

# การออกแบบชุดถ่ายทอดกำลังแบบเฟืองสะพานกับเฟืองตรง สำหรับการถ่ายทอดกำลังขนาด 5 กิโลวัตต์

## Design of Rack and Pinion Transmission Set for 5 kW Transmission Power

อิสระ ศรีวิบูลย์รัตน์<sup>1)</sup> และ พินัย ทองสวัสดิวงศ์<sup>2)\*</sup>

Isara Sreewiboonrat<sup>1)</sup> and Pinai Thongsawatwong<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>AAPICO Hitech Public Company Limited, 99 Moo 1 Hitech Industrial Estate,

Tambol Ban lane, Amphur Bang Pa-in, Ayuthaya, Thailand 13160

<sup>2)</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

\*อีเมลล์ tpinai@engr.tu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบชุดถ่ายทอดกำลังเฟืองสะพานกับเฟืองตรงเพื่อใช้ส่งกำลัง 5 กิโลวัตต์ โดยเฟืองสะพานจะเคลื่อนที่ไปกลับและหมุนเฟืองตรงในทิศทางเดียว ใช้ชุดเฟืองสะพานกับเฟืองตรงสองชุดในการส่งกำลังให้ต่อเนื่องกัน ซึ่งเฟืองสะพานกับเฟืองตรงอาจเกิดความเสียหายจากการใช้งานเนื่องจากความเค้นดัด การขบกันของเฟืองตรงกับเฟืองสะพานจะทำให้เกิดความเค้นดัดบนฟันเฟือง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ฟันเฟืองเกิดความเสียหายได้ จึงได้ทำการออกแบบชุดถ่ายทอดกำลังเฟืองสะพานกับเฟืองตรงและทำการวิเคราะห์ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นบนฟันเฟืองของเฟืองตรงและเฟืองสะพานโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่ขนาดโมดูล 2 และ 3 เฟืองสะพานส่งผ่านแรงขนาด 505, 541, 582 และ 631 นิวตัน ด้วยมุมกด 20° และระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟืองตรงกับขอบล่างของเฟืองสะพานเป็น 101.6, 102.0 และ 102.4 มิลลิเมตร จากผลการวิจัยเลือกใช้เฟืองขนาดโมดูล 3 และมีมุมกด 20°

คำสำคัญ: เฟืองสะพาน, เฟืองตรง, มุมกด, โมดูล

### Abstract

In this research, The design of rack and pinion transmission set used transmit 5 kW power. The rack moved and forth and back which drove pinion to rotate in one direction. Two sets of Rack and pinion were used for continous power transmission. Rack and Pinion Transmission set might be damaged due to the bending stress during its operation. The bending stress occurs in the gear tooth when the rack meshed with the pinion. The set of rack and pinion transmission was designed. Bending stress on gear teeth of spur gear and rack gear were analysed by finite element method. Gear module were 2 and 3 the rack gear, transmission force of 505, 541, 582 and 631 N with pressure angle 20°. The center distance between the pinion and the rack of 101.6, 102.0 and 102.4 mm. From research results, gear module 3 with pressure angle 20° were selected.

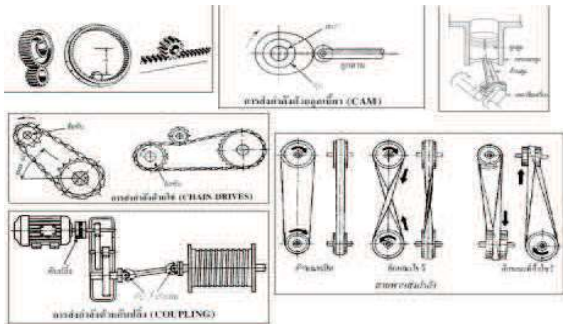
Keywords: Rack gear, Spur gear, Pressure angle, Module

