

การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ค่าความเผื่อในงานประกอบ HSA โดยวิธีการ DLM และ Monte Carlo Simulation Method Comparison of Assembly Tolerance Analysis of HSA by the DLM And the Monte Carlo Simulation Method

นายพลเทพ เวงสูงเนิน¹ ผศ.ดร.เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต^{2*}

¹นักศึกษานิเทศศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40002 โทร 08-6653-9179

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

โทร 043-202845 ต่อ 151 โทรสาร 043-202849 *อีเมล kiatfa@kku.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ค่าความเผื่อของชิ้นงานประกอบโดยใช้วิธีการของ DLM (Direction Linearization Method) โดย DLM จะอาศัยสมการ Taylor series และหลักการคำนวณของระบบเมตริกซ์เพื่อง่ายต่อการคำนวณ มาเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณหาค่าโดยการสร้างประชากรเชิงสุ่ม (Simulation) ด้วยวิธีการของ Monte Carlo จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเผื่อโดยใช้วิธีการของ DLM นั้นสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเผื่อได้แม่นยำ และเมื่อเทียบกับการวัดค่าโดยโปรแกรม CAD แล้วมีค่า Error เฉลี่ยอยู่ที่ 0.000085%

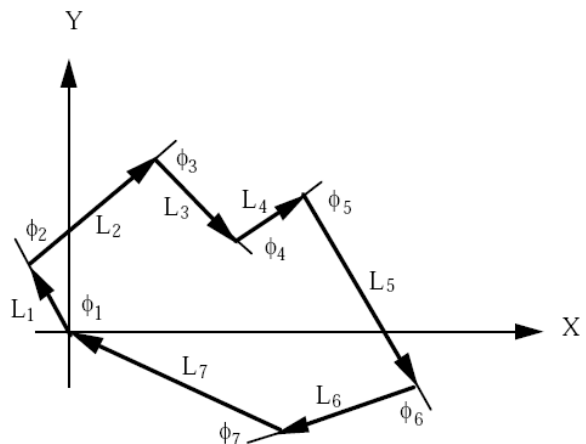
Abstract

In this study, we analyzed the value of tolerance stack-up by using DLM (Direction Linearization Method) which was base on equation of Taylor series and principle of metric system was used to be simple calculation. Then, the value obtained from this method was compare to those from calculation which constructs the simulation by Monte Carlo's method. From the result, we found that mathematical equation analysis of tolerance stack-up using DLM could be used to evaluate the accurate value and be comparable to those from CAD program (0.000085% error)

1. คำนำ

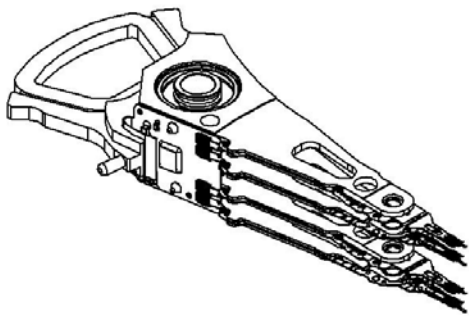
ความคลาดเคลื่อนของงานประกอบทุกชิ้นเป็นผลที่จะต้องเกิดกับทุกชิ้นงาน เนื่องจากในงานที่มีความละเอียดสูง และขนาดของชิ้นงานที่เล็กมากจะต้องมีการเกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้น โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนนั้นมีสาเหตุมาจาก ขนาด รูปทรงและจุดที่เชื่อมต่อ ซึ่งค่า

ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ถ้าจะมีสาเหตุทำให้งานไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นต้น โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพ และประสิทธิภาพของงาน ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าความเผื่อของงานประกอบ (Assembly Tolerance Stack-up Analysis) จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในการที่จะนำมาวิเคราะห์เพื่อหาความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้น และเนื่องจากชิ้นงานประกอบในอุตสาหกรรมนั้นเมื่อประกอบกันแล้วสมการที่ได้จะมีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการแสดงการวิเคราะห์ค่าความเผื่อของชิ้นงานประกอบโดยใช้วิธีการของ DLM (Direction Linearization Method) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าความคลาดเคลื่อนแบบแม่นยำ โดย DLM จะอาศัยหลักการกระจายของเทย์เลอร์ (Taylor's Series Expansion) และหลักการคำนวณของระบบเมตริกซ์เพื่อง่ายต่อการคำนวณ เนื่องจาก DLM [6], [8] จะมองส่วนของงานประกอบเป็นเวกเตอร์ที่มีทั้งขนาด และทิศทาง



