

บทที่ 5

วิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพในการหล่อลื่น

จากการวิเคราะห์ปัญหาจะเห็นว่าสมการเรย์โนลด์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการแก้สมการโดยวิธีการหาค่าผลเฉลยแบบแม่นยำตรงจะยังทำการหาค่าไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีประมาณค่าเชิงตัวเลขแล้วไม่ยากเท่ากับวิธีการหาผลเฉลยแบบแม่นยำตรง

5.1 สมการเรย์โนลด์แบบไร้มิติ[16]

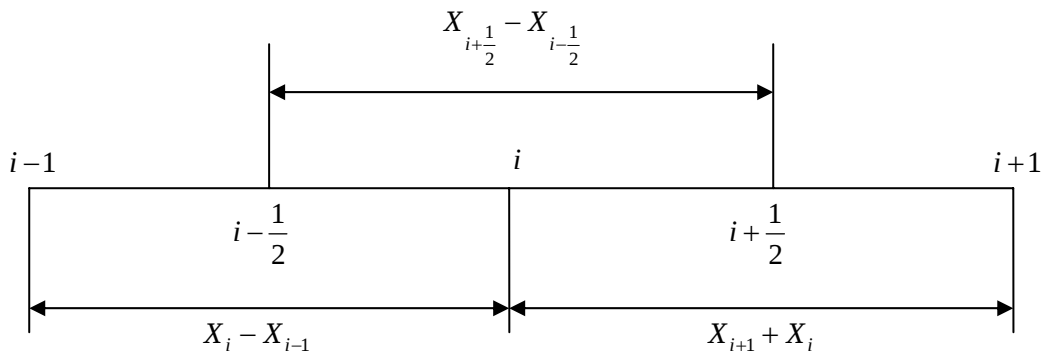
$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H^3 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e,2}} - \frac{\bar{\mu}_{e,0}}{\bar{\mu}_{e,1}^2} \right) \frac{\partial P}{\partial X} \right] = K \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + K \frac{S}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e,0}}{\bar{\mu}_{e,1}} \right) \right] + K \frac{\partial}{\partial t^*} (\bar{\rho} H) \quad (5.1)$$

$$\text{เมื่อ } \varepsilon = \bar{\rho} H^3 \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e,2}} - \frac{\bar{\mu}_{e,0}}{\bar{\mu}_{e,1}^2} \right)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\varepsilon \frac{\partial P}{\partial X} \right] = K \frac{\partial}{\partial X} (\bar{\rho} H) + K \frac{S}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left[\bar{\rho} H \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e,0}}{\bar{\mu}_{e,1}} \right) \right] + K \frac{\partial}{\partial t^*} (\bar{\rho} H) \quad (5.2)$$

การแก้สมการเรย์โนลด์โดยวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) สามารถแก้ได้โดยพิจารณาจากรูป 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงขนาดและความกว้างระหว่างโนด

ที่ตำแหน่ง i พจน์ทางซ้ายมือของสมการที่ (5.1) จะแทนค่าด้วยผลต่างแบบกึ่งกลาง (Central Difference) และพจน์ทางขวามือจะแทนด้วยผลต่างแบบถอยหลัง (Backward Difference) จะได้

$$\frac{\varepsilon \frac{dP}{dX} \Big|_{i+\frac{1}{2}} - \varepsilon \frac{dP}{dX} \Big|_{i-\frac{1}{2}}}{X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}}} = K \left[\frac{\rho_i H_i - \rho_{i-1} H_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + K \frac{S}{2} \left[\frac{\bar{\rho}_i H_i \left(1 - \frac{2\bar{\mu}_{e,0}}{\mu_{e,1}} \right)_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1} \left(1 - \frac{2\bar{\mu}_{e,0}}{\mu_{e,1}} \right)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] \quad (5.3)$$

$$+ K \left[\frac{\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_i^0 H_i^0}{\Delta t^*} \right]$$

เมื่อตัวอักษรยก 0 ในพจน์สุดท้ายแทนค่าที่เวลาเก่า แทนค่าผลต่างแบบกึ่งกลางของ $\frac{dP}{dX}$ จะได้

$$P_{i+1} \left(\frac{\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}}{X_{i+1} - X_i} \right) - P_i \left[\frac{\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}}{X_{i+1} - X_i} + \frac{\varepsilon_{i-\frac{1}{2}}}{X_i - X_{i-1}} \right] + P_{i-1} \left(\frac{\varepsilon_{i-\frac{1}{2}}}{X_i - X_{i-1}} \right) =$$

$$K \left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) \left[\frac{\rho_i H_i - \rho_{i-1} H_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + K \frac{S}{2} \left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) \quad (5.4)$$

$$\left[\frac{\bar{\rho}_i H_i \left(1 - \frac{2\bar{\mu}_{e,0}}{\mu_{e,1}} \right)_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1} \left(1 - \frac{2\bar{\mu}_{e,0}}{\mu_{e,1}} \right)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + K \left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) \left[\frac{\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_i^0 H_i^0}{\Delta t^*} \right]$$

นำ $\left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right)$ หารตลอดสมการจะได้

$$P_{i+1} \left(\frac{\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}}{\left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) (X_{i+1} - X_i)} \right) - P_i \left[\frac{\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}}{\left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) (X_{i+1} - X_i)} + \frac{\varepsilon_{i-\frac{1}{2}}}{\left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) (X_i - X_{i-1})} \right] +$$

$$\begin{aligned}
P_{i-1} \left(\frac{\varepsilon_{i-\frac{1}{2}}}{\left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) (X_i - X_{i-1})} \right) = & \quad (5.5) \\
& K \left[\frac{\rho_i H_i - \rho_{i-1} H_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + K \frac{S}{2} \left[\frac{\bar{\rho}_i H_i \left(1 - \frac{2\bar{\mu}_{e,0}}{\mu_{e,1}} \right)_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1} \left(1 - \frac{2\bar{\mu}_{e,0}}{\mu_{e,1}} \right)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] \\
& + K \left[\frac{\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_i^0 H_i^0}{\Delta t^*} \right]
\end{aligned}$$

แทนค่า $\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}$ และ $\varepsilon_{i-\frac{1}{2}}$

เมื่อ $\varepsilon_{i+\frac{1}{2}} = \left(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2} \right)$ และ $\varepsilon_{i-\frac{1}{2}} = \left(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2} \right)$ จะได้

$$\begin{aligned}
f_i = & -P_{i+1} \left[\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2 \left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) (X_{i+1} - X_i)} \right] + P_i \left[\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i+1}}{2 \left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) (X_{i+1} - X_i)} + \frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2 \left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) (X_i - X_{i-1})} \right] \\
& - P_{i-1} \left[\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}}{2 \left(X_{i+\frac{1}{2}} - X_{i-\frac{1}{2}} \right) (X_i - X_{i-1})} \right] + K \left[\frac{\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] + K \frac{S}{2} \left[\frac{\bar{\rho}_i H_i \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e,0}}{\bar{\mu}_{e,1}} \right)_i - \bar{\rho}_{i-1} H_{i-1} \left(1 - 2 \frac{\bar{\mu}_{e,0}}{\bar{\mu}_{e,1}} \right)_{i-1}}{X_i - X_{i-1}} \right] \\
& + K \left[\frac{\bar{\rho}_i H_i - \bar{\rho}_i^0 H_i^0}{\Delta t^*} \right] \quad (5.6)
\end{aligned}$$

โดยที่เงื่อนไขขอบเขตของสมการเรย์โนลด์คือ

$$X = X_{in} \quad P = 0$$

$$X = X_{out} \quad P = 0, \quad \frac{dP}{dX} = 0$$

เมื่อแทนค่า i เป็นค่าหมายเลขในโนดต่างๆ ตั้งแต่ 1 ถึง n และแทนค่าเงื่อนไขขอบลงไปจะได้ระบบสมการไม่เชิงเส้นซึ่งสามารถจัดอยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$[A]\{P\} = \{B\} \quad (5.7)$$

5.2 วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method)[11]

ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) เป็นวิธีที่มีรากฐานมาจากอนุกรมเทย์เลอร์ โดยอนุกรมเทย์เลอร์เป็นอนุกรมที่ใช้ในการหาค่าฟังก์ชันที่ตำแหน่ง X_0 จากค่าของฟังก์ชันและค่าอนุพันธ์ (derivatives) ที่มีอันดับต่างๆ กันของฟังก์ชันนั้นที่ตำแหน่ง X_0 ซึ่งจะหาได้ดังนี้

$$f(x) \cong f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) \quad (5.8)$$

ดังนั้นสมการ (5.8) จึงเปรียบเสมือนสมการเส้นตรงและจะให้ค่าที่ถูกต้องเสมอหากฟังก์ชันนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นตรง ในทำนองเดียวกันหากฟังก์ชันที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันที่ไม่สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันสมการพหุนามได้ ก็จะต้องถูกรวมเทอมของเทย์เลอร์ถึงพจน์อนันต์ แต่ในวิธีนิวตัน-ราฟสันจะหารากของสมการ $f(x)=0$ โดยใช้การประมาณฟังก์ชันด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ที่ประกอบด้วยพจน์เพียง 2 พจน์ ดังแสดงในสมการ ต่อไปนี้

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) = 0 \quad (5.9)$$

หรือ

$$x - x_0 = -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (5.10)$$

โดยจะคำนวณซ้ำระหว่างค่าเก่ากับค่าใหม่ที่ได้จากสมการ(5.10)

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_{k+1} \quad (5.11)$$

$$\Delta x_{k+1} = -\frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (5.12)$$

ทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยเช็คจากสมการ (5.11),(5.12) จะได้

$$\left| \frac{X_{k+1} - X_k}{X_{k+1}} \right| \times 100\% < 0.001 \quad (5.13)$$

จากสมการ(5.10),(5.11),(5.12)จะได้ว่า

$$f_i^{new} = f_i^{old} + \frac{\partial f_i}{\partial P_i} \Delta P_i \quad (5.14)$$

$$\Delta P_i = \frac{f_i^{new} - f_i^{old}}{\frac{\partial f_i}{\partial P_i}} \quad (5.15)$$

$$P_i^{new} = P_i^{old} + \omega \Delta P_i \quad (5.16)$$

ทำการดิฟสมการ (5.6) เทียบ P_i โดยใช้วิธีกฎลูกโซ่ จะได้

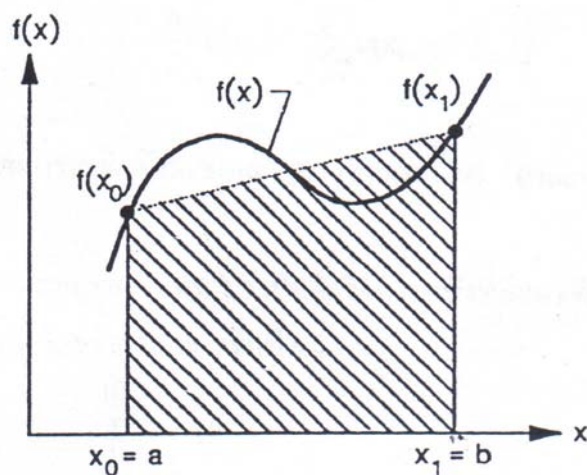
$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial P_i} = & \frac{\partial f_i}{\partial P_i} \Big|_{P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \rho_i} \frac{\partial \rho_i}{\partial P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial H_i} \frac{\partial H_i}{\partial P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial H_{i-1}} \frac{\partial H_{i-1}}{\partial P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \varepsilon_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \varepsilon_{i-1}} \frac{\partial \varepsilon_{i-1}}{\partial P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \varepsilon_{i+1}} \frac{\partial \varepsilon_{i+1}}{\partial P_i} \\ & + \frac{\partial f_i}{\partial \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i}} \right)} \frac{\partial \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i}} \right)}{\partial P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right)} \frac{\partial \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i}} \right)}{\partial P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i-1}} \right)} \frac{\partial \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e0,i-1}} \right)}{\partial P_i} + \frac{\partial f_i}{\partial \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i-1}} \right)} \frac{\partial \left(\frac{1}{\bar{\mu}_{e1,i-1}} \right)}{\partial P_i} \end{aligned} \quad (5.17)$$

5.3 การอินทิเกรตเชิงตัวเลข[11]

จากสมการที่ (4.33) จะเห็นว่าในสมการมีการอินทิเกรตจำกัดเขตอยู่ในสมการซึ่งการอินทิเกรตโดยวิธีการธรรมดาจะไม่สามารถทำได้เนื่องจากสมการเหล่านั้นมีความซับซ้อนและความยุ่งยากในการอินทิเกรตหรือไม่ก็ไม่สามารถอินทิเกรตได้ จึงจำเป็นต้องมีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขขึ้นมา โดยการอินทิเกรตเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นมีอยู่ 2 วิธีคือ

5.3.1 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู(Numerical Intigation by Trapezoidal rule)

วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูสามารถหาได้จากสูตรการหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูทางคณิตศาสตร์ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการอินทิเกรตสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.2 คือ

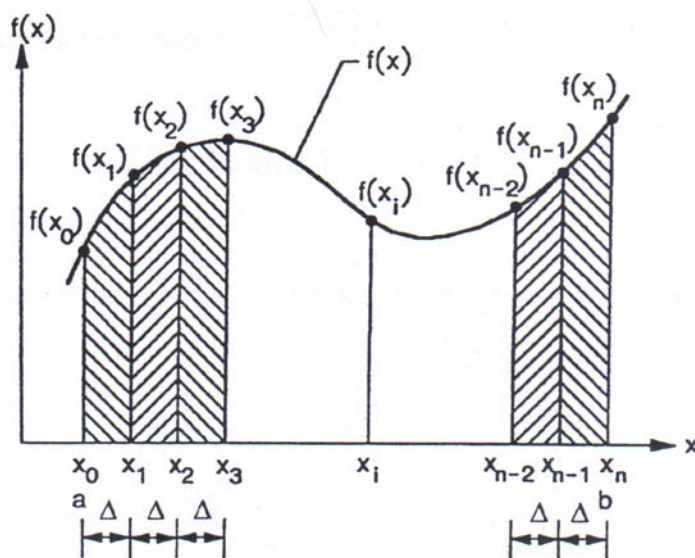


รูปที่ 5.2 แสดงการอินทิเกรตโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

จากรูปที่ 5.2 สามารถเขียนสูตรการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูได้โดย

$$I = \left(\frac{b-a}{2} \right) (f(x_1) + f(x_2)) \quad (5.18)$$

เนื่องจากการแบ่งจุดโนดบนขอบเขตของปัญหาจะมีการแบ่งออกเป็นจำนวนมากจะนำสมการที่ (5.18) มาทำการบวกไปเรื่อยๆจนครบจำนวนช่องของการแบ่งจุดโนดโดยสามารถดูได้จากรูปที่ 5.3



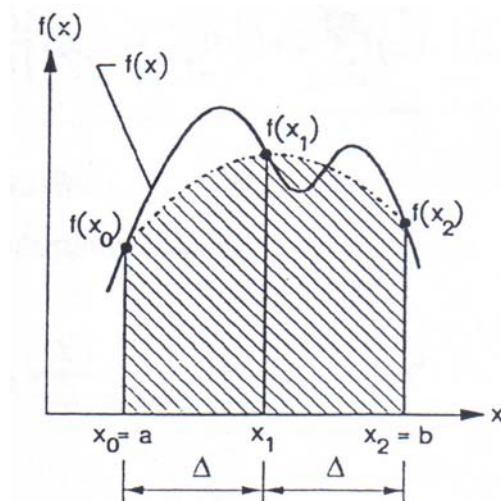
รูปที่ 5.3 แสดงการอินทิเกรตโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบแบ่งหลายจุด

ดังนั้นสูตรการอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบแบ่งหลายจุดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I = \frac{\Delta}{2} \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right) \quad (5.19)$$

5.3.2 การอินทิเกรตเชิงตัวเลขโดยกฎของซิมสัน 1/3 (Numerical integration by Simpson's 1/3 rule)

วิธีการอินทิเกรตโดยกฎของซิมสัน 1/3 เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้เนื่องจากมีความแม่นยำสูงกว่ากฎสี่เหลี่ยมคางหมู โดยพิจารณาจากรูปที่ 5.4

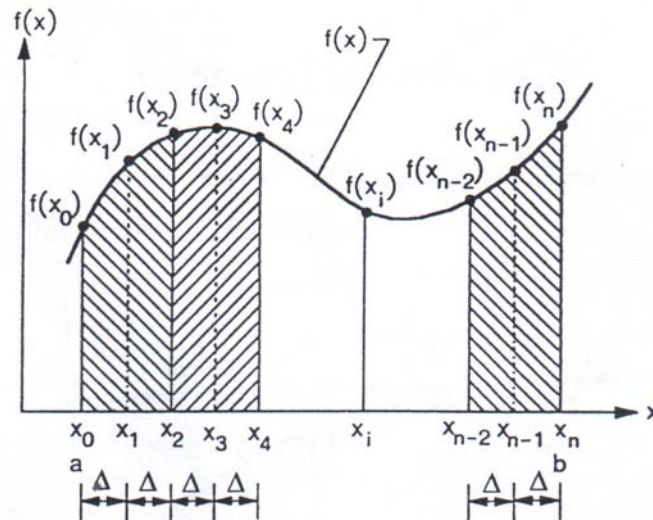


รูปที่ 5.4 แสดงการอินทิเกรตโดยใช้กฎของซิมสัน 1/3

จากรูปที่ 5.4 แสดงลักษณะการกระจายของฟังก์ชัน $f(x)$ ในช่วง $a \leq x \leq b$ และจากรูป 5.4 เราจะประมาณค่าฟังก์ชัน $f(x)$ ที่แท้จริงด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับสองที่แสดงด้วยเส้นประโดยอาศัยฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของลากรองจ์ (second order Lagrange polynomial) และทำการอินทิเกรตฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของลากรองจ์ จะได้

$$I = \frac{\Delta}{3} (f(x_1) + 4f(x_2) + f(x_3)) \quad (5.20)$$

ในทำนองเดียวกันถ้าแบ่งจำนวนจุดโนดหลายจุดโนดก็จะได้กฎของซิมสัน 1/3 สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงการอินทิเกรตโดยกฎของซิมสัน 1/3 แบบหลายช่วง

ดังนั้นสูตรการอินทิเกรตโดยกฎของซิมสัน 1/3 แบบหลายช่วงคือ

$$I = \frac{\Delta}{3} \left(f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{j=2,4,6}^{n-2} f(x_j) + f(x_n) \right) \quad (5.21)$$

5.4 การคำนวณหาค่าความหนาฟิล์ม[2]

จากสมการความหนาฟิล์มรูปแบบไร้มิติคือ

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2} - \frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} P \ln(X - X') dX' \quad (4.33)$$

จากสมการที่ (4.33) จะสังเกตเห็นได้ว่าพจน์สุดท้ายทางขวามือนั้น เราจะทำกรอินทิเกรตเชิงตัวเลข โดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูหรือกฎของซิมสัน 1/3 ไม่ได้ ดังนั้น Hamrock [2] ได้ทำการนำเสนอวิธีการประมาณค่าพจน์นี้โดยกำหนดให้

$$\delta = -\frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} P \ln(X - X') dX' \quad (5.22)$$

ทำการอินทิเกรตที่ละส่วนสมการที่ (5.22) จะทำให้

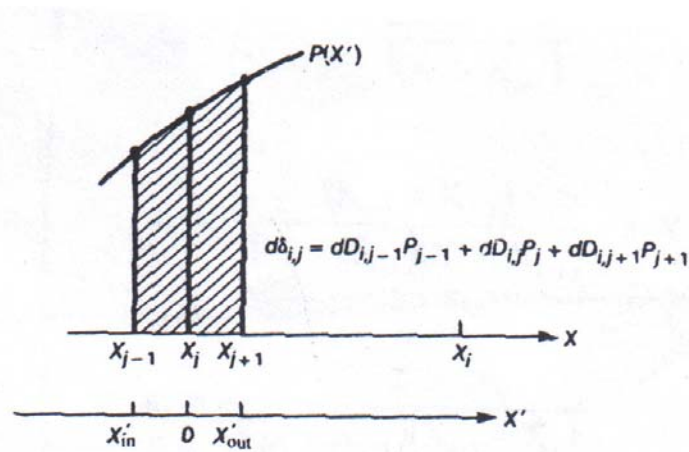
$$\delta = -\frac{1}{2\pi} \left| P I_1 \right|_{X_{in}}^{X_{out}} + \frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} \frac{dp}{dX'} I_1 dX' \quad (5.23)$$

เมื่อ

$$I_1 = -(X - X')^2 [\ln(X - X')^2 - 2] \quad (5.24)$$

ทำการตัดพจน์แรกทางขวาของสมการที่ (5.23) ออกเนื่องจากเงื่อนไขค่าของเขตของสมการเรย์โนลด์ทำให้มีค่าเป็น 0 ดังนั้นสมการที่ (5.23) จะกลายเป็น

$$\delta = -\frac{1}{2\pi} \int_{X_{in}}^{X_{out}} \frac{dP}{dX'} (X - X')^2 [\ln(X - X')^2 - 2] dX' \quad (5.25)$$



รูปที่ 5.6 แสดงวิธีคำนวณหาการเปลี่ยนรูประหว่างที่มีความดันมากระทำ $d\delta_{i,j}$ ที่โนด i ในช่วง $[X_{j-1}, X_{j+1}]$

จากสมการที่ (5.25) ช่วงของขอบเขต $[X_{in}, X_{out}]$ สามารถแบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ คือ $[X_{j-1}, X_{j+1}]$ ดังนั้นการเปลี่ยนรูป δ_i จึงเป็นผลรวมของการเปลี่ยนรูปในช่วงย่อยๆ $d\delta_{i,j}$ ที่โนด i ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วง $[X_{j-1}, X_{j+1}]$

$$\delta_i = \sum_{j=1,3,5}^{n-1} d\delta_{i,j} \quad (5.26)$$

ในช่วงย่อยๆ เหล่านี้ค่าของ dP/dX' จะสมมุติว่ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับ X' และ X' จะถูกเปลี่ยนแปลงระหว่าง X'_{j-1} และ X'_j และระหว่าง X'_j และ X'_{j+1} ดังรูปที่ 5.6 เมื่อช่วงย่อยๆ เหล่านี้อยู่ในระยะ X_i และ X_j เพื่อให้ง่ายขึ้นจะให้อยู่ในรูป

$$d\delta_{i,j} = -\frac{1}{2\pi} \int_{X_{j-1} \rightarrow X_j}^{X_{j+1} \rightarrow X_j} \frac{dP}{dX'} (X_i - X_j - X') \left[\ln(X_i - X_j - X')^2 - 2 \right] dX' \quad (5.27)$$

การกระจายเชิงเส้นของ dP/dX' คือ

$$\frac{dP}{dX'} = (a_1 X' + a_2) P_{j-1} + (a_3 X' + a_4) P_j + (a_5 X' + a_6) P_{j+1} \quad (5.28)$$

เมื่อ

$$a_1 = \frac{2}{(X_{j-1} - X_j)(X_{j-1} - X_{j+1})} \quad (5.29)$$

$$a_2 = -\frac{(X_j + X_{j+1})}{(X_{j-1} - X_j)(X_{j-1} - X_{j+1})} + a_1 X_j \quad (5.30)$$

$$a_3 = \frac{2}{(X_j - X_{j-1})(X_j - X_{j+1})} \quad (5.31)$$

$$a_4 = -\frac{(X_{j+1} + X_{j-1})}{(X_j - X_{j-1})(X_j - X_{j+1})} + a_3 X_j \quad (5.32)$$

$$a_5 = \frac{2}{(X_{j+1} - X_{j-1})(X_{j+1} - X_j)} \quad (5.33)$$

$$a_6 = -\frac{(X_j + X_{j-1})}{(X_{j+1} - X_{j-1})(X_{j+1} - X_j)} + a_5 X_j \quad (5.34)$$

จากการกระจาย dP/dX' ในทำนองเดียวกันก็สามารถกระจาย $d\delta_{i,j}$ ได้คือ

$$d\delta_{i,j} = dD_{i,j-1} P_{j-1} + dD_{i,j} P_j + dD_{i,j+1} P_{j+1} \quad (5.35)$$

เมื่อ dD สามารถคำนวณได้จาก

$$dD_{i,j-1} = -\frac{1}{2\pi} \int_{X_{j-1} \rightarrow X_j}^{X_{j+1} \rightarrow X_j} (a_1 X + a_2) (X_i - X_j - X') \left[\ln(X_i - X_j - X')^2 - 2 \right] dX' \quad (5.36)$$

ทำการแปลงโคออร์ดิเนตโดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} Z &= X_i - X_j - X' , \quad Z_{\min} = X_i - X_{j-1} , \quad Z_{\max} = X_i - X_{j+1} \\ b_2 &= a_1(X_i - X_j) + a_2 , \quad dZ = -dX' \end{aligned} \quad (5.37)$$

ดังนั้น $dD_{i,j-1}$ สามารถคำนวณได้ด้วย

$$\begin{aligned} dD_{i,j-1} &= -\frac{1}{2\pi} \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} -(a_1 Z + b_2) Z (\ln Z^2 - 2) dZ \\ &= -\frac{1}{2\pi} (-2b_2) \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} Z \ln Z dZ + a_1 \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} Z^2 \ln Z^2 dZ + 2b_2 \left[\frac{Z^2}{2} \right]_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} - 2a_1 \left[\frac{Z^3}{3} \right]_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} \\ &= -\frac{1}{2\pi} \left[-2b_2 \frac{Z^2}{4} (\ln Z^2 - 1) + 2a_1 \frac{Z^3}{9} (\ln |Z|^3 - 1) + 2b_2 \frac{Z^2}{2} - 2a_1 \frac{Z^3}{3} \right]_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} \end{aligned} \quad (5.38)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ $dD_{i,j}$ และ $dD_{i,j+1}$ มีความสัมพันธ์คล้ายกันกับ $dD_{i,j-1}$ จำสามารถใช้สมการ (5.38) เพื่อแปลงโคออดิเนตและใช้วิธีการคำนวณแบบเดียวกันดังนั้น

$$dD_{i,j-1} = -\frac{1}{2\pi} \left(a_1 K_1 + a_2 \frac{K_2}{2} \right) \quad (5.39)$$

$$dD_{i,j} = -\frac{1}{2\pi} \left(a_3 K_1 + a_4 \frac{K_2}{2} \right) \quad (5.40)$$

$$dD_{i,j+1} = -\frac{1}{2\pi} \left(a_5 K_1 + a_6 \frac{K_2}{2} \right) \quad (5.41)$$

