

## การวิเคราะห์การแตกหักของเฟืองเกียร์ปั๊ม

### The Analysis Fracture of the Gear Pump

ปรีดี บุตรโคตร<sup>1\*</sup>, ภูมิรินทร์ ลินเลื่อ<sup>1</sup>, ปัญญา ทองสุข<sup>1</sup>, ชานนท์ มุลวรรณ<sup>2</sup>, สำเร็จ เนตรภู<sup>2</sup>

<sup>1</sup> นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

<sup>2</sup> อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ; ie.engineer@kbu.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์การแตกหักของเฟืองเกียร์ปั๊ม ส่วนผสมทางเคมีของเฟืองเกียร์ปั๊มประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ร้อยละ 1.50 โดยน้ำหนัก ธาตุซิลิคอน ร้อยละ 0.30 ธาตุแมงกานีส ร้อยละ 0.40 ธาตุโครเมียม ร้อยละ 12 ธาตุโมลิบดีนัม ร้อยละ 1 และ ธาตุวานาเดียม ร้อยละ 0.90 เฟืองเกียร์ปั๊มผลิตจากเหล็กกล้า SKD 11 ตามมาตรฐาน JIS ความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 681.92 HV โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสของ เหล็กคาร์ไบด์ ออสเทนไนต์ตกค้าง กระจายในโครงสร้างหลัก มาเทนไซต์ การแตกหักเริ่มที่ขอบฟันเป็นการแตกหักเนื่องจากการล้า

**คำสำคัญ :** เหล็กคาร์ไบด์ ; ออสเทนไนต์ตกค้าง ; มาเทนไซต์

#### Abstract

The objective of this research is to analyze the fracture of the Gear Pump. The chemical composition of the Gear Pump consists of 1.50% by weight of carbon, 0.30 percent of silicon, 0.40% of manganese, 12% of chromium, 1% of molybdenum, and 0.90% of vanadium. The Gear Pump is made of SKD-11 steel. According to the JIS standard, the average hardness is 681.92 HV. The microstructure consists of the iron carbide and retained austenite in the matrix of martensite phase. The fracture begins at the rim of the gear as a fatigue fracture.

**Keywords:** Iron carbide; Retained austenite; Martensite

## 1. บทนำ (Introduction)

เกียร์บีม (Gear Pump) มีหน้าที่ปั๊มพอลิเมอร์ (Polymer) ผ่านกระบวนการทางความเย็นเพื่อให้พอลิเมอร์แข็งตัวเป็นเส้นใยและนำไปผลิตเป็นเครื่องนุ่งห่ม ผ้าอ้อมเด็ก ถุงผ้า และผ้าสปันบอนด์ เป็นต้น เฟืองเกียร์บีมที่ทำจากเหล็กกล้า SKD 11 ตามมาตรฐานของ JIS การแตกหักจะทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงัก ส่งผลให้กระบวนการผลิตล่าช้า และขนส่งสินค้าล่าช้า

เกียร์บีมมีอัตราการป้อนพอลิเมอร์ 0.480 กรัม/วินาที การแตกหักของเฟืองเกียร์บีมจะใช้เวลาในการเปลี่ยน 3 ชั่วโมงต่อครั้ง ซึ่งพอลิเมอร์มีมูลค่าเท่ากับ 300 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อรวมมูลค่าความเสียหายทั้งหมดจะเท่ากับ 654,080 บาท ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากชำรุดของเฟืองเกียร์บีม

เกียร์บีมป้อนพอลิเมอร์	0.480 กรัม/นาที
การเปลี่ยนเกียร์บีม	3 ชั่วโมง (3 × 60 = 180 นาที)
มูลค่าสินค้า	300 บาท/กิโลกรัม
จำนวนสินค้าที่เสียหาย	0.480 กรัม/นาที × 180 นาที = 86.4 กิโลกรัม
จำนวน gear pump ที่หยุด	24 ตัว
ราคาเฟืองเกียร์	16,000 × 2 บาท
มูลค่าความเสียหายรวม	(86.4 กิโลกรัม × 300 บาท/กิโลกรัม) × 24 + ค่าเฟืองเกียร์ 32,000 บาท = 654,080 บาท

วิษณุ บุญมาก และ กัณวรัช พลุประชาญ ได้ทำการศึกษาความเสียหายของเฟืองเฉียงที่เกิดขึ้นในตำแหน่งเกียร์ 5 ของรถบีคอปที่มีกำลังขับ 120 kW ผ่านการทำงานมา 6 ปี การแตกหักของเฟืองเฉียงขับเกิดจากความล้าซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นดัดที่เกินค่า Tensile strength ของวัสดุ 1300 MPa ลักษณะรอยแตกบริเวณผิวรอบนอกของเฟืองมีการแตกผ่านเกรน และการแตกระหว่างเกรน ซึ่งเป็นการแตกหักแบบเปราะ ผลการคำนวณที่ได้จากสมการของลูอิสตามมาตรฐานของ AGMA เปรียบเทียบกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมี

ค่าความเค้นดัดมีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อแรงบิดเพิ่มสูงขึ้นจนเกินค่า Tensile strength ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เฟืองเกิดการแตกหัก [ 1 ]

มาโนช รัตนโย ชัยวัฒน์ พีรทัตสุวรรณ ณรงค์ศักดิ์ธรรมโชติ พงษ์ศักดิ์ รุนกระโทก อนุชิต คงฤทธิ์ จิตติวัฒน์ นิธิกาจนธาร โครสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD 11 ตามมาตรฐาน JIS ที่ผ่านกระบวนการทางความเย็นที่อุณหภูมิ -190 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิดังกล่าวมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอนุภาคคาร์ไบด์มากที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการอบชุบทางความเย็นที่ -20 องศาเซลเซียส และ -80 องศาเซลเซียส โดยอนุภาคคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นจะมีขนาดเล็กและมีรูปทรงกลมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างพื้นของมาร์เทนไซต์ตลอดทั้งชิ้นงานและพบโครงสร้างของออสเทนไนต์ตกค้างที่มีสีเหลืองอ่อนขนาดเล็กกระจายตัวอยู่ระหว่างโครงสร้างของมาร์เทนไซต์ตลอดทั้งชิ้นงาน [ 2 ]

สมการของ LEWIS FORMULAE ประมาณค่าโมเมนต์ดัดของฟันเฟือง โดยพิจารณาฟันเฟืองในลักษณะของคานยื่น (Cantilever beam) หน้าตัดของฟันเฟืองเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หากจุดวิกฤตที่โคนฟันเฟืองเป็นรูปพาราโบลา [ 3 ] โดยกำหนดดังนี้

- 1) ฟันเฟืองมีลักษณะรับภาระเหมือนคานยื่น
- 2) องค์ประกอบของแรงย่อยตามแนวเส้นสัมผัสทำให้เกิดโมเมนต์ดัดรอบฐานฟัน
- 3) ไม่พิจารณาภาระของแรงตามแนวรัศมี
- 4) องค์ประกอบของแรงย่อยตามแนวเส้นสัมผัสกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าของฟันเฟือง
- 5) ไม่พิจารณาความเค้นที่เป็นจุด (Stress concentration)
- 6) อนุমান (assume) ว่าที่เวลาใด ๆ มีฟันเฟืองเดียวที่สัมผัสกันและเกิดภาระ (Load)

$M_b$  = Moment at BC

$M$  = Module Of Gear

$P_t$  = Tangential Load

$B$  = Face Width

$h$  = Depth Of Tooth

$I$  = Moment Of Inertia

$$M_b = P_t \times h$$

ซึ่ง

$$P_t = m \times b \times \sigma_b Y$$

ความเค้นดัดถูกกำหนดโดย

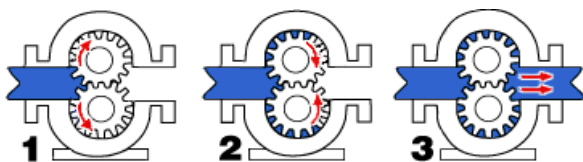
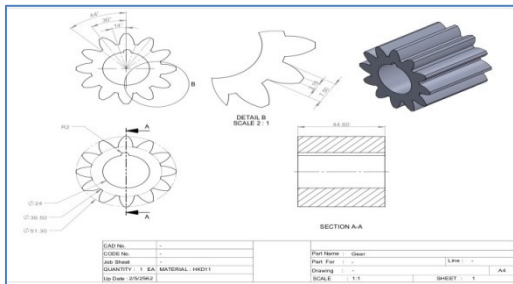
$$\sigma_b = \frac{M_b \times Y}{I}$$

และ

$$I = \frac{b \times h^3}{12}$$

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์การแตกหักของเฟืองเกียร์ปั๊ม ไม่ให้เกิดการแตกหักซ้ำอีก การวิเคราะห์การแตกหักจะเริ่มจากการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม การทดสอบความแข็ง การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเกียร์ปั๊ม

## 2. วิธีการวิจัย (Methodology)



ภาพที่ 1 Drawing Gear และการหลักทำงาน

2.1 เหล็ก SKD11 เกียร์ปั๊มเฟืองนอก (External Gear Pump) ประกอบด้วยเกียร์สองตัวโดยที่ฟันของเกียร์ทั้งสองตัวนั้นขบกันและพอลิเมอร์จะถูกส่งเข้ามาเติมในส่วนช่องว่าง เมื่อปั๊มเริ่มหมุนตัว เฟืองทั้งสองตัวจะเริ่มหมุน และผลักพอลิเมอร์ไปยังชุดเตอร์เพื่อผลิตเป็นเส้นใย

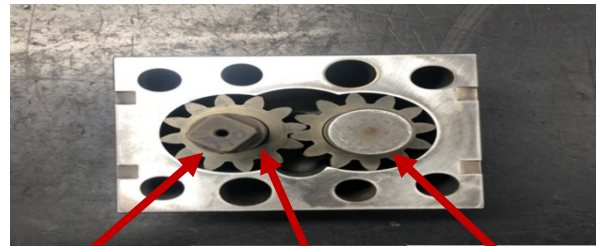
สมบัติการใช้งาน SKD11 มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง ชุบแข็งได้ดี มีความแข็งหลังอบคืนตัว เท่ากับ 50-60 HRC มีความเหนียวแรงพอใช้ มีความสามารถในการชุบแข็งสูง สามารถชุบแข็งในเตาสุญญากาศได้ รักษาคมตัดให้มีอายุการใช้

งานได้ยาวนาน ด้านทนทานการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงได้ดี เกิดการบิดงอเล็กน้อยหลังชุบแข็ง สามารถทำไนโตรดิ่งได้ และสามารถชุบเคลือบผิวแบบ PVD ได้ [ 4 ]

### 2.3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยได้ดำเนินงานตามขั้นตอนดังนี้

#### 2.3.1 การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง



เฟืองขับ                      เฟืองที่แตกหัก                      เฟืองตาม

ภาพที่ 2 เกียร์ปั๊มที่เกิดการแตกหัก

เฟืองเกียร์ปั๊มเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือกลุ่มงานเย็น SKD 11 ตามมาตรฐาน JIS ที่มีส่วนผสมของคาร์บอนและโครเมียม ในปริมาณสูง ช่วยให้ทนต่อการเสียดสีและต้านทานต่อการสึกหรอได้สูงมาก

#### 2.3.2 การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม (ยี่ห้อ Taseto chemical)

การตรวจสอบด้วยการใช้สารแทรกซึม โดยวิธีการนี้อาศัยหลักของปฏิกิริยาแทรกซึม (Capillary action) โดยการพ่นของเหลวย้อมสีที่มีสมบัติแทรกซึมเข้าไปในรอยร้าวหรือรูเล็กๆ

#### 2.3.3 การทดสอบวัดค่าความแข็งของชิ้นทดสอบ

ค่าความแข็งของชิ้นงานตรวจสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Rockwell Hardness Tests เครื่องทดสอบยี่ห้อ : STRUERS/Duramin-5 Type 05656242 Serial No : 5655349

#### 2.3.4 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

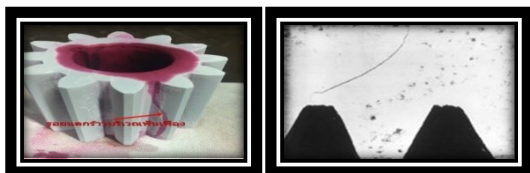
การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเฟืองโดยใช้เครื่อง Spectro lab : M8 , Type : LAWWA 18A, Serial No : 4N0149 เหล็กกล้า SKD 11 ตามมาตรฐาน JIS โดยมีคาร์บอนเป็นส่วนผสมสำคัญ

#### 2.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเฟืองที่เสียหายโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Hitachi SU5000

## 2.4 ผลการทดสอบ

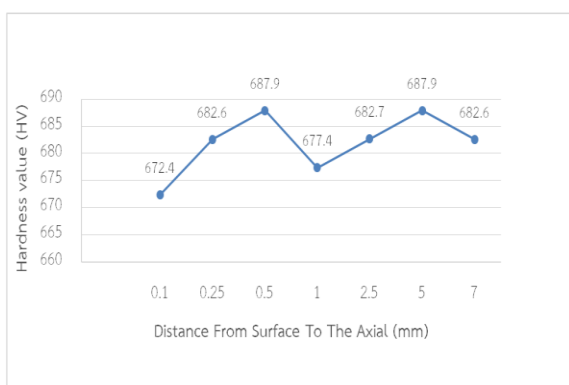
### 2.4.1 ผลการตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม



ภาพที่ 3 การแตกหักที่ขอบฟัน

การแตกหักที่โคนฟัน (Rim and Web Failures) โดยเริ่มแตกที่โคนของฟันเพียง

### 2.4.2 ผลการทดสอบความแข็ง



ภาพที่ 4 ความแข็งของเฟืองที่เสียหายโดยวัดจากขอบฟิวด้านนอกถึงแกนกลางของเฟือง

ค่าความแข็งสูงสุดที่ผิวเฟืองเท่ากับ 687.9 HV และ ค่าความแข็งต่ำที่สุดบริเวณรอยแตกหักของเฟืองเท่ากับ 633.1 Hv

### 2.4.3 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

#### ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของเฟืองเกียร์บี้ม

Composition weight %	วัสดุ	
	เฟืองมาตรฐาน	เฟืองเกียร์ที่เสียหาย
	SKD.11	เหล็ก SKD.11
C	1.50-1.60	1.4337
Si	0.10-0.40	0.2727
Mn	0.15-0.6	0.4256
P	≤ 0.03	0.0181
S	≤ 0.03	0.002
Cr	11.0-12.0	11.5025
Mo	0.60-0.80	0.8259
V	0.35-1.10	0.2044

### 2.4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

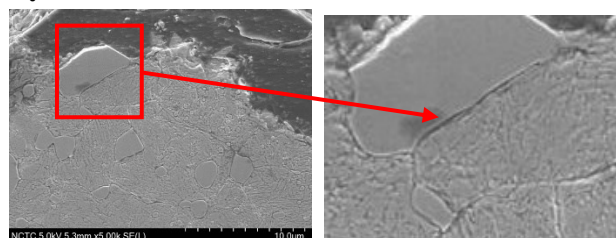


ภาพที่ 5 ตัดขึ้นทดสอบเพื่อทำการทดลอง



ภาพที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของเฟือง

โครงสร้างจุลภาคของเกียร์บี้ม โครงสร้างประกอบด้วยคาร์ไบด์ (สีขาว) และออสเทนไนต์ (สีเหลืองอ่อน) ตกค้างกระจายอยู่ในโครงสร้างหลักมาร์เทนไซต์ (สีดำ)



ภาพที่ 7 ตำแหน่งเริ่มต้นของการแตกหักจาก SEM

กำลังขยาย 5000 เท่า

การแตกหักจะเกิดขึ้นที่โคนของฟันเฟือง รอยแตกจะเกิดตามแนวขอบเกรนซึ่งโดยปกติเกิดจากขอบเกรนซึ่งอ่อนแอและเปราะ ลักษณะดังกล่าวเป็นการแตกหักแบบเปราะ [ 5 ]

### 2.4.5 ผลการวิเคราะห์ความเค้นตัดโดยสมการของลูอิส

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเฟืองเกียร์

#### ตารางที่ 3 ขนาดพร้อมส่วนประกอบเฟืองเกียร์บี้ม

ลักษณะ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
กำลังสูงสุดที่ความเร็วรอบ/นาที่	$H @ n_p$	1 @ 1000	kW @ rpm
จำนวนฟันเฟืองตาม	$N_p$	12	ฟัน
จำนวนฟันเฟืองขับ	$N_G$	12	ฟัน

ตารางที่ 3 ขนาดพร้อมส่วนประกอบเฟืองเกียร์บี้ม (ต่อ)

ลักษณะ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองตาม	$d_p$	52.738	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองขับ	$d_G$	52.738	mm
โมดูล	$m$	3.5	-
มุมกด	$\phi$	20°	องศา
มุมฮีลิคซ์	$\psi$	0°	องศา
ความกว้างของฟันเฟือง	$F$	44.630	mm

ใช้มอเตอร์ขนาด 1 กิโลวัตต์ซึ่งให้แรงบิด 35000 Nm

$$P_t = \frac{\text{Torque}}{\text{Radius}} = \frac{35000}{26.369} = 1327.32 \text{ N}$$

$$M_b = 1327.32 \times 4.271$$

$$= 5668.98 \text{ N/m}^2$$

$$y = \frac{3.14}{2} = 1.577$$

$$I = \frac{6.032 \times 4.271^3}{12}$$

$$= 39.16 \text{ Kg/m}^2$$

$$\sigma_b = 5668.98 \times \frac{1.577}{39.16}$$

$$= 228.29 \text{ MPa}$$

### 3.ผลการวิจัย (Results)

#### 3.1 การตรวจสอบด้วยสารแทรกซึม

การตรวจสอบด้วยภาพถ่ายของเฟืองที่แตกหักจะเห็นว่าเป็นลักษณะ การแตกหักที่โคนฟัน (Rim and Web Failures) เริ่มแตกที่โคนฟัน โดยลักษณะการเริ่มแตกจะเป็นแนวเส้น

เล็ก ๆ จากระหว่างร่องฟัน ซึ่งแสดงถึงการที่เฟืองรับภาระมาก และ ทำให้ความเค้นตรงบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น มีค่ามากกว่าความแข็งแรงที่จุดยืด (Yield Point)

#### 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของเฟืองเกียร์บี้ม

ส่วนผสมทางเคมีของเฟืองเกียร์บี้มประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) 1.50% ซิลิคอน (Si) 0.30% แมงกานีส (Mn) 0.40% โครเมียม (Cr) 12.00% โมลิบดีนัม (Mo) 1.00% และ วาเนเดียม (V) 0.90% ซึ่งตรงกับเหล็ก SKD11 ตามมาตรฐาน JIS

#### 3.3 โครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเฟสของคาร์ไบด์และออสเทนไนต์ตกค้างกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างหลัก (Matrix) มาร์เทนไซต์

#### 3.4 ความแข็ง

ความแข็งของเฟืองเกียร์บี้มใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยเท่ากับ 681.92 Hv

### 4.การอภิปราย (Discussion)

ภาระที่เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานกลระหว่างฟันเฟืองทำให้เกิดความเค้นที่โคนฟันเฟืองเท่ากับ 228.29 MPa แต่ความแข็งแรงที่จุดยืดของวัสดุที่ใช้ทำเฟืองเท่ากับ 330 MPa การรับภาระซ้ำ ๆ ของเฟืองเกิดความเค้นที่เป็นจุด (Concentration Stress) มีค่าเกินความแข็งแรงที่จุดยืด ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตก รอยแตกจะแผ่ขยายออกไปและแตกหักในที่สุด

### 5. สรุปผล (Conclusion)

การแตกหักของเฟืองเกียร์บี้มเกิดขึ้นเนื่องจากการล้า และเป็นการแตกหักแบบเปราะ

### 6.กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ช่วย ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ตรวจสอบความแข็ง ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว รวมทั้ง ผศ. ขานนท์ มูลวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย และ ดร. สำเร็จ เนตรภู ที่ช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## 7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] วิษณุ บุญมาก และ กัณวริช พลุปราษฎ์ สมบัติทางกล และโครงสร้างจุลภาคของการวิเคราะห์ความเสียหายที่ส่งผ่านเฟืองเฉียงรยอนตบรรทุกขนาดเล็ก Kasem Bundit Engineering Journal Vol.5 No.2 July - December 2015
- [2] มาโนช ริทินโย ชัยวัฒน์ พิรทัตสุวรรณ ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ พงษ์ศักดิ์ รุนกระโทก อนุชิต คงฤทธิ จิตติวัฒน์ นิธิกาจน ธาร ผลของกระบวนการทางความเย็นต่อปริมาณของโคมเมียมคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าเครื่องมือ JIS SKD11 วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒปีที่ 12 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน พ.ศ.2560
- [3] Sarfraz Ali N. Quadr & Dhananjay R. Dolas Effect of Root radii on Stress analysis of Involute Spur Gear under Static Loading International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE) Volume: 2 May 2015
- [4] Concellon, P.J.F., and Arino, S.B. (2014). Analysis of power losses on spur gears using the design of experiments theory. Journal Engineering Faculty University of Antioquia, vol.72, May 2014, pp. 203 - 216.
- [5] บุญธรรม วงศ์ไชย (2550). การวิเคราะห์ความเค้นดัดในเฟืองตรงกรณีเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเฟือง ขั้วและเฟืองตาม โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, ชลบุรี
- [6] Osman Asi. (2005). "Fatigue Failure of a Helical Gear in a Gearbox". Engineering Failure Analysis. Vol.13. (7): 1116-1125.
- [7] Chamroon Tantipisalkul. (2007). Mechanical Engineering Design 1. 4th edition. Bangkok: Threlada Ltd. (In Thai)
- [8] J. Venkatesh and Mr. P. B. G. S. N. Murthy. (2014). "Design and Structural Analysis of High Speed Helical Gear Using Ansys". J. Venkatesh Int. Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 4. Issue 3: 1-5.
- [9] Lundin, A., and Mardestam, P. (2010). Efficiency analysis of a planetary gearbox. Bachelor's thesis, University of Linkoping, Sweden.
- [10] Anderson, N.E. and Loewenthal, S.H. (1980). Spur gear system efficiency at part and full load, NASA Technical Paper 1622, AVRADCOM Technical Report 79 – 46, February 1980