิ่มขึ้น

เมื่อนำข้อมูลในรูปที่ 4.33 มาวิเคราะห์ใหม่ โดยนำรูปร่างชิ้นงานของรอบการคำนวณที่มีความเค้น von Mises มากสุดต่ำกว่ารอบการคำนวณอื่นมาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปด โดยความเค้นภายหลังการวิเคราะห์แสดงในตาราง 4.7 พบว่า การออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสามให้รูปร่างชิ้นงานที่มีความเค้น von Mises มากสุดสูงกว่าการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่ถึงแปด โดยรูปร่างชิ้นงานของการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และแปดมีความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานเท่ากับ 82.8 และ 83.2 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่มีขอบโค้งวงกลมตามทฤษฎีและมีค่าความเค้นแตกต่างกันเท่ากับ 0.6 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยภาพแสดงการเปรียบเทียบเส้นขอบของรูปร่างชิ้นงานที่ออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และแปดกับรูปร่างเส้นขอบวงกลมตามทฤษฎีแสดงในรูปที่ 4.34 พบว่าเส้นขอบของชิ้นงานมีรูปร่างที่แตกต่างไปจากเส้นขอบวงกลม โดยที่ค่าความเค้นมากที่สุดของชิ้นงานยังคงมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่มีขอบโค้งวงกลมและยังมีลักษณะการกระจายของความเค้นที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งเป็นภาพแสดงเส้นระดับความเค้นและภาพขยายบริเวณของโค้งของชิ้นงานที่ออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และแปด

รูปร่างสุดท้ายของการออฟทีไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่ได้นำไปเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความเค้น von Mises มากสุดบนชิ้นงานและลักษณะการกระจายความเค้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการแสดงเส้นขอบด้วยเส้นขอบเบซิเออร์ในวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชันโดยใช้อีลิเมนต์จำนวน 22625 อีลิเมนต์และมอดูลีของสายเคเบิลการคำนวณเท่ากับ 45874 อดิสสระ ซึ่งพบว่าค่าความเค้น von Mises มากสุดของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันมีค่าแตกต่างไป 1.9 เปอร์เซ็นต์และมีลักษณะการกระจายเส้นระดับความเค้นที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 4.36



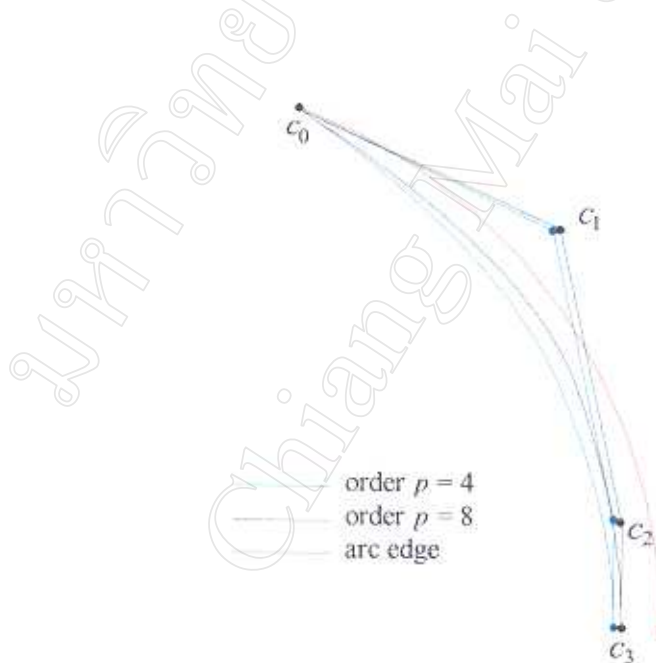
รูปที่ 4.32 ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ที่กำลัง p เท่ากับสองถึงแปดของเส้นขอบบี-สไฟลน์
สำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู



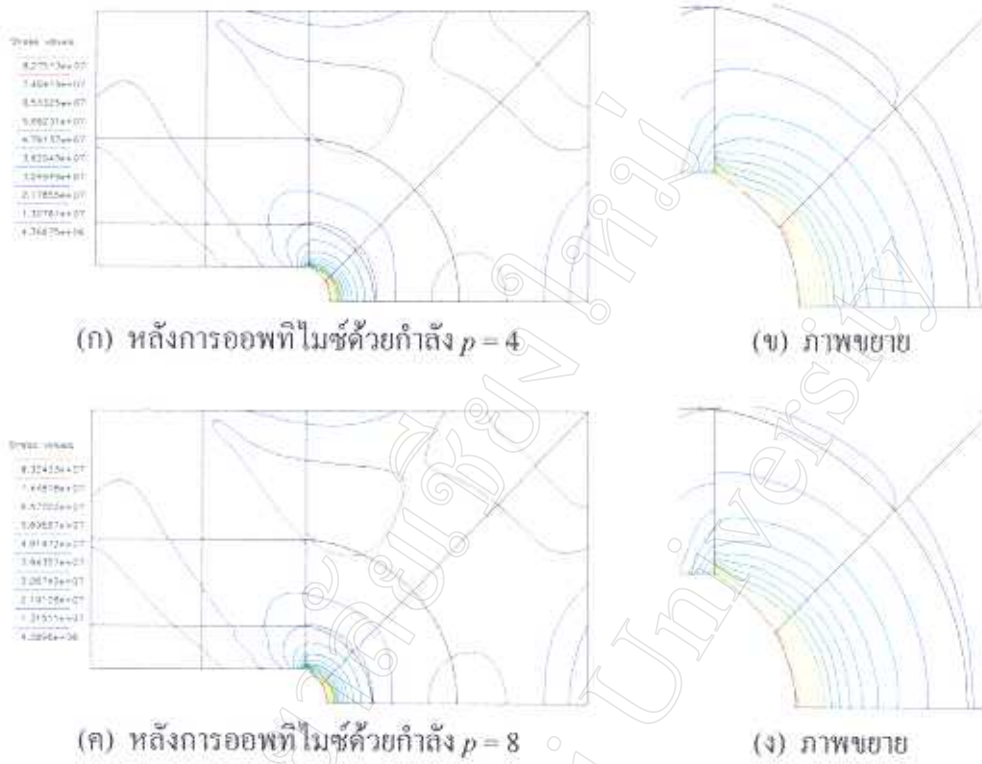
รูปที่ 4.33 ความเค้น von Mises มากสุดที่กำลัง p เท่ากับสองถึงแปดของเส้นขอบบี-สไฟลน์สำหรับ
การวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู

ตาราง 4.7 ความเค้น von Mises ภายหลังการอพทไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สโพล์ของการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู

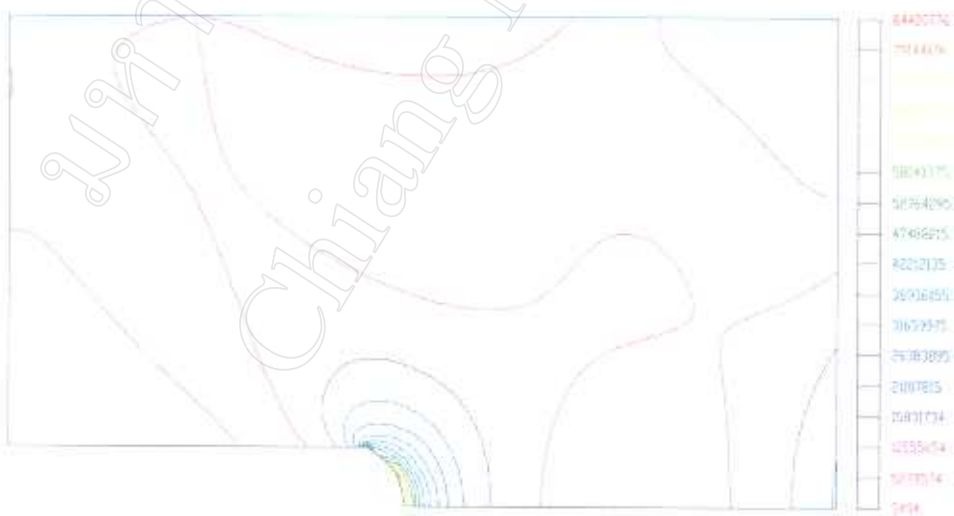
กำลัง p	ความเค้น von Mises (MPa) มากสุด		จำนวนรอบการคำนวณ	ความเค้น von Mises ที่ $p = 8$ (MPa)
	ก่อนการวิเคราะห์	ค่าต่ำสุด		
2	87.2	-	-	-
3	95.6	77.3	11	113.5
4	104.4	78.9	11	82.8
5	111.2	79.9	10	89.8
6	112.6	80.6	12	87.3
7	111.6	80.7	20	86.0
8	112.3	83.2	12	-