เมื่อ

$$K_1 = K_2 \frac{X_i - X_j}{2} + \frac{2K_3}{9} \quad (5.42)$$

$$K_2 = Z_{\min}^2 (\ln Z_{\min}^2 - 3) - Z_{\min}^2 (\ln Z_{\max}^2 - 3) \quad (5.43)$$

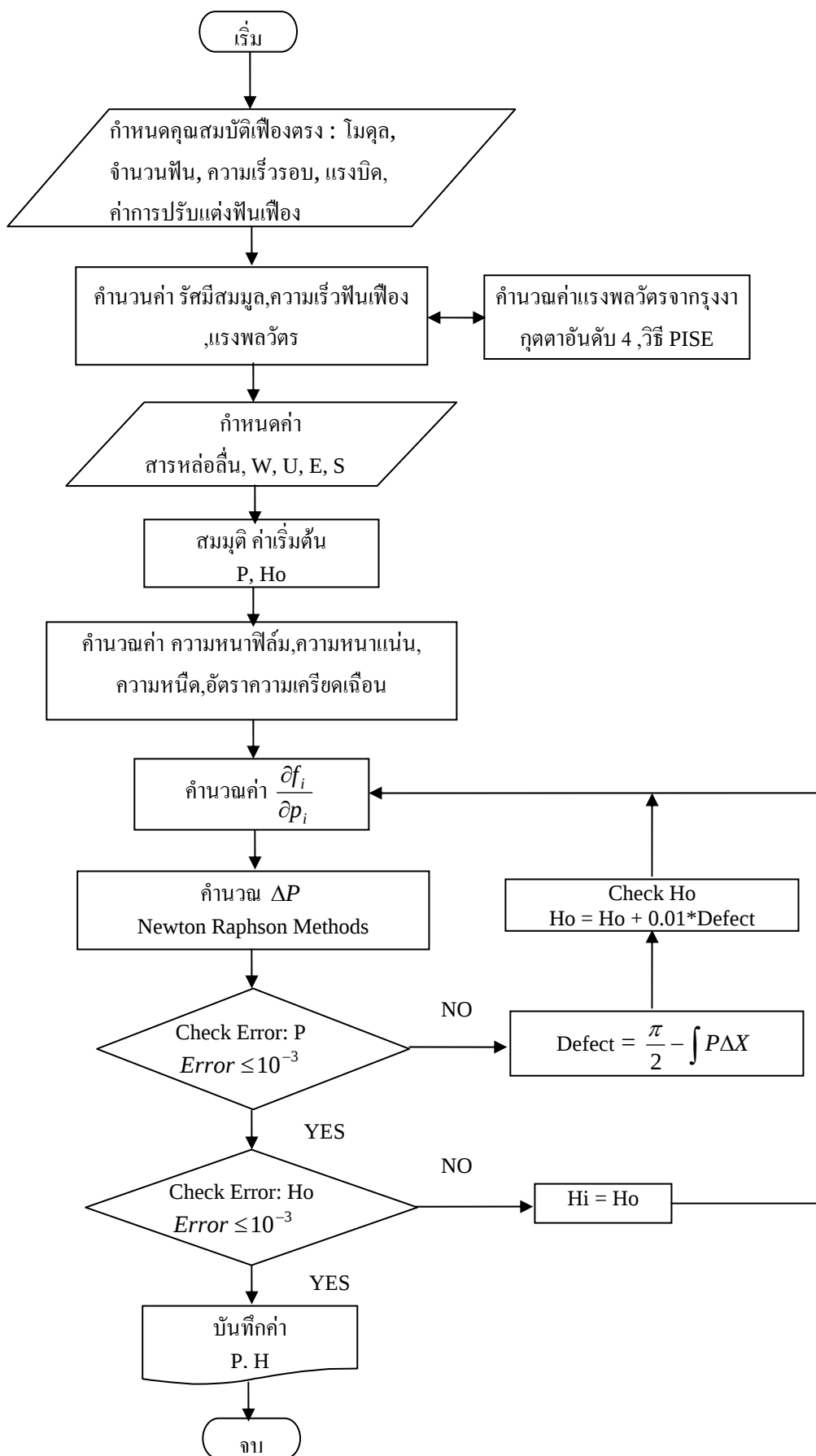
$$K_3 = Z_{\max}^3 (\ln |Z_{\max}^3| - 4) - Z_{\min}^3 (\ln |Z_{\min}^3| - 4) \quad (5.44)$$

แทนค่าสมการ (5.35) ลงในสมการ (5.26) ทำให้ได้สมการการเปลี่ยนรูปเมื่อมีความดันกระทำคือ

$$\delta_i = \sum_{j=1,3,5,\dots}^{n-1} (dD_{i,j-1}P_{j-1} + dD_{i,j}P_j + dD_{i,j+1}P_{j+1}) \quad (5.45)$$

ดังนั้นสมการความหนาฟิล์มที่โนดต่างๆ คือ

$$H_i = H_0 + \frac{X_i^2}{2} + \sum_{j=1,3,5,\dots}^{n-1} (dD_{j,j-1}P_{j-1} + dD_{i,j}P_j + dD_{i,j+1}P_{j+1}) \quad (5.46)$$



รูปที่ 5.7 กระบวนการคำนวณความหนาฟิล์มและความดัน

5.5 ผลการคำนวณ

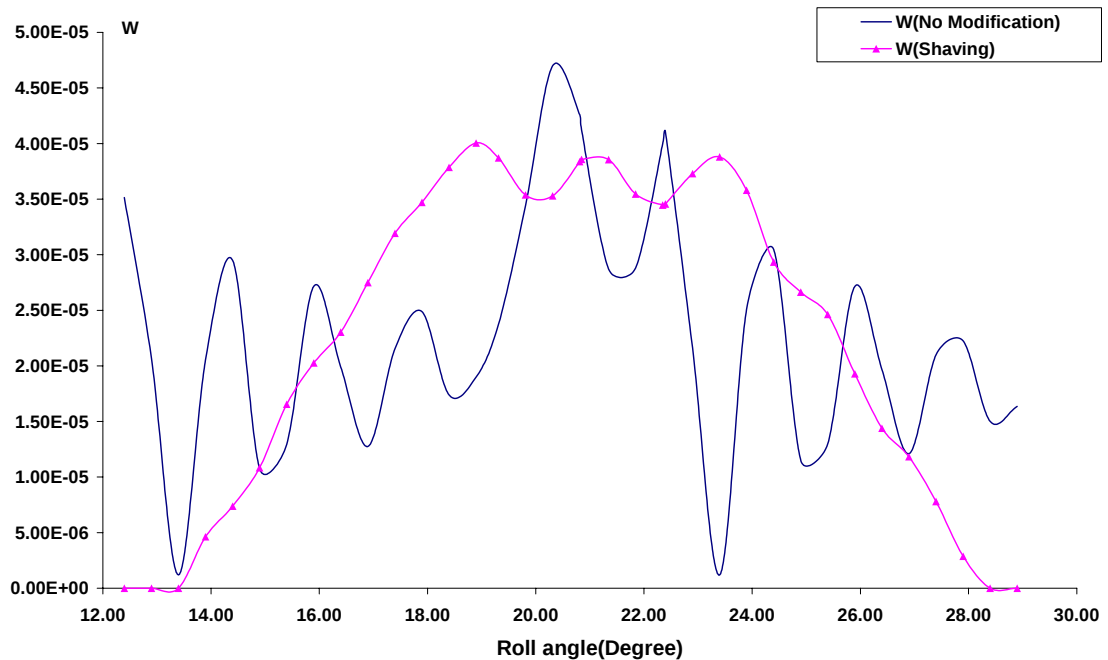
ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของสารหล่อลื่นที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติสารหล่อลื่น	SAE90
ความหนาแน่น (kg/m^3)	892.8
ความหนืดสมบูร์น ที่ $P = 0$, (Pa.s)	0.1946304
ดัชนีความหนืด-ความดันสารหล่อลื่น (Z)	0.511
ดัชนีเพาเวอร์ลอร์ (n)	1

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติวัสดุ

โมดูลัสความยืดหยุ่น (นิวตัน/เมตร)	207×10^9
อัตราส่วนปัวซอง	0.3

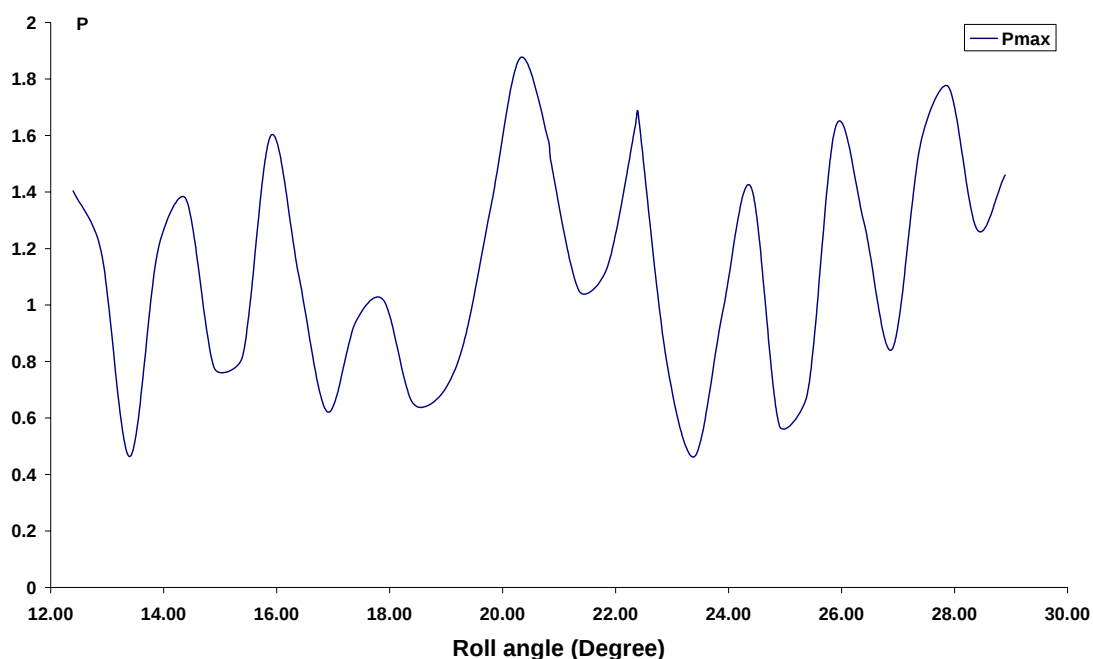
5.5.1 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อฟันเฟืองตรงที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.8 แรงพลวัต(ไร้มิติ) ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

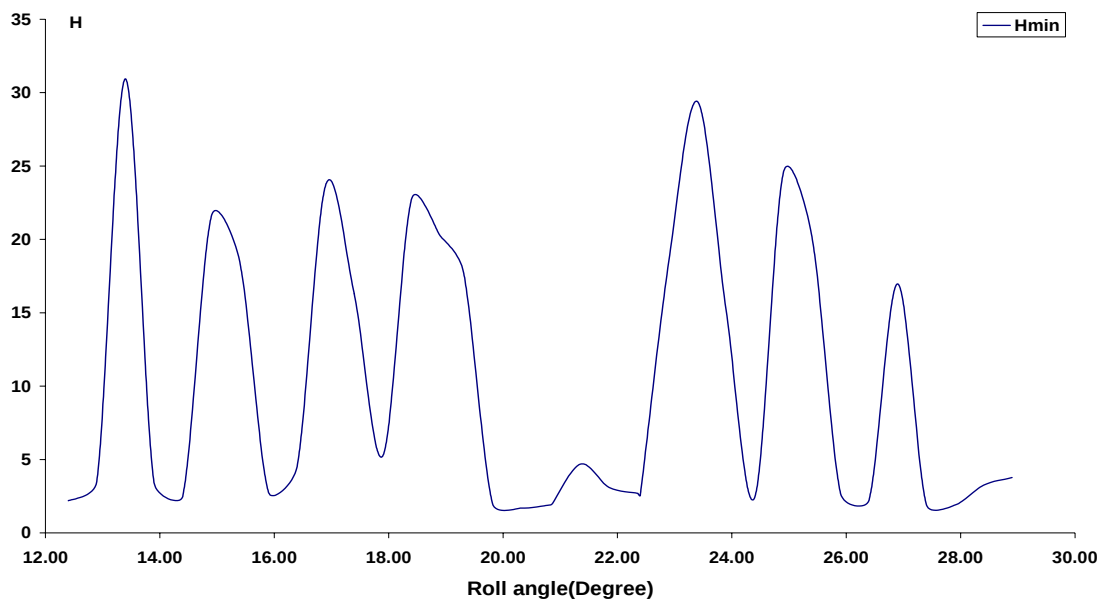
จากรูป 5.8 แสดงค่าแรงพลวัตแบบไร้มิติที่เกิดขึ้น บนหน้าผิวฟันเฟืองตรง หนึ่งคู่ ฟันที่ไม่ได้ทำการปรับแต่งฟัน และแบบที่ทำการปรับแต่งฟันโดยวิธีเฉือนหน้าฟัน จะเห็นได้ว่าในกรณีที่

ไม่ปรับแต่งฟิน จะมีการกระจายแรงพลวัตในแต่ละมุมหมุนที่ค่อนข้างเพิ่มขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนกรณีที่มีการปรับแต่งจะทำให้แรงพลวัตเกิดขึ้นค่อนข้างจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามมุมหมุนที่เกิดขึ้นในช่วงขบกัน สองคู่ฟินเฟือง ขาเข้า และจะเริ่มค่อนข้างคงที่ในช่วง ขบกัน หนึ่งคู่ฟินเฟือง และ เริ่มลดลงเมื่อมุมหมุนในช่วง ขบกันสองคู่ฟินเฟืองขาออก



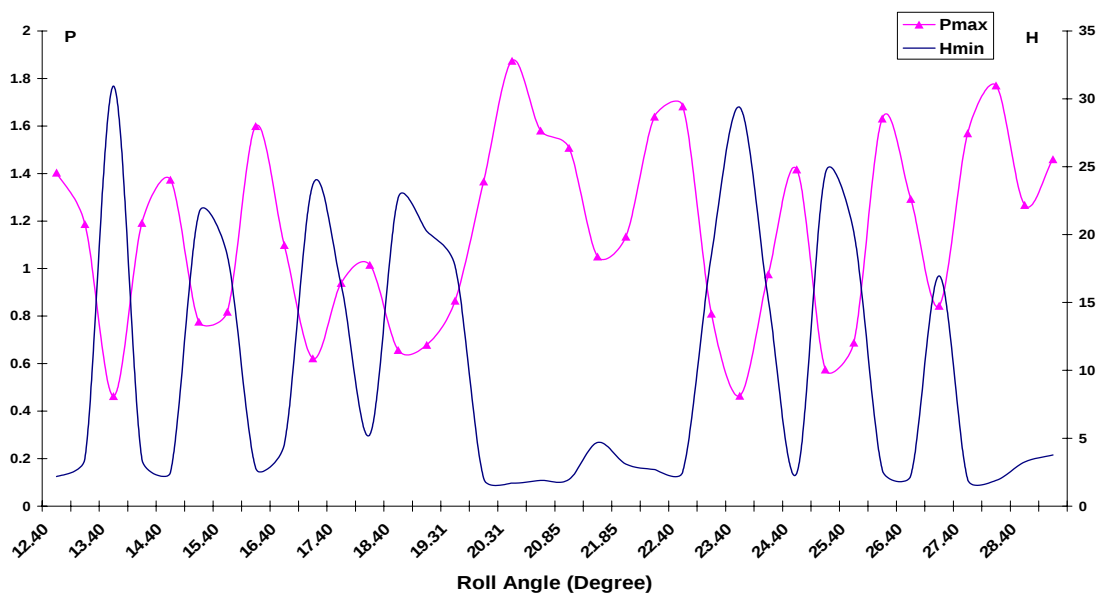
รูปที่ 5.9 การกระจายความดัน (ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

จากรูป 5.9 แสดงการกระจายความดันไร้มิติ ที่เกิดขึ้นบนฟินเฟืองหนึ่ง คู่ฟินเฟือง จะเห็นได้ว่ามีลักษณะการกระจายความดันเป็นไปลักษณะใกล้เคียงกับการเกิดแรงพลวัตในฟินเฟือง นั่นคือ เมื่อไม่มีการปรับแต่งฟินความดันที่กระทำต่อฟินเฟือง ในช่วงที่มีการขบกันหนึ่งคู่ฟินเฟืองจะมีความดันสูงกว่าในทุกๆ ช่วงมุมหมุน เนื่องจาก ฟินเฟืองที่มีการขบกันเพียง หนึ่งคู่ฟินเฟืองจะมีการรับแรงที่เกิดขึ้นสูงกว่าในช่วงที่มีการขบกัน สองคู่ฟินเฟือง และจากรูปจะเห็นว่ามีลักษณะการกระจายความดันที่ขึ้นลงซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีแรงพลวัตที่ไม่สม่ำเสมอ กระทำต่อฟินเฟืองที่ไม่ปรับแต่ง



รูปที่ 5.10 การกระจายความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

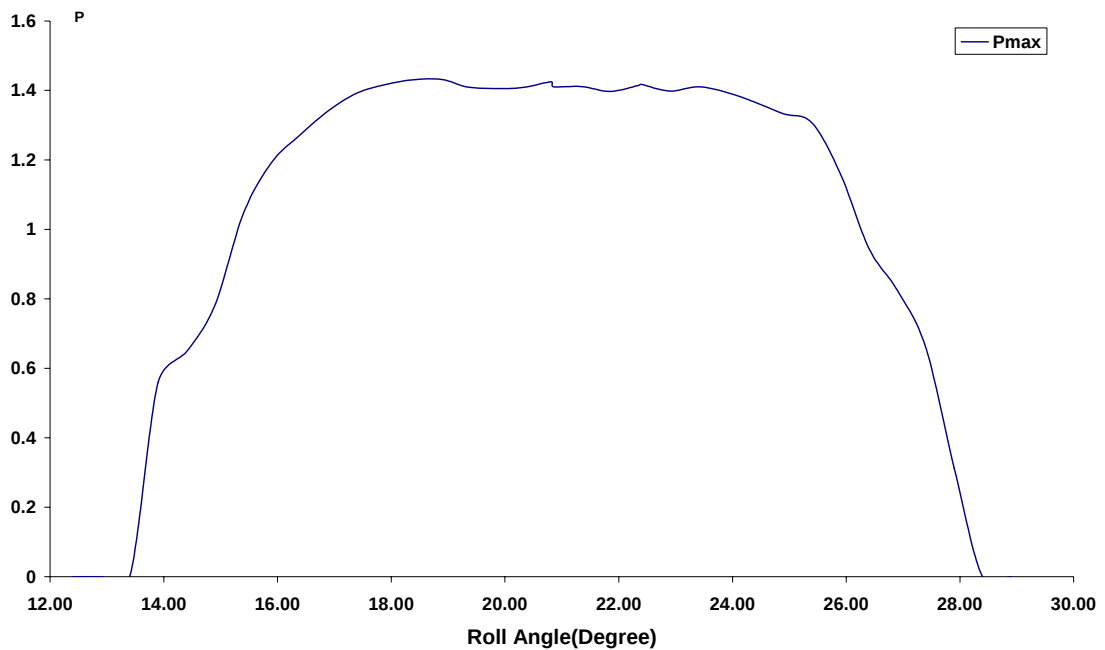
จากรูป 5.10 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ที่เกิดขึ้นกับฟันเฟืองตรงที่ขบกัน หนึ่งคู่ จะเห็นได้ว่า การกระจายความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น จะมีลักษณะการกระจายความหนาฟิล์มที่หนาและบาง ขึ้นอยู่กับความดันที่กระทำ นั่นคือเมื่อมีความดันกระทำมาก จะทำให้ความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความหนาน้อยลง ซึ่งในช่วงมุมหมุนที่มีการขบกัน หนึ่งคู่ฟันเฟือง จะมีความดันกระทำมากและทำให้ความหนาฟิล์ม น้อยลงอย่างมาก



รูปที่ 5.11 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

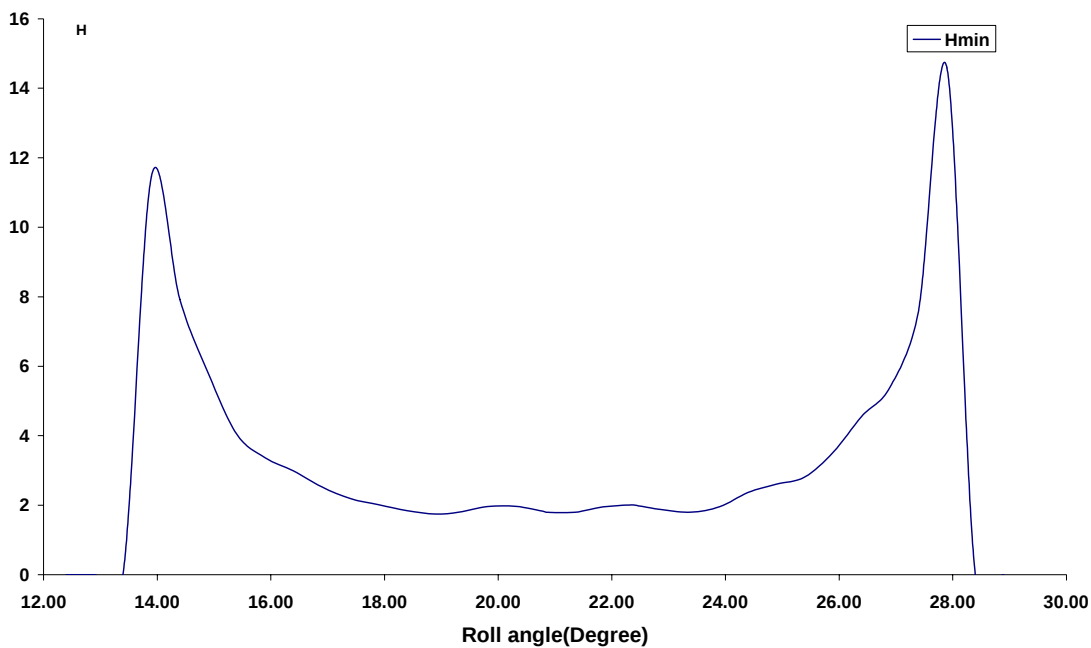
จากรูป 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันและความหนาฟิล์มแบบ ไร้มิติที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความดันสูงจะทำให้ความหนาฟิล์มบางลง และช่วงที่มีความดันสูงจะเกิดขึ้น ในช่วงที่พื้นเพียงมีการขบกัน หนึ่งคู่พื้นเพียง

5.5.2 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อพื้นเพียงตรงที่ ปรับแต่ง ที่ ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที



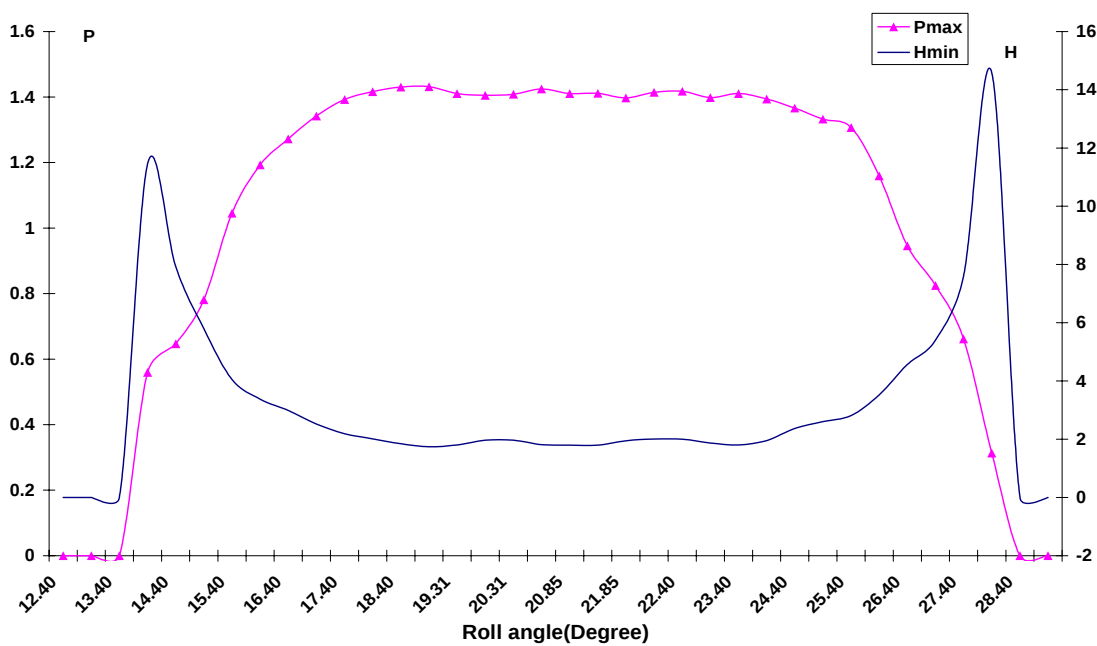
รูปที่ 5.12 การกระจายความดัน (ไร้มิติ) กรณีที่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

จากรูป 5.12 แสดงถึงการกระจายความดันแบบ ไร้มิติ ในกรณีที่มีการปรับแต่งพื้นเพียง ตรงโดยวิธีเลื่อนหน้าพื้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับแต่งพื้นเพียง ความดันที่เกิดขึ้นจะเกิดเป็น รูปค่อนข้างจะเป็นรูปประฆังคว่ำ และจะมีค่าสูงในช่วงที่มีการขบกัน หนึ่งคู่พื้นเพียง แสดงให้เห็นว่า มีความดันกระทำสูงสุดในช่วงนี้



