การประเมินค่าอายุการใช้งานของสายพานลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ในกระบวนการทำความสะอาดชิ้นงานกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์ภายใต้ภาระที่มากระทำแบบวัฏจักรทางความร้อน การสั่นสะเทือน และคลื่นอัลตร้าโซนิกส์

Fatigue Life Estimation of Stainless Steel Wire Conveyor on Cleaning Process of Hard Disk Case under Cyclic Load of Heat and Vibration and Ultrasonic Wave

ณรงค์ศักดิ์ เกศรัตนาสวัสดิ์[1*] และ พีระพงศ์ ตริยเจริญ[2]

Narongsak Ketrattanasawat[1*] and Peerapong Triyacharoen[2]

นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1]Master of Engineering (Industrial Production Technology), Kasetsart University, Ngam Wong Wan Rd, Lat Yao Chatuchak Bangkok 10900*

[2]Lecturer in Master of Engineering (Industrial Production Technology), Kasetsart University, Ngam Wong Wan Rd, Lat Yao Chatuchak Bangkok 10900

[*]Corresponding author, E mail: dominant_human@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้จำลองสายพานลวดเหล็กกล้าไร้สนิมถัก เกรด 304 ที่ใช้ลำเลียงกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์เข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม Solidworks 2014 ภายใต้ภาระที่มากระทำด้วยแรงดันน้ำจากคลื่นอัลตร้าโซนิกที่ช่วงความถี่ 40-132 กิโลเฮิรตซ์ และความร้อนจากการเป่าและการอบที่ช่วงอุณหภูมิ 30-80 องศาเซลเซียส รวมถึงการสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่ โดยใช้เวลา 25.2 นาที/กระบวนการ และวนรอบเริ่มกระบวนการใหม่ซ้ำๆ จึงส่งผลให้สายพานเสียหายเนื่องจากความล้า และนำผลไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการหาอายุการใช้งานจากรอบความเสียหายสะสม โดยใช้หลักการ Rainflow Cycle Counting ในโปรแกรม Matlab และทำการวิเคราะห์อายุการใช้งานตามทฤษฎีของ Miner’s จากการวิเคราะห์พบว่า สายพานภายใต้ภาระงานที่มากระทำแบบวัฏจักรนี้ มีอายุการใช้งาน 3,065 รอบของกระบวนการทำความสะอาด ซึ่งต่างจากผลการใช้งานจริงในกระบวนการล้างทำความสะอาดที่ร้อยละ 15.45 ดังนั้น แบบจำลองจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินอายุงานของสายพานที่มีภาระงานกระทำขนาดต่างๆ และความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ทำให้ทราบอายุการใช้งานล่วงหน้าก่อนที่จะเกิดความเสียหายและสามารถวางแผนการบำรุงรักษาสายพานได้อย่างเหมาะสมต่อไป

คำสำคัญ: *วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ความล้า สายพาน คลื่นอัลตร้าโซนิค*

มหาวิทยาลัยรังสิต

Abstract

A model of braided-304-strainless-steel wire conveyor belt that delivers the Hard Disk Case into a cleaning process is simulated on Solidworks 2014 by Finite Element Method, under load of water pressure generated from ultrasonic wave at 40-132 kHz and heat by blowing and baking at 30-80 degree Celsius with the vibration of conveyor movement in cleaning process. This process takes 25.2 minutes per cycle and the process is then repeated which causes the fatigue failure on the conveyor. Then the result was applied and the lifetime was calculated from accumulation of Rainflow Cycle Counting method using Matlab, following Miner's theorem to estimate the lifetime of the conveyor. From the analysis, it was found that the conveyor could operate for 3,065 cycles of cleaning process under loading and heating condition which was varied to the actual cleaning process at 15.45 percent under the same condition. Therefore, this simulation model can be used to estimate the lifetime of the conveyor under various loading and heating condition. It can apply for progressive in maintaining planning.