รูปที่ 4.34 รูปร่างเส้นขอบที่อพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และแปดและเส้นขอบวงกลมสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานรูปตัวยู



รูปที่ 4.35 เส้นระดับความเค้นของชั้นงานรูปตัวยูหลังการอพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่และแปด



รูปที่ 4.36 เส้นระดับความเค้นของชั้นงานที่อพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับสี่โดยใช้เส้นขอบบี-สไปไลน์เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน

4.3.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไฟลน์

การอพอทิไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์พบว่าค่าความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานที่อพอทิไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับหกถึงแปดมีค่าเท่ากับ 81.4, 80.7 และ 81.9 MPa ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีขอบโค้งวงกลมตามทฤษฎี พบว่ามีค่าความเค้นที่ใกล้เคียงกับเส้นขอบวงกลมโดยมีค่าความเค้นต่ำกว่า 1.1, 1.9 และ 0.3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และสำหรับการอพอทิไมซ์โดยใช้เส้นบี-สไฟลน์พบว่าค่าความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานที่อพอทิไมซ์ด้วยทุกกำลัง p เท่ากับสี่และแปดมีค่าเท่ากับ 82.8 และ 83.2 MPa และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นขอบวงกลมตามทฤษฎีพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกับเส้นขอบวงกลมโดยมีค่าแตกต่าง 0.6 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ดังนั้นสำหรับการอพอทิไมซ์ขอบโค้งของชิ้นงานรูปตัวยู พบว่า การอพอทิไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไฟลน์จะให้รูปร่างชิ้นงานที่มีค่าความเค้น von Mises ที่ลดลง โดยรูปร่างขอบโค้งที่ได้จากการอพอทิไมซ์มีรูปร่างที่แตกต่างไปจากขอบโค้งวงกลมตามทฤษฎีโดยที่ชิ้นงานผลลัพธ์ยังคงมีค่าความเค้นที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่มีขอบโค้งวงกลม

4.4 การออกแบบขอบโค้งของรูที่เจาะบนคานฝังรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

4.4.1 โมเดลและวิธีการวิเคราะห์

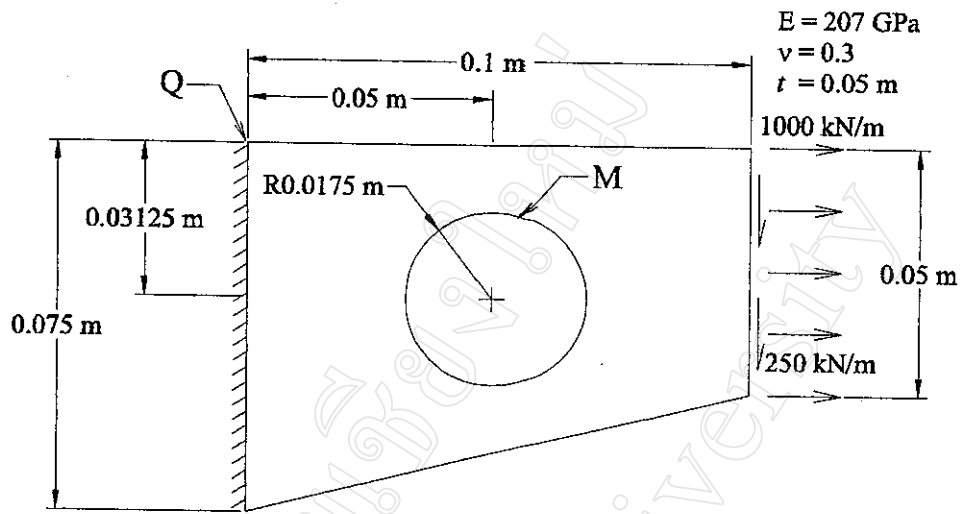
คานฝังรูปสี่เหลี่ยมคางหมูมีขนาดของปลายคานด้านฝังและปลายคานด้านปล่อย 0.075 และ 0.05 เมตรตามลำดับ คานมีความหนา 0.05 เมตร มีรูวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.035 เมตรเจาะอยู่ตรงกลางคาน วัสดุที่ใช้ทำคานที่มีค่าโมดูลัสของยังค์ 207 GPa และมีอัตราส่วนปริมาตรของ 0.3 ภาระแรงที่กระทำเป็นแรงดึงกระจายขนาด 1000 kN ต่อเมตร และแรงเฉือนกระจายขนาด 250 kN ต่อเมตรกระทำที่ปลายคาน

