

ภาคผนวก ก

การคำนวณความเค้นของชิ้นงานตัวอย่าง

ก.1 การคำนวณความเค้นมากที่สุดของแผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกน

แผ่นกว้างเจาะรูรับแรงดึงด้านข้างในแนวแกนเพียงด้านเดียวซึ่งทำให้เกิดความเค้นดึงกระจายสม่ำเสมอ σ_0 โดยกำหนดเงื่อนไขคือ ขนาดของรูมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของแผ่นกว้างแต่ต้องมีขนาดไม่น้อยกว่าความหนาของแผ่น สำหรับแผ่นกว้างเจาะรูรัศมี b และมีความเค้นดึงกระทำขนาด σ_0 ดังแสดงในรูปที่ ก.1 มีความเค้นในชิ้นงานซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ (Cook and Young, 1985)

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - 4 \frac{b^2}{r^2} + 3 \frac{b^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_0}{2} \left(-1 - 3 \frac{b^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_0}{2} \left(-1 - 2 \frac{b^2}{r^2} + 3 \frac{b^4}{r^4} \right) \sin 2\theta\end{aligned}$$

โดยที่ r คือตำแหน่งบนชิ้นงานที่ห่างจากจุดศูนย์กลางของรูและ $r \geq b$ โดยค่าความเค้นมากที่สุดจะอยู่ที่ขอบโค้งของรู และเมื่อพิจารณาสมการข้างต้นเมื่อ $r = b$ พบว่าความเค้นมากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง $\theta = 90^\circ$ หรือที่ตำแหน่ง M โดยมีค่าเท่ากับ $3\sigma_0$ มีทิศสัมผัสกับเส้นขอบของรูและเป็นความเค้นดึง ในขณะที่ความเค้นที่ตำแหน่ง W มีค่าเท่ากับ σ_0 มีทิศสัมผัสวงกลมและเป็นความเค้นกด

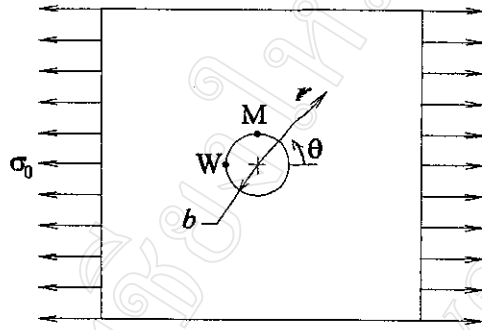
ในกรณีแผ่นกว้างเจาะรูที่รับแรงดึงในแนวแกนทั้งสองด้านโดยแรงทั้งสองมีสัดส่วนเป็นสองเท่าซึ่งกันและกันซึ่งทำให้เกิดความเค้นดึงกระจายสม่ำเสมอ σ_0 และ $\frac{\sigma_0}{2}$ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ ก.2 โดยความเค้นภายในชิ้นงานคำนวณได้โดยใช้วิธีซูเปอร์โพสิชันของความเค้นอันเนื่องมาจากแรงในแต่ละด้าน ดังนั้นความเค้นที่ตำแหน่ง M คำนวณได้จากผลรวมของความเค้นดึงเนื่องจากค่าความเค้น σ_0 และความเค้นกดเนื่องจากค่าความเค้น $\frac{\sigma_0}{2}$ ดังนี้

$$(\sigma_\theta)_M = 3\sigma_0 - \frac{\sigma_0}{2} = \frac{5}{2}\sigma_0$$

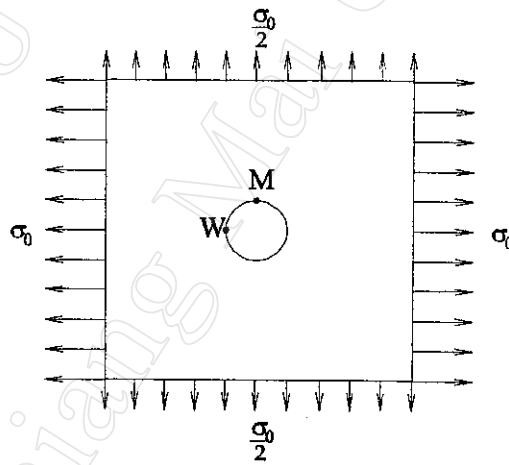
ในทำนองเดียวกันค่าความเค้น von Mises ที่ตำแหน่ง W คือ

$$(\sigma_{\theta})_W = \frac{3}{2}\sigma_0 - \sigma_0 = \frac{1}{2}\sigma_0$$

ดังนั้นสำหรับแผ่นกว้างรับแรงดึงทั้งสองด้านในแนวแกนจะมีความเค้นมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง M มีค่าเท่ากับ $\frac{5}{2}\sigma_0$ และเป็นความเค้นดึง