Keywords: *Finite Element Method, Fatigue, Conveyor, Ultrasonic wave*

1. บทนำ

กระบวนการทำความสะอาดกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์เป็นกระบวนการที่ทำการล้างอนุภาคฝุ่นละออง และคราบน้ำมันที่เกาะอยู่บนพื้นผิว โดยผ่านสถานีทำความสะอาดทั้งหมด 10 สถานี ถูกลำเลียงด้วยสายพานเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 โดยในแต่ละสถานีมีภาระที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ และสายพาน คือ ความร้อนจากการอบแห้ง และแรงสั่นสะเทือนของน้ำที่เกิดจากเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตร้าโซนิค (http://www.ctgclean.com/blog/technology-library/articles/ ultrasonic-cleaning-fundamental. com ,20 มิถุนายน 2558) ที่มีประสิทธิภาพทำให้อนุภาคฝุ่นละอองและคราบน้ำมันหลุดออกจากผิวชิ้นงาน ซึ่งตัวสายพานที่ทำหน้าที่ลำเลียงผลิตภัณฑ์เป็นวงรอบจะต้องรับภาระซ้ำๆอย่างต่อเนื่อง มีผลทำให้สายพานเกิดการล้าตัวนำไปสู่การเสียรูป และขาดเสียหายตามลำดับ ส่งผลให้ต้องหยุดกระบวนการผลิตจนนำไปสู่การสูญเสียรายได้ และความเชื่อมั่นจากลูกค้า โดยเฉลี่ยแล้วในรอบระยะเวลา 1 ปีการผลิต บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์สูญเสียรายได้จากการหยุดการผลิตเนื่องจากสายพานลำเลียงเสียหายอยู่ที่ปีละประมาณ 3,000,000 บาท และส่งผลให้ลูกค้าเสียความเชื่อมั่นและเป็นปัญหาที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขเนื่องจากไม่สามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างแม่นยำได้ ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การประเมินอายุการใช้งานของสายพานเหล็กกล้าไร้สนิม ด้วยการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลทางสถิตด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้วิธีหลักการ Rainflow Cycle Counting (Igor Rychlik ,1987) ในโปรแกรม Matlab วิเคราะห์รอบความเสียหายสะสม จากนั้นใช้ทฤษฎี ของ Miner's มาคำนวณหาอายุการใช้งาน และผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่าอายุการใช้งานของสายพานเหล็กกล้าไร้สนิมจะอยู่ที่ประมาณ 6 เดือน ซึ่งสอดคล้องกับการใช้งานจริง

2. วัตถุประสงค์

1 เพื่อประเมินอายุการใช้งานของสายพานเหล็กหล้าไร้สนิมในกระบวนการทำความสะอาดกล่อง

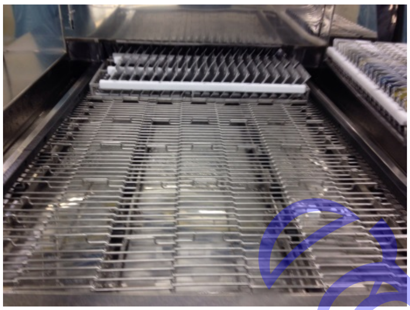
บรรจุฮาร์ดดิสก์ภายใต้ภาระที่มากระทำแบบวัฏจักรและความร้อน

2 เพื่อใช้ประเมินอายุการใช้งานของสายพานลำเลียงที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตรากำลังการผลิตในอนาคต

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สายพานเหล็กกล้าไร้สนิม

สายพานลำเลียง ผลิตจากลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด AISI 304 (JIS Hand Book, 2010) ขึ้นรูปด้วยวิธีการรีดเย็น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.47 มิลลิเมตร มีค่า Tensile Strength เท่ากับ 1.424 GPa และ Yield Strength เท่ากับ 1.214 GPa (INCO Data Book 3rd Ed, 1968) ถูกนำมาถักเป็นสายพานลำเลียง ขนาดหน้ากว้าง 560 มิลลิเมตร ยาว 30,000 มิลลิเมตร รองรับน้ำหนักจากการลำเลียงกล้องบรรจุฮาร์ดดิสก์ ประมาณ 30-35 กิโลกรัม/ตารางเมตร ภายในกระบวนการทำความสะอาดจะมีสถานีทำความสะอาดทั้งหมด 10 สถานีที่สายพานลำเลียงกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ผ่านโดยมีภาระที่มากระทำในรูปแบบของความร้อน และการสั่นสะเทือนของน้ำที่เกิดจากคลื่นอัลตร้าโซนิค อีกทั้งมีสถานีลำเลียงกลับสายพานเปล่าอีก 1 สถานี เครื่องถูกตั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ของสายพาน 1 เมตร/นาที หรือ 25.2 นาที/กระบวนการทำความสะอาด