## 1. บทนำ

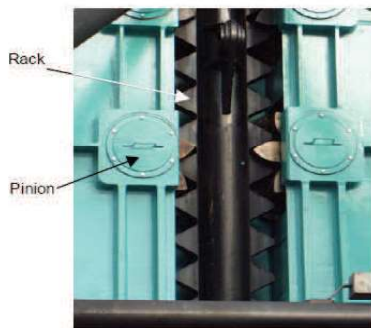
ระบบการส่งกำลังหรือการถ่ายทอดกำลังของเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลที่ใช้โดยทั่วไปมีหลายอย่าง เช่น เฟืองสายพานและพูลเลย์ เพลาค้อนเหวี่ยง โช้ ฯลฯ (รูปที่ 1) ซึ่งมีความเหมาะสมของแต่ละประเภทงานที่นำไปใช้แตกต่างกัน หลักการส่งกำลังของเครื่องยนต์และเครื่องจักรกล คือ การส่งกำลังจากต้นกำลังไปยังจุดที่ต้องการ เพื่อนำกำลังงานไปใช้

เฟืองเป็นเครื่องกลที่ทำงานโดยการหมุนใช้สำหรับการส่งกำลังในลักษณะของแรงบิด โดยการหมุนของตัวเฟืองที่มีฟันอยู่ในแนวรัศมี การส่งกำลังจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีเฟืองตั้งแต่สองตัวขึ้นไป เป็นเฟืองขับและเฟืองตาม [1] โดยอาจจะเป็นการขบกันระหว่างเฟืองตรงกับเฟืองตรง เฟืองตรงกับเฟืองวงแหวน เฟืองตรงกับเฟืองสายพาน เฟืองบายศรีกับเฟืองบายศรี เฟืองตัวหนอนกับเฟืองที่มีเกลียวตัวหนอน เป็นต้น

การส่งกำลังโดยใช้เฟืองตรงกับเฟืองสายพานเป็นการส่งแรงจากเชิงมุมเป็นแรงเชิงเส้นหรือจากแรงเชิงเส้นเป็นแรงเชิงมุม สามารถปรับระยะห่างระหว่างต้นกำลังกับจุด



รูปที่ 1 ระบบส่งกำลังแบบต่างๆ



รูปที่ 2 Rack and Pinion ของ jack-up rigs [2]

ส่งกำลังเพราะจำนวนฟันของเฟืองสายพานจะมีได้ไม่จำกัด [10] นอกจากนั้นสามารถปรับความเอียงในการส่งกำลังได้ โดยการปรับแนวของเฟืองสายพาน

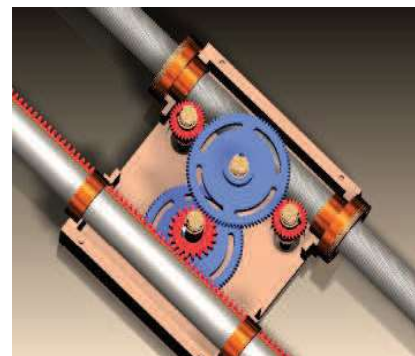
Li, 2007 [2] ศึกษา fatigue life ของการยกขึ้นของเฟืองสายพานกับเฟืองตรงของแท่นขุดเจาะน้ำมัน เพื่อลดค่าเฉลี่ยความเค้น (mean stress) โดยการนำแบบของเฟืองสายพานกับเฟืองตรงมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หาความทนทานของโครงสร้างและประเมินผลการวิเคราะห์

Gallegos et al., 2005 [3] เสนอหลักการออกแบบซึ่งประกอบไปด้วยประสิทธิภาพแบบทางพลศาสตร์ และรูปทรงทางเรขาคณิตและข้อจำกัดความแข็งแรงของเฟืองสายพานกับเฟืองตรง สำหรับปัญหาทางพลศาสตร์ที่เหมาะสม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากการส่งกำลังที่ไม่แน่นอนอย่างต่อเนื่อง

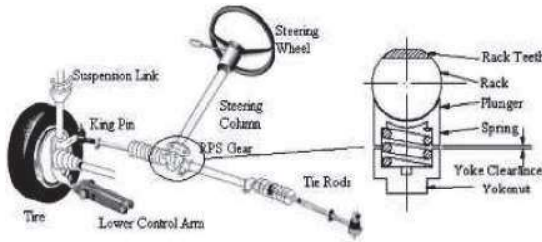
สมชัย สิริยาภรณ์ และคณะ, 2551 [4] ออกแบบและสร้างเครื่องขัดล้าง Anilox Roll ซึ่งประกอบด้วยชุดแปร่งชุดเคลื่อนที่ในแนวนอนด้วยเพลาค้อนที่เป็นเกลียวนำ (Lead Screw) และการเคลื่อนที่ของชุดแปร่งชุดทำให้เกิดการหมุนของแปร่งชุดโดยผ่านกลไกเฟืองสายพานและเฟืองตรงจากการทดลองใช้งานพบว่าใช้งานได้ดี คือทำให้หลุมเซลล์