รูปที่ ก.1 แผ่นกว้างเจาะรูรัศมี b รับความเค้นดึงในแนวแกนเพียงด้านเดียว



รูปที่ ก.2 แผ่นกว้างเจาะรูรับความเค้นดึงในแนวแกนทั้งสองด้าน

ก.2 การคำนวณความเค้นมากที่สุดของชิ้นงานรูปตัวยู

ชิ้นงานรูปตัวยูที่มีแรงดึงกระจายที่ปลายทั้งสองข้างดังแสดงในรูปที่ ก.3 โดยตำแหน่งที่เกิดความเค้นมากที่สุดอยู่ที่ขอบ โคง์งของชิ้นงาน ดังนั้นการพิจารณาค่าความเค้นมากที่สุดจะเลือกพิจารณาที่ตำแหน่ง W และ M ซึ่งมีค่าความเค้นหนาแน่นของความเค้นค้ำเท่ากันและมีค่าเท่ากับ 2.38 (Young, 1989) โดยแรงที่กระทำเป็นแรงกระทำที่จุดเดียว ดังนั้นในการคำนวณจะกำหนดให้แรงกระจายที่ปลายชิ้นงานเป็นแรงกระทำที่จุดเดียวและมีตำแหน่งอยู่ที่กึ่งกลางของพื้นที่ที่แรงกระทำ รูปแบบการวิเคราะห์ชิ้นงานแสดงดังรูปที่ ก.4 และคำนวณความเค้นที่ตำแหน่ง W และ M ได้ดังนี้

ความเค้นที่ตำแหน่ง W คำนวณจากความสัมพันธ์ดังนี้

$$(\sigma)_W = K \frac{Pl \frac{w}{2}}{I}$$

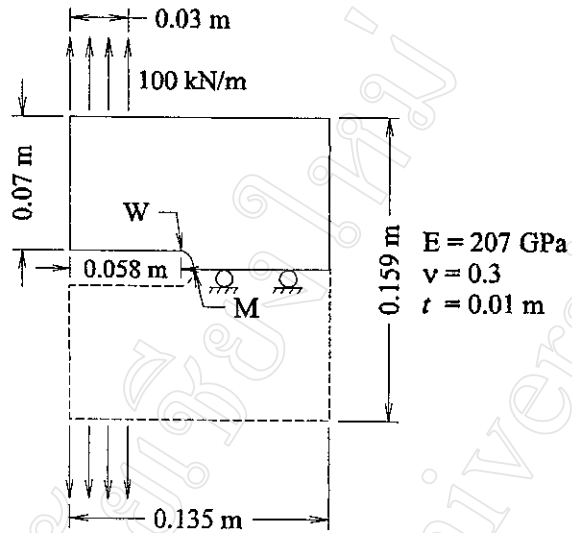
เมื่อ I คือ โมเมนต์ของอินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดรอบแกนสะเทินและมีค่าเท่ากับ $\frac{tw^3}{12}$ และเมื่อแทนค่าของ $K = 2.38$, $P = 3 \text{ kN}$, $w = 0.07 \text{ m}$, $l = 0.043 \text{ m}$ และ $t = 0.01 \text{ m}$ จะได้ $(\sigma)_W$ เท่ากับ 37.7 MPa และเป็นความเค้นดึง

ความเค้นที่ตำแหน่ง M คำนวณจากความสัมพันธ์ดังนี้

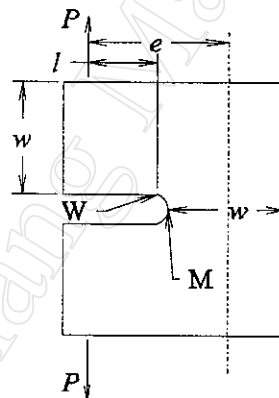
$$(\sigma)_M = K \frac{Pe \frac{w}{2}}{I} + \frac{P}{wt}$$

เมื่อแทนค่าของ $K = 2.38$, $P = 3 \text{ kN}$, $w = 0.07 \text{ m}$, $e = 0.085 \text{ m}$ และ $t = 0.01 \text{ m}$ จะได้ $(\sigma)_M$ เท่ากับ 78.3 MPa และเป็นความเค้นดึง

ดังนั้น ชิ้นงานรูปตัวยูมีความเค้นมากที่สุดที่ตำแหน่ง M มีค่าเท่ากับ 78.3 MPa และเป็นความเค้นดึง



รูปที่ ก.3 ชิ้นงานรูปตัวยูที่มีแรงดึงที่ปลายทั้งสองข้าง



รูปที่ ก.4 รูปแบบการวิเคราะห์ชิ้นงานของชิ้นงานรูปตัวยู

ภาคผนวก ข

เมตริกซ์เบซิเอร์และเมตริกซ์ปี-สโพลน์

ข.1 เมตริกซ์เบซิเอร์

เมตริกซ์เบซิเอร์ในสมการ (2.18) ที่คำนวณ โดยกระจายเทอมฟังก์ชันเบสอันดับคี่ของสมการเส้นขอบเบซิเอร์ในสมการ (2.15) ตามจำนวนของจุดควบคุมที่ใช้สร้างเส้นขอบแสดงดังนี้