รูปที่ 1 แสดงรูปแบบสายพานเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการทำความสะอาดกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์

3.2 การเก็บข้อมูลอายุการใช้งานจริงของสายพานเหล็กกล้าไร้สนิม

ทำการตรวจเช็คสายพาน และทำการติดตั้ง จากนั้น เก็บบันทึกข้อมูลการผลิต และประวัติการเกิดปัญหาตลอดการใช้งานเพื่อรวบรวมไปพิจารณาร่วมกับผลการประเมินจากการคำนวณ

3.3 การสร้างแบบจำลอง และวิเคราะห์ผลทางสถิต

ออกแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยโปรแกรม Solidworks 2014 จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของวัสดุ และทำการวิเคราะห์ผลทางสถิตภายใต้ภาระที่มากระทำในรูปแบบของ ความร้อน แรงดันจากคลื่นอัลตร้าโซนิค และน้ำหนักของกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์ของแต่ละสถานี ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 1 แสดงภาระของแต่ละสถานีภายใต้กระบวนการทำความสะอาดกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์

สถานี	อุณหภูมิ □	คลื่นอัลตร้าโซนิค W/cm^2	เวลา s	น้ำหนัก kg
1	45±15	-	29	60
2	45±15	22	120	60
3	45±15	-	29	60
4	45±15	25.83	211	60
5	55±15	-	24	60
6	55±15	-	24	60

สถานี	อุณหภูมิ	คลื่นอัลตร้าโซนิค	เวลา	น้ำหนัก
	□	W/cm^2	s	kg
7-8	55±15	-	72	60
9	65±15	-	58	60
10	50±15	-	192	60
11	23	-	759	-

3.4 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของสายพาน

ภายใต้การลำเลียงของสายพานเคลื่อนที่ผ่านสถานีทำความสะอาด สายพานเกิดการสั่นสะเทือนจากขับเคลื่อนของเฟืองมอเตอร์ ซึ่งแรงสั่นสะเทือนนี้มีผลทำให้แรงที่กระทำต่อสายพานเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงได้เลือกใช้เครื่องมือ Application “VibSenser” ใน IPhone 5 ติดตั้งไว้บนสายพานเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนตลอดกระบวนการทำความสะอาดทั้ง 11 สถานี จะได้ผลออกมาในรูปแบบของความมันพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา

3.5 การวิเคราะห์ผลทางกล

ทำการรวมผลข้อมูลจากการวิเคราะห์ทางสถิต และผลจากการตรวจวัดการสั่นสะเทือน โดยประยุกต์ใช้สมการ Superposition (ณัฐพงษ์ หล้ากอง , สายประสิทธิ์ เกิดนิยม ,บุญชัย วัจจะตรากุล, 2551) คือ

$$\square_{(\square)} = \square_{\square}\left(\frac{\square_{\square\square\square}}{\square_{\square\square\square}}\right) \quad (1)$$

โดยที่ $\square_{(\square)}$ คือ ความเค้น ณ เวลาใดๆ ,$\square_{\square}$ คือ แรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของความเร่ง ,$\square_{\square\square\square}$ คือ ความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิต และ $\square_{\square\square\square}$ คือ แรงที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิต ผลที่ออกมาจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและเวลา จากนั้นนำค่าที่ได้ไปทำการคำนวณรอบความเสียหายสะสมด้วยวิธีการ Rainflow Cycle Counting โดยใช้โปรแกรม Matlab เข้ามาช่วยในการคำนวณหารอบความเสียหายทั้งหมดใน 1 รอบของกระบวนการทำความสะอาดกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์ รวมถึงค่าความเค้นสูงสุดต่ำสุดอีกด้วย

3.6 การวิเคราะห์รอบอายุการใช้งาน

นำผลจากการวิเคราะห์ทางกลมาทำการวิเคราะห์หารอบอายุการใช้งานที่สายพานสามารถรองรับได้ โดยเริ่มจากวิธีการดังนี้