รูปที่ 3 Pinion-rack CVT prototype [3]



รูปที่ 4 โครงสร้างของเครื่องขัดล้าง [4]



รูปที่ 5 A Virtual Prototype of a Rack and Pinion Steering [5]

สะดวกขึ้นหลังจากการขัดล้างไป 1 ชั่วโมง เสียเวลาในการติดตั้งและถอดเพียง 2 นาที

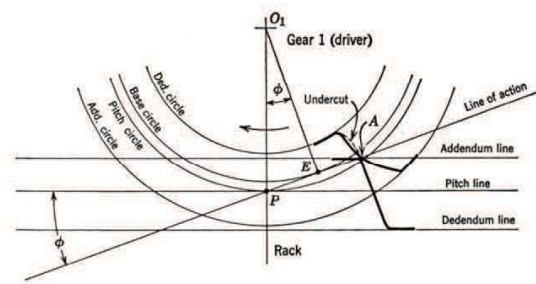
Kamble and Saha, 2007 [5] ศึกษาและพัฒนาต้นแบบชุดเฟืองส่งกำลังแบบเฟืองสะพานและเฟืองตรง (RPS) โดยการทดสอบแรงบิดที่เฟืองตรง ซึ่งแรงบิดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากการใช้งานและความเป็นอิสระของพื้นของเฟืองตรง การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานของการขบกันของเฟืองและแรงจากสปริงที่ควบคุมเฟืองในการขบกัน เป็นต้น ในการวิเคราะห์แบบอัตโนมัติเชิงพลศาสตร์ด้วยซอฟต์แวร์เครื่องจักรกล (ADAMS)

เมื่อพิจารณาถึงความสะดวกในการปรับระยะระหว่างเฟืองตรงกับเฟืองสะพานและการปรับความเอียงแล้ว ชุดถ่ายทอดกำลังแบบเฟืองสะพานกับเฟืองตรงก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าจะนำมาใช้ในการส่งกำลังที่มีข้อจำกัดสำหรับใช้ในการส่งกำลังในระบบการส่งกำลังของต้นกำลังขนาดเล็ก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะออกแบบชุดส่งกำลังเฟืองตรงกับเฟืองสะพาน เพื่อใช้กับการส่งกำลังขนาดไม่เกิน 5 กิโลวัตต์ โดยมีความเร็วรอบในการใช้งาน 1200 – 1500 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถจะนำไปใช้กับเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องผลิตไฟฟ้า ฯลฯ

## 2. วิธีการศึกษา

### 2.1 การออกแบบชุดส่งกำลังแบบเฟืองตรงกับเฟืองสะพาน

เฟืองสะพานกับเฟืองตรงเป็นกลไกในเครื่องจักรกลที่ทำงานร่วมกัน โดยเฟืองสะพานทำหน้าที่ส่งผ่านการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังเฟืองตรงเพื่อเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม การส่งผ่านแรงของเฟืองสะพานและเฟืองตามนั้น



รูปที่ 6 การขบกันของเฟืองตรงกับเฟืองสะพาน [9]

เมื่อเฟืองสะพานส่งแรงผ่านไปยังเฟืองตาม จุดที่ฟันเฟืองทั้งสองสัมผัสกันตามทฤษฎีจะสัมผัสกันบนวงกลมพิตช์ (Pitch circle) กับเส้นพิตช์ (Pitch line) และมีมุมกด ( $\phi$ ) เป็นมุมกด (Pressure angle) ของเฟือง (รูปที่ 6)

การออกแบบชุดส่งกำลังแบบเฟืองสะพานกับเฟืองตรงนั้น ใช้โปรแกรม Solidworks ในการจำลองโมเดล โดยพิจารณาขอบเขตในการใช้เฟืองสะพานกับเฟืองตรงและความสามารถในการรับแรงไม่เกิน 5 กิโลวัตต์ ซึ่งคำนวณออกมาเป็นแรงที่กระทำ ( $W_f$ ) ได้จากสมการ

$$W_f = H / V \quad (1)$$

โดย  $H$  = แรงในหน่วยกิโลวัตต์ (kW)

