

การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการ
เคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กันยายน 2560

การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการ
เคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล



ปริญญานิพนธ์
ของ
กิตติโชติ สุภากำเนิด

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กันยายน 2560

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการ
เคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กันยายน 2560

กิตติโชติ ศุภกานี (2560). การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนาย

ผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล.

ปริญญาานิพนธ์ ปร.ด. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ:บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล, รองศาสตราจารย์ ดร.ชัชพล ชังชู

โครงสร้างของเครื่องจักรกลประกอบขึ้นมาจากการประกอบชิ้นส่วนทางกลจำนวนมาก และชิ้นส่วนทางกลแต่ละชิ้นก็จะมีขนาดเคลื่อนที่ทางด้านขนาดและรูปร่างของตนเอง ซึ่งเมื่อประกอบชิ้นส่วนเหล่านั้นเข้าด้วยกันเป็นเครื่องจักรกลแล้ว ความคลาดเคลื่อนด้านขนาดและรูปร่างก็จะถูกรวมเข้าด้วยกันจนการเป็นความคลาดเคลื่อนรวมของเครื่องจักรกลนั้นๆ ในสภาพความเป็นจริงในปัจจุบันเครื่องจักรกลมีการประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนจำนวนมากและมีความซับซ้อนในการประกอบ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ยากที่จะทำนายผลกระทบของความคลาดเคลื่อนทางมิติต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลโดยอาศัยสมการทางกลศาสตร์

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของความคลาดเคลื่อนทางมิติต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีกระบวนการฝึกฝนเป็นแบบมีผู้สอน และใช้ขั้นตอนการส่งค่าย้อนกลับสำหรับการทำนายการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลจะครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่ง โดยจะใช้กรณีศึกษาของ เพลาช้อเหวี่ยง ก้านสูบ และกระบอกสูบ ซึ่งจากผลการศึกษาโดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมพบว่าให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำสูงสำหรับเพลาช้อเหวี่ยงที่ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่มีขนาดตามมาตรฐานและชิ้นส่วนที่มีความคลาดเคลื่อน อย่างไรก็ตามวิธีที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้เหมาะสมสำหรับการหาค่าความคลาดเคลื่อนทางมิติเท่านั้น ยังไม่ได้นำไปประยุกต์ใช้กับความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต และสำหรับในการสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยมีขั้นตอนการส่งค่าย้อนกลับในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนกลไกของกลศาสตร์ทั้งหมด 13 เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการสอนโดยจะครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของเพลาช้อเหวี่ยงที่ใช้เป็นกรณีศึกษาซึ่งจะมีองศาในการหมุนตั้งแต่ $(\theta) = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330$ และ 360 องศา โดยทั้ง 13 ค่าในการหมุนนี้จะเป็นข้อมูลฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมโดยมีขั้นตอนการส่งค่าย้อนกลับ โดยจะมีรูปแบบการสอนให้กับโปรแกรมทั้งหมด 10 รูปแบบที่ถูกใช้ในการสอน ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำแตกต่างกันไป โดยรูปแบบที่มีโครงสร้างแบบ 5-6-3 จะให้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำมากที่สุดเมื่อเทียบผลลัพธ์กับการคำนวณด้วยสมการกลศาสตร์ คือ 95.130%

DEVELOPMENT OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL TO PREDICT THE
EFFECTS OF GEOMETRIC DIMENSIONING AND TOLERANCING (GD&T) ON THE
MOTION AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE ELEMENTS OF MACHINERY



AN ABSTRACT
BY
KITTICHOTE SUPAKUMNERD

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Doctor of Philosophy Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

September 2017

Kittichote Supakumnerd. (2017). *Development of an Artificial Neural Network Model to Predict the Effects of Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) on the Motion and Mechanical Properties of the Elements of Machinery*. Doctoral thesis, Ph.D. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.
Advisor Committee: Asst. Prof. Dr. Pichai Asadamongkon, Assoc.Prof. Dr. Chatchapol Chungchoo.

Due to the fact that machinery consists of many mechanical parts which have their own tolerance; therefore, the assembly of all parts with regard to tolerance causes a variation in both the function and the shapes of the machines. One of the most important factors, in terms of mechanical functions is that of kinematics. The kinematic model is very hard to develop for more complex assembly. Hence, in this research, a neural network model to predict changes in the displacement, velocity and acceleration of machinery is introduced. This neural network model could be applied in both simple and complicated assembly. The experimental results indicated that the proposed model can predict the kinematics of machinery with a high degree of accuracy for both nominal size case and parts with dimension tolerance case. The benefit of this neural network model is that designers can estimate changes in displacement, velocity and acceleration of assembly parts very easily when the dimension tolerance of each part is changed. In this paper, the back propagation neural network (BPNN) model for predicting changes in displacement, velocity and acceleration of the elements of machinery were introduced. A real industrial case study employed a crankshaft with a connecting rod and cylinder. It was found that this method could provide the most accurate results in terms of displacement, velocity and acceleration, for both the nominal size of machine parts and machine parts with dimension tolerance. However, the new method introduced in this paper can only be used for dimension tolerance and cannot be applied for geometric tolerance. The kinematics of this mechanism for thirteen conditions was employed for training in the BPNN model. These conditions included displacement, velocity and acceleration of point "A" at the degree of the crankshaft (θ) = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 and 360 degrees. There were thirteen sets of training data and by employing these thirteen training data sets, ten BPNN models were used for training. The average accuracy level for each model found that the five-six-three structure was the most suitable. Obviously, since the average accuracy of the five-six-three structure is 95.130%, indicating satisfaction and value.

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล, รองศาสตราจารย์ ดร.ชัชพล ชังชู ผู้ควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำวิจัย เรื่องการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล พร้อมทั้งให้ความรู้และคำแนะนำ คำปรึกษา ให้แนวคิด และช่วยแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำปริญญานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ สถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในระหว่างการทำนิพนธ์เป็นอย่างดี

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจตลอดจนสนับสนุนการศึกษาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และความร่วมมือในการทำวิจัยเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

กิตติโชติ สุภากำเนิด

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการ
เคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

ของ

กิตติโชติ สุภักำเน็ด

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2560

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชสา ประมวลเจริญกิจ)

..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัชพล ชังชู) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัชพล ชังชู)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน)

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
งานวิจัยเกี่ยวกับหลักการทฤษฎีความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต	3
งานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาทฤษฎีความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต	4
งานวิจัยเกี่ยวกับขั้นตอนการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูล	5
งานวิจัยเกี่ยวกับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในประเทศไทย	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต	13
โครงข่ายประสาทเทียมและการประยุกต์ใช้	58
การพัฒนาสมการจลศาสตร์	71
3 วิธีดำเนินการวิจัย	73
อุปกรณ์สำหรับดำเนินงานวิจัย	73
การดำเนินงานวิจัย	74
แผนภาพการดำเนินการวิจัย	79
4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย	83
การคำนวณค่าที่ได้จากสมการจลศาสตร์	83
ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม	107
การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียมและสมการจลศาสตร์	108

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 การประยุกต์การทำนายผลกระทบของ GD&T กับอุปกรณ์อื่น	112
วิธีดำเนินงาน.....	113
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	115
ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	117
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	121
สรุป	121
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	122
บรรณานุกรม	123
ภาคผนวก	128
ภาคผนวก ก. ผลงานเผยแพร่จากปริญญานิพนธ์.....	129
ภาคผนวก ข. อภิธานศัพท์	162
ภาคผนวก ค. ตารางบันทึกผลการทดสอบ	164
ภาคผนวก ง. มาตรฐาน ISO ที่เกี่ยวข้อง.....	183
ประวัติย่อผู้วิจัย	190

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ตารางสรุปการสำรวจเอกสารงานวิจัย.....	7
2 สัญลักษณ์แทนความคลาดเคลื่อน.....	16
3 แสดงข้อแตกต่างของการคิดแบบโครงข่ายประสาทเทียมกับการคิดของ คอมพิวเตอร์.....	61
4 ความแตกต่างระหว่างประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม.....	64
5 ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน.....	74
6 การกำหนดแบบการ ASSEMBLY ของชิ้นส่วนย่อย.....	75
7 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ที่ใช้ในการ Solve ด้วยโปรแกรม	76
8 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9.....	83
9 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18.....	85
10 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27.....	87
11 ตารางแสดงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9.....	91
12 ตารางแสดงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18.....	93
13 ตารางแสดงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27.....	95
14 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9.....	99
15 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18.....	101
16 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27.....	103
17 ผลการคำนวณค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเร่ง ของการจำลองการ เคลื่อนที่ของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยสมการจลศาสตร์.....	107
18 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ที่จุด A จากการคำนวณและSolve ด้วย โปรแกรมBPNN.....	109
19 ตารางแสดงค่าความเร็ว ที่จุด A จากการคำนวณและSolve ด้วยโปรแกรม BPNN.....	109
20 ตารางแสดงค่าความเร่ง ที่จุด A จากการคำนวณและSolve ด้วยโปรแกรม BPNN.....	110

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
21 ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของโปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหวเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีของระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่งของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยง.....	111
22 ผลการทดลองด้วยวิธีของ Monte Carlo Simulation.....	119
23 ผลการทดลองระหว่างวิธี Monte Carlo Simulation กับค่าที่คำนวณจากสมการสั้นสะท้อนทางกล.....	120



บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง.....	14
2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกลม (Circularity).....	14
3 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง เมื่อฉายบนระนาบและ ตัวอย่าง.....	17
4 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง เมื่อถูกจำกัดโดยทรง สี่เหลี่ยมหน้าขนาน และตัวอย่าง.....	17
5 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง เมื่อถูกจำกัดโดย ทรงกระบอกและตัวอย่าง.....	18
6 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความราบ และตัวอย่าง.....	18
7 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกลม และตัวอย่าง.....	19
8 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นทรงกระบอกและตัวอย่าง.....	19
9 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปหน้าข้างของเส้นใดๆ และ ตัวอย่าง.....	20
10 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปหน้าข้างของผิวใดๆและตัวอย่าง.....	20
11 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนาน และตัวอย่าง.....	21
12 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนาน เมื่อถูกจำกัดโดยทรง สี่เหลี่ยมหน้าขนาน และตัวอย่าง.....	21
13 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนาน เมื่อถูกจำกัดโดย ทรงกระบอก.....	22
14 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนานของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และ ตัวอย่าง.....	22
15 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนานของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และ ตัวอย่าง	23
16 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนานของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และ ตัวอย่าง.....	23
17 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และ ตัวอย่าง.....	24
18 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และ ตัวอย่าง.....	24

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
19 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตึงฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม เมื่อถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนานและตัวอย่าง.....	25
20 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตึงฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม เมื่อถูกจำกัดโดยทรงกระบอก และตัวอย่าง.....	25
21 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตึงฉากของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และตัวอย่าง.....	26
22 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตึงฉากของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง.....	26
23 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของเส้นซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และตัวอย่าง.....	27
24 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง.....	27
25 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และตัวอย่าง.....	28
26 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง.....	28
27 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของจุด และตัวอย่าง.....	29
28 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของเส้น และตัวอย่าง.....	29
29 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของเส้น เมื่อถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนานและตัวอย่าง.....	30
30 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของเส้น เมื่อถูกจำกัดโดยทรงกระบอก และตัวอย่าง.....	30
31 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของผิวราบหรือระนาบกลาง และตัวอย่าง...	31
32 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความร่วมศูนย์ของจุด และตัวอย่าง.....	31
33 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความร่วมแกนของแกน และตัวอย่าง.....	32
34 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตรของระนาบกลาง และตัวอย่าง.....	32
35 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตรของของเส้นหรือแกน และตัวอย่าง.....	33
36 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตรของของเส้นหรือแกน เมื่อถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน และตัวอย่าง.....	33

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
37 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในแนวรัศมี และตัวอย่าง.....	34
38 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในแนวแกน และตัวอย่าง.....	34
39 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในทิศทางใดๆ และตัวอย่าง.....	35
40 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในทิศทางที่ กำหนด และตัวอย่าง.....	35
41 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – ทั้งหมดในแนวรัศมี และ ตัวอย่าง.....	36
42 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – ทั้งหมดในแนวแกน และ ตัวอย่าง.....	36
43 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน.....	37
44 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนและจำนวนรู.....	37
45 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนและข้อจำกัดของรูปร่าง.....	37
46 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่มีมากกว่า 1 ลักษณะ.....	38
47 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ต่อจากเส้นขอบนอก.....	38
48 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนบนเส้นบอกขนาด.....	39
49 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนบนเส้นแกน.....	39
50 ทิศทางความกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน.....	40
51 ทิศทางความกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ตั้งฉากกับรูปร่างทาง เรขาคณิตของชิ้นงานที่ควบคุม.....	40
52 ระบุทิศทางความกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน.....	41
53 ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะแห่งที่มีค่าเท่ากัน.....	41
54 ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนร่วม.....	42
55 การกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนกับความยาวใดๆ.....	42
56 การกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเพิ่มเติมจากที่มีอยู่.....	43
57 การกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่ง.....	43

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
58 การกำหนดเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งของรูปลักษณะเป็นเดตัม.....	44
59 มิติแท้จริงทางทฤษฎี.....	44
60 ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนฉาย.....	45
61 เดตัมที่เป็นเส้นตรงหรือระนาบ.....	46
62 เดตัมที่เป็นแกนของทรงกระบอก.....	46
63 เดตัมที่เป็นแกนร่วมหรือระนาบกลางร่วม.....	47
64 เดตัมที่เป็นแกนของทรงกระบอกและตั้งฉากกับระนาบ.....	47
65 สามเหลี่ยมเดตัม.....	48
66 ตัวอักษรเดตัม.....	48
67 เดตัมที่กำหนดโดยรูปลักษณะเดียว.....	49
68 เดตัมร่วมที่กำหนดโดยรูปลักษณะ 2 ลักษณะ.....	49
69 ระบบเดตัมที่กำหนดโดยรูปลักษณะ 2 ลักษณะ หรือมากกว่า.....	50
70 ระบบเดตัมที่กำหนดโดยรูปลักษณะ 2 ลักษณะที่ไม่จำเป็นต้องเรียงลำดับ รูปลักษณะที่กำหนดเป็นเดตัม.....	51
71 การกำหนดไว้บนเส้นขอบนอกของรูปลักษณะ.....	51
72 บนเส้นช่วยบอกขนาดที่ตำแหน่งเส้นบอกขนาด.....	51
73 เดตัมบนแกนร่วมหรือระนาบร่วมที่เกิดจากรูปลักษณะ 2 ลักษณะ.....	52
74 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่สามารถตรงกับรูปลักษณะเดตัมด้วยเส้นนำได้ โดยตรง.....	52
75 การกำหนดเดตัมทาร์เก็ต.....	53
76 กรอบเดตัมทาร์เก็ต.....	54
77 ชนิดของเดตัมทาร์เก็ต.....	54
78 การระบุเดตัมทาร์เก็ตในแบบ.....	55
79 ระบบเดตัมสามระนาบ.....	56
80 การกำหนดกลุ่มของรูปลักษณะเป็นเดตัม.....	57
81 แสดงความสัมพันธ์ของระบบประสาททั้ง 4 ส่วน	59
82 แสดงการทำงานของเซลล์ประสาทเทียม.....	62
83 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม.....	65

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
84 โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Feed forward Back	66
85 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ.....	67
86 แสดงค่าที่ได้จากฟังก์ชันซิกมอยด์.....	69
87 ภาพกลไกเพลลาข้อเหวี่ยง.....	74
88 การกำหนด Joint Constrain และ Driver	76
89 รูปแบบการเรียนรู้วิธีแบบแพร่ย้อนกลับ.....	78
90 ขั้นตอนการทำงานจนครบกระบวนการ.....	79
91 ขั้นตอนการสร้าง CAD MODELING	80
92 การประกอบชิ้นงาน ASSEMBLY MODELING	81
93 การทำ MOTION SIMULATION	82
94 แสดงกราฟระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ.....	89
95 แสดงกราฟส่วนขยายของระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ.....	90
96 แสดงกราฟของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ.....	97
97 แสดงกราฟส่วนขยายของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ.....	98
98 แสดงกราฟของค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ.....	105
99 แสดงกราฟส่วนขยายของค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ.....	106
100 แสดงผลความแม่นยำผลการคำนวณด้วยโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโครงสร้าง การสอนที่ต่างกัน.....	108
101 ตัวอย่างแบบวาด 3 มิติ ของใบพัดลม.....	113
102 ใบพัดสำหรับเครื่องยนต์ขั้วรุ่น 4 ฟุต.....	114
103 ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM.....	115
104 ลักษณะการหมุนของใบพัดสำหรับเรือนวดข้าว.....	117
105 มุมในการติดตั้งใบพัด.....	118

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันนั้นเครื่องจักรกลที่ผลิตขึ้นมีความซับซ้อนและต้องทำงานที่มีความละเอียดและความแม่นยำที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างของเครื่องจักรกลประกอบขึ้นมาจากการประกอบชิ้นส่วนทางกลจำนวนมาก และชิ้นส่วนทางกลแต่ละชิ้นก็就会有ความคลาดเคลื่อนทางด้านขนาดและรูปร่างของตนเอง ซึ่งเมื่อประกอบชิ้นส่วนเหล่านั้นเข้าด้วยกันเป็นเครื่องจักรกลแล้ว ความคลาดเคลื่อนด้านขนาดและรูปร่างก็จะถูกรวมเข้าด้วยกันจนการเป็นความคลาดเคลื่อนรวมของเครื่องจักรกลนั้นๆ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าความคลาดเคลื่อนทางด้านขนาดและรูปร่างนั้นจะมีผลกระทบโดยตรงต่อเครื่องจักรกล ยกตัวอย่างเช่น ความคลาดเคลื่อนทางด้านขนาดและรูปร่างของลูกเบี้ยว (cam) นั้นจะส่งผลโดยตรงของการเคลื่อนที่ของตัวตาม (follower) ให้มีการเคลื่อนที่ที่ผิดไปจากที่ออกแบบไว้ เป็นต้น

ในกรณีของเครื่องจักรกลที่มีการประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนทางกลจำนวนไม่มากหรือไม่มี ความซับซ้อนในการประกอบ การทำนายผลกระทบของ Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้นสามารถกระทำ ได้โดยไม่ยุ่งยากมากนักโดยการใช้ kinematic equation แต่ในสภาพความเป็นจริงในปัจจุบัน เครื่องจักรกลมีการประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนจำนวนมากและมีความซับซ้อนในการประกอบ ดังนั้นจึง เป็นไปได้ยากที่จะทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วน เครื่องจักรกลโดยอาศัย kinematic equation ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงขอเสนอวิธีการใหม่ในการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล นั่นคือ การทำนายโดยใช้แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

ทั้งนี้ผลการศึกษาวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ออกแบบเครื่องจักรกลที่จะสามารถนำไปใช้ในการระบุ/แจกแจงความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเพื่อที่จะควบคุมให้ความคลาดเคลื่อนรวม (ทั้งขนาดและรูปร่าง) ของเครื่องจักรกลนั้นไม่ส่งผลกระทบจนทำให้การเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลผิดไปจาก design specification

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยไว้ดังนี้ คือ “เพื่อพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการทำงานของชิ้นงานทางกล”

ขอบเขตของโครงการวิจัย

เพื่อออกแบบและพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ back propagation neural network ซึ่งจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่งเท่านั้น

ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยคาดว่าประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัยมีดังนี้

- 1) ได้แนวทาง/วิธีการใหม่ในการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
- 2) ได้แนวทาง/วิธีการใหม่ที่จะช่วยให้ผู้ออกแบบเครื่องจักรกลแจกแจงความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเพื่อที่จะควบคุมให้ความคลาดเคลื่อนรวม (ทั้งขนาดและรูปร่าง) ของเครื่องจักรกลนั้นไม่ส่งผลกระทบจนทำให้การเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลผิดไปจาก design specification

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับหลักการทฤษฎีความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต

ฮอฟแมน (Hoffmann: 1982). ได้กล่าวถึงการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและรูปทรงนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะชิ้นงานแต่ละชิ้นที่มีความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและรูปทรงเมื่อนำไปประกอบกันจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรในภาพรวม และเนื่องจากไม่มีกระบวนการผลิตเครื่องจักรอันไหนก็ตามที่ไม่มีความคลาดเคลื่อนเลย ดังนั้นการกำหนดความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและรูปทรงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการออกแบบ เพื่อความมีประสิทธิภาพในการทำงานที่แม่นยำของเครื่องจักร โดยกำหนดขอบเขตของชิ้นงานในการออกแบบว่าต้องมีบริเวณที่มีความคลาดเคลื่อนได้ในชิ้นงานขนาดจริง ซึ่งในอดีตที่ผ่านมานักออกแบบทางวิศวกรรมจะเผื่อค่าความคลาดเคลื่อนในการออกแบบไว้อยู่แล้ว โดยมักจะมีค่าที่กำหนดยอมรับได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของเครื่องจักรและความแม่นยำในการทำงานตามต้องการ

แชฟเฟรต ดี ดีบีว (Shepherd D.W.1987). นำเสนอการออกแบบทางวิศวกรรมในสมัยก่อนจะมีการพิจารณาองค์ประกอบหลักใน 2 ส่วน คือ รูปร่างรูปทรง และ ขนาดของชิ้นงาน โดยกล่าวถึงมาตรฐาน Y14.5 เป็นมาตรฐานกำหนดความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน โดยจะกำหนดเป็นขอบเขตความเผื่อ ซึ่ง Y14.5 ได้ถูกตีพิมพ์ในปี 1966 นับแต่นั้นมาการออกแบบทางวิศวกรรมจะถูกกำหนดด้วยการใช้มาตรฐานนี้

ทาคุชิ (Taguchi G. 1988). ได้พิสูจน์เกี่ยวกับค่าความคลาดเคลื่อนว่าความเบี่ยงเบนของรูปร่างและรูปทรงในชิ้นส่วนจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรลดลง ดังนั้นในการออกแบบต้องจำกัดค่าความเบี่ยงเบนไม่ให้เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ทาคุชิได้แสดงให้เห็นความเสียหายของเครื่องจักรที่มีการขึ้นที่ไม่ได้มาตรฐานเมื่อนำไปเทียบกับเครื่องจักรที่มีชิ้นส่วนตามมาตรฐานที่ออกแบบไว้พบว่าประสิทธิภาพลดลงไปอย่างมาก

ตราเบรนและมิเดิลส์ (Traband, M.T.& Medeiros, D.J.1989). กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและมิติรวมทั้งวิธีในการออกแบบทางวิศวกรรมจะใช้วิธีการกำหนดค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปจากค่ามาตรฐานซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เช่น ค่าความเที่ยงตรง ความเรียบ ความกลม ความเป็นทรงกระบอก

1.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาทฤษฎีความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต

ฟาร์เมอร์ (Farmer L.E. 1986). กำหนดเกณฑ์สำหรับการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและรูปทรง โดยเกณฑ์ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทฤษฎีที่มีอยู่ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาทฤษฎีใหม่ ซึ่งเกณฑ์ของฟาร์เมอร์มีหลักการดังนี้

- เปิดให้นักออกแบบสามารถวิเคราะห์และกำหนดการออกแบบขนาดและความคลาดเคลื่อนที่เกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นฟังก์ชันในการใช้งานสามารถตรวจสอบได้จากการออกแบบ
- ความชัดเจนและง่ายต่อการใช้งาน รวมทั้งประสิทธิภาพจะถูกกำหนดไปในขั้นตอนการออกแบบ
- ช่วยให้กระบวนการผลิตชิ้นงานง่ายขึ้นรวมทั้งการประกอบและจัดวางตำแหน่งชิ้นงาน
- ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลแต่ละชิ้นถูกผลิตด้วยความเที่ยงตรงและคุณภาพสูง
- สามารถอ้างอิงกับขนาดที่ถูกต้องและหากเกิดปัญหาระหว่างการผลิตก็สามารถตรวจสอบได้ว่าต้องไปแก้ที่ส่วนไหน

ฮิลลีย์อาร์ดและบลัค (Hillyard, R.C; & Braid, I.C. 1978). เสนอหลักแนวคิดในการเพิ่ม-ลด ค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเป็นตัวบอกปริมาณค่าที่แปรผันจากขนาดจริงได้เช่นความเป็นเส้นตรง ความเป็นมุม ทั้งนี้ทฤษฎีการหาขนาดถูกพัฒนาโดยฮิลลีย์อาร์ดและบลัคจะกำหนดขนาดและรูปแบบให้สัมพันธ์กันและมีการตรวจสอบการทำงานของชิ้นงานที่มีขนาดไม่เป็นไปตามมาตรฐาน

รีควิชาร์ (Requicha A.A.G.1983). ได้นำทฤษฎีของ ฮิลลีย์อาร์ดและบลัค มาประยุกต์ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลได้อย่างง่ายดาย โดยนำไมโครมิเตอร์มาตรวจสอบชิ้นงานที่ผลิตมาได้อีกด้วยแต่กรณีนี้จะใช้ตรวจสอบชิ้นงานที่มีความคลาดเคลื่อนไม่มากนักหรือใช้เฉพาะกรณีเครื่องจักรที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ไม่ซับซ้อน

วีวิลล์ (Weill R.1988). ได้นำเสนอแนวคิดค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถมีได้มากที่สุด โดยใช้หลักการพื้นฐานด้านขนาดของรูปร่างและรูปทรงในการออกแบบซึ่งจะพิจารณาถึงขอบเขตของพื้นที่ผิวที่ค่าคลาดเคลื่อนในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยจะครอบคลุมลักษณะรูปร่างและรูปทรงที่ต้องการ

โรเจอร์ (Rogers, D.F. 1989). ได้เริ่มใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและจำกัดพื้นที่ผิวแบบลักษณะเส้นโค้งโดยการกำหนดค่าในกราฟ

หลิน (Lin, V.C. 1981) ได้พัฒนาชุดโปรแกรมทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งให้ความแม่นยำในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

โรลซิกแนกซ์ (Rossignac, J.R. 1986) ได้พัฒนาวิธีการตั้งค่ากับวัตถุแข็งเกร็ง โดยใช้วิธีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทางด้านรูปร่างและรูปทรงซึ่งให้ผลในการหาประสิทธิภาพเครื่องจักรและการดำเนินงานในการแก้ไขแบบได้ดี

ยู (Yu, Y.C. 1986) ดำเนินการทดสอบรูปแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีความคลาดเคลื่อน พบว่าต้องออกแบบให้ชิ้นส่วนมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเพื่อการทำงานที่แม่นยำ

อีเตซามิ (Etesami, F. 1988) ดำเนินการทดสอบชิ้นงานจากกระบวนการผลิตที่มีความคลาดเคลื่อนในชิ้นงาน พบว่าเครื่องจักรที่ประกอบด้วยชิ้นงานดังกล่าวมีความแม่นยำลดลง

จายารามาและสินิวาสัน (Srinivasan, V. & Jayaraman, R.1985) ได้นำเสนอทฤษฎีในการประมาณค่าโดยอาศัยหลักการขอบเขตที่แท้จริงซึ่งจะถูกสร้างจากตำแหน่งที่แม่นยำโดยจะมีการใส่ชิ้นงานที่มีความคลาดเคลื่อนและชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องซึ่งจะพิจารณาว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าได้สูงสุดเท่าไรที่เครื่องจักรกลยังคงทำงานได้

1.3 งานวิจัยเกี่ยวกับขั้นตอนการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

ดัฟเฟร์ (Duffie, N. 1988) ได้ใช้วิธีการวัดขนาดที่ถูกต้องโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบนอกจากจะช่วยวิเคราะห์ข้อมูลแล้วยังช่วยในการแก้ไขปัญหาให้อีกด้วย

แอนโทนี่ (Anthony, G.T. 1984) ได้เสนอแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้พัฒนาซอฟต์แวร์ คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ โดยจุดมุ่งหมายของการพัฒนาเพื่อช่วยให้การออกแบบเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็ว นอกเหนือจากความสามารถในการแสดงภาพเป็น 3 มิติให้เห็นได้อย่างถูกต้องแล้ว ข้อมูลของชิ้นงานที่ออกแบบต้องมีคุณสมบัติเป็นเสมือนวัตถุจริงที่มีน้ำหนักด้วย ข้อมูลทางคณิตศาสตร์ของวัตถุรูปทรง 3 มิติ

กอร์นิน (Gonin, R. 1989) กล่าวถึงการทดสอบข้อมูลว่ามีวัตถุประสงค์คือต้องนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุดเช่น ความเป็นเส้นตรง ความเป็นระนาบ ความเป็นวงกลม ซึ่งในกระบวนการผลิตชิ้นงานจะต้องได้รับการตรวจสอบด้วย

ลูสร์ (Lotze, W. 1982) ได้อธิบายถึงการวัดค่าความละเอียดของขนาดชิ้นงานโดยการใช้เครื่องตรวจวัดความละเอียดสูงในระดับไมครอนโดยเป็นเครื่องวัดขนาดของชิ้นงานในลักษณะสามมิติ

เวคแมนน์และเฮิร์ลชอร์กิ (Weckenmann, A.&Heurichowski, M. 1985) ได้ศึกษาปัญหาในประเด็นการประกอบชิ้นงานและการวัดเพื่อหาขนาดโดยใช้เครื่องตรวจวัดความละเอียดสูงในระดับไมครอนมีลักษณะเป็นแท่งโลหะยาวมีพื้นที่กำหนดระยะทำด้วยเซรามิกภายในพร้อมชุดจับยึดและปรับมุมได้ตามต้องการ

ฟอร์บ (Forbes, A.B. 1989) พัฒนารูปแบบการหาผลรวมที่น้อยที่สุดของระยะทางความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบความคลาดเคลื่อนได้

ดาร์ลควิสต์ (Dahlquist, G.1974) ใช้หลักการของวิธีระเบียบเชิงตัวเลขในการคำนวณและหาผลกระทบของความคลาดเคลื่อนที่มีผลกระทบการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลที่ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งการคำนวณด้วยวิธีนี้จะสอดคล้องกับของกอร์นินที่มีข้อจำกัดในการคำนวณกับข้อมูลที่เป็นเชิงเส้น

โล่ (Lai, K. 1988) ได้นำเสนอการหาค่าความคลาดเคลื่อนของทรงกลมและแนวคิดสำหรับการคำนวณพื้นที่ผิวที่น้อยที่สุดสำหรับการสวมชิ้นงานที่ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน

พรีพาราตาและฮอง (Preparata, F.P. and Hong, S.J. 1977) กล่าวถึงการผลิตชิ้นงานที่มีสภาพผิวไม่เรียบหรือไม่เป็นไปตามขนาดที่ออกแบบไว้โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีผิวลักษณะนูนขึ้นมาเมื่อนำมาประกอบจะทำให้ไม่สามารถประกอบชิ้นงานเข้าต่อกันได้

โฮปและลีวี (Hopp, T.H. and Reeve C.P. 2008) ได้ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาขนาดความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ที่สามารถประกอบเข้ากับเครื่องจักรได้และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในประเทศไทย

นายเตจ ตระการผล (Trakarnpol D. 2012). การศึกษาการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยโปรแกรม NX Motion ซึ่งทำการศึกษาโดยสร้างแบบสร้างโมเดลต้นแบบและจำลองการเคลื่อนไหวด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 7.5 Motion Simulation กับ การคำนวณทางทฤษฎี ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ เพื่อหาค่า ระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่ง ของลูกสูบ เมื่อเพลลาข้อเหวี่ยงหมุนด้วยความเร็วคงที่ 1200 รอบต่อนาที ซึ่งในการจำลองการเคลื่อนไหวใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 7200 degree/sec (เป็นค่า default ของโปรแกรม), และใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 125.66 Radian/sec สำหรับการคำนวณ แต่งานวิจัยนี้สร้างโมเดลต้นแบบที่ใช้ขนาดมาตรฐาน ซึ่งผู้ศึกษาไม่ได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตตามมาตรฐาน ISO 2768 สำหรับชิ้นงานจริง

กิตติพล ปวutipันธุ์ (Pavutipphan K. 2013). ศึกษาค้นคว้านี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรม Unigraphics NX for Designers and Motion Simulation (UG-NX) Version 7.5 สำหรับการศึกษาการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลา scotch yoke โดยใช้หลักเกณฑ์ในการให้ค่าความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐานเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต ISO 2768 เป็นแนวทางในการออกแบบชิ้นส่วนกลไก Scotch Yoke เพื่อศึกษาผลกระทบของความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนที่มีผลต่อการทำงาน ในการศึกษาแบบการประกอบโดยใช้ความคลาดเคลื่อนเข้าไปในชิ้นส่วน 3 ชิ้น โดยแยกการประกอบได้ทั้งหมด 27 แบบนั้น พบว่าเมื่อกลไก scotch yoke เคลื่อนที่ครบ 1 รอบตัวความเร็วเชิงมุม 360 องศาต่อวินาที จะมีระยะทางการเคลื่อนที่ อยู่ในช่วง 259.408 - 310.258 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับจุดหมุน จากผลของการทดลองนี้เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องจักรกลหรือนำไปใช้ในการวางแผนการซ่อมบำรุงเพื่อลดและป้องกันผลกระทบจากกลไกเครื่องจักรที่ทำงานผิดพลาดจากค่าความคลาดเคลื่อน

จุฑาทิพย์ โพธิ์เจริญ (Chuthatip P. 2013) ศึกษาผลกระทบของความคลาดเคลื่อนด้านมิติของชิ้นส่วนย่อยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง โดยสร้างโมเดลต้นแบบและจำลองการเคลื่อนไหวด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 7.5 Motion Simulation ที่มีการออกแบบค่า

ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันของแต่ละชิ้นส่วนย่อยตามมาตรฐาน ISO 2678 - Table 1 ที่ tolerance class - m (medium) ซึ่งประกอบทั้งหมด 27 แบบ โดยการศึกษาจะกำหนดขอบเขตการศึกษาและการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่งของลูกสูบ เมื่อเพลาช้อเหวี่ยงหมุนด้วยความเร็วคงที่ 1,200 รอบต่อนาที ซึ่งในการจำลองการเคลื่อนไหวนั้นใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 360 องศา/วินาที ผลการศึกษาพบว่าทั้งค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่งของกลไกเพลาช้อเหวี่ยงที่มีการออกแบบตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมีค่าที่แตกต่างกัน เมื่อให้เพลาช้อเหวี่ยงหมุน ครบ 1 รอบ แล้วอ่านค่าระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ผลปรากฏว่าทั้งหมด 27 แบบ มีค่าอยู่ในช่วง 69.693 – 70.293 mm ความเร็วของลูกสูบมีค่าอยู่ในช่วง 13.610 - 13.954 mm/s ความเร่งของลูกสูบมี ค่าอยู่ในช่วง 459811.490 - 461456.756 mm/s² ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมีผลต่อการเคลื่อนที่ของกลไกเพลาช้อเหวี่ยง

ตาราง 1 ตารางสรุปการสำรวจเอกสารงานวิจัย

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Hoffmann P. 1982). ฮอฟแมน	การกำหนดความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและรูปทรงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการออกแบบ	การกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและรูปทรง
(Shepherd D.W.1987). แซฟเฟร็ด ดี ดีบับ	การออกแบบทางวิศวกรรมในสมัยก่อนจะมีการพิจารณาองค์ประกอบหลักใน 2 ส่วน คือ รูปร่างรูปทรง และ ขนาดของชิ้นงาน	มาตรฐาน Y14.5 เป็นมาตรฐานกำหนดความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน โดยจะกำหนดเป็นขอบเขตความเผื่อ ซึ่ง Y 14.5 ได้ถูกตีพิมพ์ในปี 1966
(Taguchi G. 1988). ทาคุชิ	พิสูจน์เกี่ยวกับค่าความคลาดเคลื่อนว่าความเบี่ยงเบนของรูปร่างและรูปทรงในชิ้นส่วนจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรลดลง	ในการออกแบบต้องจำกัดค่าความเบี่ยงเบนไม่ให้เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Traband,M.T.& Medeiros, D.J.1989). ทรา เบรนและมีเดิลส์	ทฤษฎีเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและมิติรวมทั้งวิธีในการออกแบบทางวิศวกรรม	วิธีการกำหนดค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปจากค่ามาตรฐานซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้
(Farmer L.E. 1986). ฟาร์เมอร์	กำหนดเกณฑ์สำหรับการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนทางรูปร่างและรูปทรง โดยเกณฑ์ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับทฤษฎีที่มีอยู่	การพัฒนาทฤษฎีใหม่
(Hillyard,R.C.& Braid, I.C. 1978). ฮิลลีย์ยาร์ดและบลัด	เสนอหลักแนวคิดในการเพิ่ม-ลด ค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเป็นตัวบอกปริมาณค่าที่แปรผันจากขนาดจริง	ทฤษฎีการหาขนาดถูกโดยฮิลลีย์ยาร์ดและบลัดกำหนดขนาดและรูปแบบให้สัมพันธ์กันชิ้นงาน
(Requicha A.A.G.1983). รีควิชาร์	ตรวจสอบชิ้นงานใช้เฉพาะกรณีเครื่องจักรที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ไม่ซับซ้อน	ทฤษฎีของ ฮิลลีย์ยาร์ดและบลัด มาประยุกต์ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล
(Weill R.1988). วีอีลล์	ค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถมีได้มากที่สุด โดยใช้หลักการพื้นฐานด้านขนาดของรูปร่างและรูปทรงในการออกแบบซึ่งจะพิจารณาถึงขอบเขตของพื้นที่ผิวที่ค่าคลาดเคลื่อนในเกณฑ์ที่ยอมรับได้	แนวคิดค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถมีได้มากที่สุด
(Rogers, D.F. 1989). โรเจอร์	ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและจำกัดพื้นที่ผิวแบบลักษณะเส้นโค้งโดยการกำหนดค่าในกราฟ	ใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบ

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Lin, V.C. 1981) หลิน	ได้พัฒนาชุดโปรแกรมทดสอบด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งให้ความแม่นยำในเกณฑ์ที่ยอมรับได้	โปรแกรมทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนที่
(Rossignac, J.R. 1986). โรลซิกแนกซ์	พัฒนาวิธีการตั้งค่างับวัตถุแข็งเกร็งโดยใช้วิธีการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทางด้านรูปร่างและรูปทรง	การหาประสิทธิภาพเครื่องจักรและการดำเนินงานในการแก้ไขแบบได้ดี
(Yu, Y.C. 1986). ยู	ดำเนินการทดสอบรูปแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีความคลาดเคลื่อน	ออกแบบให้ชิ้นส่วนมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเพื่อการทำงานที่แม่นยำ
(Etesami, F. 1988). อีเตซามิ	ดำเนินการทดสอบชิ้นงานจากกระบวนการผลิตที่มีความคลาดเคลื่อนในชิ้นงาน	เครื่องจักรที่ประกอบด้วยชิ้นงานที่มีความคลาดเคลื่อนมีความแม่นยำลดลง
(Srinivasan, V. & Jayaraman, R. 1985). จา ยารามาและสินิวาสัน	หลักการขอบเขตที่แท้จริงซึ่งจะถูกสร้างจากตำแหน่งที่แม่นยำโดยจะมีการใส่ชิ้นงานที่มีความคลาดเคลื่อนและชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องซึ่งจะพิจารณาว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าได้สูงสุดเท่าไรที่เครื่องจักรกลยังคงทำงานได้	ทฤษฎีในการประมาณค่า
(Duffie, N. 1988). ดัฟเฟร์	ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบนอกจากจะช่วยวิเคราะห์ข้อมูลแล้วยังช่วยในการแก้ไขปัญหา	วิธีการวัดขนาดที่ถูกต้อง

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Anthony, G.T. 1984). แอนโทนี	การพัฒนาเพื่อช่วยให้การออกแบบเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็ว นอกเหนือจากความสามารถในการแสดงภาพเป็น 3 มิติให้เห็นได้อย่างถูกต้องแล้ว ข้อมูลของชิ้นงานที่ออกแบบต้องมีคุณสมบัติเป็นเสมือนวัตถุจริงที่มีน้ำหนักด้วย ข้อมูลทางคณิตศาสตร์ของวัตถุรูปทรง 3 มิติ	แนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้พัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
(Gonin, R. 1989). กอร์นิน	กระบวนการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุดเช่น ความเป็นเส้นตรง ความเป็นระนาบ ความเป็นวงกลม ซึ่งในกระบวนการผลิตชิ้นงานจะต้องได้รับการตรวจสอบด้วย	การทดสอบข้อมูลว่ามีวัตถุประสงค์คือต้องนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการวิเคราะห์
(Lotze, W. 1982) ลูส์	การใช้เครื่องตรวจวัดความละเอียดสูงในระดับไมครอนโดยเป็นเครื่องวัดขนาดของชิ้นงาน	การวัดค่าความละเอียดโดยการใช้เครื่องตรวจวัดความละเอียดสูง
(Weckenmann, A.&Heurichowski, M. 1985).เวคแมนน์และเฮอร์ลือชอร์กี	ศึกษาปัญหาในประเด็นการประกอบชิ้นงานและการวัดเพื่อหาขนาดโดยใช้เครื่องตรวจวัดความละเอียดสูงในระดับไมครอน	ประเด็นการประกอบชิ้นงานและการวัดเพื่อหาขนาด
(Forbes, A.B. 1989) ฟอร์บ	พัฒนาวิธีการหาผลรวมที่น้อยที่สุดของระยะทางความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง	การคำนวณเพื่อออกแบบความคลาดเคลื่อน
(Dahlquist, G.1974). ดาร์ลควิสต์	ใช้หลักการของวิธีระเบียบเชิงตัวเลขในการคำนวณและหาผลกระทบของความคลาดเคลื่อนที่มีผลกระทบการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลที่ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่มีความคลาดเคลื่อน	การคำนวณด้วยวิธีนี้จะสอดคล้องกับของกอร์นินที่มีข้อจำกัดในการคำนวณกับข้อมูลที่เป็นเชิงเส้น

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Lai, K. 1988). ไลน์	นำเสนอการหาค่าความคลาดเคลื่อนของทรงกลม	แนวคิดสำหรับการคำนวณพื้นที่ผิวที่น้อยที่สุดสำหรับการสวมชิ้นงานที่ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน
(Preparata, F.P. and Hong, S.J. 1977). พรีพาราตาและฮอง	การผลิตชิ้นงานที่มีสภาพผิวไม่เรียบหรือไม่เป็นไปตามขนาดที่ออกแบบไว้	ชิ้นงานที่มีผิวลักษณะนูนขึ้นมา เมื่อนำมาประกอบจะทำให้ไม่สามารถประกอบชิ้นงานเข้าต่อกันได้
(Hopp, T.H. and Reeve C.P.2008). โฮปและลีวี	หาขนาดความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ที่สามารถประกอบเข้ากับเครื่องจักรได้และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ	ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาขนาดความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด
(Trakarnpol D. 2012). เต็จ ตระการผล	การศึกษาการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยโปรแกรมกับการคำนวณทางทฤษฎี ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ เพื่อหาค่า ระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่ง ของลูกสูบ เมื่อเพลลาข้อเหวี่ยงหมุนด้วยความเร็วคงที่ 1200 รอบต่อนาที ซึ่งในการจำลองการเคลื่อนไหวนั้นใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 7200 degree/sec และใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 125.66 Radian/sec สำหรับการคำนวณ	โปรแกรม NX Motion สามารถสร้างแบบสร้างโมเดลต้นแบบและจำลองการเคลื่อนไหวนั้นด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 7.5 Motion Simulation

ตาราง 1 (ต่อ)

นักวิจัย	ลักษณะงานที่ศึกษา	การศึกษาและผลที่ได้รับ
(Pavutipphan K. 2013). กิตติพล ปวutipพันธุ์	หลักเกณฑ์ในการให้ค่าความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐานเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต ISO 2768 เป็นแนวทางในการออกแบบชิ้นส่วนกลไก Scotch Yoke เพื่อศึกษาผลกระทบของความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนที่มีผลต่อการทำงาน	การประยุกต์ใช้โปรแกรม Unigraphics NX for Designers and Motion Simulation (UG-NX) Version 7.5 สำหรับการศึกษาการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลา Scotch Yoke
(Chuthatip P. 2013). จุฑาทิพย์ โพธิ์เจริญ	ผลกระทบของความคลาดเคลื่อนด้านมิติของชิ้นส่วนย่อยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเพลลาข้อเหวี่ยง ที่มี การออกแบบค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตที่แตกต่างกันของแต่ละชิ้นส่วนย่อยตามมาตรฐาน ISO 2678 - Table 1 ที่ Tolerance class - m (medium) ซึ่งประกอบทั้งหมด 27 แบบ	การกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมีผลต่อการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยง

จากการทบทวนวรรณกรรมและตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่องการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ดังตารางที่สรุปสาระสำคัญพบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่เป็น การออกแบบ พัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ back propagation neural network ดังนั้นการศึกษาเรื่องการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม สำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล จึงเป็นประเด็นสำคัญในการศึกษาและออกแบบเครื่องจักรกลที่จะสามารถนำไปใช้ในการระบุ/แจกแจงความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเพื่อที่จะควบคุมให้ความคลาดเคลื่อนรวม (ทั้งขนาดและรูปร่าง) ของเครื่องจักรกลนั้นไม่ส่งผลกระทบจนทำให้การเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลผิดไปจาก design specification

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต (Geometric Dimensioning and Tolerancing) คำย่อ GD&T หมายถึง เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ใช้ควบคุมรูปร่าง (form) การวางทิศทาง (orientation) ที่ตั้ง (location) และการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน (run-out) ของชิ้นงาน