- จุดควบคุม 3 จุด

$$\chi_{BEZ} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- จุดควบคุม 4 จุด

$$\chi_{BEZ} = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- จุดควบคุม 5 จุด

$$\chi_{BEZ} = \begin{bmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ -4 & 12 & -12 & 4 & 0 \\ 6 & -12 & 6 & 0 & 0 \\ -4 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- จุดควม 6 จุด

$$\chi_{BEZ} = \begin{bmatrix} -1 & 5 & -10 & 10 & -5 & 1 \\ 5 & -20 & 30 & -20 & 5 & 0 \\ -10 & 30 & -30 & 10 & 0 & 0 \\ 10 & -20 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- จุดควม 7 จุด

$$\chi_{BEZ} = \begin{bmatrix} 1 & -6 & 15 & -20 & 15 & -6 & 1 \\ -6 & 30 & -60 & 60 & -30 & 6 & 0 \\ 15 & -60 & 90 & -60 & 15 & 0 & 0 \\ -20 & 60 & -60 & 20 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & -30 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- จุดควม 8 จุด

$$\chi_{BEZ} = \begin{bmatrix} -1 & 7 & -21 & 35 & -35 & 21 & -7 & 1 \\ 7 & -42 & 105 & -140 & 105 & -42 & 7 & 0 \\ -21 & 105 & -210 & 210 & -105 & 21 & 0 & 0 \\ 35 & -140 & 210 & -140 & 35 & 0 & 0 & 0 \\ -35 & 105 & -105 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 21 & -42 & 21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -7 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- จุดควบคุม 9 จุด

$$X_{BEZ} = \begin{bmatrix} 1 & -8 & 28 & -56 & 70 & -56 & 28 & -8 & 1 \\ -8 & 56 & -168 & 280 & -280 & 168 & -56 & 8 & 0 \\ 28 & -168 & 420 & -560 & 420 & -168 & 28 & 0 & 0 \\ -56 & 280 & -560 & 560 & -280 & 56 & 0 & 0 & 0 \\ 70 & -280 & 420 & -280 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -56 & 168 & -168 & 56 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 28 & -56 & 28 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ข.2 เมตริกซ์บี-สไฟลน์

เมตริกซ์บี-สไฟลน์ในสมการ (2.24) ที่คำนวณโดยกระจายเทอมฟังก์ชันเบสอันดับของสมการเส้นขอบบี-สไฟลน์ในสมการ (2.20) ตามจำนวนของจุดควบคุมที่ใช้สร้างเส้นขอบแสดงดังนี้

- จุดควบคุม 4 จุด

$$X_{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ -2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$X_{B2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{3}{2} & 1 \\ 0 & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & 1 \\ 0 & -2 & 4 & -2 \\ 0 & 2 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

-จุดควบคุม 5 จุด

$$X_{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & \frac{7}{4} & -1 & \frac{1}{4} & 0 \\ 3 & -\frac{9}{2} & \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$X_{B2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{4} & 1 & \frac{-7}{4} & 1 \\ 0 & \frac{3}{2} & \frac{-9}{2} & 6 & -3 \\ 0 & -3 & 6 & -6 & 3 \\ 0 & 2 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

- จุดควมคุม 6 จุด

$$X_{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{-15}{8} & \frac{11}{8} & \frac{-5}{8} & \frac{1}{8} & 0 \\ -4 & 7 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 6 & -9 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$X_{B2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{8} & \frac{-5}{8} & \frac{11}{8} & \frac{-15}{8} & 1 \\ 0 & -1 & 4 & -7 & 8 & -4 \\ 0 & 3 & -9 & 12 & -12 & 6 \\ 0 & -4 & 8 & -8 & 8 & -4 \\ 0 & 2 & -2 & 2 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

- จุดควมคุม 7 จุด

$$X_{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & \frac{31}{16} & \frac{-13}{8} & 1 & \frac{-3}{8} & \frac{1}{16} & 0 \\ 5 & \frac{-78}{8} & \frac{55}{8} & \frac{-25}{8} & \frac{5}{8} & 0 & 0 \\ -10 & \frac{35}{2} & -10 & \frac{5}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 10 & -15 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$X_{B2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{16} & \frac{3}{8} & -1 & \frac{13}{8} & \frac{-31}{16} & 1 \\ 0 & \frac{5}{8} & \frac{-25}{8} & \frac{55}{8} & \frac{-75}{8} & 10 & -5 \\ 0 & \frac{-5}{2} & 10 & \frac{-35}{2} & 20 & -20 & 10 \\ 0 & 5 & -15 & 20 & -20 & 20 & -10 \\ 0 & -5 & 10 & -10 & 10 & -10 & 5 \\ 0 & 2 & -2 & 2 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

- จุดควบคุม 8 จุด

$$X_{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{-63}{32} & \frac{57}{32} & \frac{-21}{16} & \frac{11}{16} & \frac{-7}{32} & \frac{1}{32} & 0 \\ -6 & \frac{93}{8} & \frac{-39}{4} & 6 & \frac{-9}{4} & \frac{3}{8} & 0 & 0 \\ 15 & \frac{-225}{8} & \frac{165}{8} & \frac{-75}{8} & \frac{15}{8} & 0 & 0 & 0 \\ -20 & \frac{35}{2} & \frac{-20}{2} & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & \frac{-45}{2} & \frac{15}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$X_{B2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{32} & \frac{-7}{32} & \frac{11}{16} & \frac{-21}{16} & \frac{57}{32} & \frac{-63}{32} & 1 \\ 0 & \frac{-3}{8} & \frac{9}{4} & -6 & \frac{39}{4} & \frac{-93}{8} & 12 & -6 \\ 0 & \frac{15}{8} & \frac{-75}{8} & \frac{165}{8} & \frac{-225}{8} & 30 & -30 & 15 \\ 0 & \frac{-5}{8} & \frac{20}{8} & \frac{-35}{8} & \frac{40}{8} & \frac{-40}{8} & \frac{40}{8} & \frac{-20}{8} \\ 0 & \frac{15}{2} & \frac{-45}{2} & 30 & -30 & 30 & -30 & 15 \\ 0 & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & 12 & -12 & 12 & -12 & -6 \\ 0 & 2 & -2 & 2 & -2 & 2 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