รูปที่ 1 แบบจำลองเวกเตอร์ของงานประกอบแบบปกติ

ในบทความนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาว่า ส่วนประกอบของ HAS สามารถที่จะวิเคราะห์โดยวิธีการ DLM ได้หรือไม่ และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณหาค่าโดยการสร้างประชากรเชิงสุ่ม (Simulation) ด้วยวิธีการของ Monte Carlo ซึ่งการสร้างประชากรเชิงสุ่มนั้นอยู่บนพื้นฐานของวิชาทางสถิติ [4] ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ ค่าเฉลี่ย เลขคณิต และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งวิธีการนี้ได้มีการนำมาใช้ในในงานของแบบจำลองงานประกอบในเครื่องกล โดยสามารถที่จะใช้ทั้งสองวิธีสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ค่าระยะเยื้องของงานประกอบ (Tolerance Stack-up) [1], [3], [4] ที่มักจะเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear function) และสมการที่ตัวแปรไม่เป็นอิสระต่อกัน (Implicit function) โดยจะนำวิธีการทั้งสองนี้มาวิเคราะห์ค่าช่องว่างที่เกิดขึ้นในงานประกอบ (Gap) โดยใช้ Model ส่วนประกอบของ HSA (Head Stack Assemblies) โดยที่วิเคราะห์หาค่า Worst Case แลค่า RSS (Root Sum Squares) ซึ่งเป็นค่าที่จะเป็นในการจัดการในงานการผลิตชิ้นงานประกอบเพื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2 HSA (Head Stack Assemblies)

Sakchuchawan และ Tangchaichit [7] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการสร้างสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้วิธีการสร้างประชากรเชิงสุ่มด้วยวิธีการของ Monte Carlo ซึ่งปรากฏว่าได้สมการเป็น

$$Gap = a + b + 0.75c + 0.75d + 0.75e + 2.616f \quad (1)$$

ซึ่งในบทความนี้จะเป็นการทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ใช้วิธีการ Monte Carlo Simulation ว่าวิธีการใดจะมีความเหมาะสม หรือมีข้อเด่นข้อด้อยในการนำมาใช้ในการสร้างสมการคณิตศาสตร์ของงานประกอบของ HGA ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์อย่างไร

2. วัตถุประสงค์

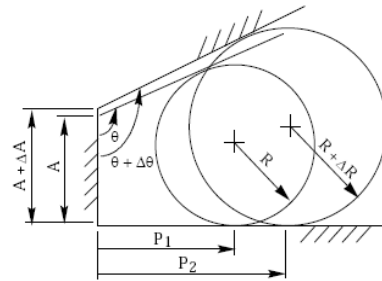
2.1 เพื่อศึกษาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเยื้องในงานประกอบ HSA โดยวิธีการ DLM (Direct Linearization Method)

2.2 เพื่อทำการเปรียบเทียบสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเยื้องของงานประกอบที่ได้จากวิธีการ DLM และ Monte Carlo Simulation

3. วิธีการ

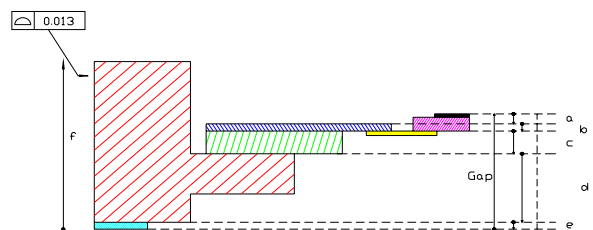
DLM (Direct Linearization Method) เป็นวิธีการหาสมการความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการของเมตริกซ์ [1], [5] ซึ่งจะแบ่งลู่ออกเป็น 2 ประเภทคือรูปแบบเปิด (Open vector loops) และรูปแบบปิด (Closed vector loops) โดยที่เมื่อสร้างสมการตามเวกเตอร์ลู่ออกสมการที่ได้จะอยู่ในสมการ Implicit function ซึ่งยากแก่การหาค่าตอบจึงต้องใช้วิธีการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์เข้ามาช่วย ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นจะแบ่งเป็น 3 ส่วน [1], [2], [3], [5] ได้แก่