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของรูปลักษณะ (feature) หมายถึงขอบเขต เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่จำกัดรูปลักษณะ เช่น จำกัดเรื่องของผิว แกน หรือระนาบกลาง

เดตัม (datum) หมายถึง สิ่งอ้างอิงทางเรขาคณิตที่แท้จริงทางทฤษฎี (เช่น แกน ระนาบ เส้นตรง) ที่สัมพันธ์กับรูปลักษณะที่ควบคุมโดยเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน เดตัมอาจกำหนดได้จาก รูปลักษณะหนึ่ง ลักษณะหรือมากกว่า

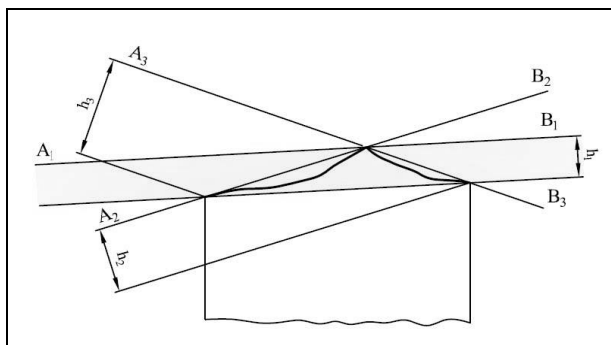
รูปลักษณะเดตัม (datum feature) หมายถึง รูปลักษณะจริงของชิ้นงาน (เช่น ขอบ ผิว รู) ที่ใช้กำหนดที่ตั้งของเดตัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะมีลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนี้

1. พื้นที่ภายในวงกลม
2. พื้นที่ระหว่างวงกลม 2 วง ซึ่งมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน
3. พื้นที่ระหว่างเส้น 2 เส้น ซึ่งขนานกัน
4. ปริภูมิ (space) ภายในทรงกระบอก
5. ปริภูมิระหว่างทรงกระบอก 2 ทรงกระบอก ซึ่งมีแกนร่วมกัน
6. ปริภูมิระหว่างผิว 2 ผิว ซึ่งขนานกัน หรือระนาบ 2 ระนาบซึ่งขนานกัน
7. ปริภูมิภายในทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตซึ่งกำหนดให้กับรูปลักษณะหนึ่ง จะไม่ครอบคลุมถึงความเบี่ยงเบนของรูปร่างของรูปลักษณะเดตัมที่สัมพันธ์กัน รูปร่างของรูปลักษณะเดตัมควรจะต้องมีความถูกต้องเพียงพอเพื่อให้ตรงกับจุดประสงค์ ในบางกรณีอาจจำเป็นต้องกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่างสำหรับรูปลักษณะเดตัมด้วย

ความตรง (straightness) หรือความราบของรูปลักษณะเดี่ยวที่ควบคุมโดยเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถือว่าถูกต้องต่อเมื่อระยะจากจุดแต่ละจุดของรูปลักษณะถึงผิวของรูปร่างทางเรขาคณิตตามอุดมคติมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้การเลือกทิศทางของเส้นหรือผิวตามอุดมคติ (ideal line or surface) จะต้องเลือกในลักษณะที่ระยะสูงสุดระหว่างผิวตามอุดมคติกับผิวจริงมีค่าน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง (straightness)

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

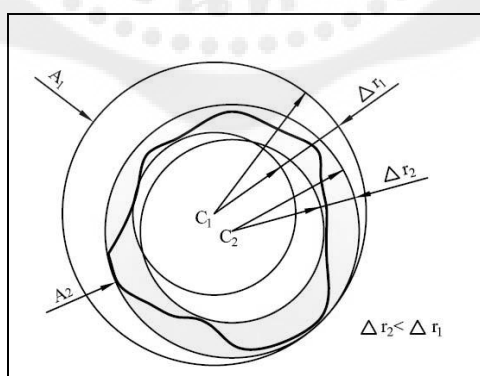
ทิศทางที่เป็นไปได้ของเส้นหรือผิวตามอุดมคติ A1 – B1, A2 – B2, A3 – B3

ระยะสูงสุดระหว่างผิวตามอุดมคติกับผิวจริง h_1 h_2 h_3

ในกรณีของภาพที่ 1 $h_1 < h_2 < h_3$

ดังนั้นการวางทิศทางที่ถูกต้องของเส้นหรือผิวตามอุดมคติ คือ A1 – B1 และระยะ h_1 จะต้องเท่ากับหรือน้อยกว่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดให้

ความกลม (circularity) และความเป็นทรงกระบอก (cylindricity) ที่ตั้งของวงกลมร่วมศูนย์กลาง 2 วง หรือทรงกระบอกร่วมแกน 2 ทรงกระบอก นั้น จะต้องเลือกในลักษณะที่ผลต่างของรัศมีของวงกลมทั้งสอง หรือทรงกระบอกทั้งสอง มีค่าน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกลม (circularity)

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ที่ตั้งที่เป็นไปได้ของจุดศูนย์กลางของวงกลมร่วมศูนย์กลาง 2 วง หรือแกนของทรงกระบอก

ร่วมแกน 2 ทรงกระบอก คือ

จุดศูนย์กลาง C_1 ของวงกลม A_1 และจุดศูนย์กลาง C_2 ของวงกลม A_2

ผลต่างของรัศมีที่สัมพันธ์ $\Delta r_1 \quad \Delta r_2$

ในกรณีของภาพที่ 2 $\Delta r_1 > \Delta r_2$

ดังนั้นที่ตั้งที่ถูกต้องของวงกลมร่วมศูนย์กลาง หรือทรงกระบอกร่วมแกนคือ จุดศูนย์กลาง C_2 ของวงกลม A_2 และผลต่างของรัศมี Δr_2 จะต้องเท่ากับหรือน้อยกว่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดให้

สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ถูกแบ่งแยกจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน 4 ประเภทดังนี้

- เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง
- เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการวางทิศทาง
- เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของที่ตั้ง
- เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน

ตาราง 2 สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

รูปลักษณะและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน		ลักษณะเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน	การกำหนดเดตัม	สัญลักษณ์
รูปลักษณะเดี่ยว	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง	ความตรง (straightness)	ไม่มี	
		ความราบ (flatness)		
		ความกลม (roundness)		
		ความเป็นทรงกระบอก (cylindricity)		
รูปลักษณะเดี่ยวหรือที่สัมพันธ์กัน		รูปหน้าข้างเส้นใดๆ (profile of any line)	มีหรือไม่มีก็ได้	
		รูปหน้าข้างผิวใดๆ (profile of any surface)		
รูปลักษณะที่สัมพันธ์กัน	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการวางทิศทาง	ความขนาน (parallelism)	มี	
		ความตั้งฉาก(perpendicularity)		
		ความเป็นมุม (angularity)		
	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของที่ตั้ง	ตำแหน่ง (position)	มี	
		ความร่วมศูนย์หรือความร่วมแกน (concentricity or coaxiality)		
		ความสมมาตร (symmetry)		
	เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน	การเบี่ยงเบนเมื่อหมุน-แต่ละระนาบ (circular run-out)	มี	
		การเบี่ยงเบนเมื่อหมุน-ทั้งหมด (total run-out)		

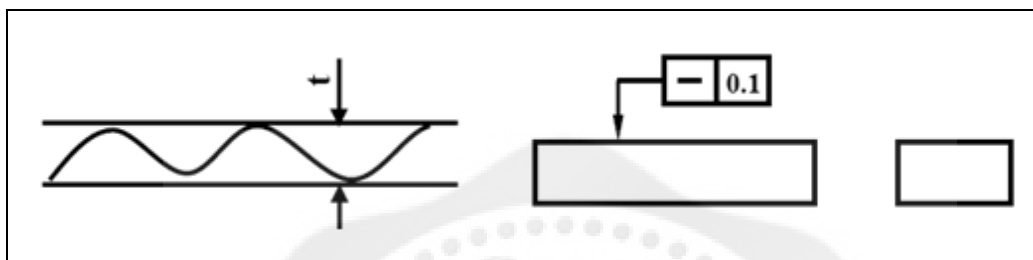
ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ความหมายและตัวอย่างการใช้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

1. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง (straightness)

ความตรงของเส้นตามอุดมคติ หรือจะถือว่าถูกต้องเมื่อระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดใด ๆ บนเส้น ที่วัดตามความยาวของเส้นจะต้องมีค่าน้อยที่สุด

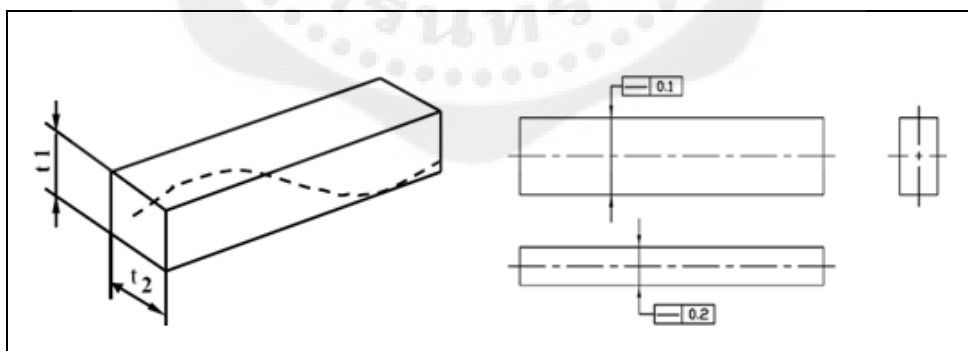
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน เมื่อฉายบนระนาบหนึ่ง จะถูกจำกัดโดยเส้นตรงขนานกัน 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t



ภาพประกอบ 3 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง เมื่อฉายบนระนาบและตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

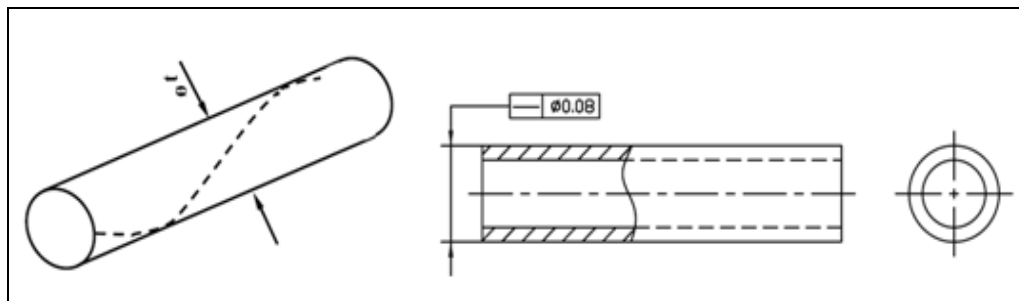
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน ซึ่งมีภาคตัดเท่ากับ $t_1 \times t_2$ ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทาง 2 ทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบ 4 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง เมื่อถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ t ถ้าเขียนเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนตามหลังเครื่องหมาย $\varnothing$



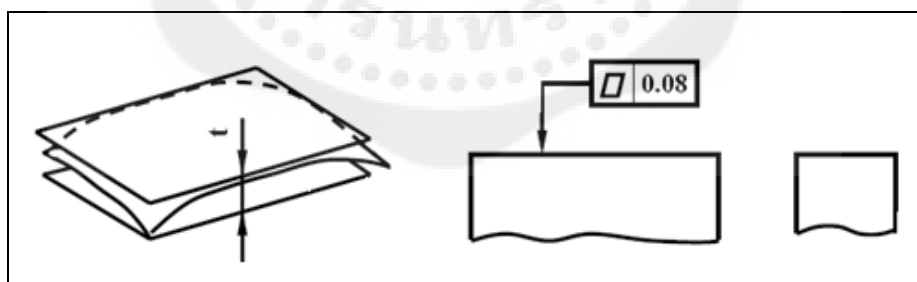
ภาพประกอบ 5 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตรง เมื่อถูกจำกัดโดยทรงกระบอกและตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

2. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความราบ (flatness)

ความราบของผิวตามอุดมคติหรือจะถือว่าถูกต้องต่อเมื่อระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดใดๆ บนผิวนั้น ที่วัดตามความยาวของผิว จะต้องมีค่าน้อยที่สุด

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t

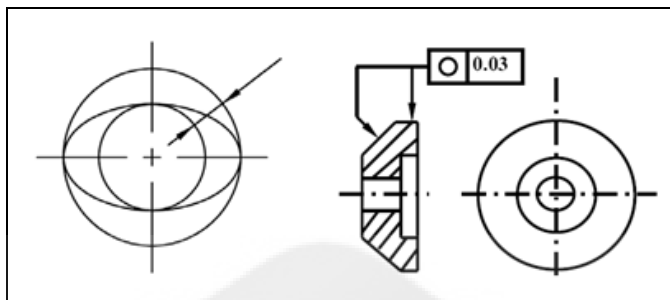


ภาพประกอบ 6 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความราบ และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

3. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกลม (roundness)

ความกลมของผิวตามอุดมคติหรือจะถือว่าถูกต้องต่อเมื่อระยะห่างระหว่างจุดใดๆ บนเส้นรอบวงกับศูนย์กลาง จะต้องเท่ากับรัศมีของวงกลม ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในระนาบที่พิจารณาจะถูกจำกัดโดยวงกลมร่วมศูนย์กลาง 2 วงซึ่งมีผลต่างของรัศมีเท่ากับ t



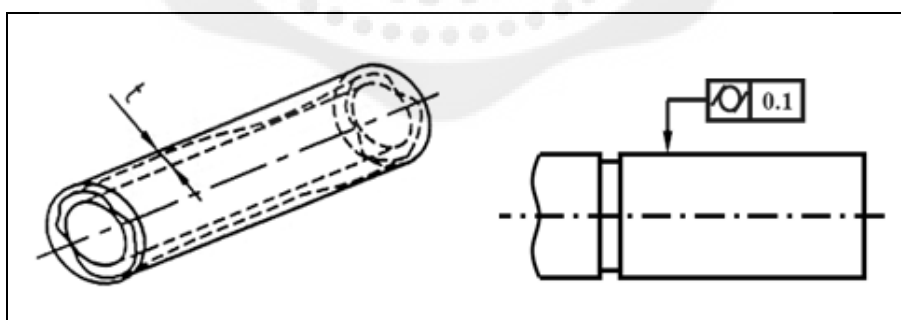
ภาพประกอบ 7 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความกลม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

4. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นทรงกระบอก (cylindricity)

ความเป็นทรงกระบอกตามอุดมคติหรือจะถือว่าถูกต้องต่อเมื่อทุกๆ ภาคตัดขวางเป็นวงกลมสมบูรณ์ ที่มีจุดศูนย์กลางในแนวแกนตรง

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยทรงกระบอกร่วมแกน 2 ทรงกระบอกซึ่งมีผลต่างของรัศมีเท่ากับ t

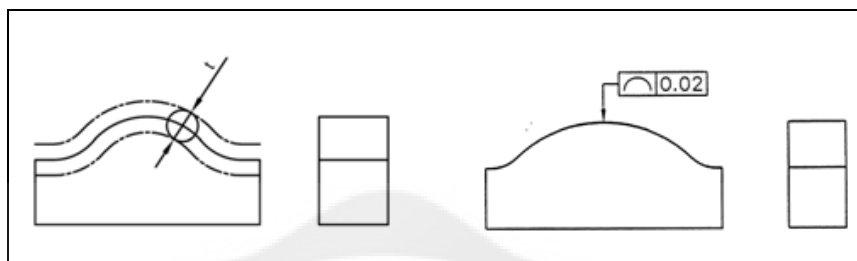


ภาพประกอบ 8 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นทรงกระบอก และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

5. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปหน้าข้างของเส้นใดๆ (profile of any line)

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยเส้นขนานกัน 2 เส้น ซึ่งกั้นระยะด้วยทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ t โดยที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมทั้งหมดจะอยู่บนเส้นของรูปร่างทางเรขาคณิตจริง

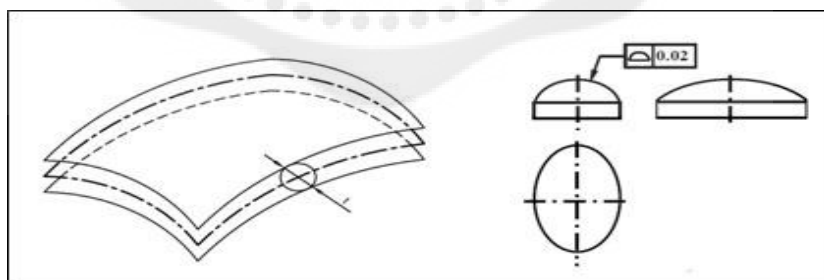


ภาพประกอบ 9 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปหน้าข้างของเส้นใดๆ และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

6. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปหน้าข้างของผิวใดๆ (profile of any surface)

ขอบเขตของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดไว้ด้วยผิวขนาน 2 ผิว ซึ่งกั้นระยะด้วยทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ t โดยจุดศูนย์กลางของทรงกลมทั้งหมดจะอยู่บนผิวของรูปร่างทางเรขาคณิตจริง



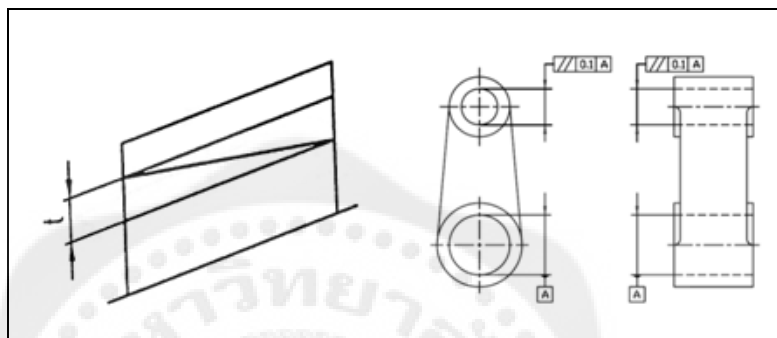
ภาพประกอบ 10 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปหน้าข้างของผิวใดๆ และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

7. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนาน (parallelism)

7.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนานของเส้นซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม

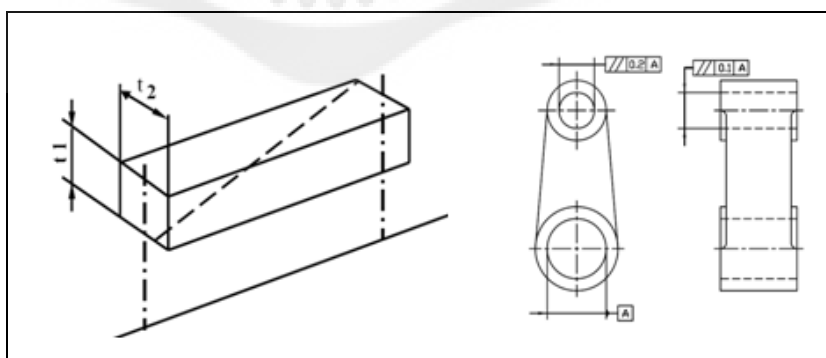
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเมื่อฉายบนระนาบหนึ่ง จะถูกจำกัดโดยเส้นตรงขนานกัน 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และขนานกับเส้นเดดัม ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทางเดียว



ภาพประกอบ 11 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนาน และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

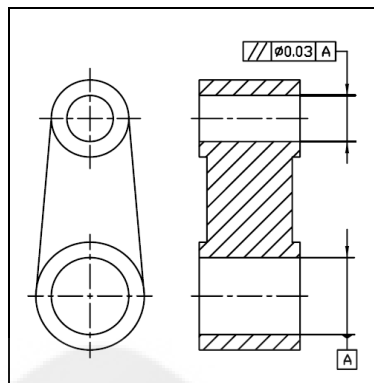
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนาน จะถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน ซึ่งมีภาคตัดเท่ากับ $t_1 \times t_2$ และขนานกับเส้นเดดัม ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทาง 2 ทิศทาง ที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบ 12 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนาน เมื่อถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ t และขนานกับเส้นเดดัมถ้าเขียนเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนตามหลังเครื่องหมาย $\emptyset$

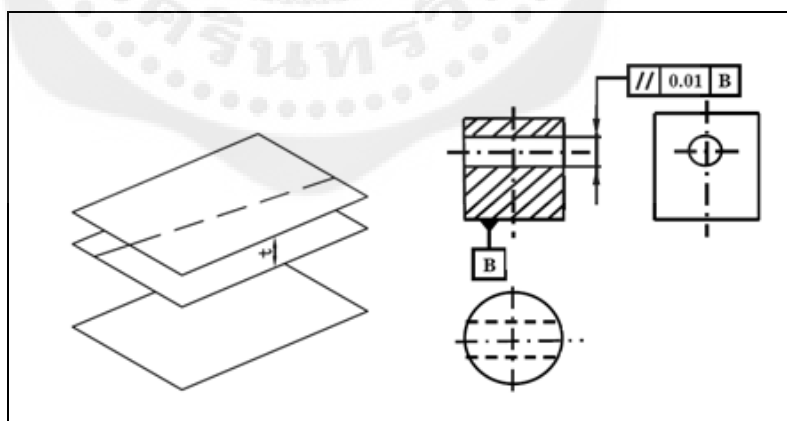


ภาพประกอบ 13 การให้สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนาน เมื่อถูกจำกัดโดยทรงกระบอก

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

7.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนานของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และขนานกับผิวเดดัม

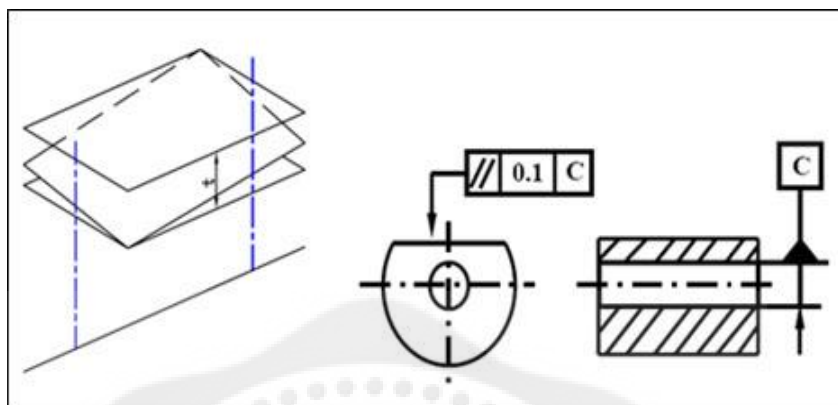


ภาพประกอบ 14 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความขนานของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

7.3 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความหนาของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และขนานกับเส้นเดดัม

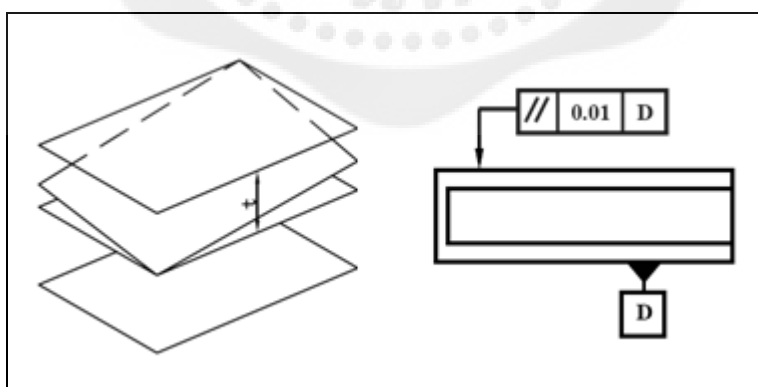


ภาพประกอบ 15 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความหนาของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

7.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความหนาของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และขนานกับผิวเดดัม



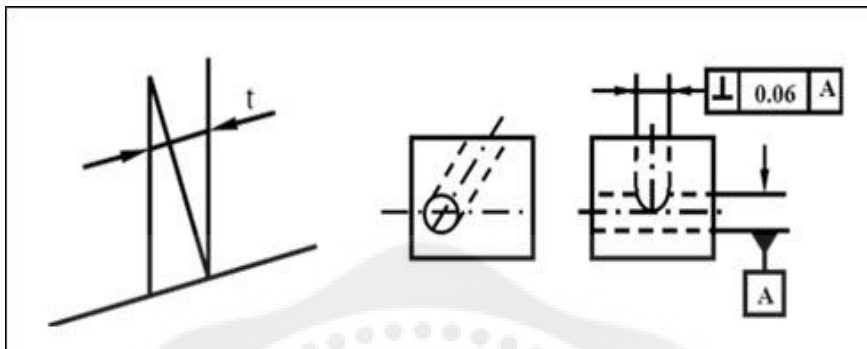
ภาพประกอบ 16 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความหนาของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

8. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉาก (perpendicularity)

8.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเมื่อฉายบนระนาบหนึ่งจะถูกจำกัดโดยเส้นตรงขนานกัน 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และตั้งฉากกับเส้นเดดัม

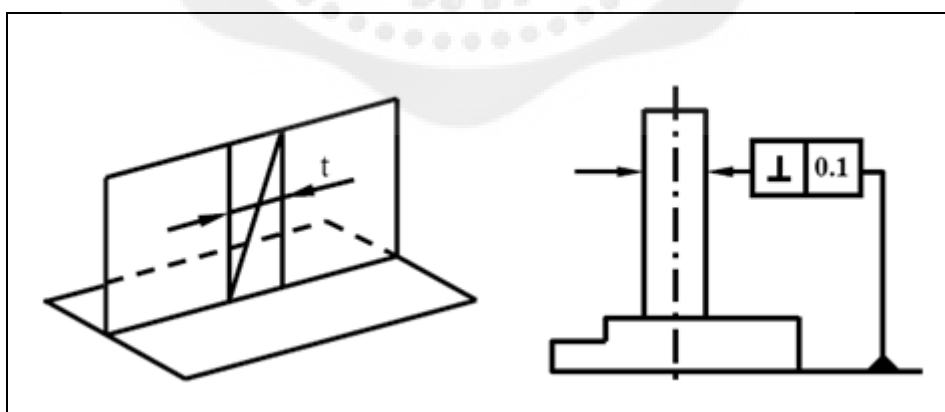


ภาพประกอบ 17 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

8.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม

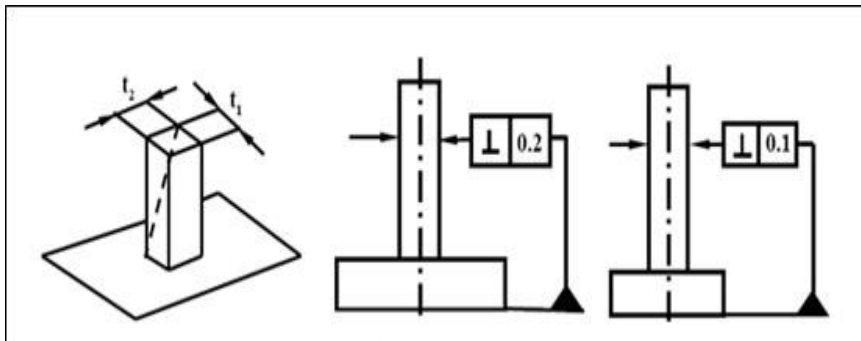
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเมื่อฉายบนระนาบหนึ่ง จะถูกจำกัดโดยเส้นตรงขนานกัน 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และตั้งฉากกับระนาบเดดัม ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทางเดียวกัน



ภาพประกอบ 18 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

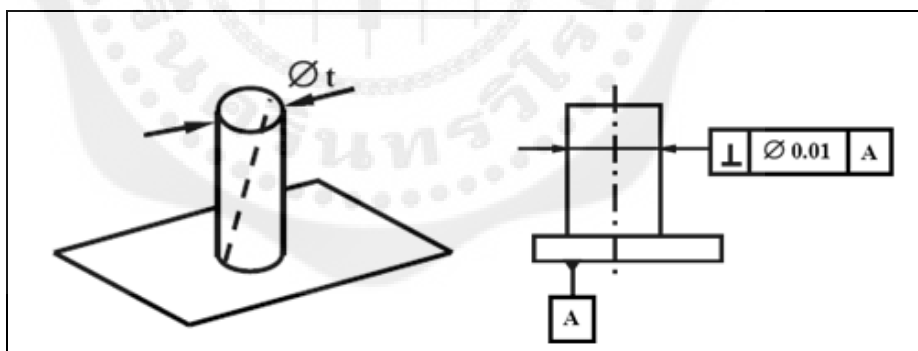
ขอบเขตเกณฑ์ความเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนานซึ่งมีภาคตัดเท่ากับ $t_1 \times t_2$ และตั้งฉากกับระนาบ ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทาง 2 ทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบ 19 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม เมื่อถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนานและตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ขอบเขตเกณฑ์ความเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ t และตั้งฉากกับระนาบเดดัม ถ้าเขียนเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนตามหลังเครื่องหมาย $\perp$

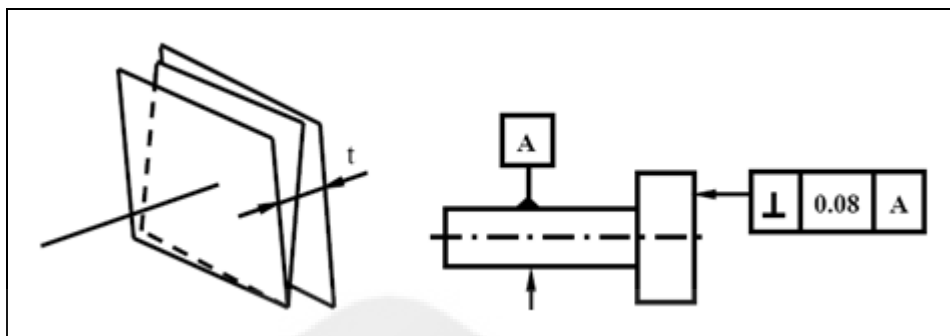


ภาพประกอบ 20 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตั้งฉากของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม เมื่อถูกจำกัดโดยทรงกระบอก และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

8.3 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตึงฉากของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และตั้งฉากกับเส้นเดดัม

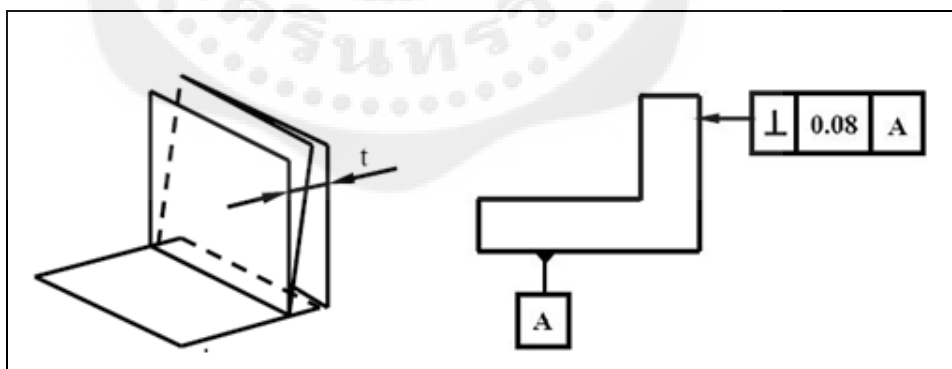


ภาพประกอบ 21 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตึงฉากของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

8.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตึงฉากของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และตั้งฉากกับผิวเดดัม



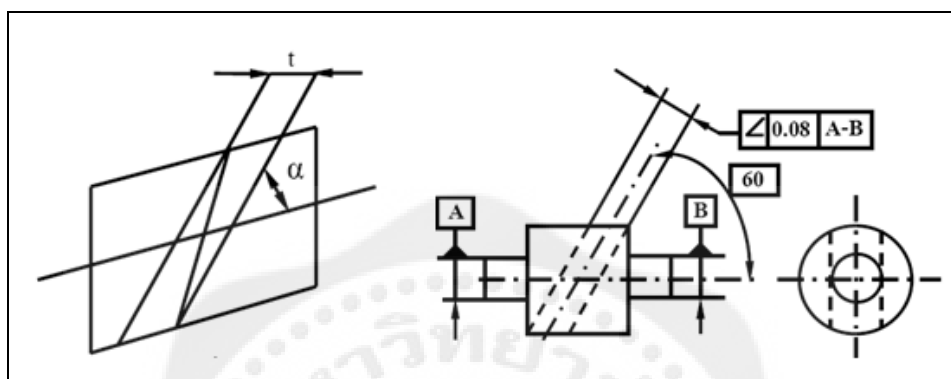
ภาพประกอบ 22 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความตึงฉากของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

9. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุม (angularity)

9.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของเส้นซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม

เส้นและเส้นเดดัมอยู่บนระนาบเดียวกัน ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเมื่อฉายบนระนาบหนึ่ง จะถูกจำกัดโดยเส้นตรงขนานกัน 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และเอียงทำมุมตามที่กำหนดกับเส้นเดดัม

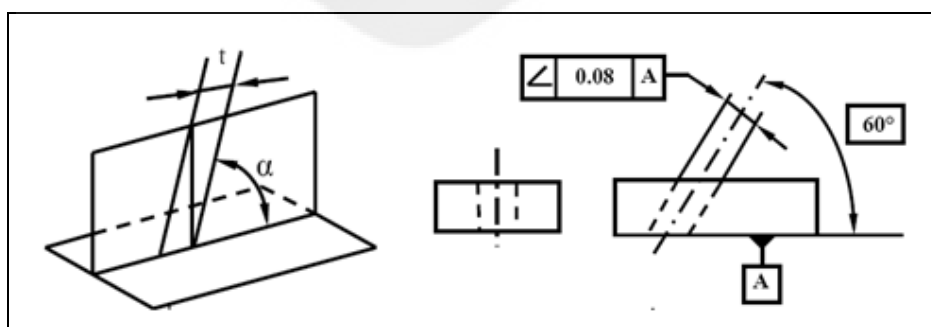


ภาพประกอบ 23 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของเส้นซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

9.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเมื่อฉายบนระนาบหนึ่ง จะถูกจำกัดโดยเส้นตรงขนานกัน 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และเอียงทำมุมตามที่กำหนดกับผิวเดดัม

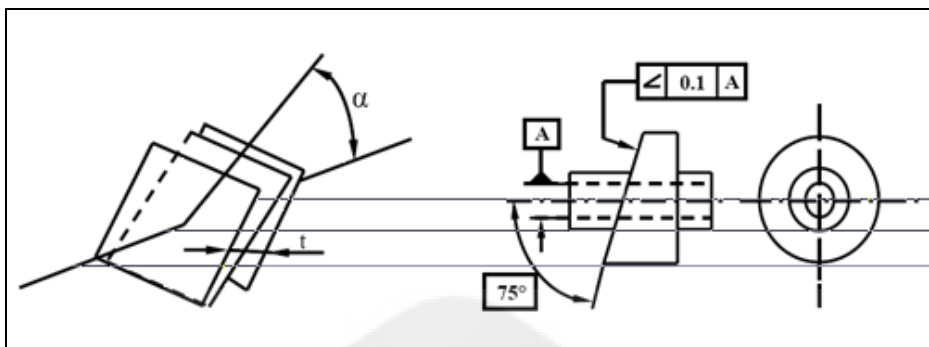


ภาพประกอบ 24 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของเส้นซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

9.3 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และเอียงทำมุมตามที่กำหนดกับเส้นเดดัม

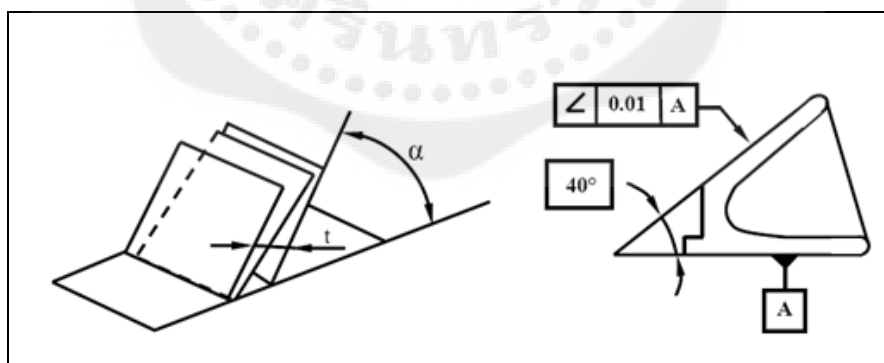


ภาพประกอบ 25 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของผิวซึ่งอ้างอิงกับเส้นเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

9.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และเอียงทำมุมตามที่กำหนดกับผิวเดดัม



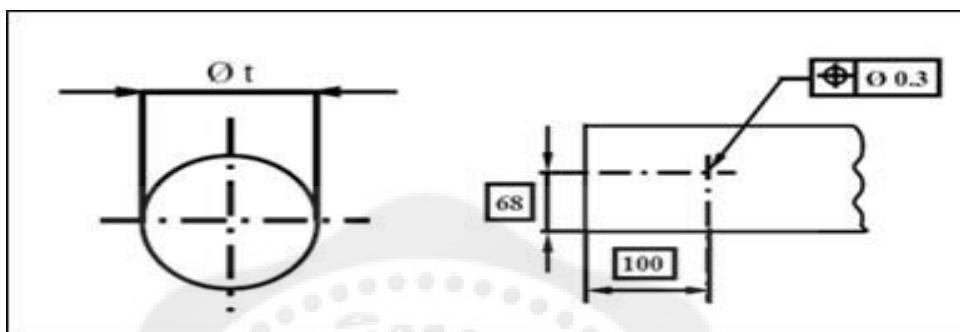
ภาพประกอบ 26 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมของผิวซึ่งอ้างอิงกับผิวเดดัม และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

10. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ใช้ควบคุมตำแหน่ง (position)

10.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของจุด

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยพื้นที่ของวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ t โดยที่จุดศูนย์กลางของวงกลมนี้ จะต้องอยู่ที่ตำแหน่งแท้จริงทางทฤษฎีของจุดที่พิจารณา

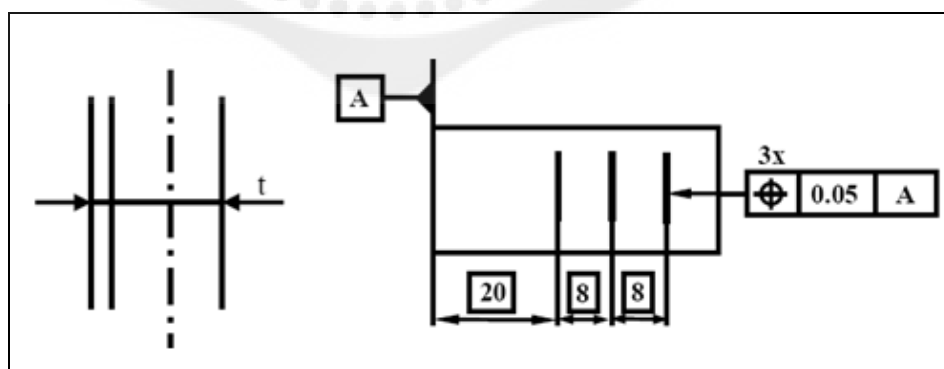


ภาพประกอบ 27 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของจุด และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

10.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของเส้น

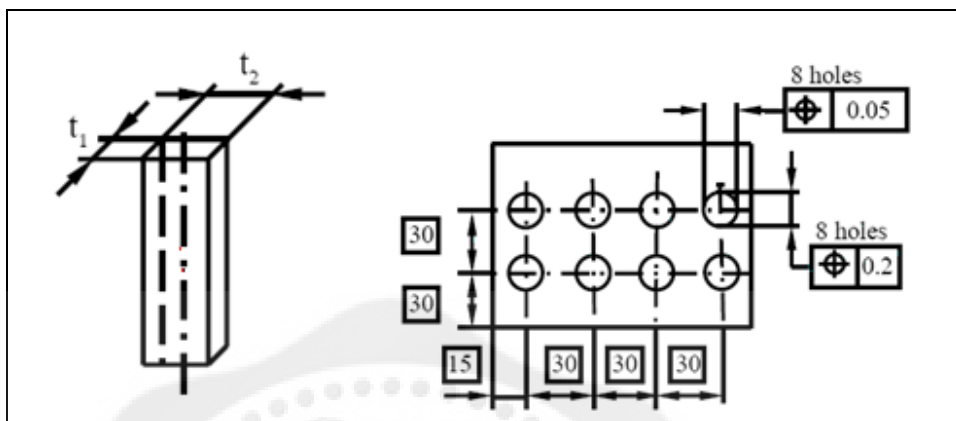
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยเส้นตรงที่ขนานกัน 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างกัน เท่ากับ t โดยมีตำแหน่งที่แท้จริงทางทฤษฎีของเส้นที่พิจารณาเป็นเส้นสมมาตร ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทางเดียว



ภาพประกอบ 28 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของเส้น และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

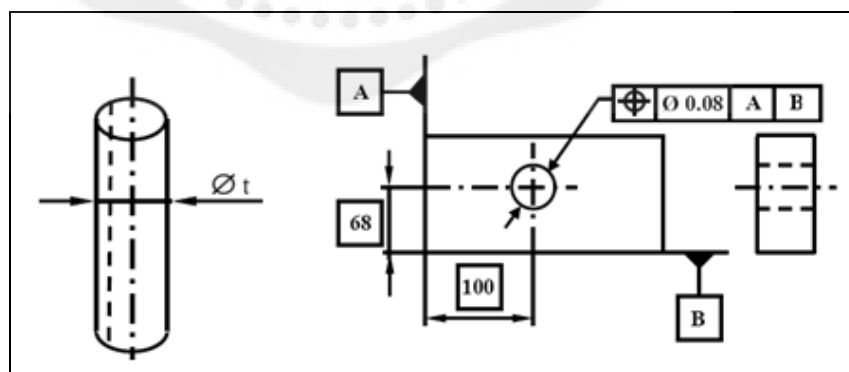
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน ซึ่งมีภาคตัดเท่ากับ $t_1 \times t_2$ โดยที่แกนของทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนานนี้จะอยู่ที่ตำแหน่งที่แท้จริงทางทฤษฎีของเส้นที่พิจารณา ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทาง 2 ทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบ 29 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของเส้น เมื่อถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนานและตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ t โดยที่แกนของทรงกระบอกนี้จะอยู่ที่ตำแหน่งที่แท้จริงทางทฤษฎีของเส้นที่พิจารณา ถ้าเขียนค่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนตามหลังเครื่องหมาย $\varnothing$

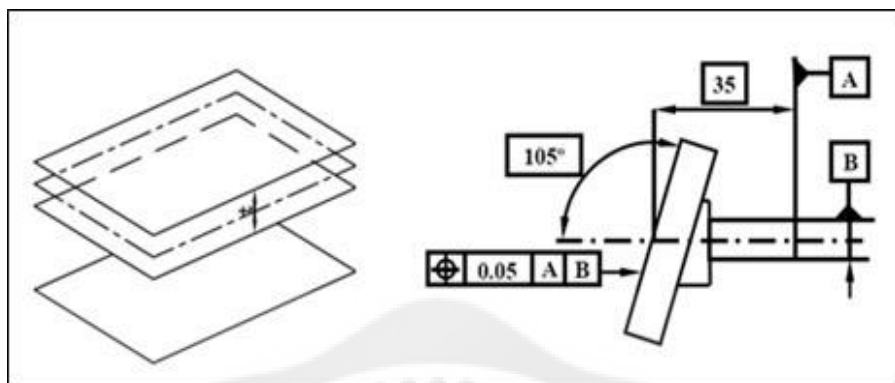


ภาพประกอบ 30 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของเส้น เมื่อถูกจำกัดโดยทรงกระบอก และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

10.3 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของผิวราบหรือระนาบกลาง

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t โดยมีตำแหน่งแท้จริงทางทฤษฎีของผิวที่พิจารณาเป็นผิวสมมาตร



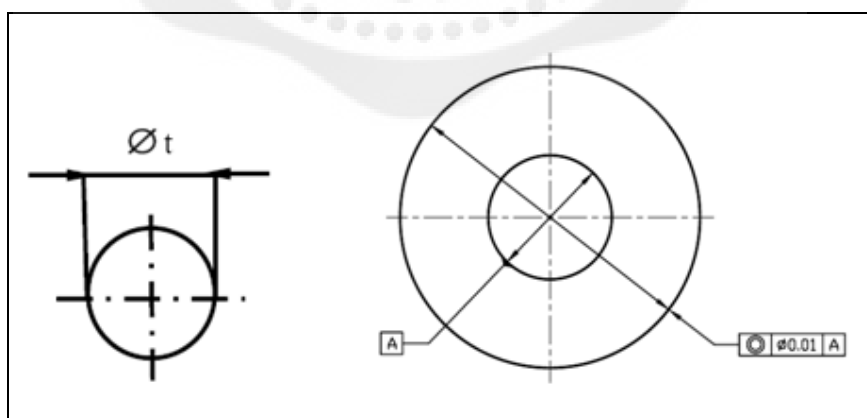
ภาพประกอบ 31 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของผิวราบหรือระนาบกลาง และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

11. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความร่วมศูนย์หรือความร่วมแกน (concentricity or coaxiality)

11.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความร่วมศูนย์ของจุด

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยพื้นที่ของวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ t โดยที่จุดศูนย์กลางของวงกลมนี้จะอยู่ที่จุดเด็ตัม

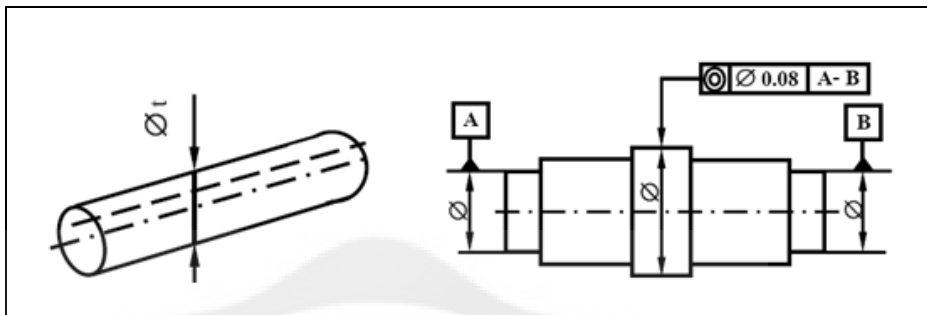


ภาพประกอบ 32 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความร่วมศูนย์ของจุด และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