-จุดควบคุม 9 จุด

$$X_{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & \frac{127}{64} & \frac{-15}{8} & \frac{99}{64} & -1 & \frac{29}{64} & \frac{-1}{8} & \frac{1}{64} & 0 \\ 7 & \frac{-441}{32} & \frac{399}{32} & \frac{-147}{16} & \frac{77}{16} & \frac{-49}{32} & \frac{7}{32} & 0 & 0 \\ -21 & \frac{651}{16} & \frac{-273}{8} & 21 & \frac{-63}{8} & \frac{21}{16} & 0 & 0 & 0 \\ 35 & \frac{-525}{8} & \frac{385}{8} & \frac{-175}{8} & \frac{35}{8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -35 & \frac{245}{4} & -35 & \frac{35}{4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 21 & \frac{-63}{2} & \frac{21}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -7 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$X_{B2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{64} & \frac{1}{8} & \frac{-29}{64} & 1 & \frac{-99}{64} & \frac{15}{8} & \frac{-127}{64} & 1 \\ 0 & \frac{7}{32} & \frac{-49}{32} & \frac{77}{16} & \frac{-147}{16} & \frac{399}{32} & \frac{-441}{32} & 14 & -7 \\ 0 & \frac{-21}{16} & \frac{63}{8} & -21 & \frac{273}{8} & \frac{-651}{16} & 42 & -42 & 21 \\ 0 & \frac{35}{8} & \frac{-175}{8} & \frac{385}{8} & \frac{-525}{8} & 70 & -70 & 70 & -35 \\ 0 & \frac{-35}{4} & 35 & \frac{-245}{4} & 70 & -70 & 70 & -70 & 35 \\ 0 & \frac{21}{2} & \frac{-63}{2} & 42 & -42 & 42 & -42 & 42 & -21 \\ 0 & -7 & 14 & -14 & 14 & -14 & 14 & -14 & 7 \\ 0 & 2 & -2 & 2 & -2 & 2 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

- จุดควบคุม 10 จุด

$$X_{B1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{-255}{128} & \frac{247}{128} & \frac{-219}{128} & \frac{163}{128} & \frac{-93}{128} & \frac{37}{128} & \frac{-9}{128} & \frac{1}{128} & 0 \\ -8 & \frac{127}{8} & -15 & \frac{99}{8} & -8 & \frac{29}{8} & -1 & \frac{1}{8} & 0 & 0 \\ 28 & \frac{-441}{8} & \frac{399}{8} & \frac{-147}{4} & \frac{77}{4} & \frac{-49}{8} & \frac{7}{8} & 0 & 0 & 0 \\ -56 & \frac{217}{2} & -91 & 56 & -21 & \frac{7}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 70 & \frac{-525}{4} & \frac{385}{4} & \frac{-175}{4} & \frac{35}{4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -56 & 98 & -56 & 14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 28 & -42 & 14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$X_{B2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{128} & \frac{-9}{128} & \frac{37}{128} & \frac{-93}{128} & \frac{163}{128} & \frac{-219}{128} & \frac{247}{128} & \frac{-255}{128} & 1 \\ 0 & \frac{-1}{8} & 1 & \frac{-29}{8} & 8 & \frac{-99}{8} & 15 & \frac{-127}{8} & 16 & -8 \\ 0 & \frac{7}{8} & \frac{-49}{8} & \frac{77}{4} & \frac{-147}{4} & \frac{399}{8} & \frac{-441}{8} & 56 & -56 & 28 \\ 0 & \frac{-7}{2} & 21 & -56 & 91 & \frac{-217}{2} & 112 & -112 & 112 & -56 \\ 0 & \frac{35}{4} & \frac{-175}{4} & \frac{385}{4} & \frac{-525}{4} & 140 & -140 & 140 & -140 & 70 \\ 0 & -14 & 56 & -98 & 112 & -112 & 112 & -112 & 112 & -56 \\ 0 & 14 & -42 & 56 & -56 & 56 & -56 & 56 & -56 & 28 \\ 0 & -8 & 16 & -16 & 16 & -16 & 16 & -16 & 16 & -8 \\ 0 & 2 & -2 & 2 & -2 & 2 & -2 & 2 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

ภาคผนวก ก

การใช้โปรแกรม p -FEM และรายละเอียดของไฟล์อินพุต

การใช้โปรแกรม p -FEM ผู้ใช้ต้องเขียนไฟล์อินพุตเพื่อแสดงรายละเอียดของชิ้นงานที่ทำการวิเคราะห์ป้อนเข้าสู่โปรแกรม โดยชื่อไฟล์จะกำหนดโดยผู้ใช้และกำหนดให้มีนามสกุล .dat ไฟล์อินพุตประกอบด้วยหลายส่วน ในแต่ละส่วนจะขึ้นต้นด้วยชื่อของส่วนนั้นๆ รายละเอียดของไฟล์อินพุตแสดงดังนี้

ก.1 ชื่อและลักษณะของชิ้นงาน

ชื่อและลักษณะของชิ้นงานแสดงในบรรทัดแรกของไฟล์อินพุตและมีความยาวไม่เกิน 255 ตัวอักษร