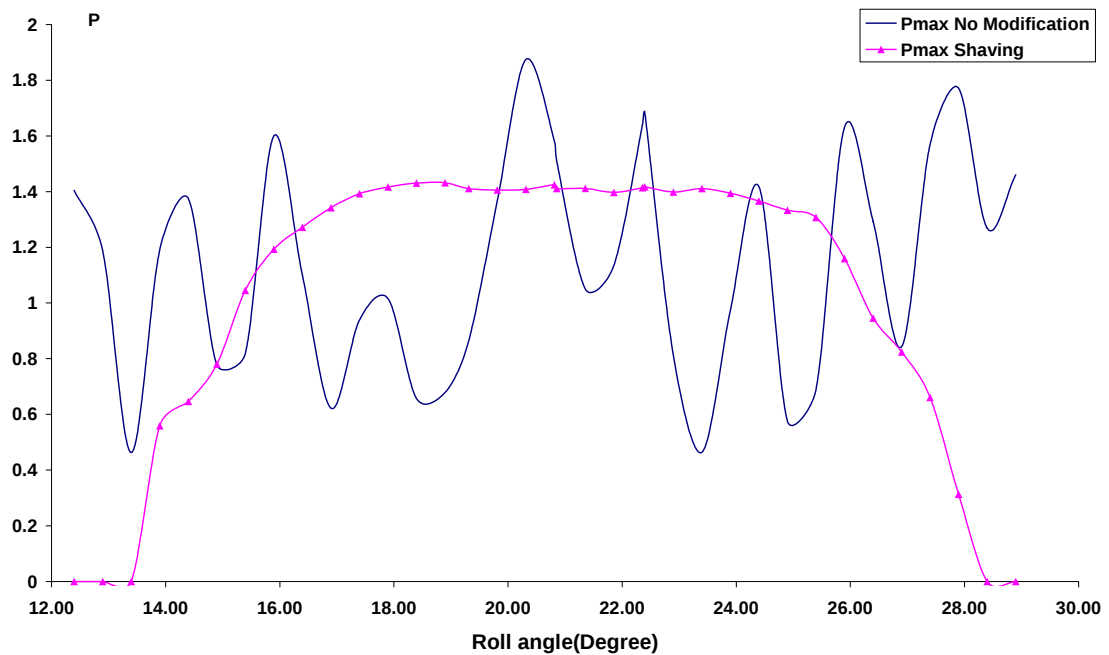
รูปที่ 5.13 การกระจายความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) กรณีที่ปรับแต่งฟิน ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

จากรูป 5.13 แสดงถึงความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการปรับแต่งฟินเพียง จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับแต่งฟินเพียงโดยวิธีเนียนหน้าฟิน แล้ว จะทำให้ลักษณะของการกระจายความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นมีค่าความหนาฟิล์มน้อยมากในช่วงที่มีการขบกัน หนึ่งคู่ฟินเพียง



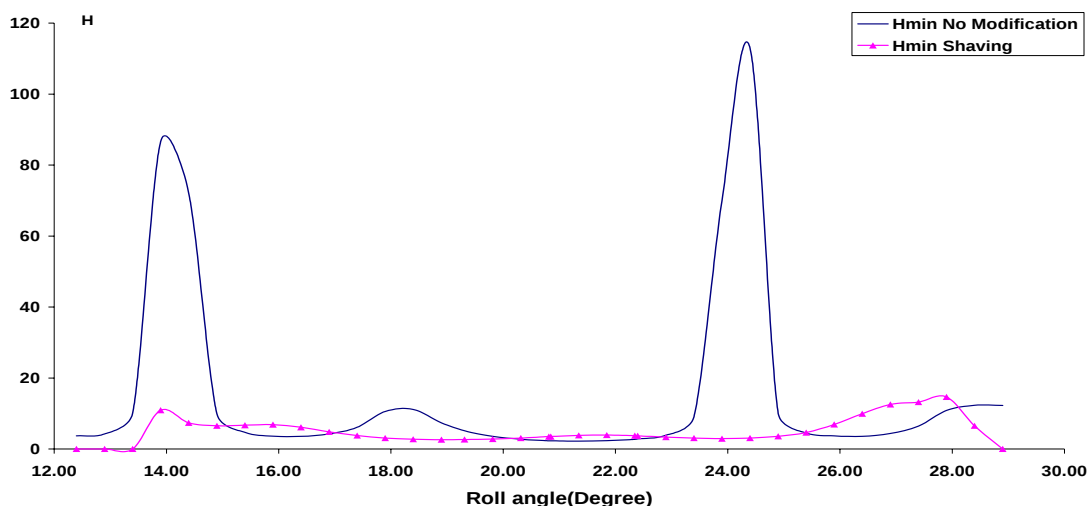
รูปที่ 5.14 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ปรับแต่งฟิน ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

จากรูป 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟัน จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับแต่งฟันความดันที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นสูงอย่างมากในช่วงที่ฟันเฟืองมีการขบกัน หนึ่งคู่ฟันเฟือง และจะทำให้ผลของการกระจายความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น ความหนาฟิล์มจะบางลง อยา่มากในช่วงนี้



รูปที่ 5.15 การกระจายความดัน(ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่ง และปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

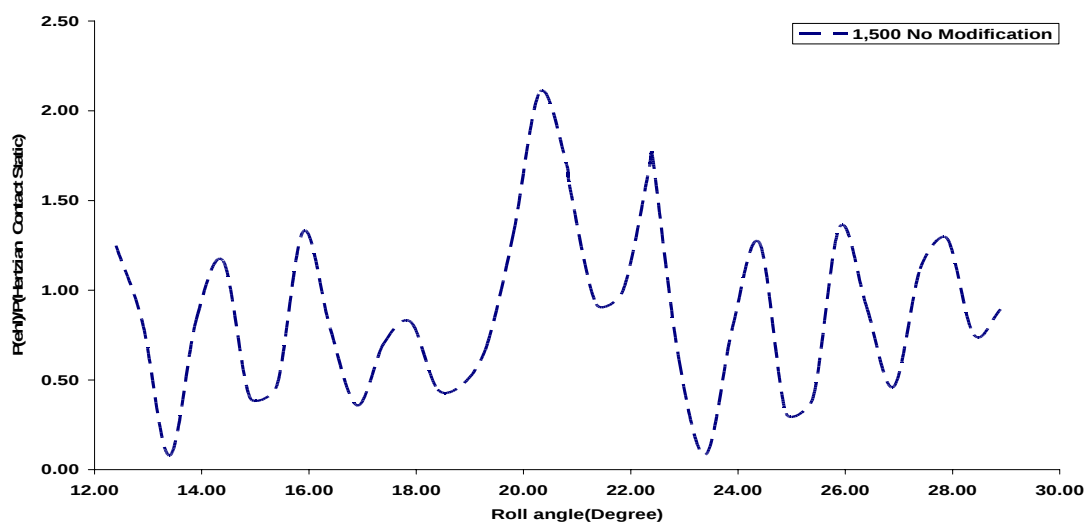
จากรูปที่ 5.15 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายแรงดันที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันเฟืองตรงและในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่ง จะเห็นได้ว่า การกระจายแรงดันที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการปรับแต่งจะมีการกระจายแรงดันที่น้อยกว่าในช่วงที่มีการขบกันหนึ่งคู่ฟันเฟือง ซึ่งแสดงได้ว่า เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองตรงจะมีการกระจายแรงดันที่ลดลงในช่วงการขบกันหนึ่งคู่ฟันเฟือง



รูปที่ 5.16 การกระจายความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่งและปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

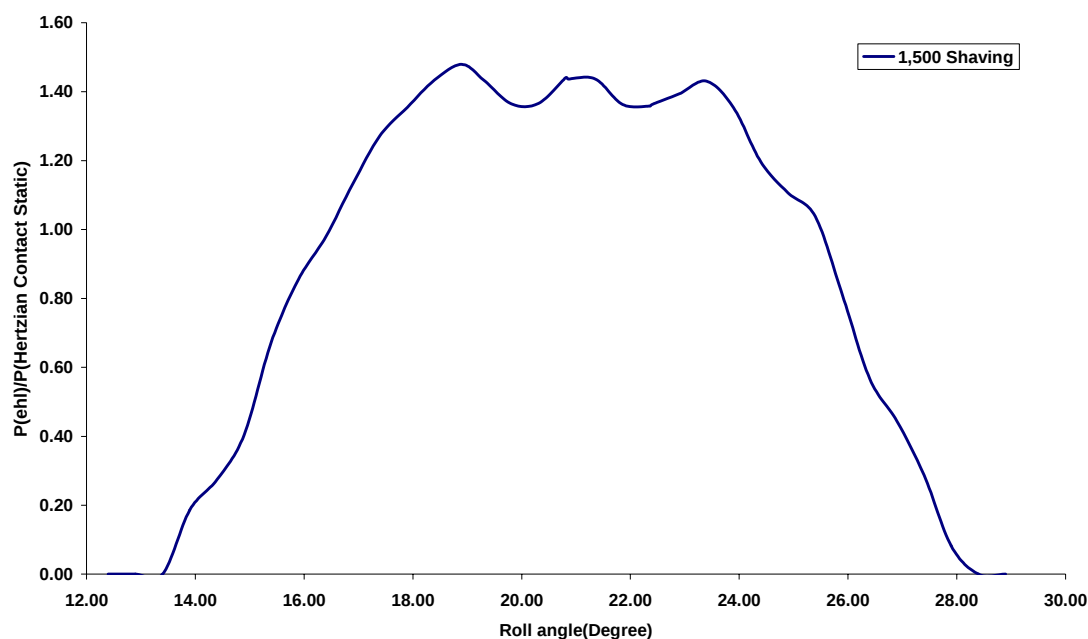
จากรูปที่ 5.16 แสดงถึงการกระจายความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นระหว่างฟันเฟืองที่ไม่มีการปรับแต่งและที่มีการปรับแต่งโดยวิธีเฉือนหน้าฟัน จะเห็นว่า ความหนาฟิล์มในกรณีที่มีการปรับแต่งจะมีความหนาฟิล์มที่มากกว่ากรณีที่ไม่ปรับแต่งในช่วงที่มีการขบกัน หนึ่งคู่ฟันเฟือง ช่วงหนึ่ง ประมาณมุมหมุนที่ 20 ถึง 23 องศา นั้นแสดงให้เห็นได้ว่าเมื่อความหนาฟิล์มน้อยลงหรือฟิล์มน้ำมันบางลงมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายของฟันเฟืองได้ ณ ตำแหน่งนั้นๆ

5.5.3 แสดงถึงอัตราส่วนการกระจายความดันและ Hertzian contact stress (static) ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที



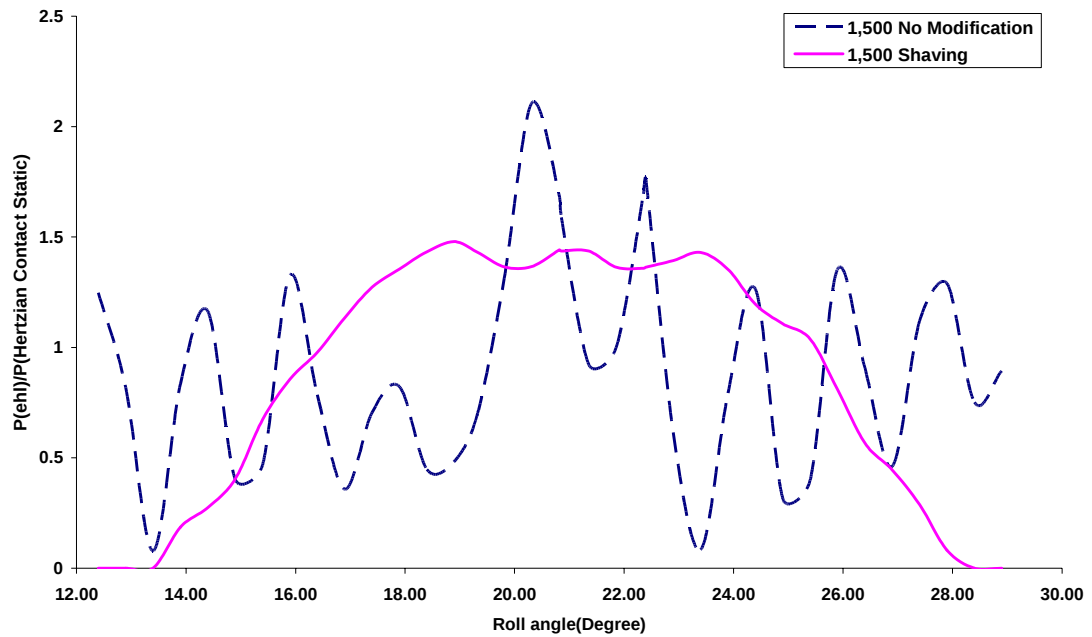
รูปที่ 5.17 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดัน ในกรณี ไม่ปรับแต่ง ที่ 1,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.17 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรง ในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ในกรณีไม่ปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าการอัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากบริเวณที่มีการขบกัน หนึ่งคู่ฟันเฟือง และมีลักษณะการกระจายขึ้นๆ ลงๆ อย่างชัดเจน



รูปที่ 5.18 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดัน ในกรณี ที่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

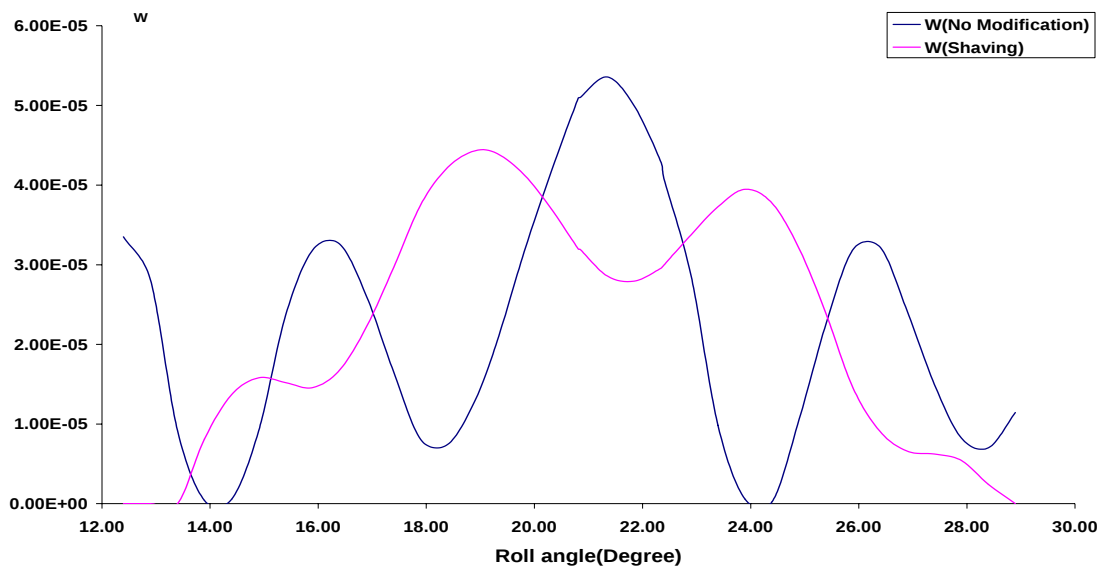
จากรูปที่ 5.18 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรง ในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ในกรณีปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองลักษณะอัตราส่วนแรงดันที่เกิดขึ้นในแต่ละมุมหมุนจะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงสองคู่ฟันเฟืองในช่วงขาเข้าและมีค่ามากสุดในช่วงที่มีการขบกันหนึ่งคู่ฟันเฟือง และเริ่มลดลงในช่วงที่มีการขบกันสองคู่ฟันเฟืองในช่วงขาออก



รูปที่ 5.19 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดัน ในกรณีปรับแต่งและไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที

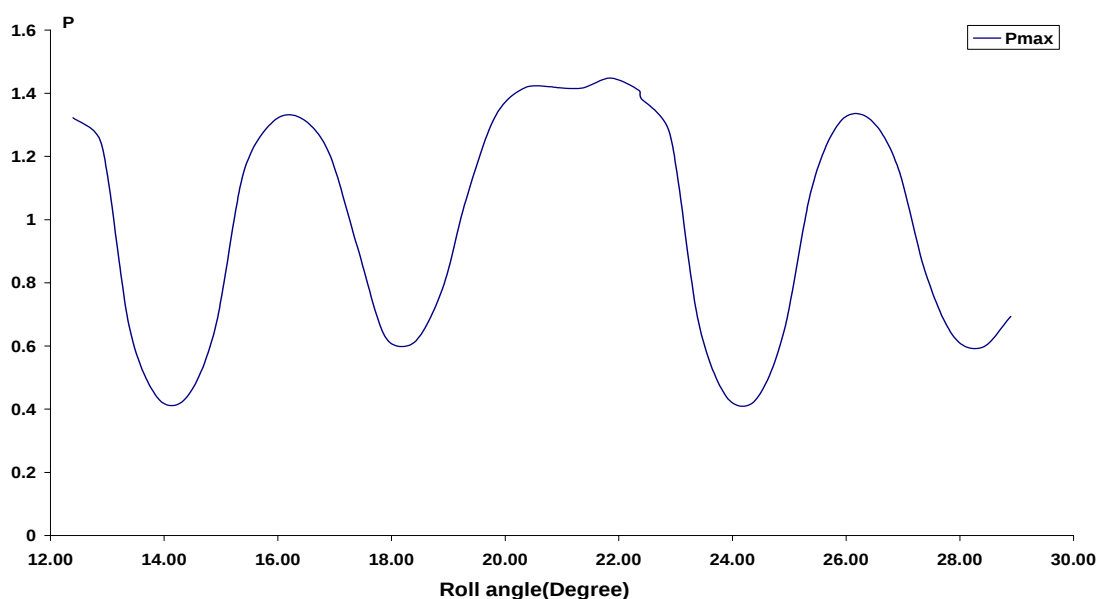
จากรูปที่ 5.19 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซ จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนแรงดันในกรณีที่มีการปรับแต่งฟันเฟืองจะมีค่าที่ลดลง ในช่วงที่มีการขบกัน หนึ่งคู่ฟันเฟือง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งฟันเฟืองทำให้แรงดันที่กระทำมีค่าลดลง

5.5.4 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อฟันเฟืองตรงที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที



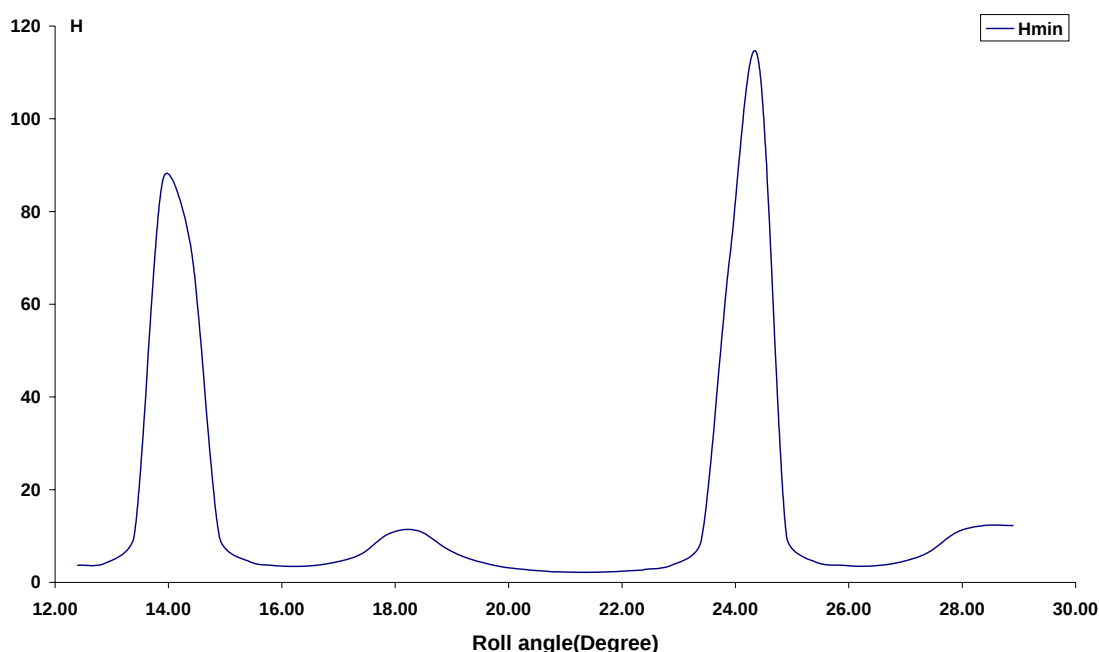
รูปที่ 5.20 แรงพลวัต (ไร้มิติ) ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.20 แสดงแรงพลวัตที่กระทำบนฟันเฟืองแบบไร้มิติที่เกิดขึ้น บนหน้าผิวฟันเฟืองตรง หนึ่งคู่ จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ไม่มีปรับแต่งฟัน จะมีการกระจายแรงพลวัตที่สูงมาก ในช่วงที่มีการขบกันหนึ่งคู่ฟันเฟือง ที่มุมหมุนประมาณ 21 องศา แต่เมื่อมีการปรับแต่งจะทำให้ค่าการกระจายแรงพลวัตที่เกิดขึ้นสูงสุด มีค่าน้อยลง



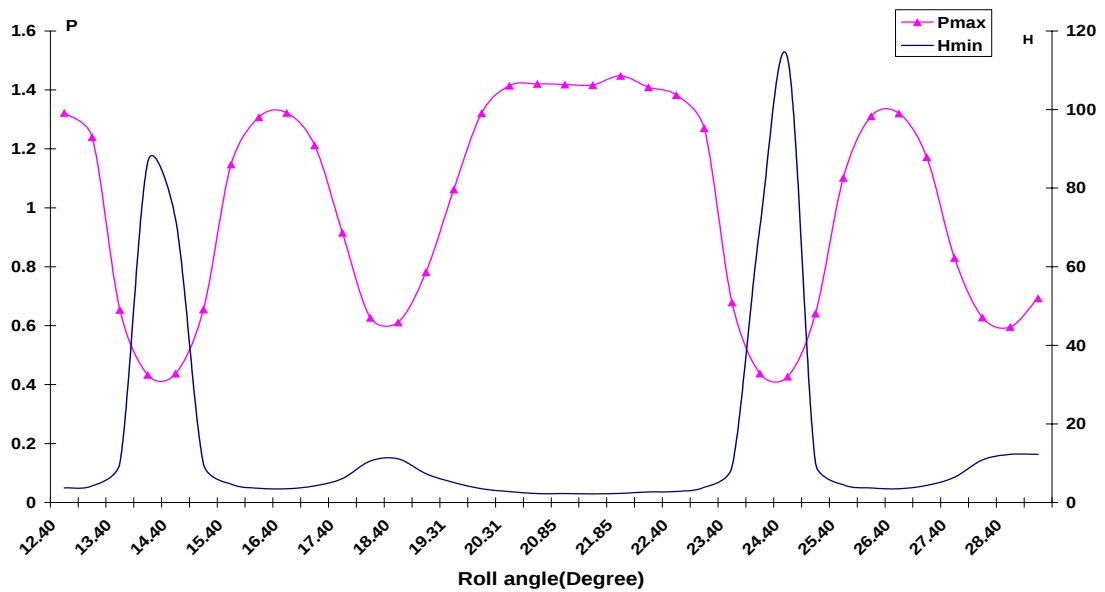
รูปที่ 5.21 การกระจายความดัน(ไร้มิติ) กรณีที่ไม่มีปรับแต่งฟันที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.21 แสดงถึงการกระจายความดันแบบไร้มิติของฟืนเฟืองตรงในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่ง จะเห็นได้ว่าการกระจายแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงในช่วงที่มีการเคลื่อนที่เข้าชกกันสองคู่ฟืนเฟือง และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงที่มีการชกกันแบบหนึ่งคู่ฟืนเฟือง จะเพิ่มสูงอีกครั้งในช่วงเคลื่อนที่ออก ในการชกกันสองคู่ฟืนเฟือง ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงของการกระจายแรงดันในแต่ละช่วงของการชกกันของฟืนเฟือง



รูปที่ 5.22 การกระจายความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

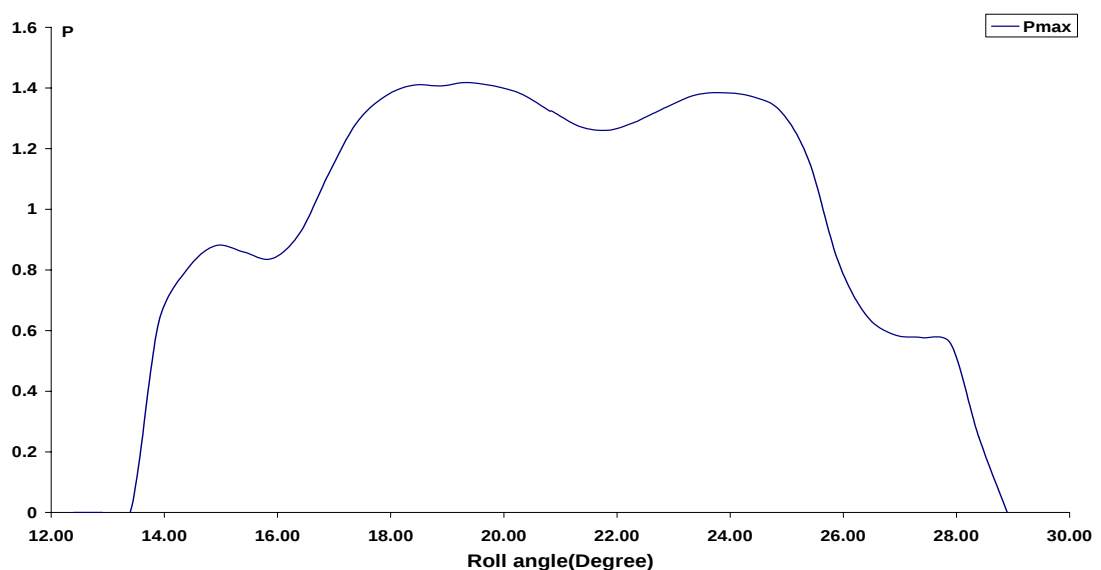
จากรูปที่ 5.22 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่ง ฟืนเฟือง จะเห็นได้ว่า ค่าความหนาฟิล์มจะมีค่าสูงมากในช่วงมุมหมุนที่มีการกระจายความดันที่ต่ำ และมีค่าบางลงในช่วงที่มีการกระจายความดันสูงและจะมีค่าความหนาฟิล์มหนามากที่สุดที่มุมหมุน 14 องศา และ 24 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 5.23 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ไม่มีปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