11.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความร่วมแกนของแกน

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ t โดยที่แกนของทรงกระบอกนี้จะอยู่ที่แกนเดตัม ถ้าเขียนค่าของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนตามหลังเครื่องหมาย $\varnothing$



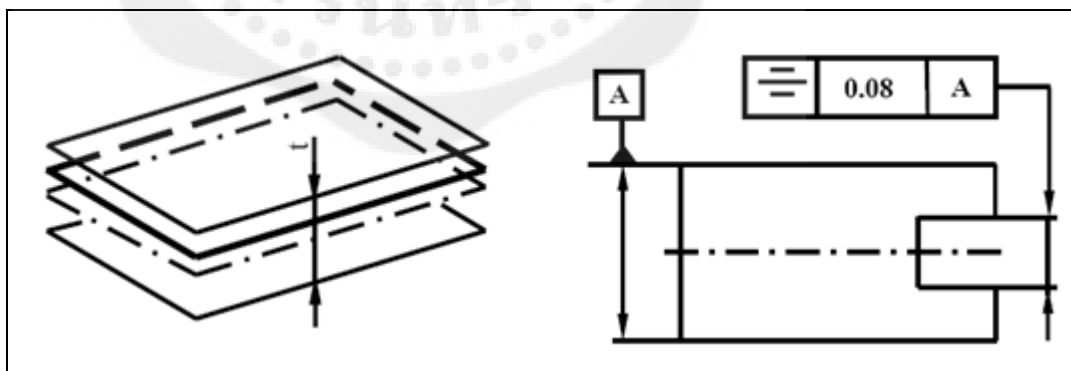
ภาพประกอบ 33 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความร่วมแกนของแกน และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

12. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตร (symmetry)

12.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตรของระนาบกลาง

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t โดยมีระนาบเดตัมเป็นระนาบสมมาตร

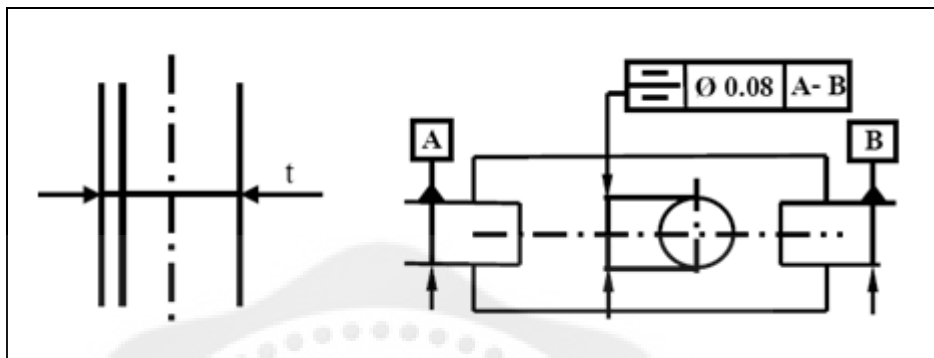


ภาพประกอบ 34 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตรของระนาบกลาง และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

12.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตรของเส้นหรือแกน

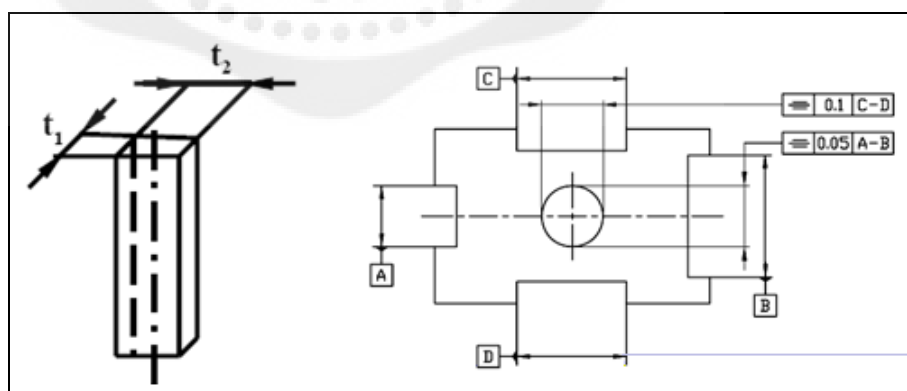
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน เมื่อฉายบนระนาบหนึ่ง จะถูกจำกัดโดยเส้นตรงขนานกัน 2 เส้น ซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ t โดยมีแกนเดตัม (หรือระนาบเดตัมฉาย) เป็นเส้นสมมาตร ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทางเดียว



ภาพประกอบ 35 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตรของของเส้นหรือแกน และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน ซึ่งมีภาคตัดเท่ากับ $t_1 \times t_2$ โดยที่แกนของทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนานนี้จะอยู่ที่แกนเดตัม ถ้าระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในทิศทาง 2 ทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน

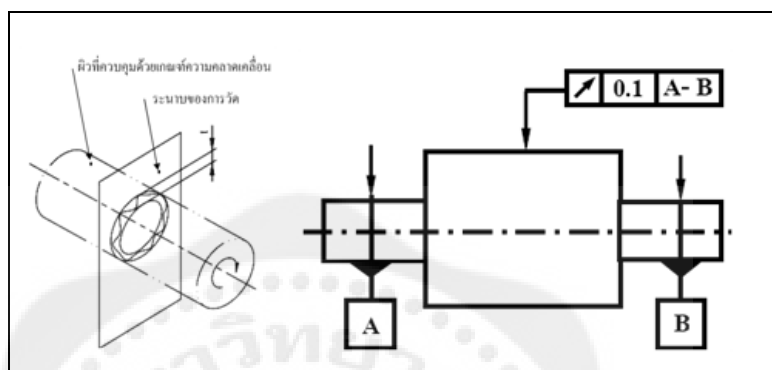


ภาพประกอบ 36 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความสมมาตรของของเส้นหรือแกน เมื่อถูกจำกัดโดยทรงสี่เหลี่ยมหน้าขนาน และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

13. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบ (circular run-out)

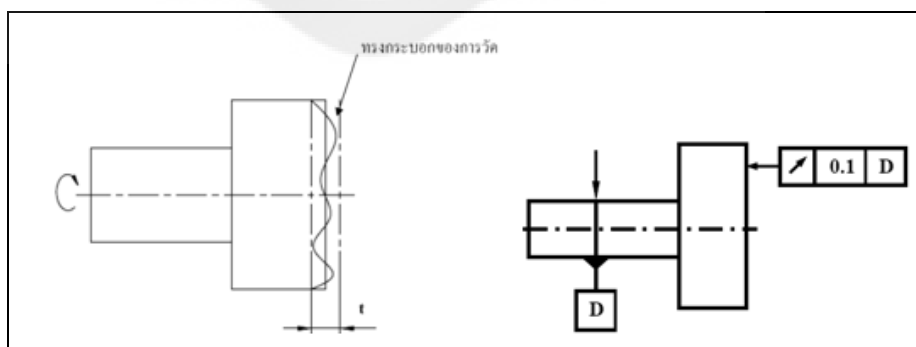
13.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในแนวรัศมี ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน บนระนาบการวัดใดๆ ซึ่งตั้งฉากกับแกน จะถูกจำกัดโดยวงกลมร่วมศูนย์กลาง 2 วง ซึ่งมีค่าผลต่างของรัศมีเท่ากับ t และมีจุดศูนย์กลางที่อยู่แกนเดดัม



ภาพประกอบ 37 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในแนวรัศมี และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

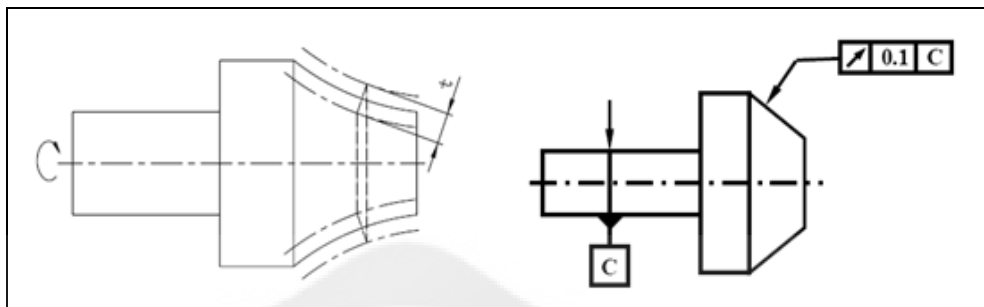
13.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในแนวแกนขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดที่ตำแหน่งรัศมีใดๆ โดยวงกลม 2 วง ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และประกอบเป็นทรงกระบอกของการวัดโดยมีแกนอยู่ที่แกนเดดัม



ภาพประกอบ 38 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในแนวแกนและตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

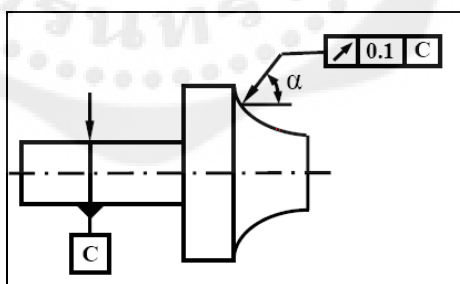
13.3 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในทิศทางใดๆ ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดภายในกรวยของการวัดใดๆ โดยวงกลม 2 วง ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และมีแกนอยู่ที่แกนเดตัมทิศทางของการวัดให้วัดตั้งฉากกับผิว นอกจากนี้จะมีการระบุเป็นอย่างอื่น



ภาพประกอบ 39 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในทิศทางใดๆ และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

13.4 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในทิศทางที่กำหนดขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดภายในกรวยของการวัดใดๆ ตามมุมที่กำหนดโดยวงกลม 2 วง ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และมีแกนอยู่ที่แกนเดตัม



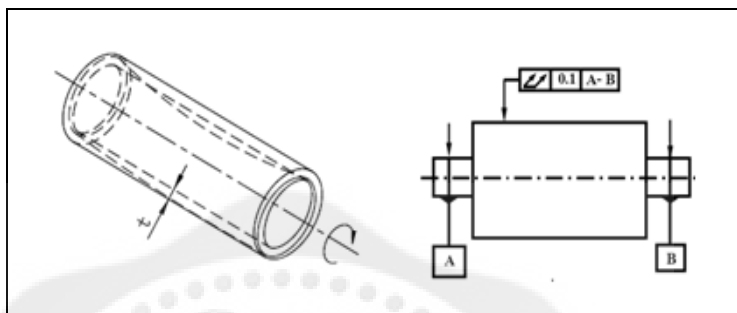
ภาพประกอบ 40 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – แต่ละระนาบในทิศทางที่กำหนด และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

14. เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – ทั้งหมด (total run-out)

14.1 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – ทั้งหมดในแนวรัศมี

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนจะถูกจำกัดโดยทรงกระบอกร่วมแกน 2 ทรงกระบอก ซึ่งมีผลต่างของรัศมีเท่ากับ t และมีแกนอยู่ที่แกนเดดัม ระหว่างการหมุนชิ้นงานรอบแกนเดดัมหลายๆ รอบ

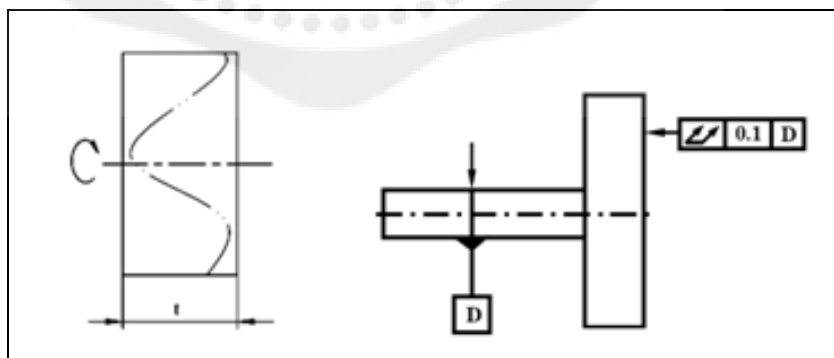


ภาพประกอบ 41 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – ทั้งหมด
ในแนวรัศมี และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

14.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – ทั้งหมดในแนวแกน

ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน จะถูกจำกัดโดยระนาบขนานกัน 2 ระนาบ ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ t และตั้งฉากกับแกนเดดัม ระหว่างการหมุนชิ้นงานรอบแกนเดดัมหลายๆ รอบ



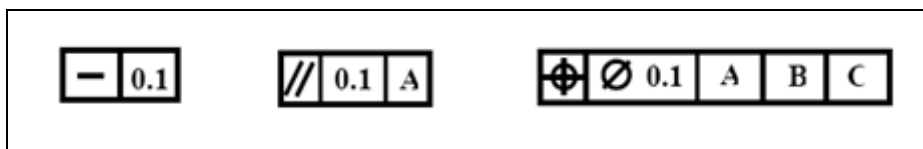
ภาพประกอบ 42 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการเบี่ยงเบนเมื่อหมุน – ทั้งหมด
ในแนวแกน และตัวอย่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

15. การระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตในแบบ

15.1 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน (tolerance frame)

ข้อกำหนดที่จำเป็นต่างๆ ให้เขียนในกรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่องหรือมากกว่าข้อกำหนดที่เขียนนั้นให้เขียนจากซ้ายไปขวาตามลำดับดังนี้



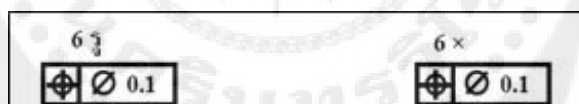
ภาพประกอบ 43 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ช่องที่1 เป็น สัญลักษณ์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ช่องที่2 เป็นค่าของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนในหน่วยเดียวกับหน่วยของมิติเชิงเส้นถ้าขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเป็นวงกลมหรือทรงกระบอกก็ให้เขียนค่านี้ตามหลังเครื่องหมาย $\varnothing$

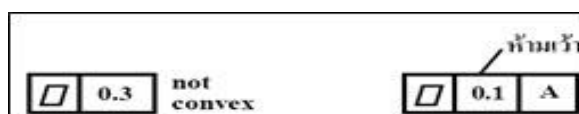
ช่องที่3 เป็น ตัวอักษรเดตัม (datum letter) (ตัวอักษรที่บ่งถึงตำแหน่งเดตัม) ถ้าจำเป็นข้อกำหนดที่สัมพันธ์กับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน เช่น “6 รู” หรือ “6 holes” หรือ “6x” ให้เขียนไว้เหนือกรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน



ภาพประกอบ 44 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนและจำนวนรู

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ข้อจำกัดของรูปร่างของรูปลักษณะภายในเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ให้เขียนใกล้กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน และอาจมีเส้นนำด้วยก็ได้



ภาพประกอบ 45 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนและข้อจำกัดของรูปร่าง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ถ้าจำเป็นต้องกำหนดลักษณะเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า 1 ลักษณะ สำหรับรูปลักษณะหนึ่งๆ ข้อกำหนดเกี่ยวกับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนนี้ ให้เขียนในกรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ซ้อนกัน

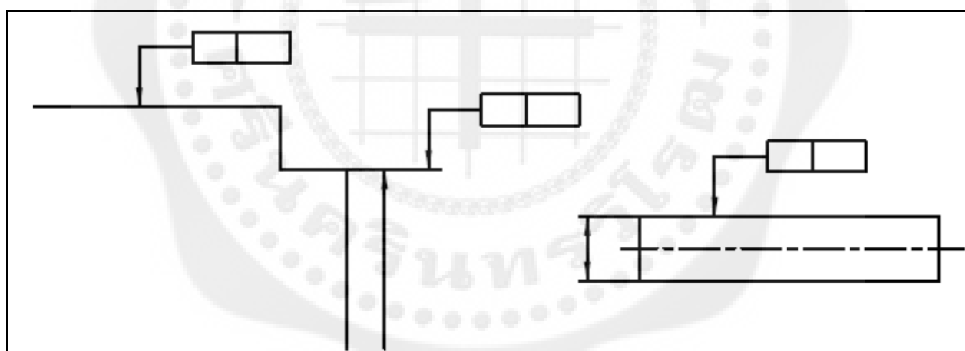
-	0.01	
//	0.05	A

ภาพประกอบ 46 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่มีมากกว่า 1 ลักษณะ

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

การระบุกรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนให้มีความสัมพันธ์กับรูปลักษณะที่จะกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ทำได้โดยเขียนเส้นนำที่มีหัวลูกศรจากกรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไปยังรูปลักษณะที่จะกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ในลักษณะต่างๆ ดังนี้

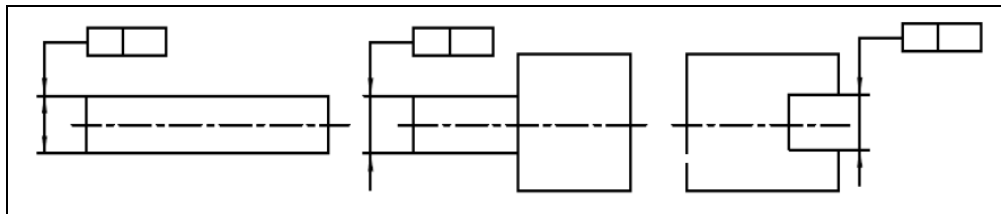
- บนเส้นขอบนอกของรูปลักษณะ หรือบนเส้นที่ต่อจากเส้นขอบนอก (ยกเว้นตรงตำแหน่งเส้นบอกขนาด) เมื่อเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนนี้ใช้ควบคุมเส้นหรือผิวของรูปลักษณะนั้น



ภาพประกอบ 47 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ต่อจากเส้นขอบนอก

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

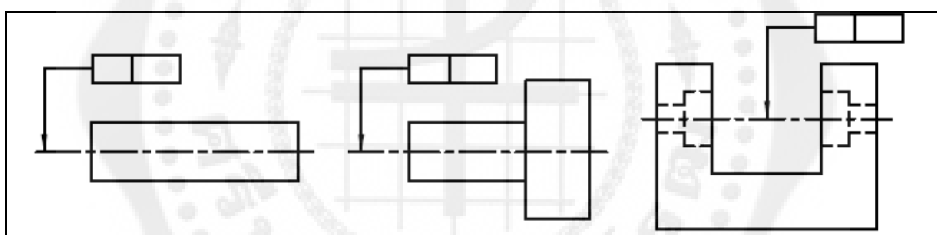
- บนเส้นช่วยบอกขนาดที่ตำแหน่งเส้นบอกขนาด เมื่อเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนนี้ใช้ควบคุมแกนหรือระนาบกลางของรูปลักษณะที่บอกขนาดนั้น



ภาพประกอบ 48 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนบนเส้นบอกขนาด

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

- บนเส้นแกนเมื่อเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนนี้ใช้ควบคุมแกน หรือระนาบกลางของรูปลักษณะทั้งหมดที่ร่วมแกนหรือร่วมระนาบกลางนั้น

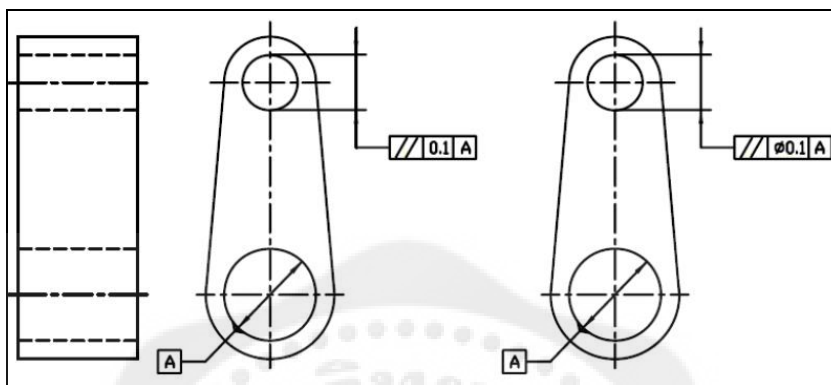


ภาพประกอบ 49 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนบนเส้นแกน

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

15.2 ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

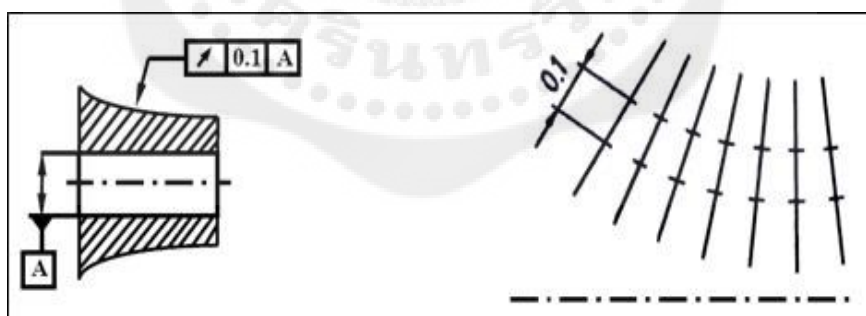
ทิศทางการกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ให้อยู่ในทิศทางเดียวกับลูกศรของเส้นนำซึ่งเชื่อมระหว่างกรอบขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนกับรูปลักษณะที่ควบคุม โดยเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเขียนตามหลังเครื่องหมาย $\varnothing$



ภาพประกอบ 50 ทิศทางการกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

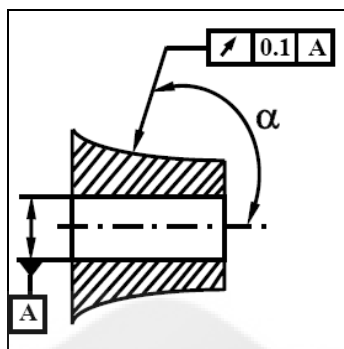
โดยทั่วไป ทิศทางการกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนต้องตั้งฉากกับรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงานที่ควบคุม



ภาพประกอบ 51 ทิศทางการกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ตั้งฉากกับรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงานที่ควบคุม

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

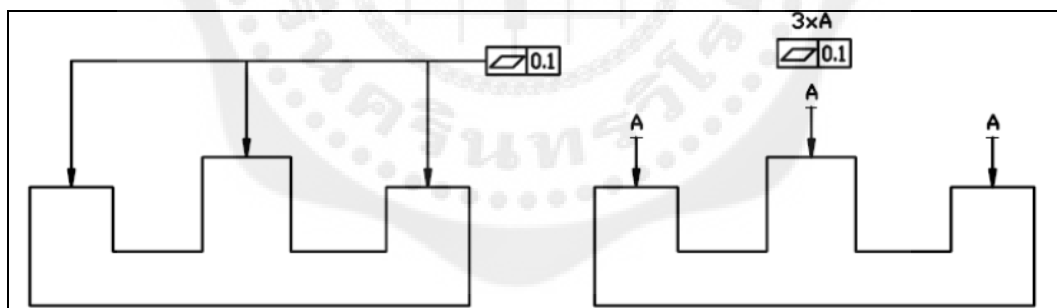
ระบุทิศทางความกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน เมื่อไม่ต้องการให้ทิศทางความกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนตั้งฉากกับรูปร่างทางเรขาคณิตของชิ้นงานที่ควบคุม



ภาพประกอบ 52 ระบุทิศทางความกว้างของขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

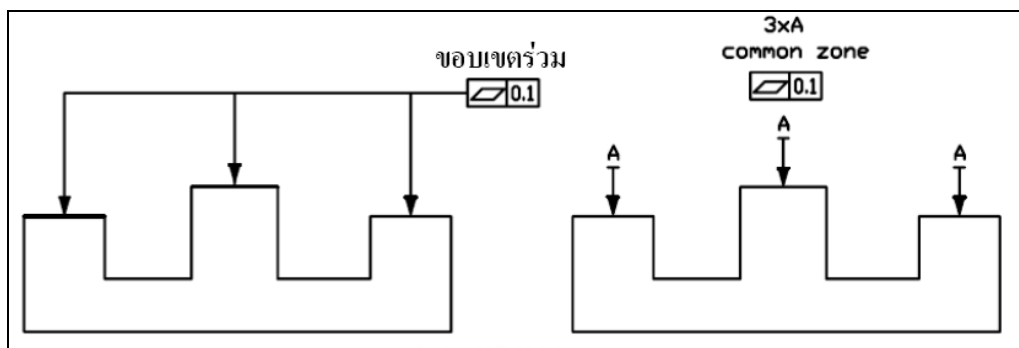
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะแห่งที่มีค่าเท่ากัน เมื่อใช้กับรูปลักษณะซึ่งแยกจากกันหลายๆ แห่ง สามารถระบุได้



ภาพประกอบ 53 ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะแห่งที่มีค่าเท่ากัน

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

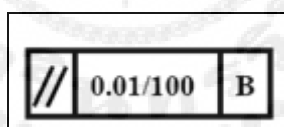
ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนร่วม เมื่อใช้กับรูปลักษณะซึ่งแยกจากกันหลายๆ แห่ง ให้ระบุโดยมีคำว่า “ขอบเขตร่วม” หรือ “common zone” ไว้เหนือกรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน



ภาพประกอบ 54 ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนร่วม

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

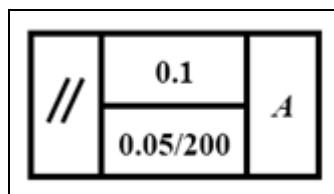
15.3 การระบุที่มีข้อจำกัดถ้ากำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนกับความยาวใดๆ ให้เขียนค่าความยาวนี้ต่อท้ายค่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน โดยคั่นด้วยเส้นเฉียงในกรณีที่มีรูปลักษณะเป็นพื้นผิว การระบุดังกล่าวสามารถนำมาใช้ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะหมายความว่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนนี้ใช้กับเส้นทั้งหมดบนพื้นผิวนั้นตามความยาวจำกัด ในทุกตำแหน่งและทุกทิศทาง (100 หน่วย)



ภาพประกอบ 55 การกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนกับความยาวใดๆ

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

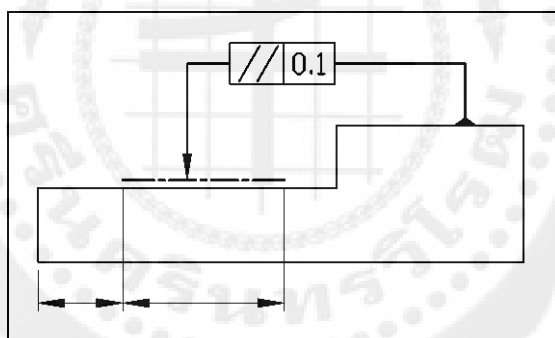
ถ้ากำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปลักษณะใดแล้ว ยังมีการกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนชนิดเดียวกันเพิ่มเติม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและจำกัดด้วยความยาวจำกัด เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนค่าหลังนี้ให้ระบุไว้ได้ค่าแรก



ภาพประกอบ 56 การกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเพิ่มเติมจากที่มีอยู่

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

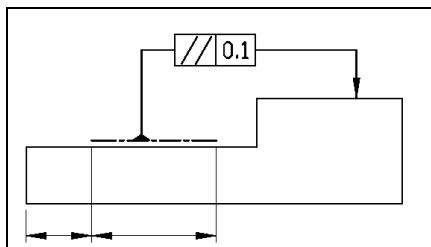
ถ้ากำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนให้เฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งของรูปลักษณะโดยเฉพาะ ให้แสดงส่วนนั้นด้วยเส้นลูกโซ่หนา และบอกขนาดของส่วนนั้นด้วย



ภาพประกอบ 57 การกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่ง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

ถ้ากำหนดเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งของรูปลักษณะเป็นเดดัม ให้แสดงส่วนนั้นด้วยเส้นลูกโซ่หนา และบอกขนาดของส่วนนั้นด้วย



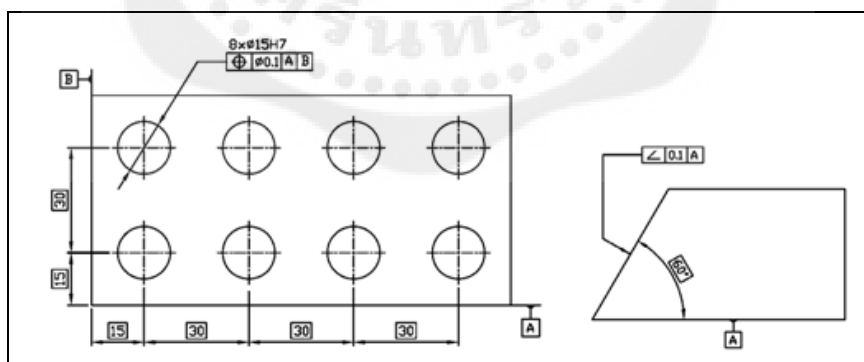
ภาพประกอบ 58 การกำหนดเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งของรูปลักษณะเป็นเดดัม

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

15.4 มิติแท้จริงทางทฤษฎี

ถ้ากำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง (position) หรือรูปหน้าข้าง (profile) หรือความเป็นมุม (angularity) ให้กับรูปลักษณะหนึ่ง มิติแท้จริงทางทฤษฎีที่ใช้กำหนดตำแหน่ง รูปหน้าข้าง หรือมุม ต้องไม่กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาดไว้

มิติเหล่านี้จะเขียนในกรอบสี่เหลี่ยม และมิติในกรอบสี่เหลี่ยมนี้จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อมีการระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปหน้าข้างหรือเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของความเป็นมุมในกรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเท่านั้น

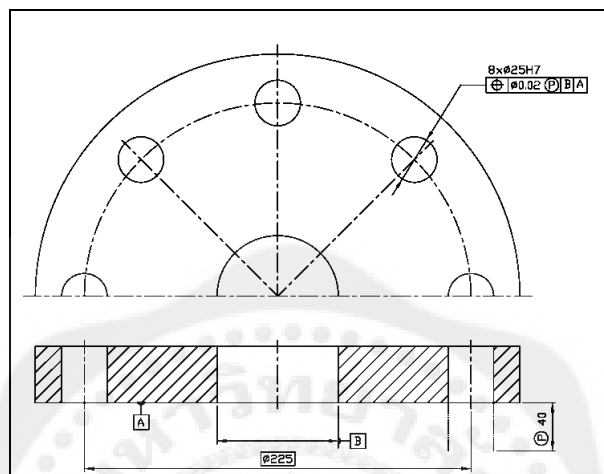


ภาพประกอบ 59 มิติแท้จริงทางทฤษฎี

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

15.5 ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ในบางกรณีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการวางทิศทางและที่ตั้งไม่ได้ใช้กับรูปลักษณะส่วนที่กำหนดโดยตรง แต่ใช้กับส่วนฉายภายนอกของรูปลักษณะนั้น ในกรณีนี้ให้ระบุขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนฉาย โดยเขียนสัญลักษณ์ **(P)** ต่อท้าย



ภาพประกอบ 60 ขอบเขตเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 6 (2529)

เดตัมและระบบเดตัม

เดตัม (datum) หมายถึง สิ่งอ้างอิงทางเรขาคณิตที่แท้จริงทางทฤษฎี (เช่น แกน ระนาบ เส้นตรง) ที่สัมพันธ์กับรูปลักษณะที่ควบคุมโดยเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

ระบบเดตัม (datum-system) หมายถึง กลุ่มของเดตัมตั้งแต่ 2 เดตัมขึ้นไป ที่นำมาใช้อ้างอิงร่วมสำหรับรูปลักษณะที่ควบคุมโดยเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนหนึ่งๆ

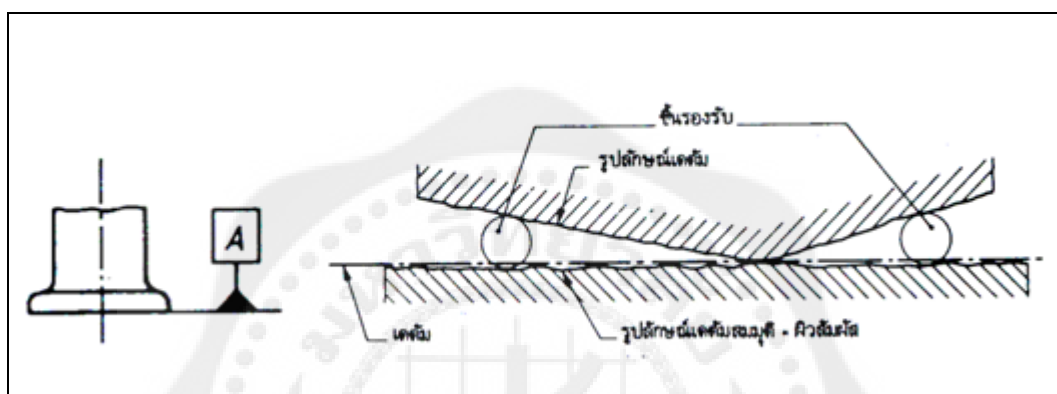
รูปลักษณะเดตัม (datum feature) หมายถึง รูปลักษณะจริงของชิ้นงาน (เช่น ขอบ ผิว รู) ที่ใช้กำหนดที่ตั้งของเดตัม

เดตัมทาร์เก็ต หมายถึง จุด เส้น หรือพื้นที่ที่จำกัดไว้ บนชิ้นงานที่ใช้สัมผัสกับเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตหรือการตรวจสอบ เพื่อให้การกำหนดเดตัมตรงกับจุดประสงค์ที่ต้องการ

รูปลักษณะเดตัมสมมุติ (simulated datum feature) หมายถึง ผิวจริงที่มีความเที่ยงตรงเพียงพอของรูปร่าง (เช่น โต๊ะระดับ รองลื่น แมนเดรล (mandrel)) ที่สัมผัสกับรูปลักษณะเดตัม เพื่อใช้หาเดตัม

16. การหาเดดัม โดยปกติรูปลักษณะที่จะระบุเป็นเดดัมจะมีความไม่เที่ยงตรงเนื่องจากกรรมวิธีผลิต ความไม่เที่ยงตรงเหล่านี้อาจปรากฏเป็นความเบี่ยงเบนในรูปของความหนา ความกว้าง หรือความเป็นกรวย จึงจำเป็นต้องมีวิธีต่างๆ ในการหาเดดัม ดังตัวอย่างต่อไปนี้

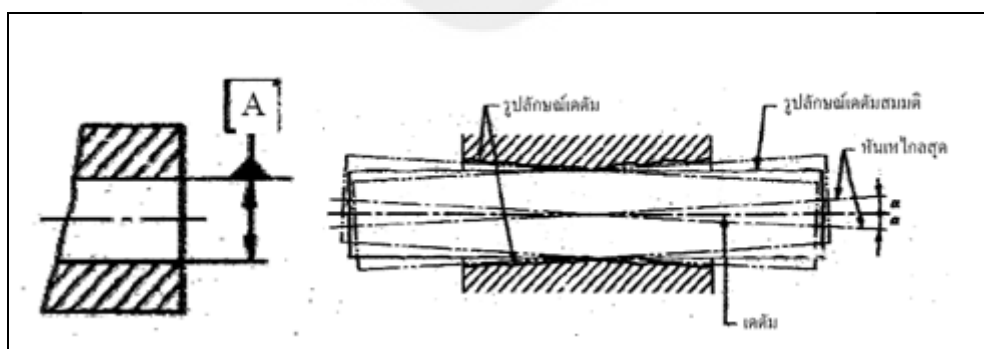
16.1 เดดัมที่เป็นเส้นตรงหรือระนาบ ให้จัดวางรูปลักษณะเดดัมในลักษณะที่ระยะห่างมากที่สุด ระหว่างรูปลักษณะเดดัมกับรูปลักษณะเดดัมสมมติ มีค่าน้อยที่สุด ถ้ารูปลักษณะเดดัมวางบนผิวสัมผัสแล้วไม่มั่นคงให้ใช้ชั้นรองรับที่เหมาะสมวางรองรับ สำหรับรูปลักษณะที่เป็นเส้นให้ใช้ชั้นรองรับ 2 ชั้น (ภาพที่ 61) และสำหรับรูปลักษณะที่เป็นผิวราบให้ใช้ชั้นรองรับ 3 ชั้น



ภาพประกอบ 61 เดดัมที่เป็นเส้นตรงหรือระนาบ

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

16.2 เดดัมที่เป็นแกนของทรงกระบอกเดดัม ในที่นี้ คือ แกนของทรงกระบอกที่เล็กที่สุดบรรจุภายในรู (ภาพที่ 62) หรือแกนของทรงกระบอกที่เล็กที่สุด ซึ่งสามารถล้อมรอบภายนอกเพลลา โดยทรงกระบอกนี้จะวางในตำแหน่งที่การเคลื่อนที่ทุกทิศทางมีระยะเท่ากัน

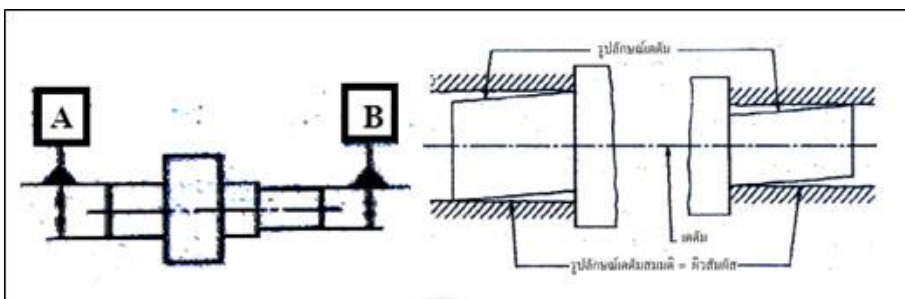


ภาพประกอบ 62 เดดัมที่เป็นแกนของทรงกระบอก

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

16.3 เดตัมที่เป็นแกนร่วมหรือระนาบกลางร่วม

ภาพประกอบ 63 แสดงตัวอย่างเดตัมที่เป็นแกนร่วม ซึ่งได้จากทรงกระบอกร่วมแกน 2 ทรงกระบอกที่เล็กที่สุดซึ่งสามารถล้อมรอบภายนอก



ภาพประกอบ 63 เดตัมที่เป็นแกนร่วมหรือระนาบกลางร่วม

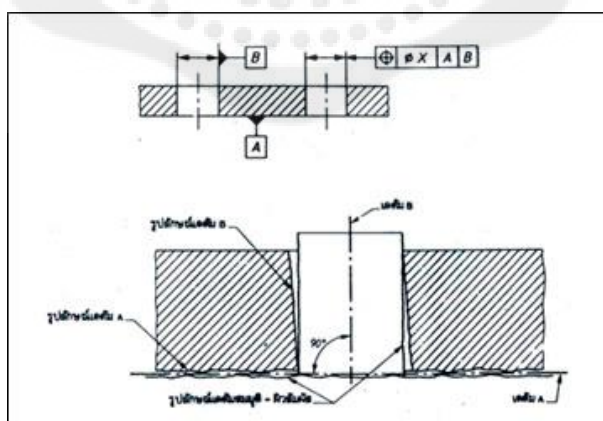
ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

16.4 เดตัมที่เป็นแกนของทรงกระบอกและตั้งฉากกับระนาบ

ภาพที่ 64 แสดงตัวอย่างเดตัมที่เป็นแกนของทรงกระบอกและตั้งฉากกับระนาบที่กำหนด โดยที่

เดตัม “A” คือ ระนาบซึ่งแทนโดยหน้าสัมผัสของผิวราบ

เดตัม “B” คือ แกนของทรงกระบอกที่ใหญ่ที่สุดซึ่งสามารถบรรจุภายในรูและตั้งฉากกับเดตัม “A”



ภาพประกอบ 64 เดตัมที่เป็นแกนของทรงกระบอกและตั้งฉากกับระนาบ

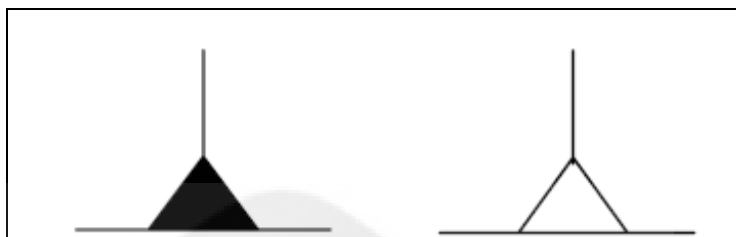
ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

17. การระบุเด็ตัมและระบบเด็ตัมในแบบ

17.1 สัญลักษณ์ของเด็ตัม

17.1.1 สามเหลี่ยมเด็ตัม

สามเหลี่ยมเด็ตัมที่ใช้ในการชื่อบอกเด็ตัมนั้น ให้เขียนเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีเส้นนำสามเหลี่ยมเด็ตัมนี้จะเป็นสามเหลี่ยมทึบหรือไม่ทึบก็ได้

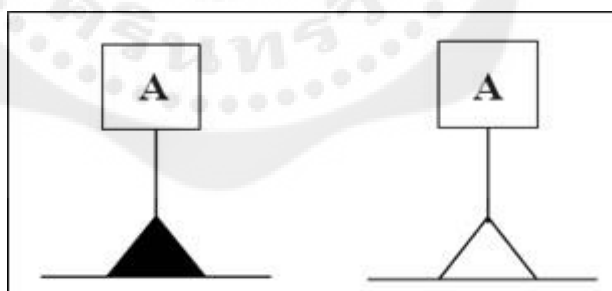


ภาพประกอบ 65 สามเหลี่ยมเด็ตัม

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

17.1.2 ตัวอักษรเด็ตัม

ตัวอักษรเด็ตัมใช้ในการบ่งบอกเด็ตัม โดยเขียนเป็นตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในกรอบต่อจากสามเหลี่ยมเด็ตัม (ภาพที่ 66) และไม่ต้องเขียนตัวอักษรเด็ตัม ถ้ากรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสามารถตรงกับรูปลักษณ์เด็ตัมโดยตรงได้ ด้วยเส้นนำ



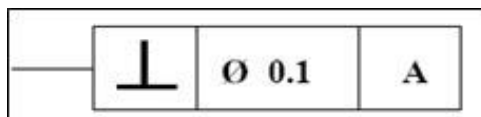
ภาพประกอบ 66 ตัวอักษรเด็ตัม

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

18. เดตั้มและระบบเดตั้มที่ระบุในกรอบเกณฑัความคลาดเคลื่อน

18.1 เดตั้มที่กำหนดัโดยรูปลักษณัเดัียว

เมื่อดีตั้มถูกกำหนดัโดยรูปลักษณัเดัียว ให้ระบุเดตั้มโดยเขียนตัวอักษรเดตั้มเพัยงตัว เดัียวลงในช่องที่ 3 ของกรอบเกณฑัความคลาดเคลื่อน

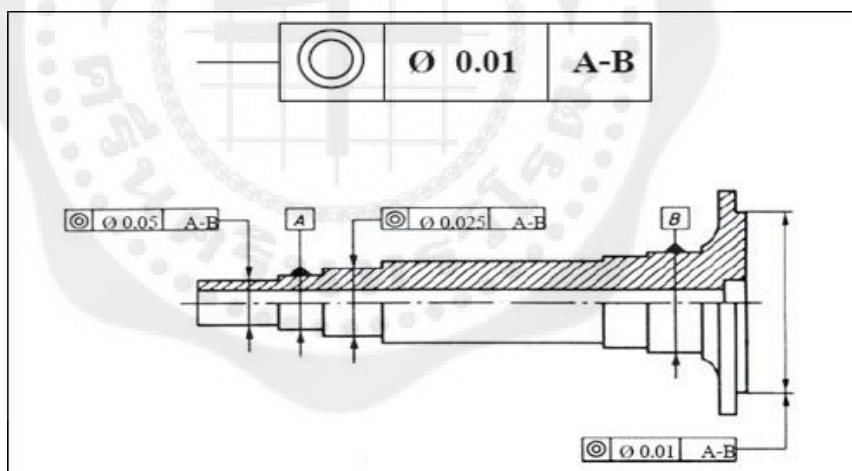


ภาพประกอบ 67 เดตั้มที่กำหนดัโดยรูปลักษณัเดัียว

ที่มา: มาตรฐานผลัตภัณัที่อุตสาหกรรรม 210 เล่ม 8 (2529)

18.2 เดตั้มร่วมที่กำหนดัโดยรูปลักษณั 2 ลัษณะ

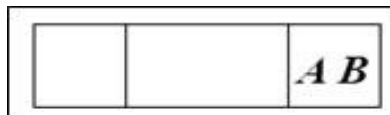
เมื่อดีตั้มร่วมถูกกำหนดัโดยรูปลักษณั 2 ลัษณะ ให้ระบุเดตั้มโดยเขียนตัวอักษรเดตั้ม 2 ตัว ซึ่งแยกจากกันด้วยเส้นขัีดนอนลงในช่องที่ 3 ของกรอบเกณฑัความคลาดเคลื่อน



ภาพประกอบ 68 เดตั้มร่วมที่กำหนดัโดยรูปลักษณั 2 ลัษณะ

ที่มา: มาตรฐานผลัตภัณัที่อุตสาหกรรรม 210 เล่ม 8 (2529)

ถ้าไม่จำเป็นต้องเรียงลำดับรูปลักษณะที่กำหนดเป็นเดตัม ให้ระบุเดตัมโดยเขียนตัวอักษรเดตัมในช่องเดียวกัน

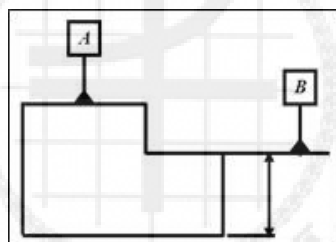


ภาพประกอบ 70 ระบบเดตัมที่กำหนดโดยรูปลักษณะ 2 ลักษณะที่ไม่จำเป็นต้องเรียงลำดับรูปลักษณะที่กำหนดเป็นเดตัม