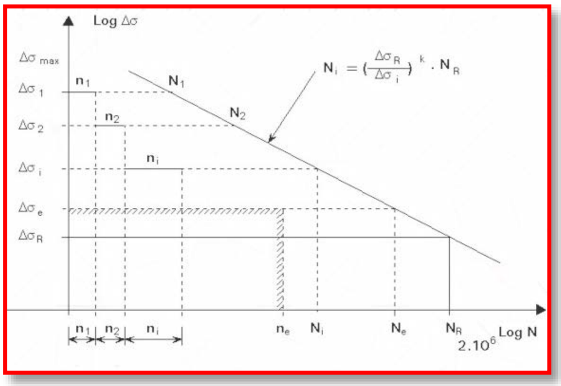
3.6.1 ทำการคำนวณปรับแก้ค่าความต้านทานการล้าของวัสดุ ด้วยสมการ

$$\square_{\square} = \square_{\square}\,\square_{\square}\,\square_{\square}\,\square_{\square}\,\square_{\square}\,\square_{\square}\,\square_{\square}^{\square} \quad (2)$$

3.6.2 .ใช้ทฤษฎีของ Miner’s ที่ระบุไว้ว่า

$$D = \sum_{\square=1}^{\square_{\square}}\left(\frac{\square_{\square}}{(\square_{\square})_{\square}}\right) \quad (3)$$

โดยที่ D = ผลรวมของอัตราส่วนรอบความเสียหายย่อยที่ระดับความเค้น $\square_{\square}$ / รอบความเสียหายทั้งหมด เมื่อมีค่าเป็น *1* แสดงว่าวัสดุเกิดความเสียหาย *(รูปที่ 2)*



รูปที่ 2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Log Δσ และ Log N (Budynas, Richarf G, 2011)

โดยประยุกต์ใช้กับสมการ Basquin Equation คำนวณหารอบความเสียหายทั้งหมดของวัสดุ

$$\square_{\square} = \left(\frac{\square_{\square}}{\square}\right)^{\frac{1}{\square}} \quad (4)$$

มหาวิทยาลัยรังสิต

โดยที่ $\square_{\square}$ = รอบความเสียหายทั้งหมดของวัสดุ ซึ่ง A และ B คือค่าคงที่ของวัสดุ หาได้จาก

$$A = \frac{(\square\square_{\square})^2}{\square_{\square\square}} \quad (5)$$

$$B = -\frac{1}{3} log\left(\frac{\square\square_{\square}}{\square_{\square\square}}\right) \quad (6)$$

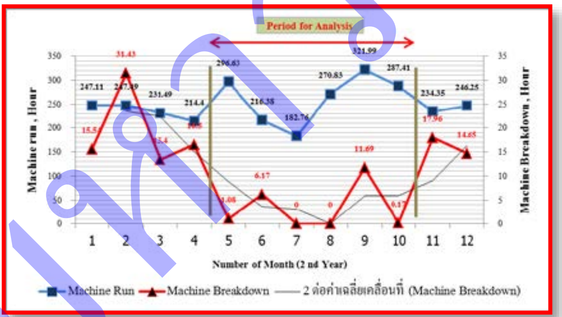
ซึ่ง $$\square = \frac{\square_{\square}\square}{\square_{\square}}(2\square10^3)^{\square} \quad (7)$$

$$\square = \frac{\square\square\square\left(\frac{\square_{\square}}{\square_{\square}}\right)}{\square\square\square(2\square_{\square})} \quad (8)$$

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการเก็บข้อมูลอายุการใช้งานจริงของสายพานลวดเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 จำนวน 1 ชุด