$V$  = ความเร็วพิตช์ของเฟืองสะพาน (m/s)

เมื่อ

$$V = \pi d_p n / 60 \quad (2)$$

โดย  $d_p$  = เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ของเฟืองตรง (m)

$n$  = ความเร็วรอบของเฟือง (รอบต่อนาที)

โดยกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ของเฟืองตรงเท่ากับ 126 มม. ความเร็วรอบที่จะนำไปใช้งาน 1200 – 1500 รอบต่อนาที เพื่อคำนวณแรงที่กระทำ ( $W_f$ ) กับเฟืองสะพานดังแสดงในตารางที่ 1 มาใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นดัดต่อไป

ตารางที่ 1 แรงกระทำที่ปลายฟันเฟืองที่ความเร็วรอบ 1200 – 1500 รอบต่อนาที

ความเร็ว (รอบ/นาที)	แรงกระทำ (นิวตัน)
1200	505
1300	541
1400	582
1500	631

ในการทดสอบขั้นต่อไปจากงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์สมรรถนะของชุดส่งกำลังเฟืองสะพานกับเฟืองตรงโดยใช้แรงดันจากกระบอกลมอัดให้เฟืองสะพานเคลื่อนที่ไปกลับและหมุนเฟืองตรงในทิศทางเดียว

## 2.2 วิเคราะห์ความเค้นดัดชุดส่งกำลังแบบเฟืองตรงกับเฟืองสะพานโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.2.1 สมการความเค้นดัดของเฟือง

ในการหาค่าความเค้นดัดที่เกิดขึ้นที่โคนฟันเฟืองสามารถหาได้จากสมการความเค้นดัดของสมาคมผู้ผลิตเฟืองแห่งสหรัฐอเมริกา (American Gear Manufacturers Association, AGMA) [1]

$$\sigma = K_o K_v K_s K_H K_B W^1 / (b m Y_j) \quad (3)$$

โดย

$\sigma$  = ความเค้นดัด

$W^1$  = แรงส่งผ่านในแนวสัมผัส

$m$  = โมดูล

$b$  = ความกว้างของฟัน

$K_o$  = แฟคเตอร์ภาระเกิน

$K_v$  = แฟคเตอร์พลวัต

$K_s$  = แฟคเตอร์ขนาด

$K_H$  = แฟคเตอร์การกระจายแรง

$K_B$  = แฟคเตอร์ความหนาขอบ

$Y_j$  = แฟคเตอร์รูปทรงสำหรับความเค้นดัด

### 2.2.2 สมการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ความเค้นในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$\sigma = D \epsilon \quad (4)$$

โดย  $\sigma$  = เทนเซอร์ของความเค้น (Stress tensor)

$\epsilon$  = เทนเซอร์ของความเครียด (Strain tensor)

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz} \quad \tau_{xy}]^T \quad (5)$$

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & \nu & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ \nu & \nu & \nu & \nu & 0.5-\nu & 0 \\ \nu & \nu & \nu & \nu & \nu & 0.5-\nu \end{bmatrix} \quad (6)$$

$D$  = เมตริกซ์ของวัสดุ (Material matrix) สำหรับวัสดุ

แบบไอโซทรอปิก

โดย  $\sigma_x, \sigma_y$  และ  $\sigma_z$  = ความเค้นตั้งฉาก

$\tau_{yz}, \tau_{xz}$  และ  $\tau_{xy}$  = ความเค้นเฉือน

$E$  = ค่ามอดูลัสของยัง

$\nu$  = ค่าอัตราส่วนปัวซอง

สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นของฟันเฟืองนั้น จะใช้ค่าความเค้น Von Mises ในการวิเคราะห์ความเสียหาย โดยสมการความเค้น Von Mises เป็นดังนี้

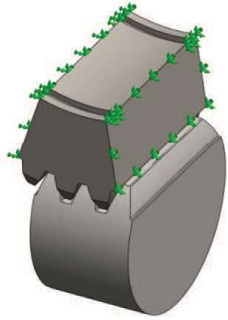
$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \quad (7)$$