การสร้างโมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์มีรูปแบบชิ้นงานดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.37 โดยการวิเคราะห์จะวิเคราะห์ชิ้นงานทั้งหมด รูปแบบชิ้นงานวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.37(ก) และสร้างโมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์โดยแบ่งชิ้นงานวิเคราะห์ดังกล่าวออกเป็น 18 อีลิเมนต์และมีโหนดที่มุมอีลิเมนต์ 32 โหนดดังแสดงในรูปที่ 4.37(ข) การกำหนดลักษณะเส้นขอบของรูซึ่งเป็นขอบที่ทำการออกแบบจะกำหนดเส้นขอบด้วยเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์โดยเส้นขอบของชิ้นงานเริ่มต้นจะเป็นขอบโค้งวงกลม

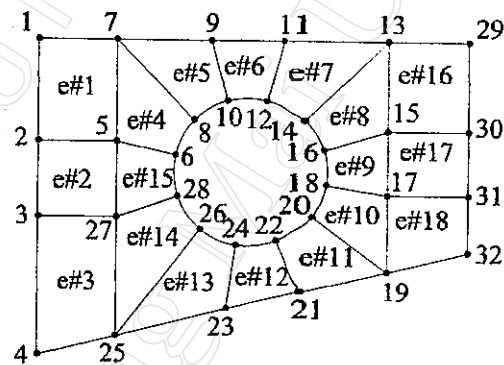
การวิเคราะห์ชิ้นงานใช้เส้นขอบเบซิเออร์กำลังแปดและเส้นขอบบี-สไปไลน์กำลังเจ็ด ที่สร้างจากจุดควบคุมจำนวนเก้าจุดได้แก่ c_0 ถึง c_8 โดยจุดควบคุม c_0 และ c_8 มีตำแหน่งพิกัดเดียวกัน และแนวเชื่อมต่อของจุดควบคุม c_0 ถึง c_1 และ c_7 ถึง c_8 อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน วิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันจะใช้กำลัง p เริ่มต้นที่มีค่าไม่น้อยกว่ากำลังของโพลิโนเมียลที่ใช้แสดงขอบของชิ้นงาน ดังนั้นจึงแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสามกรณีคือ กรณีที่หนึ่งวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยแสดงขอบโค้งด้วยเส้นขอบเบซิเออร์ กรณีที่สองวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดโดยแสดงขอบโค้งด้วยเส้นขอบบี-สไปไลน์ และกรณีที่สามวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยแสดงขอบโค้งด้วยเส้นขอบบี-สไปไลน์ โดยที่ตำแหน่งของจุดควบคุมของเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์แสดงดังรูปที่ 4.37(ค) และ 4.37(ง) ตามลำดับ

การอพทิมัซชิ้นงานกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M ดังแสดงในรูปที่ 4.37(ก) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานเริ่มต้น โดยมีเงื่อนไขคอนสเตรนท์ ได้แก่ ค่าความเค้น von Mises มากสุดของแต่ละรอบการคำนวณมีค่าลดลงดังสมการ (2.12) โดยกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมการเข้าสู่ของค่าตอบ (κ) มีค่าเท่ากับ 0.9 และกำหนดให้ปริมาตรของชิ้นงานมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ ตัวแปรออกแบบของการอพทิมัซมีห้าตัวแปร ได้แก่ s_1, s_2, s_3, s_4 และ s_5 ซึ่งเป็นพิกัดของของจุดควบคุม c_3, c_4, c_5, c_6 และ c_7 ตามลำดับ การวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์มีทิศการเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบ s_1, s_2, s_3, s_4 และ s_5 ทำมุม $87.9^\circ, 44.7^\circ, 347.1^\circ, 289.6^\circ$ และ 246.3° เทียบกับแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ

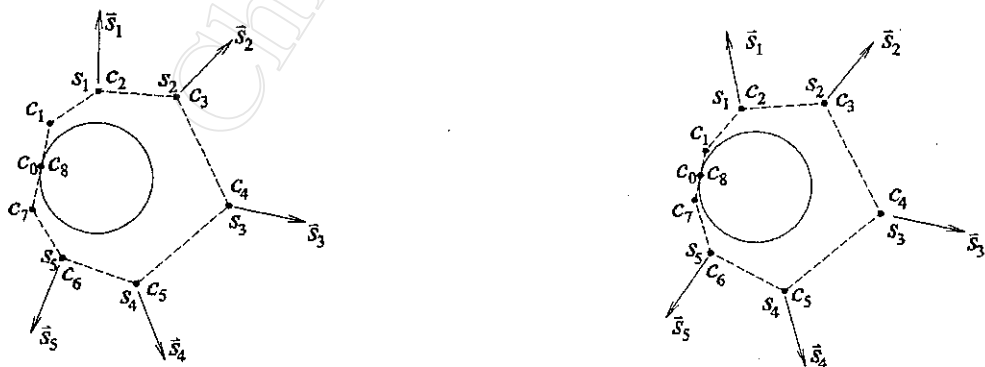
ดังแสดงในรูปที่ 4.37(ค) สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบปี-สโพลน์มีทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบ s_1, s_2, s_3, s_4 และ s_5 ทำมุม $99.1^\circ, 49.7^\circ, 347.1^\circ, 284.5^\circ$ และ 235.2° เทียบกับแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.37(ง) และกำหนดให้จุดควบคุม c_0, c_1, c_7 และ c_8 อยู่ที่ตำแหน่งเดิมเพื่อป้องกันการเลื่อนของรูในระหว่างการอพยพไหม้



(ก) รูปแบบชิ้นงานวิเคราะห์



(ข) โมเดลทางไฟไนต์อีลิเมนต์



(ค) ตำแหน่งจุดควบคุมและตัวแปรออกแบบของเส้นขอบเบซิเออร์ (ซ้าย) และบี-สไปไลน์ (ขวา)

รูปที่ 4.37 รูปร่างชิ้นงานและรูปแบบวิธีการวิเคราะห์คานฟัดเงาะรู

4.4.2 ผลการวิเคราะห์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไฟลน์แสดงขอบโค้งของชิ้นงาน

ความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง M และความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานที่แต่ละรอบการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าการออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์โดยวิเคราะห์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดให้รูปร่างชิ้นงานที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 117.3 MPa ที่รอบการคำนวณที่แปด ในขณะที่การออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์โดยวิเคราะห์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดและแปดให้รูปร่างชิ้นงานที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดเท่ากับ 109.6 และ 116.5 MPa ที่รอบการคำนวณที่เจ็ดและสี่ตามลำดับ โดยภายหลังการนำรูปร่างชิ้นงานของการออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดโดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์มาวิเคราะห์ใหม่ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดพบว่าความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 117.8 MPa ดังนั้นการออปติไมซ์ทั้งสามกรณีสามารถลดค่าความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานได้ 9.7, 13.2 และ 14.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