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

19. การระบุฐานของสามเหลี่ยมเดตัม

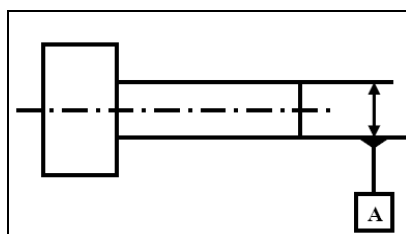
กำหนดไว้บนเส้นขอบนอกของรูปสัญลักษณ์ หรือบนเส้นที่ต่อจากเส้นขอบนอก (ยกเว้นตรงตำแหน่งเส้นบอกขนาด) เมื่อรูปสัญลักษณ์เดตัม คือ เส้นหรือผิวของรูปสัญลักษณ์นั้น



ภาพประกอบ 71 การกำหนดไว้บนเส้นขอบนอกของรูปลักษณะ

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

บนเส้นช่วยบอกขนาดที่ตำแหน่งเส้นบอกขนาด เมื่อเดตัมคือ แกนหรือระนาบกลาง

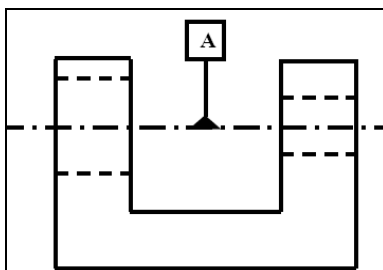


ภาพประกอบ 72 บนเส้นช่วยบอกขนาดที่ตำแหน่งเส้นบอกขนาด

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

บนแกนหรือระนาบกลาง เมื่อเดดัมคือ

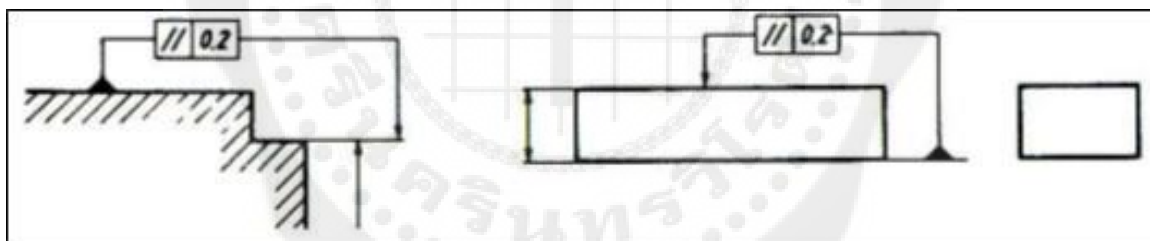
- แกนหรือระนาบกลางของรูปลักษณะเดียว เช่น ทรงกระบอก
- แกนร่วมหรือระนาบร่วมที่เกิดจากรูปลักษณะ 2 ลักษณะ



ภาพประกอบ 73 เดดัมบนแกนร่วมหรือระนาบร่วมที่เกิดจากรูปลักษณะ 2 ลักษณะ

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

ถ้ารอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสามารถตรงกับรูปลักษณะเดดัมด้วยเส้นนำได้โดยตรง ก็ไม่ต้องเขียนตัวอักษรเดดัม

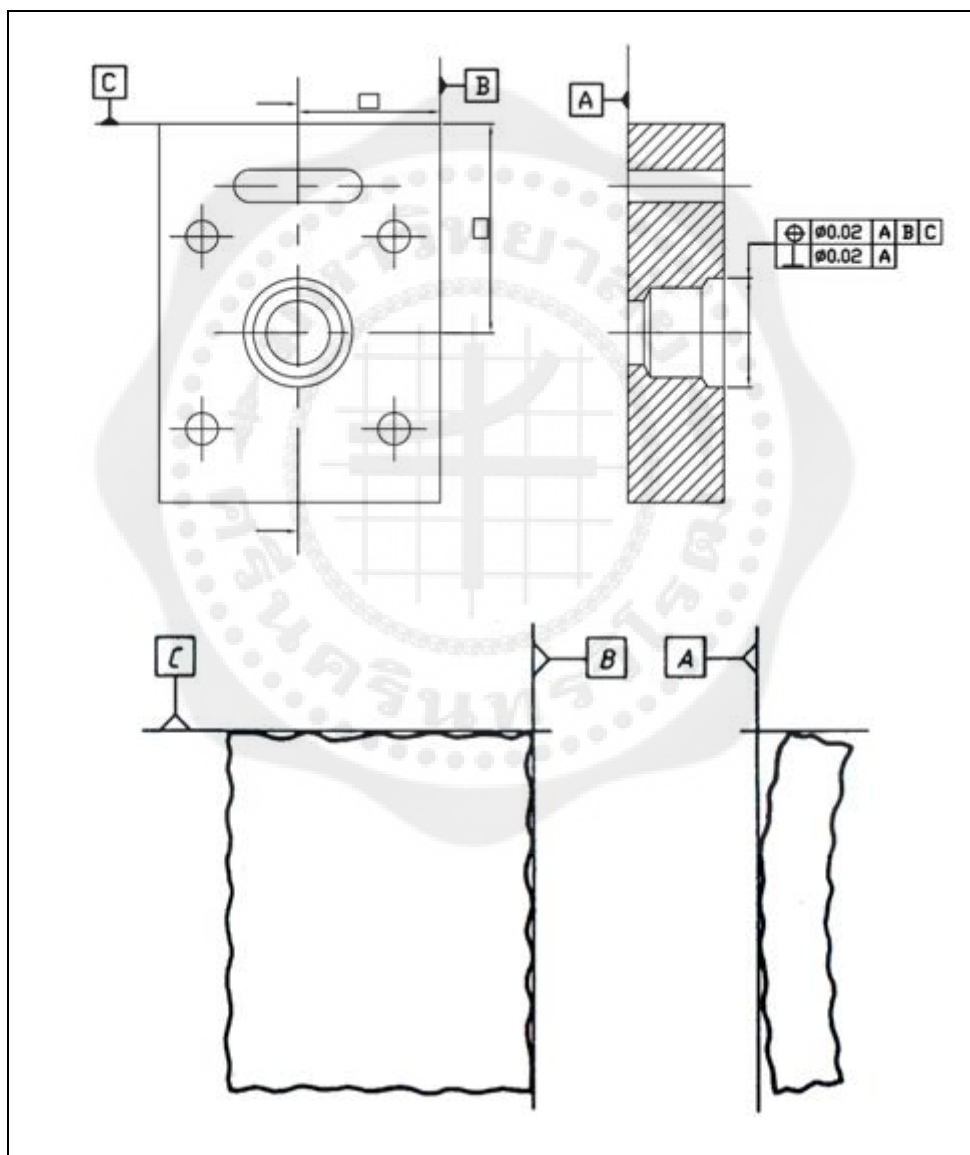


ภาพประกอบ 74 กรอบเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่สามารถตรงกับรูปลักษณะเดดัมด้วยเส้นนำได้โดยตรง

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

20. เดตั้มทาร์เก็ต

ถ้ารูปลักษณะเดตั้มมีความคลาดเคลื่อนของรูปร่างจากรูปร่างตามอุดมคติมาก การใช้ผิวทั้งหมดเป็นรูปลักษณะเดตั้มอาจทำให้ผลการวัดแต่ละครั้งแตกต่างกัน จึงอาจจำเป็นต้องกำหนดเดตั้มทาร์เก็ตขึ้น ก่อนกำหนดเดตั้มทาร์เก็ตจำเป็นต้องพิจารณาว่า การกำหนดเดตั้มโดยใช้เดตั้มทาร์เก็ตแทนที่จะใช้ผิวทั้งหมด จะมีผลเสียต่อการใช้งานของชิ้นงานอันเนื่องมาจากความเบี่ยงเบนจากรูปร่างหรือตำแหน่งทางเรขาคณิตตามอุดมคติหรือไม่



ภาพประกอบ 75 การกำหนดเดตั้มทาร์เก็ต

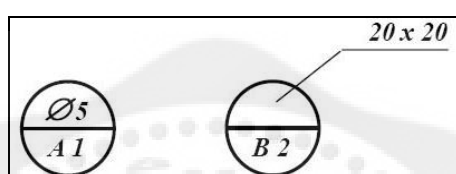
ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

21. สัญลักษณ์สำหรับเดนมาร์กเกิด

การระบุเดนมาร์กเกิดในแบบ ให้ใช้สัญลักษณ์ต่อไปนี้

กรอบเดนมาร์กเกิด ข้อกำหนดที่จำเป็นต่างๆ จะเขียนในกรอบวงกลม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่องด้วยเส้นระดับ ช่องล่างสำหรับเขียนตัวอักษรและตัวเลข (ตัวอักษรใช้แทนรูปลักษณะเดนมาร์ก ตัวเลขใช้แทนหมายเลขเดนมาร์กเกิด)

ช่องบนสำหรับเขียนข้อกำหนดเพิ่มเติม เช่น มิติของพื้นที่เดนมาร์กเกิด ถ้าที่ว่างในช่องนี้ไม่พอเขียนก็ให้เขียนข้อกำหนดเพิ่มเติมไว้นอกกรอบและต่อกับช่องบนโดยเส้นนำกรอบเดนมาร์กเกิดจะต่อกับเดนมาร์กเกิด โดยเส้นนำที่มีหัวลูกศร



ภาพประกอบ 76 กรอบเดนมาร์กเกิด

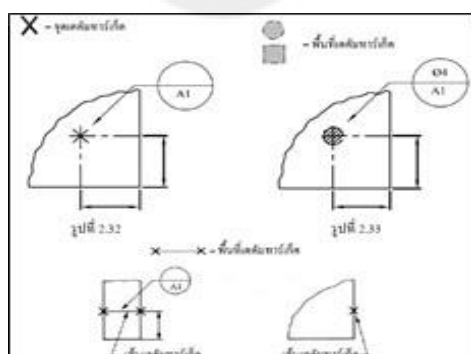
ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

เดนมาร์กเกิด

ถ้าเดนมาร์กเกิด เป็น

1. จุด ให้ระบุโดยใช้เครื่องหมายกากบาท
2. เส้น ให้ระบุโดยใช้เครื่องหมายกากบาท 2 ตัว และต่อกันด้วยเส้นเติมบาง
3. พื้นที่ ให้ระบุโดยใช้พื้นที่แรเงา ที่ล้อมรอบด้วยเส้นลูกโซ่บางขีดสั้นคู่ (thin double dashed line)

(thin double dashed line)



ภาพประกอบ 77 ชนิดของเดนมาร์กเกิด

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

22. การระบุในแบบ

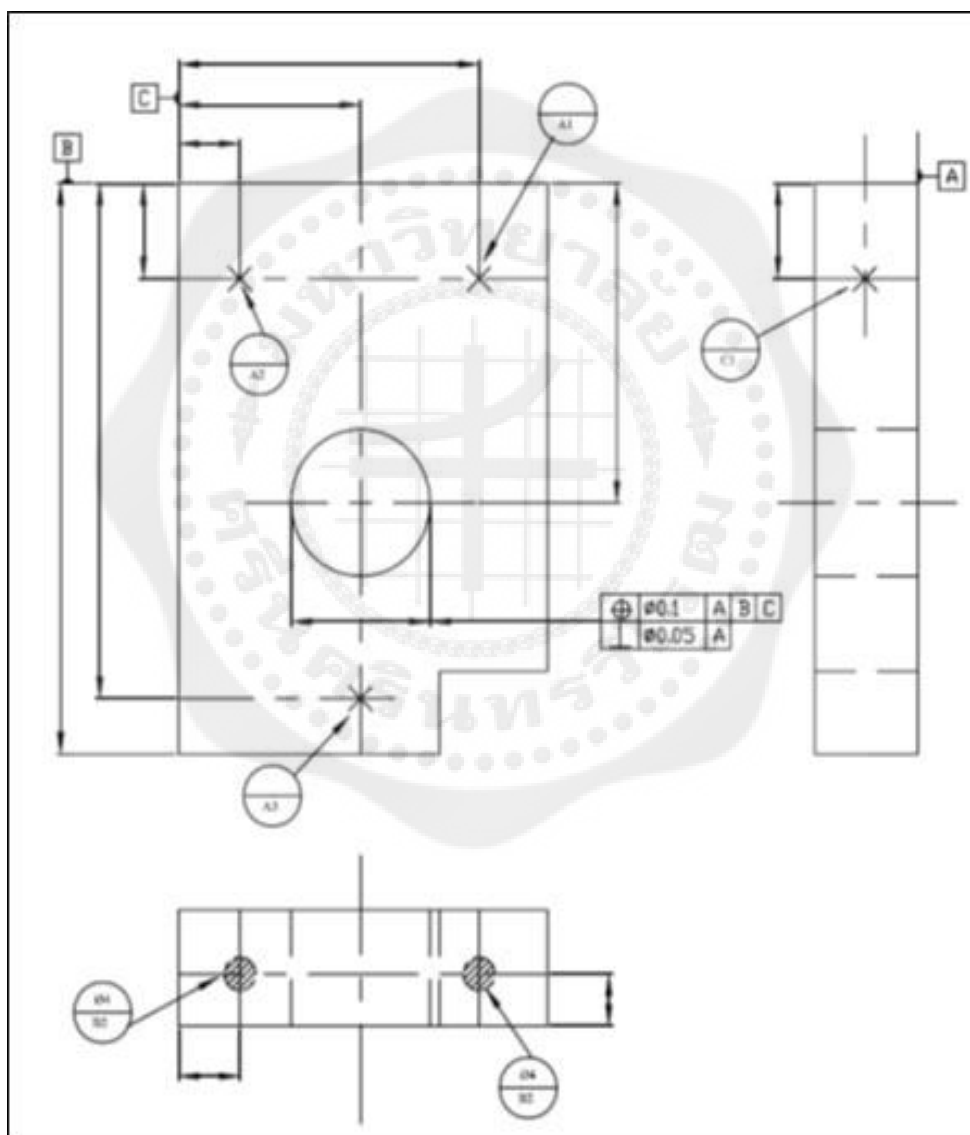
สัญลักษณ์จะต้องเขียนบนภาพที่สามารถแสดงผิวที่เกี่ยวข้องได้ชัดเจน การแสดงมิติของตำแหน่งของเดนมาร์กเกิด ให้แสดงบนภาพที่มองเห็นเดนมาร์กเกิดได้ชัดเจนที่สุด

จากภาพที่ 78 ระบุ

เดนมาร์กเกิด “A1” “A2” และ “A3” ใช้กำหนดเป็นเดนมาร์ก “A”

เดนมาร์กเกิด “B1” และ “B2” ใช้กำหนดเป็นเดนมาร์ก “B”

เดนมาร์กเกิด “C1” ใช้กำหนดเป็นเดนมาร์ก “C”

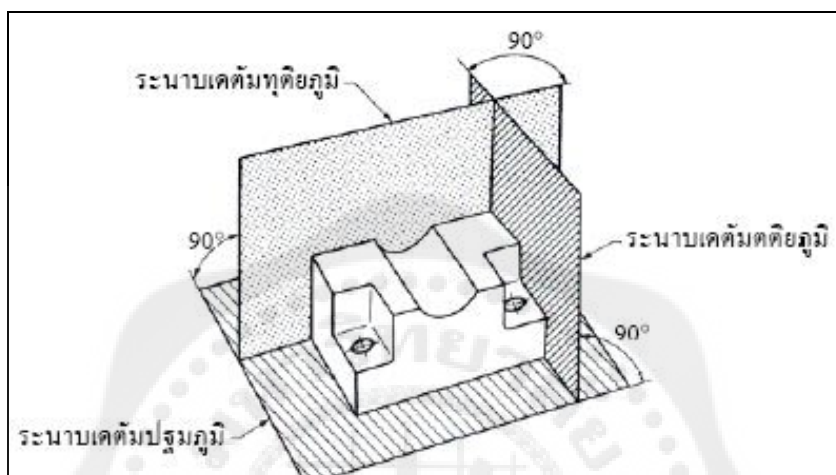


ภาพประกอบ 78 การระบุเดนมาร์กเกิดในแบบ

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

23. ระบบเดตัมสามระนาบ

การกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการวางทิศทาง หรือความสัมพันธ์ของตำแหน่งโดยทั่วไปใช้เดตัมเดียวหรือสองเดตัมเท่านั้น อย่างไรก็ตาม มีบ่อยครั้งที่ต้องใช้ระบบเดตัมสามระนาบซึ่งระนาบทั้งสามตั้งฉากซึ่งกันและกัน และจำเป็นต้องพิจารณาถึงการเรียงลำดับความสำคัญด้วย ระนาบเหล่านี้ คือ ระนาบเดตัมปฐมภูมิ ระนาบเดตัมทุติยภูมิ และระนาบเดตัมตติยภูมิ



ภาพประกอบ 79 ระบบเดตัมสามระนาบ

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

ดังนี้

ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้เดตัมทาร์เก็ตในระบบเดตัมสามระนาบ ในแต่ละระนาบให้ใช้

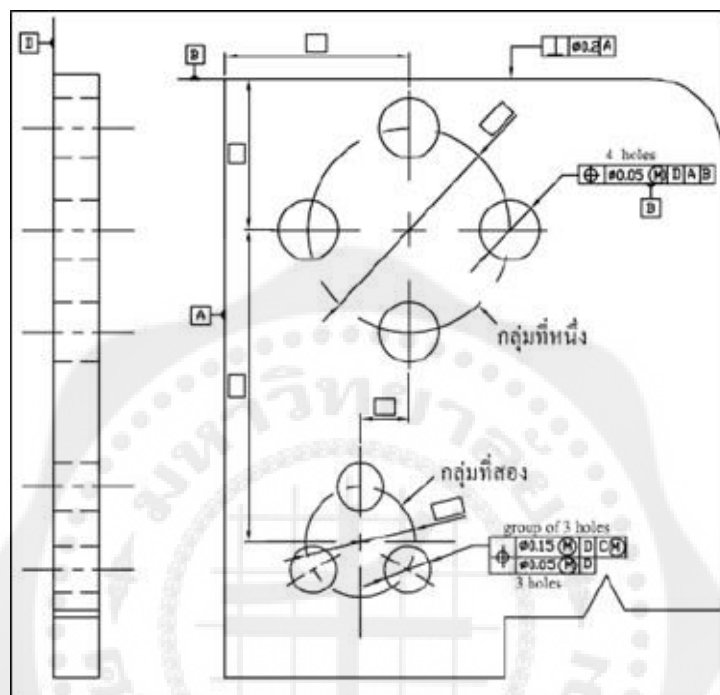
เดตัมปฐมภูมิ ใช้ 3 เดตัมทาร์เก็ต (จุดหรือพื้นที่)

เดตัมทุติยภูมิ ใช้ 2 เดตัมทาร์เก็ต (จุดหรือพื้นที่)

เดตัมตติยภูมิ ใช้ 1 เดตัมทาร์เก็ต (จุดหรือพื้นที่)

24. การกำหนดกลุ่มของรูปลักษณะเป็นเด็ตัม

เมื่อต้องการให้ตำแหน่งจริงของกลุ่มลักษณะรูปทรงหนึ่ง เช่น รู เป็นเด็ตัมสำหรับรูปลักษณะหรือกลุ่มของรูปลักษณะอื่น ให้แสดงในแบบ โดยเขียนสามเหลี่ยมเด็ตัม ที่ครอบคลุมถึงความคลาดเคลื่อนของกลุ่มรูปลักษณะนั้น



ภาพประกอบ 80 การกำหนดกลุ่มของรูปลักษณะเป็นเด็ตัม

ที่มา: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 210 เล่ม 8 (2529)

กลุ่มที่หนึ่งซึ่งมีรู 4 รู ใช้กำหนดเป็นเด็ตัม “C”

กลุ่มที่สองซึ่งมีรู 3 รู ต้องการเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งระหว่างรูปลักษณะแต่ละลักษณะในกลุ่มที่สองละเอียดกว่าเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งทั้งกลุ่มอ้างอิงกับเด็ตัม “C”

2.2 โครงข่ายประสาทเทียมและการประยุกต์ใช้

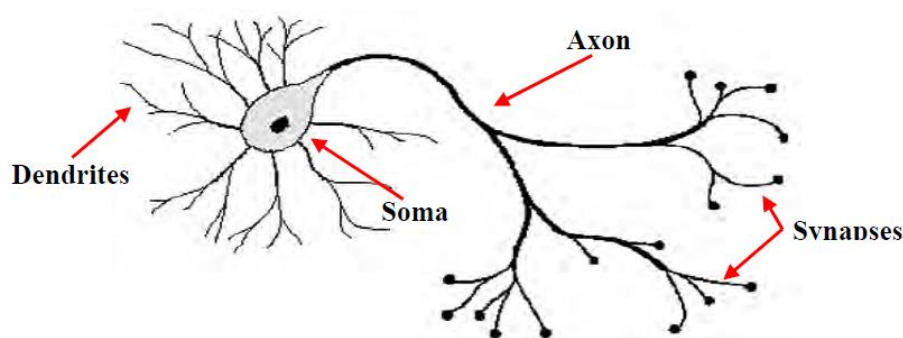
2.2.1 โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural networks)

คือโมเดลทางคณิตศาสตร์หรือโมเดลทางคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลคำนวณแบบคอนเนกชันนิสต์ (connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ โดยโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) และการสร้างความรู้ใหม่ (knowledge extraction) เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์โดยคนหรือผู้เชี่ยวชาญสามารถที่จะคิดและวิเคราะห์ได้อย่างลึกลับซับซ้อน จึงได้มีการนำแนวคิดการทำงานของสมองมนุษย์นั้นมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพผ่านการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ โดยวิธีการนี้จะทำหน้าที่คล้ายกับสมองของมนุษย์ในรูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม อันเป็นการทำงานของเซลล์ประสาท (nerve cells) ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า นิวรอน (neuron)

แนวคิดเริ่มต้นของเทคนิคนี้ได้มาจากการศึกษาโครงข่ายไฟฟ้าชีวภาพ (bioelectric network) ในสมอง ซึ่งประกอบด้วย เซลล์ประสาท หรือ "นิวรอน" (neurons) และ "จุดประสานประสาท" (synapses) แต่ละเซลล์ประสาทประกอบด้วยปลายในการรับกระแสประสาทเรียกว่า "เดนไดรต์" (dendrite) ซึ่งเป็น input และปลายในการส่งกระแสประสาทเรียกว่า "แอกซอน" (axon) ซึ่งเป็นเหมือน output ของเซลล์ เซลล์เหล่านี้ทำงานด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอกหรือกระตุ้นด้วยเซลล์ด้วยกัน กระแสประสาทจะวิ่งผ่านเดนไดรต์เข้าสู่นิวเคลียสซึ่งจะเป็นตัวตัดสินใจว่าต้องกระตุ้นเซลล์อื่น ๆ ต่อหรือไม่ ถ้ากระแสประสาทแรงพอ นิวเคลียสก็จะกระตุ้นเซลล์อื่น ๆ ต่อไปผ่านทางแอกซอนของมัน

โดยรูปร่างลักษณะของนิวรอนในสมองมนุษย์นั้นดังแสดงในภาพประกอบที่ 81 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับต้นไม้ที่ปราศจากใบที่แต่ละกิ่งและรากที่เชื่อมโยงกันด้วยลำต้น โดยส่วนประกอบการทำงานหลักของข่ายประสาทคือเซลล์ประสาท และกลุ่มเซลล์ประสาทนั้นจะมีการรับรู้ โดยมีการทำงานคือจะรับอินพุต (input) จากแหล่งต่าง ๆ นำมารวมเข้าด้วยกันและ มีการทำงานในแบบไม่เป็นเส้นตรง (non-Linear) และส่งเอาต์พุตสุดท้ายออกมา

มนุษย์นั้นมีความซับซ้อนในกระบวนการคิดซ้ำ ทำให้เซลล์ประสาทมีความหลากหลาย อย่างมาก อย่างไรก็ตาม เซลล์ประสาทตามธรรมชาติทั้งหมดมีส่วนประกอบพื้นฐาน 4 ส่วนเหมือนๆ กัน ส่วนประกอบเหล่านี้เรียกตามชื่อทางชีววิทยาว่า เดนไดรต์ (dendrites), โซมา (soma), แอ็กซอน (axon) และซินแนปส์ (synapses) ดังภาพประกอบที่ 81



ภาพประกอบ 81 แสดงความสัมพันธ์ของระบบประสาททั้ง 4 ส่วน (Maureen Candill, 1989)

ที่มา: http://kb2tmp.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2132/8/284819_ch3.pdf

เดนไดรต์เป็นส่วนขยายหรือส่วนต่อของโซมา ซึ่งมีลักษณะคล้ายขนซึ่งทำหน้าที่เหมือนเป็นช่องทางนำเข้าของค่าอินพุต และเดนไดรต์จะทำการรับอินพุตผ่านซินแนปส์ของเซลล์ประสาทอื่น โดยโซมาจะคอยประมวลผลสัญญาณไฟฟ้าที่รับเข้ามาตลอดเวลา แล้วส่งผลการทำงานเป็นเอาต์พุตออกไปให้เซลล์ประสาทอื่น โดยผ่านทางแอกซอนและซินแนปส์

การเรียนรู้และความทรงจำเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดในการนำมาใช้งานการเรียนรู้ของมนุษย์ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีชีวภาพเพียงอย่างเดียว แต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายวิภาค (anatomical alterations) ควบคู่ไปด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายวิภาคนี้จะไม่เกิดกับนิวรอนหรือซินแนปส์เพียงตัวเดียวหรือจุดเดียว คือ จะเกิดกับหลายๆ นิวรอน พร้อมๆ กัน เมื่อถึงเวลาหนึ่งนิวรอน ก็จะหมดหน้าที่ไป แต่การลบเลือนของความทรงจำจะไม่เหมือนกับการสลายไปของนิวรอน นิวรอนตัวหนึ่ง จะร่วมงานกับนิวรอนอีกหลายตัวเพื่อก่อให้เกิดรูปแบบของความทรงจำสำหรับเรื่องใดเรื่องหนึ่งขึ้นในสมอง หมายความว่าความจำในเรื่องหนึ่ง ๆ มักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของนิวรอนหลาย ๆ ตัว และจะเกิดในส่วนใดส่วนหนึ่งของสมอง โดยแต่ละส่วนของสมองจะแบ่งหน้าที่และความถนัดในเรื่องที่ต่างกันออกไป

นิวรอนเหล่านี้ คือ รากฐานระบบประสาทของมนุษย์รวมทั้งการทำหน้าที่ในด้านการคิดคำนึงต่าง ๆ ด้วย โดยจำนวนนิวรอนที่มีอยู่ในสมองมนุษย์นั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยนิวรอนแต่ละตัวจะเชื่อมโยงกับนิวรอนตัวอื่นอีกนับพันตัว และเชื่อกันว่าความรู้ทั้งหมดของมนุษย์นั้นจะเก็บไว้ในจุดเชื่อมโยง (connections) ต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับความเข้มของการเชื่อมโยงด้วย สิ่งเหล่านี้ทำให้มนุษย์สามารถเรียน คิด จดจำ หรือระลึกถึงสิ่งที่จำไว้ เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างฉับพลัน จึงเป็นความมหัศจรรย์ที่คอมพิวเตอร์ไม่สามารถทำได้

2.2.2 คุณสมบัติของโครงการข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมนั้น มีคุณสมบัติที่เทียบเท่ากับสมองมนุษย์คนเรา ในด้านการเรียนและจดจำ เช่น สมองของมนุษย์เรานั้น เมื่อได้รับการเรียนรู้บางสิ่งหลาย ๆ ครั้งนั้น ก็เกิดการจดจำ และเมื่อพบเห็นสิ่งที่ไม่เคยได้เรียนรู้มาก่อนก็สามารถที่จะอนุมานได้ว่าสิ่งนั้นคืออะไร จากความรู้ที่ได้รับจากการเรียนรู้ในก่อนหน้าที่ผ่านมา โครงข่ายประสาทมีคุณสมบัติ 2 ประการ คือ (Wasserman, 1998)

1) การเรียนรู้ (learning) โครงข่ายประสาทสามารถเรียนรู้จากชุดฝึกสอนที่ได้ทำการป้อนให้โครงข่ายประสาทเทียมได้เรียนรู้

2) การระลึกหรือจดจำได้ (recall) โครงข่ายประสาทเทียมสามารถระลึกได้ทั้งชุดฝึกสอนและชุดทดสอบหรือชุดทั่วไป ได้ดีในระดับที่ยอมรับได้ โดยชุดทดสอบจะมีความแตกต่างจากชุดฝึกสอน ซึ่งความแตกต่างนั้นเรียกว่ามีสิ่งบิดเบือนของข้อมูลนั้น ๆ ซึ่งเป็นลักษณะของสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้น

โครงข่ายประสาทเทียมในทัศนะของคอมพิวเตอร์นั้น จะประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผล (processing elements (PE)) ที่เชื่อมโยงกันหลายตัว ทำงานในลักษณะขนานกันไปคล้ายกับนิวรอนในสมองของมนุษย์ เพื่อแปลงข้อมูลจากรูปแบบหนึ่งไปสู่อีกรูปแบบหนึ่ง การใช้โครงข่ายประสาทเทียมนี้จะเป็นการปรับรูปแบบของการสอนให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้แทนที่จะเป็นการป้อนโปรแกรมให้กับคอมพิวเตอร์ โดยจุดมุ่งหมายของการสอนนิวรอนหรือการป้อนข้อมูลที่ต้องการให้กับคอมพิวเตอร์เรียนรู้ คือ การทำให้ระบบคอมพิวเตอร์นี้สามารถแสดงคำตอบในรูปแบบที่ต้องการได้ ซึ่งจะเป็นการป้อนข้อมูลที่ถือว่ารู้อยู่แล้วเข้าไปให้โครงข่ายประสาทเทียมพร้อมด้วยค่าเอาต์พุตที่ต้องการให้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นแสดงออกมา จากนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการคำนวณและปรับค่าตัวเลขน้ำหนักเองโดยใช้กฎเกณฑ์ต่าง ๆ เข้าช่วยจนกระทั่งเอาต์พุตที่ได้ออกมานั้นถูกต้องแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ส่วนตัวเลขที่เป็นกลไกที่ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้และจดจำได้นั้นจะอยู่ในรูปที่เรียกว่า “เมตริกซ์น้ำหนัก” โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดในรูปแบบของ “เมตริกซ์ของค่าและค่าน้ำหนักของแต่ละคำหรือวลี” ลักษณะการทำงานแบบนี้ จะทำให้ผู้ใช้โครงข่ายประสาทเทียม สามารถที่จะป้อนข้อมูลใหม่ ๆ เข้าไปแล้วปล่อยให้ป้อนหน้าที่ของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดนั้น ๆ ที่จะหาทางที่จะจัดการปรับตัวเพื่อที่จะหาคำตอบนั้นเอาเอง ความก้าวหน้าของโครงข่ายประสาทเทียมในปัจจุบันเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถแก้ปัญหาให้กับงานบางประเภทที่ไม่สามารถทำงานได้จนสัมฤทธิ์ผล และให้คำตอบในแบบที่ผู้ใช้งานพึงพอใจ

ข้อเปรียบเทียบระหว่างการประมวลผลแบบดั้งเดิมกับโครงข่ายประสาทเทียม

1. การประมวลผลแบบดั้งเดิม (traditional approach)

เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลโดยมนุษย์ ดังนั้นทรัพยากรมนุษย์จะถูกใช้ในการพัฒนาอัลกอริทึมและโปรแกรม

2. การประมวลผลแบบโครงข่ายประสาทเทียม (neural network approach)

ในกระบวนการสอน จะมีการสอนวนซ้ำหลาย ๆ รอบ เพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียม เกิดการเรียนรู้ เมื่อสิ้นสุดการสอนแล้วโครงข่ายประสาทเทียมก็จะสามารถจำแนกข้อมูลได้ และเมื่อมีข้อมูลใหม่ ๆ ที่ต้องการให้โครงข่ายรู้จักก็สามารถทำในทำนองเดียวกันและต้องมีการสอนใหม่ แต่ทำให้ประหยัดเวลาและแรงงานในการพัฒนาโปรแกรมขึ้นมาใหม่

การเก็บข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบกระจายและถูกใช้ร่วมกันโดยหลาย ๆ เซลล์ประสาท ซึ่งต่างกับแบบดั้งเดิม คือ ข้อมูลจะเก็บไว้ในหน่วยความจำ การเก็บข้อมูลของโครงข่ายประสาทเทียมแบบกระจายนั้นทำให้เกิดความซ้ำซ้อน ซึ่งเป็นการเพิ่มความทนทาน คือ เป็นระบบสำรองทดแทน (fault/error tolerance system)

รูปแบบของโครงข่ายประสาทเทียม ส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบที่สำคัญ เช่น รูปแบบการเรียนรู้ภายในส่วนโปรเซสซึ่ง มีการบวก การคูณ การลบตัวเลขบรรจุอยู่หน่วยโปรเซสซึ่งในโครงข่ายประสาทเทียมจะทำงานสัมพันธ์กันโดยขึ้นกับการเชื่อมโยงกันหมดทุกส่วนหรือเชื่อมโยงเพียงบางส่วนก็ได้ การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมต้องเริ่มด้วยการพิจารณาจากเรื่องของการเชื่อมต่อกันภายใน และสถาปัตยกรรมที่สนับสนุนการสร้างโครงข่ายประสาทเทียมให้เป็นไปได้

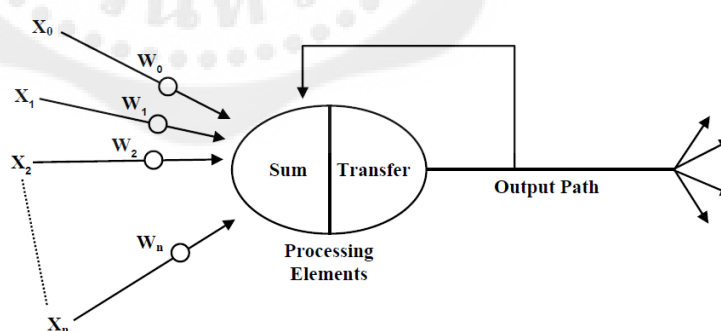
ตาราง 3 แสดงข้อแตกต่างของการคิดแบบโครงข่ายประสาทเทียมกับการคิดของคอมพิวเตอร์

คอมพิวเตอร์	โครงข่ายประสาทเทียม
Process digital data in binary form.	Process analog signals that fluctuate continuously
Make yes/no decision based on mathematical or logical functions.	Make weighted decision based on fuzzy, incomplete and contradictory data
Rigidly structured sequence of operations with predictable results.	Independently formulated methods of data processing.
Definitive answer, given enough time.	Approximate answer to highly complex problems.
Sort large databases for exact matches	Sort large data bases for close matches.
Specific data storage.	Associative data storage.

2.2.3 หลักการทำงาน

ข้อมูลการทดลองในปัจจุบันได้แสดงให้เห็นว่าเซลล์ประสาททางชีววิทยา (Biological neurons) ของมนุษย์นั้นมีความซับซ้อนทางโครงสร้างมากกว่าโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างโดยวงจรโครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อทางด้านชีววิทยานั้นสามารถให้ความเข้าใจเกี่ยวกับเซลล์ประสาทได้ดีกว่ารวมถึงเมื่อเทคโนโลยีในปัจจุบันที่ก้าวหน้าไปอย่างมากนั้น นักออกแบบวงจรโครงข่ายประสาทเทียมจึงสามารถที่จะพัฒนาระบบของโครงข่ายได้อย่างต่อเนื่อง โดยเป็นการสร้างที่มีความสามารถเหนือกว่าความเข้าใจของมนุษย์ในด้านของสมองแต่ในปัจจุบันนี้ เป้าหมายของวงจรโครงข่ายประสาทเทียมไม่ใช่การสร้างสมองที่ยิ่งใหญ่หรูหรา แต่เป็นในทางตรงข้าม คือ นักวิจัยวงจรโครงข่ายเซลล์ประสาทได้กำลังค้นหาเพื่อที่ทำความเข้าใจเกี่ยวกับความสามารถของเซลล์ประสาทตามธรรมชาติของมนุษย์ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่ไม่สามารถแก้ได้โดยวิธีการคำนวณดั้งเดิม โดยเซลล์ประสาทเทียมนั้นได้ถูกจำลองขึ้นมาตามหน้าที่พื้นฐานทั้ง 4 ของเซลล์ประสาทธรรมชาติดังแสดงในภาพประกอบ 81

โครงข่ายประสาทเทียมจะมีอินพุตหลายค่าเข้ามาในโครงข่าย โดยจะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ $X(n)$ และแต่ละอินพุตนั้นจะถูกคูณด้วยค่าความรู้หรือเป็นค่าน้ำหนัก (weight) ซึ่งแทนด้วย $W(n)$ โดยที่ปกติผลคูณของค่าน้ำหนักและอินพุตที่เข้าสู่โครงข่ายนั้น จะถูกนำมารวมกันและส่งผ่านเข้าไปในฟังก์ชัน (transfer function) เพื่อที่จะหาเอาต์พุตหรือผลลัพธ์ออกมา โดยกระบวนการนี้นั้นทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างวงจรโครงข่ายอื่นที่ใช้ฟังก์ชันผลรวม (summing functions) และฟังก์ชันการส่งผ่านที่ต่างกันได้ โดยที่บางแอปพลิเคชันนั้น ต้องการคำตอบที่เป็น “ใช่หรือไม่ใช่” หรือค่าไบนารี (binary) โดยแอปพลิเคชันนี้อาจจะรวมถึงการจดจำข้อความ การชี้เฉพาะคำพูด และการแปลความหมาย รูปภาพของเหตุการณ์ ดังแสดงในภาพประกอบ 82



ภาพประกอบ 82 แสดงการทำงานของเซลล์ประสาทเทียม

ที่มา: (Dave Anderson and George McNeill, 1992)

2.2.4 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม (learning of neural network)

โดยทั่วไปการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ก็คือ การสอนโครงข่ายให้ทำการคำนวณข้อมูลเอาต์พุตพร้อมกับปรับปรุงค่าน้ำหนักโดยใช้ข้อมูลอินพุตที่ป้อนให้กับโครงข่ายโดยอาศัยกระบวนการทำซ้ำ (iterative) สามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

2.2.4.1 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน

การเรียนรู้แบบมีผู้สอนนั้นต้องการชุดข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตเป้าหมายเป็นชุดฝึกสอนควบคู่ (training pair) โดยปกติการสอนโครงข่ายนั้นจะใช้ชุดฝึกสอนควบคู่กันหลายชุดในระหว่างการสอนโครงข่ายจะเกิดเอาต์พุตจริงซึ่งแตกต่างจากเอาต์พุตเป้าหมายทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าความผิดพลาด โดยโครงข่ายจะเรียนรู้ข้อมูลทั้งสองโดยการปรับค่าน้ำหนักเพื่อลดค่าความแตกต่างหรือค่าความผิดพลาดระหว่างค่าของตัวแปรเอาต์พุตของโครงข่ายกับค่าของข้อมูลเอาต์พุตที่ต้องการให้น้อยที่สุด การปรับค่าน้ำหนักจะปรับทีละน้อย ๆ โดยกระบวนการทำซ้ำกับข้อมูลที่ละชุด จนกระทั่งค่าน้ำหนักในโครงข่ายลู่เข้า ซึ่งทั้งหมดนี้เรียกว่า การเรียนรู้ จากนั้นเมื่อเราป้อนค่าข้อมูลอินพุตล่าสุดซึ่งเป็นข้อมูลชุดใหม่ก็จะได้ค่าตัวแปรเอาต์พุตของโครงข่าย เมื่อโครงข่ายทำการเรียนรู้แล้วก็จะป้อนข้อมูลอินพุตล่าสุดให้กับโครงข่าย เพื่อที่จะหาค่าของตัวแปรเอาต์พุตซึ่งคือ ค่าผลการทำนายหรือระบุค่าหรือวลีสำคัญ เป็นต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การเรียนรู้แบบมีผู้สอนเท่านั้น

2.2.4.2 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (unsupervised learning)

การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนั้นได้ถูกพัฒนาเพื่อให้ใกล้เคียงกับระบบการเรียนรู้ของสมองมนุษย์มากยิ่งขึ้น โดยจะมีเพียงชุดข้อมูลอินพุตเท่านั้น จากนั้น กระบวนการเรียนรู้จะใช้หลักทางสถิติ โดยหาค่าทางสถิติของชุดฝึกสอน และทำการจัดกลุ่มข้อมูลออกเป็นระดับต่าง ๆ โดยโครงข่ายประสาทเทียมจะหาค่าเอาต์พุตเองจากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต

2.2.4.3 การเรียนรู้เชิงบังคับ (reinforcement learning)

การเรียนรู้เชิงบังคับนั้นเป็นการเรียนรู้แบบมีผู้สอนและไม่มีผู้สอน โดยจะใช้การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนในระหว่างการสอนที่มีเพียงชุดข้อมูลอินพุต และจะใช้การเรียนรู้แบบมีผู้สอนคือเมื่อได้ค่าเอาต์พุตและจะทำการบอกว่าถูกหรือผิดแต่จะไม่บอกว่าเอาต์พุตที่ถูกคืออะไร

2.2.5 ประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม

จาก (Dave Anderson and George McNeill, 1992) แนวคิดของเซลล์ประสาทเทียมที่ต้องมีการเชื่อมต่อและมีการคำนวณค่าแอดดิเวชันฟังก์ชัน โดยมากจะเป็นตัวบ่งบอกโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม ซึ่งจะมีกฎกำหนดวิธีการของโครงข่ายโดยแบ่งออกเป็นประเภทได้ 5 ประเภท ดังนี้

2.2.5.1 ประเภทการคาดเดา (prediction)

2.2.5.2 ประเภทการจัดลำดับหมวดหมู่ (classification)

2.2.5.3 ประเภทการเชื่อมโยงข้อมูล (data association)

2.2.5.4 ประเภทกระบวนการสร้างความคิด (data conceptualization)

2.2.5.5 ประเภทการกลั่นกรองข้อมูล (data filtering)

ตาราง 4 ความแตกต่างระหว่างประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม

ชนิดโครงข่าย	โครงข่าย	การใช้
การคาดเดา Prediction	- Back-propagation - Delta Bar Delta - Extended Delta Bar Delta - Directed Random Search - Higher Order Neural Networks - Self-organizing map into Back-propagation	ใช้ค่าอินพุตเพื่อคาดเดาเอาต์พุต
การจัดหมวดหมู่ Classification	- Learning Vector Quantization - Counter-propagation - Probabilistic Neural Networks	ใช้ค่าอินพุตเพื่อกำหนดการจัดหมวดหมู่
การเชื่อมโยงข้อมูล Data Association	- Hopfield - Boltzmann Machine - Hamming Network - Bidirectional associative Memory	เหมือนกับ Classification แต่มันจะจดจำข้อมูลที่มี error ด้วย
กระบวนการสร้างความคิด Data Conceptualization	- Adaptive Resonance Network - Self Organizing Map	วิเคราะห์อินพุตเพื่อการจัดกลุ่ม
การกลั่นกรองข้อมูล Data Filtering	- Recirculation	ทำให้สัญญาณอินพุตเรียบสม่ำเสมอ

ที่มา: (Dave Anderson and George McNeill, 1992)

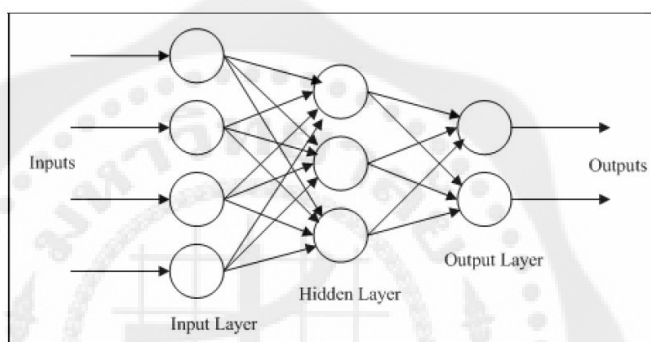
โดยโครงข่ายที่จะกล่าวถึงในงานวิจัยนี้ จะใช้โครงข่ายเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้น หรือ โครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ ดังที่จะกล่าวต่อไป

2.2.6 โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้น

คือสถาปัตยกรรมโครงข่ายเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้น ที่เป็นโครงข่ายประเภทการคาดเดา (networks for prediction) หรือ โครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าโดยมีการเรียนรู้แบบย้อนกลับ นั้นถูกพัฒนาในต้นปี 1970 โดยจากหลายๆ แหล่งและเป็นการทำงานพัฒนาร่วมกันอย่างอิสระ โดยในปัจจุบันสถาปัตยกรรมแบ็คพรอพากเกชันหรือแบบแพร่ย้อนกลับนี้เป็นที่นิยมสูงสุดและยังมีประสิทธิภาพมาก รวมถึงยังมีความง่ายสำหรับการเป็นต้นแบบสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นที่เป็นแบบหลายเลเยอร์ โดยเทคนิคการแพร่ย้อนของสถาปัตยกรรมแบบนี้

นั้นได้ถูกใช้ในหลายแอปพลิเคชันด้วยกัน และยังมีผลต่อชนิดของโครงข่ายขนาดใหญ่ในด้านของรูปร่างและวิธีการฝึกที่แตกต่างกันไป เพราะมีจุดแข็งที่สำคัญของเทคนิค คือ วิธีการทำงานแบบไม่เชิงเส้น (non-linear) ที่มีความเหมาะสมต่อการแก้ปัญหาที่มีความไม่ชัดเจน

โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นนั้น มีลักษณะต้นแบบ คือ จะมีจำนวนหนึ่งชั้นอินพุต (input layer) หนึ่งชั้นเอาต์พุต (output layer) และอย่างน้อยหนึ่งชั้นซ่อน (hidden layer) ซึ่งลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมนั้น ไม่มีข้อจำกัดทางทฤษฎีต่อจำนวนของชั้นซ่อน แต่ตามแบบต้นฉบับจะมีเพียงหนึ่งชั้นหรือสองชั้นเท่านั้น โดยบางการทำงานที่แก้ปัญหาที่ซับซ้อนจะต้องมีอย่างน้อยที่สุดสี่ชั้น (สามชั้นซ่อน กับหนึ่งชั้นเอาต์พุต) แต่ละชั้นเชื่อมต่อกับชั้นที่ตามมา ดังแสดงในภาพประกอบ 83



ภาพประกอบ 83 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม

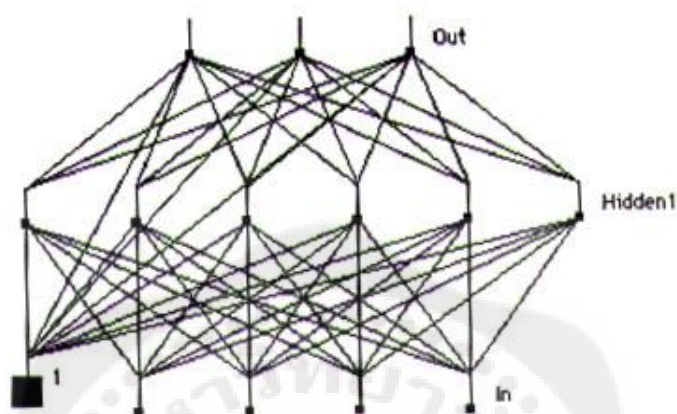
ที่มา: (Chester, M., 1993)

จาก (Dave Anderson and George McNeill, 1992) นั้น ชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมจะเป็นการแสดงถึงการไหลของข้อมูล (information) ในกระบวนการของการเรียกซ้ำหรือการแพร่กลับ โดยการเรียกซ้ำนั้น เป็นกระบวนการนำข้อมูลอินพุตสู่โครงข่ายที่ได้รับการฝึกสอนแล้ว และรอรับคำตอบที่เอาต์พุตโดยการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างหรือค่าความผิดพลาดจากการแพร่ย้อนกลับในช่วงของการเรียกซ้ำ โดยจะใช้ในขณะที่โครงข่ายกำลังเรียนรู้จากข้อมูลชุดฝึกสอน จำนวนชั้นและจำนวนโหนดในแต่ละชั้นนั้นเป็นมีผลต่อการทำงานของโครงข่ายแบบป้อนไปข้างหน้าและมีการเรียนรู้แพร่ย้อนกลับ โดยสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ละเอียดอ่อนมากและเป็นศิลปะของนักออกแบบโครงข่าย โดยไม่มีคำตอบที่ตายตัวหรือแน่นอนสำหรับการออกแบบโครงข่าย จะมีเพียงกฎทั่วไปที่นักวิจัยและวิศวกรส่วนใหญ่หยิบยกขึ้นมาและทำตามกฎนั้นดังต่อไปนี้

กฎที่1 เมื่อข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนมากขึ้น จำนวน ของหน่วยประมวลผลในชั้นซ่อนก็ควรจะมากขึ้นด้วย

กฎที่ 2 ถ้ากระบวนการสามารถแยกเป็นหลายขั้นตอนได้ ก็ต้องเพิ่มชั้นซ่อน แต่ถ้ากระบวนการไม่สามารถแยกเป็นขั้นตอนได้ชั้น ที่เพิ่มเข้าไปอาจทำให้สามารถจดจำอย่างง่ายได้ แต่จะไม่ใช้วิธีการธรรมดา

กฎที่ 3 ปริมาณข้อมูลการฝึกสร้างขอบเขตบนของหน่วยประมวลผลในชั้นซ่อน



ภาพประกอบ 84 โครงข่ายประสาทเทียมแบบ feed forward Back

ที่มา: (Dave Anderson and George McNeill, 1992)

2.2.7 ลักษณะโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ หรือแบบเพอร์เซพตรอนหลายชั้นซึ่งใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ มีลักษณะหลักๆ ดังนี้คือ

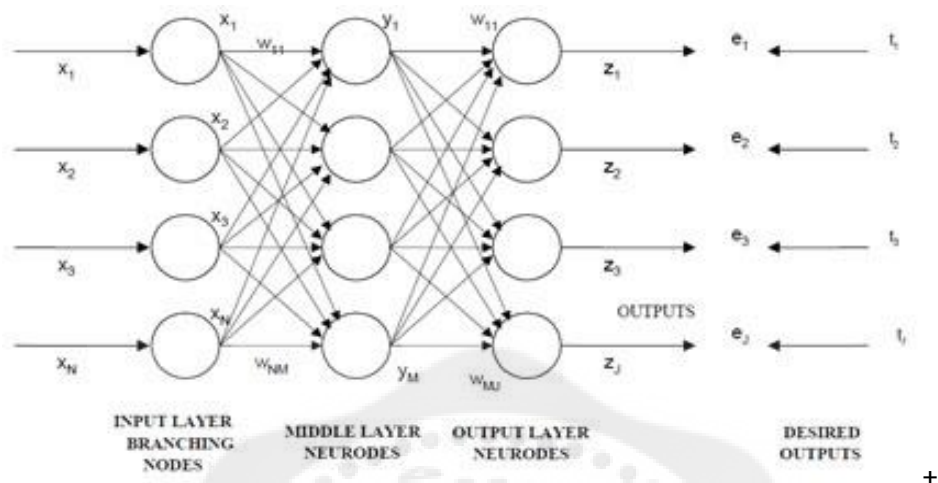
2.2.7.1 จำนวนชั้นต่างๆ โครงข่ายประสาทเทียมจะประกอบด้วยชั้นต่างๆ คือ ชั้นอินพุตเอาต์พุต และชั้นซ่อนซึ่งจะอยู่ระหว่างชั้นอินพุตและชั้นเอาต์พุต

2.2.7.2 การเชื่อมต่อระหว่างชั้นต่างๆ นั้น จะมีลักษณะที่ทุกๆ โหนดในชั้นอินพุตนั้นจะส่งสัญญาณไปยังทุกๆ โหนดในชั้นซ่อน และทุกๆ โหนดในชั้นซ่อนจะทำการส่งสัญญาณต่อไปยังโหนดในชั้นเอาต์พุต

2.2.7.3 การทำงานของชั้นต่างๆ นั้น ในชั้นอินพุตจะไม่มีผลการประมวลผลใด ๆ ทั้งสิ้น จะทำหน้าที่เพียงแค่ว่ารับสัญญาณหรือข้อมูลเข้าแล้วกระจายออกไปยังแต่ละโหนดในชั้นซ่อน ส่วนชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุตนั้น เป็นชั้นที่มีการประมวลผล โดยภาพที่ 84 จะเป็นการแสดงถึงลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้น ซึ่งจะประกอบด้วยชั้นอินพุตชั้นซ่อนจำนวน 1 ชั้น และชั้นของเอาต์พุตโดยแต่ละโหนดจะถูกเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย

2.2.8 วิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ

โครงข่ายแบบเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นมีรายละเอียดดังนี้ ดังใน
ภาพประกอบ 85



ภาพประกอบ 85 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ

ที่มา: (Winston, Patrick Henry 1992 : 443-469)

ความหมายของตัวแปรต่างๆที่ใช้ แสดงตัวแปลต่างๆ พร้อมความหมาย

x_n = อินพุตโหนดที่ n มีทั้งหมด N โหนด

s_m = เอาต์พุตของชั้นซ่อน ก่อนทำการปรับค่า (activation) เป็น y_m

y_m = เอาต์พุตของชั้นซ่อน หลังทำการปรับค่าของโหนดที่ m มีทั้งหมด M โหนด

v_j = เอาต์พุตของชั้นเอาต์พุต ก่อนทำการปรับค่า (activation) เป็น z_j

z_j = ค่าเอาต์พุตที่ได้ทำการปรับค่าแล้วของชั้นเอาต์พุตโหนดที่ j มีทั้งหมด J โหนด

t_j = ค่าเอาต์พุตที่ต้องการที่ชั้นเอาต์พุตโหนดที่ j มีทั้งหมด J โหนด

w_{nm} = น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นอินพุต กับชั้นซ่อน

w_{mj} = น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นซ่อน กับชั้นเอาต์พุต

η = อัตราการเรียนรู้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

r = จำนวนรอบที่จะทำการเรียนรู้ มี R เป็นจำนวนรอบที่กำหนด

q = จำนวนชุดของข้อมูลตัวอย่าง มี Q เป็นตัวกำหนด

$e^{(q)}$ = ค่าผิดพลาดของข้อมูลตัวอย่าง

E = ค่าผิดพลาดรวมเฉลี่ยของข้อมูลตัวอย่าง

2.2.9 ขั้นตอนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับ

แบ่งเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.2.9.1 กำหนดจำนวนโหนดในชั้นอินพุต (n), จำนวนโหนดในชั้นเอาต์พุต (j), จำนวนโหนดในชั้นซ่อน (m) จำนวน 1 ชั้นซ่อน และกำหนดจำนวนข้อมูลอินพุตและข้อมูลเอาต์พุต ต่อจากนั้นจะทำการกำหนดจำนวนรอบสูงสุดที่จะทำการเรียนรู้ (r) รวมถึงค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้

2.2.9.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของอัตราการเรียนรู้ (η) ที่อยู่ในช่วง $[0, 1]$

2.2.9.3 การสุ่มน้ำหนักเริ่มต้นให้กับทุกๆ เส้นเชื่อมโยงภายในโครงข่ายประสาทเทียมในทั้ง 2 ชั้น โดยให้มีค่าอยู่ระหว่าง $[-1, 1]$

2.2.9.4 รับค่าอินพุตของข้อมูลชุดแรกหรือข้อมูลแถวแรก เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียม

2.2.9.5 กำหนดค่าผลรวมของโหนดในชั้นซ่อน (s_m) ก่อนทำการปรับค่ารวมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) ฟังก์ชันซิกมอยด์ ซึ่งจะได้ค่าของโหนดในชั้นซ่อนที่อยู่ในช่วง $[0, 1]$ โดยมีรายละเอียดดังสมการ 2-1 ถึง 2-3

ค่าเอาต์พุตของชั้นซ่อนก่อนทำการปรับค่า ดังสมการที่ 2-1

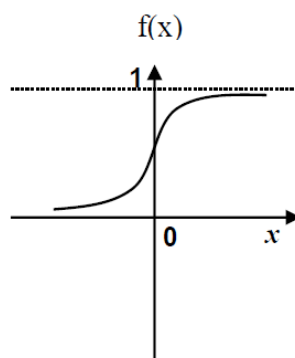
$$s_m = \sum_{n=1}^N x_n * w_{nm} \quad (2-1)$$

ค่าเอาต์พุตของชั้นซ่อนหลังทำการปรับค่า ดังสมการที่ 2-2

$$y_m = f(s_m) \quad (2-2)$$

ฟังก์ชันที่ใช้ปรับค่า $f(x)$ ดังสมการที่ 2-3

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2-3)$$



c) SIGMOID

ภาพประกอบ 86 แสดงค่าที่ได้จากฟังก์ชันซิกมอยด์

2.2.9.6 คำนวณค่าเอาต์พุตของโหนดในชั้นเอาต์พุตด้วยสมการที่ 2-4 จากนั้นทำการปรับค่าผลรวมด้วยฟังก์ชันกระตุ้นฟังก์ชันซิกมอยด์ ดังสมการที่ 2-3 ซึ่งจะได้ค่าของโหนดในชั้นเอาต์พุตที่อยู่ช่วง $[0, 1]$ สำหรับค่าของผลลัพธ์ในโหนดของชั้นเอาต์พุตนั้น หลังทำการปรับค่าแสดงดังสมการที่ 2-5

$$v_j = \sum_{m=1}^M y_m * w_{mj} \quad (2-4)$$

ค่าเอาต์พุตของชั้นเอาต์พุตหลังทำการปรับค่า ดังสมการที่ 2-5

$$z_j = f(v_j) \quad (2-5)$$

2.2.9.7 การหาค่าความผิดพลาดของโหนดในชั้นเอาต์พุตและทำการปรับน้ำหนักนั้น โดยให้นำเอาต์พุตที่คำนวณได้จริงเปรียบเทียบกับเอาต์พุตที่กำหนดไว้ เพื่อหาค่าความผิดพลาดของข้อมูล โดยถ้าวัดค่าผิดพลาดของข้อมูลน้อยกว่าค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้แล้วนั้นโครงข่ายประสาทเทียมก็จะทำการรับข้อมูลชุดต่อไปเข้าสู่โครงข่าย โดยถ้าไม่ได้ทำการปรับน้ำหนักแล้วนั้นโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการรับข้อมูลแถวถัดไปและจะกลับไปทำข้อ 2.2.9.5 แต่ถ้าเป็นข้อมูลชุดสุดท้ายของข้อมูลแล้วนั้น จะไปทำข้อ 2.2.9.8 ค่าความผิดพลาดในแต่ละแถวของข้อมูล ดังสมการที่ 2-6

$$e^{(q)} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J (t_j - z_j)^2 \quad (2-6)$$

การปรับน้ำหนักระหว่างโหนดในชั้นซ่อนและชั้นเอาต์พุต ดังสมการที่ 2-7

$$w_{mj}^{(r+1)} = w_{mj}^{(r)} + \eta \{ (t_j^{(q)} - z_j^{(q)}) * [z_j^{(q)} (1 - z_j^{(q)})] * y_m^{(q)} \} \quad (2-7)$$

การปรับน้ำหนักระหว่างโหนดในชั้นอินพุตและชั้นซ่อน มีสมการที่ 2-8

$$w_{nm}^{(r+1)} = w_{nm}^{(r)} + \eta \{ \sum_{j=1}^J (t_j^{(q)} - z_j^{(q)}) [z_j^{(q)} (1 - z_j^{(q)})] w_{mj}^{(r)} * [y_m^{(q)} (1 - y_m^{(q)})] x_n^{(q)} \} \quad (2-8)$$

2.2.9.8 คำนวณค่าผิดพลาดรวมเฉลี่ย (mean squared error : MSE) ในทุก ๆ แถวข้อมูล โดยนำค่าผิดพลาดของแต่ละแถวของชุดข้อมูลมารวมกัน แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้ในการตรวจสอบว่าผลลัพธ์ของทุก ๆ ข้อมูลในแต่ละรอบนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ในทุก ๆ แถวข้อมูลหรือไม่ โดยถ้า ค่าความผิดพลาดยอมรับได้ให้จบการเรียนรู้ แต่ถ้าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ให้ตรวจสอบว่าได้ทำการเรียนรู้ครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าครบแล้วให้จบการเรียนรู้ แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำข้อ 2.2.9.4 ใหม่ ซึ่งก็คือเริ่มต้นการเรียนรู้รอบใหม่

การคิดผิดพลาดรวมเฉลี่ย ดังสมการที่ 2-9

$$E = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q e^q \quad (2-9)$$

ข้อดีและข้อเสียของการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (Dayhoff, 1990)

ข้อดี คือ การเรียนรู้แบบแพร่กลับนั้นจะมีความสามารถในการจดจำรูปแบบ ซึ่งการเรียนรู้แบบแพร่กลับสามารถที่จะเรียนรู้ความสัมพันธ์ของรูปแบบได้มากมาย โดยการเรียนรู้แบบแพร่กลับต้องการตัวอย่างรูปแบบที่จะเรียนรู้ ความยืดหยุ่นของการเรียนรู้อยู่ที่ความหลากหลายในการออกแบบทางเลือกต่าง ๆ เช่น จำนวนชั้น เส้นเชื่อมโยง จำนวนโหนดในแต่ละชั้นที่ได้ทำการกำหนดขึ้น โดยความยืดหยุ่นนี้เอง ทำให้ การเรียนรู้แบบแพร่กลับสามารถแก้ปัญหางานประยุกต์ได้อย่างมากมาย

ข้อจำกัด คือ การใช้เวลามากในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมให้เกิดการเรียนรู้สำหรับการเรียนรู้แก้ปัญหา

2.2.10 การวัดประสิทธิภาพ

$$\text{ค่าความถูกต้องของข้อมูล (\%)} = \frac{\text{จำนวนแถวข้อมูลที่ทำนายถูก}}{\text{จำนวนแถวข้อมูลทั้งหมด}} * 100$$

2.2.11 การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในงานด้านต่าง ๆ

เนื่องจากความสามารถในการเรียนรู้ การจดจำ และจำลองพฤติกรรมทางกายภาพของระบบโครงข่ายประสาทเทียมจากข้อมูลชุดฝึกสอนที่ป้อนให้กับโครงข่าย ซึ่งเป็นการทำงานที่ซับซ้อน และในด้านผลการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมนั้น ถ้าได้รับข้อมูลการฝึกสอนที่ดีนั้น โครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถทำงานในด้านต่างๆ สำหรับชุดทดสอบที่มีค่าความแม่นยำสูง จึงได้มีผู้นำมาประยุกต์ใช้งานหลากหลาย ดังนี้

2.2.11.1 งานในด้านของการสกัดองค์ความรู้จากฐานข้อมูลขนาดใหญ่

2.2.11.2 งานในด้านของการจดจำรูปแบบที่มีความไม่แน่นอน เช่น ลายมือลายเซ็นต์ ตัวอักษร รูปหน้า

2.2.11.3 งานในด้านการประมาณค่าฟังก์ชันหรือการประมาณความสัมพันธ์ (โดยมีการกำหนดอินพุตและเอาต์พุต แต่ไม่ได้มีการระบุว่ามีอินพุตและเอาต์พุตนั้น มีความสัมพันธ์กันอย่างไร)

2.2.11.4 งานในด้านการจัดหมวดหมู่และการแยกแยะสิ่งของหรือข้อมูล

2.2.11.5 งานในด้านการทำนาย เช่น พยากรณ์อากาศ พยากรณ์หุ้น

2.2.11.6 งานในด้านการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมกับการควบคุมกระบวนการทางเคมี โดยวิธีพยากรณ์แบบจำลอง (Model Predictive Control)

2.2.11.7 งานในด้านการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายกลับในการทำนายพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในตัวอาคาร

2.2.11.8 งานในด้านการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการหาไซโครเมตริกชาร์ท การประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาทควบคุมระบบ HVAC

2.3 การพัฒนาสมการจลศาสตร์

จากผลงานวิจัยด้านการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยโปรแกรม NX Motion Simulation ของนายเต็จ (2555) ซึ่งทำการศึกษาโดยสร้างแบบสร้างโมเดลต้นแบบและจำลองการเคลื่อนไหวด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 7.5 Motion Simulation กับการคำนวณทางทฤษฎี ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ เพื่อหาค่า ระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่ง ของลูกสูบ เมื่อเพลลาข้อเหวี่ยงหมุนด้วยความเร็วคงที่ 1200 รอบต่อนาที ซึ่งในการจำลองการเคลื่อนไหวใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 7200 degree/sec (เป็นค่า default ของโปรแกรม), และใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 125.66 Radian/sec สำหรับการคำนวณ ผลการศึกษาพบว่ามีความใกล้เคียงกันมาก แต่งานวิจัยนี้สร้างโมเดลต้นแบบที่ใช้ขนาดมาตรฐาน ซึ่งผู้ศึกษาไม่ได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตตามมาตรฐาน ISO 2768 สำหรับชิ้นงานจริง ซึ่งสัมพันธ์กับสมการดังนี้

ตำแหน่ง (Position)

$$S = r \cos \theta + \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta} \quad (2-10)$$

ความเร็ว (Velocity)

$$v = -r \sin \theta - \frac{r^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \quad (2-11)$$

ความเร่ง (Acceleration)

$$a = -r \cos \theta - \frac{r^2 \cos^2 \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}} - \frac{-r^2 \sin^2 \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}} - \frac{r^4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{(\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta})^3} \quad (2-12)$$

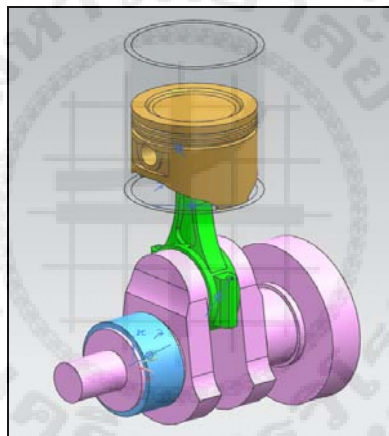
โดยที่

- s** คือ ระยะทางที่ลูกสูบเคลื่อนที่ (วัดตามแนวจุดศูนย์กลางเพลาช้อเหวี่ยงตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ)
- l** คือ ความยาวก้านสูบ (ระยะห่างระหว่างสลักลูกสูบกับสลักก้านสูบ)
- θ** คือ มุมของเพลาช้อเหวี่ยง
- r** คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางของเพลาช้อเหวี่ยง ด้านล่างถึงจุดศูนย์กลางด้านบนของเพลาช้อเหวี่ยง
- v** คือ ความเร็วของสลักก้านสูบ (วัดตามแนวจุดศูนย์กลางเพลาช้อเหวี่ยงตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ)
- a** คือ ความเร่งของสลักก้านสูบ (วัดตามแนวจุดศูนย์กลางเพลาช้อเหวี่ยงตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการทำงานของกลไกเพลาช้อเหวี่ยง โดยเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ back propagation neural network ซึ่งจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลจะครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่ง เพื่อช่วยให้ผู้ออกแบบเครื่องจักรกลแจกแจงความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเพื่อที่จะควบคุมให้ความคลาดเคลื่อนรวม (ทั้งขนาดและรูปร่าง) ของเครื่องจักรกลนั้นไม่ส่งผลกระทบจนทำให้การเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลผิดไปจาก design specification ดังภาพประกอบ 87



ภาพประกอบ 87 ภาพกลไกเพลาช้อเหวี่ยง

1. อุปกรณ์สำหรับดำเนินงานวิจัย

- 1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง ใช้สำหรับการทำงานและประมวลผลของโปรแกรม
- 1.2 โปรแกรมโซลิดเวิร์ด (solidworks premium 2016 sp1 x 64) ใช้ในการทำแบบ cad modeling
- 1.3 โปรแกรม microsoft matlab version 2016 ใช้สร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T
- 1.4 โปรแกรม microsoft excel version 2013 ใช้ประมวลผลและแยกข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

2. การดำเนินงานวิจัย

การศึกษาการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล มีรายละเอียดของการศึกษาการทดลอง ดังนี้

2.1 กำหนดการศึกษาโดยเลือกกลไกเพลาช้อเหวี่ยง เมื่อเพลาช้อเหวี่ยงหมุนด้วยความเร็วคงที่ 1200 รอบต่อนาที ซึ่งในการจำลองการเคลื่อนไหวใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 7200 degree/sec (เป็นค่า default ของโปรแกรม), และใช้ความเร็วเชิงมุมคงที่คือ 125.66 radian/sec สำหรับการคำนวณ

2.2 ทำการศึกษาการออกแบบและกำหนดขนาดของชิ้นส่วนกลไกหลักได้แก่

2.2.1 เพลาช้อเหวี่ยง (crank shaft)

2.2.2 ก้านสูบ (connecting rod)

2.2.3 ลูกสูบ (piston)

2.2.4 กระบอกสูบ (cylinder)

2.2.5 แบริ่ง (bearing)

2.3 ทำการศึกษามาตรฐานที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตโดยเลือกใช้มาตรฐาน ISO 2768

2.4 ทำการศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม โซลิดเวิร์ด (solidworks premium 2016 sp1 x 64) ในการทำแบบ cad modeling

2.5 ทำการศึกษาระบุเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตโดยเลือกใช้ค่ามาตรฐาน ISO 2768 - ตาราง 4 ที่ tolerance class - m (medium) และออกแบบชิ้นส่วนย่อยด้วยโปรแกรม โซลิดเวิร์ด (solidworks premium 2016 sp1 x 64) ตามตารางด้านล่าง

ตาราง 5 ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานตาม - ISO 2768		
	nominal	minimum	maximum
Ø crank shaft (mm)	60	59.7	60.3
Ø connecting rod (mm)	60	59.7	60.3
connecting rod length (mm)	120	119.7	120.3

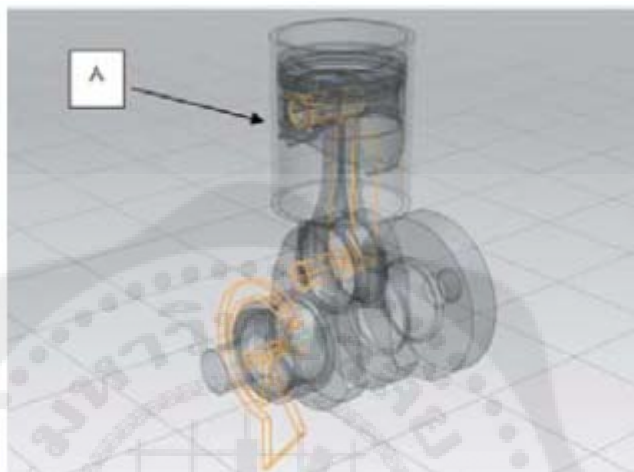
2.6 ทำการศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม โซลิดเวิร์ค (solidworks premium 2016 sp1 x 64) ในการทำ assembly และทำการ assembly ชิ้นส่วนย่อยตามตาราง 5 ด้านล่างนี้

ตาราง 6 การกำหนดแบบการ assembly ของชิ้นส่วนย่อย

แบบที่	ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานตาม - ISO 2768		
	Ø crank shaft (mm)	Ø connecting rod (mm)	connecting rod length (mm)
1	60	60	120
2	60	60	119.7
3	60	60	120.3
4	60	59.7	120
5	60	59.7	119.7
6	60	59.7	120.3
7	60	60.3	120
8	60	60.3	119.7
9	60	60.3	120.3
10	59.7	60	120
11	59.7	60	119.7
12	59.7	60	120.3
13	59.7	59.7	120
14	59.7	59.7	119.7
15	59.7	59.7	120.3
16	59.7	60.3	120
17	59.7	60.3	119.7
18	59.7	60.3	120.3
19	60.3	60	120
20	60.3	60	119.7
21	60.3	60	120.3
22	60.3	59.7	120
23	60.3	59.7	119.7
24	60.3	59.7	120.3
25	60.3	60.3	120
26	60.3	60.3	119.7
27	60.3	60.3	120.3

2.7 ทำการศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม โซลิดเวิร์ค (solidworks premium 2016 sp1 x 64) ในการทำ motion simulation

2.8 ทำการกำหนด link, joint constrain และ driver ให้กับชิ้นส่วนย่อยที่ต้องการทำ motion simulation ดังแสดงในภาพประกอบ 88



ภาพประกอบ 88 การกำหนด joint constrain และ driver

2.9 ทำ motion simulation โดยการกำหนดให้ใช้เพลาคอเหวี่ยงเป็นตัวขับเคลื่อน ซึ่งกำหนดตัวแปรที่เป็นค่าคงที่ของการทดลองนี้ได้แก่ ขนาดของลูกสูบ ระยะระหว่างระนาบอ้างอิงถึงจุดศูนย์กลางของเพลาคอเหวี่ยง โดยการทดลองนี้จะใช้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ 1200 รอบต่อนาทีเพื่อหาระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ในส่วนของ input ที่ใช้ในการทำ simulation แสดงในตารางด้านล่างนี้

ตาราง 7 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ที่ใช้ในการ solve ด้วยโปรแกรม

Input	
Velocity(constant)	7200 degree/sec
Time	0.10 Sec
Step Size	360 point

2.10 ทำการศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม โซลิดเวิร์ด (solidworks premium 2016 sp1 x 64) ในการทำ export result จากการทำ motion simulation โดยใช้ plot to spreadsheet export ไปยัง microsoft excel 2013

2.11 ทำ motion simulation ซ้ำตั้งแต่ข้อ 7 - 10 จนครบทั้ง 27 แบบแล้วหาค่าขอบล่างและขอบบนของระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่งของการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม โซลิดเวิร์ด (solidworks premium 2016 sp1 x 64)

2.12 พัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ back propagation neural network ซึ่งจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลจะครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่ง ซึ่งจะพิจารณาจากจุด A ในรูปข้างต้น

สำหรับการพัฒนาพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยใช้วิธีโครงข่ายเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับมีอินพุตข้อมูล จำนวน 5 ข้อมูลและมีค่า bias เท่ากับ 0.5 ให้เป็นอินพุตแรก สำหรับอินพุตข้อมูลที่ 2,3,4 และ 5 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาช้อเหวี่ยง เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ ความยาวก้านสูบและมุมในการหมุนของก้านสูบ ตามลำดับ

จากการที่ได้กล่าวในบทที่ 2 ค่าของอินพุตข้อมูลหรือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอัตราการเรียนรู้ (η) ที่อยู่ในช่วง $[0, 1]$ ดังนั้นผลของอินพุตข้อมูลชิ้นงานที่มีขนาดปกติจะมีค่าอินพุตข้อมูลที่ 2 ถึง 5 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$2^{\text{nd}} \text{ input unit: } \text{input} = \frac{\text{crank shaft diameter}}{120} \quad (3-1)$$

$$3^{\text{rd}} \text{ input unit: } \text{input} = \frac{\text{connecting rod diameter}}{120} \quad (3-2)$$

$$4^{\text{th}} \text{ input unit: } \text{input} = \frac{\text{connecting rod length}}{240} \quad (3-3)$$

$$5^{\text{th}} \text{ input unit: } \text{input} = \frac{\text{angular of connecting rod}}{360} \quad (3-4)$$

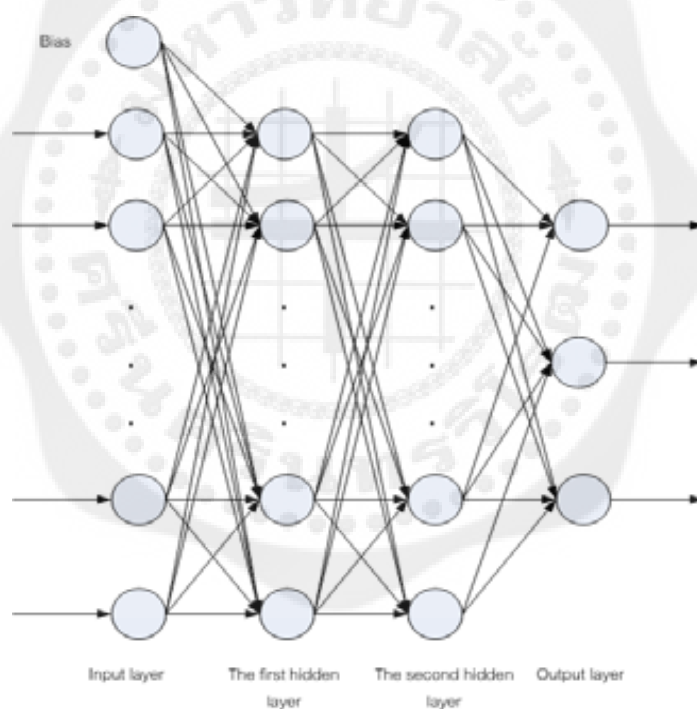
สำหรับจำนวนโหนดในชั้นซ่อนมีค่าจาก 2 ถึง $2l+1$ (โดยที่ l คือจำนวนของอินพุตข้อมูล) ซึ่งในชั้นซ่อนแรกจะถูกพิจารณาในรูปสมการเชิงเส้นตรงอย่างง่าย ($y=x$) หลังจากนั้นจะพิจารณาโดยใช้การกำหนดค่าผลรวมของโหนดในชั้นซ่อน (s_m) ก่อนทำการปรับค่ารวมด้วยฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) ฟังก์ชันซิกมอยด์ ซึ่งจะได้ค่าของโหนดในชั้นซ่อนที่อยู่ในช่วง $[0, 1]$

จากขอบเขตการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โดยเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ back propagation neural network ซึ่งจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลจะครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่ง ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเอาต์พุตได้จากสมการดังนี้

$$1^{\text{st}} \text{ output unit: } \text{displacement} = \frac{\text{displacement of A}}{4 \times 69.993} + 0.5 \quad (3-5)$$

$$2^{\text{nd}} \text{ output unit: } \text{velocity} = \frac{\text{velocity of A}}{4 \times 13.782} + 0.5 \quad (3-6)$$

$$3^{\text{rd}} \text{ output unit: } \text{acceleration} = \frac{\text{acceleration of A}}{4 \times 460636.180} + 0.5 \quad (3-7)$$



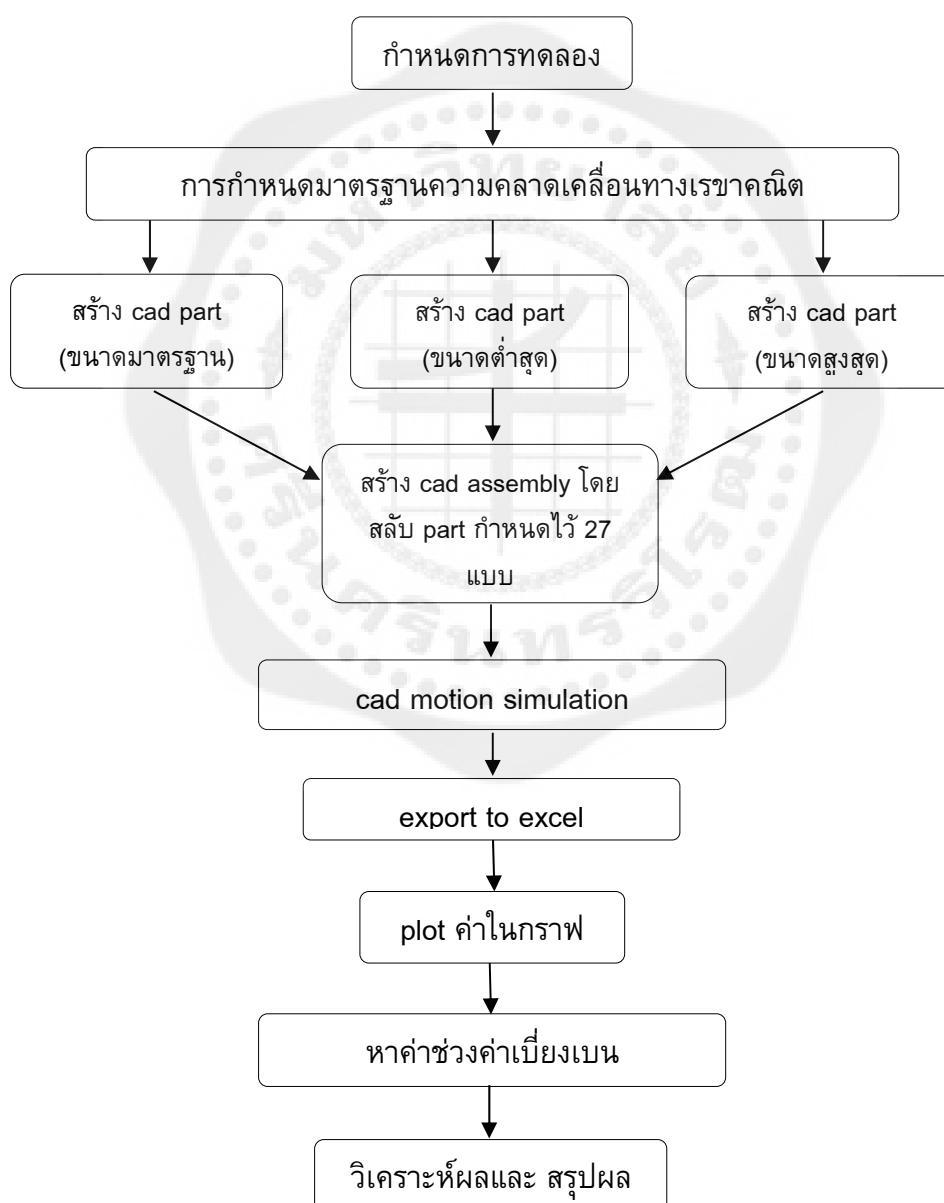
ภาพประกอบ 89 รูปแบบการเรียนรู้วิธีแบบแพร่ย้อนกลับ

2.13 นำผลการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลจะครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่ง จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์มาเปรียบเทียบกันเพื่อพิจารณาถึงความแม่นยำในการคำนวณด้วยวิธีการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

2.14 สรุปผลของการทดลอง

3. แผนภาพการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นกระบวนการ

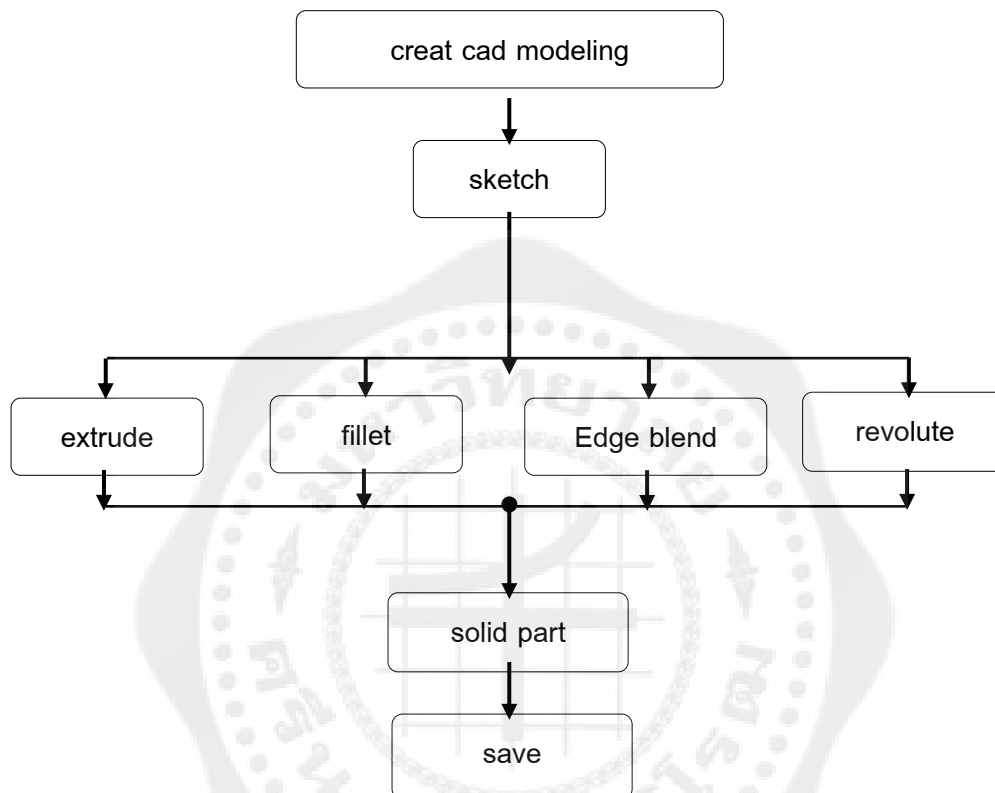


ภาพประกอบ 90 ขั้นตอนการทำงานจนครบกระบวนการ

3.2 แผนภาพย่อยของการสร้างแบบชิ้นงาน และ motion simulation solidwork

3.2.1 การสร้าง cad modeling ของชิ้นส่วนย่อย โดยใช้โปรแกรม

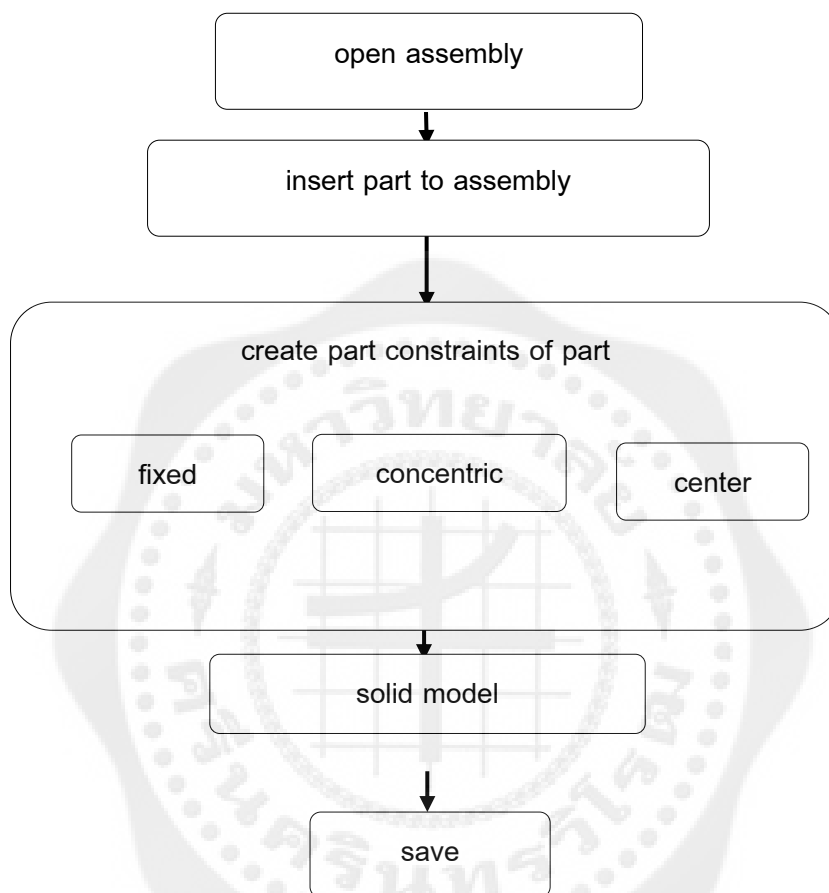
solidworks premium 2016 sp1 x 64



ภาพประกอบ 91 ขั้นตอนการสร้าง cad modeling

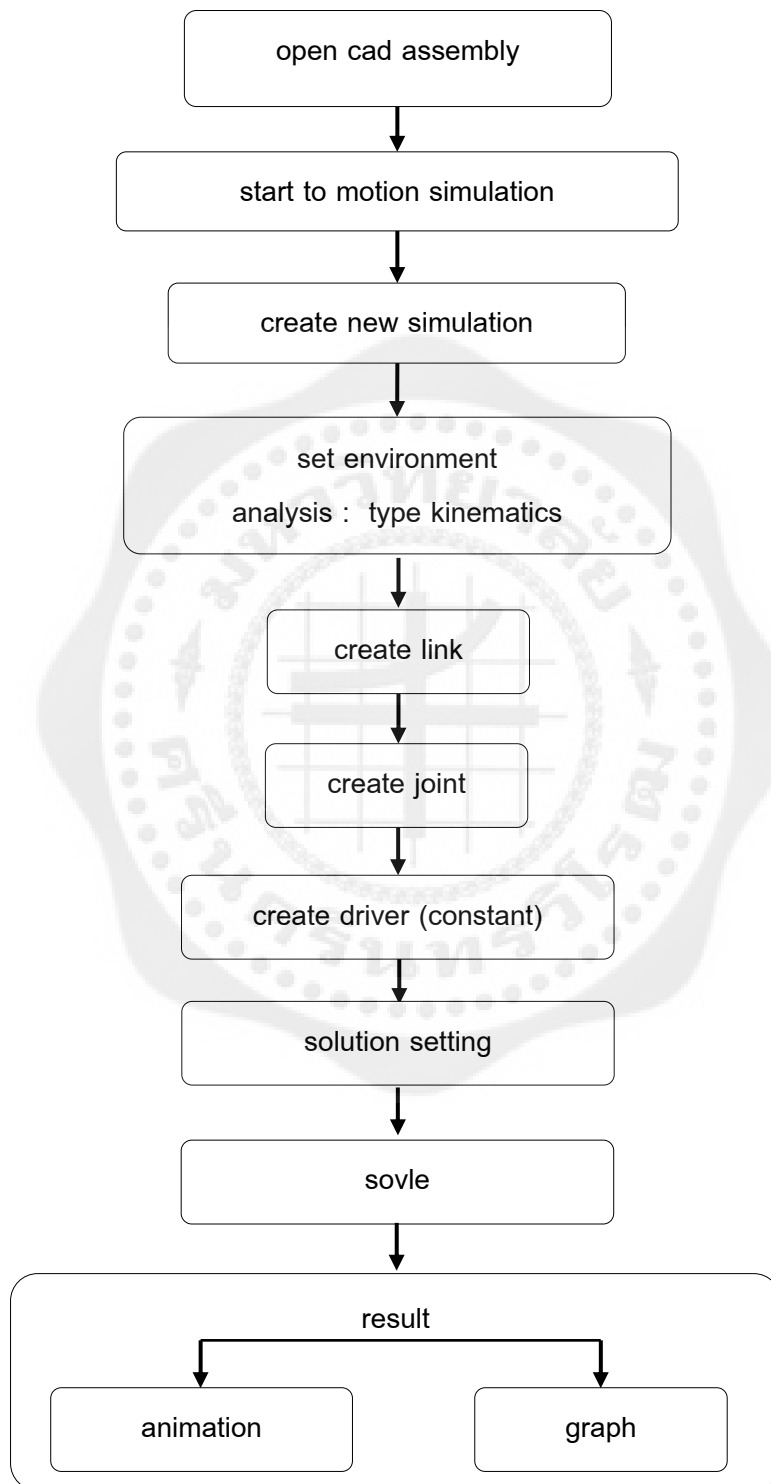
3.2.2 การสร้าง cad assembly โดยใช้โปรแกรม solidworks premium 2016

sp1 x 64



ภาพประกอบ 92 การประกอบชิ้นงาน assembly modeling

3.2.2 การสร้างแบบจำลองโดยใช้ assembly modeling ทำ motion simulation โดย
โปรแกรม solidworks premium 2016 sp1 x 64



ภาพประกอบ 93 การทำ motion simulation

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้เป็น การพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ใช้วิธีโครงข่ายเพอร์เซพตรอนแบบหลายชั้นที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของกลไกเพลาชองเหวี่ยง โดยใช้เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตซึ่งใช้มาตรฐาน ISO 2768