### 2.2.3 วิธีการวิเคราะห์

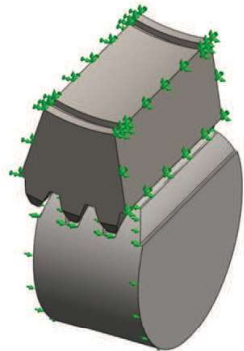
หาความเค้นดัดที่เกิดขึ้นบนฟันเฟืองโดยใช้โปรแกรม Solidworks Simulation ในการวิเคราะห์ความเค้น เพื่อศึกษาการเลือกใช้ชุดถ่ายทอส่งกำลังแบบเฟืองสะพานกับเฟืองตรงในการทำจำลองโมเดลนั้นใช้แบบจำลองของฟันเฟืองแบบสามฟันและได้กำหนดเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary conditions) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ [2, 6, 7] ซึ่งจะทำการยึดเฟืองตามไม่ให้มีการเคลื่อนที่แล้วค่อยกำหนดภาระที่กระทำต่อฟันเฟืองขับหรือเฟืองตาม โดยมีขั้นตอนดังนี้

- กำหนดการยึดตรึง (Constrain) ไว้ที่ผิวด้านข้างทั้งสองด้านของเฟืองตามไม่ให้มีการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 7
- กำหนดให้เฟืองขับเคลื่อนที่ดังรูปที่ 8
- กำหนดแรงดันที่กระทำต่อเฟืองสะพานคำนวณจากสมการที่ 1 และ 2 จะได้แรงที่กระทำ 505, 541, 582 และ 631 นิวตัน ดังรูปที่ 9
- กำหนดระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเฟืองตรงกับขอบล่างเฟืองสะพานเป็น 101.6, 102.0 และ 102.4 มม.
- กำหนดขนาดโมดูลเฟืองเป็น 2 และ 3
- กำหนดการแบ่งเอลิเมนต์จะใช้เอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้าแบบสลิปจูดต่อ (Second order tetrahedral element) เนื่องจากเหมาะสมสำหรับรูปร่างของเฟืองที่มีส่วนเว้าส่วนโค้งค่อนข้างมาก
- กำหนดให้เฟืองทำจากเหล็ก AISI 4140 หรือ 1.7225(42CrMo4)

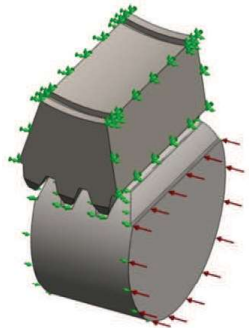
- เมื่อแบ่งเอลิเมนต์จะแล้วจะได้ 41351 เอลิเมนต์ และ 61826 จุดต่อ ดังรูปที่ 10



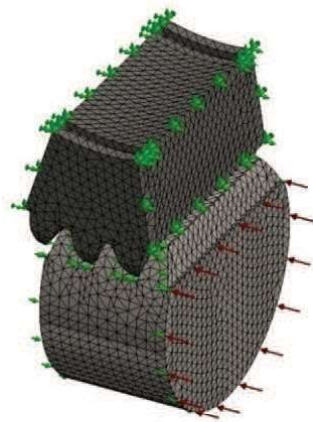
รูปที่ 7 การกำหนดการยึดตรึงของเฟือง



รูปที่ 8 การกำหนดการหมุนของเฟืองขับ



รูปที่ 9 การกำหนดแรงดันที่เฟืองขับ



รูปที่ 10 การแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh)