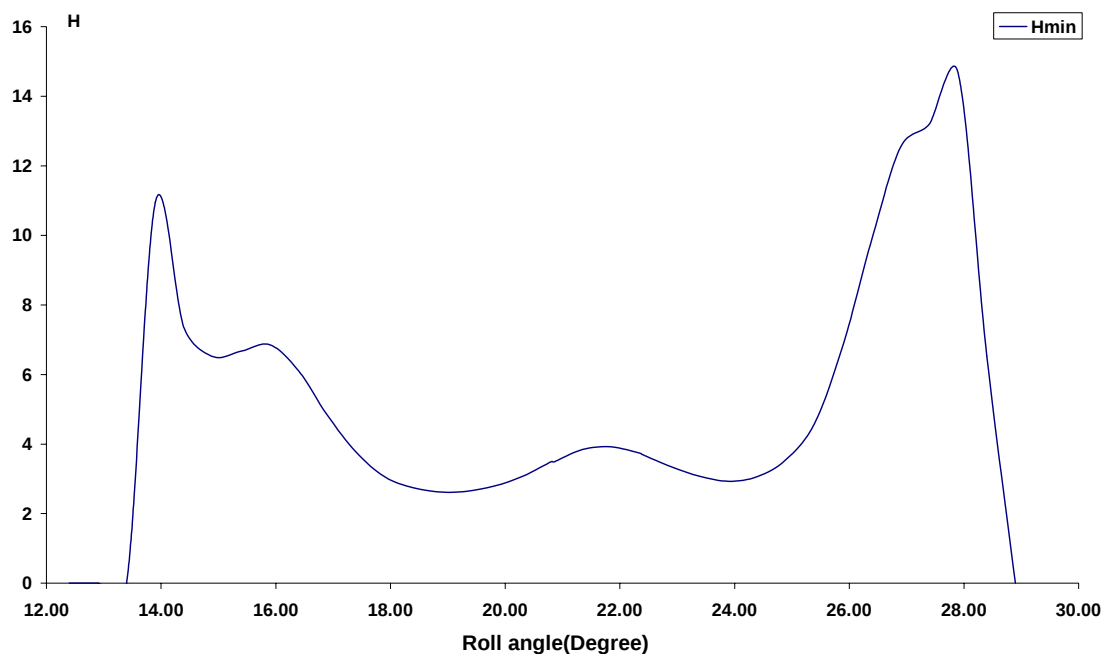
จากรูปที่ 5.23 แสดงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ไม่มี การปรับแต่งฟันเพียง จะได้ได้ว่า การกระจายความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นมีค่าความหนาฟิล์มที่บางเมื่อมี การกระจายความดันสูง และจะมีค่าความหนาฟิล์มหนา ขึ้นเมื่อมีการกระจายความดันน้อย ซึ่งจาก รูปจะเห็นได้ว่า ที่มุมหมุน 14 องศา และ 24 องศา มีค่าความหนาฟิล์มหนาและมีการกระจายความ ดันต่ำ

5.5.5 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อฟันเฟืองตรงที่ ปรับแต่ง ที่ ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที



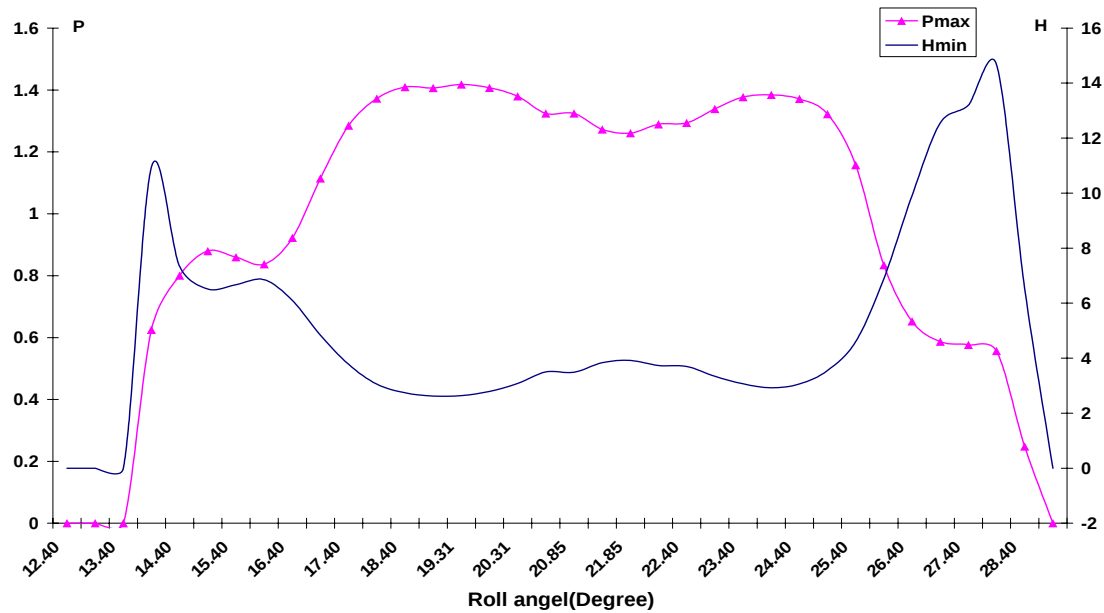
รูปที่ 5.24 การกระจายความดัน(ไร้มิติ) กรณีที่ปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.24 แสดงการกระจายความดันไรรัด ในกรณีที่มีการปรับแต่งฟินเพียง จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับแต่งฟินเพียงค่าการกระจายแรงดันที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากบริเวณมุมหมุนที่ประมาณ 18 ถึง 26 องศา



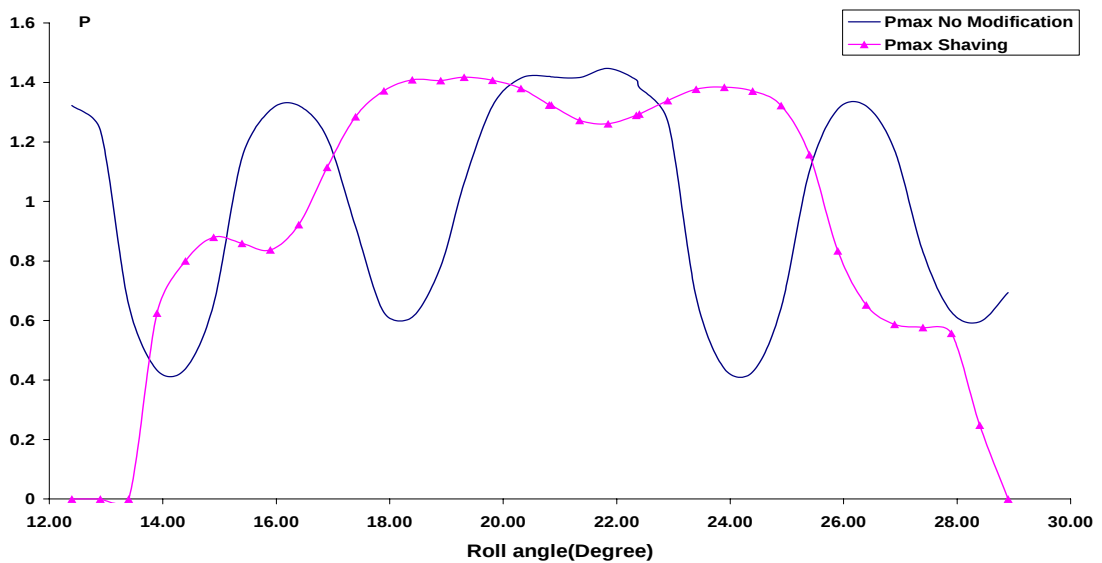
รูปที่ 5.25 การกระจายความหนาฟิล์ม (ไรรัด) กรณีที่ปรับแต่งฟิน ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.25 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไรรัด ในกรณีที่มีการปรับแต่ง จะเห็นได้ว่าค่าความหนาฟิล์มที่ได้จะมีค่าน้อยในช่วงมุมหมุนที่ 18 ถึง 26 องศา และจะมีค่าความหนาฟิล์มที่หนา มากในช่วงเริ่มเข้าขบกันของฟินเพียง และในช่วงที่เคลื่อนที่ออกจากกันของฟินเพียง



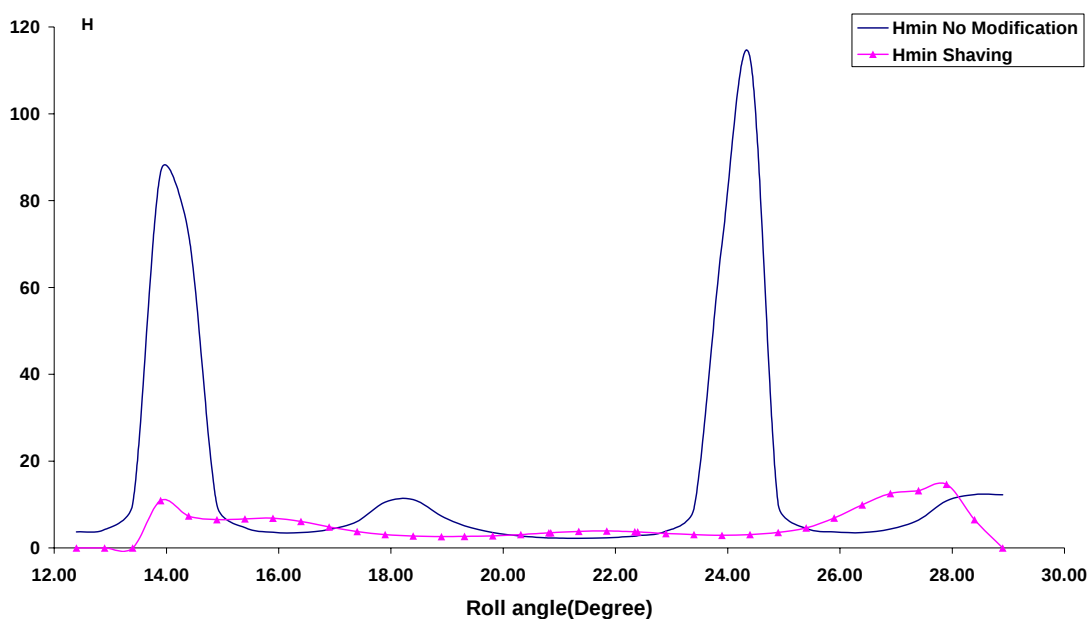
รูปที่ 5.26 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.26 แสดงถึงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่มีการปรับแต่งฟันเพื่อจะเห็นได้ว่าการกระจายความดันที่เกิดขึ้นเมื่อการกระจายความดันมีค่ามากจะทำให้ความหนาฟิล์มบางลง และเช่นเดียวกันเมื่อการกระจายความดันน้อย จะทำให้ค่าการกระจายความหนาฟิล์มมีค่า หนาขึ้น ซึ่งจากรูปค่าการกระจายความดันจะมีค่าสูงในช่วงมุมหมุนที่ 18 ถึง 26 องศา



รูปที่ 5.27 การกระจายความดัน (ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่งและปรับแต่งฟันที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

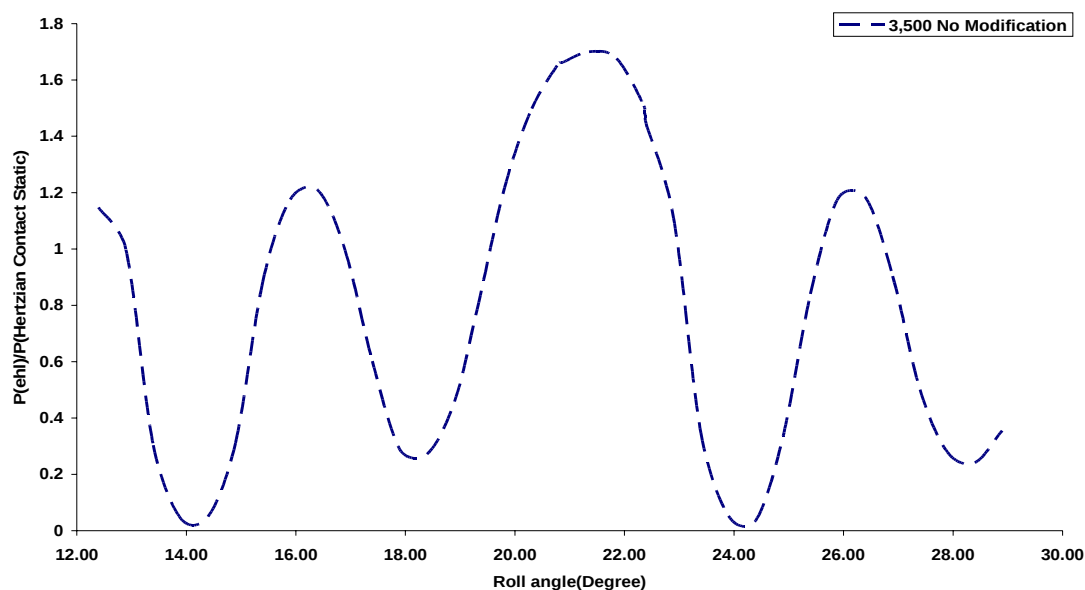
จากรูปที่ 5.28 แสดงค่าการกระจายความดันแบบไรมิตีที่มีการปรับแต่งและไม่ปรับแต่ง ฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองค่าการกระจายความดันไม่ลดลง จากกรณีที่ไม่ปรับแต่งมากนัก แต่จะมีลักษณะการกระจายความดันที่สูงและยาวนานขึ้นในช่วงมุมหมุนที่ 18 ถึง 26 องศา



รูปที่ 5.28 การกระจายความหนาฟิล์ม (ไรมิตี) ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันเฟืองและปรับแต่งฟันเฟืองที่ความเร็ว รอบ 3,500 รอบต่อนาที

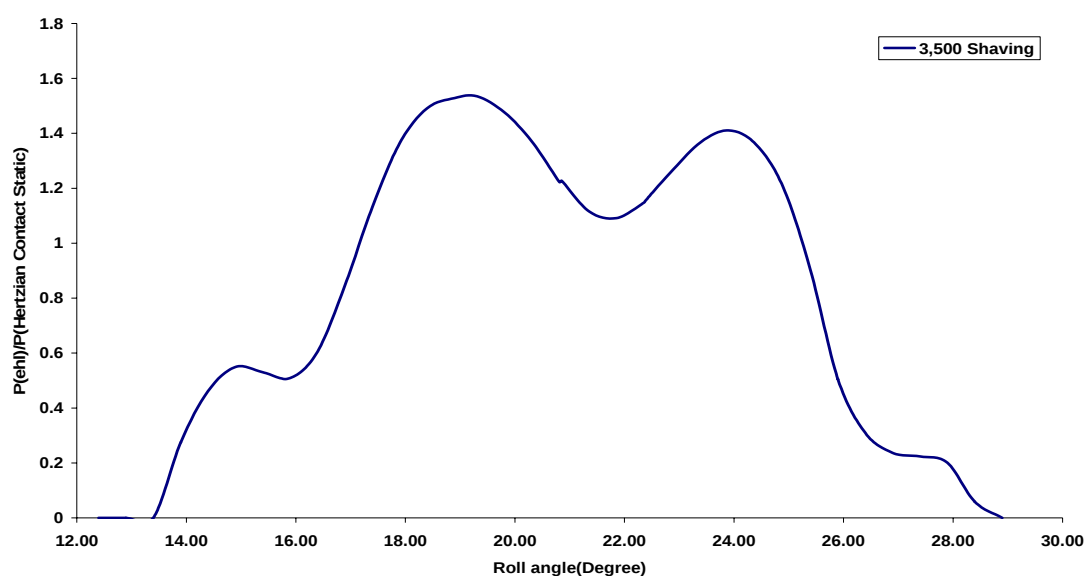
รูปที่ 5.28 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไรมิตีในกรณีที่ไม่ทำการปรับแต่งฟันเฟือง และที่ทำการปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าค่าความหนาฟิล์ม ที่มีการปรับแต่งจะมีค่าต่ำกว่า ความหนาฟิล์มในกรณีที่ไม่ปรับแต่ง ซึ่งจากรูปที่มุมหมุนประมาณ 14 และ 24 องศา จะมีค่าการกระจายความหนาฟิล์มที่หนามาก และในช่วงมุมหมุนที่ 18 องศา ค่าการกระจายความหนาฟิล์มของกรณีที่ไม่ปรับแต่ง ก็มีความหนาฟิล์มที่หนากว่า กรณีที่ปรับแต่ง

5.5.6 แสดงถึงอัตราส่วนการกระจายความดันและ Hertzian contact stress (static) ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที



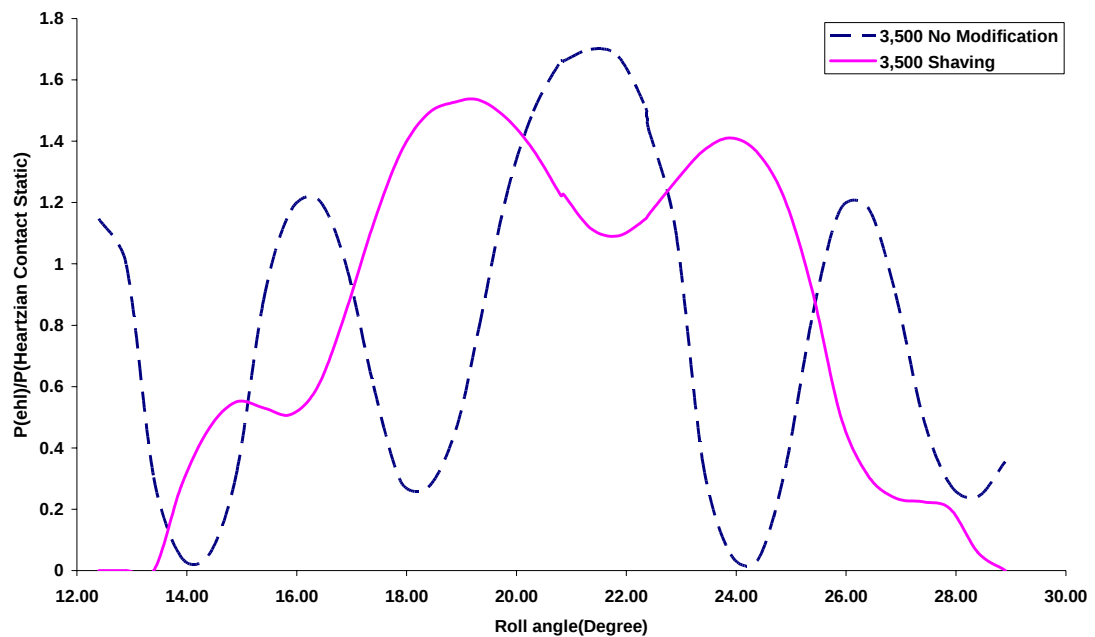
รูปที่ 5.29 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.29 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮอร์ซ ในกรณีไม่ปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าการอัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้น มีค่าสูงในมุมหมุนที่ประมาณ 16 องศา 21 องศา และ 26 องศา



รูปที่ 5.30 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

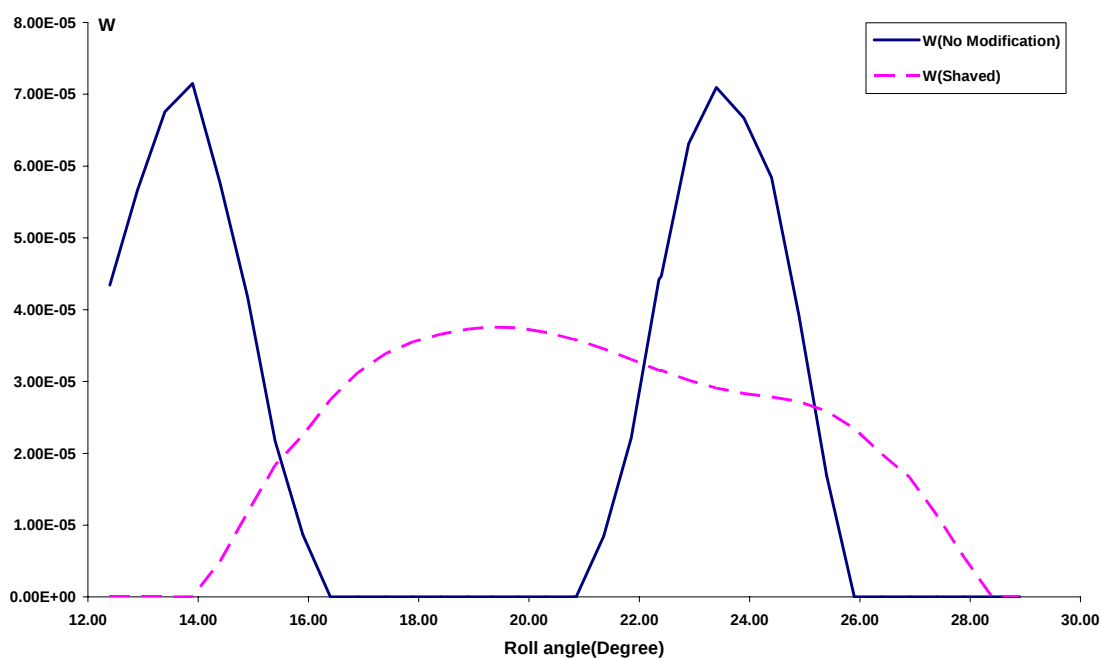
จากรูปที่ 5.30 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ในกรณีที่มีการปรับแต่งฟัน จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นในช่วงมุมหมุนที่ 19 องศาและ ลดลงเล็กน้อยที่ มุมหมุน 24 องศา



รูปที่ 5.31 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ปรับแต่งและไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 3,500 รอบต่อนาที

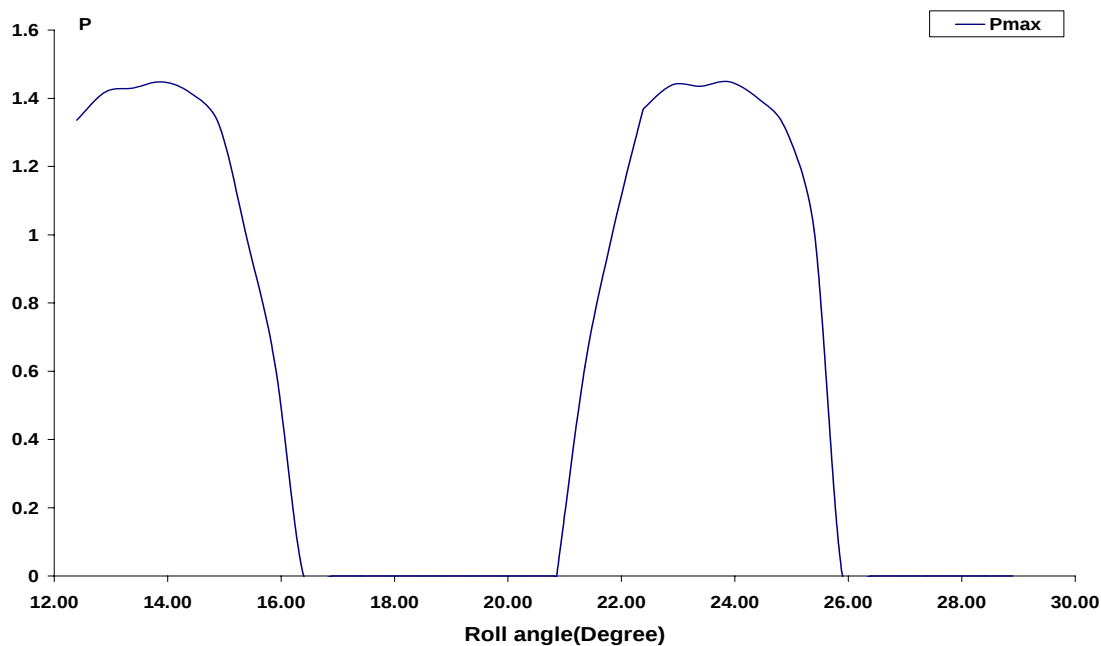
จากรูปที่ 5.31 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ในกรณีที่ไม่มี การปรับแต่งฟันและมีการปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้น ในกรณีที่ไม่มี การปรับแต่งจะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ มีการปรับแต่ง ที่มุมหมุน 22 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองโดยวิธีเลื่อนหน้าฟัน จะทำให้อัตราส่วนความดันมีค่าน้อยลง ในช่วงมุมหมุน 22 องศา

5.5.7 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อฟันเฟืองตรงที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที



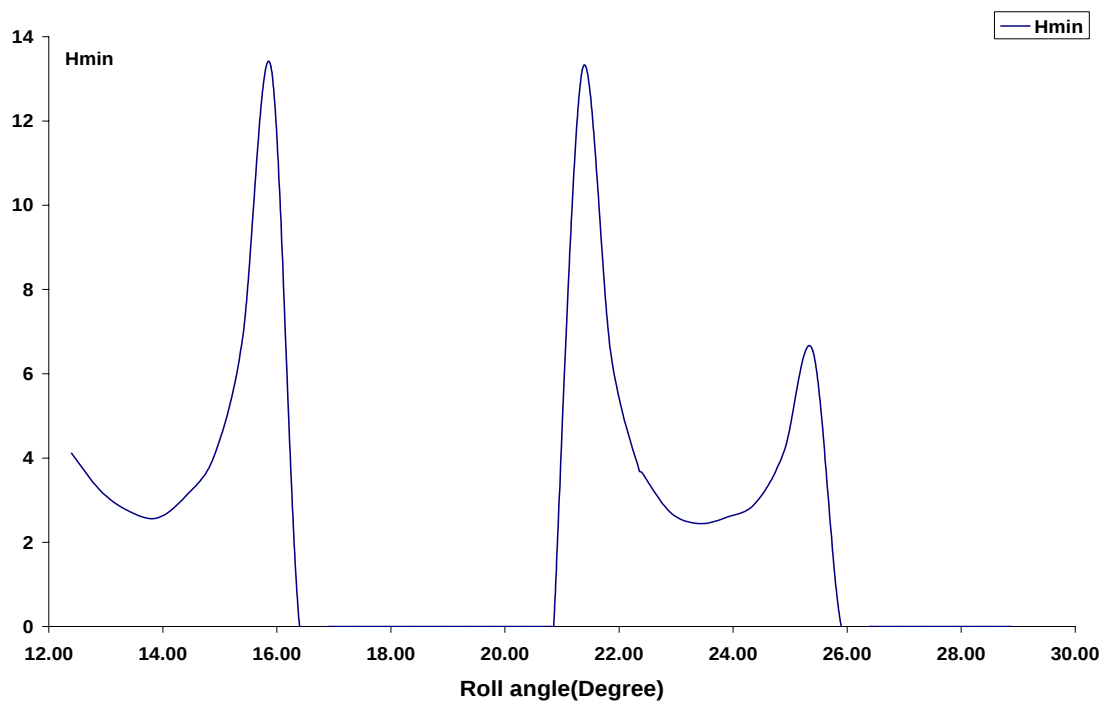
รูปที่ 5.32 แรงพลวัต(ไร้มิติ) ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.32 แสดงแรงพลวัตที่กระทำบนฟันเฟืองแบบไร้มิติที่เกิดขึ้น บนหน้าผิวฟันเฟืองตรงหนึ่งคู่ จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ไม่มีปรับแต่งฟันแรงพลวัตที่กระทำต่อฟันเฟืองจะมีค่าสูงมากในช่วงเริ่มขบกัน และจะไม่มีแรงพลวัตกระทำต่อผิวฟันเฟืองที่มุมหมุนที่ประมาณ 16.5 ถึง 21 องศา และจะมีค่าแรงพลวัตเพิ่มสูงขึ้นทันทีทันใดในช่วงมุมหมุนที่ประมาณ 24 องศา แต่เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองโดยวิธีเลื่อนหน้าฟันจะเห็นว่า ค่าแรงพลวัตที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างมาก และจะมีค่าแรงพลวัตเกิดขึ้นในช่วง 16.5 ถึง 21 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงที่ไม่มีแรงพลวัตเกิดเนื่องจากในช่วงที่มีการขบกันสองคู่ฟันเฟือง แล้วเริ่มขบกัน ฟันเฟืองจะมีการแยกจากกันแล้วเข้าสัมผัสกันอีกครั้ง ซึ่งในช่วงนี้จะไม่เกิดการสัมผัสกันของฟันเฟืองแต่ เมื่อฟันเฟืองเข้าสัมผัสกันอีกครั้งทำให้แรงพลวัตที่เกิดขึ้นสูงขึ้นอย่างทันทีทันใด แต่เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟือง จะทำให้ฟันเฟืองมีการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ดังแสดงให้เห็นว่า แรงพลวัตที่เกิดขึ้นมีค่าในทุกๆ ช่วงมุมหมุน และมีค่าภาระที่น้อย ลงจากกรณีที่ไม่มีปรับแต่ง



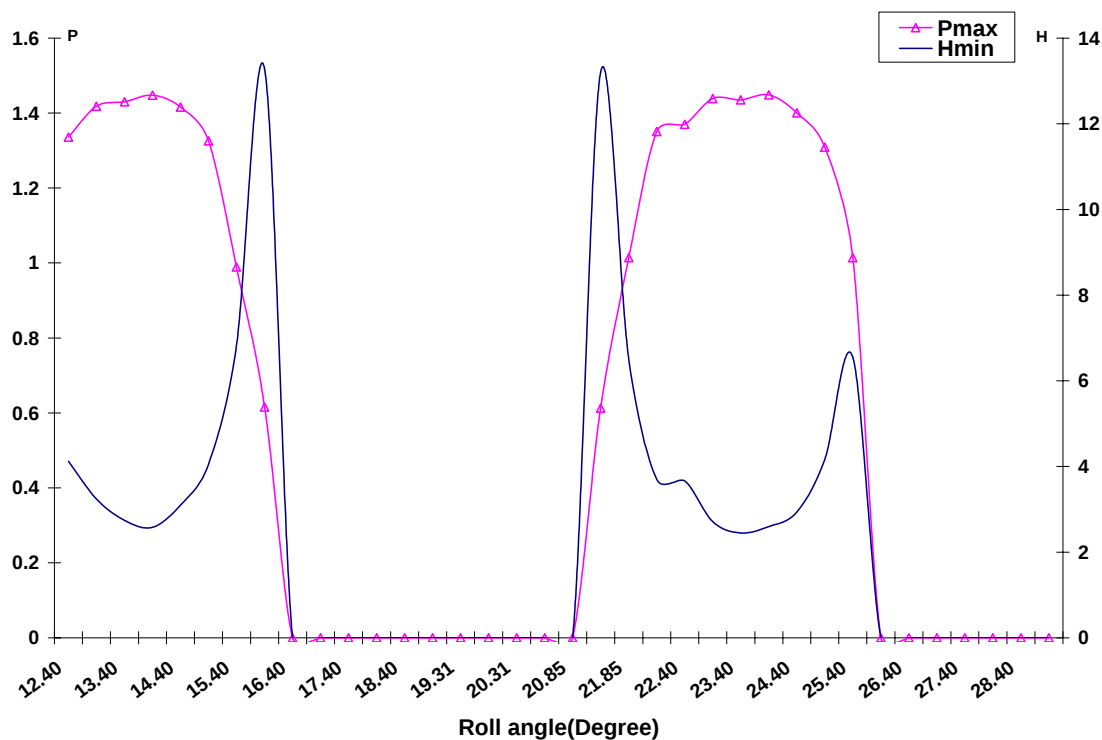
รูปที่ 5.33 การกระจายความดัน(ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.33 แสดงการกระจายความดันแบบไร้มิติ ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งจะเห็นได้ว่า ความดันมีค่าสูงในช่วงมุมหมุนที่ 14 และ 24 องศา ซึ่งเป็นช่วงที่มีการขบกันสองคู่ฟันเฟืองและมีช่วงที่ไม่มีความดันเกิดขึ้นที่ มุมหมุนประมาณ 16.5 ถึง 21 องศา



รูปที่ 5.34 การกระจายความหนาฟิล์ม(ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

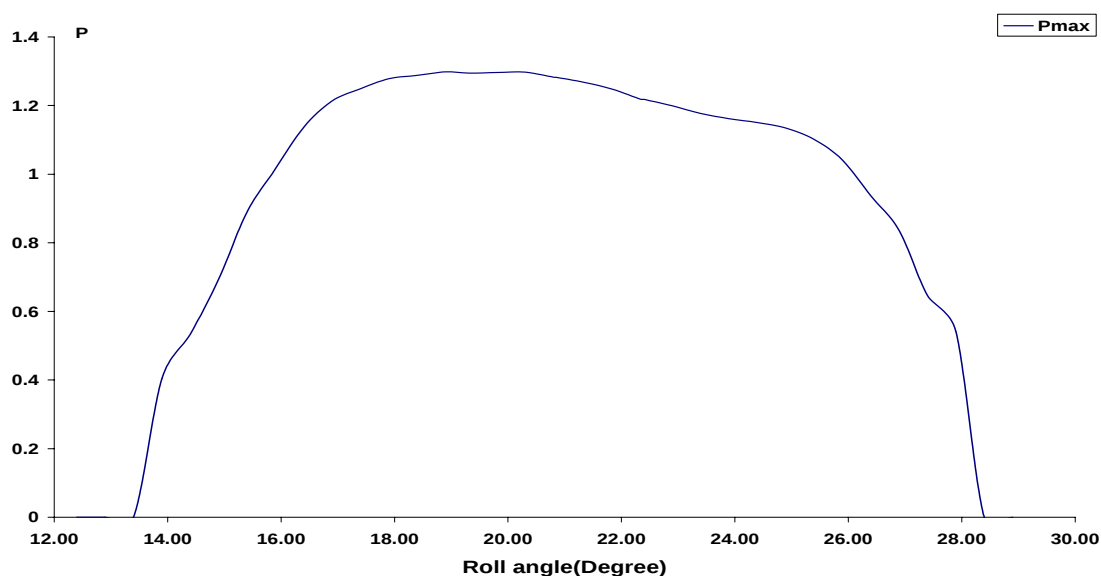
จากรูปที่ 5.34 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟินจะเห็นว่าความหนาฟิล์มมีค่าที่บางในช่วงที่มีความดันสูง และในช่วงที่ไม่เกิดแรงดันกระทำ ทำให้ไม่เกิดความหนาฟิล์ม (จากการคำนวณจะพบว่าไม่สามารถระบุค่าความหนาฟิล์มได้เนื่องจากไม่มีภาระกระทำในช่วงมุมหมุนดังกล่าว)



รูปที่ 5.35 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟิน ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

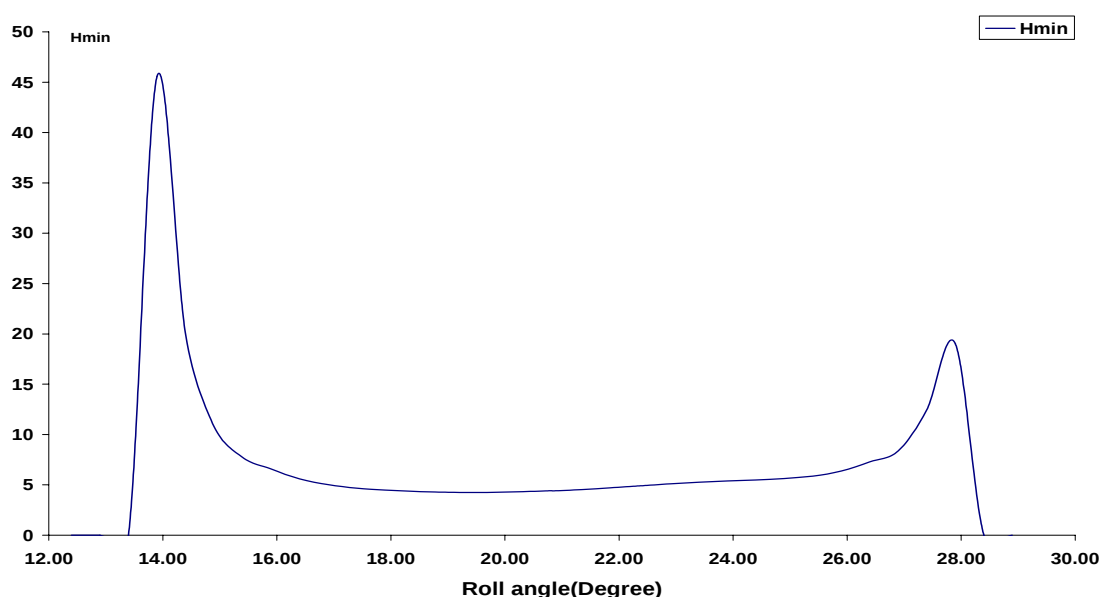
จากรูปที่ 5.35 แสดงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟิน จะเห็นได้ว่า ค่าความหนาฟิล์มมีค่าความหนาฟิล์มน้อยลง(บาง) เมื่อมีความดันกระทำสูง จากรูปจะเห็นว่าที่มุมหมุนประมาณ 13.5 องศา มีค่าความหนาฟิล์มบางสุดในช่วงเริ่มขบกันของฟินเฟือง และที่มุมหมุนประมาณ 23.5 องศา มีค่าความหนาฟิล์มบางสุดในช่วงที่ฟินเฟืองเริ่มเคลื่อนที่จากกัน

5.5.8 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อพื้นเพื่อตรงที่ปรับแต่งพื้น ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที



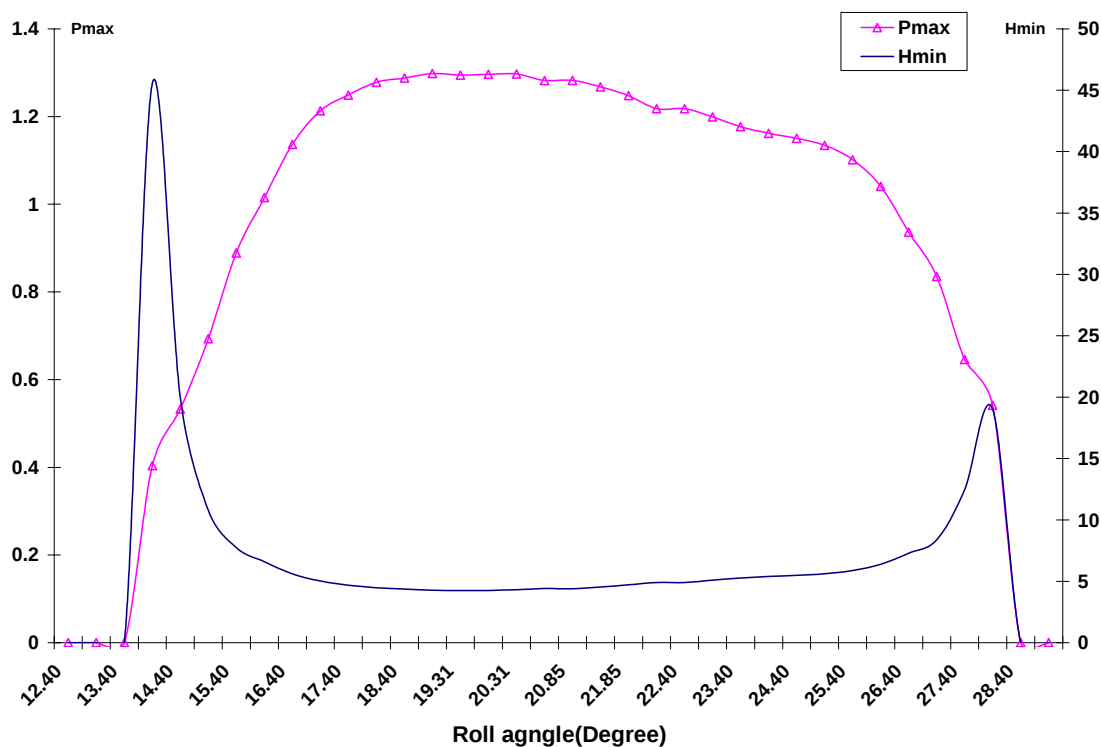
รูปที่ 5.36 การกระจายความดัน(ไร้มิติ) กรณีที่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.36 แสดงการกระจายความดันแบบไร้มิติในกรณีที่ปรับแต่งพื้นเพียง จะเห็นได้ว่าความดันที่เกิดขึ้นมีค่าสูงในช่วงที่มุมหมุนประมาณ 16 ถึง 21 องศา และค่อยๆ ลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าความดันที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ



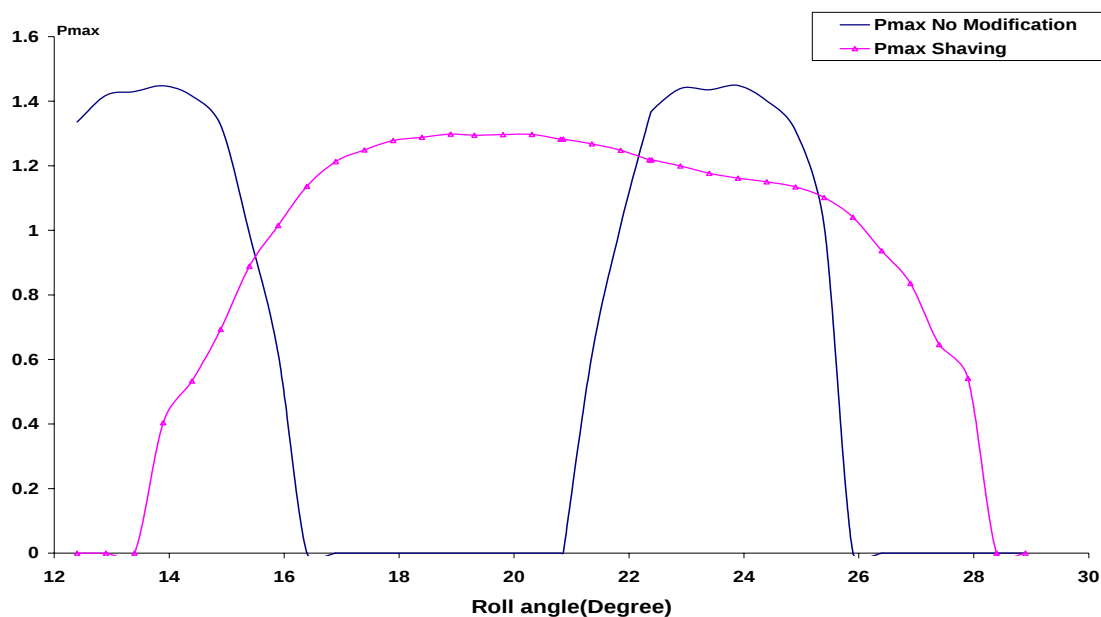
รูปที่ 5.37 การกระจายความหนาฟิล์ม(ไร้มิติ) กรณีที่ปรับแต่งพื้น ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.37 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่มีการปรับแต่งฟิน จะเห็นได้ว่าความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีการมีแรงดันกระทำสูงจะมีความหนาฟิล์มที่บางลง ซึ่งในรูปแสดงให้เห็นในช่วงมุมหมุนที่ประมาณ 15 ถึง 27 องศา



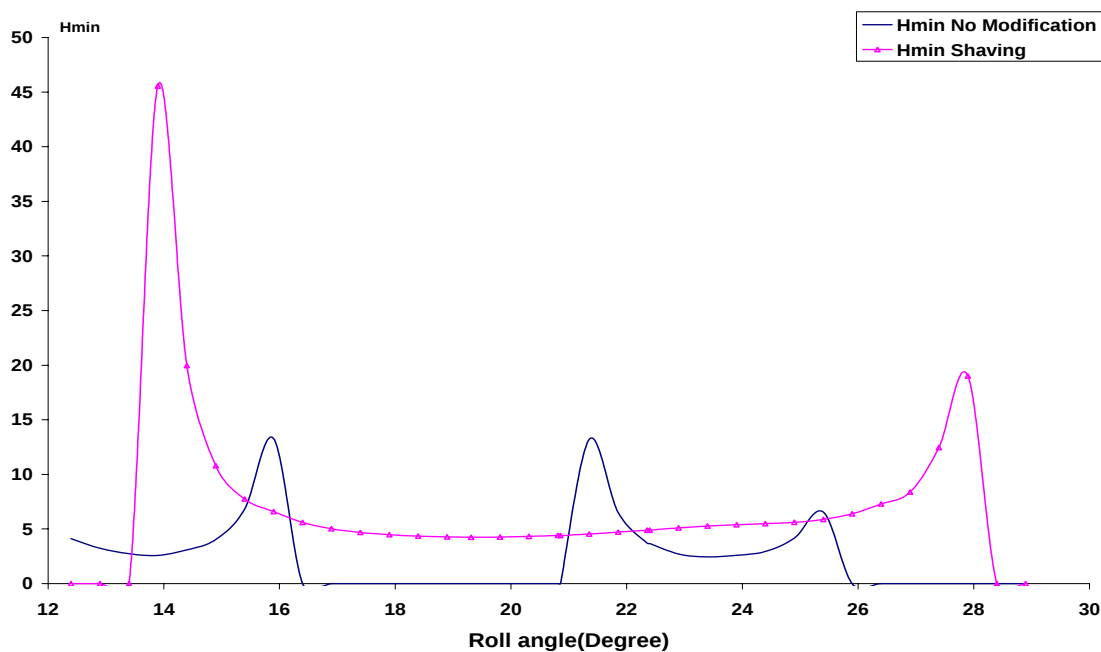
รูปที่ 5.38 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ปรับแต่งฟิน ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.38 แสดงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติในกรณีที่ปรับแต่งฟิน จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันสูงกระทำจะทำให้ความหนาฟิล์มมีค่าบางลง ซึ่งในรูปจะเห็นว่าที่มุมหมุน 16 องศา ถึง 26 องศาจะมีช่วงความหนาฟิล์มบางค่อนข้างสม่ำเสมอ



รูปที่ 5.39 การกระจายความดัน(ไรมิต) กรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันและปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

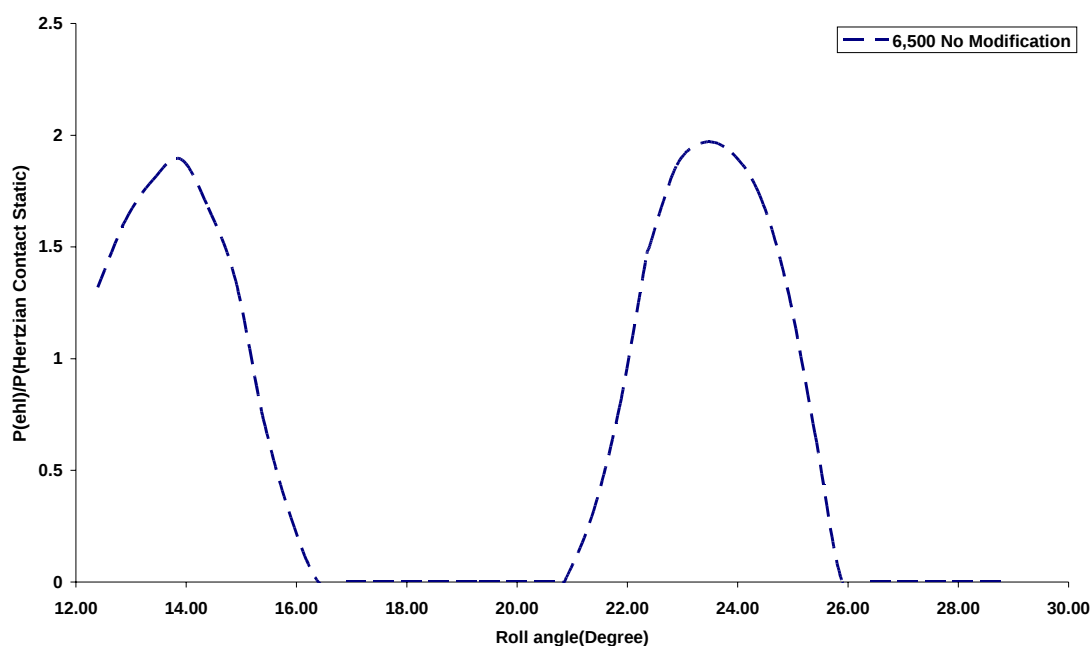
จากรูปที่ 5.39 แสดงการกระจายความดันแบบไรมิต ในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่งฟันและปรับแต่งฟันเพียง จะเห็นได้ว่า ความดันสูงสุดที่เกิดในในกรณีทำการปรับแต่งฟันเพียง มีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการปรับแต่งฟัน แต่ทว่า เมื่อทำการปรับแต่งฟันเพียงในช่วงมุมหมุนที่ประมาณ 16.5 ถึง 21 องศา จะมีค่ามากขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 5.40 การกระจายความหนาฟิล์ม(ไรมิต) กรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันและปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

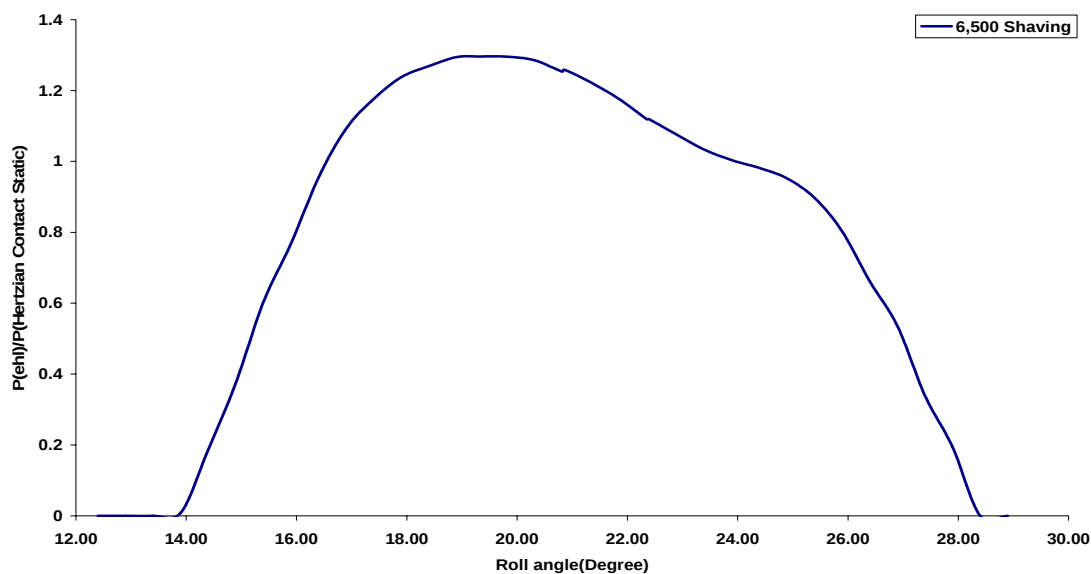
จากรูปที่ 5.40 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติกรณีที่ไม่นับปรับแต่งและปรับแต่ง ฟัน จะเห็นได้ว่าการกระจายความหนาฟิล์มในกรณีการปรับแต่งมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ จะมีค่าความหนาฟิล์มสูงมากในช่วงมุมหมุนที่ 14 และ 28 องศา นั้นแสดงว่าความดันที่กระทำในช่วงมุม หมุนนี้มีค่าน้อยมาก แต่ทว่าในช่วงมุมหมุนที่ประมาณ 16 ถึง 27 องศา มีค่าความดันกระทำต่อ ฟันเฟืองที่มีการปรับแต่งทำให้ความหนาฟิล์มที่ได้มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ในกรณีที่ไม่นับปรับแต่ง จะเห็นว่าในช่วงมุมหมุนที่ไม่มีค่าความหนาฟิล์ม เนื่องจากไม่มีความดันที่กระทำต่อฟันเฟืองในช่วง ดังกล่าว (จากการคำนวณจะพบว่าไม่สามารถระบุค่าความหนาฟิล์มได้เนื่องจากไม่มีภาระกระทำให้ ช่วงมุมหมุนดังกล่าว)