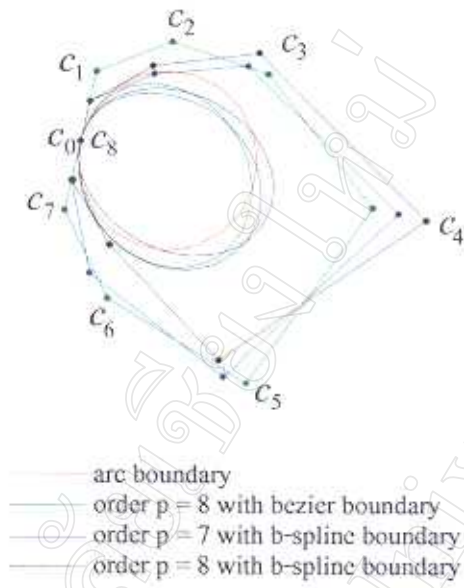
จากรายละเอียดการออปติไมซ์ในตารางที่ 4.8 พบว่ารูปร่างชิ้นงานสุดท้ายของการออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไฟลน์มีค่าความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกัน และพบว่าการออปติไมซ์โดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์และวิเคราะห์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดให้รูปร่างชิ้นงานที่มีค่าความเค้น von Mises มากสุดมีค่าต่ำสุดและใช้รอบการคำนวณที่น้อยกว่า นอกจากนี้พบว่า ตำแหน่งบนชิ้นงานที่ค่าความเค้น von Mises มากสุดภายหลังจากการออปติไมซ์อยู่ที่ตำแหน่ง Q ซึ่งเป็นตำแหน่งบนคานที่ยึดติดกับผนังด้านบนดังแสดงในรูปที่ 4.37(ก) ดังนั้น การปรับแต่งรูปร่างขอบโค้งจึงไม่สามารถลดค่าความเค้น von Mises มากสุดของชิ้นงานลงได้อีกเนื่องจากชิ้นงานมีสภาวะขอบคงเดิม นั่นคือ พื้นที่หน้าตัดที่จุดยึดมีขนาดเท่าเดิมและแรงกระทำมีขนาดคงที่

รูปร่างของเส้นขอบของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.38 พบว่ารูปร่างเส้นขอบของการออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ และการออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ดและแปดโดยใช้เส้นขอบบี-สไฟลน์มีรูปร่างที่แตกต่างกัน แต่จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่าความเค้นของชิ้นงานทั้งสามกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงนำรูปร่างชิ้นงานของการออปติไมซ์ทั้งสามกรณีมาวิเคราะห์เทียบกับวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชันเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของความเค้น von Mises มากสุดและตำแหน่งที่เกิดบนชิ้นงานรวมถึงลักษณะการกระจายความเค้นบนชิ้นงานโดยใช้จำนวนอีลิเมนต์เท่ากับ 20199, 20228 และ 20212 อีลิเมนต์ตามลำดับ และมีองศาอิสระของการคำนวณเท่ากับ 41198, 41258 และ 41228 องศาอิสระตามลำดับ พบว่ามีค่าความเค้น von Mises ของออปติไมซ์ทั้งสามกรณีมีค่าความเค้นแตกต่างกัน 4.9, 4.8 และ 4.8 เปอร์เซ็นต์

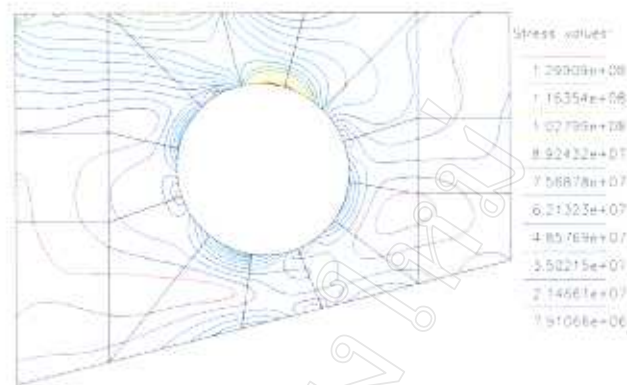
ตามลำดับ โดยภาพแสดงเส้นระดับความเค้นของชิ้นงานก่อนและหลังการอพทไมซ์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชันและหลังการอพทไมซ์ที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชันของชิ้นงานทั้งสามกรณีแสดงดังรูปที่ 4.39 ถึง 4.41 ตามลำดับ

ตาราง 4.8 ความเค้น von Mises ที่รอบการคำนวณต่างๆ ของการออฟทีไมซ์โดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์และบี-สไปไลน์ของการวิเคราะห์ฐานผังรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