- ความคลาดเคลื่อนจากมุม และขนาด (Dimensional variations)
- การกำหนดค่าความเยื้องของรูปทรง (Geometric form feature variations)
- ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อในลู่ออก (Kinematic variations)



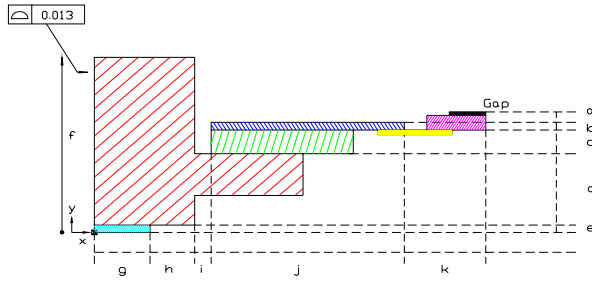
รูปที่ 3 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากงานประกอบ

จากรูปที่ 2 เป็นการแสดงภาพของ HSA ที่ได้ทำการประกอบแล้ว จะเห็นได้ว่าใน HSA 1 ชิ้น ประกอบไปด้วยหลายชิ้นส่วนด้วยกัน ซึ่งในแต่ละชิ้นส่วนก็จะมีค่าความเยื้องในแต่ละจุดต่างกัน การที่จะพัฒนางานประกอบ HSA นั้นสามารถที่จะทำได้หลายวิธี และตัวชี้วัดก็แตกต่างกันไป แต่จากบทความก่อนหน้าของ Sakchuchawan P.[1] ได้กล่าวถึงความสำคัญของค่า Gram Load และปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่สามารถวัดได้ ดังนั้นจึงได้สร้างแบบจำลองของ HSA ขึ้นมาเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลอง HSA ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย Monte Carlo

แต่เนื่องจากการวิเคราะห์โดยใช้ DLM นั้นจำเป็นต้องสร้างลู่ออกเวกเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องทราบตัวแปรเพิ่มขึ้น โดยอ่านจากแบบของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดให้ แล้วจะได้รูปดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลอง HSA ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย DLM

หลังจากที่ได้แบบจำลองที่ใช้การวิเคราะห์แล้วนั้นก็นำเอาค่าของตัวแปรที่สร้างขึ้นมาใส่ในตารางเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าในสมการของ DLM โดยอ้างอิงจากแบบที่ใช้ในงานจริง จะได้ค่าตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า parameter ในงานประกอบ

Type	Parameter	Nominal (mm)	Tolerance(+/-)
In	g	5.7610	0.0130
	e	0.3100	0.0130
	h	1.8390	0.0000
	d	0.9650	0.0250
	i	25.2200	0.0000
	c	0.1620	0.0200
	j	6.2900	0.0000
	k	7.3100	0.0000
	b	0.0254	0.0025
	a	0.1530	0.0000
De	-	-	-
Geo	β	0.0000	0.0593o

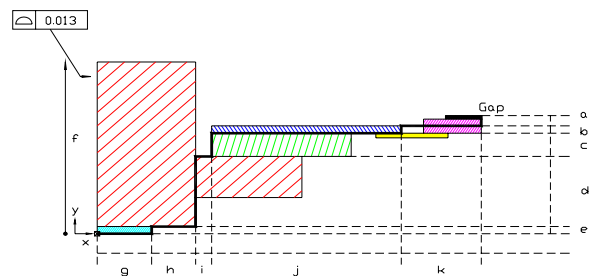
*หมายเหตุ :

In =Independent variables

De =Dependent variables

Geo =Geometric Feature variable

หลังจากนั้นจึงต้องกำหนดเวกเตอร์รูปที่ต้องการหา ในที่นี้งานวิจัยต้องการหาค่า Gap ดังนั้นจึงสามารถกำหนดเวกเตอร์รูปได้ดังภาพที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองการสร้างเวกเตอร์รูปที่ใช้ในการวิเคราะห์

สร้างสมการคณิตศาสตร์โดยอาศัยหลักการของเมตริกซ์ของการประกอบ และอธิบายการเปลี่ยนแปลงโดยใช้สมการของ Taylor Series จะได้สมการตามสมการที่ (2)

$$\{\delta Gap\} = [C]\{\delta X\} + [D]\{\delta U\} + [G]\{\delta \alpha\} \quad (2)$$

โดยที่ $\{\delta Gap\}$ คือเมตริกซ์ของค่าระยะ Gap ที่เปลี่ยนแปลงไป

$[C]$ คือเมตริกซ์สมการ Partial diff ของ Gap เทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการผลิต

$[D]$ คือเมตริกซ์สมการ Partial diff ของ Gap เทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากจุดเชื่อมต่อใน Loop

$[G]$ คือเมตริกซ์สมการ Partial diff ของ Gap เทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากรูปร่าง

$\{\delta X\}$ คือเวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนจากการผลิต

$\{\delta U\}$ คือเวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนจากจุด

เชื่อมต่อ

$\{\delta \alpha\}$ คือเวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนจากรูปร่าง

จากรูปเวกเตอร์ในรูปที่ 6 สามารถสร้างสมการของ Gap ได้ดังสมการที่ (3), (4), (5)

$$\begin{aligned} Gap_x = & g \cos(0 + \beta) + e \cos(90 + \beta) \\ & + h \cos(0 + \beta) + d \cos(90 + \beta) \\ & + i \cos(0 + \beta) + c \cos(90 + \beta) \\ & + j \cos(0 + \beta) + k \cos(0 + \beta) \\ & + b \cos(90 + \beta) + a \cos(90 + \beta) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Gap_y = & g \sin(0 + \beta) + e \sin(90 + \beta) \\ & + h \sin(0 + \beta) + d \sin(90 + \beta) \\ & + i \sin(0 + \beta) + c \sin(90 + \beta) \\ & + j \sin(0 + \beta) + k \sin(0 + \beta) \\ & + b \sin(90 + \beta) + a \sin(90 + \beta) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Gap_\theta = & 0 + 90 - 90 + 90 - 90 + 90 - 90 + 0 \\ & + 90 + 0 - 90 \end{aligned} \quad (5)$$

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่างานประกอบ HAS นั้นไม่มีเมตริกซ์เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนจากจุดต่อ หรือความคลาดเคลื่อนที่ไม่อิสระ (Dependent variable) ดังนั้นเมตริกซ์ $[D]$ ในสมการที่ (2) จึงเป็นศูนย์ เมตริกซ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณจึงมีเพียง $[C]$ และ $[G]$ ซึ่งหาค่าได้ตามสมการที่ (6), (7)

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \cos(\beta + 90) & \sin(\beta + 90) \\ \cos(\beta + 90) & \sin(\beta + 90) \\ \cos(\beta + 90) & \sin(\beta + 90) \\ \cos(\beta + 90) & \sin(\beta + 90) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} -g \sin(\beta) - e \sin(90 + \beta) \\ -e \sin(90 + \beta) - e \sin(90 + \beta) \\ -e \sin(90 + \beta) - e \sin(90 + \beta) \\ -e \sin(90 + \beta) - e \sin(90 + \beta) \\ -e \sin(90 + \beta) - e \sin(90 + \beta) \\ g \cos(90 + \beta) + g \cos(90 + \beta) \\ + g \cos(90 + \beta) + g \cos(90 + \beta) \\ + g \cos(90 + \beta) + g \cos(90 + \beta) \\ + g \cos(90 + \beta) + g \cos(90 + \beta) \\ + g \cos(90 + \beta) + g \cos(90 + \beta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

แทนค่าตัวแปรในสมการที่ (6), (7) ตามตารางที่ 1 จะได้ค่าเมตริกซ์ดังนี้

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} -1.9154 \\ 46.4200 \end{bmatrix} \quad (9)$$

นำเมตริกซ์ $[C]$ และ $[D]$ ไปแทนลงในสมการที่ (2) จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายตำแหน่ง Gap ของ HSA ได้ดังนี้

$$\begin{cases} \delta Gap_x \\ \delta Gap_y \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} \delta g \\ \delta e \\ \delta d \\ \delta c \\ \delta b \end{cases} + \begin{bmatrix} -1.9154 \\ 46.4200 \end{bmatrix} \begin{cases} \delta \beta \end{cases} \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) สามารถที่จะนำเอาวิเคราะห์หาค่า Worst Case และ RSS expressions ซึ่งเป็นค่าที่จำเป็นที่จะต้องใช้ในการออกแบบงานประกอบได้จากสมการที่ (11) และสมการที่ (12)

Worst Case

$$\delta U \text{ or } \delta V = \sum |S_{ij} \delta x_j| \quad (11)$$

RSS

$$\delta U \text{ or } \delta V = \sqrt{\sum ((S_{ij} \delta x_j)^2)} \quad (12)$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆที่กำหนดไว้ในงาน และที่คำนวณได้ในกระบวนการลงไปในสมการที่ (11), (12) จะได้ค่า ดังนี้

Worst Case:

$$\begin{aligned} \delta Gap_x &= |S_{11} \delta g| + |S_{12} \delta e| + |S_{13} \delta d| + |S_{14} \delta c| \\ &\quad + |S_{15} \delta b| + |S_{16} \delta \beta| \\ &= |1|0.0130 + |0|0.0200 + |0|0.0250 \\ &\quad + |0|0.0200 + |0|0.0025 \\ &\quad + |-1.9154|0.0010 \\ &= \pm 0.013140 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta Gap_y &= |S_{21} \delta g| + |S_{22} \delta e| + |S_{23} \delta d| + |S_{24} \delta c| \\ &\quad + |S_{25} \delta b| + |S_{26} \delta \beta| \\ &= |0|0.0130 + |1|0.0200 + |1|0.0250 \\ &\quad + |1|0.0200 + |1|0.0025 \\ &\quad + |46.4200|0.0010 \\ &= \pm 0.113920 \end{aligned}$$

RSS

$$\begin{aligned} \delta Gap_x &= [(S_{11} \delta g)^2 + (S_{12} \delta e)^2 + (S_{13} \delta d)^2 + \\ &\quad (S_{14} \delta c)^2 + (S_{15} \delta b)^2 + (S_{16} \delta \beta)^2] \\ &= [(1 \times 0.0130)^2 + (0 \times 0.0200)^2 + (0 \times 0.0250)^2 \\ &\quad + (0 \times 0.0200)^2 + (0 \times 0.0250)^2 \\ &\quad + (-1.9154 \times 0.0010)^2] \\ &= \pm 0.013140 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta Gap_y &= [(S_{21} \delta g)^2 + (S_{22} \delta e)^2 + (S_{23} \delta d)^2 + \\ &\quad (S_{24} \delta c)^2 + (S_{25} \delta b)^2 + (S_{26} \delta \beta)^2] \\ &= [(0 \times 0.0130)^2 + (1 \times 0.0200)^2 + (1 \times 0.0250)^2 \\ &\quad + (1 \times 0.0200)^2 + (1 \times 0.0250)^2 \\ &\quad + (46.4200 \times 0.0010)^2] \\ &= \pm 0.059884 \end{aligned}$$

4. ผลการวิจัย

4.1 จากการศึกษาวิจัยที่สามารถที่จะเปรียบเทียบสมการ Gap โดยวิธี Monte Carlo และ DLM ได้ดังนี้

Monte Carlo Simulation Method

$$\begin{aligned} Gap &= a + b + 0.75c + 0.75d + 0.75e + 2.616f \\ &= (a_{nom} + \delta a) + (b_{nom} + \delta b) \\ &\quad + 0.75(c_{nom} + \delta c) + 0.75(d_{nom} + \delta d) \\ &\quad + 0.75(e_{nom} + \delta e) + 2.616(f_{nom} + \delta f) \end{aligned} \quad (13)$$

DLM (Direct Linearization Method)

$$\begin{aligned} Gap &= Gap_{nom} + \delta Gap_y \\ &= (a_{nom} + b_{nom} + c_{nom} + d_{nom} + e_{nom}) \\ &\quad + \delta e + \delta d + \delta c + \delta b + 46.4200\delta\beta \quad (14) \\ &= (a_{nom} + b_{nom} + c_{nom} + d_{nom} + e_{nom}) \\ &\quad + \delta e + \delta d + \delta c + \delta b + 46.4200 \tan^{-1}\left(\frac{\delta f}{12.56}\right) \end{aligned}$$

4.2 หลังจากที่ได้สมการก็สามารถที่จะเปรียบเทียบค่า Gap ที่มีการเปลี่ยนแปลง (δGap_y) เมื่อมีการเปลี่ยนตัวแปร (parameter) ต่างๆของงานประกอบ กับโปรแกรม CAD ที่ใช้ในการเขียนแบบทั่วไป จะได้ค่าดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า Error ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง parameter

Change	Gap		Error			
	Value	Monte	DLM	CAD	Monte	DLM
P						
a	.0000	1.55615	1.91540	1.91540	18.76	0.00
b	.0025	1.55865	1.91790	1.91790	18.78	0.00
c	.0200	1.57115	1.93540	1.93540	18.82	0.00
d	.0250	1.57490	1.94040	1.94040	18.84	0.00
e	.0200	1.57115	1.93540	1.93540	18.82	0.00
β	.0130	1.59016	1.96345	1.96344	19.01	0.00
		Mean			18.84	0.00

5. สรุป และวิจารณ์ผล

จากการที่ได้ทำการทดสอบพบว่าวิธีการ DLM นั้นมีขั้นตอนในการสร้างไม่ซับซ้อนนัก และสามารถที่จะนำมาใช้ในการทำนายค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนที่นำมาประกอบได้ โดยที่สมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีการนี้นั้นสามารถที่จะนำมาวิเคราะห์ค่าของ Worst Case และ RSS expressions ที่เป็นค่าซึ่งจำเป็นต่อการออกแบบงานประกอบได้ โดยการเปรียบเทียบวิธีการระหว่าง DLM และ Monte Carlo Simulation นั้น ค่า Error ของสมการที่ใช้ทำนายนั้นเมื่อวัดจากโปรแกรม CAD นั้น ค่า Error ของสมการคณิตศาสตร์ของวิธีการ Monte Carlo Simulation นั้น มีค่าอยู่ที่ประมาณ 18.84% และค่า Error ของสมการที่ใช้วิธี DLM นั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.000085%

6. ข้อเสนอแนะ

ในงานประกอบต่างๆนั้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์งานที่ประกอบ เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และพัฒนางาน ซึ่งวิธีการของ DLM (Direct Linearization Method) นั้นก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้ และสมการที่ได้ยังสามารถที่จะใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงได้ทั้งในแกน x, y และการเปลี่ยนแปลงของมุมด้วย และถ้าจะให้สมการสามารถที่จะใช้วิเคราะห์ผลดีที่สมควรจะเพิ่มการวิเคราะห์การจัดสรรค่าระยะความเผื่อเทียบกับต้นทุนการผลิตด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทบริษัทร่วมทุน (ประเทศไทย) จำกัดและคุณเทิดไท เทียนทอง ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และข้อมูลทางเทคนิคในการทำวิจัย รวมถึงศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (I/UCRC in HDD Component) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ช่วยประสานงานทางด้านทุนในการทำวิจัยและขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้ ภายใต้โครงการพัฒนาทรัพยากรบุคคลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์

เอกสารอ้างอิง

- Chase, K. W., Gao, J., and Magleby, S. P., 1995, "General 2-D Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies with Small Kinematic Adjustments." *Journal of Design and Manufacturing*, v5, pp. 263-274
- Chase, K. W., Gao, J., Magleby, S. P., and Sorensen, C. D., 1996, "Including Geometric Feature Variations in Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies." Submitted for publication.
- Chase, K. W., 1999, "Tolerance Analysis of 2-D and 3-D Assemblies," ADCATS Report No.99-4
- Gao, J., Chase, K. W., and Magleby, S. P., "A New Monte Carlo Simulation Method for Tolerance Analysis of Kinetically Constrained Assemblies.", Technical report, Mechanical Engineering Department, Brigham Young University.
- Gao, J., K. W. Chase and S. P. Magleby "General 3-D Tolerance Analysis of Mechanical Assemblies with Small Kinematic Adjustments," *IIE Transactions*, v 30, pp. 367-377, 1998.
- Gao, J., K. W. Chase and S. P. Magleby, "Global Coordinate Method for Determining Sensitivity in Assembly Tolerance Analysis," *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition*, Anaheim, CA, Nov. 15-20, 1998.
- Sakchuchawan P., Tangchaichit K., 2008, "Study the factor from tolerance with the result to Gram load of Head Stack Assembly," *The 1st International Data Storage Conference 2008 (DST-CON 2008)* 21-23 April 2008.
- Wittwer, J. W., Chase, K. W., Howell, L. L., 2001, "The direct linearization method applied to position error in kinematic linkages," *Journal of Mechanism and Machine Theory* 39 (2004) 681-693.