5.5.9 แสดงถึงอัตราส่วนการกระจายความดันและ Hertzian contact stress (static) ที่ ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที



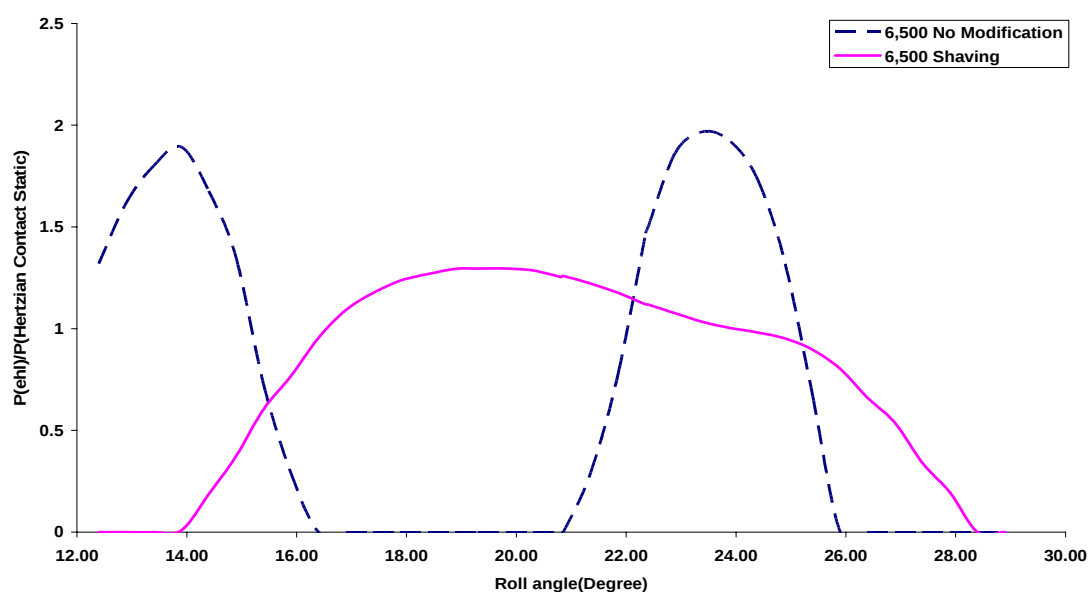
รูปที่ 5.41 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ไม่นับปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.41 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตโร ไฮโดรไดนามิกส์ และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรง ในรูปแบบของ ความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซในกรณีไม่ปรับแต่งฟันเฟืองจะเห็นได้ว่าอัตราส่วน ความดันที่เกิดขึ้นนี้มีค่าสูงสุดที่มุมหมุนประมาณ 14 องศา และที่ 24 องศา



รูปที่ 5.42 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

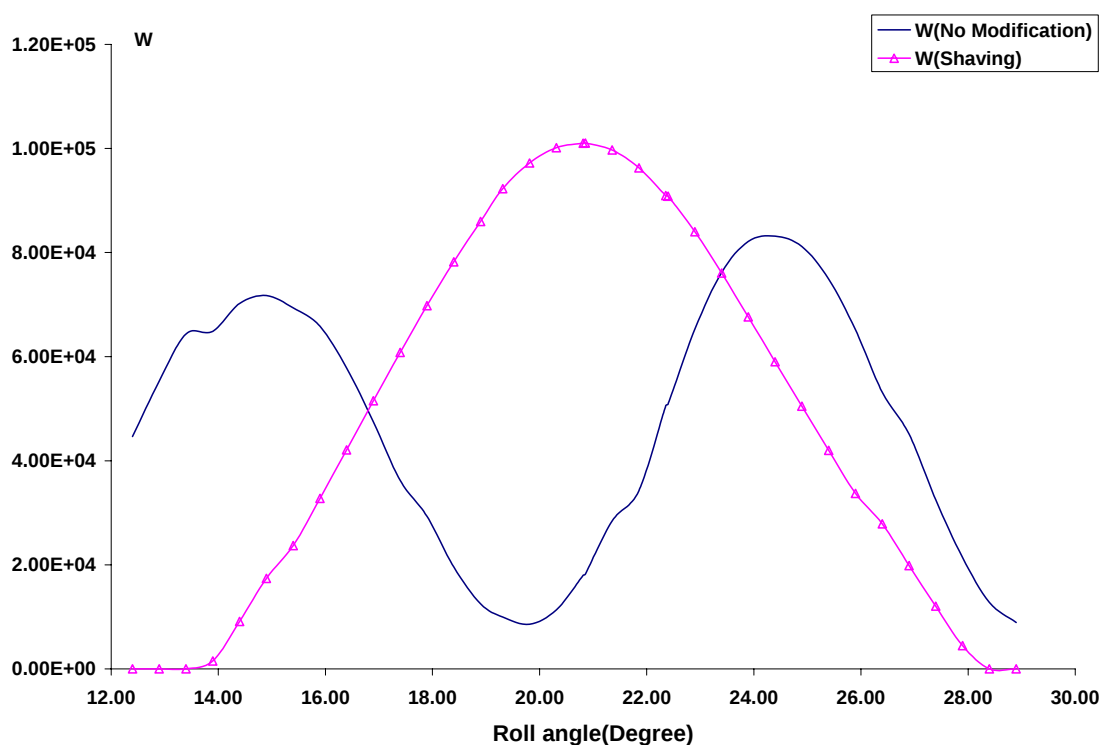
จากรูปที่ 5.42 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซ ในกรณีที่ปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้นนี้มีค่าสูงสุดที่มุมหมุน 19 องศา และมีค่าค่อยลดลงในช่วงมุมหมุนที่ 20 ถึง 26 องศา



รูปที่ 5.43 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ปรับแต่งและไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาที

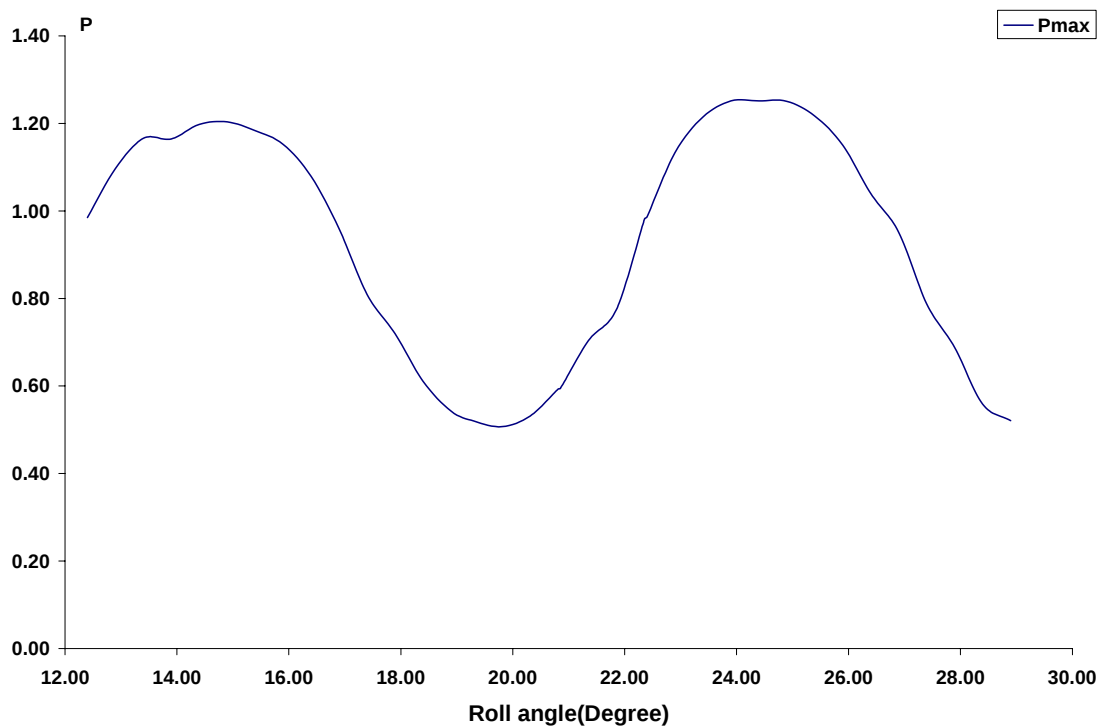
จากรูปที่ 5.43 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซ ในกรณีที่ไม่นับปรับแต่งฟันเฟืองและปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้นนี้เมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟือง จะมีค่าอัตราส่วนความดันที่ลดลงต่ำกว่าค่าสูงสุดของกรณีที่ไม่นับปรับแต่งซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าทำการปรับแต่งฟันเฟือง จะทำให้อัตราส่วนความดันลดลง แสดงว่า แรงที่กระทำต่อฟันเฟืองที่ไม่นับปรับแต่งจะมีค่าที่น้อยลง

5.5.10 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อฟันเฟืองตรงที่ไม่ปรับแต่งฟันเฟือง ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที



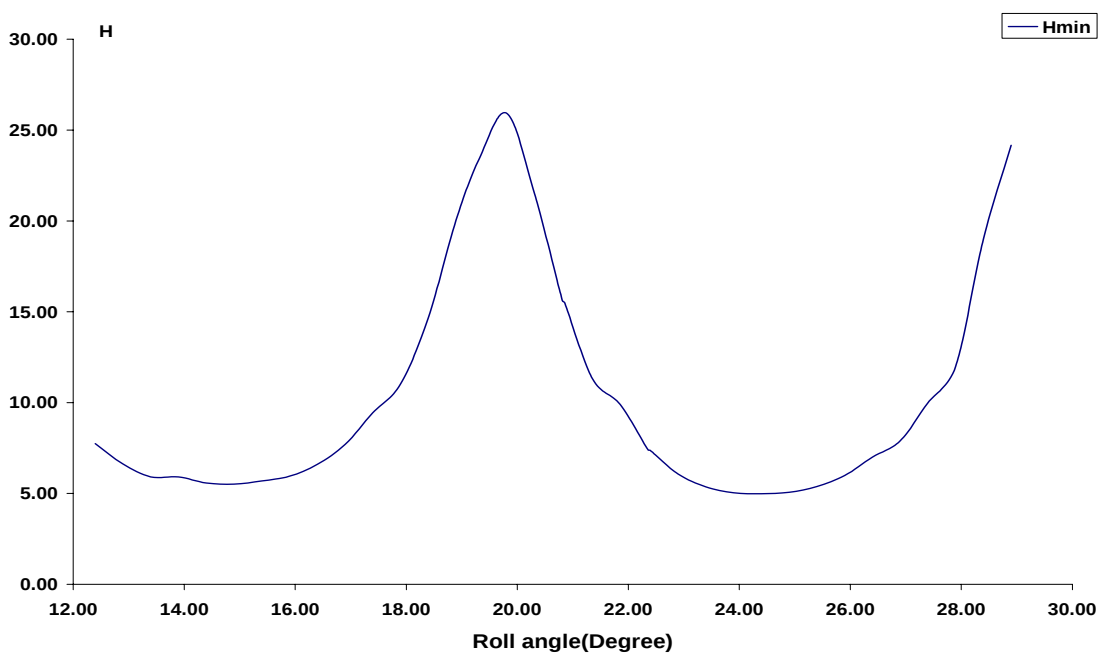
รูปที่ 5.44 แรงพลวัต(ไร้มิติ) ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.44 แสดงถึงแรงพลวัตแบบไร้มิติของฟันเฟืองที่ไม่นับปรับแต่งและทำการปรับแต่ง จะเห็นได้ว่าแรงพลวัตที่ไม่มีปรับแต่งจะมีค่าสูงสุดน้อยกว่า ในกรณีที่มีการปรับแต่ง ซึ่งการปรับแต่งจะมีค่าแรงพลวัตสูงสุดในช่วงมุมหมุนที่ 20 องศา แสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งฟันเฟืองในความเร็วนี้นี้ไม่ได้ทำให้แรงพลวัตลดลงได้



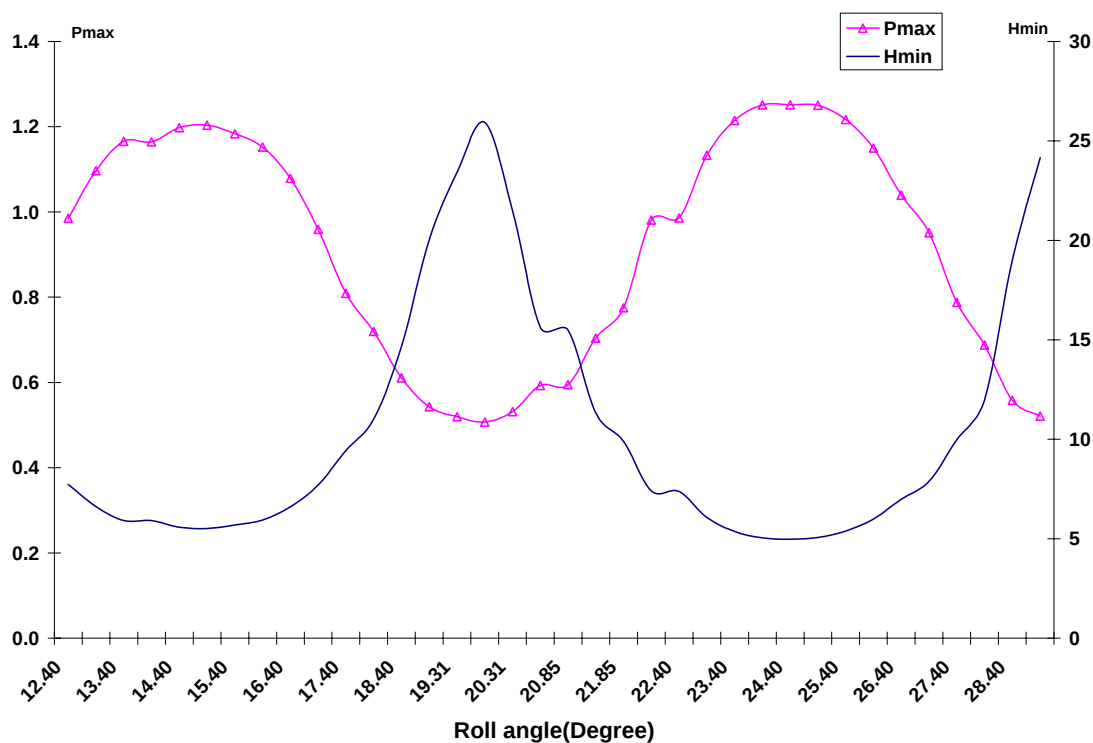
รูปที่ 5.45 การกระจายความดัน(ไร่มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.45 แสดงถึงการกระจายความดันแบบไร่มิติ ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันเฟืองจะเห็นได้ว่าการกระจายแรงดันนี้จะมีค่ามากในมุมหมุนที่ 15 องศาและ 26 องศา ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงที่มีฟันเฟืองมีการขบกันสองคู่ฟันเฟืองในช่วงการเริ่มเคลื่อนที่เข้า และ ที่ช่วงฟันเฟืองขบกันสองคู่ฟันเฟืองในช่วงเริ่มเคลื่อนที่จากกัน



รูปที่ 5.46 การกระจายความหนาฟิล์ม(ไร่มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

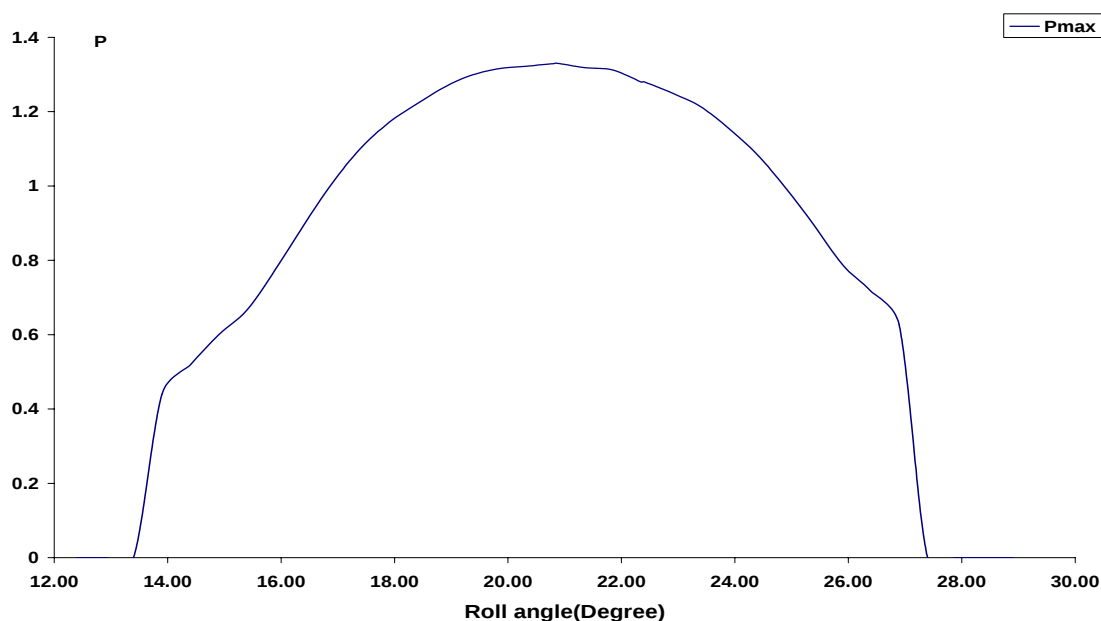
จากรูปที่ 5.46 แสดงถึงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติที่ไม่มีการปรับแต่งพื้น จะเห็นว่า ความหนาฟิล์มมีค่ามากในช่วงมุมหมุนที่ประมาณ 20 องศา และจะมีค่าความหนาฟิล์มที่น้อยในช่วงที่พื้นเฟืองเคลื่อนที่เข้าขบกันในช่วงที่มีการขบกันสองคู่พื้นเฟืองและในช่วงที่มีการเคลื่อนที่จากกัน



รูปที่ 5.47 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่งพื้น ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

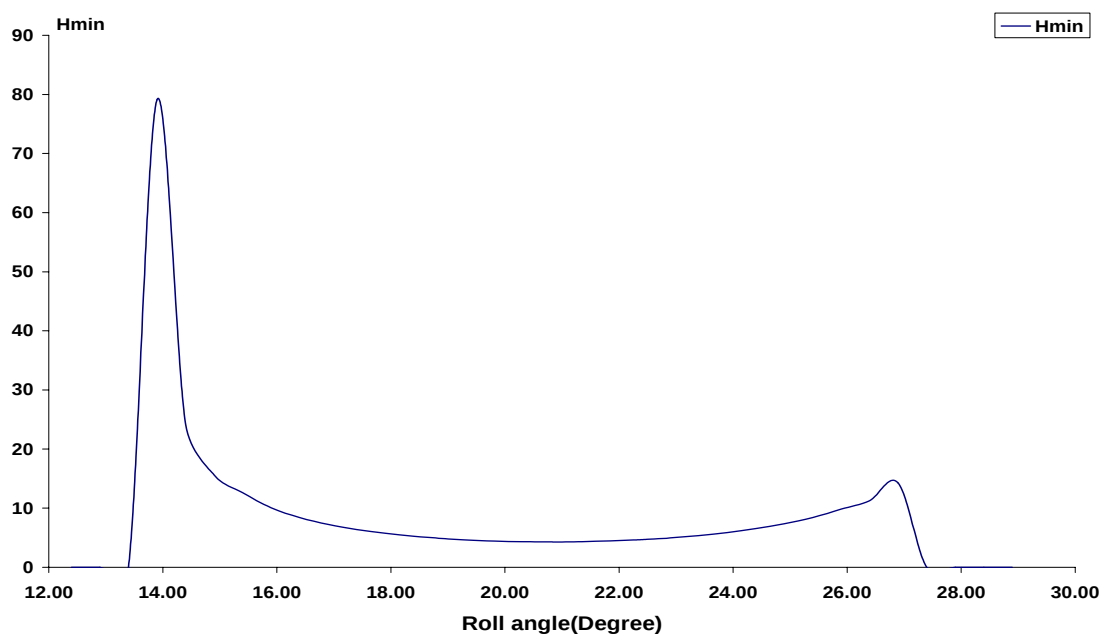
จากรูปที่ 5.47 แสดงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่งพื้น จะเห็นได้ว่าการกระจายความดันและความหนาฟิล์มมีความสัมพันธ์เมื่อมีการกระจายความดันสูง ค่าความหนาฟิล์มก็จะบาง ดังรูปจะเห็นได้ว่าที่มุมหมุนที่ 15 องศาจะมีการกระจายความดันสูงและความหนาฟิล์มบาง ในช่วงที่พื้นเฟืองเริ่มเคลื่อนที่เข้าขบกัน และ ที่มุมหมุน 20 องศาจะมีการกระจายความดันต่ำซึ่งทำให้ฟิล์มมีความหนามาก และที่มุมหมุนที่ 24 องศาจะมีการกระจายความดันสูงและความหนาฟิล์มบางในช่วงที่พื้นเฟืองเริ่มเคลื่อนที่จากกัน

5.5.11 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อพื้นเฟืองตรงที่ปรับแต่งพื้น ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที



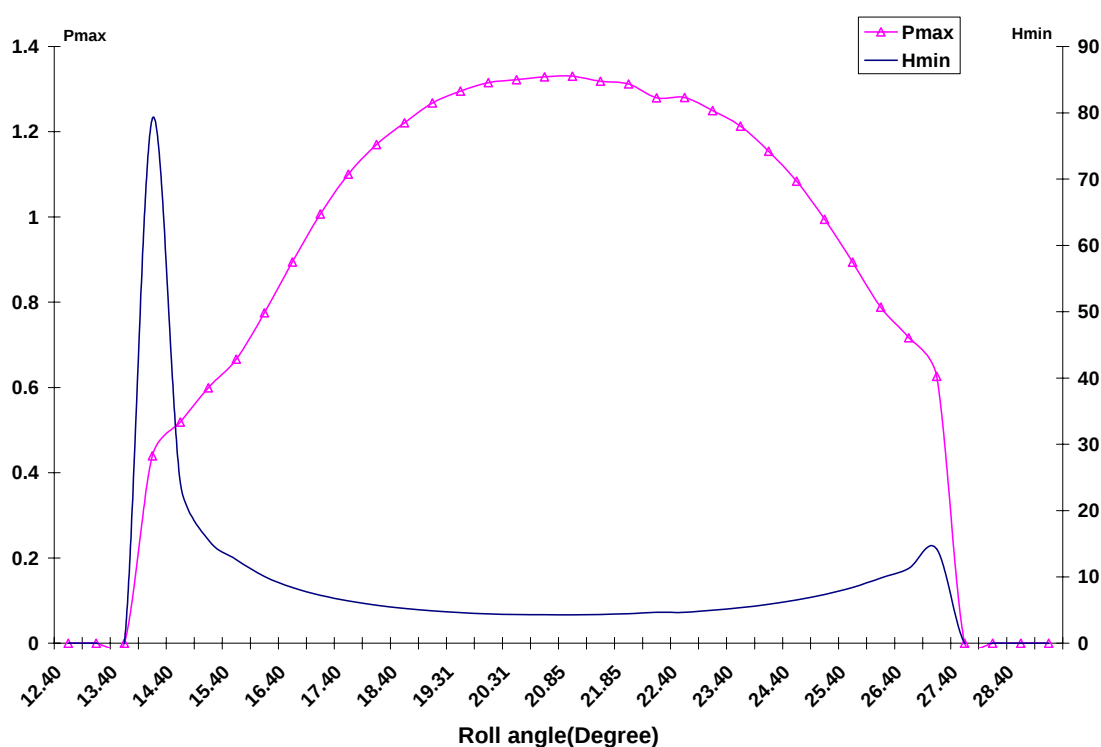
รูปที่ 5.48 การกระจายความดัน(ไร้มิติ) กรณีที่ปรับแต่งพื้น ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.48 แสดงการกระจายความดันแบบไร้มิติในกรณีที่ปรับแต่งพื้นเฟืองจะเห็นว่าเมื่อทำการปรับแต่งพื้นค่าการกระจายความดันจะมีค่าที่มากที่สุดในช่วงมุมหมุนที่ 21 องศา และการกระจายความดันมีลักษณะโค้งคล้ายระฆังคว่ำ