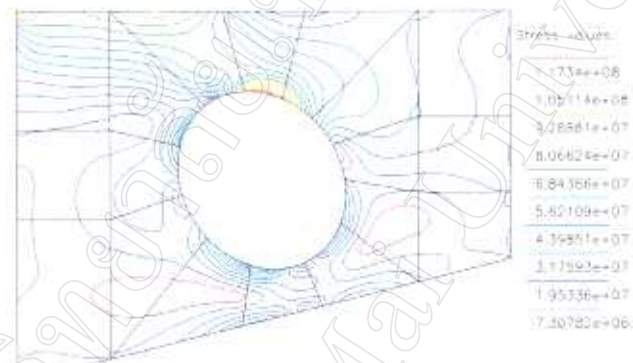
รอบการคำนวณที่	ความเค้น von Mises (MPa)					
	วิเคราะห์ด้วยเส้นขอบเบซิเออร์และกำลัง $p=8$		วิเคราะห์ด้วยเส้นขอบบี-สไปไลน์และกำลัง $p=7$		วิเคราะห์ด้วยเส้นขอบบี-สไปไลน์และกำลัง $p=8$	
	ที่ตำแหน่ง M	ค่ามากที่สุด	ที่ตำแหน่ง M	ค่ามากที่สุด	ที่ตำแหน่ง M	ค่ามากที่สุด
0	129.9	129.9	135.7	135.7	136.4	136.4
1	126.5	129.4	131.4	134.8	132.0	135.6
2	97.3	122.8	96.1	124.7	95.4	125.1
3	93.0	122.6	82.8	120.8	82.1	121.5
4	96.4	126.7	66.6	111.5	67.5	116.5
5	93.5	123.4	67.4	113.0	-	-
6	89.8	122.2	59.9	109.9	-	-
7	85.9	122.3	58.2	109.6	-	-
8	74.4	117.3	-	-	-	-
วิเคราะห์ด้วยกำลัง $p=8$	-	-	-	117.8	-	-



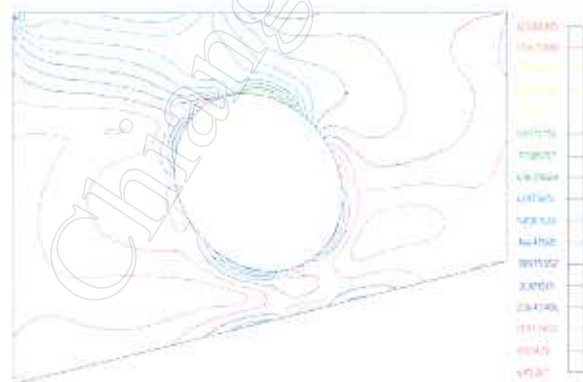
รูปที่ 4.38 รูปร่างเส้นขอบของรูปที่เจาะบนคานฝังรูปสี่เหลี่ยมคางหมูก่อนและการอพยพไมซ์