ก.2 รายละเอียดโหนด

ประกอบด้วยจำนวนของโหนดที่มุมอิลิเมนต์ภายในตาข่ายอิลิเมนต์ หมายเลขโหนดและตำแหน่งพิกัด x , y และ z รายละเอียดโหนดมีรูปแบบดังนี้

NODE			
N			
1	x	y	z
2	x	y	z
.	.	.	.
n	x	y	z

โดยที่ n คือจำนวนของโหนดที่มุมของอิลิเมนต์ หมายเลข 1, 2,..., n ของแต่ละบรรทัดหมายถึงหมายเลขของโหนด x , y และ z คือพิกัดของโหนดในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์โจทย์ปัญหาในสองมิติให้ใส่ค่า 0.0 ในตำแหน่งพิกัด z

ค.3 รายละเอียดโหนดของขอบโค้ง

ประกอบด้วยจำนวนของโหนดที่ใช้สำหรับสร้างขอบโค้งเบซิเออร์และบี-สไปไลน์ของขอบชิ้นงาน หมายเลขโหนดของขอบโค้งและตำแหน่งพิกัด x , y และ z โดยรายละเอียดโหนดของขอบโค้งใช้เฉพาะกรณีโจทย์ปัญหาที่วิเคราะห์ขอบโค้งด้วยเส้นขอบเบซิเออร์และบี-สไปไลน์ในสองมิติเท่านั้น รายละเอียดโหนดของขอบโค้งมีรูปแบบดังนี้

CURVE_NODE

nCN

1 x y z

2 x y z

. . .

nCN x y z

โดยที่ nCN คือจำนวนโหนดของขอบโค้ง หมายเลข 1, 2,..., n ของแต่ละบรรทัดหมายถึงหมายเลขของโหนดของขอบโค้ง x , y และ z คือพิกัดของ โหนดของขอบโค้งในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ

ค.4 รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ

ประกอบด้วยจำนวนของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์และรายละเอียดของคุณสมบัติของวัสดุทั้งหมด รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุมีรูปแบบดังนี้

MATERIAL

nM

1 E v t

2 E v t

. . .

nM E v t

โดยที่ nM คือจำนวนของวัสดุทั้งหมด หมายเลข 1, 2,..., nM ของแต่ละบรรทัดหมายถึงหมายเลขของคุณสมบัติของวัสดุ E คือค่าโมดูลัสของยังค์ v คือค่าอัตราส่วนปัวซอง และ t คือความหนาของอิเลเมนต์ในสองมิติ สำหรับการวิเคราะห์โจทย์ปัญหาในสามมิติให้ใส่ค่า 0.0 ในตำแหน่ง t

ค.5 รายละเอียดของอีลิเมนต์

ประกอบด้วยชนิดของอีลิเมนต์ จำนวนของอีลิเมนต์ในตาข่ายอีลิเมนต์ วัสดุที่ใช้และหมายเลขโหนดที่มุม รายละเอียดของอีลิเมนต์มีรูปแบบดังนี้

```

ELEMENT
elem_type
nE
1   m   n1   n2   ...   nn
2   m   n1   n2   ...   nn
...
nE  m   n1   n2   ...   nn

```

โดยที่ elem_type แบ่งออกเป็น PLANE_STRESS, PLANE_STRAIN หรือ BRICK nE คือจำนวนของอีลิเมนต์ทั้งหมด หมายเลข 1, 2,..., n ของแต่ละบรรทัดหมายถึงหมายเลขของอีลิเมนต์ m คือหมายเลขของวัสดุ โดยอ้างอิงจากรายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุ n1 n2 ... nn คือหมายเลขของโหนดที่มุมอีลิเมนต์ซึ่งอ้างอิงจากรายละเอียดโหนด การวิเคราะห์ชิ้นงานในสองมิติจะใช้อีลิเมนต์สี่เหลี่ยมซึ่งประกอบด้วย 4 โหนด และการวิเคราะห์ในสามมิติจะใช้อีลิเมนต์แปดเหลี่ยมซึ่งประกอบด้วย 8 โหนด

ค.6 รายละเอียดเส้นขอบโค้งวงกลม

ประกอบด้วยจำนวนของขอบโค้งในตาข่ายอีลิเมนต์ และรายละเอียดของขอบโค้งทั้งหมด โดยรายละเอียดขอบโค้งวงกลมใช้เฉพาะกรณีโจทย์ปัญหาที่วิเคราะห์ขอบโค้งของชิ้นงานด้วยเส้นขอบที่เป็นส่วนโค้งวงกลมในสองมิติเท่านั้น รายละเอียดขอบโค้งวงกลมมีรูปแบบดังนี้

```

CURVE_EDGE
nC
nd1   nd2   xC   yC
nd1   nd2   xC   yC
...
nd1   nd2   xC   yC

```

โดยที่ nC คือจำนวนของขอบโค้งทั้งหมด nd1 และ nd2 คือหมายเลขของโหนดที่ปลายขอบโค้งของอีลิเมนต์โดยอ้างอิงจากรายละเอียดโหนด xC และ yC คือพิกัดของจุดศูนย์กลางของขอบโค้ง

ค.7 รายละเอียดเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์

ประกอบด้วยจำนวนเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์ ชนิดของเส้นขอบ หมายเลขโหนดและโหนดของขอบโค้ง โดยรายละเอียดของเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์ใช้เฉพาะกรณีโจทย์ปัญหาที่วิเคราะห์ขอบโค้งของชิ้นงานด้วยเส้นขอบเบซิเออร์หรือเส้นขอบบี-สไปไลน์ในสองมิติเท่านั้น รายละเอียดเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์มีรูปแบบดังนี้

```

SPLINE_CURVE
nS
spline_type
nd1 nd2 ... ndn cnd1 cnd2 ... cndn
...
spline_type
nd1 nd2 ... ndn cnd1 cnd2 ... cndn

```

โดยที่ nS คือจำนวนของเส้นขอบเบซิเออร์และเส้นขอบบี-สไปไลน์ทั้งหมด spline_type คือชนิดของเส้นขอบได้แก่ BEZIER_EDGE หรือ B_SPLINE_EDGE nN คือจำนวนโหนดของขอบโค้งที่เส้นขอบลากผ่าน nCN คือจำนวนโหนดของขอบโค้งที่ใช้สร้างเส้นขอบ nd1 nd2 ... ndn คือลำดับของหมายเลขของโหนดที่เส้นขอบลากผ่านโดยอ้างอิงจากรายละเอียดโหนด และ cnd1 cnd2 ... cndn คือลำดับหมายเลขของโหนดของขอบโค้งที่ใช้สร้างเส้นขอบโดยอ้างอิงจากรายละเอียดโหนดของขอบโค้ง

ค.8 รายละเอียดแรงกระทำที่โหนด

ประกอบด้วยจำนวนของแรงภายนอกทั้งหมด หมายเลขโหนด ทิศทางและขนาดของแรง โดยแรงที่กระทำเป็นแรงกระทำที่โหนดที่มุมของอิเลิเมนต์ รายละเอียดของแรงกระทำที่โหนดมีรูปแบบดังนี้

```

NODAL_LOAD
nL
nd dir value
...
nd dir value

```

โดยที่ nL คือจำนวนของแรงกระทำที่โหนดทั้งหมด nd คือหมายเลขของโหนดที่แรงกระทำ dir คือทิศทางของแรง โดยแบ่งออกเป็น 1, 2 หรือ 3 สำหรับแรงกระทำในทิศทาง x , y และ z ตามลำดับ และ $value$ คือขนาดของแรงที่กระทำ

ค.9 รายละเอียดแรงกระจายสม่ำเสมอบนขอบอิลิเมนต์ในกรณีโจทย์ปัญหาสองมิติ

ประกอบด้วยจำนวนของแรงกระจายที่กระทำบนขอบอิลิเมนต์ หมายเลขโหนดที่ปลายขอบอิลิเมนต์ที่แรงกระทำ ทิศทางและขนาดของแรง โดยแรงกระจายกระทำที่ขอบของอิลิเมนต์ เป็นการวิเคราะห์โจทย์ปัญหาในสองมิติเท่านั้น รายละเอียดแรงกระจายสม่ำเสมอบนขอบอิลิเมนต์มีรูปแบบดังนี้

```
DISTRIBUTED_LOAD
nD
nd1    nd2    dir    value
...
nd1    nd2    dir    value
```

โดยที่ nD คือจำนวนของแรงกระจายที่กระทำที่ขอบอิลิเมนต์ทั้งหมด $nd1$ และ $nd2$ คือหมายเลขของโหนดที่ปลายของขอบอิลิเมนต์ที่แรงกระทำ dir คือหมายเลขแสดงทิศทางของแรง โดยแบ่งออกเป็น 1 สำหรับแรงกระทำตั้งฉากกับขอบอิลิเมนต์ หรือ 0 สำหรับแรงกระทำสัมผัสกับขอบอิลิเมนต์ $value$ คือขนาดของแรงที่กระทำโดยสำหรับแรงตั้งฉาก $value$ มีค่าเป็นบวก เมื่อทิศทางตั้งฉากจากอิลิเมนต์ และสำหรับแรงสัมผัส $value$ มีค่าเป็นบวกเมื่อแรงมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ค.10 รายละเอียดของแรงกระจายสม่ำเสมอบนพื้นผิวของอิลิเมนต์ในกรณีโจทย์ปัญหาสามมิติ

ประกอบด้วยจำนวนแรงกระจายที่กระทำบนพื้นผิวของอิลิเมนต์ หมายเลขโหนดที่มุมของพื้นผิวอิลิเมนต์ ทิศทางและขนาดของแรง รายละเอียดของแรงกระจายสม่ำเสมอบนพื้นผิวอิลิเมนต์ มีรูปแบบดังนี้

```
FACE_UNIFORM_LOAD
nF
nd1    nd2    nd3    nd4    dir    value
...
nd1    nd2    nd3    nd4    dir    value
```

โดยที่ nF คือจำนวนของแรงกระจายที่กระทำบนพื้นผิวอิลิเมนต์ทั้งหมด $nd1$ $nd2$ $nd3$ $nd4$ คือหมายเลขโหนดที่มุมของพื้นผิวอิลิเมนต์ที่แรงกระทำ dir คือหมายเลขแสดงทิศทางของแรง โดยแบ่งออกเป็น 1 สำหรับแรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวของอิลิเมนต์ หรือ 0 สำหรับแรงที่กระทำสัมผัสกับพื้นผิว (ในกรณีนี้โปรแกรมยังไม่รองรับแรงสัมผัส) $value$ คือขนาดของแรงที่กระทำโดย $value$ มีค่าเป็นบวกเมื่อแรงกระทำในทิศทางออกนอกอิลิเมนต์

ค.11 รายละเอียดคอนสเตรนท์ที่โหนด[†]

ประกอบด้วยจำนวนของคอนสเตรนท์ที่โหนด หมายเลขเลขโหนด ทิศทางและขนาดของคอนสเตรนท์ รายละเอียดคอนสเตรนท์ที่โหนดมีรูปแบบดังนี้

```
CONSTRAINT
nR
nd    dir    value
...
nd    dir    value
```

โดยที่ nR คือจำนวนของคอนสเตรนท์ทั้งหมด nD คือหมายเลขโหนด dir คือหมายเลขแสดงทิศทางของคอนสเตรนท์ โดยแบ่งออกเป็น 1, 2 หรือ 3 สำหรับการยึดในทิศทาง x , y หรือ z ตามลำดับ $value$ คือขนาดของคอนสเตรนท์โดย $value$ มีค่าเท่ากับ 0.0 เมื่อบังคับให้โหนดไม่เคลื่อนที่ในทิศทางที่กำหนด ซึ่งในขณะนี้โปรแกรมถูกทดสอบเฉพาะกรณี $value$ เท่ากับ 0.0 เท่านั้น

ค.12 พารามิเตอร์สำหรับควบคุมผลลัพธ์

ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับควบคุมในขั้นตอนการปรับแต่ง รายละเอียดของพารามิเตอร์สำหรับควบคุมผลลัพธ์มีรูปแบบดังนี้

```
SOLUTION_PARAMETER
indicator_type
start_p adaptivity min_error n_refinement p_max
```

[†] เงื่อนไขคอนสเตรนท์ของรายละเอียดคอนสเตรนท์ที่โหนดเป็นเงื่อนไขการบังคับไม่ให้โหนดเคลื่อนที่ ซึ่งไม่ใช่เงื่อนไขคอนสเตรนท์ในการออฟทิไมซ์รูปร่าง

โดยที่ `indicator_type` แบ่งออกเป็น `ELEMENT_RESIDUAL` หรือ `STRESS_ERROR`
`start_p` คือกำลัง p เริ่มต้นของขอบอิลิเมนต์ที่ใช้ในขั้นตอนการปรับแต่งด้วยอันดับ p ที่ไม่
 สมำเสมอ `adaptivity` คือค่าพารามิเตอร์ของการปรับแต่ง (γ) ซึ่งใช้ในการควบคุมความเร็ว
 ของการลู่เข้าโดย `adaptivity` มีค่าเท่ากับ 0.0 ในกรณีการปรับแต่งด้วยกำลัง p ที่สมำเสมอ
`min_error` คือขนาดจำกัดค่าผิดพลาดของการลู่เข้าสำหรับกระบวนการปรับแต่งในขั้นตอนสุดท้าย
 โดย `min_error` มีค่าเท่ากับ 0.0 เมื่อไม่ใช่เงื่อนไข `n_refinement` คือจำนวนรอบ
 การคำนวณของการปรับแต่ง `p_max` คือกำลัง p สูงสุดของขอบอิลิเมนต์ในขั้นตอนการปรับแต่ง
 โดย `p_max` มากสุดมีค่าเท่ากับ 8 สำหรับอิลิเมนต์ในสองมิติ และมีค่าเท่ากับ 6 สำหรับอิลิเมนต์ใน
 สามมิติ

หมายเหตุ

- สำหรับการวิเคราะห์ด้วยกำลัง p สมำเสมอ พารามิเตอร์ข้างต้นที่ใช้ ได้แก่ `start_p`,
`n_refinement` และ `p_max` โดยที่ค่าของ `n_refinement` และ `p_max` ต้องมี
 ค่าเท่ากัน

- สำหรับการวิเคราะห์ด้วยกำลัง p ไม่สมำเสมอ `min_error` จะมีค่าตามอัตราส่วนของ
 ค่าผิดพลาดของความเค้นมากที่สุดต่อค่าความเค้น von Mises สมมูลมากที่สุดที่พบในตาข่ายอิลิเมนต์
 เมื่อค่าของ `indicator_type` เป็น `STRESS_ERROR` เท่านั้น

ค.13 ภาพแสดงเส้นระดับความเค้น

ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดลักษณะของภาพแสดงเส้นระดับความเค้น ซึ่งใน
 ขณะนี้โปรแกรมรองรับเฉพาะการแสดงผลการกระจายความเค้นในสองมิติเท่านั้น รายละเอียด
 ของภาพแสดงเส้นระดับความเค้นมีรูปแบบดังนี้

`STRESS_CONTOUR`
 Type

โดยที่ `type` แบ่งออกเป็น `X_STRESS`, `Y_STRESS`, `XY_SHEAR_STRESS`, `PRIN_STRESS_1`,
`PRIN_STRESS_2` หรือ `VON_MISES`

ค.14 พารามิเตอร์ของ PCG solver

ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดลักษณะการคำนวณในขั้นตอน PCG solver รายละเอียดพารามิเตอร์ของ PCG solver มีรูปแบบดังนี้

```
PCG_SOLVER_PARAMETER
n_iter    tolerance    final_tolerance
```

โดยที่ `n_iter` คือจำนวนรอบการคำนวณซ้ำมากสุดในขั้นตอนการคำนวณของกระบวนการ PCG solver `tolerance` และ `final_tolerance` คือขนาดเกณฑ์การรู้เข้าของการแก้ปัญหา โดยมีขนาดเท่ากับอัตราส่วนของเศษคงเหลือของทั้งระบบต่อขนาดของแรงภายนอก โดยที่ค่าของ `tolerance` ควรมีขนาดมากกว่าค่าของ `final_tolerance` โดยค่า `n_iter`, `tolerance` และ `final_tolerance` กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 500, 0.001 และ 0.00001 ตามลำดับในกรณีไม่ระบุรายละเอียดในหัวข้อนี้

ค.15 รายละเอียดการออฟทีไมซ์รูปร่าง

รายละเอียดการออฟทีไมซ์รูปร่างเป็นการปรับแต่งขอบโค้งของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่วิเคราะห์ต้องแสดงขอบโค้งของชิ้นงานด้วยเส้นขอบเบซิเออร์หรือเส้นขอบบี-สไปไลน์ ดังนั้น การออฟทีไมซ์รูปร่างต้องมีรายละเอียดโหนดของขอบโค้ง รายละเอียดเส้นขอบเบซิเออร์หรือเส้นขอบบี-สไปไลน์ และรายละเอียดการออฟทีไมซ์รูปร่าง โดยรายละเอียดการออฟทีไมซ์รูปร่างแสดงดังนี้

ค.15.1 การออฟทีไมซ์รูปร่าง

เป็นการเลือกใช้หรือไม่ใช้ขั้นตอนของการแก้ไขโจทย์ปัญหาการออฟทีไมซ์ โดยจะใช้ส่วนนี้เมื่อต้องการแก้ไขโจทย์ปัญหาการออฟทีไมซ์รูปร่าง ซึ่งในขณะนี้โปรแกรมรองรับเฉพาะการออฟทีไมซ์รูปร่างในสองมิติเท่านั้น การเลือกคำนวณการออฟทีไมซ์รูปร่างมีรูปแบบดังนี้

```
OPTIMIZATION
Status
```

โดยที่ `status` แบ่งออกเป็น ON หรือ OFF

ค.15.2 รายละเอียดตัวแปรออกแบบ

ประกอบด้วยจำนวนของตัวแปรออกแบบ หมายเลขโหนดของขอบโค้งและทิศทางการเคลื่อนที่ รายละเอียดตัวแปรออกแบบมีรูปแบบดังนี้

DESIGN_VARIABLE

nDV

cnd1 cnd2 cnd3 dir

...

cnd1 cnd2 cnd3 dir

โดยที่ nDV คือจำนวนของตัวแปรออกแบบ cnd1, cnd2 และ cnd3 คือหมายเลขโหนดของขอบโค้งที่กำหนดเป็นตัวแปรออกแบบโดย cnd2 และ cnd3 เท่ากับ 0 เมื่อกำหนดตัวแปรออกแบบเป็นการเคลื่อนที่ของโหนด cnd1 เพียงตัวเดียว dir คือทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวแปรออกแบบโดยกำหนดเป็นมุมมองค่าที่เทียบกับแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ค.15.3 เงื่อนไขคอนสเตรนซ์ของปริมาตรชิ้นงาน

เป็นการเลือกใช้หรือไม่ใช้เงื่อนไขคอนสเตรนซ์ของปริมาตรในขั้นตอนการอพทิมัลไรซ์รูปร่าง เงื่อนไขคอนสเตรนซ์ของปริมาตรมีรูปแบบดังนี้

VOLUME_FIXED

Status

โดยที่ status แบ่งออกเป็น ON หรือ OFF

ค.15.4 เกณฑ์การดูเข้าของคำตอบ

เป็นการกำหนดค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้เพื่อให้โปรแกรมหยุดการคำนวณ โดยมีรูปแบบดังนี้

CONVERGENCE_CRITERION

Stop_tolerance

โดยที่ Stop_tolerance คือค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้เพื่อให้โปรแกรมหยุดการคำนวณ

ค.16 การหยุดการคำนวณชั่วคราวในระหว่างการวิเคราะห์ชิ้นงาน

เป็นการหยุดการคำนวณชั่วคราวของการปรับแต่งเมื่อสิ้นสุดขั้นตอนของการปรับแต่งในแต่ละรอบการคำนวณ โดยพิมพ์ PAUSE ที่ท้ายไฟล์อินพุต โปรแกรมจะหยุดการคำนวณหลังจากการคำนวณการประมาณค่าผิดพลาด และรอรับคำสั่งเพื่อให้โปรแกรมทำงานต่อหรือจบการทำงานของกระบวนการปรับแต่ง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายไพฑูรย์ ลิ้มปิติพานิชย์

วัน เดือน ปี สถานที่ เกิด 20 กรกฎาคม 2519 จังหวัดเชียงใหม่

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนปิ่นสร้อยแยลส์วิทยาลัย
ปีการศึกษา 2533
สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2536
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2540

ทุนการศึกษา ทุนส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษเป็นอาจารย์ในสถานศึกษาของรัฐจาก
ทบวงมหาวิทยาลัย โดยมีมหาวิทยาลัยบูรพาเป็นต้นสังกัด
ปีการศึกษา 2542