1.การหาผลกระทบของระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกสูบ โดยใช้เพลาชองเหวี่ยงเป็นตัวขับเคลื่อน โดยเทียบกับเวลาทั้งหมด 62 ค่า โดยใช้ time step = 360 ซึ่งจะแสดงด้วยผลการทดลองในตาราง

ตาราง 8 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8	แบบที่ 9
0	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300
6	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622
12	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988
18	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750
24	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456
30	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793
36	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522
42	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379
48	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988
54	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793
60	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043
66	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823
72	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111
78	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833
84	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912
90	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293
96	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959
102	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936
108	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284
114	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088
120	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421
126	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303
132	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637
138	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153
144	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383
150	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679
156	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293

ตาราง 8 (ต่อ)

Crank (°)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8	แบบที่ 9
156	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808
162	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976
168	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019
174	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408
180	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815
186	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137
192	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503
198	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266
204	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971
210	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308
216	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037
222	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895
228	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503
234	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308
240	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558
246	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338
252	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626
258	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348
264	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427
270	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808
276	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475
282	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451
288	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800
294	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603
300	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936
306	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818
312	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152
318	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669
324	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898
330	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195
336	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808
342	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976
348	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019
354	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408
360	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815

ตาราง 9 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 10	แบบที่ 11	แบบที่ 12	แบบที่ 13	แบบที่ 14	แบบที่ 15	แบบที่ 16	แบบที่ 17	แบบที่ 18
0	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300
6	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622
12	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988
18	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750
24	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456
30	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793
36	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522
42	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379
48	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988
54	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793
60	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043
66	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823
72	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111
78	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833
84	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912
90	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293
96	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959
102	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936
108	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284
114	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088
120	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421
126	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303
132	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637
138	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153
144	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383
150	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679
156	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293
162	157.151	156.842	157.461	157.151	156.842	157.461	157.151	156.842	157.461
168	164.199	163.895	164.504	164.199	163.895	164.504	164.199	163.895	164.504
174	168.592	168.291	168.893	168.592	168.291	168.893	168.592	168.291	168.893
180	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300

ตาราง 9 (ต่อ)

Crank (°)	แบบที่ 10	แบบที่ 11	แบบที่ 12	แบบที่ 13	แบบที่ 14	แบบที่ 15	แบบที่ 16	แบบที่ 17	แบบที่ 18
186	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137
192	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503
198	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266
204	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971
210	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308
216	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037
222	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895
228	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503
234	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308
240	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558
246	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338
252	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626
258	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348
264	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427
270	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808
276	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475
282	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451
288	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800
294	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603
300	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936
306	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818
312	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152
318	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669
324	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898
330	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195
336	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808
342	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976
348	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019
354	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408
360	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815

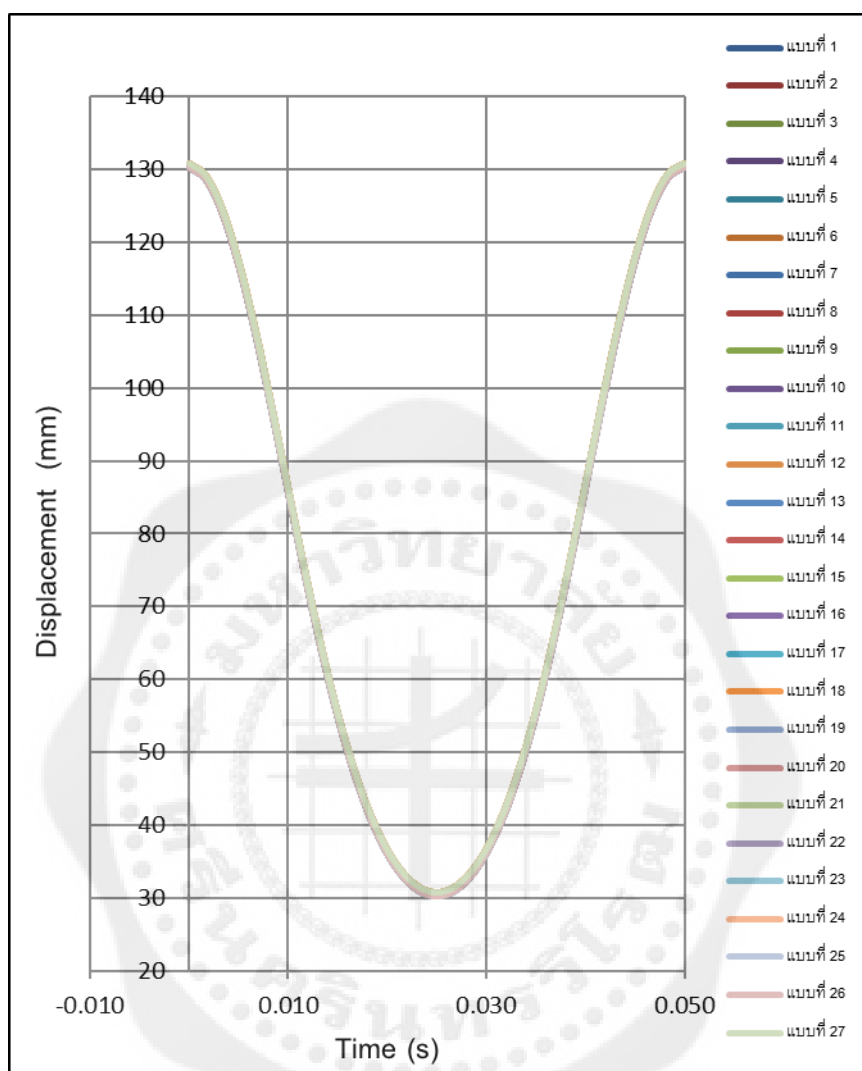
ตาราง 10 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 19	แบบที่ 20	แบบที่ 21	แบบที่ 22	แบบที่ 23	แบบที่ 24	แบบที่ 25	แบบที่ 26	แบบที่ 27
0	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300
6	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622
12	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988
18	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750
24	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456
30	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793
36	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522
42	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379
48	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988
54	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793
60	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043
66	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823
72	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111
78	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833
84	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912
90	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293
96	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959
102	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936
108	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284
114	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088
120	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421
126	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303
132	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637
138	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153
144	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383
150	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679
156	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293
162	157.151	156.842	157.461	157.151	156.842	157.461	157.151	156.842	157.461
168	164.199	163.895	164.504	164.199	163.895	164.504	164.199	163.895	164.504
174	168.592	168.291	168.893	168.592	168.291	168.893	168.592	168.291	168.893
180	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300

ตาราง 10 (ต่อ)

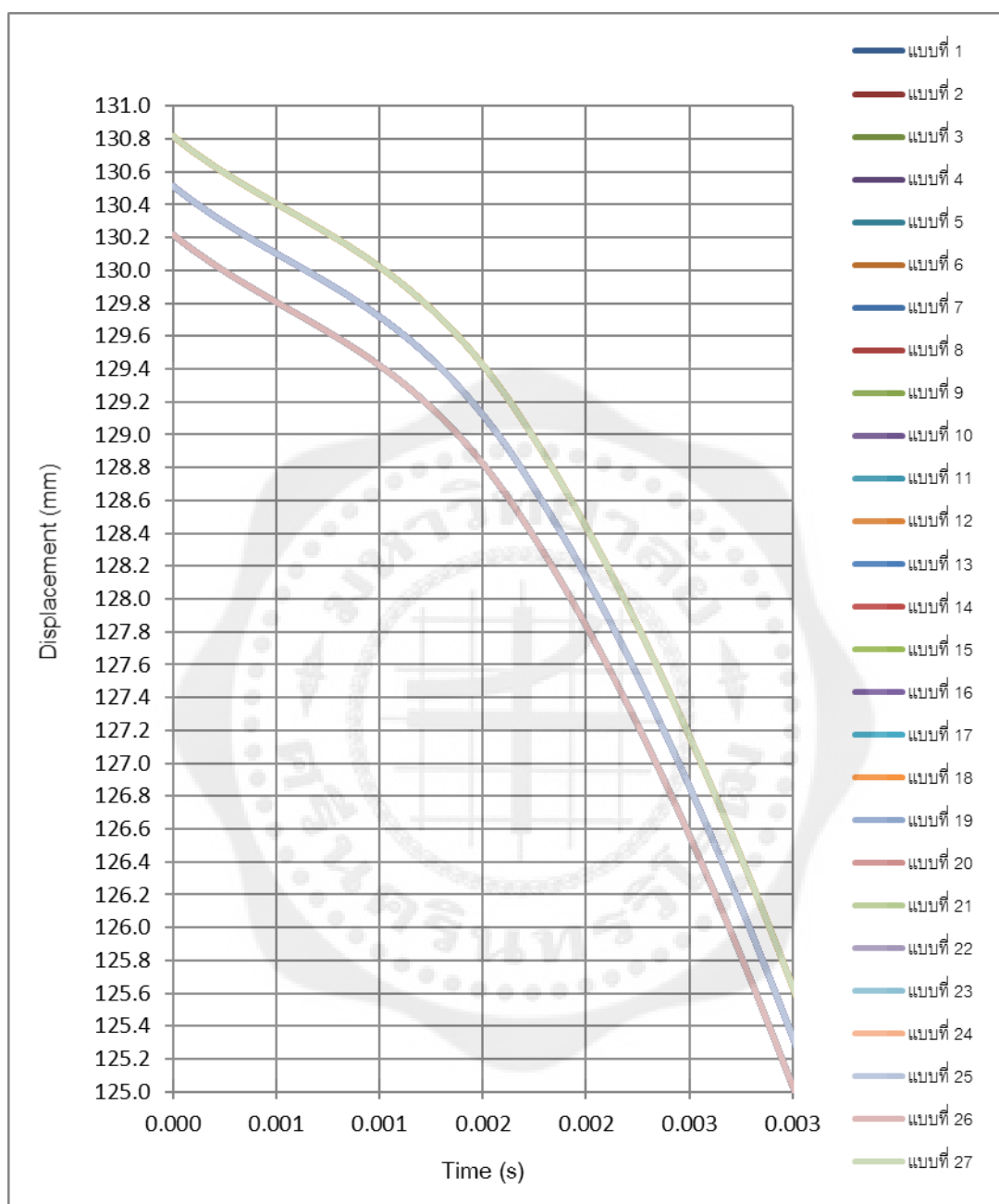
Crank (°)	แบบที่ 19	แบบที่ 20	แบบที่ 21	แบบที่ 22	แบบที่ 23	แบบที่ 24	แบบที่ 25	แบบที่ 26	แบบที่ 27
186	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137
192	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503
198	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266
204	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971
210	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308
216	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037
222	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895
228	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503
234	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308
240	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558
246	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338
252	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626
258	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348
264	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427
270	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808
276	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475
282	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451
288	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800
294	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603
300	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936
306	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818
312	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152
318	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669
324	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898
330	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195
336	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808
342	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976
348	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019
354	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408
360	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815

แสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ตั้งแต่แบบที่ 1 - 27



ภาพประกอบ 94 แสดงกราฟระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ

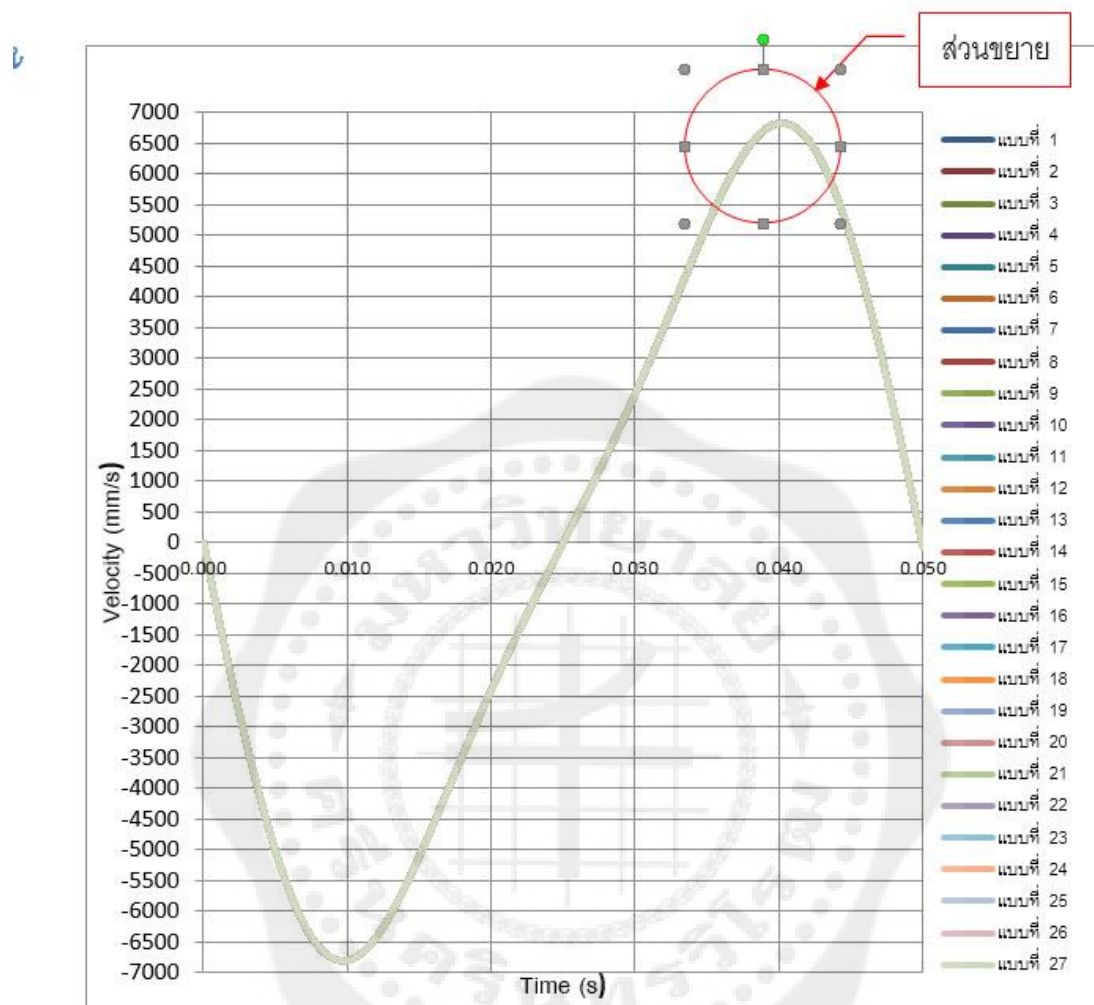
แสดงส่วนขยายของค่าระยะทางการเคลื่อนที่ตั้งแต่แบบที่ 1 – 27



ภาพประกอบ 95 แสดงกราฟส่วนขยายของระยะทางการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ

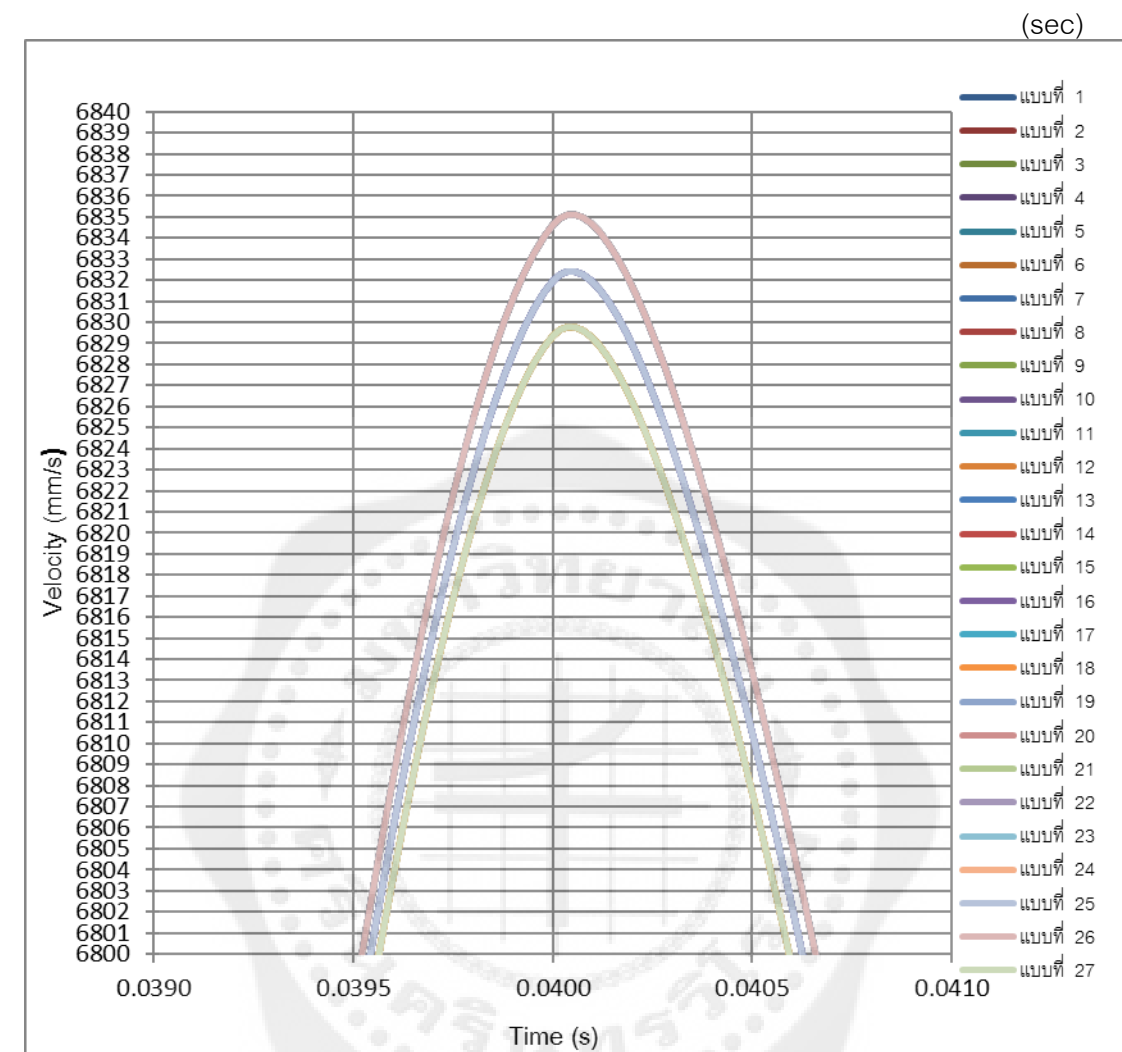
[illegible]

แสดงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ตั้งแต่แบบที่ 1 - 27



ภาพประกอบ 96 แสดงกราฟของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ

แสดงส่วนขยายค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ตั้งแต่แบบที่ 1 - 27



ภาพประกอบ 97 แสดงกราฟส่วนขยายของค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ

ตาราง 14 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8	แบบที่ 9
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50
12	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48
18	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88
24	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43
30	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50
36	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95
42	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62
48	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13
54	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
60	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
66	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
72	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
78	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
84	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
90	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
96	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
102	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
108	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
114	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
120	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
126	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86
132	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95
138	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51
144	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88
150	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97
156	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17
162	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66
168	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73
174	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
180	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

ตาราง 14 (ต่อ)

Crank (°)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8	แบบที่ 9
186	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	-1072341.83	1070799.51
192	-943790.80	-944417.71	-943167.48	-943790.80	944417.71	-943167.48	-943790.80	-944417.71	943167.48
198	-745422.51	-745796.76	-745050.89	-745422.51	745796.76	-745050.89	-745422.51	-745796.76	745050.89
204	-494566.05	-494581.47	-494551.43	-494566.05	494581.47	-494551.43	-494566.05	-494581.47	494551.43
210	-218022.33	-217611.25	-218431.51	-218022.33	217611.25	-218431.51	-218022.33	-217611.25	218431.51
216	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	49728.94
222	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	276064.61
228	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	436626.12
234	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
240	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
246	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
252	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
258	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
264	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
270	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
276	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
282	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
288	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
294	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
300	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
306	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	528033.87
312	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	431801.95
318	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	262144.52
324	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	27534.88
330	-245365.44	-244989.31	-245739.96	-245365.44	244989.31	-245739.96	-245365.44	-244989.31	245739.96
336	-522728.65	-522787.26	-522671.17	-522728.65	522787.26	-522671.17	-522728.65	-522787.26	522671.17
342	-770250.41	-770663.04	-769840.65	-770250.41	770663.04	-769840.65	-770250.41	-770663.04	769840.65
348	-962061.93	-962715.88	-961411.72	-962061.93	962715.88	-961411.72	-962061.93	-962715.88	961411.72
354	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	1080420.18
360	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	1117734.75

ตาราง 15 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 10	แบบที่ 11	แบบที่ 12	แบบที่ 13	แบบที่ 14	แบบที่ 15	แบบที่ 16	แบบที่ 17	แบบที่ 18
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50
12	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48
18	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88
24	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43
30	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50
36	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95
42	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62
48	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13
54	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
60	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
66	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
72	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
78	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
84	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
90	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
96	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
102	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
108	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
114	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
120	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
126	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86
132	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95
138	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51
144	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88
150	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97
156	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17
162	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66
168	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73
174	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
180	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

ตาราง 15 (ต่อ)

Crank (°)	แบบที่ 10	แบบที่ 11	แบบที่ 12	แบบที่ 13	แบบที่ 14	แบบที่ 15	แบบที่ 16	แบบที่ 17	แบบที่ 18
186	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	-1072341.83	0799.51	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51
192	-943790.80	-944417.71	-943167.48	-943790.80	-944417.71	1167.48	-943790.80	-944417.71	-943167.48
198	-745422.51	-745796.76	-745050.89	-745422.51	-745796.76	1050.89	-745422.51	-745796.76	-745050.89
204	-494566.05	-494581.47	-494551.43	-494566.05	-494581.47	1551.43	-494566.05	-494581.47	-494551.43
210	-218022.33	-217611.25	-218431.51	-218022.33	-217611.25	1431.51	-218022.33	-217611.25	-218431.51
216	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	728.94	50533.86	51343.61	49728.94
222	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	064.61	277106.75	278155.67	276064.61
228	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	626.12	437651.25	438683.02	436626.12
234	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	421.77	526182.94	526948.60	525421.77
240	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	134.91	554489.86	554846.32	554134.91
246	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	015.10	543950.63	543885.06	544015.10
252	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	476.58	516067.27	515655.17	516476.58
258	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	702.16	487054.90	486403.99	487702.16
264	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	683.32	466902.73	466118.12	467683.32
270	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	456.76	460636.18	459811.49	461456.76
276	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	478.18	469706.64	468931.06	470478.18
282	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	108.64	492482.47	491852.63	493108.64
288	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	949.99	523578.56	523204.43	523949.99
294	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	335.28	552328.98	552321.84	552335.28
300	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	121.70	561552.29	561984.88	561121.70
306	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	033.87	528874.82	529720.89	528033.87
312	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	801.95	432889.79	433984.81	431801.95
318	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	144.52	263214.63	264291.77	262144.52
324	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	334.88	28330.37	29130.61	27534.88
330	-245365.44	-244989.31	-245739.96	-245365.44	-244989.31	1739.96	-245365.44	-244989.31	-245739.96
336	-522728.65	-522787.26	-522671.17	-522728.65	-522787.26	1671.17	-522728.65	-522787.26	-522671.17
342	-770250.41	-770663.04	-769840.65	-770250.41	-770663.04	1840.65	-770250.41	-770663.04	-769840.65
348	-962061.93	-962715.88	-961411.72	-962061.93	-962715.88	1411.72	-962061.93	-962715.88	-961411.72
354	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	0420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
360	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	7734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

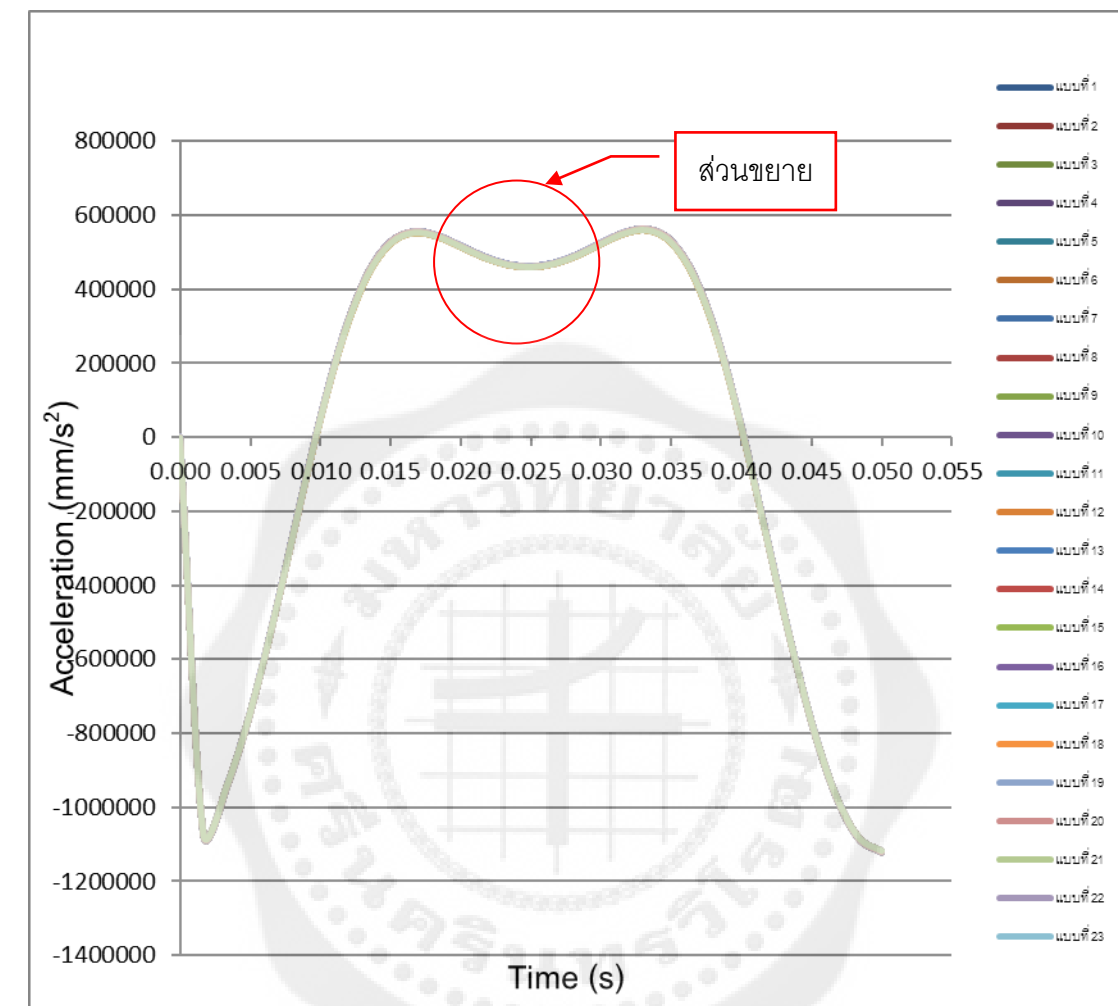
ตาราง 16 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 19	แบบที่ 20	แบบที่ 21	แบบที่ 22	แบบที่ 23	แบบที่ 24	แบบที่ 25	แบบที่ 26	แบบที่ 27
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50
12	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48
18	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88
24	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43
30	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50
36	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95
42	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62
48	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13
54	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
60	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
66	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
72	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
78	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
84	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
90	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
96	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
102	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
108	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
114	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
120	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
126	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86
132	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95
138	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51
144	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88
150	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97
156	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17
162	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66
168	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73
174	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
180	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

ตาราง 16 (ต่อ)

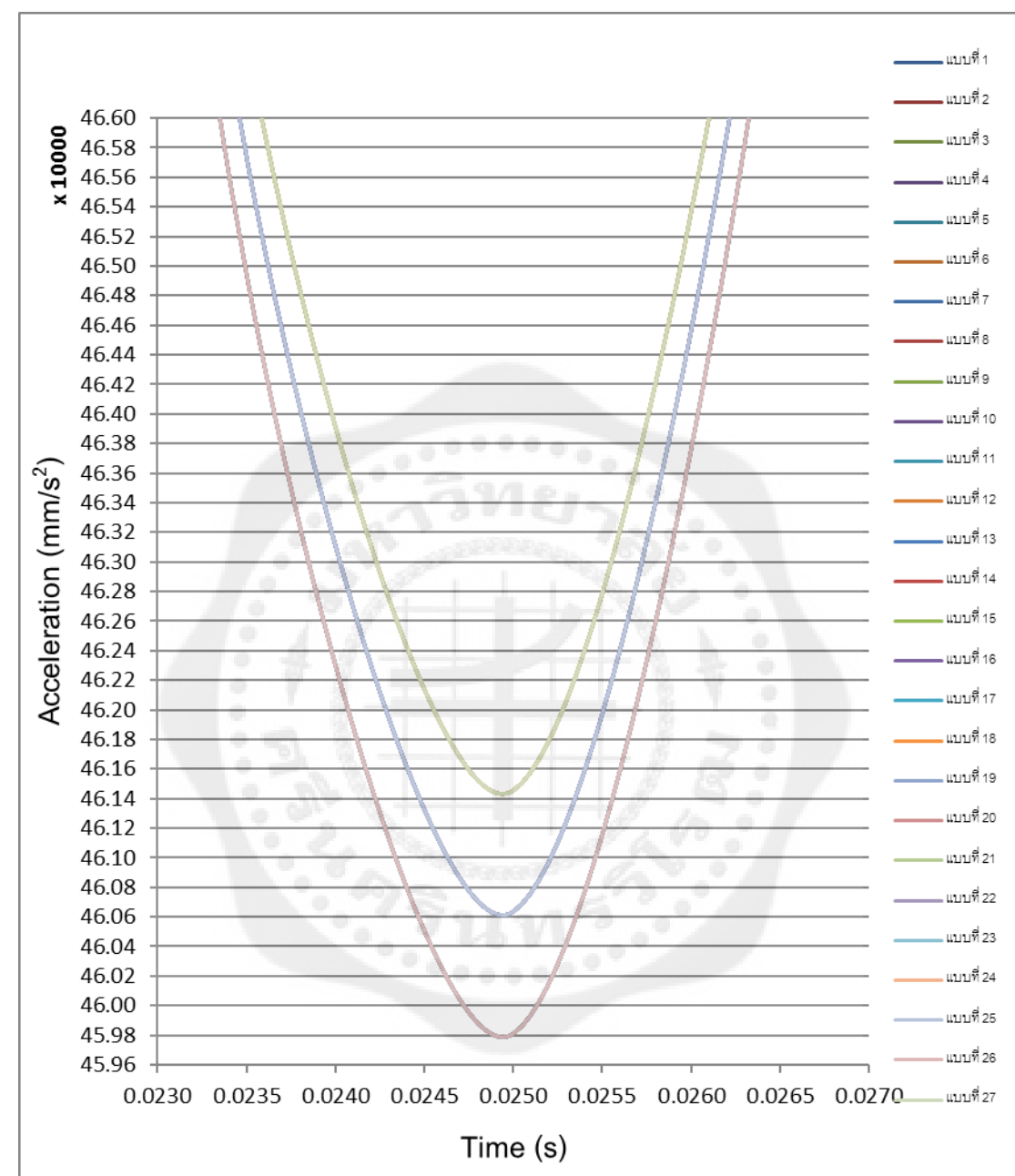
Crank (°)	แบบที่ 19	แบบที่ 20	แบบที่ 21	แบบที่ 22	แบบที่ 23	แบบที่ 24	แบบที่ 25	แบบที่ 26	แบบที่ 27
186	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51
192	-943790.80	-944417.71	-943167.48	-943790.80	-944417.71	-943167.48	-943790.80	-944417.71	-943167.48
198	-745422.51	-745796.76	-745050.89	-745422.51	-745796.76	-745050.89	-745422.51	-745796.76	-745050.89
204	-494566.05	-494581.47	-494551.43	-494566.05	-494581.47	-494551.43	-494566.05	-494581.47	-494551.43
210	-218022.33	-217611.25	-218431.51	-218022.33	-217611.25	-218431.51	-218022.33	-217611.25	-218431.51
216	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	49728.94
222	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	276064.61
228	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	436626.12
234	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
240	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
246	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
252	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
258	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
264	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
270	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
276	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
282	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
288	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
294	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
300	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
306	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	528033.87
312	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	431801.95
318	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	262144.52
324	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	27534.88
330	-245365.44	-244989.31	-245739.96	-245365.44	-244989.31	-245739.96	-245365.44	-244989.31	-245739.96
336	-522728.65	-522787.26	-522671.17	-522728.65	-522787.26	-522671.17	-522728.65	-522787.26	-522671.17
342	-770250.41	-770663.04	-769840.65	-770250.41	-770663.04	-769840.65	-770250.41	-770663.04	-769840.65
348	-962061.93	-962715.88	-961411.72	-962061.93	-962715.88	-961411.72	-962061.93	-962715.88	-961411.72
354	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
360	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

แสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ตั้งแต่แบบที่ 1 - 27



ภาพประกอบ 98 แสดงกราฟของค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ

แสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ตั้งแต่แบบที่ 1 - 27



ภาพประกอบ 99 แสดงกราฟส่วนขยายของค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ของลูกสูบทั้ง 27 แบบ

สำหรับผลการคำนวณค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเร่ง ของการจำลองการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยสมการจลศาสตร์

$$s = r \cos(\theta) + \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2(\theta)} \quad (4-1)$$

$$v = -r \sin \theta - \frac{r^2 \sin(\theta) \cos(\theta)}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2(\theta)}} \quad (4-2)$$

$$a = -r \cos(\theta) - \frac{r^2 \cos^2(\theta)}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2(\theta)}} + \frac{r^2 \sin^2(\theta)}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2(\theta)}} - \frac{r^4 \sin^2(\theta) \cos^2(\theta)}{(\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2(\theta)})^3} \quad (4-3)$$

โดยที่

- s คือ ระยะทางที่ลูกสูบเคลื่อนที่ (วัดตามแนวจุดศูนย์กลางเพลลาข้อเหวี่ยงตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ)
- v คือ ความเร็วของสลักก้านสูบ (วัดตามแนวจุดศูนย์กลางเพลลาข้อเหวี่ยงตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ)
- a คือ ความเร่งของสลักก้านสูบ (วัดตามแนวจุดศูนย์กลางเพลลาข้อเหวี่ยงตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกสูบ)

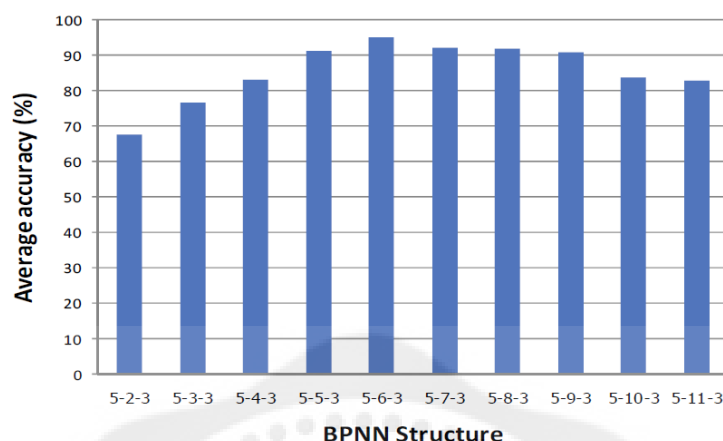
ตาราง 17 ผลการคำนวณค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเร่ง ของการจำลองการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงด้วยสมการจลศาสตร์

ค่าความคลาดเคลื่อน	ระยะทางการเคลื่อนที่ (mm)	ความเร็ว (mm/s)	ความเร่ง (mm/s ²)
ค่าน้อยสุด	69.693	13.610	459811.490
ค่ามาตรฐาน	69.993	13.782	460636.180
ค่ามากที่สุด	70.293	13.954	461456.756

2. ผลการสอนโครงข่ายประสาทเทียม

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยมีขั้นตอนการส่งค่าย้อนกลับในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนกลไกของจลนศาสตร์ทั้งหมด 13 เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการสอนโดยจะครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของเพลลาข้อเหวี่ยงที่ใช้เป็นกรณีศึกษาซึ่งจะมีองศาการหมุนตั้งแต่ $(\theta) = 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330$ และ 360 องศา โดยทั้ง 13 องศาในการหมุนนี้จะป้อนข้อมูลฝึกสอนให้กับโครงข่ายประสาทเทียมโดยมีขั้นตอนการส่งค่าย้อนกลับ โดยจะมีรูปแบบการสอนให้กับโปรแกรมทั้งหมด 10 รูปแบบที่ถูกใช้ในการสอน ซึ่งแต่

ละแบบก็จะมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำแตกต่างกันไป โดยรูปแบบที่มีโครงสร้างแบบ 5-6-3 จะให้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำมากที่สุดเมื่อเทียบผลลัพธ์กับการคำนวณด้วยสมการจลนศาสตร์ คือ 95.130%



ภาพประกอบ 100 แสดงผลความแม่นยำผลการคำนวณด้วยโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโครงสร้างการสอนที่ต่างกัน

3. การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโครงข่ายประสาทเทียมและสมการจลนศาสตร์
การทดลองเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีและการ solve ด้วยโปรแกรม
ซึ่งจะนำค่ามาตรฐานจากตารางที่ 16 มาทำการทดลองเพียงค่าเดียว ผลเป็นดังแสดงในตารางดังนี้

ตาราง 18 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ที่จุด A จากการคำนวณและ solve ด้วยโปรแกรม BPNN

องศาในการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยง (°)	ค่าระยะทางที่ คำนวณจากBPNN (mm)	ค่าระยะทางที่ คำนวณจากสมการ จลศาสตร์ (mm)	% ค่าความคลาด เคลื่อน
0	173.740	170.000	2.200
30	139.474	136.917	1.868
60	88.630	86.917	1.971
90	71.533	70.000	2.190
120	89.014	86.911	2.420
150	140.379	136.907	2.536
180	173.740	170.000	2.200
210	139.474	136.927	1.860
240	88.630	86.923	1.964
270	71.533	70.000	2.190
300	89.014	86.905	2.427
330	140.379	136.897	2.543
360	173.740	170.000	2.200

ตาราง 19 ตารางแสดงค่าความเร็ว ที่จุด A จากการคำนวณและ solve ด้วยโปรแกรม BPNN

องศาในการหมุนของเพลาช้อเหวี่ยง (°)	ค่าความเร็วที่ คำนวณจากBPNN (mm/s)	ค่าความเร็วที่ คำนวณจากสมการ จลศาสตร์ (mm/s)	% ค่าความคลาด เคลื่อน
0	0.000	0.000	0.000
30	-6886.644	-6656.664	3.455
60	-4331.665	-4226.029	2.500
90	14.251	13.954	2.125
120	4408.619	4225.206	4.341
150	6880.398	6657.005	3.356
180	-85.532	-83.912	1.931
210	-6886.644	-6656.322	3.460
240	-4331.665	-4226.852	2.480
270	14.251	13.954	2.125
300	4408.619	4224.384	4.361
330	6880.398	6657.346	3.350
360	-85.532	-83.912	1.931

ตาราง 20 ตารางแสดงค่าความเร่ง ที่จุด A จากการคำนวณและ solve ด้วยโปรแกรม BPNN

องศาในการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยง (°)	ค่าความเร่งที่ คำนวณจากBPNN (mm/s ²)	ค่าความเร่งที่ คำนวณจากสมการ จลศาสตร์ (mm/s ²)	% ค่าความคลาด เคลื่อน
0	0.000	0.000	0.000
30	-949220.503	-825265.609	15.020
60	295822.456	269677.247	9.695
90	924960.460	789552.249	17.150
120	-42114.629	-35625.453	18.215
150	-575663.745	-519739.748	10.760
180	-933261.113	-789460.824	18.215
210	-817484.433	-825366.685	-0.955
240	284109.854	269464.461	5.435
270	849347.396	789613.160	7.565
300	-37401.095	-35473.130	5.435
330	-559014.339	-519699.102	7.565
360	-882746.397	-789399.863	11.825

ตาราง 21 ตารางเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของโปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหวเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีของระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่งของกลไกเพลาช้อเหวี่ยง

	องศาในการหมุนของ เพลาช้อเหวี่ยง (°)	Ø ของเพลาช้อ เหวี่ยง (mm)	Ø ของก้านสูบ (mm)	ความยาวก้าน สูบ (mm)	ค่าที่คำนวณจาก BPNN	ค่าที่คำนวณจาก สมการจลศาสตร์	% ความคลาด เคลื่อน
ระยะทาง (mm)	0	59.7	59.7	120	170.068	170.000	0.040
	60	59.7	60.3	120	92.483	86.722	6.643
	120	60.3	60	119.7	89.726	86.775	3.401
	210	60.3	59.7	120.3	105.430	97.308	8.347
ความเร็ว (mm/s)	0	59.7	59.7	120	0.035	0.000	-
	60	59.7	60.3	120	-4393.624	-4189.231	4.879
	120	60.3	60	119.7	3853.957	4260.116	-9.534
	210	60.3	59.7	120.3	-6863.858	-6656.831	3.110
ความเร่ง (mm/s ²)	0	59.7	59.7	120	0.013	0.000	-
	60	59.7	60.3	120	527741.269	554489.860	-4.824
	120	60.3	60	119.7	548564.681	561984.880	-2.388
	210	60.3	59.7	120.3	-230128.517	-218431.510	5.355

บทที่ 5

การประยุกต์การทำนายผลกระทบของ GD&T กับอุปกรณ์อื่น

ในช่วงระยะเวลา 5 ปีที่ผ่านมา การใช้เครื่องจักรกลการเกษตรในประเทศไทยมีการเติบโตขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลหลักๆ 2 ประการคือ ประการแรกเป็นการเปลี่ยนรุ่นของผู้ที่ทำการเกษตรจากเกษตรกรรุ่นเดิมมาเป็นคนรุ่นใหม่ (ทำให้เกิดการยอมรับในการใช้เครื่องจักรกลการเกษตรมากขึ้น) และประการที่สองการขาดแคลนแรงงานภาคการเกษตร

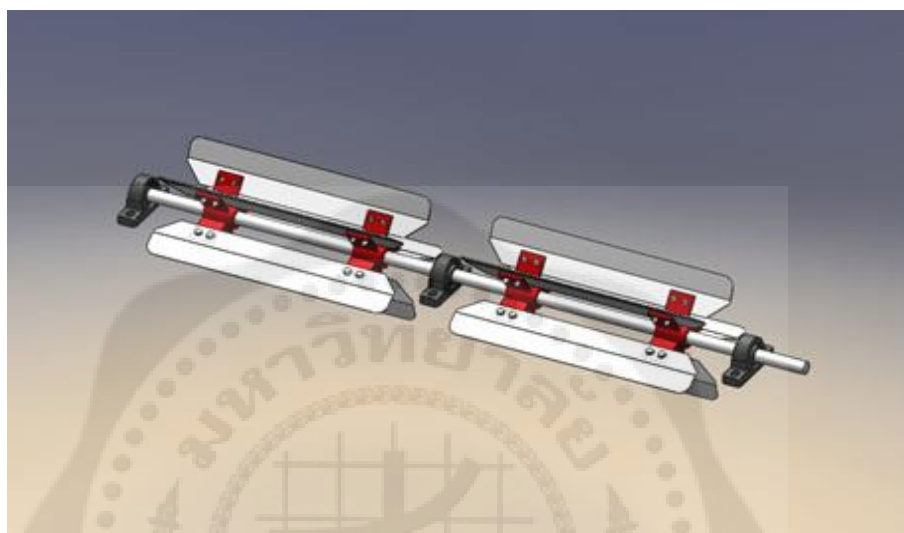
อย่างไรก็ตามยังคงเป็นที่ถกเถียงกันในวงกว้างเกี่ยวกับขนาดของเครื่องจักรกลทั้งนี้เนื่องจากมีความเห็นที่แตกต่างกันเกี่ยวกับพื้นที่ทำการเกษตร (เกี่ยวเนื่องโดยตรงกับขนาดของเครื่องจักรกลการเกษตร) โดยทางหนึ่งเห็นว่าในอนาคตเกษตรกรแต่ละคนจะมีพื้นที่ทำการเกษตรไม่มากประมาณไม่เกินครอบครัวละ 10-20 ไร่ (เช่นเดียวกับในประเทศญี่ปุ่น) จึงมีความต้องการเครื่องจักรกลการเกษตรที่มีขนาดกะทัดรัด และในแต่ละครอบครัวจะมีเครื่องจักรกลเป็นของตนเอง ในขณะที่อีกกลุ่มหนึ่งมองว่าเกษตรกรยังคงมีพื้นที่ในการทำการเกษตรได้ถึงครอบครัวละหลายสิบไร่ขึ้นไป ซึ่งต้องการเครื่องจักรกลขนาดกลางหรือใหญ่ขึ้นไป โดยบางครอบครัวหรือสถาบันเกษตรกรจะเป็นเจ้าของเครื่องจักรกลการเกษตรขนาดใหญ่เหล่านั้น ส่วนเกษตรกรที่เหลือจะว่าจ้างเครื่องจักรมาทำงาน

นอกจากนี้ในส่วนของกลุ่มลูกค้านั้น กลุ่มลูกค้าหลักนอกจากจะเป็นเกษตรกรในประเทศไทยแล้ว ยังมีเกษตรกรในกลุ่มประเทศ CLMV เกษตรกรในประเทศอินเดีย เกษตรกรในประเทศบังกลาเทศ และเกษตรกรในประเทศอินโดนีเซีย เป็นลูกค้าที่สำคัญ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้านสภาพการตลาดและผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยจึงได้กำหนดแนวทางการออกแบบเครื่องจักรกลการเกษตรต้นแบบที่เหมาะสมกับวิสาหกิจ ไว้ดังนี้คือ