(ก) ก่อนการอพทไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชัน

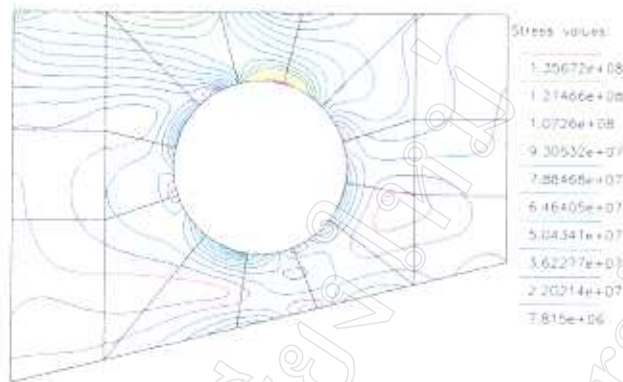


(ข) หลังการอพทไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชัน

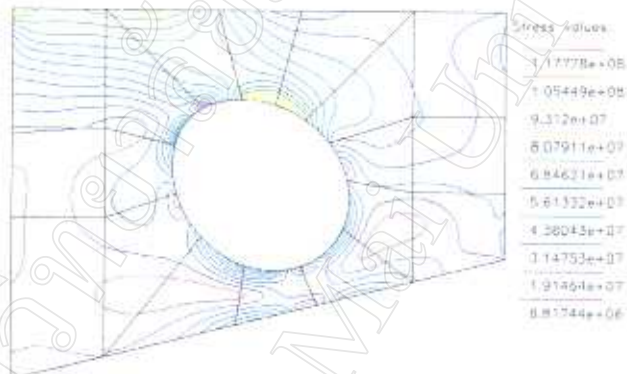


(ค) หลังการอพทไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน

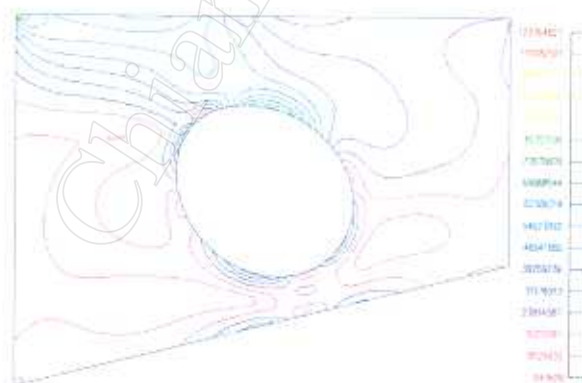
รูปที่ 4.39 เส้นระดับความเค้นก่อนและหลังการอพทไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปดโดยใช้เส้นขอบเบซิเออร์ของคานาฟ้งรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



(ก) ก่อนการออพติไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชัน

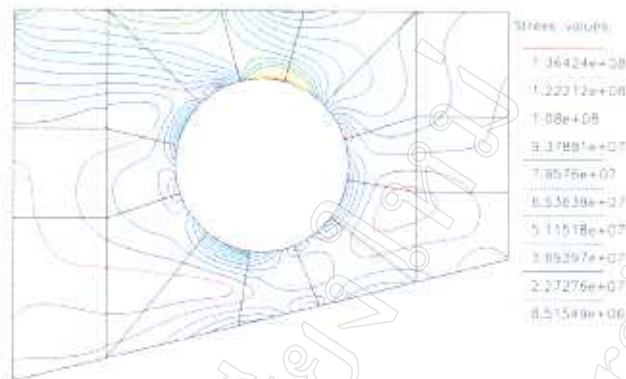


(ข) หลังการออพติไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชัน

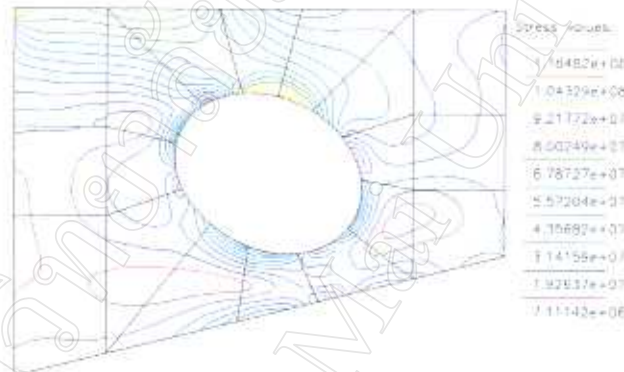


(ค) หลังการออพติไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน

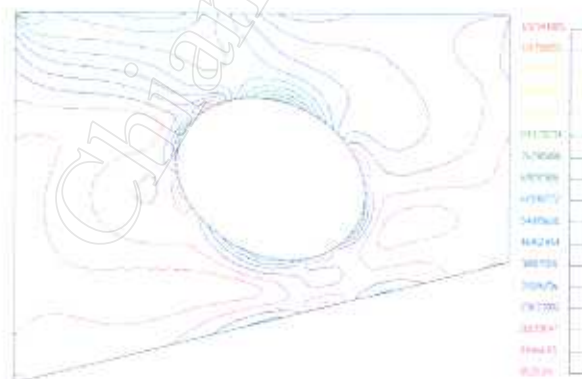
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบความเค้นก่อนและหลังการออพติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับเจ็ด โดยใช้เส้นขอบปี-สโพล์ของคานาผิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



(ก) ก่อนการออปติไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชัน



(ข) หลังการออปติไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ p เวอร์ชัน



(ค) หลังการออปติไมซ์โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ h เวอร์ชัน

รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบความเค้นก่อนและหลังการออปติไมซ์ด้วยกำลัง p เท่ากับแปด โดยใช้เส้นขอบปี-สโพล์ของคานาผิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู