

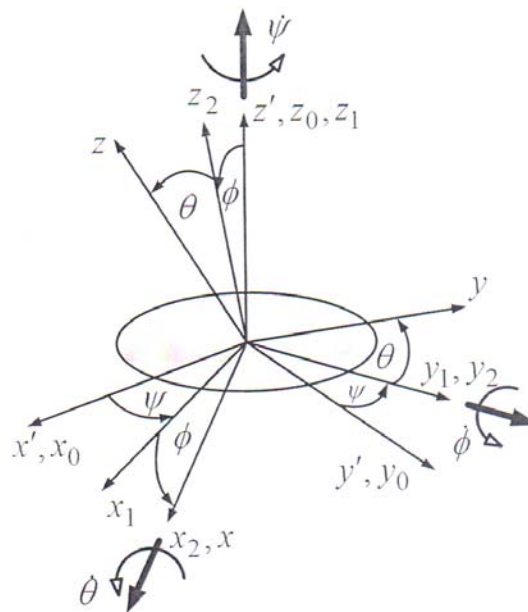
บทที่ 3

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบพื้นเฟืองตรง

3.1 บทนำ

วัตถุประสงค์ในบทนี้คือการพัฒนาารูปแบบพลวัตของวัตถุแข็งเกร็งในสามทิศทางของการขบกันของพื้นเฟืองตรง ซึ่งแต่ละมวลของเฟืองยอมให้มีการส่งถ่ายและหมุน ในการพลิกหมุนของวัตถุใช้รูปแบบของ มุมออยเลอร์ (Euler Angle) ในสมการการเคลื่อนที่ได้แสดงในรูปของ ออยเลอร์-นิวตัน แรงสัมผัสระหว่างเฟืองเป็นการประมาณโดยใช้วิธี PISE [10] รวมทั้ง แรงหน่วง และแรงเสียดทานที่เพิ่มเข้าในรูปแบบของการเคลื่อนที่ รวมทั้งวิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยใช้วิธีลูกกูดดา นำมารวมในกระบวนการนี้ จากหลักการในรูปแบบนี้ยึดเอาไปทำการประยุกต์ในระบบเฟืองตรง ที่ไม่มีการปรับแต่งและปรับแต่งฟันเพื่อทำการประเมินค่าแรงพลวัตที่ฟันเฟือง

3.2 การเคลื่อนที่เชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็ง [10]



รูปที่ 3.1 แสดงมุมของออยเลอร์ Z-Y-X [10]

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำการกำหนดการเคลื่อนที่ของวัตถุโดย มุมของออยเลอร์ ซึ่งมุมออยเลอร์ได้แสดงดังในรูป (3.1) ที่มีมุม φ, ϕ และ θ แสดงการพลิกมุมในวัตถุที่มี 3 แกน $x-y-z$ และเปลี่ยนไปเป็น $x'-y'-z'$ ซึ่งขนานกับแนวแกนคงที่ $X-Y-Z$ และจุดเริ่มต้นคือจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ ซึ่งจะทำการแปลงค่าต่างๆในโคออดิเนตอยู่ในรูปเมตริกซ์ ในลำดับแรก

กำหนดให้โคออดิเนต $x_0 - y_0 - z_0$ ซึ่งเริ่มต้นเท่ากับค่าโคออดิเนต $x' - y' - z'$ การหมุนผ่านมุม ψ ของ z' ได้มาซึ่งระบบโคออดิเนต $x_1 - y_1 - z_1$ ลำดับสอง การหมุนผ่านมุม ϕ ของแกน y_1 ได้มาซึ่งระบบโคออดิเนต $x_2 - y_2 - z_2$ และลำดับสุดท้ายวัตถุคงที่จะได้โคออดิเนต $x - y - z$ ซึ่งได้มาโดยการหมุน θ ของแกน x_2 ของระบบโคออดิเนต $x_2 - y_2 - z_2$ ซึ่งลำดับการเคลื่อนที่สามารถเขียนแทนได้ด้วย เมตริกซ์การเคลื่อนที่มุมออยเลอร์ ที่ $X - Y - Z$ ซึ่งจะได้

$$[R] = [R_{\psi, \phi, \theta}] = [R_{\theta, x_2}] [R_{\phi, y_1}] [R_{\psi, z'}] \quad (3.1)$$

เมื่อ $[R_{\psi, z'}]$, $[R_{\phi, y_1}]$ และ $[R_{\theta, x_2}]$ คือ เมตริกซ์การหมุนของ z' , y_1 และ x_2 ตามลำดับและสามารถเขียนได้ดังนี้

$$[R_{\psi, z'}] = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$[R_{\phi, y_1}] = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & -\sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[R_{\theta, x_2}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.2), (3.3) และ (3.4) แทนในสมการที่ (3.1) จะได้

$$[R] = \begin{bmatrix} C(\psi)C(\phi) & S(\psi)C(\phi) & -S(\phi) \\ -S(\psi)C(\theta) + C(\psi)S(\phi)S(\theta) & C(\psi)C(\theta) + S(\psi)S(\phi)S(\theta) & C(\phi)S(\theta) \\ S(\psi)S(\theta) + C(\psi)S(\phi)C(\theta) & -C(\psi)S(\theta) + S(\psi)S(\phi)C(\theta) & C(\phi)C(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} C(\psi) &= \cos(\psi), \quad S(\psi) = \sin(\psi) \\ C(\phi) &= \cos(\phi), \quad S(\phi) = \sin(\phi) \\ C(\theta) &= \cos(\theta), \quad S(\theta) = \sin(\theta) \end{aligned} \quad (3.6)$$

ส่วนหนึ่งลำดับมุมที่เลือกมาอธิบายการพลิกหมุนของวัตถุ ในลำดับต่อไปจะแสดงถึงความเร็วเชิงมุมสมบูรณ์ $\vec{\omega}^B$ ของวัตถุ ความเร็วเชิงมุมสมบูรณ์ของวัตถุสามารถแทนค่าด้วยผลรวมความเร็วเชิงมุมของทุกแกน

$$\vec{\omega}^B = \psi \vec{z}_1 + \dot{\phi} \vec{y}_2 + \dot{\theta} \vec{x} \quad (3.7)$$

เมื่อ $\psi, \dot{\phi}$ และ $\dot{\theta}$ คือการหมุนของแกน z_1, y_2 และ x โดยกำหนดดังรูป (3.1) เราสามารถเขียนในรูปเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\vec{z}_1$ ในรูปโคออดิเนตวัตถุยึดแน่นในแนว $x - y - z$ ดังนี้

$$\vec{z}_1 = \cos(\phi) \vec{z}_2 - \sin(\phi) \vec{x}_2 = \cos(\phi) \vec{z}_2 - \sin(\phi) \vec{x}$$

แต่ $\vec{z}_2 = \cos(\theta) \vec{z} + \sin(\theta) \vec{y}$

แทนค่าในสมการก่อนหน้านี้ จะได้

$$\vec{z}_1 = \cos(\phi) [\cos(\theta) \vec{z} + \sin(\theta) \vec{y}] - \sin(\phi) \vec{x} \quad (3.8)$$

จากรูป 3.1 จะได้ว่า

$$\vec{y}_2 = \cos(\theta) \vec{y} - \sin(\theta) \vec{z} \quad (3.9)$$

ทำการแทนค่าสมการที่ (3.8) และ (3.9) ลงในสมการที่ (3.7) จะได้ความเร็วเชิงมุมสมบูรณ์ดังนี้

$$\vec{\omega}^B = (\dot{\theta} - \psi \sin(\phi)) \vec{x} + (\psi \cos(\phi) \sin(\theta) + \dot{\phi} \cos(\theta)) \vec{y} + (\psi \cos(\phi) \cos(\theta) - \dot{\phi} \sin(\theta)) \vec{z} \quad (3.10)$$

เขียนในรูปเมตริกซ์ จะได้

$$\vec{\omega}^B = \begin{Bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} - \psi \sin(\phi) \\ \psi \cos(\phi) \sin(\theta) + \dot{\phi} \cos(\theta) \\ \psi \cos(\phi) \cos(\theta) - \dot{\phi} \sin(\theta) \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

หรือสามารถเขียนได้อีกรูปแบบ คือ

$$\bar{\omega}^B = \begin{bmatrix} -\sin(\phi) & 0 & 1 \\ \cos(\phi)\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ \cos(\phi)\cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} = [B]\{\dot{\Lambda}\} \quad (3.12)$$

เมื่อ $\dot{\Lambda}$ คืออนุพันธ์อันดับหนึ่งของมุมออยเลอร์ $\{\dot{\psi}, \dot{\phi}, \dot{\theta}\}^T$ โดยทำการ ดิฟ สมการ (3.12) ความเร่ง
สมบูรณ์ $\dot{\bar{\omega}}^B$ ที่ได้คือ

$$\dot{\bar{\omega}}^B = \{\dot{\omega}^B\} = [\dot{B}]\{\dot{\Lambda}\} + [B]\{\ddot{\Lambda}\} \quad (3.13)$$

เมื่อ $\ddot{\Lambda}$ คืออนุพันธ์อันดับสองของมุมออยเลอร์ $\{\ddot{\psi}, \ddot{\phi}, \ddot{\theta}\}^T$ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุพันธ์อันดับสองของมุมออยเลอร์ จะได้

$$\{\ddot{\Lambda}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} = [B]^{-1} [\{\dot{\omega}^B\} - [\dot{B}]\{\dot{\Lambda}\}] \quad (3.14)$$

เมื่อ

$$[\dot{B}] = \begin{bmatrix} -\dot{\phi}\cos(\phi) & 0 & 0 \\ -\dot{\phi}\sin(\phi)\sin(\theta) + \dot{\theta}\cos(\phi)\cos(\theta) & -\dot{\theta}\sin(\theta) & 0 \\ -\dot{\phi}\sin(\phi)\cos(\theta) - \dot{\theta}\cos(\phi)\sin(\theta) & -\dot{\theta}\cos(\theta) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3 แรงพลวัตของวัตถุแข็งเกร็ง

สมการเวกเตอร์พื้นฐานได้แสดงถึงการเคลื่อนที่โดยทั่วไปของวัตถุดังต่อไปนี้ สำหรับการส่งถ่ายการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางมวลจะได้

$$\vec{F}^{ext} = m\vec{a}_{cm} \quad (3.16)$$

สำหรับเคลื่อนที่แบบหมุนของวัตถุจะได้

$$\vec{M}_{CM}^{ext} = ([I_{CM}] \dot{\vec{\omega}}^B)_{xyz} + \vec{\Omega} \times [I_{CM}] \vec{\omega}^B \quad (3.17)$$

เมื่อ

$\vec{a}_{CM}$ คือ ความเร่งเชิงเส้นที่จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ

$\vec{F}^{ext}$ คือ ผลรวมของแรงภายนอกที่กระทำกับวัตถุ

$\vec{\Omega}$ คือ ความเร็วเชิงมุมสมบูรณ์ของแกน $x-y-z$

$\vec{\omega}^B$ คือ ความเร็วเชิงมุมสมบูรณ์ของวัตถุ

$[I_{CM}]$ คือ โมเมนต์เฉื่อยมวลและผลของความเฉื่อยของวัตถุ วัดกับแกน $x-y-z$ และจุดเริ่มของแกนที่บริเวณจุดศูนย์กลางมวล

$\vec{M}_{CM}^{ext}$ คือ ผลรวมของโมเมนต์ รอบจุดศูนย์กลางมวล ที่กระทำกับวัตถุ

ในเทอมของ $()_{xyz}$ ซึ่งถึงการวัดอ้างอิงถึงแกน $x-y-z$ ถ้า แกน $x-y-z$ ยึดคงที่ ดังนั้น $\vec{\Omega} = \vec{\omega}^B$ และสมการที่ (3.17) จะได้

$$\vec{M}_{CM}^{ext} = [I_{CM}] \dot{\vec{\omega}}^B + \vec{\omega}^B \times [I_{CM}] \vec{\omega}^B \quad (3.18)$$

หรือทำการเขียนใหม่จะได้

$$\dot{\vec{\omega}}^B = [I_{CM}]^{-1} [\vec{M}_{CM}^{ext} - \vec{\omega}^B \times [I_{CM}] \vec{\omega}^B] \quad (3.19)$$

แทนสมการ (3.19) ลงในสมการที่ (3.14) จะได้

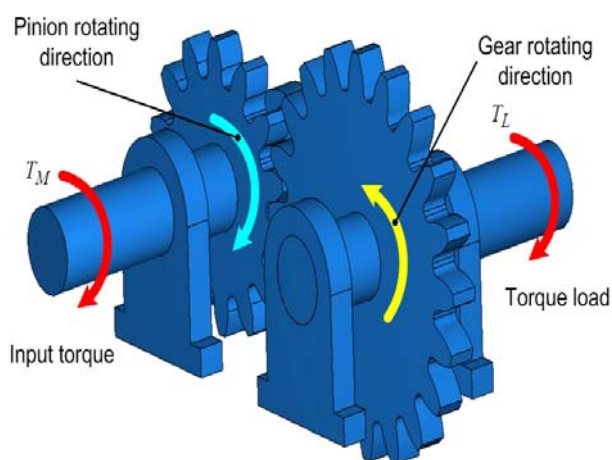
$$\{\ddot{\Lambda}\} = [B]^{-1} [I_{CM}]^{-1} [\vec{M}_{CM}^{ext} - \vec{\omega}^B \times [I_{CM}] \vec{\omega}^B] - [\dot{B}] \{\dot{\Lambda}\} \quad (3.20)$$

การใช้สมการ (3.20) เป็นรูปแบบในระบบแกนโคออดิเนต $x-y-z$ พจน์ทางซ้ายมือของสมการเป็นอนุพันธ์อันดับสองของมุมออยเลอร์ อย่างไรก็ตาม เราสามารถอินทิเกรตสมการนี้เพื่อหาขนาด

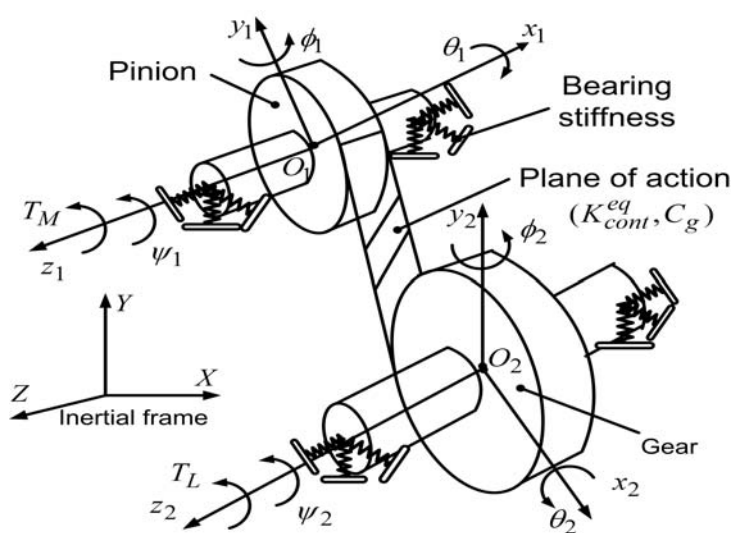
แรงที่เกิดขึ้น และสภาวะเริ่มต้น เช่น แรงภายนอก, โมเมนต์ภายนอก, ตำแหน่ง, ความเร็ว, ความเร่ง, และคุณสมบัติของความเฉื่อย สามารถอินทิเกรตสมการนี้ในการทำนายตำแหน่งและความเร็วที่เวลาถัดไป

3.4 แบบจำลองแรงพลวัตของระบบเฟือง[10]

พิจารณาถึงกายภาพในปัจจุบัน ของรูปแบบการขบกันของระบบเฟืองตรง ดังแสดงในรูป (3.2) เฟลาขับแข็งเกร็งรองรับภาระที่ส่งแรงบิด T_M และรองรับโดยแบร์ริง ที่ต่อกับเฟืองขับในระบบเฟือง



รูปที่ 3.2 การขบกันของฟันเฟืองตรง



รูปที่ 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนในระบบเฟืองตรง

สมการเคลื่อนที่เบื้องต้น และสถานะเริ่มต้น ดังเช่น แรงภายนอก โมเมนต์ภายนอก ตำแหน่งความเร็ว ความเร่ง และคุณสมบัติภายใน ซึ่งสามารถอินทิเกรต สมการเหล่านี้ เพื่อทำนาย ตำแหน่งและความเร็ว ในช่วงเวลาต่อไป ดังนั้น เราประยุกต์สมการ (3.16) และสมการ (3.20) ของ เฟืองขับ และเฟืองตาม ตามข้อสมมุติฐาน

1. แรง ที่กระทำเฟืองทั้งสอง จะมีแรงกระทำจากแบร์ริง การกระแทก การสัมผัสและแรงเสียดทาน ที่จุดสัมผัสบนพื้นผิวฟันเฟือง
2. แรงกระแทก คืออ้างอิงจากข้อแตกต่างของความเร็วเชิงมุมของแกน z_1 และ z_2 ของเฟืองขับและเฟืองตาม
3. ความเร็วลิ้นไถล ซึ่งอ้างอิงความเร็วแตกต่างของระนาบที่อยู่คนละมุมตั้งแต่ความเร็วเชิงมุมในแกนเฟือง ที่มีอิทธิพลต่อส่วนประกอบ ความเร็วเชิงมุมส่วนที่เหลือ
4. แรงกระแทกและแรงเสียดทานที่ปกติและเป็นมุมที่พื้นผิวสัมผัสเริ่มต้น (ก่อนการเปลี่ยนแปลง) ที่จุดสัมผัส
5. แรงสัมผัส สมมุติฐานโดยวิธี PISE ซึ่งปกติที่พื้นผิวสัมผัสจุดเริ่มต้น

ซึ่งสมมุติฐานเบื้องต้น แรงที่กระทำบนเฟืองขับและเฟืองตาม สามารถเขียนตามได้ดังนี้

โดยตัวห้อย 1 และ 2 แทนเฟืองขับและเฟืองตาม

แรงสัมผัส

$$\vec{F}_{cont_1} = -F_{cont} \vec{n}_1 \quad (3.21)$$

$$\vec{F}_{cont_2} = -F_{cont} \vec{n}_2 \quad (3.22)$$

เมื่อ F_{cont} คือ ขนาดของแรงสัมผัสซึ่งประเมินจากวิธี PISE [15] และ $\vec{n}_1, \vec{n}_2$ คือ เวกเตอร์ปกติของพื้นผิวที่จุดขบกันของฟันเฟืองตามลำดับ

แรงกระแทก

$$\vec{F}_{d_1} = C_g (\dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_2) \vec{n}_1 \quad (3.23)$$

$$\vec{F}_{d_2} = -\vec{F}_{d_1} \quad (3.24)$$

ผลกระทบของการกระแทก ของการขบกันของเฟืองได้จาก

$$C_g = 2\xi \left[\frac{K_{cont}^{eq} R_{b_1}^2 R_{b_2}^2 I_{z_1} I_{z_2}}{R_{b_1}^2 I_{z_1} + R_{b_2}^2 I_{z_2}} \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

เมื่อ

ξ	คือ อัตราส่วนการกระแทก
K_{cont}^{eq}	คือ ความยืดหยุ่นเทียบเท่าของการขบกัน[15]
R_{b_1}	คือ รัศมีวงกลมฐานของเฟืองขับ
R_{b_2}	คือ รัศมีวงกลมฐานของเฟืองตาม
I_{z_1}	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวลของเฟืองขับ
I_{z_2}	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวลของเฟืองตาม

จากการวัดค่ารายงานจากการวิจัย [4] ค่า ξ มีค่าระหว่าง 0.3 ถึง 0.17

แรงเสียดทาน

$$\vec{F}_{f_1} = \text{sign}(\vec{V}_s) \mu (\vec{F}_{cont_1} + \vec{F}_{d_1}) \vec{e}_1 \quad (3.26)$$

$$\vec{F}_{f_2} = -\vec{F}_{f_1} \quad (3.27)$$

ทิศทางของแรงเสียดทานกำหนดโดยเครื่องหมายของความแตกต่างของความเร็ว ของเฟืองขับ และเฟืองตาม ที่จุดขบกัน และเวกเตอร์ทิศทางพื้นผิวสัมผัส $\vec{e}_1$ และ $\vec{e}_2$ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน μ หาได้จาก [2]

$$\mu = 0.05e^{-0.125|\vec{V}_s|} + 0.002\sqrt{|\vec{V}_s|} \quad (3.28)$$

เมื่อ $\vec{V}_s$ คือเวกเตอร์ของความเร็วเลื่อนไถล วัดในหน่วย in/sec ที่จุดขบกัน

แรงกระทำแบบริ้ง

$$\vec{F}_{K_1} = -K_{x_1} \delta_{x_1} \vec{i}_1 - K_{y_1} \delta_{y_1} \vec{j}_1 - K_{z_1} \delta_{z_1} \vec{k}_1 \quad (3.29)$$

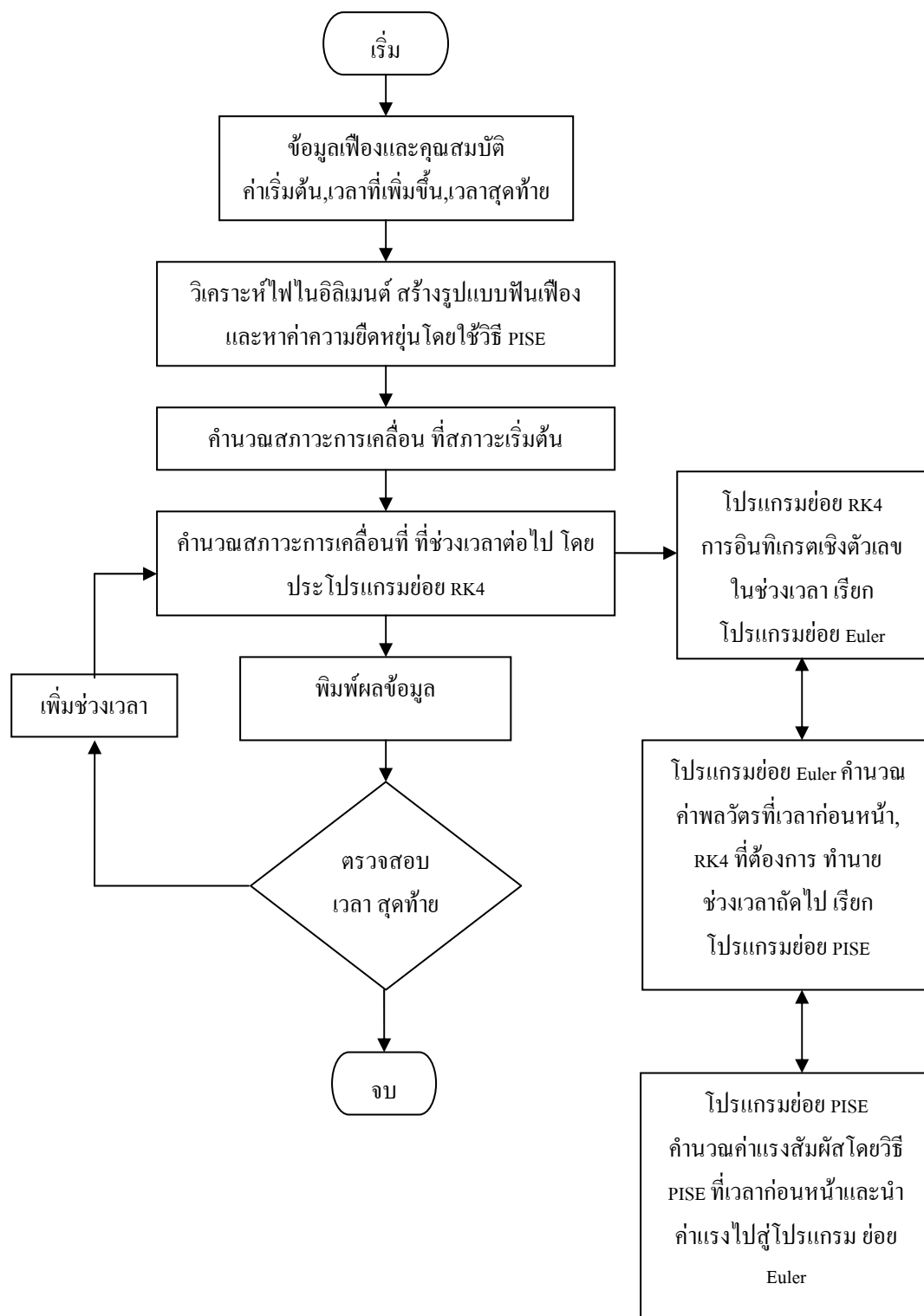
$$\vec{F}_{K_2} = -K_{x_2} \delta_{x_2} \vec{i}_2 - K_{y_2} \delta_{y_2} \vec{j}_2 - K_{z_2} \delta_{z_2} \vec{k}_2 \quad (3.30)$$

K_x, K_y และ K_z คือค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของสปริงในทิศทาง x, y และ z ซึ่ง δ_x, δ_y และ δ_z คือระยะยืดของสปริงในทิศทาง x, y และ z เวกเตอร์ $\vec{i}, \vec{j}$ และ $\vec{k}$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน $x-y-z$ หลังจากรู้แรงเบื้องต้น โมเมนต์ที่เกิดโดยแรงเหล่านี้ สามารถประเมินอย่างง่ายโดยข้ามตำแหน่งเวกเตอร์ กับ แรงเวกเตอร์

3.5 ขั้นตอนในการคำนวณแรงพลวัตในระบบเฟืองตรง

กระบวนการคำนวณโดยรวมทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 3.4 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. กระบวนการเริ่มต้น ของโปรแกรมย่อย INPUT ซึ่งเป็นการป้อนค่าทั้งหมดของฟันเฟือง คุณสมบัติของวัสดุ และสภาวะการทำงาน เช่น ความเร็ว และ ภาระที่กระทำ
2. โปรแกรมสร้าง ไฟล์ข้อมูลในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ และยอมรับไฟล์ ABAQUS ในการวิเคราะห์ค่าการบิดตัวของฟันเฟือง โปรแกรมใช้ข้อมูลในการหาค่าความยืดหยุ่นของฟันเฟืองหนึ่งตัว
3. โปรแกรมคำนวณค่าปริมาณแรงพลวัตเริ่มต้น ซึ่งสามารถใช้วิธีการ อินทิเกรตเชิงตัวเลข
4. การอินทิเกรตเชิงตัวเลขของสมการเริ่ม และลง ในการทำนายปริมาณแรงพลวัตที่เกิด ในเวลาต่อไป ในระหว่างดำเนินการ ทำตามขั้นตอนในโปรแกรมย่อยให้สำเร็จ
5. โปรแกรมย่อย RK4 เป็นวิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลข
6. โปรแกรมย่อย EULER เป็นการเรียก ค่าโดย RK4 ในการประเมินความเร่งที่เวลาต่างๆ
7. โปรแกรมย่อย PISE เป็นการนำมาโดย EULER ถึงการหาค่าแรงสัมผัส ที่ตำแหน่งเวลาต่างๆ ของระบบเฟือง



รูปที่ 3.4 แสดงกระบวนการการคำนวณแรงพลวัต

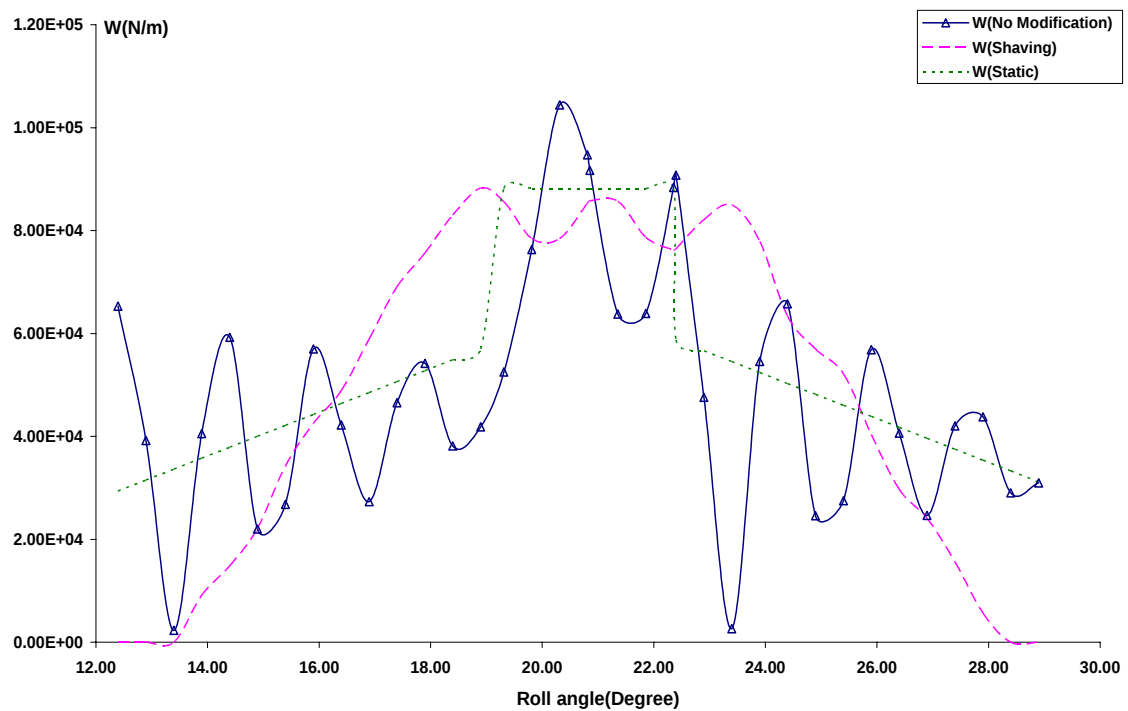
3.6 ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของเฟืองตรง

โมดูล (มม.)	3.175
จำนวนฟันของเฟืองขับ,เฟืองตาม (มม.)	36,36
มุมกด (องศา)	20
โมดูลัสความยืดหยุ่น (นิวตัน/เมตร)	207×10^9
อัตราส่วนปัวซอง	0.3
แรงบิด (นิวตัน.เมตร)	112.98
ความกว้างหน้าฟัน (มม.)	25.4

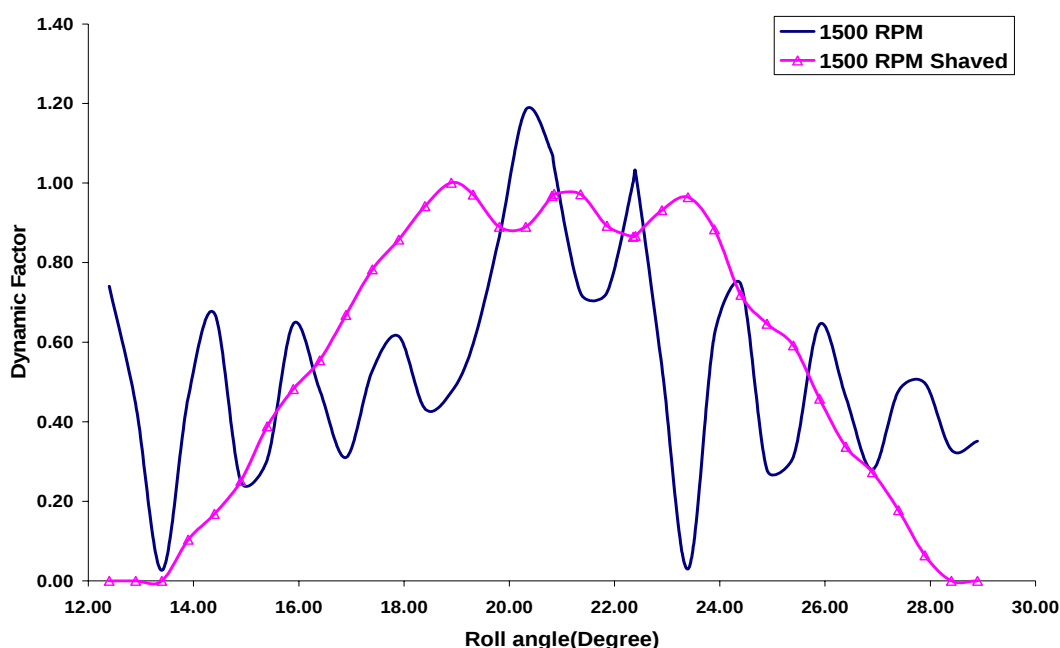
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าการปรับแต่งฟันเฟืองตรง

เฟืองขับ	P_{m1} (in)	3.67×10^{-4}
	ϕ_{s1} (rad)	0.36397
เฟืองตาม	P_{m1} (in)	3.67×10^{-4}
	ϕ_{s1} (rad)	0.36397



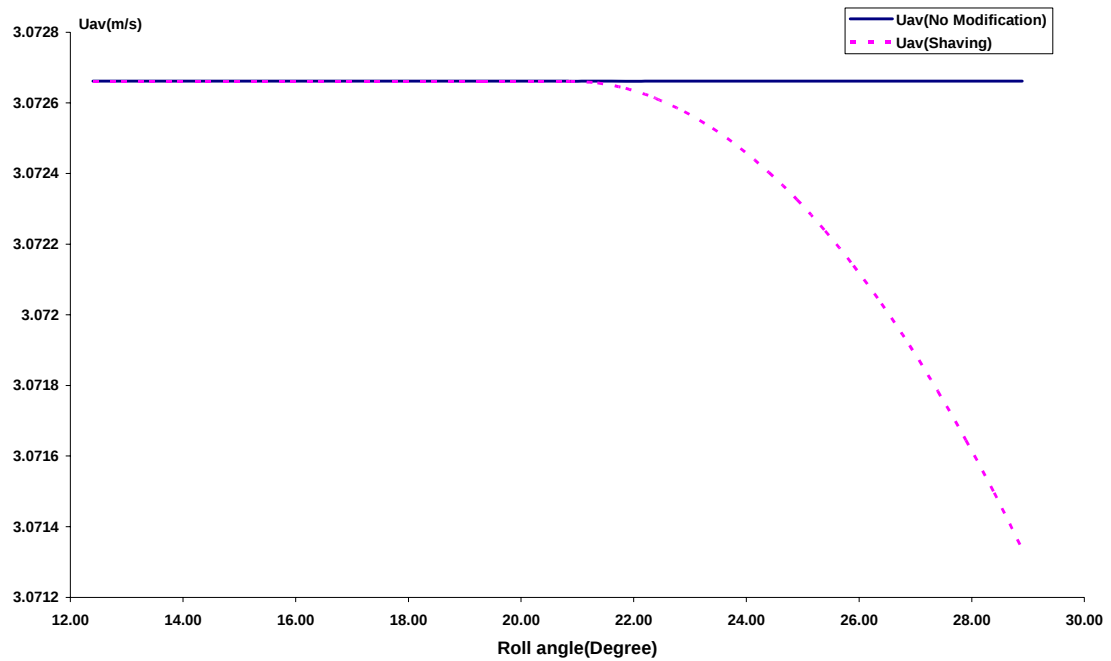
รูปที่ 3.5 แสดงแรงพลวัตที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.5 แสดงถึงการเกิดแรงพลวัตกระทำต่อหน้าฟันที่ตำแหน่งมุมหมุนต่างๆ จากรูปจะเห็นว่าแรงที่กระทำต่อหน้าฟันเฟือง 3 แรงคือ แรงพลวัตที่ไม่มีการปรับแต่งฟันเฟือง แรงพลวัตที่มีการปรับแต่งฟันเฟือง และ แรงสถิต(Static) ซึ่ง แรงพลวัตที่กระทำต่อหน้าฟัน ในกรณีที่ ไม่มีการปรับแต่งจะมีการสวิงขึ้นลง ในทุกๆ ช่วงของมุมหมุน ส่วนแรงพลวัตในกรณีที่มีการปรับแต่งฟันจะพบว่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงมุมหมุนที่ 13 จนถึง 19 องศา และจะมีการสวิงเล็กน้อย ในช่วงที่ฟันเฟืองมีการขบกัน หนึ่งคู่ฟันเฟือง (มุมหมุนที่ 19 ถึง 23 องศา) และจะค่อยๆ ลดลง



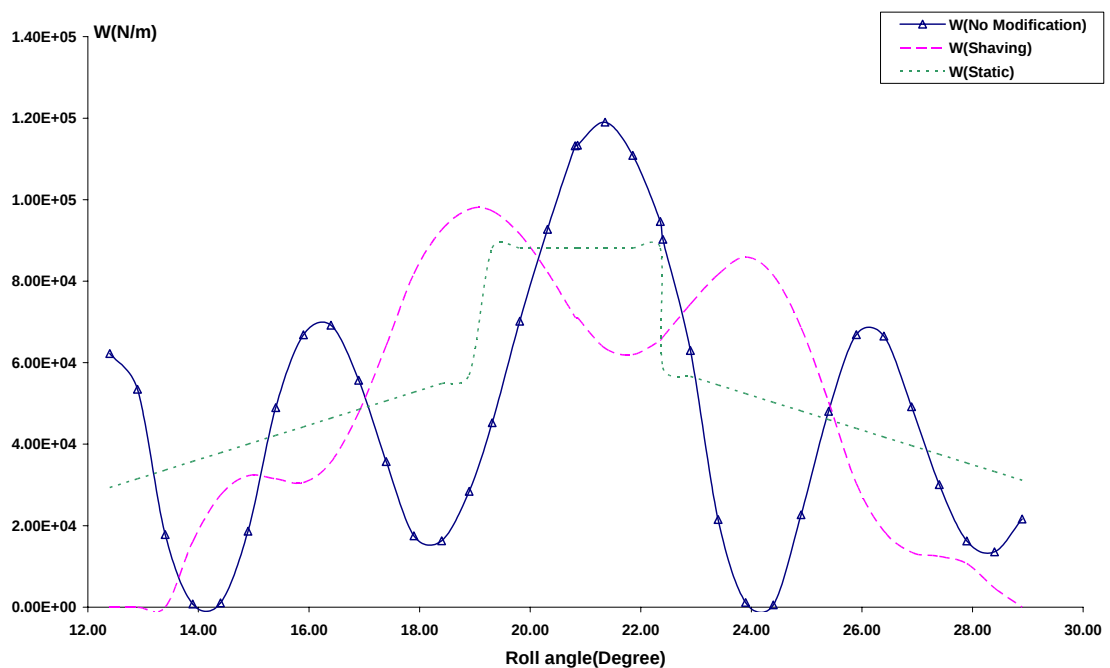
รูปที่ 3.6 แสดงค่า Dynamic Factor ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.6 แสดงค่า Dynamic Factor ($\text{Dynamic Factor} = \text{Dynamic Force} / \text{Static Force}$) ของแรงที่กระทำต่อฟันเฟืองตรงในกรณีที่ ไม่มีการปรับแต่งฟันเฟืองและกรณีที่มีการปรับแต่งฟันเฟือง ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการปรับแต่งฟันเฟืองมีผลทำให้การสวิงของค่า Dynamic Factor น้อยลงโดยมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้น (ในช่วงที่มีการขบกัน 2 คู่ฟันเฟือง) จนถึงช่วงที่มีการขบกัน 1 คู่ฟันเฟือง ค่า Dynamic Factor จะมีค่าสวิงเล็กน้อย และค่อยๆ ลดลง จากรูป 3.6 จะเห็นได้ว่า ฟันเฟืองที่ไม่ปรับแต่ง ค่า Dynamic Factor จะมีค่าสูงสุดประมาณ 1.20 ในช่วงที่มีการขบกัน 1 คู่ฟันเฟือง ที่มุมหมุนประมาณ 21 องศา แต่เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟือง จะมีค่า ค่า Dynamic Factor ลดลงเป็นประมาณ 1.00 ที่มุมหมุนประมาณ 19 องศา



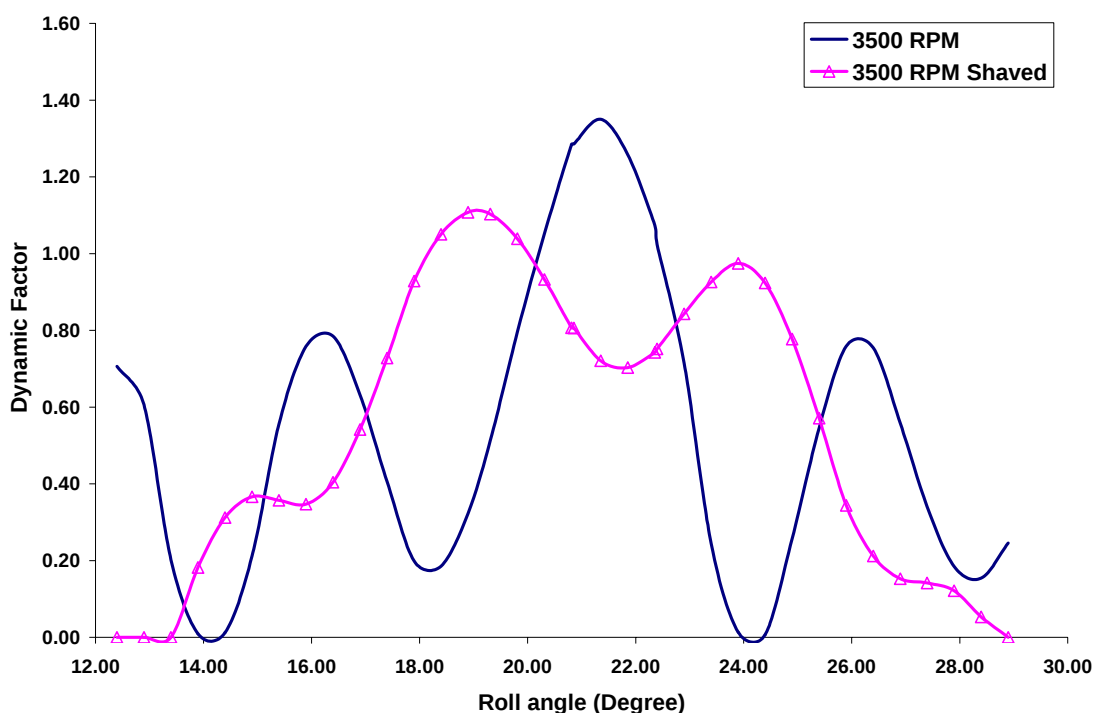
รูปที่ 3.7 แสดงความเร็วเฉลี่ย 1,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.7 แสดงถึงความเร็วเฉลี่ยของฟันเฟืองตรงที่มีการปรับแต่งฟันเฟือง และไม่มี การปรับแต่ง จะเห็นได้ว่า ในช่วงที่ไม่มีการปรับแต่ง ความเร็วเฉลี่ยมีค่าประมาณ 3 เมตรต่อวินาที แต่เมื่ออยู่ในช่วงการเลือนหน้าฟัน ความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลง นั่นแสดงว่าความเร็วในการ เข้าสัมผัสกันของฟันเฟืองตรง ที่มีการปรับแต่งจะมีความเร็วที่น้อยกว่า ความเร็วของฟันเฟืองที่ไม่ ปรับแต่ง



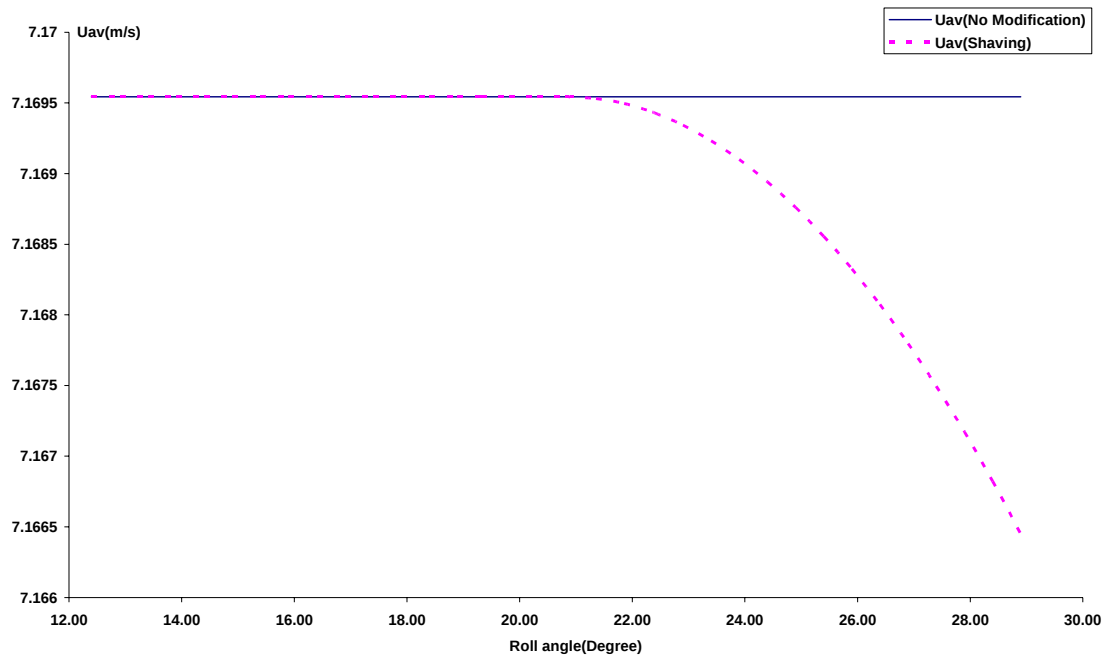
รูปที่ 3.8 แสดง แรงพลวัตที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.8 แสดงถึงแรงพลวัตที่กระทำต่อหน้าฟันเฟืองที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่า แรงพลวัตที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการปรับแต่งฟันเฟือง แรงพลวัตที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า แรงพลวัตที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันเฟือง ซึ่งจากรูปที่ 3.8 แรงพลวัตสูงสุดในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันเฟืองจะเกิดในช่วงที่ฟันเฟืองมีการขบกัน 1 คู่ฟันเฟือง



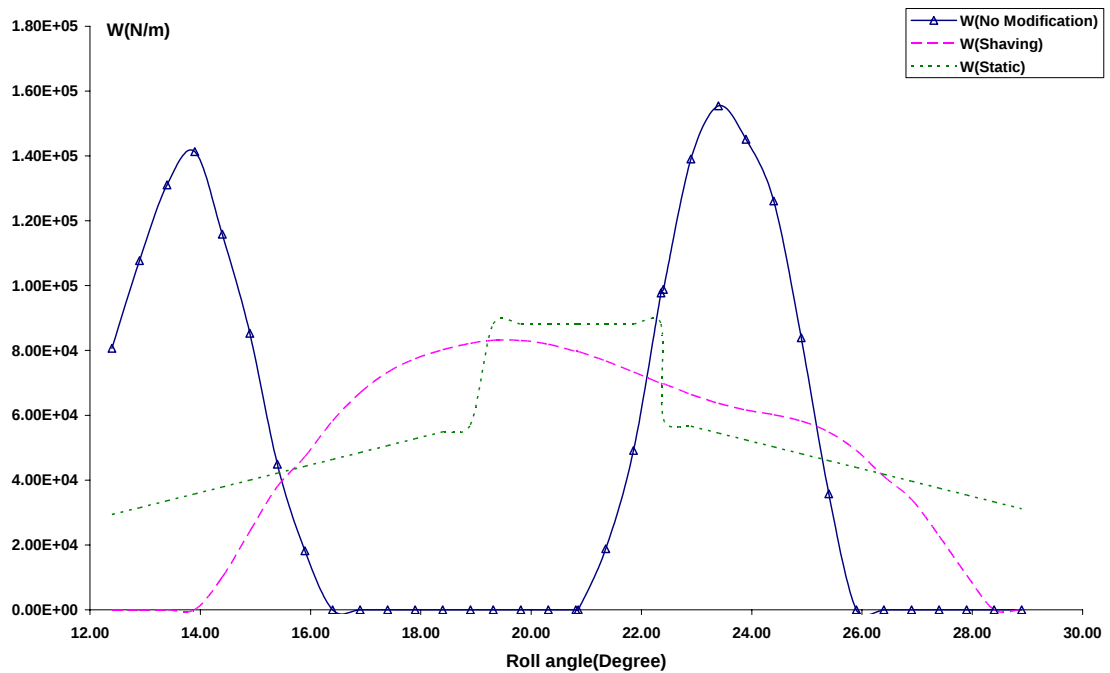
รูปที่ 3.9 แสดงค่า Dynamic Factor ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.9 แสดงค่า Dynamic Factor ของฟันเฟืองตรงที่ไม่มีการปรับแต่ง และที่ปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าค่า Dynamic Factor สูงสุดเกิดขึ้นในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันเฟือง และมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง ที่ฟันเฟืองมีการขบกัน 1 คู่ฟันเฟือง ที่ประมาณ 1.40 มุมหมุนที่ประมาณ 21 องศา แต่เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองค่า Dynamic Factor จะมีค่าลดลงที่ประมาณ 1.20 นั้นแสดงว่า เมื่อปรับแต่งฟันเฟือง แรงที่กระทำต่อฟันเฟืองจะมีค่าลดลง



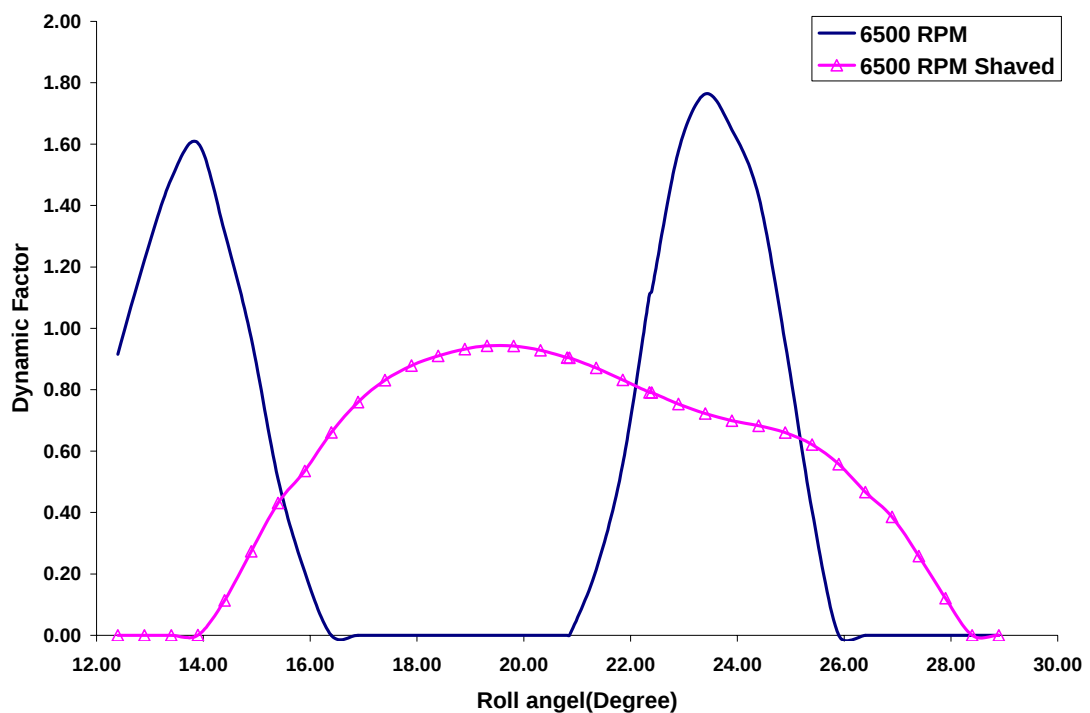
รูปที่ 3.10 แสดงความเร็วเฉลี่ย 3,500 รอบต่อวินาที

จากรูปที่ 3.10 แสดงความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างฟันเฟืองที่มีการปรับแต่งฟันและไม่มี การปรับแต่ง จะเห็นว่า ในกรณีที่ไม่มี การปรับแต่งความเร็วเฉลี่ยประมาณ 7.2 เมตรต่อวินาที แต่ ในช่วงที่มีการปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่า ความเร็วเฉลี่ยมีค่าลดลง นั่นแสดงว่าการปรับแต่ง ฟันเฟืองมีผลทำให้ความเร็วในช่วงที่ปรับแต่งลดลง



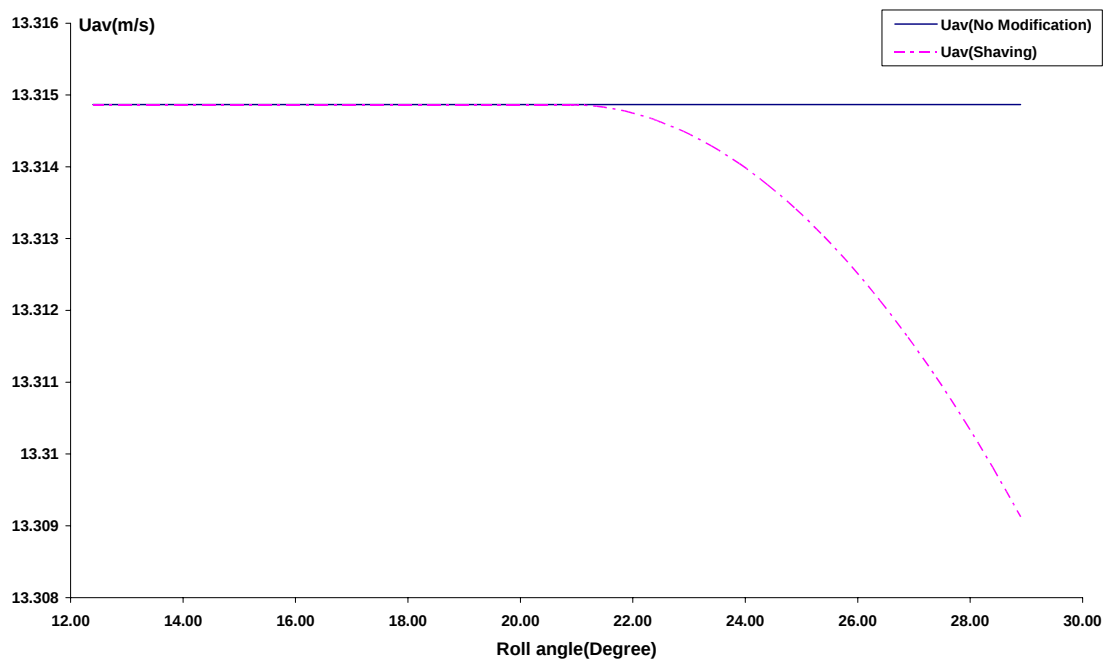
รูปที่ 3.11 แสดงแรงพลวัตที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อวินาที

จากรูปที่ 3.11 แสดงแรงพลวัตกระทำต่อพื้นเฟืองที่มีการปรับแต่งและไม่ปรับแต่งที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่มีการปรับแต่งพื้นเฟืองแรงพลวัตที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแรงพลวัตสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นเฟือง จากรูปจะเห็นว่า ที่มุมหมุนที่ 16.5 ถึง 21 องศา แรงพลวัตของกรณีไม่ปรับแต่งพื้นเฟืองจะเป็นศูนย์ แสดงว่าไม่มีแรงพลวัตกระทำต่อพื้นเฟืองในช่วงมุมหมุนนี้ และเมื่อมีแรงกระทำอีกครั้งจะพบว่ามีความแรงพลวัตที่กระทำสูงมากเนื่องจากการเข้าสัมผัสกันอีกครั้งของพื้นเฟืองจะเข้าสัมผัสกันจะเกิดแรงกระทำทำให้เกิดแรงพลวัตสูงขึ้นอย่างมาก



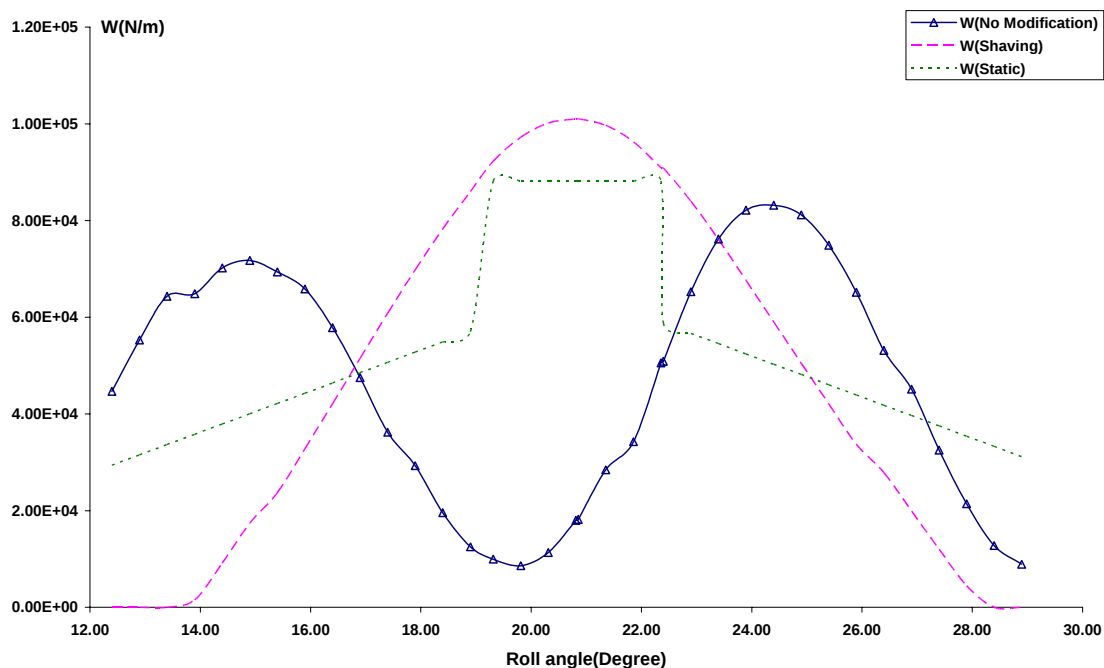
รูปที่ 3.12 แสดงค่า Dynamic Factor ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.12 แสดงถึงแสดงค่า Dynamic Factor ของพื้นเฟืองตรงที่ไม่มีการปรับแต่ง และที่ปรับแต่งพื้นเฟือง ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที จะเห็นว่าเมื่อทำการปรับแต่งพื้นเฟืองตรง โดยวิธีเลื่อนหน้าฟันค่า Dynamic Factor ที่เกิดขึ้นจะลดลงและมีการกระจายที่มุมหมุนต่างๆ บนหน้าฟันเฟืองสม่ำเสมอ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับแต่งการสัมผัสของพื้นเฟืองจะมีการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างราบรื่น



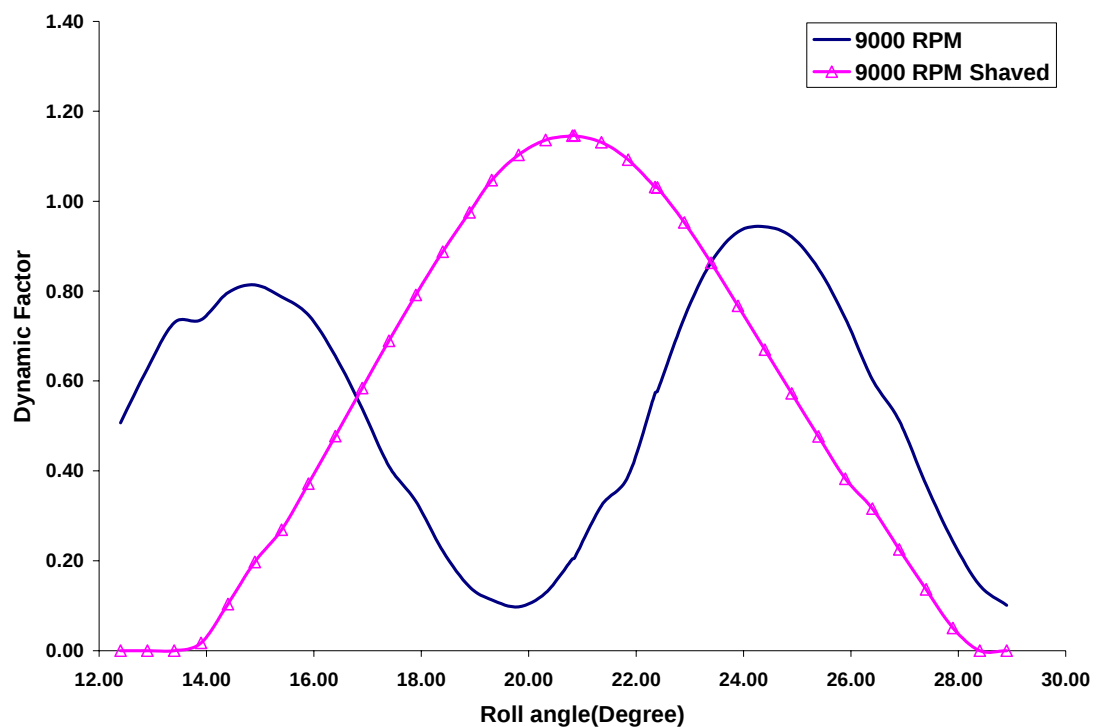
รูปที่ 3.13 แสดงความเร็วเฉลี่ย 6,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.13 แสดงความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างฟันเฟืองที่มีการปรับแต่งฟันและไม่มี การปรับแต่ง จะเห็นว่า ในกรณีที่ไม่มี การปรับแต่ง จะมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 13.3 เมตรต่อนาที และจะมีความเร็วเฉลี่ยลดลง ในช่วงที่เริ่มมีการเกือนหน้าฟัน



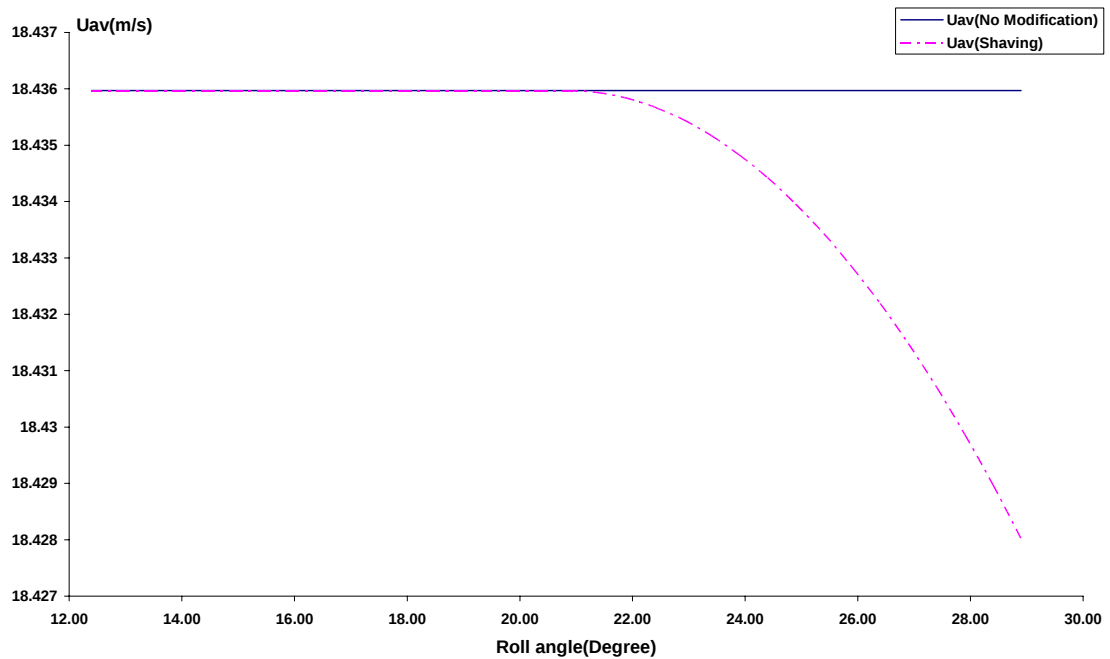
รูปที่ 3.14 แสดงแรงพลวัตที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.14 แสดงแรงพลวัตกระทำต่อฟันเฟืองที่มีการปรับแต่งและไม่ปรับแต่งที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาทีจากรูปจะเห็นว่า เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองแรงพลวัตที่เกิดขึ้นมีค่าที่สูงกว่าในกรณีที่ไม่ปรับแต่ง ในช่วงที่ฟันเฟืองมีการขบกันแบบ 1 คู่ฟันเฟือง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า การปรับแต่งฟันเฟืองไม่ทำให้แรงพลวัตมีค่าลดลงในความเร็วรอบ ที่ 9,000 รอบต่อนาที เนื่องจากความเร็วรอบที่สูงมากและแรงพลวัตมีค่าสูง ทำให้การปรับแต่งไม่ลดลงในช่วงความเร็วรอบนี้



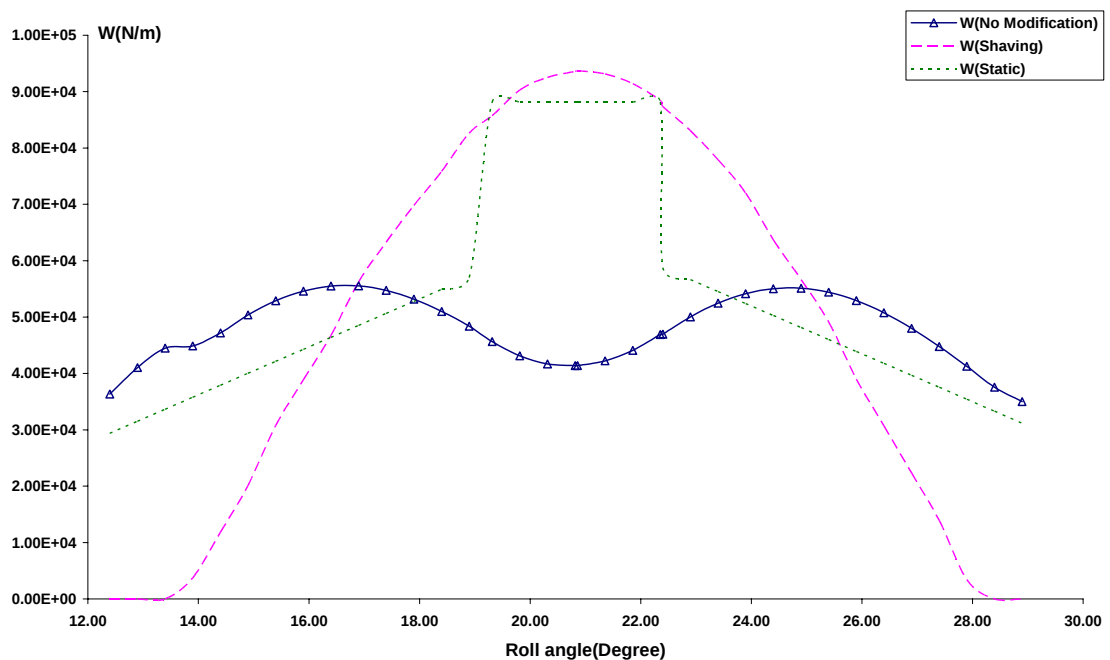
รูปที่ 3.15 แสดงค่า Dynamic Factor ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.15 แสดงถึงค่า Dynamic Factor ของฟันเฟืองตรงที่ไม่มีการปรับแต่ง และที่ปรับแต่งฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที จะเห็นว่าเมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองตรงโดยวิธีเลื่อนหน้าฟันค่า Dynamic Factor ในช่วงที่ฟันเฟืองขบกัน 1 คู่ฟันเฟืองจะมีค่าที่มากกว่า ในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่งฟันเฟือง



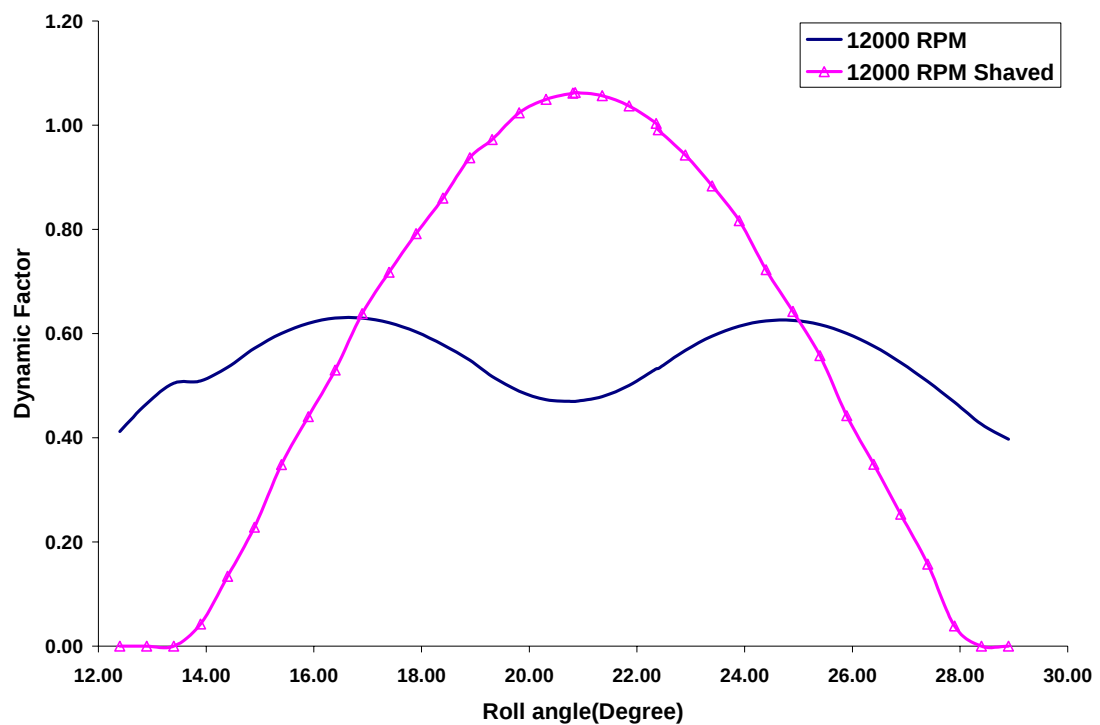
รูปที่ 3.16 แสดงความเร็วเฉลี่ย 9,000 รอบต่อวินาที

จากรูปที่ 3.16 แสดงความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างฟันเฟืองที่มีการปรับแต่งฟันและไม่มี การปรับแต่ง จะเห็นว่า ในกรณีที่ไม่มี การปรับแต่ง ฟันเฟืองจะมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 18.4 เมตร ต่อวินาที และในช่วงที่เริ่มมีการเฉือนหน้าฟัน และจะเห็นได้ว่า ความเร็วเฉลี่ยลดลง เมื่อทำการ ปรับแต่งฟันเฟือง



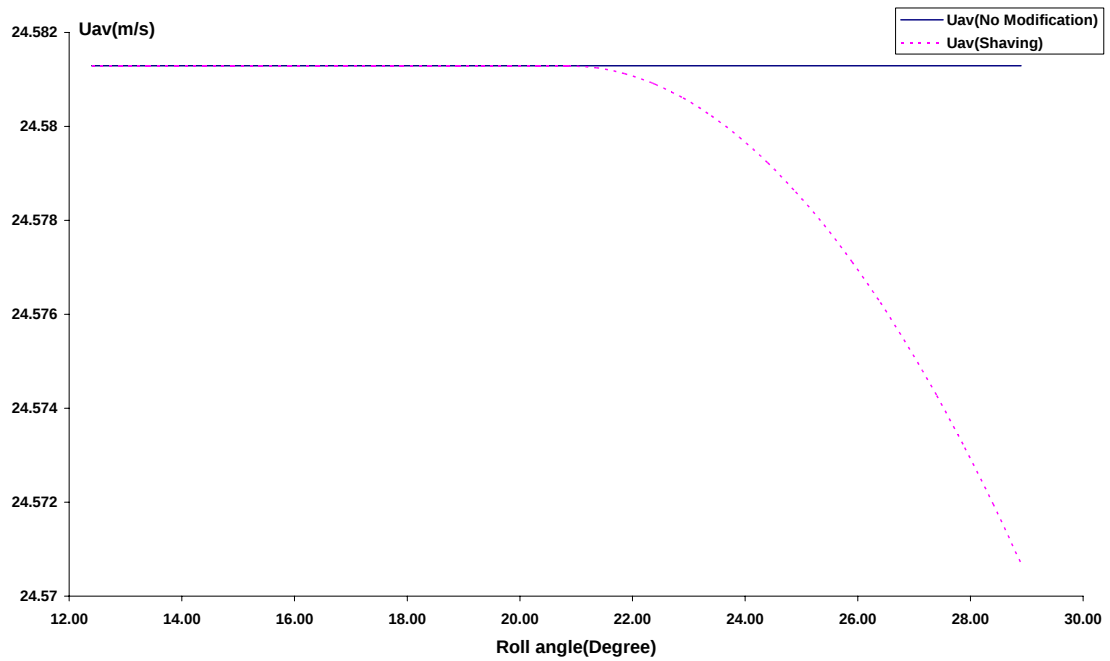
รูปที่ 3.17 แสดงแรงพลวัตที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อวินาที

จากรูปที่ 3.17 แสดงแรงพลวัตกระทำต่อพื้นเฟืองที่มีการปรับแต่งและไม่ปรับแต่งที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับแต่งพื้นเฟืองแรงพลวัตที่เกิดขึ้นมีค่าที่สูงกว่าในกรณีที่ไม่มีปรับแต่ง ในช่วงที่พื้นเฟืองมีการขบกันแบบ 1 คู่พื้นเฟือง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า การปรับแต่งพื้นเฟืองไม่ทำให้แรงพลวัตมีค่าลดลงในความเร็วรอบ ที่ 12,000 รอบต่อนาที



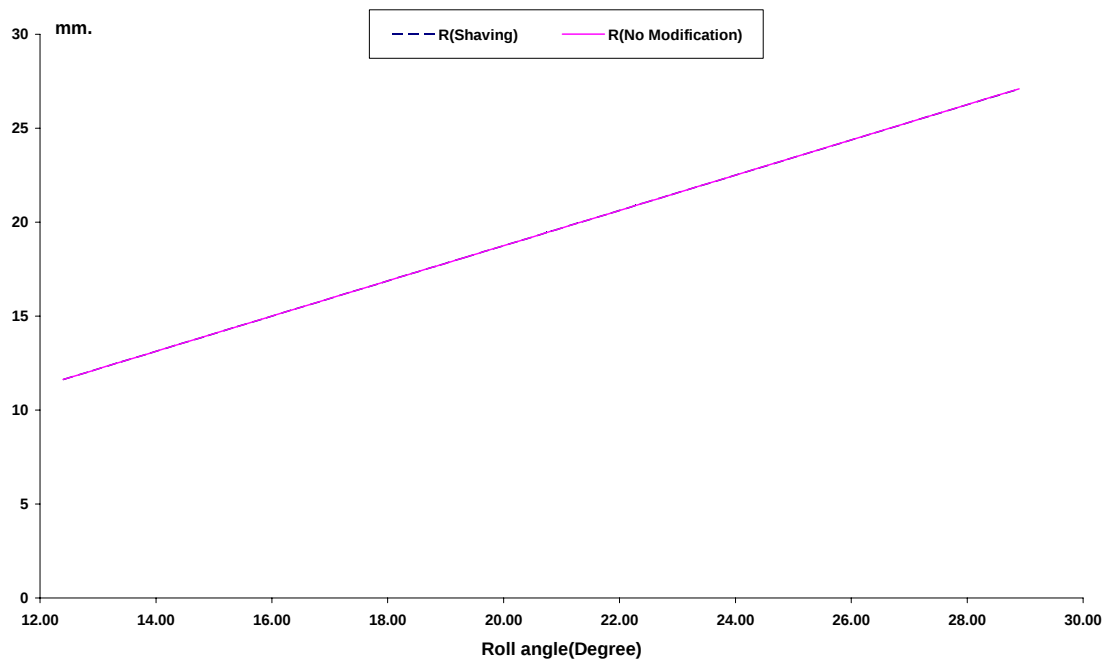
รูปที่ 3.18 แสดงค่า Dynamic Factor ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.18 แสดงถึงค่า Dynamic Factor ของพื้นเฟืองตรงที่ไม่มีการปรับแต่ง และที่ปรับแต่งพื้นเฟือง ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที จะเห็นว่าเมื่อทำการปรับแต่งพื้นเฟืองตรง โดยวิธีเลื่อนหน้าฟันค่า Dynamic Factor ในช่วงที่พื้นเฟืองขบกัน 1 คู่พื้นเฟืองจะมีค่าที่มากกว่า ในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นเฟือง



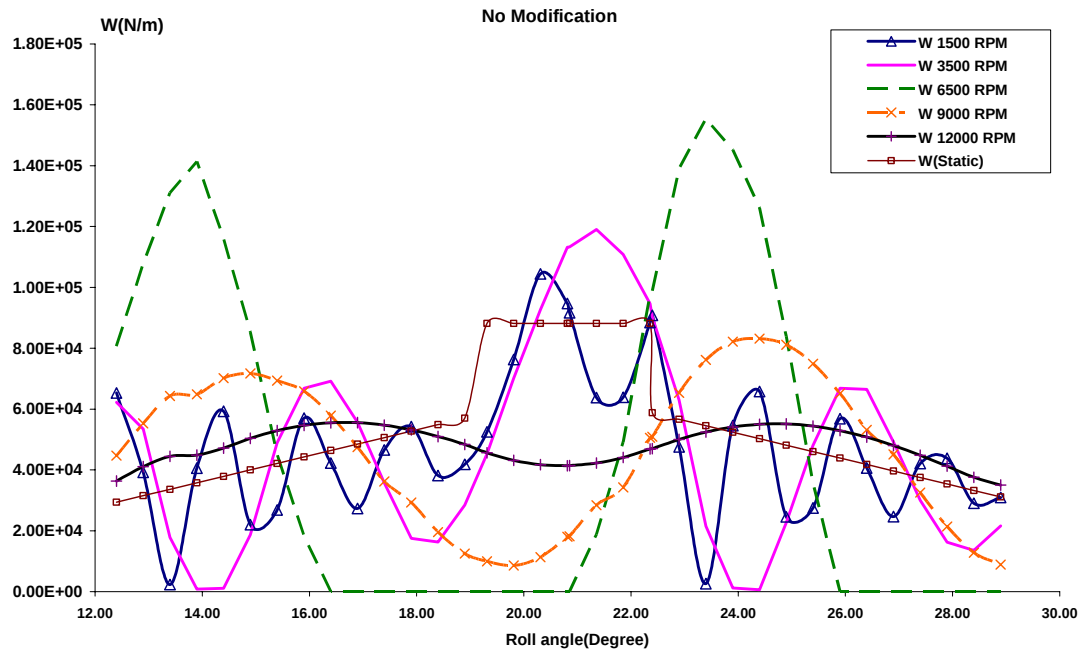
รูปที่ 3.19 แสดงความเร็วเฉลี่ย 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 3.19 แสดงความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างฟันเฟืองที่มีการปรับแต่งฟันและไม่มี การปรับแต่ง จะเห็นว่า ในกรณีที่ไม่มี การปรับแต่ง จะมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 24.5 เมตรต่อวินาที และ ในช่วงที่เริ่มมีการเกือนหน้าฟัน และจะเห็นได้ว่า ความเร็วเฉลี่ยลดลง



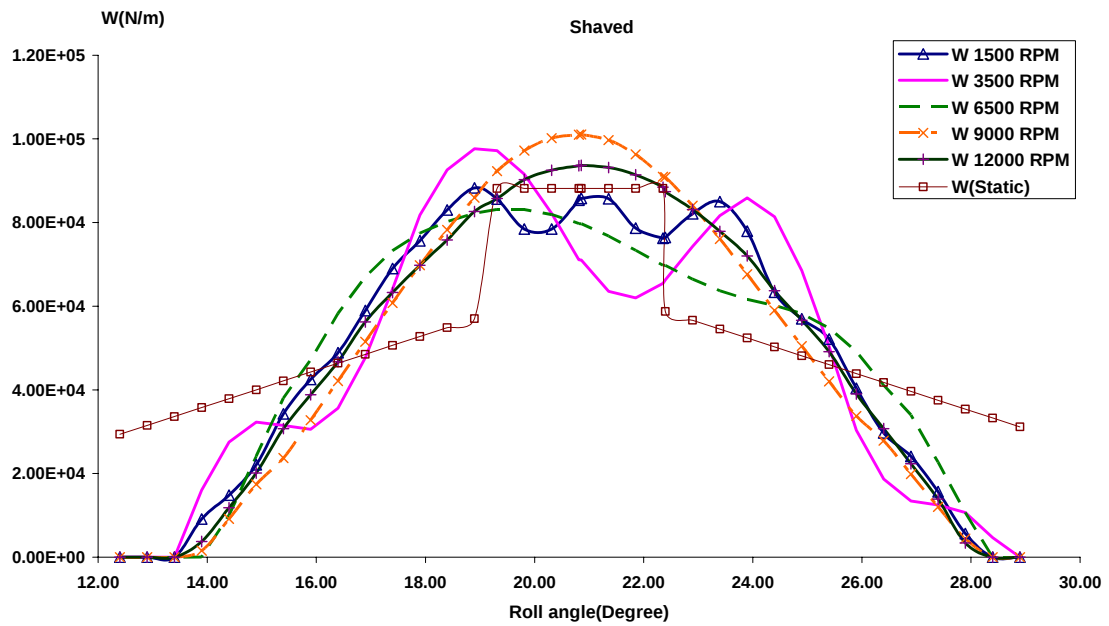
รูปที่ 3.20 แสดงรัศมีอินโวลูตของเฟืองขับ

จากรูปที่ 3.20 แสดงถึงรัศมีอินโวลูตของฟันเฟืองขับ เปรียบเทียบระหว่าง กรณีที่ไม่มีการปรับแต่งฟัน และในกรณีที่มีการปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่า รัศมีอินโวลูตของฟันเฟืองที่ทำการปรับแต่งฟัน เมื่อเปรียบเทียบกับ กรณีที่ไม่ปรับแต่ง มีความแตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 3.21 แสดงแรงพลวัตในกรณีที่ไม่มีปรับแต่ง

จากรูปที่ 3.21 แสดงถึงแรงพลวัตในกรณีที่ไม่มีปรับแต่งฟันเฟืองที่ความเร็วรอบที่ 1,500 รอบต่อนาทีที่ 3,500 รอบต่อนาทีที่ 6,500 รอบต่อนาทีที่ 9,000 รอบต่อนาที และที่ 12,000 รอบต่อนาที จะได้ว่า ในกรณีที่ไม่มีมีการปรับแต่งฟันเฟือง แรงพลวัตที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที จะมีค่ามากที่สุด ที่มุมหมุน ประมาณ 23 องศา และที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที ที่มุมหมุน ประมาณ 21 องศา ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ที่มุมหมุนประมาณ 20 องศา ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที ที่มุมหมุนประมาณ 24 องศา และที่ความเร็วรอบที่ 12,000 รอบต่อนาที ที่มุมหมุนประมาณ 25 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 3.22 แสดงแรงพลวัตในกรณีที่ปรับแต่ง

จากรูปที่ 3.22 แสดงถึงแรงพลวัตในกรณีที่ปรับแต่งพื่นเพื่อที่ความเร็วรอบที่ 1,500 รอบต่อนาทีที่ 3,500 รอบต่อนาทีที่ 6,500 รอบต่อนาทีที่ 9,000 รอบต่อนาทีที่ และ 12,000 รอบต่อนาที จะได้ว่า ในกรณีที่มีการปรับแต่งพื่นเพื่อ แรงพลวัตที่สูงมากจะเกิดที่ความเร็วรอบที่ 9,000 รอบต่อนาที ที่มุมหมุนประมาณ 21 องศา ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาทีที่มุมหมุนประมาณ 19 องศา ที่ความเร็วรอบที่ 12,000 รอบต่อนาที ที่มุมหมุนประมาณ 21 องศา ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาทีที่มุมหมุนประมาณ 19 องศา และที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาทีจะมีค่าแรงพลวัตน้อยที่สุดที่มุมหมุนประมาณ 20 องศา ตามลำดับ

3.7 สรุปผลการทดลอง

จากผลการปรับแต่งฟันเฟืองตรงโดยวิธีเงื่อนไขฟันมีผลต่อแรงพลวัตที่กระทำกับฟันเฟืองสรุปได้ดังนี้

- 3.7.1 ฟันเฟืองที่ไม่มีการปรับแต่งฟัน แรงพลวัตที่เกิดขึ้นจะพบว่า ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาทีจะมีแรงพลวัตสูงสุดกระทำต่อฟันเฟือง
- 3.7.2 ฟันเฟืองที่ไม่มีการปรับแต่งฟัน จะมีช่วงที่แรงพลวัตมีค่าเป็นศูนย์ ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที และที่ 3,500 รอบต่อนาที
- 3.7.3 ฟันเฟืองที่ไม่มีการปรับแต่ง แรงพลวัตสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละความเร็วรอบ จะเห็นว่า ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาทีมีค่าสูงสุด รองลงมาคือที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที ที่ 1,500 รอบต่อนาที ที่ 9,000 รอบต่อนาที และที่ 12,000 รอบต่อนาทีตามลำดับ
- 3.7.4 ฟันเฟืองที่มีการปรับแต่งจะเห็นว่า ในทุกๆความเร็วรอบ แรงพลวัตที่เกิดขึ้นจะมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอไม่มีการแกว่งของแรงพลวัตมาก
- 3.7.5 ฟันเฟืองที่มีการปรับแต่งจะเห็นว่า แรงพลวัตสูงสุดที่เกิดขึ้น มีค่าลดลงในเฉพาะการปรับแต่งที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที ที่ 3,500 รอบต่อนาที และที่ 6,500 รอบต่อนาที ส่วนที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาทีและที่ 12,000 รอบต่อนาที แรงพลวัตสูงสุดที่เกิดจากการปรับแต่งไม่มีค่าสูงขึ้น
- 3.7.6 การปรับแต่งฟันเฟืองโดยวิธีเงื่อนไขฟันมีผลทำให้แรงพลวัตลดลงอย่างมากที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที
- 3.7.7 การปรับแต่งฟันเฟืองจะมีค่าที่ทำให้แรงพลวัตลดลงที่ความเร็วรอบช่วงหนึ่งๆ เท่านั้น ไม่สามารถลดแรงพลวัตสูงสุดได้ในทุกๆความเร็วรอบ