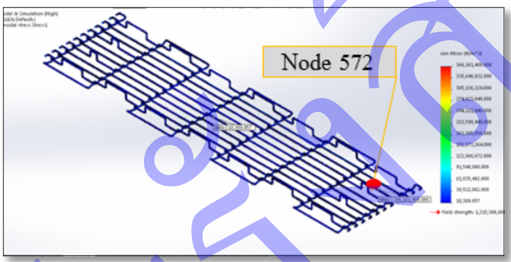
จากการบันทึกชั่วโมงการทำงานของเครื่องทำความสะอาดกล่องบรรจุฮาร์ดดิสก์พบว่าสายพานมีชั่วโมงการทำงานทั้งหมด 1,550 ชั่วโมง หรือประมาณ 6 เดือน ซึ่งในระยะเวลาทั้งหมดนี้ได้รวมถึงชั่วโมงการบำรุงรักษา เข้าไปด้วย โดยสาเหตุเกิดจากสายพานหลุดเฟืองขับเคลื่อนเป็นหลัก แต่สามารถปรับให้มาทำการผลิตได้เป็นปกติ และไม่มีผลต่อโครงสร้างของสายพาน (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แสดงช่วงอายุการใช้งานของสายพานจากการเก็บบันทึกจริง

4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิต

พบว่าค่าความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นที่จุด Node 572 (รูปที่ 4) ขนาด 573.38 MPa ที่สถานีที่ 9 และความเค้นต่ำสุดขนาด 22 MPa ที่สถานีที่ 11



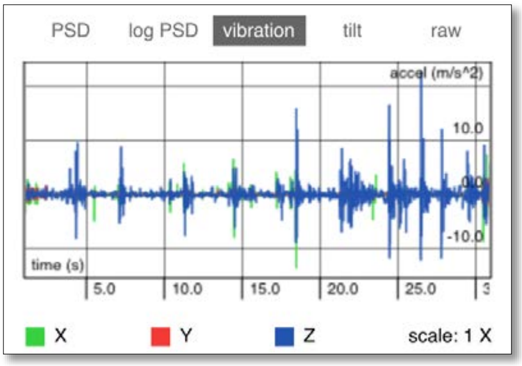
รูปที่ 4 แสดงจุดที่มีความเค้นสูงสุดที่ Node 572 ขนาด 573.38 MPa

ตารางที่ 2 แสดงความเค้น และแรงที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

สถานี	ค่าความเค้น ,MPa	แรง ,N
1	365.68	17.8
2	365.64	17.4
3	365.68	17.8
4	365.66	17.3
5	469.53	23
6	469.53	23
7-8	468.53	23
9	573.38	21.1
10	417.5	29.2
11	22	0.994

4.3 ผลจากตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือนของสายพาน

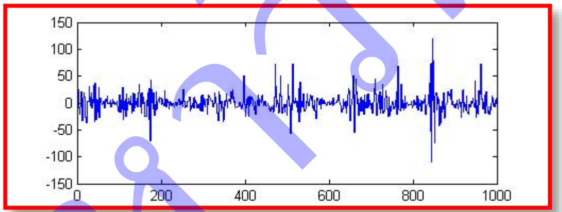
พบว่าการสั่นสะเทือนอยู่ในรูปแอมพลิจูดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่คงที่ โดยตัวอุปกรณ์ตรวจวัดแสดงผลออกมาในรูปแบบของช่วงแอมพลิจูดของความเร่งต่อเวลาใดๆ (รูปที่ 5) นอกจากนี้จะพบช่วงที่แอมพลิจูดเกิดความถี่สูงจะอยู่ในสถานีที่ 2 และ สถานีที่ 4 ซึ่งเป็นสถานีที่มีคลื่นอัลตร้าโซนิคเข้ามาเกี่ยวข้อง



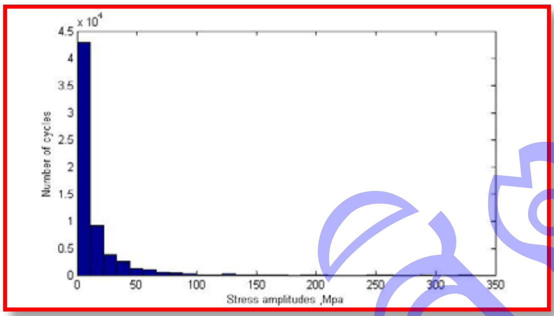
รูปที่ 5 แสดงผลจากตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือนของสายพานด้วย Application “VibSenser” ใน IPhone 5

4.4 ผลการวิเคราะห์ทางกล

เมื่อทำการรวมผลทางสถิต เข้ากับผลการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของสายพานด้วยวิธีการ Superposition และนำผลไปคำนวณในโปรแกรม Matlab โดยใช้หลักการ Rainflow Cycle Counting พบว่ามีรอบความเสียหายจากกระบวนการทำความสะอาดเกิดขึ้นทั้งหมด 62,422 รอบ โดยมีความเค้นสูงสุดขนาด 325 MPa และต่ำสุดขนาด 2.42 MPa (รูปที่ 7)



รูปที่ 6 แสดงผลการรวมค่าความเค้นจากการวิเคราะห์ทางสถิตเข้ากับแอมพลิจูดของการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง ณ เวลาใดๆ ด้วยสมการ Superposition



รูปที่ 7 แสดงผลการคำนวณรอบความเสียหายจากโปรแกรม Matlab

4.5 ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งานของสายพาน

ได้เลือกใช้ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 325 MPa เพื่อหารอบการใช้งานที่สั้นที่สุด โดยค่าปรับแก้ความต้านทานการล้าของวัสดุเท่ากับ 417.72 MPa ค่าคงที่วัสดุค่า A มีค่า 1,641.27 MPa และค่า B มีค่า -0.09948 จะได้รอบอายุการใช้งานที่สั้นที่สุดคือ 191,307,770 รอบ หรือนำมาแปลงเป็นจำนวนกระบวนการผลิตจะได้ 3,065 รอบกระบวนการทำความสะอาด

5. การอภิปรายผล

วิธีการประเมินอายุการใช้งานนี้ ได้เลือกใช้ค่าความเค้นสูงสุดที่ได้ผลลัพธ์จากโปแกรม Matlab คือ 325 MPa จำนวน 62,422 รอบซึ่งเป็นความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการทำความสะอาดชิ้นงาน จากนั้นนำค่าความเค้น และรอบความเสียหายที่ได้ไปคำนวนหาอายุการใช้งาน พบว่าสายพานจะมีอายุการใช้งานทั้งหมด 191,307,770 รอบ หรือนำมาแปลงเป็นจำนวนกระบวนการผลิตจะได้ 3,065 รอบของกระบวนการทำความสะอาด

6. บทสรุป

ผลอายุการใช้งานจากการวิเคราะห์เมื่อเทียบกับข้อมูลของอายุการใช้งานจริงพบว่า ผลจากการวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่ารอบอายุการใช้งานจริงจากการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 3,625 รอบกระบวนการทำความสะอาด หรือร้อยละ 15.45 โดยผลต่างนี้เกิดจากการที่นำค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางกลไปใช้คำนวณ จึงทำให้เกิดความแตกต่างดังกล่าว เนื่องจากในกระบวนการทำความสะอาดจะมีความเค้นที่เกิดขึ้นหลายค่า แต่การเลือกใช้ค่าความเค้นสูงสุดนี้เพื่อให้ทราบถึงรอบอายุที่สั้นที่สุดที่จะนำไปใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาสายพานก่อนที่จะเกิดความเสียหายในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกท่าน

8. เอกสารอ้างอิง

ณัฐพงษ์ หล้ากอง ,สายประสิทธิ์ เกิดนิยม ,บุญชัย วัจจะตรากุล 2551. การประเมินค่าอายุการล้าของชิ้นส่วนยานยนต์ภายใต้ภาระวัฏจักรแอมพลิจูดไม่คงที่.การประชุมเคลือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

JIS Hand Book 2010 page 2098. Ferrous Material & Metallurgy I. Akasaka ,Minato-Ku ,Tokyo ,107-8440 Japan 4-1-24.

INCO Data Book 3rd Edition 1968 page16. Maechanical and Physical Properties of Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steels at Ambient Temperatures. The International Nickel Company Inc.

Budynas, Richarf G 2011. Shigley' s ,Mechanical Engineering Design, 9th Ed. McGraw-Hill

Ultrasonic Cleaning : Fundamental Theory and Application CTG Clean, แหล่งที่มา : http://www.ctgclean.com/blog/technology-library/ articles/ ultrasonic-cleaning-fundamental.com ,20 มิถุนายน 2558

Igor Rychlik 1987. A new definition of the rainflow cycle counting method. International Journal of Fatigue. April 1987

มหาวิทยาลัยรังสิต