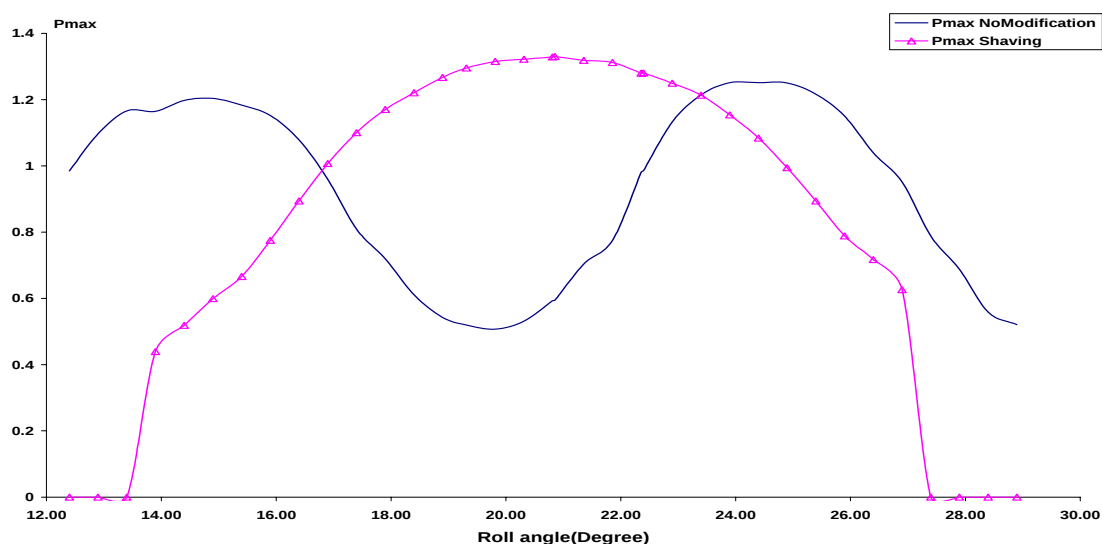
รูปที่ 5.49 การกระจายความหนาฟิล์ม(ไร้มิติ) กรณีที่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.49 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่มีการปรับแต่ง ฟันเฟืองจะเห็นได้ว่า ในช่วงที่ฟันเฟืองเริ่มขบกันที่มุมหมุนประมาณ 14 องศา จะมีความหนาฟิล์ม หนามาก และจะบางลงในช่วงมุมหมุนอื่นๆ ความหนาฟิล์มที่มีค่าสูงมากในช่วงที่มุมหมุนประมาณ 14 องศา เนื่องจาก จะสังเกตเห็นว่า ที่มุมหมุนนี้จะมีการกระจายความดันที่น้อยมากซึ่งเป็นผลจาก การปรับแต่งฟันเฟือง จะทำให้การกระจายความดันในช่วงเริ่มขบกันของฟันเฟือง จะมีค่าน้อยมาก และจะมีค่าการกระจายความดันน้อยอีกครั้งในช่วงที่ฟันเฟืองเริ่มเคลื่อนที่จาก ที่มุมหมุนประมาณ 27 องศา



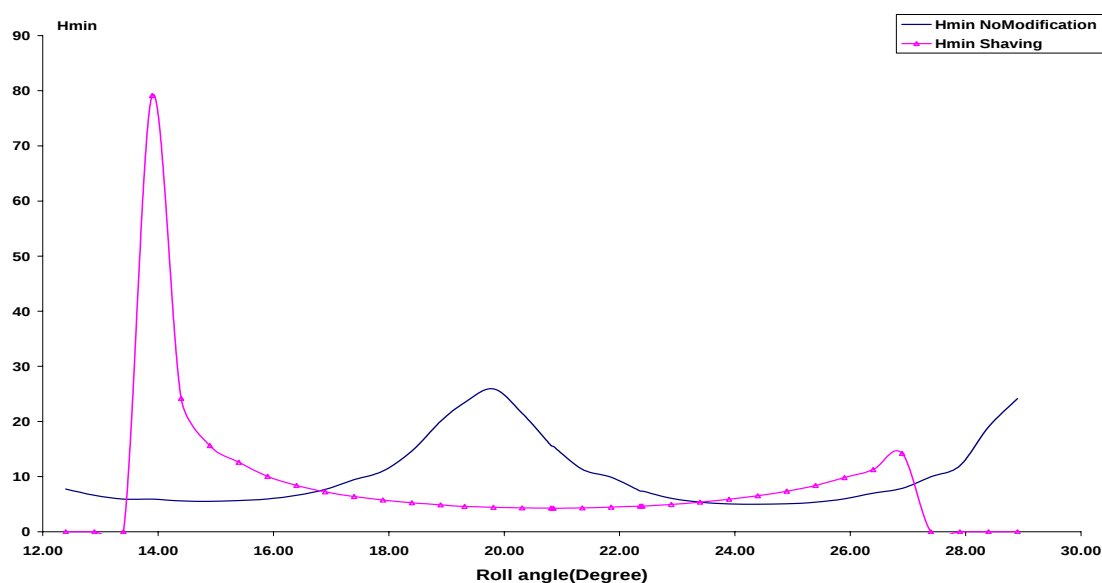
รูปที่ 5.50 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.50 แสดงค่าการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ ปรับแต่งฟัน ซึ่งจากความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าการกระจายความดันสูงการกระจายความหนา ฟิล์มจะบาง จากรูปการกระจายความดันมากสุดอยู่ในช่วงที่มุมหมุนที่ 21 องศา ซึ่งจะมีความหนา ฟิล์มบางสุดด้วย และจากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นที่มุมหมุนประมาณ 14 องศา จะ มีค่าความหนาฟิล์ม หนามากซึ่งจะพบได้ว่าที่มุมหมุนนี้จะมีค่าการกระจายความดันที่ต่ำ ทำให้ความ ดันที่กระทำต่อฟันเฟืองในช่วงมุมหมุนนี้น้อยทำให้ เกิดความหนาฟิล์มหนา



รูปที่ 5.51 การกระจายความดัน(ไรรัด) กรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันและปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

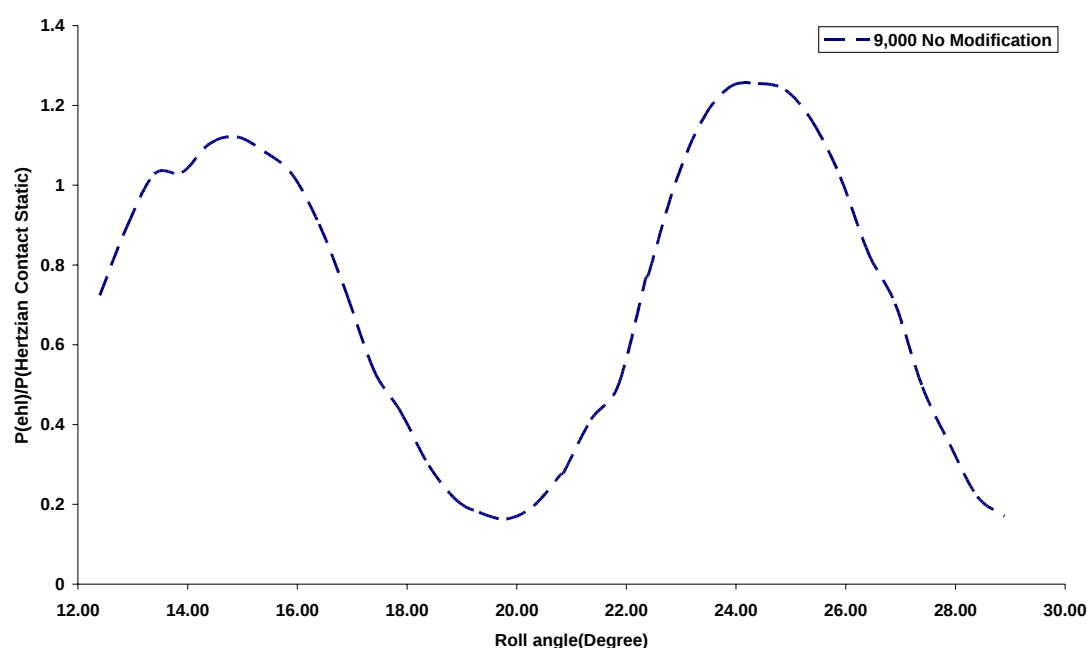
จากรูปที่ 5.51 แสดงการกระจายความดันแบบไรรัดในกรณีที่ไม่ปรับแต่งและปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าการปรับแต่งฟันเฟืองจะมีค่าการกระจายความดันที่สูงขึ้นอย่างมากในช่วงมุมหมุนที่ 17 ถึง 21 องศา และการปรับแต่งฟันเฟืองจะมีค่าการกระจายความดันสูงกว่าในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟัน เนื่องจากเมื่อทำการปรับแต่งฟันเฟืองที่ความเร็วรอบนี้เนื่องจากการสัมผัสของหน้าฟันเฟืองที่เกิดจากการปรับแต่งมีการสัมผัสกันอย่างสม่ำเสมอและผลจากความเร็วรอบนี้ทำให้การกระจายแรงดันที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีการขบกันเพียงหนึ่งคู่ฟันเฟืองมีค่าสูง



รูปที่ 5.52 การกระจายความหนาฟิล์ม (ไรรัด) ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันและปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

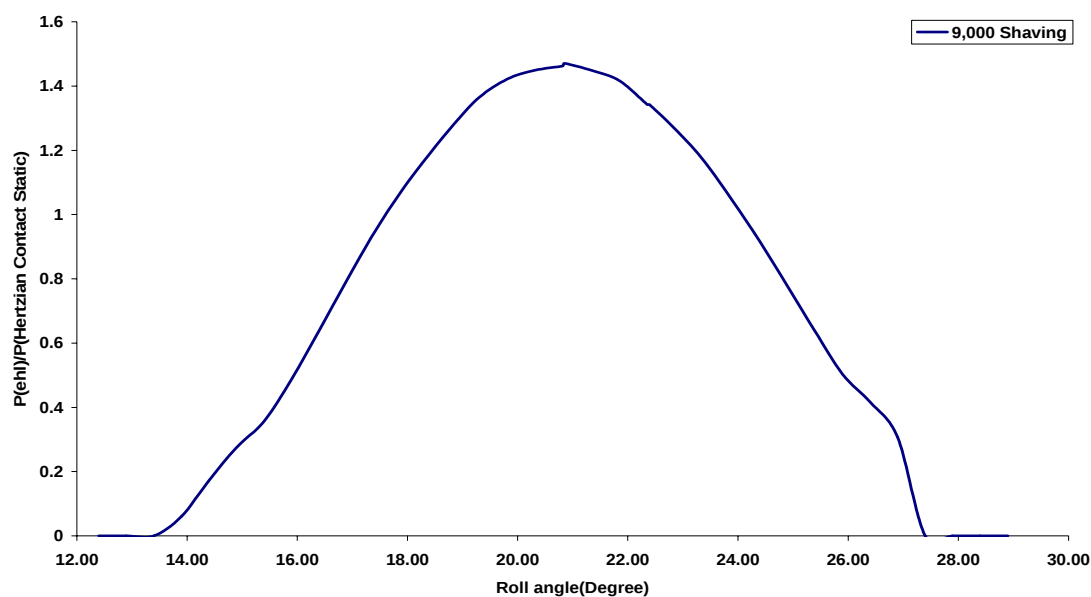
จากรูปที่ 5.52 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติในกรณีที่ปรับแต่งพินและปรับแต่งพิน จะเห็นได้ว่าที่มุมหมุน 14 องศา ความหนาฟิล์มในกรณีที่ปรับแต่งจะสูงกว่าที่ไม่ปรับแต่งและที่มุมหมุนที่ 20 องศา ความหนาฟิล์มในกรณีที่ปรับแต่งจะสูงกว่า และจากรูปจะเห็นว่า ความหนาฟิล์มของกรณีที่ปรับแต่งจะมีค่าสูงมากในช่วงเริ่มขบกัน คือมุมหมุนที่ประมาณ 14 องศา เนื่องจากเมื่อทำการปรับแต่งพินจะทำให้แรงพลวัตที่กระทำต่อพินเพื่อมีค่าลดลงและมีผลทำให้การกระจายความดันลดลง ซึ่งทำให้การกระจายความหนาฟิล์มมีค่าสูง เนื่องจากมีความดันกระทำน้อย ซึ่งในทำนองเดียวกัน ที่มุมหมุนประมาณ 20 องศา กรณีที่ไม่ปรับแต่งจะมีความหนาฟิล์มหนากว่า เพราะมีแรงกระทำน้อยกว่าในกรณีที่ปรับแต่ง

5.5.12 แสดงถึงอัตราส่วนการกระจายความดันและ Hertzian contact stress (static) ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที



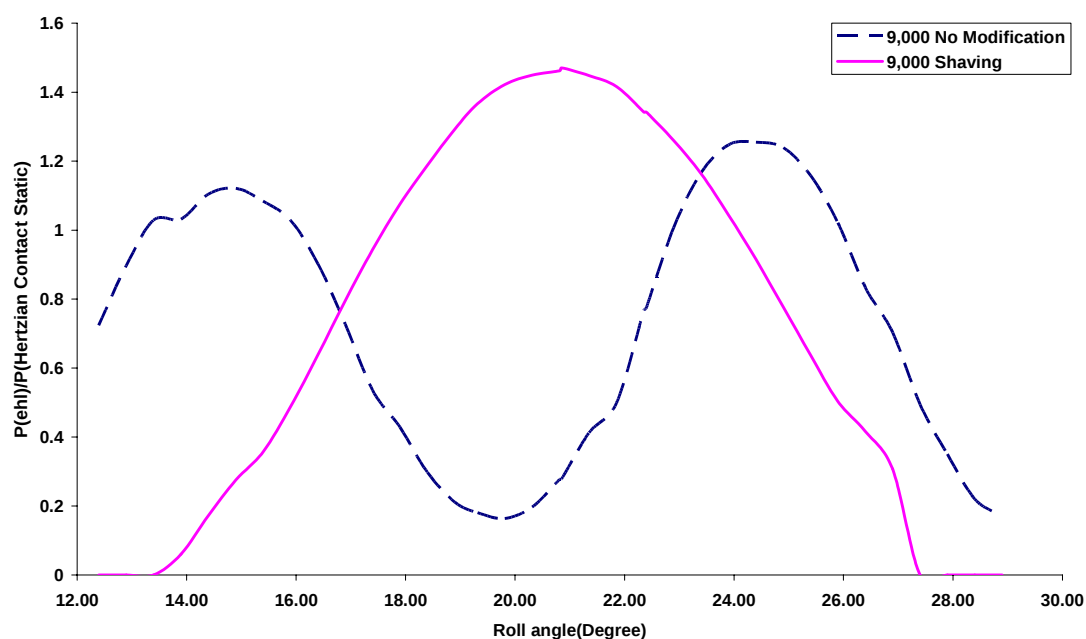
รูปที่ 5.53 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.29 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของพินเพื่อตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซ ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งพินเฟือง จะเห็นได้ว่าการอัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้น มีค่าสูงในมุมหมุนที่ประมาณ 15 และ 24 องศา



รูปที่ 5.54 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

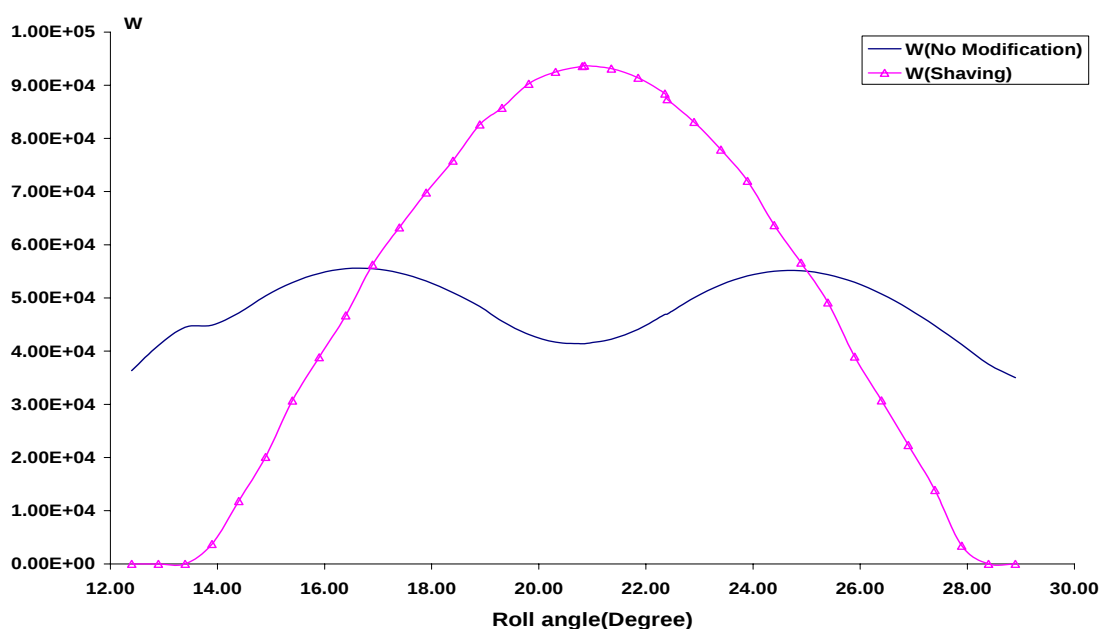
จากรูปที่ 5.54 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตรไฮโดรไดนามิกส์ และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเอิร์ช ในกรณีปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนการกระจายความดันสูงสุดที่มุมหมุน 21 องศา



รูปที่ 5.55 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ปรับแต่งและไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 9,000 รอบต่อนาที

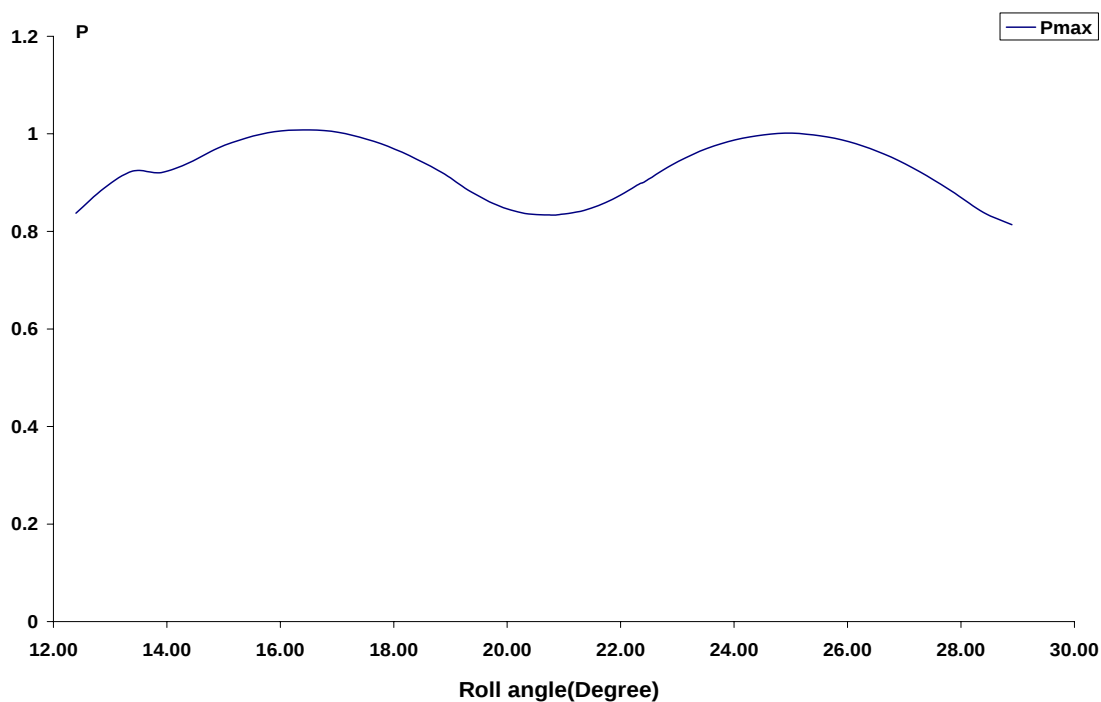
จากรูปที่ 5.55 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อิลาสโตโรไฮโดรไดนามิกส์ และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟีนเฟืองตรงในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซ ในกรณีที่ไม่นับแต่งฟีนเฟือง และปรับแต่งฟีนเฟือง จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนการกระจายความดันของการปรับแต่งจะมีค่ามากกว่าในกรณีที่ไม่มี การปรับแต่ง นั้นแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบนี้ การปรับแต่งฟีนเฟืองไม่ทำให้สัดส่วนความดันลดลงในช่วงของมุมหมุน 17 ถึง 24 องศา

5.5.13 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อฟีนเฟืองตรงที่ไม่ปรับแต่งฟีน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที



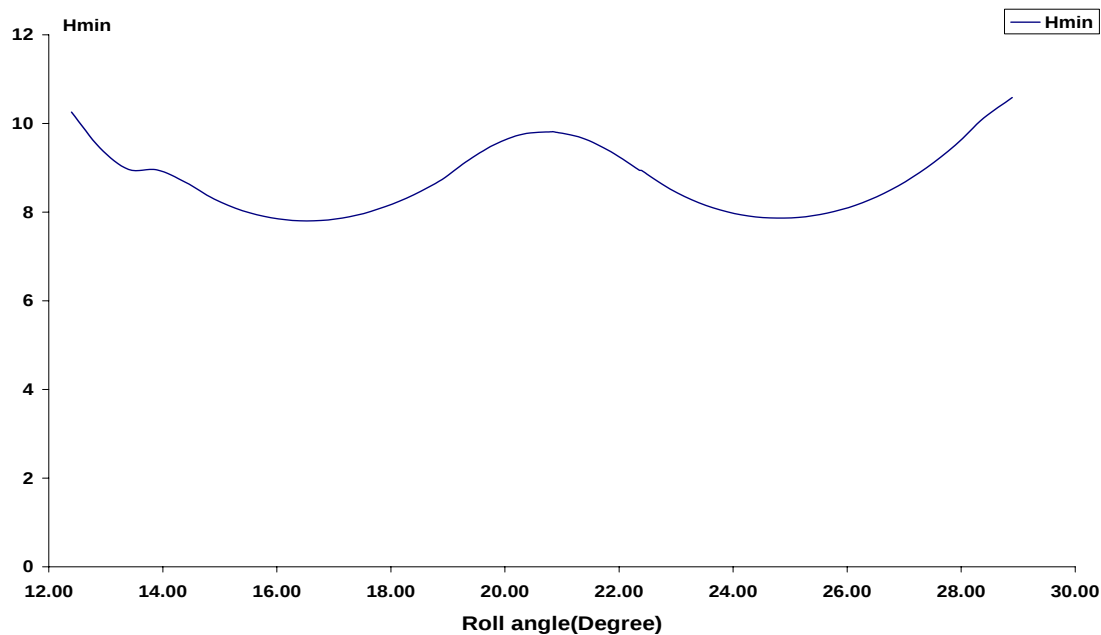
รูปที่ 5.56 แรงพลวัต (ไร้มิติ) ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.56 แสดงถึงแรงพลวัตแบบไร้มิติที่ไม่ปรับแต่งฟีนเฟือง จะเห็นได้ว่าการปรับแต่งฟีนเฟืองจะทำให้แรงพลวัตเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงมุมหมุนที่ 17 ถึง 25 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบนี้ การปรับแต่งฟีนเฟืองจะไม่ทำให้มีแรงพลวัตลดลง



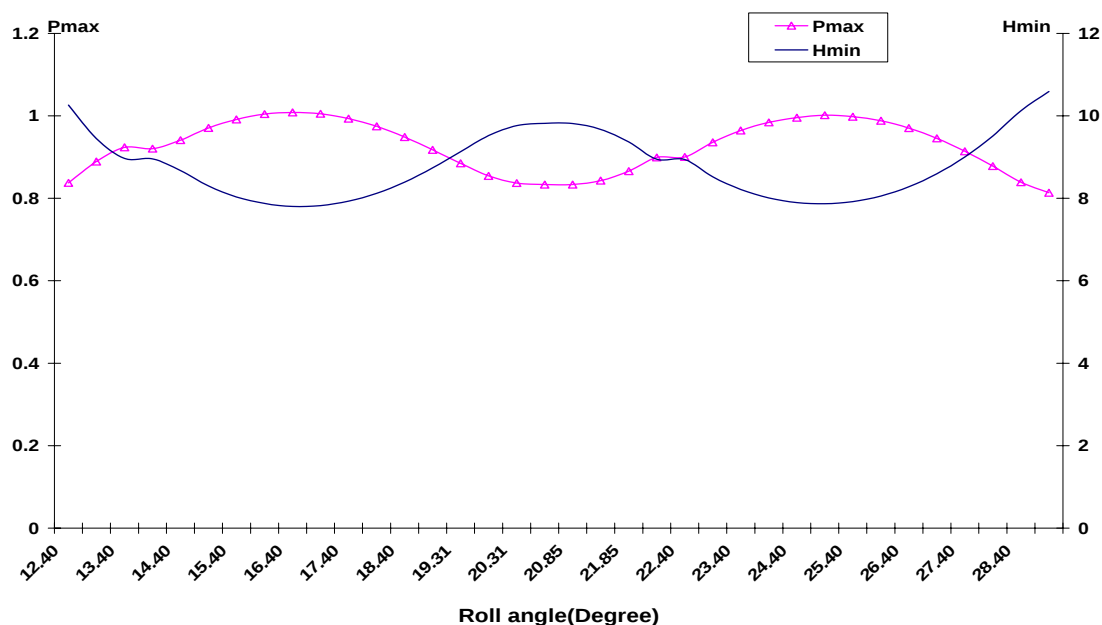
รูปที่ 5.57 การกระจายความดัน(ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่งฟิน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.57 แสดงการกระจายความดันไร้มิติ ในการที่ไม่ปรับแต่งฟินเพียง จะเห็นได้ว่าการกระจายความดันที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงไม่แตกต่างกันมากนัก และมีค่ามากในช่วงมุมหมุนที่ 16 และ 26 องศา



รูปที่ 5.58 การกระจายความหนาฟิล์ม(ไร้มิติ) กรณีที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

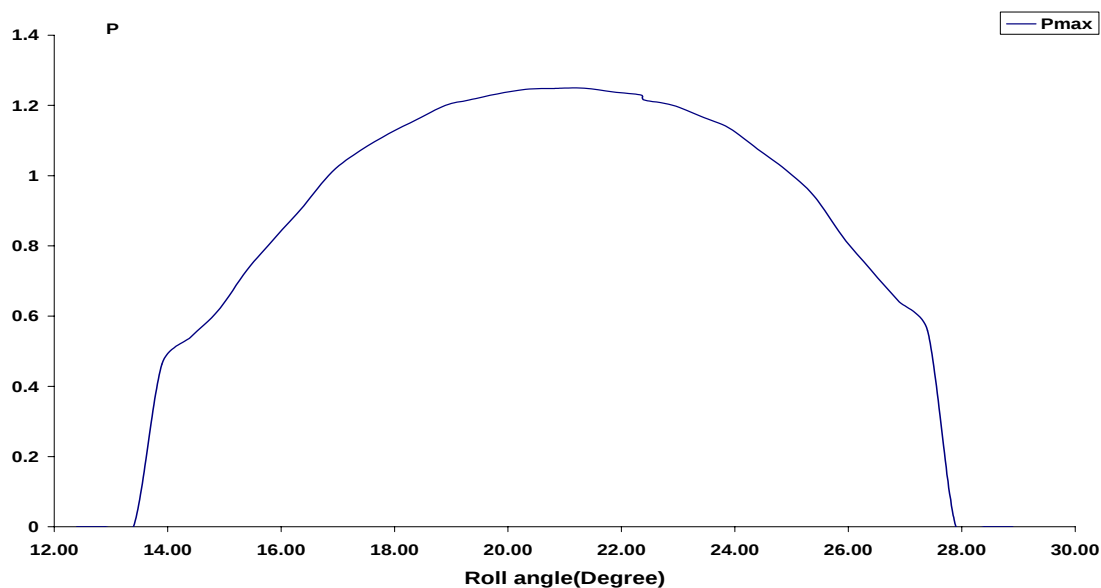
จากรูปที่ 5.58 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ไม่ปรับแต่ง จะเห็นได้ว่าความหนาฟิล์มที่ได้มีค่าความหนาฟิล์มบางลงที่มุมหมุนที่ 16 และ 26 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการขบกันสองคู่ฟันเฟือง



รูปที่ 5.59 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

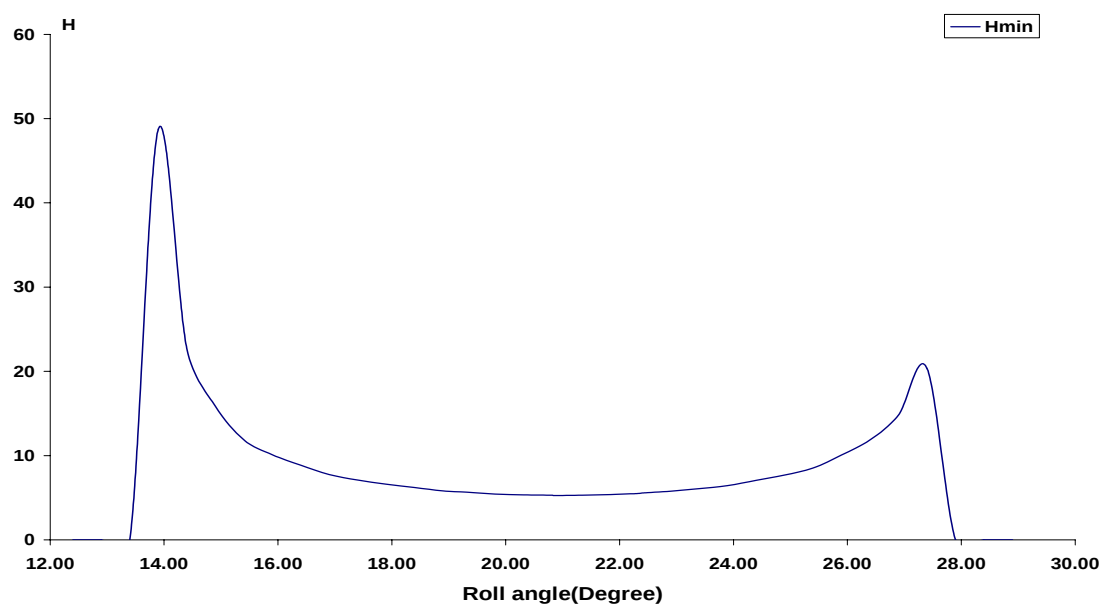
จากรูปที่ 5.59 แสดงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันจะเห็นได้ว่าการกระจายความดันสูง ค่าความหนาฟิล์มจะบางลง และที่การกระจายความดันน้อย ค่าความหนาฟิล์มจะหนา จากรูปที่มุมหมุน 16 และ 26 จะมีค่าการกระจายความดันสูงและความหนาฟิล์มบาง และที่มุมหมุนประมาณ 20 องศา จะมีค่าการกระจายความดันต่ำและความหนาฟิล์มจะสูง

5.5.14 พฤติกรรมของการกระจายความดันและความหนาฟิล์มต่อฟันเฟืองตรงที่ปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที



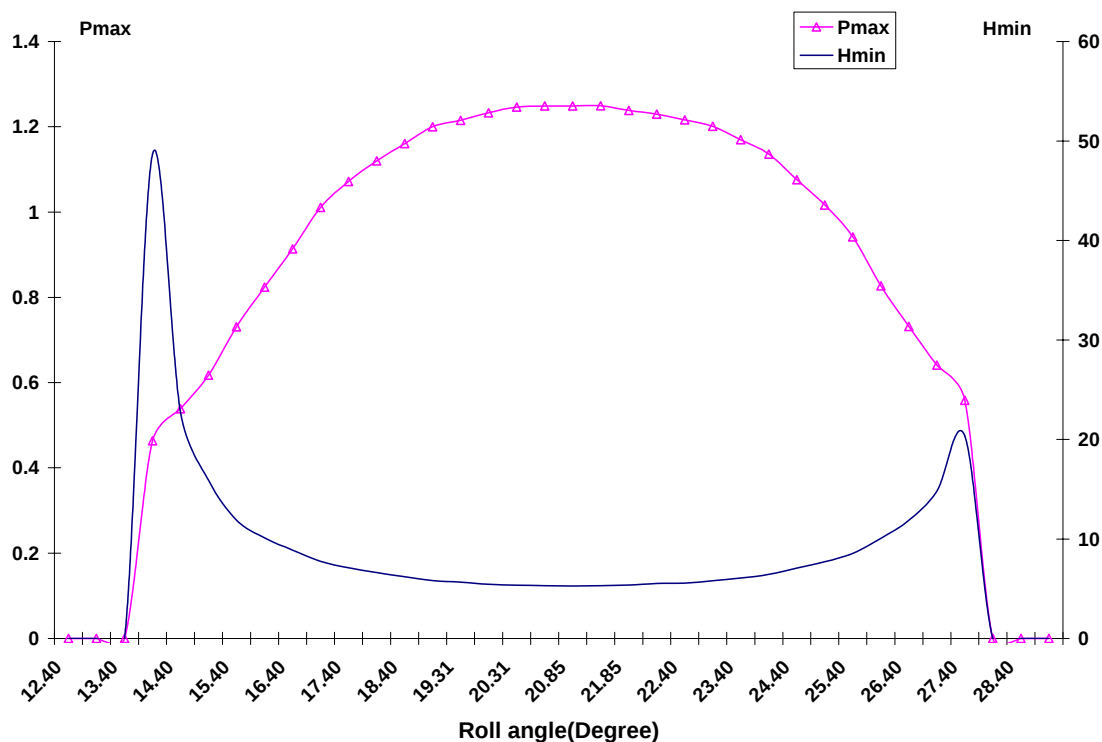
รูปที่ 5.60 การกระจายความดัน(ไร่มิติ) กรณีที่ปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.60 แสดงค่าการกระจายความดันแบบไร่มิติ ในกรณีที่ปรับแต่งฟัน จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายความดันเมื่อทำการปรับแต่ง จะเห็นได้ว่าที่มุมหมุนประมาณ 21 องศา มีค่าการกระจายความดันสูงสุด และลักษณะการกระจายความดันเป็นลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ



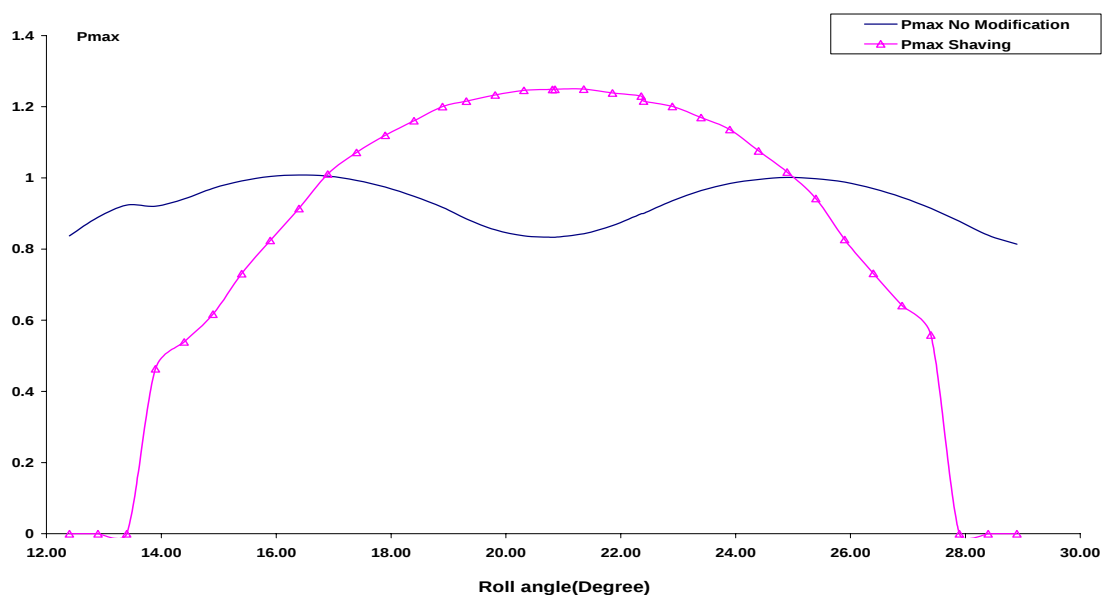
รูปที่ 5.61 การกระจายความหนาฟิล์ม(ไร่มิติ) กรณีที่ปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.61 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ปรับแต่งฟิน จะเห็นได้ว่าความหนาฟิล์มจะหนามากในช่วงเริ่มขบกันและเริ่มเคลื่อนที่ออก จากการ จากรูปที่มุมหมุน 14 และ 27 องศา



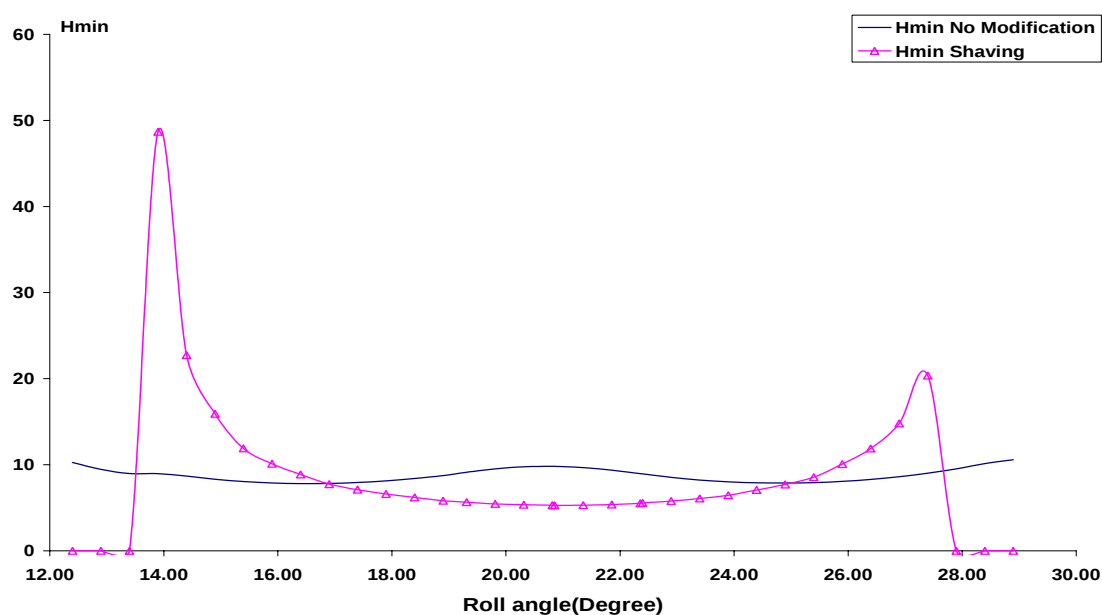
รูปที่ 5.62 การกระจายความดันและความหนาฟิล์ม (ไร้มิติ) ในกรณีที่ปรับแต่งฟิน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.62 แสดงการกระจายความดันและความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ปรับแต่งฟินเพียง จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์เมื่อความดันสูงขึ้นความหนาฟิล์มจะบางลง ดังรูปในช่วงมุมหมุน 15.5 องศา จะมีความหนาฟิล์มเริ่มบางลงและการกระจายความดันจะเริ่มสูงขึ้น และสูงสุดในช่วงมุมหมุน 21 องศาและเริ่มลดลง จนกระทั่งถึงมุมหมุนที่ 26 องศา และจากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นที่มุมหมุนประมาณ 14 องศา จะมีค่าความหนาฟิล์ม หนาмаกซึ่งจะพบได้ว่าที่มุมหมุนนี้จะมีค่าการกระจายความดันที่ต่ำ ทำให้ความดันที่กระทำต่อฟินเพียงในช่วงมุมหมุนนี้น้อยทำให้เกิดความหนาฟิล์มหนา



รูปที่ 5.63 การกระจายความดัน(ไรรัด) กรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันและปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

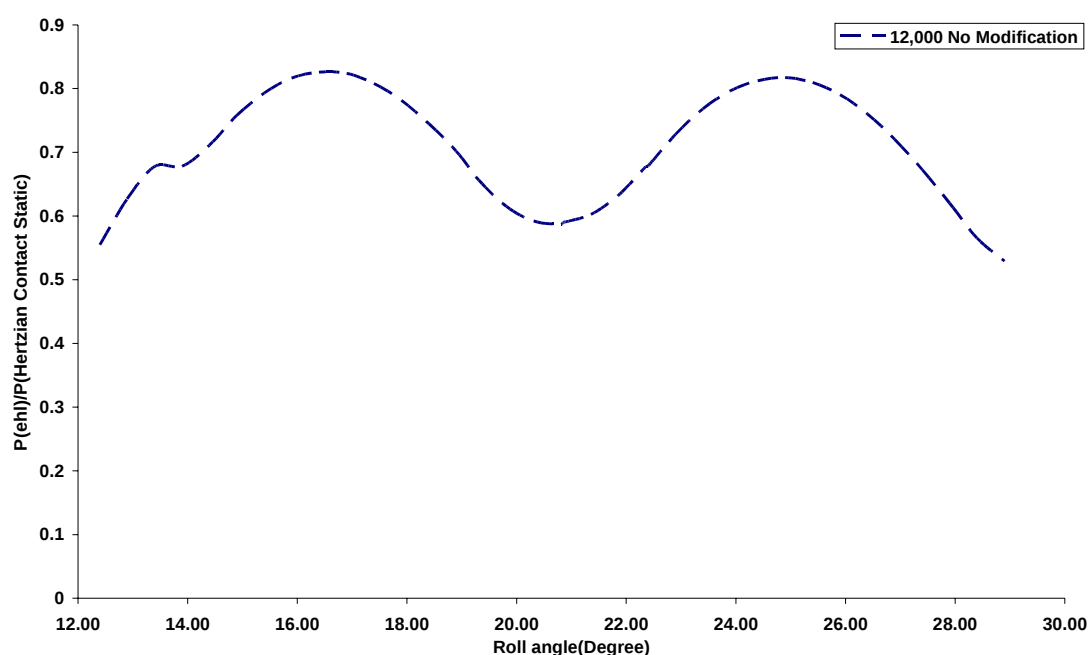
จากรูปที่ 5.63 แสดงการกระจายความดันแบบไรรัด ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งและปรับแต่งฟันเพียง จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ปรับแต่งจะมีการกระจายแรงดันสูงกว่าในกรณีที่ไม่ปรับแต่ง เนื่องจากเมื่อทำการปรับแต่งฟันเพียงมีผลทำให้ฟันเพียงมีการขบกันที่สม่ำเสมอมากกว่าในกรณีที่ไม่ปรับแต่ง ซึ่งเป็นผลให้ลักษณะการกระจายแรงพลวัตรที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะระฆังคว่ำ มีผลทำให้การกระจายความดันมีค่าสูงมากในช่วงที่มีการขบกันหนึ่งคู่ฟันเพียง ซึ่งจากรูปที่ความเร็วรอบนี้การปรับแต่งไม่ทำให้การกระจายความดันสูงสุดมีค่าลดลง



รูปที่ 5.64 การกระจายความหนาฟิล์ม (ไรรัด) ในกรณีที่ไม่ปรับแต่งฟันและปรับแต่งฟัน ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

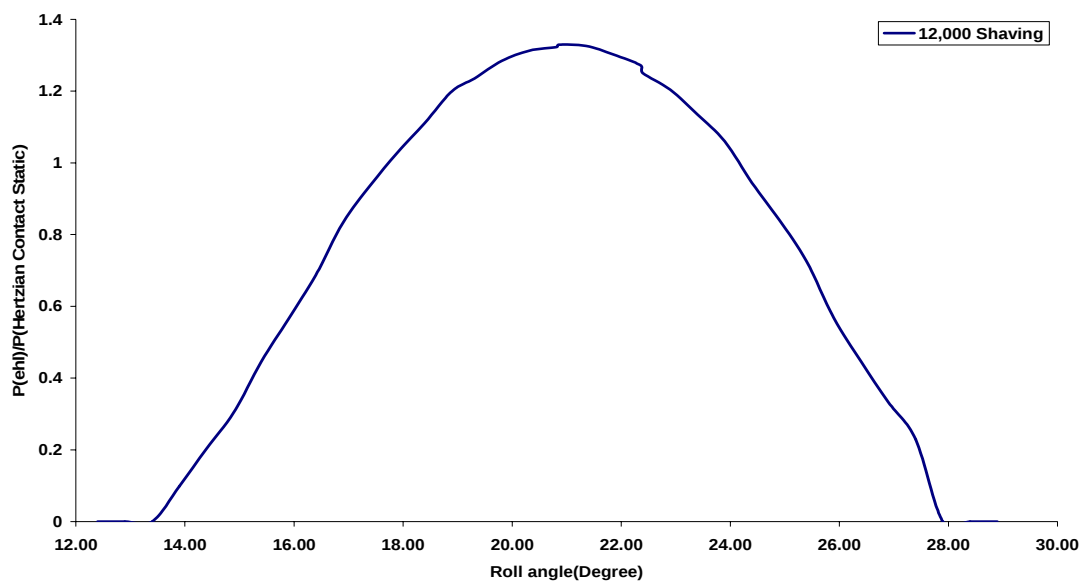
จากรูปที่ 5.64 แสดงการกระจายความหนาฟิล์มแบบไร้มิติ ในกรณีที่ไม่มีการปรับแต่งพื้นผิวและมีการปรับแต่ง จะเห็นได้ว่า ในช่วงมุมหมุนที่ 17 ถึง 25 ค่าความหนาฟิล์มที่ปรับแต่งจะมีค่าที่ต่ำกว่าในกรณีที่ไม่ปรับแต่ง เนื่องจากแรงดันกระทำที่มากกว่า แสดงให้เห็นว่า การปรับแต่งพื้นผิวในช่วงความเร็วรอบนี้ไม่ได้ทำให้ความดันที่กระทำต่อพื้นผิวลดลง และจากรูปจะเห็นว่า ความหนาฟิล์มของกรณีที่ปรับแต่งจะมีค่าสูงมากในช่วงเริ่มขบกัน คือมุมหมุนที่ประมาณ 14 องศา เนื่องจากเมื่อทำการปรับแต่งพื้นผิวจะทำให้แรงพลวัตที่กระทำต่อพื้นผิวมีค่าลดลงและมีผลทำให้การกระจายความดันลดลง ซึ่งทำให้การกระจายความหนาฟิล์มมีค่าสูง เนื่องจากมีความดันกระทำน้อย ซึ่งในทำนองเดียวกัน ที่มุมหมุนประมาณ 27 องศา กรณีที่ปรับแต่งจะมีความหนาฟิล์มหนากว่า เพราะมีแรงกระทำน้อยกว่าในกรณีที่ไม่ปรับแต่ง

5.5.15 แสดงถึงอัตราส่วนการกระจายความดันและ Hertzian contact stress (static) ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที



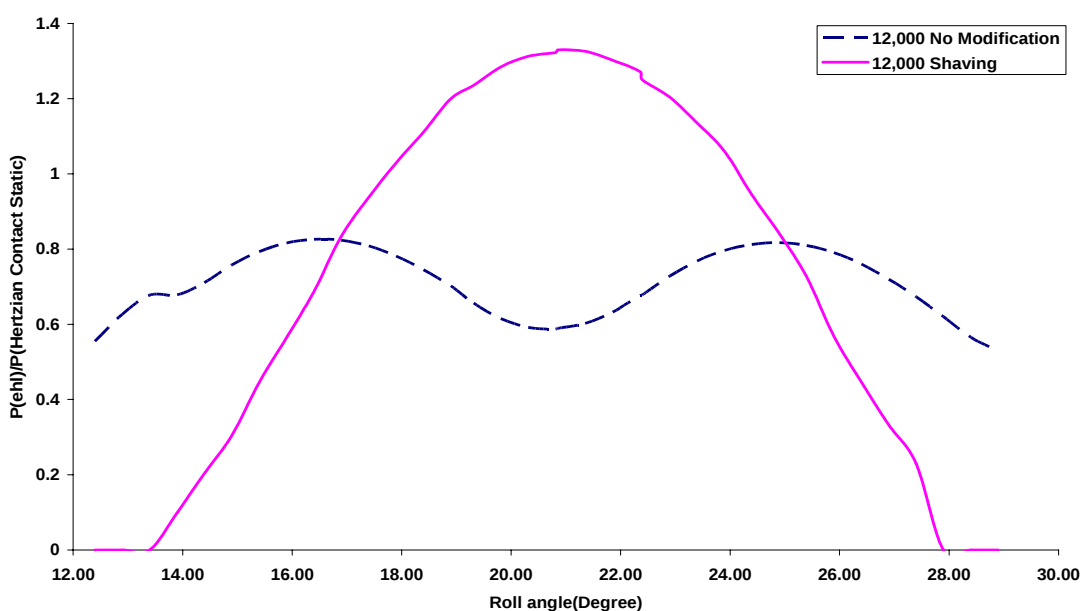
รูปที่ 5.65 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.65 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีซิสไฮโดรไดนามิกส์ และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของพื้นผิวโดยตรง ในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซ ในกรณีไม่ปรับแต่งพื้นผิว จะเห็นได้ว่าการอัตราส่วนความดันที่เกิดขึ้น มีค่าสูงในมุมหมุนที่ประมาณ 15 และ 24 องศา



รูปที่ 5.66 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 5.66 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบ อีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟันเฟืองตรง ในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซ ในกรณีปรับแต่งฟันเฟือง จะเห็นได้ว่าสัดส่วนความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นที่มุมหมุน 21 องศา



รูปที่ 5.67 แสดงค่าอัตราส่วนการกระจายความดัน กรณีที่ปรับแต่งและไม่ปรับแต่ง ที่ความเร็วรอบ 12,000 รอบต่อนาที

รูปที่ 5.67 แสดงอัตราส่วนการกระจายความดันที่เกิดจากการหล่อลื่นแบบฮิสเทรีซิสไดนามิกส์ และความดันที่เกิดขึ้นสูงสุดในแบบสถิตของฟีนเฟืองตรง ในรูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นแบบสัมผัสของเฮิร์ซ ในกรณีที่ปรับแต่งและไม่ปรับแต่ง จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนความดันของการปรับแต่งฟีนเฟืองที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าอัตราส่วนความดันที่ไม่ปรับแต่งฟีนเฟืองในช่วงที่มุมหมุน 17 องศา ถึง 25 องศา แสดงให้เห็นได้ว่า การปรับแต่งฟีนเฟือง ในความเร็วรอบนี้ไม่ได้ทำให้อัตราส่วนความดันลดลง

5.6 สรุปผลและวิจารณ์

จากรูปกราฟแสดงพฤติกรรมการกระจายความดันและความหนาฟิล์มที่ความเร็วรอบต่างๆ ดังนี้ ที่ 1,500 รอบต่อนาทีที่ 3,500 รอบต่อนาทีที่ 6,500 รอบต่อนาทีที่ 9,000 รอบต่อนาทีและที่ 12,000 รอบต่อนาที จะสรุปได้ว่า

- 5.6.1 แรงพลวัตที่กระทำกับหน้าผิวสัมผัสเฟืองมากจะทำให้เกิดแรงดันที่กระทำ ณ จุดที่เฟืองสัมผัสกันมากขึ้นเรื่อยๆ
- 5.6.2 ที่ความเร็วรอบ 6,500 รอบต่อนาทีการปรับแต่งฟันเฟืองจะมีผลทำให้แรงพลวัตลดลงและทำให้แรงดันที่กระทำกับฟันเฟืองมีค่าลดลง พร้อมทั้งความหนาฟิล์มที่จุดสัมผัสกันระหว่างฟันเฟืองจะมีความหนาขึ้น
- 5.6.3 ที่ความเร็วรอบสูงมาก จะเห็นว่าแรงพลวัตสูงสุดจากการปรับแต่งฟันเฟืองโดยวิธีเลื่อนหน้าฟันไม่ลดลง นั่นแสดงว่าการปรับแต่งฟันเฟืองที่ทำให้แรงพลวัตลดลง จะเกิดขึ้นในช่วงความเร็วรอบช่วงหนึ่งเท่านั้น
- 5.6.4 จากการกระจายความดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่า การปรับแต่งฟันเฟืองโดยวิธีเลื่อนหน้าฟันไม่ได้ช่วยให้ลดความดันที่กระทำต่อฟันเฟืองในทุกๆ ความเร็วรอบแต่จะมีผลทำให้มีความดันลดลงมากที่สุดในความเร็วยรอบที่ 6,500 รอบต่อนาที
- 5.6.5 การกระจายความดันและความหนาฟิล์มที่เกิดขึ้นในแต่ละความเร็วรอบจะเห็นได้ว่าเมื่อมีความดันที่กระทำมากจะทำให้ความหนาฟิล์มบางลง และเมื่อมีความดันที่กระทำน้อยความหนาฟิล์มก็จะหนาขึ้น ซึ่งจากพฤติกรรมนี้จะทำให้คาดการณ์ได้ว่าที่ความหนาฟิล์มบางจะมีโอกาสที่เฟืองเกิดความเสียหายที่ผิวฟันเฟืองได้มากกว่าในกรณีที่ฟิล์มหนา