1. เครื่องจักรกลการเกษตรควรเป็นเครื่องจักรกลการเกษตรสำหรับพืชเกษตรที่สำคัญของประเทศไทยและกลุ่มประเทศ CLMV ซึ่งได้แก่ ข้าว อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นหลัก
2. ควรเป็นเครื่องจักรที่มีใช้อยู่แล้วแต่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอหรือเป็นเครื่องจักรใหม่ที่ต้องตอบโจทย์การเพาะปลูกได้อย่างเหมาะสม
3. เครื่องจักรกลการเกษตรที่ควรเข้าร่วมโครงการจะต้องมีการบำรุงรักษาและการใช้งานที่ง่ายและมีต้นทุนการผลิตที่แข่งขันได้ (เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพและสมรรถนะระดับเดียวกัน) และจะต้องมี operating cost ที่ต่ำ

จากเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาเครื่องนวดข้าวต้นแบบจะมุ่งเน้นการนวดข้าวพันธุ์ กข เป็นหลัก โดยสามารถประยุกต์กับผลิตภัณฑ์ทางเกษตรอื่นๆ เช่น ข้าวโพด ได้อีกด้วย สำหรับสภาวะการทำงานนั้น ใบพัดลมจะทำงานด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 3,000 rpm (ทำงานปกติที่ 2,000 rpm) ต่อเนื่องได้ไม่เกิน 12 ชั่วโมง การขึ้นรูปใบพัดจะใช้กระบวนการพับขึ้นรูปจากเหล็กแผ่น รูเจาะใช้สว่านเจาะตามตำแหน่งที่กำหนด ใบพัดแต่ละชุดจะประกอบด้วยใบพัดจำนวน 5 ใบดังภาพ



ภาพประกอบ 101 ตัวอย่างแบบวาด 3 มิติ ของใบพัดลม

1. วิธีการดำเนินงาน

1.1 ใบพัดลม

1.1 สภาวะแวดล้อมในการทำงาน

สภาวะแวดล้อมสำหรับการใช้งานจริงของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวคือ เครื่องนวดข้าวต้องทำงานกลางแจ้งตลอดทั้งวัน โดยสภาวะอากาศเป็นแบบร้อนชื้น (เป็นสภาวะอากาศสำหรับประเทศไทย บังคลาเทศ และกลุ่มประเทศ CLMV)

1.2 สมมุติฐานในการออกแบบ

เครื่องนวดข้าวต้นแบบจะมุ่งเน้นการนวดข้าวพันธุ์ กข เป็นหลัก โดยสามารถประยุกต์กับผลิตภัณฑ์ทางเกษตรอื่นๆ เช่น ข้าวโพด ได้อีกด้วย สำหรับสภาวะการทำงานนั้น ใบพัดลมจะทำงานด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 3,000 rpm (ทำงานปกติที่ 2,000 rpm) ต่อเนื่องได้ไม่เกิน 12 ชั่วโมง การขึ้นรูปใบพัดจะใช้กระบวนการพับขึ้นรูปจากเหล็กแผ่น รูเจาะใช้สว่านเจาะตามตำแหน่งที่กำหนด ใบพัดแต่ละชุดจะประกอบด้วยใบพัดจำนวน 5 ใบ

1.3 วัสดุที่เลือกใช้

วัสดุที่เลือกใช้จะเป็นวัสดุที่หาง่ายในประเทศไทยคือ เหล็กแผ่นดำ SS400 ที่มีความหนา 1.6 mm และ 2.0 mm

1.4 ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

ได้ทำการจำลองด้วย Finite Element Method สำหรับใบพัดของเครื่องนวดข้าวรุ่น 4 ฟุต ซึ่งได้ผลการจำลองดังนี้

ใบพัดของเครื่องนวดข้าวรุ่นฟุต 4

มีรายละเอียดดังนี้

$$D_1 = 88.776 \text{ mm}$$

$$D_2 = 264.088 \text{ mm}$$

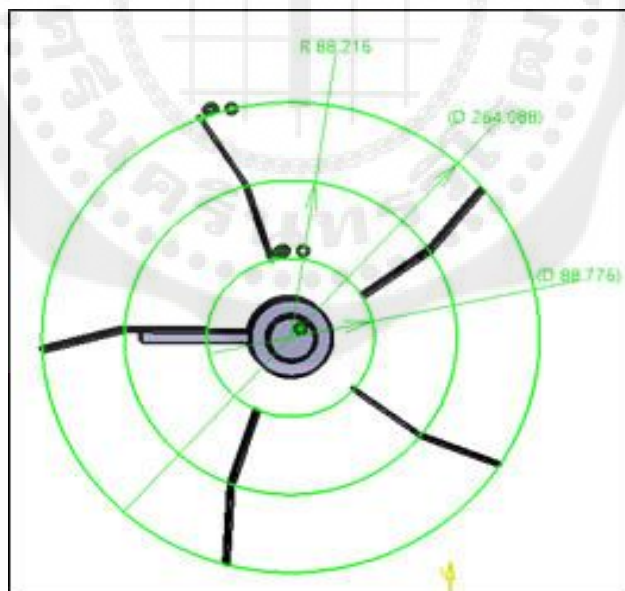
$$r = 88.216 \text{ mm}$$

$$\text{Mass} = 0.546 \text{ kg}$$

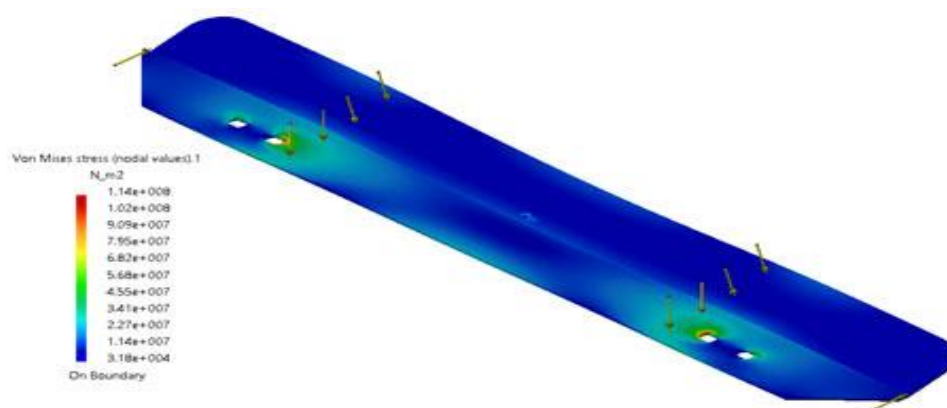
$$\text{Thickness} = 1.6 \text{ mm}$$

$$N = 2000 \text{ rpm (Pressure } 213.3493 \text{ N/m}^2)$$

$$\text{, (Centrifugal force } 2112.7907 \text{ N)}$$



ภาพประกอบ 102 ใบพัดสำหรับเครื่องนวดข้าวรุ่น 4 ฟุต



ภาพประกอบ 103 ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM

จากผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 103 จะพบว่า maximum stress ที่เกิดขึ้นต่ำกว่าค่า yield stress ของวัสดุอยู่พอสมควร ดังนั้นจึงสามารถนำไปผลิตจริงได้

1.5 การประมาณต้นทุนการผลิต

จากการประมาณร่วมสถานประกอบการ ต้นทุนการผลิตสำหรับใบพัดชุด 5 ใบ (ครอบคลุมถึง ค่าแรง ค่าวัสดุ ค่าเครื่องจักร และค่าไฟฟ้า) รุ่น 4 ชุด ต้นทุนชุดละ 850 บาท

1.6 เนื่องจากการผลิตจำนวนมากๆ จะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในใบพัด นวดข้าวให้เกิดการสั่นในเวลาและเกิดข้าวหักขึ้นเมื่อเวลานำข้าวไปสี ดังนั้นแนวทางในการประยุกต์ การทำนายผลกระทบของ GD&T โดยอาศัยหลักการจัดกลุ่มผลิตภัณฑ์จึงเป็นแนวคิดที่ใช้หลัก สมการทางคณิตศาสตร์มาจัดกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีความใกล้เคียงกันในด้านขนาด รูปร่างและน้ำหนัก เพื่อให้เวลานำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี Monte Carlo Simulation

วิธีของ Monte Carlo คือการใช้การสุ่มตัวอย่างอย่างสุ่มซ้ำๆ กันเพื่อสร้างข้อมูลที่จำลอง ตามตัวแบบคณิตศาสตร์ ตัวแบบนั้นโดยมากจะมาจากการวิเคราะห์ทางสถิติ เช่น การออกแบบการ ทดลอง design of experiment (DOE) หรือ การวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เป็น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร ตัวแปรหนึ่งเรียกว่าตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (independent variable) แทนด้วย X อีกตัวแปรหนึ่งเรียกว่าตัวแปรตาม (dependent variable) แทนด้วย Y เป็นการดูความสัมพันธ์ว่าถ้าตัวแปรอิสระเปลี่ยนไปแล้วตัวแปรตามเปลี่ยนไปด้วย หรือไม่ ซึ่งสองตัวแปรนั้นจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ การวิเคราะห์การถดถอยสามารถเขียน

รูปแบบความสัมพันธ์ของสองตัวแปรได้ในรูปของสมการการถดถอย ซึ่งสามารถพยากรณ์ค่าได้ในอนาคต หรือสามารถดูแนวโน้มของตัวแปรตามได้เมื่อเราทราบค่าตัวแปรอิสระ การวิเคราะห์การถดถอยเมื่อมีตัวแปรอิสระหนึ่งตัวแปรและตัวแปรตามหนึ่งตัวแปร แต่ถ้าหากตัวแปรตามหนึ่งตัวแปรกับตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปร จะเรียกว่าการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (multiple regression) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta X_i + \varepsilon_i \quad (5-1)$$

เมื่อ β_0 แทนระยะตัดแกน y (y – intercept)

β แทนความชันของเส้นถดถอย (slope)

การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบจุดของ β_0 และ β ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด หรือ OLS (Ordinary Least Square) ซึ่งคำนวณค่าจาก

$$SSE = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (5-2)$$

2.2 ทฤษฎีการสั่นสะเทือน

อุปกรณ์ ชิ้นส่วนทางกลหรือเครื่องจักรกลทั่วไปที่มีทั้งสภาพด้านการเคลื่อนที่ (เช่น มวล หรือโมเมนต์ความเฉื่อย) และสภาพยืดหยุ่นได้ ระบบทางกลนั้นจะสามารถสั่นสะเทือนได้เสมอ ถ้าระบบทางกลนั้นถูกกระตุ้นให้สั่นด้วยความถี่ค่าหนึ่ง หรืออาจถูกทำให้สั่นด้วยแรงภายนอกโดยตรง แล้วทำให้ระบบทางกลมีการสั่นหรือเคลื่อนที่แบบซ้ำลักษณะเดียวกันอย่างสม่ำเสมอในคาบที่พิจารณาเดียวกัน จะเรียกการเคลื่อนที่เช่นนี้ว่าการสั่นสะเทือนทางกล ซึ่งมีสมการดังนี้

$$M_t \ddot{X} + c_t \dot{X} + k_t X = \sum_{i=1}^5 m_i r_i \omega \sin\left(\left[(i-1) \left(\frac{2\pi}{5}\right) + \theta_i + \frac{\pi}{2}\right] + \omega t\right) + \sum_{i=6}^{10} m_i r_i \omega \sin\left(\left[(i-6) \left(\frac{2\pi}{5}\right) + \theta_i + \frac{\pi}{2}\right] + \omega t\right) \quad (5-3)$$

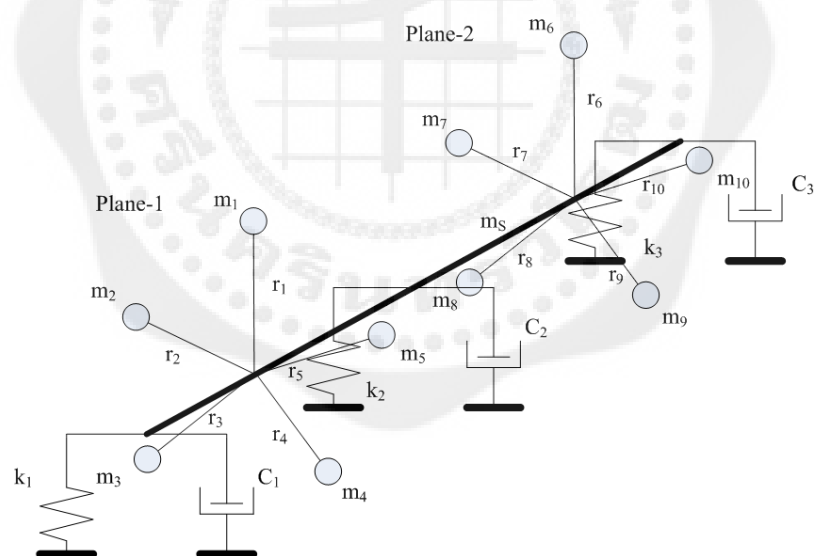
$$M_t = m_s + \sum_{i=1}^{10} m_i \quad (5-4)$$

เมื่อ	X_t	คือ ระยะทาง (m)
	M_t	คือ มวลรวม (kg)
	$m_1 - m_2$	คือ มวลของใบพัดที่ 1- 10 (kg)
	m_s	คือ มวลของเพลลา (kg)
	t	คือ เวลา (s)
	θ_i	คือ ค่าความเบี่ยงเบนจากเส้นตั้งฉาก (rad)
	ω	คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
	k_t	คือ ค่าคงที่ของสปริง (N/m)
	c_t	คือ ค่าคงที่ของความหน่วง (N.s/m)

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 การทำงานของใบพัดเครื่องหวดข้าวกรณีศึกษา

3.1.1 จากภาพประกอบ 102 พบว่าจุดศูนย์กลางมวลของใบพัดที่หนึ่งและสองให้สมมติฐานอยู่ในระนาบที่ 1 และระนาบที่ 2 ดังภาพประกอบ 104



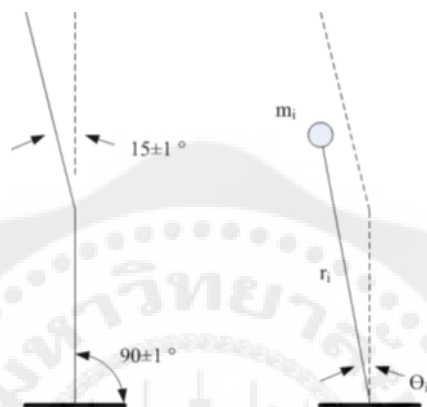
ภาพประกอบ 104 ลักษณะการหมุนของใบพัดสำหรับเครื่องหวดข้าว

3.1.2 ระบายที่ 1 และระบายที่ 2 ขนานกัน

3.1.3 แหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนมาจากการหมุนใบพัดที่ไม่สมดุล

3.1.4 สำหรับการสั่นสะเทือนนี้จะพิจารณาจากมุมในการติดตั้งใบพัดที่ 15 องศา และ 90 องศา ดังภาพประกอบ 105

3.1.5 ในการผลิตใบพัดเครื่องนวดข้าวต้องควบคุมค่า $C_p = 1.00$



ภาพประกอบ 105 มุมในการติดตั้งใบพัด

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย Monte Carlo Simulation

3.2.1 สุ่มเลือกใบพัดเครื่องนวดข้าวที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 0.411 – 0.456 kg แบบไม่มีการแบ่งกลุ่ม แล้วนำไปประกอบเป็นใบพัดเครื่องนวดข้าว แล้วทำการหาค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน

3.2.2 ทำการแบ่งกลุ่มน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันให้อยู่ด้วยกันโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มแล้วจึงทำการหาค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน

3.2.3 ทำการแบ่งกลุ่มน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันให้อยู่ด้วยกันโดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มแล้วจึงทำการหาค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน

3.2.4 ทำการแบ่งกลุ่มน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันให้อยู่ด้วยกันโดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มแล้วจึงทำการหาค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน

3.2.5 กำหนดค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนของใบพัดเครื่องนวดข้าวต้องน้อยกว่า 0.1 mm ที่ $C_p = 1.00$ ทั้งนี้ค่า safety factor แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน = 0.050 mm

3.2.6 ทำการพิจารณาค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนในแต่ละกลุ่มตามการแบ่งกลุ่มที่กำหนด

3.2.7 พิจารณาค่าที่คำนวณจากสมการสันสะท้อนทางกลและเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากวิธีของ Monte Carlo Simulation

ผลการทดลองด้วยวิธีของ Monte Carlo Simulation แสดงได้ดังตาราง 21

ตาราง 22 ผลการทดลองด้วยวิธีของ Monte Carlo Simulation

จำนวนการแบ่งกลุ่ม	น้ำหนักแต่ละกลุ่ม	แอมพลิจูดของการ สันสะท้อนสูงสุด	ผลการทดลอง
1	G1: 0.411 –0.456	0.192	G1 ไม่ผ่าน
2	G1: 0.411 –0.436	0.106	G1 ไม่ผ่าน
	G2: 0.436 –0.456	0.117	G2 ไม่ผ่าน
3	G1: 0.411 –0.426	0.041	G1 ผ่าน
	G2: 0.426 –0.441	0.049	G2 ผ่าน
	G3: 0.441 –0.456	0.087	G3 ไม่ผ่าน
4	G1: 0.411 –0.422	0.037	ทุกกลุ่มผ่าน
	G2: 0.422 –0.436	0.040	
	G3: 0.436 –0.445	0.048	
	G4: 0.445 –0.456	0.043	

เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างวิธี Monte Carlo Simulation กับค่าที่คำนวณจากสมการสันสะท้อนทางกล แสดงได้ดังตาราง 22

ตาราง 23 ผลการทดลองระหว่างวิธี Monte Carlo Simulation กับค่าที่คำนวณจากสมการ
สันสะท้อนทางกล

น้ำหนักของใบพัด เครื่องวัดข้าว (kg)	แอมพลิจูดของการสันสะท้อนสูงสุด ในช่วงเวลา 10 – 30 วินาที (mm)	
	วิธี Monte Carlo Simulation	ค่าที่คำนวณจากสมการ สันสะท้อนทางกล
น้ำหนักของใบพัด เครื่องวัดข้าวที่ 1- 10 ; กรณี การแบ่งในกลุ่มที่ 3 ของการ แบ่งจำนวน 4 กลุ่ม (i=4) 0.439,0.443,0.440,0.438,0.441, 0.442,0.442,0.445,0.437,0.440	0.048	0.872

สรุป

การประยุกต์การทำนายผลกระทบของ GD&T ที่ส่งผลต่อการทำงานของใบพัดเครื่องวัดข้าววิธี monte carlo simulation โดยการสุ่มตัวเลขน้ำหนักที่ได้จากการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมและทำการแบ่งกลุ่มใบพัดที่มีค่าน้ำหนักใกล้เคียงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันก่อนนำมาประกอบ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากสมการสันสะท้อนทางกล พบว่าค่าที่ทำนายผลกระทบของ GD&T ด้วยวิธี monte carlo simulation ให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการสันสะท้อน

จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมที่ต้องมีการผลิตชิ้นส่วนในคราวละปริมาณมากๆ เพื่อทำการจัดกลุ่มของชิ้นส่วนที่มีขนาดและน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันก่อนนำไปประกอบเป็นชิ้นงานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุดต่อไป

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วัตถุประสงค์หลักสำหรับงานวิจัยนี้คือ พัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการทำงานของชิ้นงานทางกล ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทั้งหมด 2 แบบ คือ แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมโดยวิธี back propagation neural network และแบบจำลองผลกระทบของ GD&T ด้วยวิธี monte carlo simulation ซึ่งจะพิจารณาผลการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลที่ครอบคลุมเฉพาะการจัด ความเร็ว และความเร่งเท่านั้น

จากผลการทดลองตามกรณีต่างๆ ข้างต้นของแบบจำลองสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมโดยวิธี back propagation neural network

จากการทดลองด้วยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมโดยวิธี back propagation neural network ต่อการเคลื่อนที่ของกลไกเพลาช้อเหวี่ยง (effect of GD&T on kinematics of crank shaft mechanism) นั้นพบว่าแบบจำลองการเคลื่อนที่ของกลไกเพลาช้อเหวี่ยงที่ออกแบบโดยอาศัยหลักเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตตามมาตรฐาน ISO 2768 โดยมีการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม (learning of neural network) แบบมีผู้สอนให้กับโปรแกรมทั้งหมด 10 รูปแบบที่ถูกใช้ในการสอน ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีค่าเฉลี่ยความแม่นยำแตกต่างกันไป โดยรูปแบบที่มีโครงสร้างแบบ 5-6-3 จะให้ค่าเฉลี่ยความแม่นยำมากที่สุดเมื่อเทียบผลลัพธ์กับการคำนวณด้วยสมการจลนศาสตร์ คือ 95.130% ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนทางด้านมิติของชิ้นส่วนย่อยมีผลต่อการเคลื่อนที่ของกลไกเพลาช้อเหวี่ยง ในด้านระยะทางการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่ง

2. แบบจำลองผลกระทบของ GD&T ด้วยวิธี monte carlo simulation

การทำนายผลกระทบของ GD&T ที่ส่งผลต่อการทำงานของใบพัดเครื่องนวดข้าววิธี monte carlo simulation โดยการสุ่มตัวเลขนำหน้าที่ได้จากการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมและทำการแบ่งกลุ่มใบพัดที่มีค่านำหนักใกล้เคียงกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกันก่อนนำมาประกอบ พบว่าหากทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลทั้งในเชิง GD&T และน้ำหนักของใบพัดเครื่องนวดข้าว จำนวนกลุ่มย่อยที่มากขึ้นจะส่งผลต่อการทำงานของใบพัดที่นำมาประกอบให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้นและลดค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนให้น้อยลง เมื่อเทียบกับการประกอบใบพัดแบบไม่มีการแบ่งกลุ่มใบพัดย่อย ซึ่งน้ำหนักของใบพัดของเครื่องนวดข้าวที่ 1- 10 ในกรณี การแบ่งในกลุ่มที่ 3 ของการแบ่งจำนวน 4 กลุ่ม ($i=4$) 0.439,0.443,0.440,0.438,0.441,0.442,0.442,0.445,0.437,0.440 มีค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.048 mm ซึ่งน้อยกว่าค่าที่คำนวณจากสมการสั่นสะเทือนทางกลคือ 0.872 mm

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากการทำวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายผลกระทบของ GD&T ต่อการเคลื่อนที่และสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเป็นการวิจัยที่มีพิจารณาการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลจะครอบคลุมเฉพาะการกระจัด ความเร็ว และความเร่งเท่านั้น จากการสังเกตในขณะทดลองพบสิ่งที่สามารถปรับปรุงกับการพัฒนาแบบจำลองดังนี้

1. เปลี่ยนชิ้นงานเป็นชนิดอื่นที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะการใช้งานในอุตสาหกรรม เช่น มอเตอร์ คอมเพรสเซอร์ หรือ ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น
2. ทดลองที่ตัวแปรแตกต่างกัน เช่น การสั่นสะเทือน ระยะเวลาในการซ่อมบำรุง หรือระดับของเสียงดังที่เกิดขึ้นขณะเครื่องจักรทำงาน
3. ในการทำออกแบบชิ้นส่วนย่อยต่างๆ สิ่งที่ต้องระวังคือการนำเอามาตรฐานโดยการเลือก tolerance class ที่เหมาะสม ถ้าต้องการความละเอียดสูง ต้องเลือก tolerance class ที่ละเอียดมากกว่านี้ เช่น tolerance class : f (fine) และการจำลองการเคลื่อนที่ของกลไกเพลลาข้อเหวี่ยงควรจะมี safety factor ไว้สำหรับการใช้งานจริงไว้ เพื่อป้องกันกลไกชำรุดเสียหาย
4. ทำการทดลองโดยใช้ปัญหาจากภาคอุตสาหกรรมเป็นหลักว่าอุตสาหกรรมของไทยควรพัฒนาไปในอุตสาหกรรมอนาคต เช่น อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า
5. ออกแบบและพัฒนาแบบจำลองอื่นๆ ด้วยโปรแกรมที่แตกต่างกันและควรทำการเปรียบเทียบค่าตัวแปรที่คำนวณได้กับสมการทางคณิตศาสตร์

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- เด็จ ตระการผล. (2555). การศึกษาการเคลื่อนที่ของกลไกเพลาล้อเหวี่ยงด้วยโปรแกรม
NX MotionSimulation. กรุงเทพฯ.
- เนตรผกา สีหาคารณ. (2555). การจำลองการเคลื่อนที่ของกลไก Scotch Yoke ด้วย UG – NX.
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พลศาสตร์ (Dynamics) บทที่ 5 การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็ง. [ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก:
http://pioneer.netser.chula.ac.th/~rchanat/2103213%20MechI/Dynamics/ch5/dynamics%20ch5%20_part%201_.pdf (วันที่ค้นข้อมูล: 3 มี.ค. 2555)
- วิทยา สงวนวรรณ. (2549). เทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์ขั้นสูง NX. เอส.พี.ซี บุ๊คส์,
กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2529). การเขียนแบบทางเครื่องกล มอก.210
เล่ม 6. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2529). การเขียนแบบทางเครื่องกล มอก.210
เล่ม 8. กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.
- American Society of Mechanical Engineers. (2009). Dimensioning and Tolerancing,
ASME Y14.5-2009. NY: ISBN 0-7918-3192-2.
- A. J. Morris, "Neural networks for process control", *Talk to NSYN Launch Event*, 29
September 1994.
- Camhaoil, M. M., No Date, Static and Dynamic Balancing of Rigid Rotors, Brüel & Kjaer.
- Chean X. B. and A. Geddam. (1997). Accuracy Improvement of three-axis CNC machining
centers by quasi-static error compensation. *Journal of Manufacturing Systems*.
16(5): 323-336.
- Chetwynd, D.G. (1985) .Application of linear programming to engineering
metrology, Proc. Of the Inst. Of Mechanical Engineers, 93-100.
- Chungchoo C. (2013) a. An Application of Finished Test Pieces in ISO 10791-7 for
Performance Evaluation of CNC Machining Centres. Proceedings of the 4th TSME
International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICOME 2013).
Organized by Burapha University. 16-18 October 2013. Pattaya. Chonburi. CD-ROM.

- Chungchoo C. (2013) b. An Application of Finished Test Pieces in ISO 13041-6 for Performance Evaluation of CNC Turning Centres. Proceedings of the 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICOME 2013). Organized by Burapha University. 16-18 October 2013. Pattaya. Chonburi. CD-ROM.
- Cochran, W. G., (1977), Sampling Technique, third ed., John Wiley & Son, USA.
- C. Phocharoen, "Effects of GD&T on Kinematics of Crank Shaft Mechanism", Independent Study, Master of Engineering Program in Industrial Production Technology, Kasetsart University, Bangkok, 2013.
- D. E. Rumelhart, "Parallel distributed processing, plenary session", *IEEE International Conference on Neural Networks*, Unknown Place, 1988.
- D. Flack. (2001). Measurement Good Practice Guide: CMM Measurement Strategies, National Physical Laboratory, U.K.
- Etesami, F. and Qiao, H. J.1990.Analysis of Two-dimensional Measurement Data for Automated Inspection, Of Manufacturing Systems, Vol. 9, NO. 1, 21-34.
- Feese, T. D., and Grazier, P. E., (2004), "Balance this!: case histories from difficult balance jobs", The 33rd Turbomachinery Symposium.
- Flack D. (2001). Measurement Good Practice Guide: CMM Measurement Strategies, National Physical Laboratory, U.K.
- Fuller , W. A., (2009), Sampling Statistics, John Wiley & Son, USA.
- G. Henzold.2006.Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection, Oxford, U.K.
- G. K. Grim, J. W. Haidler, B. J. Mitchell, The Basic of Balancing 202, Balance Technology Inc.,2014.
- Grim, G. K., Haidler, J. W., and Mitchell, B. J., (2014) , The Basic of Balancing 202, Balance Technology Inc.
- [Http://mtsandtg.com/service-and-training-group-services](http://mtsandtg.com/service-and-training-group-services) (accessed on 20 May 2013).
- [Http://www.renishaw.com/en/telescoping-ballbar-systems](http://www.renishaw.com/en/telescoping-ballbar-systems) (accessed on 20 May 2013).
- [Http://www.rotagriponline.com/index.php](http://www.rotagriponline.com/index.php) (accessed on 20 May 2013).
- IRD Balancing, Balance Quality Requirements of Rigid Rotors: The Practical Application of ISO 1940/1, 2009.
- ISO 2768-1:1989., 1989, General Tolerances - Part 1: Tolerances for Linear and Angular Dimensions without Individual Tolerance Indications.

ISO 13041-6:2005 (First Edition) Test Conditions for Numerically Controlled Turning Machines and Turning Centres – Part 6: Accuracy of A Finished Test Piece.

ISO 10791-7:1998 (E) Test Conditions for Machining Centres – Part 7: Accuracy of A Finished Test Piece.

Jeges, R., Monte Carlo simulation in MS Excel, information on
<http://www.projectware.com.au>.

Joel Borchers. Initial version NX 5 for Motion Simulation (Student Guide)
 TR15110-SG-NX5

J. Sietsma and R. J. F. Dow. “Creating Artificial Neural Network that Generalize”, *Neural Networks*, vol. 4, pp. 67–79, 1991.

Lai, K. And Wang J. May. (1988). A Computational Geometry Approach to Geometric Tolerancing, Proc. Of the XVI North American Manufacturing Research Conference, 376-379.

Liu Z. Q. and P. K. Venuvinod. (1999). Error compensation in CNC turning solely from dimensional measurements of previously machined parts. *Annals of the CIRP*. 48(1): 429 – 432.

Mitutoyo, Catalog No. E4180-525, Unknown Date. Data Processing System for Manual/CNC CMM: MCOSMOS.

M. M. Camhaoil, Static and Dynamic Balancing of Rigid Rotors, Brüel & Kjaer, No Date.

N. Khumbumrung. 2010. Fundamental Geometric Dimensioning & Tolerancing I, N-Tris Solutions & Engineering Co., Ltd., Thailand.

NX6 Motion. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://wenku.baidu.com/view/0473e91efad6195f312ba68d.htm>

Products Division, 2000, TM102 Static and Dynamic Balancing, TQ Education and Training Ltd.

Products Division, TM102 Static and Dynamic Balancing, TQ Education and Training Ltd, 2000.

Raksiri C. and M. Parnichkun. 2004. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. 44: 1283-1291.

R. Hecht-Neilson, *Neurocomputing*, Addison-Wesley, MA, 1990.

R. Jeges, Monte Carlo simulation in MS Excel, information on
<http://www.projectware.com.au>.

- S. Das, R. Roy and A. B. Chattopadhyay, "Evaluation of Wear of Turning Carbide Inserts using Neural Networks", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, no. 7, pp. 789–798, 1996
- Shaw C. Feng, Theodore H. Hopp. February 1991. A Review of Current Geometric Tolerancing Theories and Inspection Data Analysis Algorithms, Factory Automation Systems Division, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-0001.
- Sim Mechanics 3.2.2 Model and simulate mechanical systems. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/simmechanics.pdf> (วันที่ค้นข้อมูล : 5 ต.ค. 2555)
- S. K. Thompson, Sampling, third ed., John Wiley & Son, USA, 2012.
- Solid Mechanics. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.freestudy.co.uk/dynamics/velaccdiag.pdf> (วันที่ค้นข้อมูล: 3 ก.ย. 2554)
- Solid Mechanics. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.freestudy.co.uk/dynamics/velaccdiag.pdf> (วันที่ค้นข้อมูล: 5 ต.ค. 2555)
- S. Purushothaman and Y. G. Srinivasa, "A Back-Propagation Algorithm Applied to Tool Wear Monitoring", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 34, no. 5, pp. 625–632, 1994
- T. D. Feese, P. E. Grazier, Balance this!: case histories from difficult balance jobs, The 33rd Turbomachinery Symposium, September 2004.
- Thompson, S. K., 2012, Sampling, third ed., John Wiley & Son, USA.
- velocity_and_acceleration . [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: http://www.codecogs.com/reference/engineering/theory_of_machines/velocity_and_acceleration (วันที่ค้นข้อมูล: 5 ต.ค. 2555)
- W. A. Fuller, Sampling Statistics, John Wiley & Son, USA, 2009.
- W. G. Cochran, Sampling Technique, third ed., John Wiley & Son, USA, 1977.
- Y. Hirose, K. Yamashita and S. Hijiya, "Back-Propagation Algorithm which Varies the Number of Hidden Units", *Neural Networks*, vol. 4, pp. 61–66, 1991.
- Zhu S., G. Ding, S. Qin, J. Lei, L. Zhuang and K. Yan. 2012. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*. 52: 24-29.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก
ผลงานเผยแพร่จากปริญญานิพนธ์

การตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่ปรากฏในฐานข้อมูลการจัดอันดับวารสาร SJR หรือมีการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่ปรากฏในฐานข้อมูลสากล ISI หรือ Scopus

1. Kittichote Supakumnerd., Phaireepinas Phimpisan ., Chatchapol Chungchoo., and Pichai Asadamongkon. (2017). Reducing Fan Blade Vibration in Rice Harvesters and Combine Harvesters by Applying Product Grouping. *In International Journal of Applied Engineering Research*. ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 12 (2017) pp. 3105-3110.
2. Kittichote Supakumnerd., and Chatchapol Chungchoo. (2015). An Application of Finished Test Piece Methods for Evaluating the Performance of Computer Numerical Control Machining and Turing Centers. *In International Journal of KASETSART JOURNAL NATURAL SCIENCE*. ISSN 0075-5192 Volume 49, Number 6 (2015) pp. 951-962.

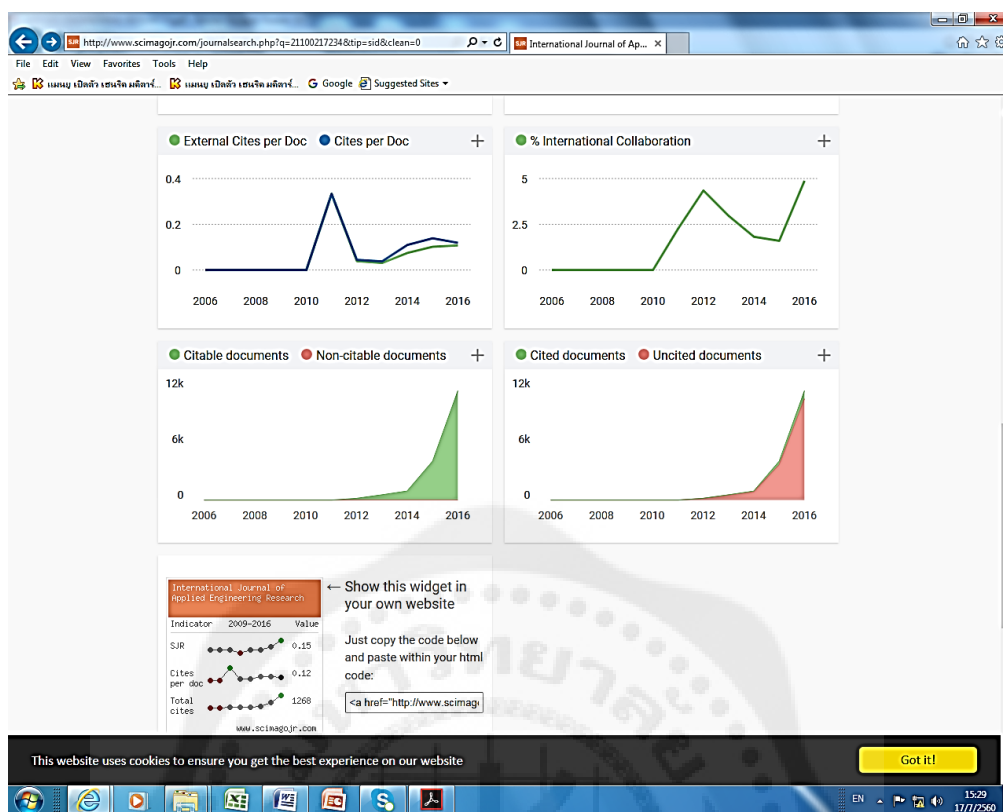
ข้อมูลวารสารนานาชาติ

1. วารสารนานาชาติ International Journal of Applied Engineering Research

ปกในของบทความ



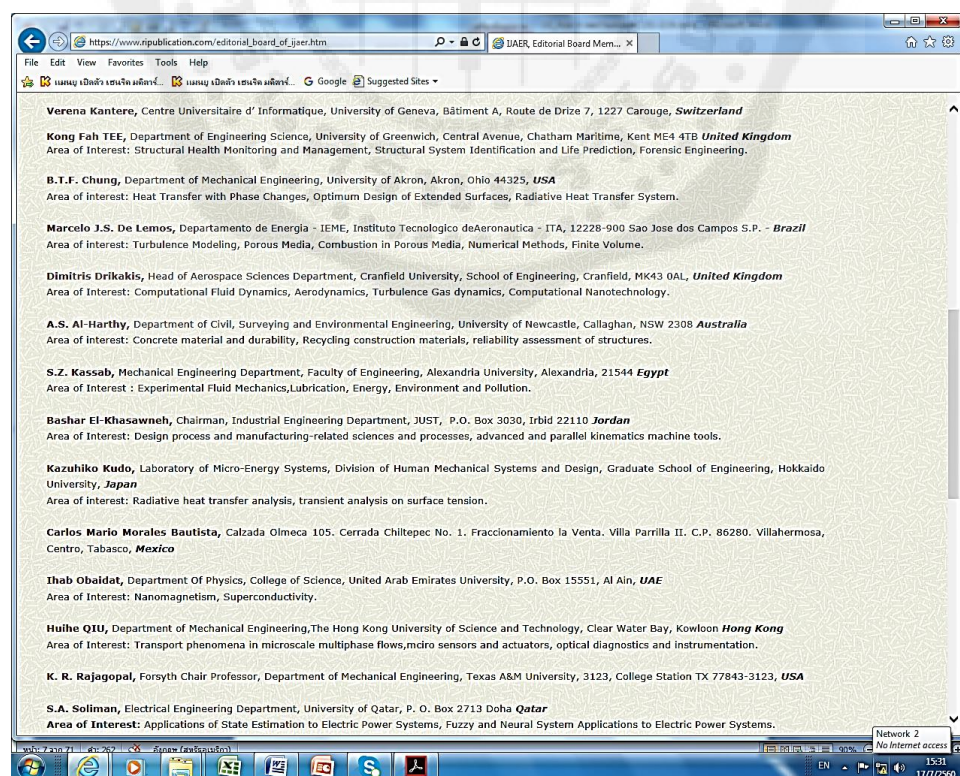
หลักฐานคะแนน SJR มีค่าคะแนน SJR (SCOPUS 2015) 0.260

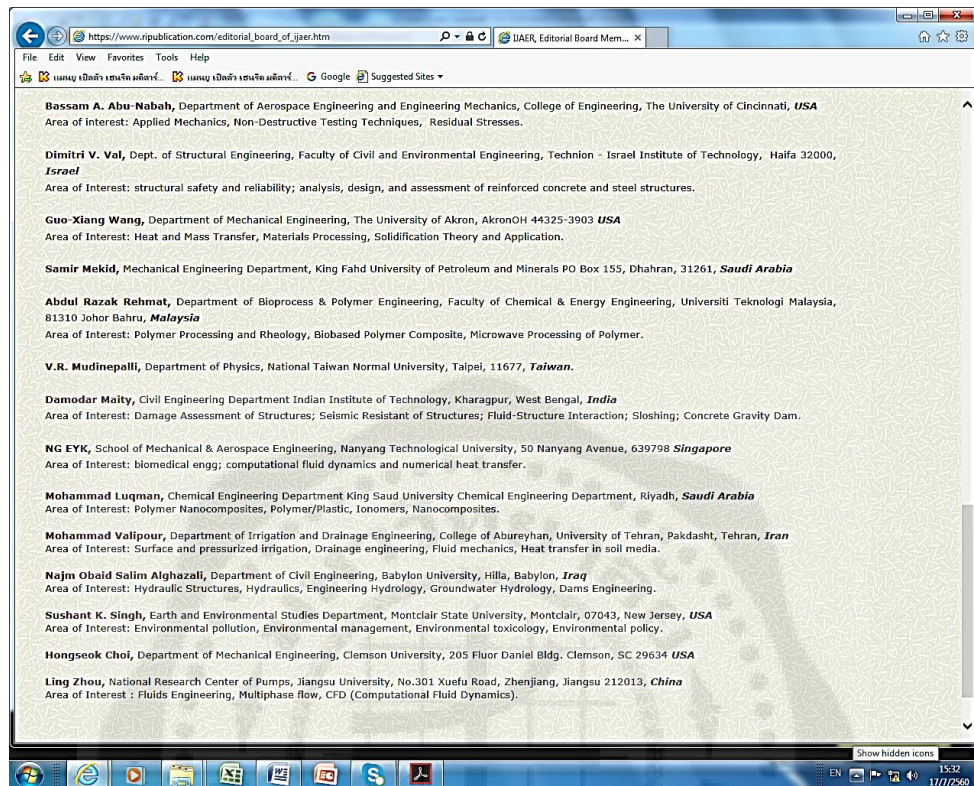


หน้าปกวารสาร



รายชื่อกองบรรณาธิการ





Reducing Fan Blade Vibration in Rice Harvesters and Combine Harvesters by Applying Product Grouping

Kittichote Supakumnerd^{1,*}, Phaireepinas Phimpisan^{2,b}, Chatchapol Chungchoo^{3,c,*} and Pichai Asadamongkon^{1,d}

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok, 26120, Thailand.

²National Metal and Material Technology Center, 114 National Science Park, Klong Nueng, Klong Luang, Pathumthani, 12120, Thailand.

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand.

kittichote_sme12@hotmail.com, ^bphaireep@gmail.com, ^cjengcpc@ku.ac.th and ^dpichaias@g.swu.ac.th

³ORCID: 0000-0002-0692-0831

Abstract

Currently, several thousand of rice harvesters and combine harvesters are assembled every year. These harvesters are sold within Thailand and exported to the CLMV and South Asian countries. However, one of the major claims of these products is broken bolts at the connection between fan blade and fan shaft. The investigation indicated that a cause of this failure is high vibration of a fan unit. In order to eliminate this failure, vibration control of the fan unit is required. However, a production line is a lot of time consumption for balancing a fan unit of these harvesters because operators must do both static and dynamic balancing processes for every single fan unit. According to the primary investigation, the variation in position and dimension of the fan blade is a major cause of its unbalance. In order to reduce this variation, a new standard procedure was introduced. This procedure was developed based on an assumption that the vibration of the fan unit can be significantly decreased if the standard deviation of the fan blade's weight is reduced. Experimental results indicated that the new procedure can reduce time consumption for doing static and dynamic balancing processes of the fan unit significantly. For example, in case of a 4-ft fan unit, the total assembly time of the fan unit can be reduced for more than 50%. Currently, this new procedure has been used in several production lines.

Keywords: Fan blade, rice harvester, combine harvester, vibration, product grouping

INTRODUCTION

More than 10 years that Thai's manufacturers have produced and exported their rice harvesters and combine harvesters

(Figure 1) to the CLMV and South Asian countries. It was recorded that there were many catastrophic failures at the fan blade and a major cause of this failure was the vibration of fan blade unit. Hence, manufacturers attempted to reduce the vibration of fan blade unit by decreasing the variation of fan blade weight.

Figure 2 shows a solid model of the fan blade unit. Each unit consists of two sets of five fan blades, three ball bearings with vibration absorber, four sets of blade holder, and one shaft. A real fan blade can be seen in Figure 3.

According to the primary investigation, the variation in position and dimension of the fan blade is a major cause of its unbalance. Ideally, this problem can be fixed by doing the static and dynamic balancing processes introduced by several experts [1-5]. However, this method consumes a lot of production time. Hence, the other methods that spend less production time are required. The new method that can serve this requirement is therefore introduced in this paper.



Figure 1. An example of combine harvester

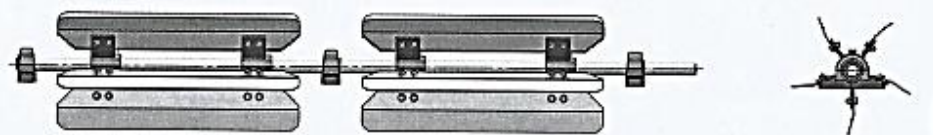


Figure 2. Solid model of fan blade unit

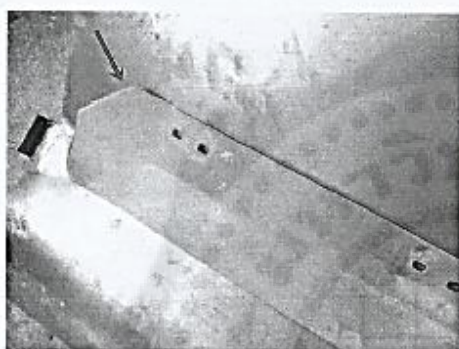


Figure 3. Example of fan blade

CASE STUDY

There are several models of rice harvesters and combine harvesters that are sold in the markets. However, in this research, a fan unit that is used in both 4-ft model of rice harvester and 4-ft model of combine harvester produced by a Thai's manufacturer was selected as a case study. The details of each fan blade used in the 4-ft model are shown in Figure 4, while the details of each set of fan blades are shown in Figure 5.