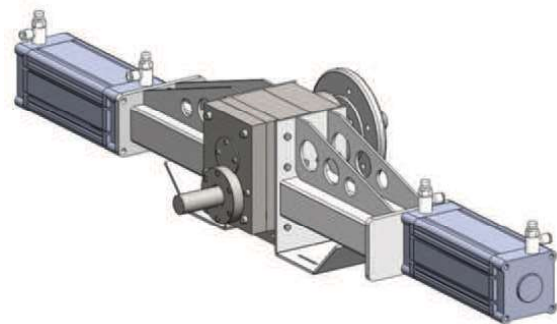
### 3. ผลการศึกษา

#### 3.1 ออกแบบชุดส่งกำลังแบบเฟืองตรงกับเฟืองสะพาน

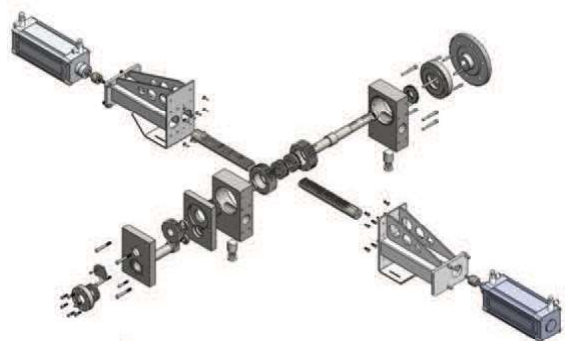
ในการสร้างแบบจำลองของเฟืองขับและเฟืองตาม สร้างจากโปรแกรม SolidWorks โดยชุดถ่ายทอดกำลังเฟือง สะพานกับเฟืองตรง มีระบอบกลมอัดสำหรับส่งกำลัง (รูป ที่ 11) โดยมีรายละเอียด (รูปที่ 12) ดังนี้

1) เฟืองตรง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิซต์ ของเฟืองตรงเท่ากับ 126 มม. และความกว้างของเฟือง (Face width) เท่ากับ 46 มม. ขนาดโมดูลที่ใช้ในการออกแบบเฟือง ตรง คือ 2 และ 3

2) เฟืองสะพาน มีความสูงพิซต์ของเฟืองสะพาน เท่ากับ 39 มม. และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเฟือง สะพานเท่ากับ 50 มม. ขนาดโมดูลที่ใช้ในการออกแบบ เฟืองสะพาน คือ 2 และ 3

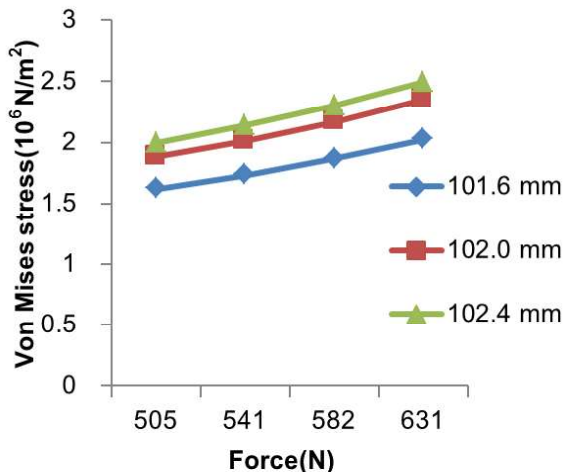


รูปที่ 11 ชุดถ่ายทอดกำลังเฟืองสะพานกับเฟืองตรง

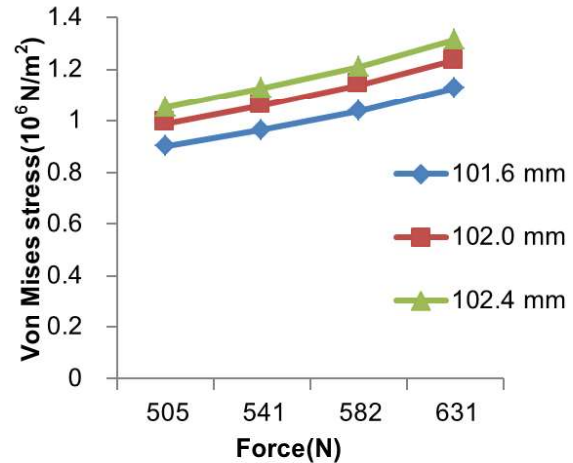


รูปที่ 12 รายละเอียดชุดถ่ายทอดกำลัง





รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Maximum Von Mises Stress กับแรงที่กระทำที่ โมดูล 2 Pressure Angle 20° (10<sup>6</sup> นิวตัน/ตร.ม)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Maximum Von Mises Stress กับแรงที่กระทำที่ โมดูล 3 Pressure Angle 20° (10<sup>6</sup> นิวตัน/ตร.ม)

เพื่อส่งกำลังเป็น 101.60, 102.0, 102.4 มม. พบว่าค่าความเค้นดัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดแรงที่กระทำมีค่าเพิ่มขึ้นที่โมดูลและระยะห่างเดียวกัน เมื่อพิจารณาความเค้นในระดับแรงที่กระทำเดียวกันพบว่าเมื่อเพิ่มขนาดโมดูลความเค้นก็จะลดลง และเมื่อเพิ่มระยะห่างจุดศูนย์กลางเฟืองตรงกับขอบล่างของเฟืองสะพานค่าความเค้นดัดจะสูงขึ้นตามระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้นที่โมดูลและแรงที่กระทำเดียวกัน โดยจะมีค่าสูงสุดคือ  $2.0244 \times 10^6$  นิวตัน/ตร.ม ที่ขนาดโมดูล 2 แรงกระทำ 631 นิวตัน และมีค่าต่ำสุดคือ  $0.9010 \times 10^6$  นิวตัน/ตร.ม ที่ขนาดโมดูล 3 แรงกระทำ 505 นิวตัน ดังนั้นเฟืองขนาดโมดูล 3 จึงนำมาใช้ในชุดส่งกำลังแบบเฟืองสะพานกับเฟืองตรง

## 5. สรุปผลการศึกษา

การออกแบบชุดถ่ายทอดกำลังแบบเฟืองสะพานกับเฟืองตรงนั้น ได้ออกแบบให้เฟืองสะพานเคลื่อนที่ไปกลับและหมุนเฟืองตรงในทิศทางเดียว โดยใช้ชุดเฟืองสะพานกับเฟืองตรงสองชุดในการส่งกำลังให้ต่อเนื่องกันและใช้กระบอกกลมอัดในการส่งกำลังให้กับชุดเฟืองส่งกำลัง จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ความเค้นดัดที่เกิดขึ้นระหว่างเฟืองสะพานกับเฟืองตรงเพื่อเลือกใช้ชุดเฟืองที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์ความเค้นดัดจากการออกแบบชุดถ่ายทอดกำลังแบบเฟืองสะพานกับเฟืองตรงพบว่า

- ค่าความเค้น Von Mises สูงสุดที่เกิดขึ้น จะมีค่าลดลงเมื่อขนาดโมดูลเพิ่มขึ้น
- แนวโน้มค่าความเค้น Von Mises มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเฟืองตรงกับขอบล่างของเฟืองสะพานที่เพิ่มขึ้น
- ค่าความเค้น Von Mises สูงสุดที่เกิดขึ้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นทุกกรณีเมื่อมีขนาดแรงที่กระทำเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากขนาดโมดูลเดียวกันระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเฟืองตรงกับขอบล่างของเฟืองสะพานเดียวกัน
- เลือกเฟืองขนาดโมดูล 3 ใช้กับชุดถ่ายทอดกำลังแบบเฟืองสะพานกับเฟืองตรง เนื่องจากมีค่าความเค้นดัดจากการรับแรงกระทำน้อยที่สุด

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีชนบท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shigley, J.E. (1986). Mechanical Engineering Design, 1<sup>st</sup> Metric Edition, Mc Graw - Hill, Singapore.
- [2] Li, S., (2007). Finite element analyses for contact

- strength and bending strength of a pair of spur gears with machining errors, assembly errors and tooth modifications. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 42, pp. 88-114.
- [3] Gallegos, J.A., Villar, C.A.C. and Flores, E.A.P. (2005). Parametric Optimal Design of a Pinion - Rack based Continuously Variable Transmission. *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Monterey, California. USA.*
- [4] สมชัย สิริยาภรณ์, วรวิฑู วิสุทธิ์เมฆางกูร, ปัญญารักษ์ งามศรีตระกูลและสรรพีปิยะ รัตนศิริ (2551). ชุดขับเคลื่อน Anilox Roll แบบอัตโนมัติสำหรับระบบการพิมพ์กล่องกระดาษลูกฟูก. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.*
- [5] Kamble, N. and Saha, S.K., (2007). Developing a Virtual Prototype of a Rack and Pinion Steering System, Vol. 2, No.1, pp.61-79.
- [6] Carvarella, M., Demelio, G. and Ciavarella, M., (1999). Numerical method for the optimization of specific sliding, stress concentration and fatigue life of gears. *International journal of fatigue*, Vol.21, pp.465-474.
- [7] Sfakiotakis, V.G., and Anifantis, N.K., (2002). Finite element modeling of spur gearing fractures. *Finite Element in Analysis and Design*, Vol.39, pp. 79-92.