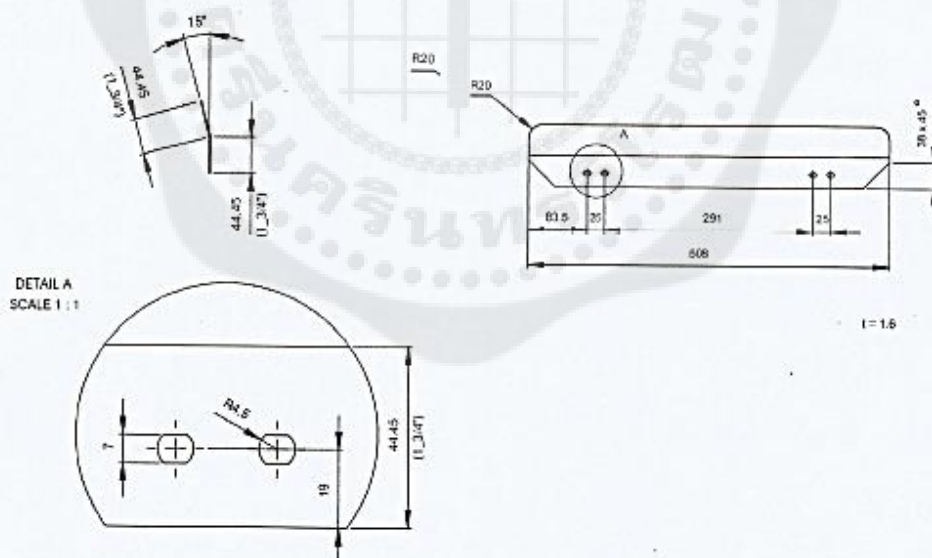


Figure 4. Drawing of each fan blade

The GD&T of parts of 4-ft model of rice harvester, including dimension and angularity, meets the ISO 2768 Standard [6]. There is no any specific GD&T

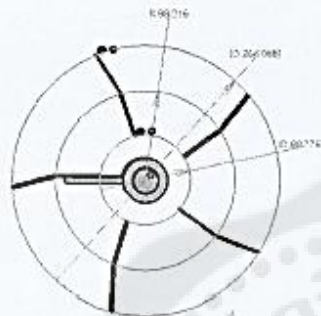


Figure 5. Drawing of one set of five fan blades

Schematic of case study

According to Figure 2, the schematic of 4-ft model of rice harvester can be expressed as shown in Figure 6.

Major assumptions for this schematic shown above are:

1. The center of mass of first and second five blades is assumed to locate in plane-1 and plane-2, respectively.
2. Plane-1 and plane-2 are parallel.
3. The source of vibration only comes from the rotation of unbalanced mass.
4. Only variation in angles at 15° and 90° of fan blade geometry is considered.
5. The production must be controlled under " $C_p = 1.00$ ".

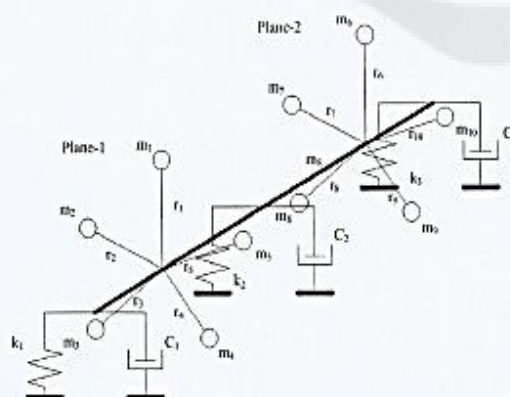


Figure 6. Schematic of case study

From the forth assumption, the schematic of mass representing the fan blade can be shown in Figure 7. It was also said that the variation in angles at 15° and 90° of fan blade geometry affects the distance " r_1 to r_{10} " and angle " Θ_1 to Θ_{10} " which is mentioned in Figure 5 and Figure 6.

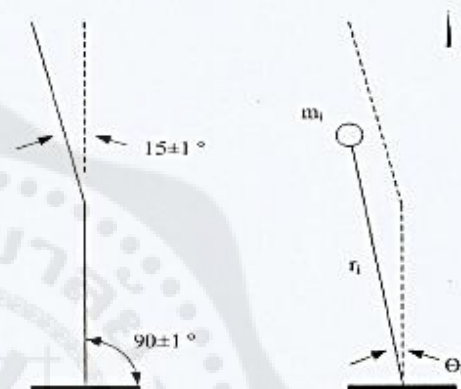


Figure 7. Schematic of mass representing each fan blade

The force vibration equation of motion that was developed by using the first, second and third assumptions can be expressed as follows:

$$M_t \ddot{X} + c_t \dot{X} + k_t X = \sum_{i=1}^5 m_i r_i \omega \sin\left(\left[(i-1)\left(\frac{2\pi}{5}\right) + \theta_i + \frac{\pi}{2}\right] + \omega t\right) + \sum_{i=6}^{10} m_i r_i \omega \sin\left(\left[(i-6)\left(\frac{2\pi}{5}\right) + \theta_i + \frac{\pi}{2}\right] + \omega t\right) \quad (1)$$

$$M_t = m_s + \sum_{i=1}^{10} m_i \quad (2)$$

Where

$X(t)$	displacement (m)
M_t	total mass (kg)
$m_1 - m_{10}$	mass of blade no.1 to no 10 (kg)
m_s	mass of shaft (mg)
t	time (s)
Θ_i	deviation from perpendicular line (rad)
ω	rotating speed (rad/s)
k_t	total spring constant (N/m)
c_t	total damping constant (N.s/m)

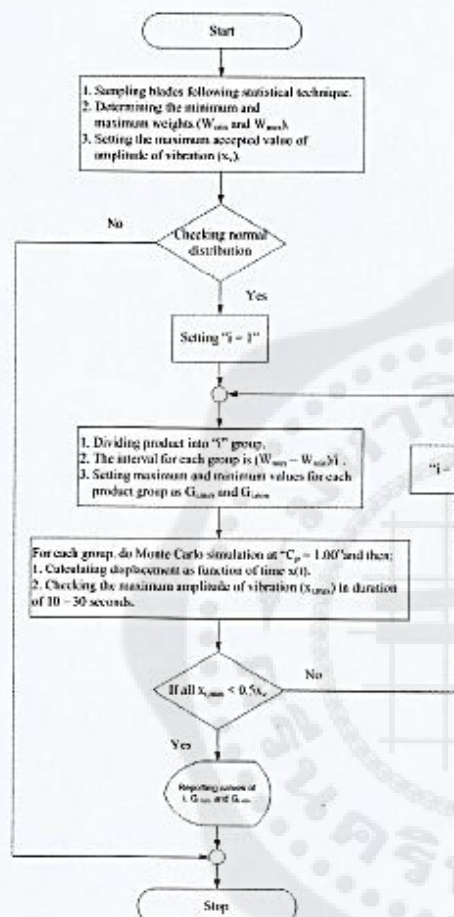


Figure 8. Flow chart of new procedure for reducing the effect of variation in position and dimension of fan blade in rice harvester and combine harvester

PROPOSE OF NEW PROCEDURE

The new procedure for reducing the vibration of fan blade in rice harvester and combine harvester was developed in this research and presented in Figure 8. The concept of this procedure was that the vibration of the fan unit can be significantly decreased if the standard deviation of the fan blade's weight is reduced.

For controlling the manufacturing cost, the product (fan blade) grouping method instead of making precision fan blade is selected. After finish fan blade production, hence, the fan blades need to be grouped. For each assembly of fan unit, all blades must be taken from the same group. Additionally, for

each fan blade group, the variation in the fan blade's weight does not have to generate unaccepted vibration.

The Monte Carlo Simulation is used for finding the possibility of vibration of fan blade unit at different conditions. By employing the simulation results, the lower limit and the upper limit of the fan blade's weight for each group could be specified. However, this procedure can be used under a major criterion that the distribution of weight of fan blades must be normal.

EXPERIMENTAL SETUP

The experiment began with sampling the fan blades that were produced in the production line. Then, the simulation was carried out following the flow chart shown in Figure 8.

In order to verify the reliability of the new procedure mentioned in Figure 8, the experiment was set as a schematic shown in Figure 9. The maximum amplitude of vibration ($x_{i,max}$) in a duration of 10 - 30 seconds was collected by using a vibration analyzer model SKF Microlog CMXA 51-1S with a sensor attached at the middle ball bearing.

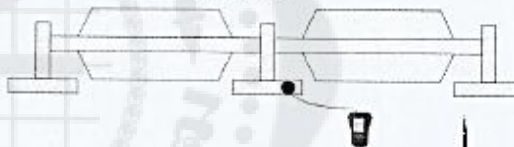


Figure 9. Schematic of testing apparatus

RESULTS AND DISCUSSION

Preparing for simulation

Since the manufacturer produces approximate 1000 fan blades for the 4-ft model every year, at least 278 fan blades must be sampled. This number of sample was calculated according to the statistical recommendations [7-9]. In this research, 278 fan blades were collected. It was found that the maximum and minimum weight of these sampled fan blades was 0.456 kg and 0.411 kg, respectively.

For checking the type of distribution of fan blade weight, all weights of sampled fan blades were analyzed for their distribution patterns by using the Microsoft Excel software. The analysis results showed that the patterns of distribution could be accepted as normal distribution. The mean value was 0.438 kg.

The value of vibration amplitude that the manufacturer can be accepted is 0.1 mm. This number was set as x_s . However, there were some errors in the vibration equation of motion amplitude (Eq. 1). Hence, the value of 2 was used as the safety factor.

Simulation results

The simulation process was carried out according to the flow chart shown in Figure 8. The Monte Carlo simulation was done by using the Microsoft Excel software. The example of using the Microsoft Excel software to do the Monte Carlo simulation was introduced by Jeges [10]. There were twelve parameters that must be employed in the Monte Carlo simulation. These were angle of $15^\circ \pm 1$ shown in Figure 6, angle of $90^\circ \pm 1$ shown in Figure 7, and weight of 10 fan blades ($m_1 - m_{10}$). The rotation speed was fixed at normal operation, which was 2,000 rpm.

The simulation results were shown in Table 1. In this table, if the manufacturer needs to produce the fan units that have the maximum vibration amplitude lower than 0.1 mm at $C_p = 1.00$, these fan blades must be divided into at least four groups. For each fan unit, all fan blades must be taken from the same group.

Table 1. Simulation results from proposed procedure

i	Group	Max. Amplitude of Vibration (mm)	Result
1	$G_1 : 0.411 - 0.456$	0.192	G_1 fail
2	$G_1 : 0.411 - 0.436$ $G_2 : 0.436 - 0.456$	0.106 0.117	G_1, G_2 fail
3	$G_1 : 0.411 - 0.426$ $G_2 : 0.426 - 0.441$ $G_3 : 0.441 - 0.456$	0.041 0.049 0.087	G_1, G_2 pass G_3 fail
4	$G_1 : 0.411 - 0.422$ $G_2 : 0.422 - 0.436$ $G_3 : 0.436 - 0.445$ $G_4 : 0.445 - 0.456$	0.037 0.040 0.048 0.043	All group pass

Note:

1. Amplitude of vibration that the manufacturer can be accepted is 0.100 mm.
2. Amplitude of vibration in case of using 2 as safety factor is 0.050 mm.

Table 2. Comparison between simulation and experiment

Weight of fan blades	Max. vibration amplitude in duration of 10 – 30 s. (mm)	
	New Procedure	Experiment
$m_1 - m_{10}$: case G_3 of $i = 4$ 0.439, 0.443, 0.440, 0.438, 0.441, 0.442, 0.442, 0.445, 0.437, 0.440	0.048	0.872

Verification of new procedure for reducing the effect of variation in position and dimension of fan blade in rice harvester and combine harvester

In order to verify the reliability of the new procedure for reducing the effect of variation in position and dimension of fan blade in rice harvester and combine harvester shown in Figure 8, the testing apparatus was set as a schematic shown in Figure 9. Ten fan blades from the same group (in case of $i = 4$) were taken and then built as a fan unit. The comparison of the maximum vibration amplitude in duration of 10 – 30 s between the calculation following the new procedure and the measuring results were shown in Table 2. It can be said that the new procedure indicated in Figure 8 can be used in the production line for controlling the vibration of fan unit.

It should be noted that the vibration amplitude of duration of 0 – 10 s was not considered because it was the waiting time for steady state operation of the fan blade system.

CONCLUSION

According to the results in the results and discussion mentioned above, it was found that the new procedure for reducing the effect of variation in position and dimension of fan blade in rice harvester and combine harvester, which was introduced in this paper (Figure 8), can control the vibration of the fan blade into an acceptable level. Without the need of static and dynamic balancing processes, this procedure can therefore save the manufacturing time for assembling the fan blade unit significantly.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors would like to thank Kasetsart University for providing a research grant.

REFERENCES

- [1] Products Division, 2000, TM102 Static and Dynamic Balancing, TQ Education and Training Ltd.
- [2] Grim, G. K., Haidler, J. W., and Mitchell, B. J., 2014, The Basic of Balancing 202, Balance Technology Inc.
- [3] Camhaol, M. M., No Date, Static and Dynamic Balancing of Rigid Rotors, Brüel & Kjaer.
- [4] Feese, T. D., and Grazier, P. E., 2004, "Balance his!: case histories from difficult balance jobs", The 33rd Turbomachinery Symposium.
- [5] IRD Balancing, Balance Quality Requirements of Rigid Rotors: The Practical Application of ISO 1940/1, 2009.
- [6] ISO 2768-1:1989., 1989, General Tolerances - Part 1: Tolerances for Linear and Angular Dimensions without Individual Tolerance Indications.

International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 12 (2017) pp. 3105-3110 |
© Research India Publications. <http://www.ripublication.com>

- [7] Cochran, W. G., 1977, Sampling Technique, third ed., John Wiley & Son, USA.
- [8] Thompson, S. K., 2012, Sampling, third ed., John Wiley & Son, USA.
- [9] Fuller, W. A., 2009, Sampling Statistics, John Wiley & Son, USA.
- [10] Jeges, R., Monte Carlo simulation in MS Excel, information on <http://www.projectware.com.au>.



ข้อมูลวารสารนานาชาติ

1. วารสารนานาชาติ International Journal of KASETSART JOURNAL NATURAL SCIENCE.

ปกในของบทความ



หลักฐานคะแนน SJR มีค่าคะแนน SJR (SCOPUS 2014) 0.176

http://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=5000153403&tip=sid&clean=0

SJR Scimago Journal & Country Rank

Enter Journal Title, ISSN or Publisher Name

Home Journal Rankings Country Rankings Viz Tools Help About Us

Kasetsart Journal - Natural Science

Country	Thailand	13
Subject Area and Category	Agricultural and Biological Sciences Agricultural and Biological Sciences (miscellaneous)	
Publisher	Kasetsart University	H Index
Publication type	Journals	
ISSN	00755192	
Coverage	2006-ongoing	
Scope	Beginning with this first issue of volume 44, the Kasetsart Journal (Natural Science) will be published six times per year (February, April, June, August, October and December). The Kasetsart Journal (Natural Science) is accepted as an international journal based on the standard of the Commission on Higher Education of Thailand and is covered by SCOPUS, SciFinder, CABI, AGRIS, EMBASE, Compendex, GEOBASE, EMBiology, BIOBASE, FLUINDEX and World Textiles. Currently, our journal can be accessed and downloaded online via the internet. (source)	

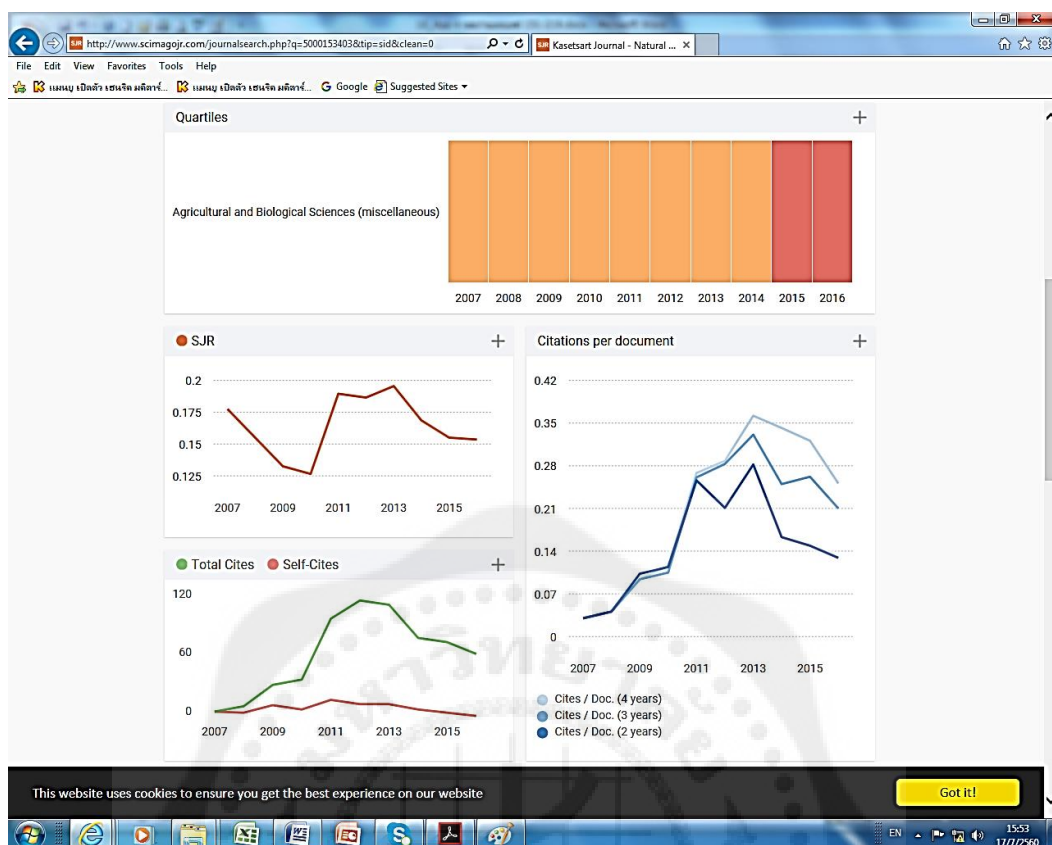
Quartiles

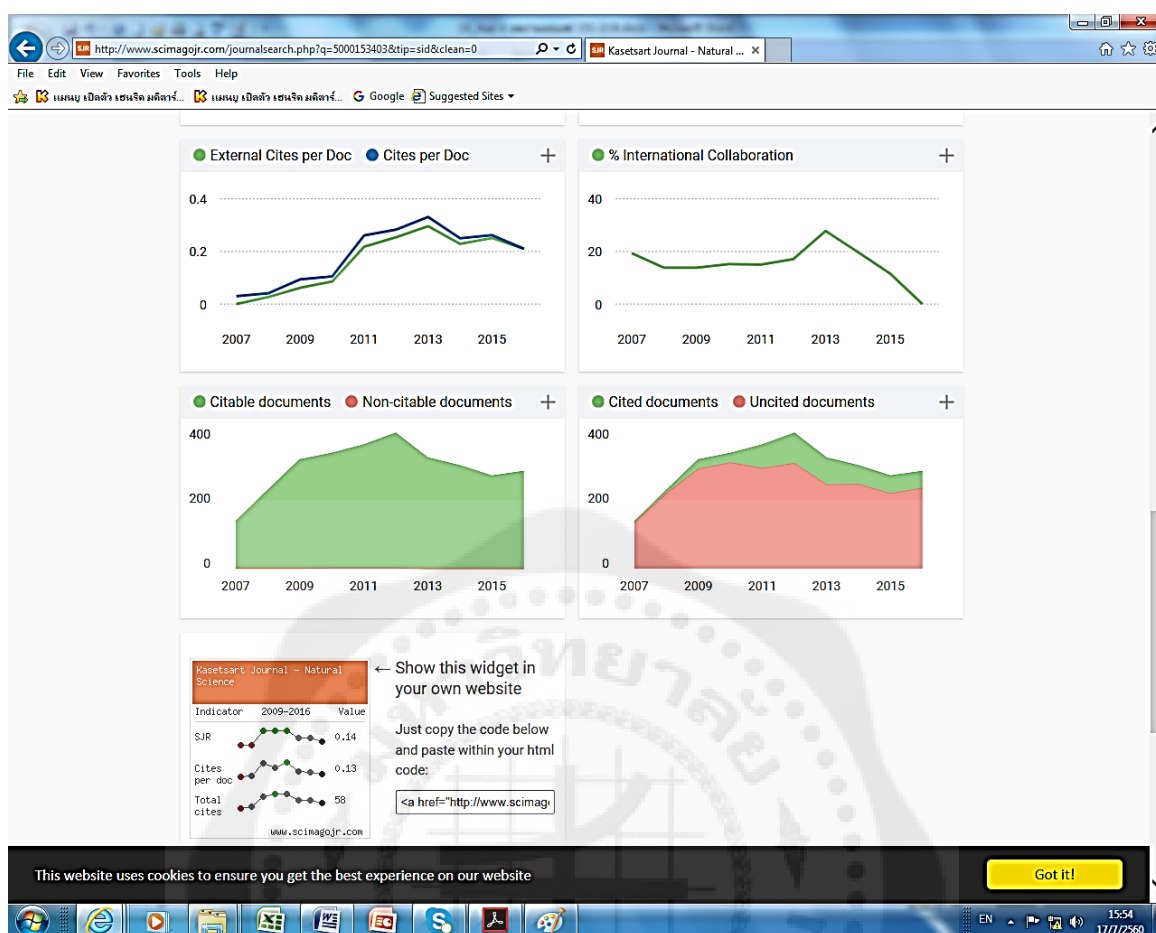
Agricultural and Biological Sciences (miscellaneous)

This website uses cookies to ensure you get the best experience on our website

Got it!

EN 15:53 17/11/2560





หน้าปกวารสาร



ISSN: 2452-316X

รายชื่อกองบรรณาธิการ

KASETSART JOURNAL NATURAL SCIENCE

(<http://www.rdi.ku.ac.th>, <http://kasetartjournal.ku.ac.th/>)

Kasetart Journal (Natural Science) is a peer-reviewed journal of Kasetsart University (www.ku.ac.th) which publishes original research articles on natural sciences and other topics dealing with current knowledge and advances in technology. The Kasetart Journal (Natural Science) is issued six times per year. Articles from researchers worldwide are welcomed.

EDITORS

Editor-in-Chief:

Arinthip Thamchaipenet Associate Professor, Genetics, Faculty of Science, Kasetsart University, Thailand

Associate Editor:

Thongchai Suwonsichon Associate Professor, Food Science, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Thailand

SECTION EDITOR

Roberto Banoan	Researcher, Soil Science, Department Manager III and Concurrent Officer-In-Charge, National Tobacco Administration, Philippines
Chaiyapoom Bunchasak	Associate Professor, Non-Ruminant Nutrition, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand
Chart Chiemchaisri	Associate Professor, Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand
Parnjit Damrongkulkarnjorn	Assistant Professor, Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand
Praparat Hormehian	Professor, Entomology, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand
Suttipon Keawwongpong	Assistant Professor, Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Thailand
Wanwimol Klaypradit	Fishery by-Product (Waste) Utilization, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Thailand
Vichian Loohakosol	Professor, Mathematics, Faculty of Science, Kasetsart University, Thailand
Yont Musig	Associate Professor, Water Quality Management in Aquaculture, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Thailand
Mulee Nanakorn	Associate Professor, Stress Physiology of Plant, Faculty of Science, Kasetsart University, Thailand
Eiji Nawata	Professor, Tropical Agriculture, Kyoto University, Japan
Anan Phonphoem	Associate Professor, Wireless Networks, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand
Kongkiti Phusavat	Associate Professor, Performance Measurement, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand
Arnatat Puapothep	Associate Professor, Veterinary Toxicology and Pharmacology, Faculty of Veterinary Medicine, Kasetsart University, Thailand
Rungnaphar Pongsawatmanit	Associate Professor, Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Thailand
Witoon Prinyawiwatkul	Professor, Food Science and Technology, Louisiana State University and LSU Agricultural Center, USA
Ladawan Puangchit	Assistant Professor, Silviculture, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Thailand
U Ravi Sangakkara	Professor, Crop Ecology, Faculty of Agriculture, University of Peradeniya, Sri Lanka
Uthaiwan Sangwanit	Assistant Professor, Forest Resources, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Thailand
Apisit Sangsasen	Associate Professor, Inorganic Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Thailand
Satoru Tsuchikawa	Professor, Near Infrared Spectroscopy and Agricultural Science, Graduate School of Biocultural Sciences, Nagoya University
Kenji Yamane	Associate Professor, Floriculture and Horticulture, Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, Japan

MANAGING EDITOR

Pitcha-om Sirichewakeson Researcher, Kasetsart University Research and Development Institute, Kasetsart University, Thailand

EDITORIAL BOARD

- Babajide Alo
Tipvadee Attathom
- Gerald T. Baker
Thaweesakdi Boonkerd
Winchai Changrasert
- Pranom Chantaranonthal
Theeraphap Chareonviriyaphap
Supap Chaitrathorn
Mauricio A. Elzo
Jerome Grant
- Harald Greger
David F. Hildebrand
Stanley J. Kays
Helen H. Keenan
Johannes Keizer
- Roger Kjelgren
Susumu Kumagai
Suk-Ha Lee
- Junras Limtrakul
Olavi Luukkanen
- Chitoshi Miki
Ayyaz Muhammad
- Sang Nag Ahn
- Uthairat Na-Nakorn
- Onanong Naivikul
- Takuya Nihira
- Katsuyoshi Nishinari
Oya S. Okay
- Kazutoshi Okuno
- Punpiti Piamsa-nga
- Ken Sasaki
Somprach Thanisuwanyangkura
- Aree Thunkijjanukij
Chanvit Vajrabukka
- Andrew J. Warner
Peter Wolschann
- Sumpun Wongnawa
- Kazuo Yamamoto
- Professor, Chemistry, Faculty of Science, University of Lagos, Nigeria
Associate Professor, Insect Pathology, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen,
Kasetsart University, Thailand
Professor, Entomology, Mississippi State University, USA
Professor, Plant Taxonomy, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Thailand
Associate Professor, Seed Science and Technology, Faculty of Agriculture,
Kasetsart University, Thailand
Professor, Plant Taxonomy, Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand
Professor, Insect Vector Control, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand
Assistant Professor, Human Ecology, Kasetsart University, Thailand
Professor, Animal Breeding and Genetics, University of Florida, USA
Professor, Entomology, Entomology and Plant Pathology Department,
The University of Tennessee, USA
Professor, Phytochemistry, Faculty of Life Science, University of Vienna, Austria
Professor, Oil Biosynthesis, University of Kentucky, USA
Professor, Horticulture, Department of Horticulture, University of Georgia, USA
Professor, Environmental Science, University of Strathclyde, Scotland
Knowledge and Information Management, FAO of the United Nations,
Office of Knowledge Exchange, Research and Extension, Italy
Professor, Urban Forestry, Department of Horticulture, Utah State University, USA
Professor, Food Safety, Research Center for Food Safety, University of Tokyo, Japan
Professor, Plant Genomics, Department of Plant Science, College of Agriculture
and Life Sciences, Seoul National University, Korea
Professor, Physical Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Thailand
Professor, Tropical Forestry, Viikki Tropical Resources Institute,
University of Helsinki, Finland
Professor, Structural Engineering, Tokyo Institute of Technology, Japan
Associate Professor, Chemical Engineering, Institute of Chemical Engineering and
Technology, University of the Punjab, Pakistan
Professor, Rice Breeding and Genetics, College of Agriculture and Life Science,
Chungnam National University, Korea
Professor, Genetics and Breeding of Aquatic Animals, Faculty of Fisheries,
Kasetsart University, Thailand
Professor, Cereal Chemistry and Technology, Faculty of Agro-Industry,
Kasetsart University, Thailand
Professor, Molecular Microbiology, International Center for Biotechnology (ICBitech),
Osaka University, Japan
Professor, Hydrocolloids, Faculty of Human Life Science, Osaka City University, Japan
Professor, Environmental Chemistry, Faculty of Naval Architecture and
Ocean Engineering, Istanbul Technical University, Turkey
Professor, Plant Breeding and Genetics, Laboratory of Plant Genetics and
Breeding Science, Graduate School of Life and Environmental Sciences,
University of Tsukuba, Japan
Associate Professor, Computer Engineering, Faculty of Engineering,
Kasetsart University, Thailand
Professor, Fermentation Technology, Hiroshima Kokusai Gakuin University, Japan
Associate Professor, Plant Ecophysiology, Faculty of Science, Kasetsart University,
Thailand
Director, Agricultural Information Management, Kasetsart University, Thailand
Professor, Animal Science, Physiology, Animal Behavior, Faculty of Agriculture,
Kasetsart University, Thailand
Visiting Scientist, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Thailand
Professor, Theoretical Chemistry, Institute of Theoretical Chemistry,
University of Vienna, Austria
Associate Professor, Inorganic Chemistry, Faculty of Science,
Prince of Songkla University, Thailand
Professor, Environmental Engineering, Environmental Science Center,
University of Tokyo, Japan

PUBLISHER

The Kasetsart Journal (Natural Science) is published by Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Kasetsart University, Bangkok, Thailand

EDITORIAL OFFICE

Kasetsart University Research and Development Institute (KURDI), Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand
TEL 66 (2) 5795548; FAX 66 (2) 5611474
e-mail: kj_rdi@ku.ac.th

KASETSART JOURNAL

NATURAL SCIENCE

The publication of Kasetsart University

VOLUME 49

November - December 2015

NUMBER 6

Plant Science

- Screening of Rubber Rootstock by the Assessment of Root Growth and Genetic Background
..... Suneerat Wattanasilakorn, Sayan Sdoodee, Charassri Nualsri,
..... and Sathaya Bunratchoo 821
- Detection of Quantitative Trait Loci for Seed Size Traits in Soybean (*Glycine max* L.)
..... Hamidreza Dargahi, Patcharin Tanya and Peerasak Srinives 832
- Effect of Genotype, Age and Soil Moisture on Cyanogenic Glycosides Content and Root Yield
in Cassava (*Manihot esculenta* Crantz)
..... Wimensiri Srihawong, Pasajee Kongsil, Krittaya Petchpoung
..... and Ed Sarobol 844

Fisheries

- Genetic and Morphological Variation among Hatchery Stocks of Thai Silver Barb
Barbonymus gonionotus (Bleeker, 1850)
..... Santi Pannusa, Supawadee Poompuang and Wongpathom Kamonrat 856

Soil Science

- Influence of Chemical Fertilizer Applications on Water Quality in Paddy Fields in Nong Harn,
Sakon Nakhon Province, Thailand
..... Anurak Khrueakham, Bundit Anurugsa and Natha Hungspreug 868

Agro-Industry

- Effects of Gamma Irradiation on Microbiological Quality, Protein and Amino Acid Profile
of Edible Bird Nest Powder
..... Norrakiah Abdullah Sani, Ong Kuan Yee, Mohd Khan Ayob,
..... Muhammad Samudi Yasir, Abdul Salam Bahji and Nazaruddin Ramli 880

Information Technology, Physical Science and Engineering

- Antioxidant Capacity Assays by Sequential Injection Analysis using a Peristaltic Pump
and Low-Cost Amperometric Detection with Pencil Lead Electrodes
..... Pachara Meanha, Jakkrapun Kongkedsuk, Apisake Hongwitayakorn
..... and Rasamee Chaisuksant 895
- Development of a Powder Material Deposition Unit and Process Parameters Identification
for Selective Vacuum Manufacturing Rapid Prototyping
..... Sitichai Khodprom, Nattawat Songkrod and Thittikorn Phattanaphibul 905
- Effect of Water Hyacinth on Open-Channel Water Flow Behavior: Laboratory Scale
..... Apichote Urantinon and Sitang Pilailar 913

New Practical Dimensioning Tolerance Allocation Technique for Assembly of Mechanical Parts Kittichote Supakumnerd, Kamuttraiyoe Chutasen, Phaireepinas Phimpisan and Chatchapol Chungchoo	924
Determining Appropriate Production and Inbound Logistics Practices for a Cassava Supply Chain in Thailand Jirachai Buddhakulsomsiri, Parthana Parthanadee and Panchalee Praneetpholkraeng	937
An Application of Finished Test Piece Methods for Evaluating the Performance of Computer Numerical Control Machining and Turning Centers Kittichote Supakumnerd and Chatchapol Chungchoo	951
Simulation Study of the Spread of Mealybugs in a Cassava Field: Effect of Release Frequency of a Biological Control Agent Jiraj Promrak and Chontita Rattanakul	963
Stability Analysis of a Mathematical Model of Atherosclerotic Plaque Development: Fibrous Cap Formation and Degradation Wanwarat Anlamlert, Yongwimon Lenbury and Jonathan Bell	971
Optimal Control Problem of Food Intake of Swine During Post Weaning Period Chanakarn Kiataramkul and Puttida Matkhao	983
A Modeling Approach for Assessing the Spread of Tuberculosis and Human Immunodeficiency Virus Co-Infections in Thailand Kornkanok Bunwong, Wichuta Sae-jie and Natdanai Boonsri	990
A Mixed Integer Linear Programming Model for Optimal Production Planning in Tangerine Supply Chain Chaimongkol Limpianchob	1001
On the Parallel Simulation of Microparticle Capture in Axial Magnetic Filter Kanok Hounkumnuard, Witchaya Pornjarungsak and Chantana Chantrapornchai	1012
Financial Evaluation to Select the Best Water Hyacinth Harvester to Improve Water Resources in Thailand Suwimon Saneewong Na Ayuttaya	1022
Monte Carlo Cellular Automata Simulation of Receptor Trafficking in Cell Signal Transduction: Tracking Dimer and Oligomer Formation Chontita Rattanakul and Yongwimon Lenbury	1036

An Application of Finished Test Piece Methods for Evaluating the Performance of Computer Numerical Control Machining and Turning Centers

Kittichote Supakumnerd¹ and Chatchapol Chungchoo^{2,*}

ABSTRACT

Currently, many mechanical parts are produced from computer numerical control (CNC) machines including CNC machining centers and CNC turning centers. In order to keep production costs as low as possible, workpieces have to be rejected at the minimum rate. This can be done, but it depends on many parameters. One important parameter is adequate machine performance to produce the workpiece. In this research, a new technique was introduced to evaluate the performance of both CNC machining and turning centers. The first benefit of this technique is that manufacturers can evaluate a machine's performance themselves (no expert is required). The second benefit is that the approximate workpiece dimensions can be predicted in advance. In addition, using the standard test piece, experimental results confirmed that this new technique can be used in industry.

Keywords: finished test piece, machining centre, performance, turning centre

INTRODUCTION

Presently, computer numerical control (CNC) performance testing can be classified into two categories—direct measurement methods and indirect measurement methods.

With direct measurement methods, testers usually employ the ISO 230 series (International Organization for Standardization, 2012) and ISO 10791 series (International Organization for Standardization, 1998) as testing standards. For CNC turning centers, the popular testing standards are the ISO 230 series (International Organization for Standardization, 2012) and ISO 13041 series (International Organization for Standardization, 2005). Major equipment for these test methods

includes laser interferometers, ball-bars and/or dial-gauges (Figure 1). The results from this testing can be used for several machine adjustments. Since most testing results are based on quasi-static errors, manufacturers are notable to determine the extent of the difference between the true product geometry and its design geometry.

For indirect measurement methods, testers usually use International Organization for Standardization (1998) to evaluate the performance of CNC machining centers, and employ International Organization for Standardization (2005) to evaluate the performance of CNC turning centers (Reference). These tests use finished test pieces to evaluate the CNC machine performance (a piece either complies or does not comply).

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok 26120, Thailand.

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand.

* Corresponding author, e-mail: fengape@ku.ac.th

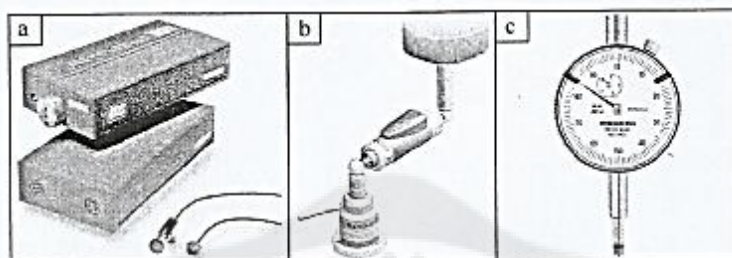


Figure 1 Examples of testing instruments: (a) Laser interferometer; (b) Ball-bar; (c) Dial gauge. (Sourced from: <http://mtsandtg.com>, <http://www.renishaw.com>; and <http://www.rotagriponline.com>; 20 May 2013).

Unfortunately, both methods (direct and indirect) cannot tell whether or not the machine can produce finished workpieces that follow the geometrical product specifications (GPS) because normally, the testing results are employed to adjust the CNC machine tools (Chean and Geddard, 1997; Liu and Venuvinod, 1999; Raksiri and Parnichkun, 2004; Zhu *et al.*, 2012;).

Hence, in this research, a new technique to evaluate the performance of both CNC machining and turning centers was introduced based on modifications to International Organization for Standardization (1998) and International Organization for Standardization (2005). This technique involves a shorter testing time and a lower testing cost compared with other techniques. Additionally, this new technique can predict whether or not the machine can produce finished workpieces following the geometrical product specifications (GPS).

Relevant theory

The important relevant theories are: 1) ISO 10791-7 and 2) ISO 13041-6 (International Organization for Standardization, 1998, 2005).

ISO 10791-7

ISO 10791-7 tests conditions for machining centers and in part 7 covers the accuracy of a finished test piece with regard to

the ISO standard which details information as broadly and comprehensively as possible on the tests which can be carried out for comparison, acceptance, maintenance or any other purpose. It can be used for numerically controlled milling and boring machines.

There are two types of test piece. The first is a positioning and contouring test piece. The second is a face milling test piece. Examples of both types of test piece are shown in Figures 2 and 3.

Tooling and cutting parameters (cutting speed, feed rate and depth of cut), blank and preliminary operations need to be done in accordance with the standard. A coordinate measuring machine (CMM) must be used as the major measuring instrument.

Both types of test piece can provide some useful information for evaluating machine performance. This information includes: 1) cylindricity of the holes—this is the tolerance zone of holes created by two imaginary cylinders; 2) straightness of the hole axis and the reference—this is a form tolerance to control the hole axis and the reference by using two imaginary parallel lines; 3) straightness of the sides—this is the straightness of the sides of the test piece 4) squareness of the sides—this shows variation from a 90-degree angle; 5) parallelism—this indicates the relation of the inspected feature to another datum plane;

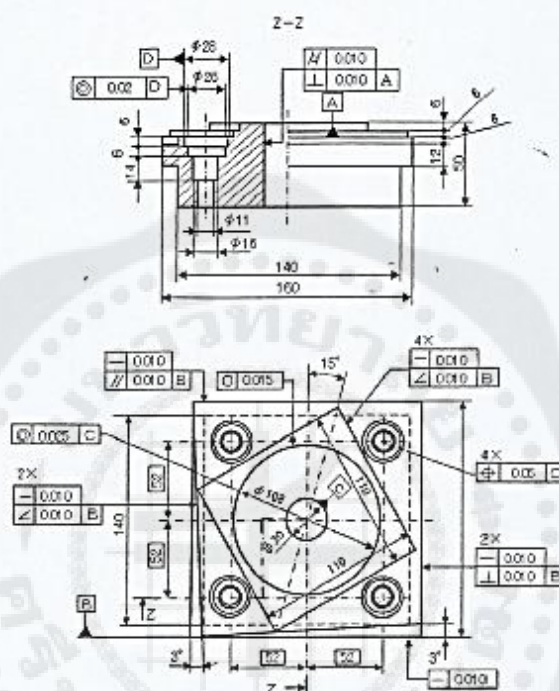


Figure 2 Example of small-sized positioning and contouring test piece. (Sourced: International Organization for Standardization, 1998).

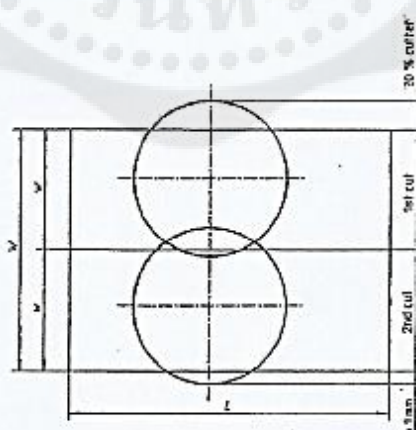


Figure 3 Example of a pattern in a face milling test (Sourced: International Organization for Standardization, 1998).

6) circularity—this defines the roundness between two concentric circles; 7) concentricity—this is used to compare two or more cylinders and to ensure that they share a common center-axis; 8) straightness of the faces—this is the straightness of the faces of a test piece; 9) accuracy of the angles—this is the variation in the specified angle between a related datum and the angled feature; and 10) flatness—this is the variation in the surface of the part which is limited by the two, imaginary, perfectly flat planes.

ISO 13041-6

ISO 13041-6 tests the conditions for numerically controlled turning machines and turning centers and in part 6 covers the accuracy of a finished test piece with regard to the ISO standard which details information as broadly and comprehensively as possible on tests which can be carried out for comparison, acceptance, maintenance or any other purpose. It can be used for both numerically controlled turning machines and turning centers.

In order to apply ISO 13041-6, reference is made to ISO 230-1, especially for the installation of the machine before testing, warming up of the machine, description of measuring methods and evaluation and presentation of the results.

There are four types of test piece. The first is a cylindrical test piece. The second is the flatness of a surface test piece. The third is a test piece machined under different kinematic conditions. The last is a circular test piece. Some examples of these test pieces are shown in Figure 4.

Tooling and cutting parameters (cutting speed, feed rate and depth of cut), and a pre-machined blank need to be done in accordance with the standard. A CMM must be used as the major measuring instrument.

Using this ISO standard, test pieces can provide some useful information for evaluating the performance of a turning center. This information includes cylindricity, consistency of machined

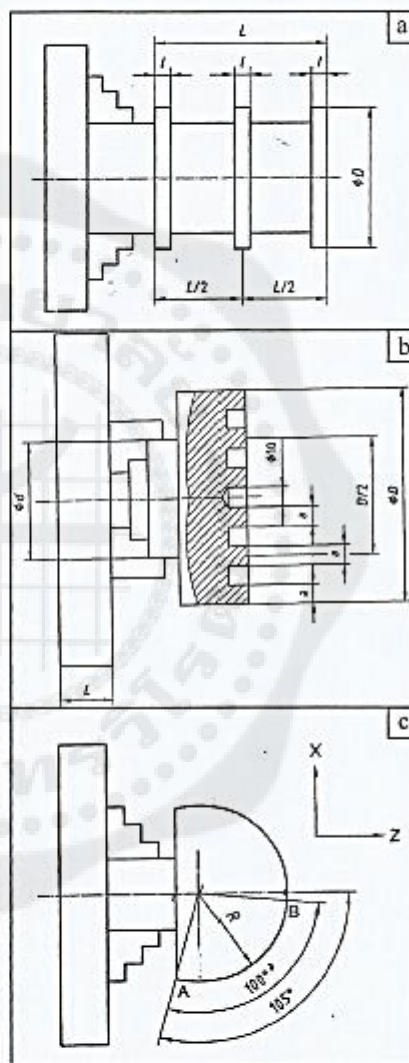


Figure 4 Three finished test pieces shown in International Organization for Standardization (2005): (a) Cylindrical test piece; (b) Flatness of surface test piece; (c) Circular test piece.

diameters, flatness, circular deviation, squareness, parallelism, straightness, accuracy of the angles, true position of holes and concentricity of outer holes to inner holes, as defined in the previous section.

A new technique for computer numerical control machining and turning center performance evaluation

The original idea for this new concept was first introduced in 2013 (Chungchoo, 2013a, 2013b). It can be used for evaluating the performance of both CNC machining and turning centers. The concept involves converting the tolerance values of the test piece to a tolerance per unit length of each tolerance type (as shown in Figure 5). Additionally, the uncertainty of measuring equipment is relevant to this concept.

For CNC machining centers, the test piece is prepared following the ISO 10791-7 standard. However, the test piece for CNC turning centers is made under the recommendations of ISO 13041-6.

In a working length, there is variation in the machine performance. For example, in CNC machining centers, the straightness of the Y-axis on the left hand side is not the same as on the right hand side. Normally, the usual working zone has the lowest machine performance. If the

tested piece is located in this zone, the reported performance is the minimum performance of the machine. Manufacturers need to use this worst value to predict whether or not the machine can produce finished workpieces following the GPS. The recommended testing position is at the center of the table for CNC machining centers and at the zone between the chuck to one quarter of the working length in the z axis for CNC turning centers.

MATERIALS AND METHODS

Experimentation

Equipment and materials for computer numerical control machining center

Test pieces (according to International Organization for Standardization, 1998) were prepared using a CNC machining center (model MCV1165; Micro-Tech; Tamil Nadu, India) which employed two cutting tools. These cutting tools were a flat end mill with a diameter of 30 mm (four flutes) and a face mill with a diameter of 63 mm (six flutes). The geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) values of these test pieces were measured using the CMM machine (model 910; Mitutoyo; Kawasaki, Japan). The test piece material was aluminum alloy #5083.

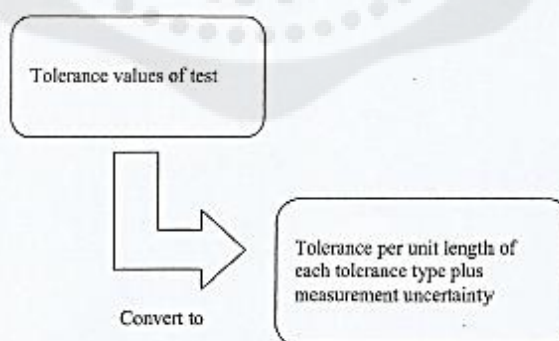


Figure 5 A new technique for computer numerical control machining and turning center performance evaluation.

Equipment and material for a computer numerical control turning center

Test pieces (according to International Organization for Standardization, 2005) were made by employing a CNC turning center (model: ST10; Hass; Tainan, Taiwan) which used two tool inserts. These inserts were WNMG080404MA (for endface and roughness) and TNMG160404R2G (for finishing). The GD&T values of these test pieces were measured using a CMM machine (model PMM-C700; Brown & Sharpe; North Kingstown, RI, USA). The test piece material was stainless steel SUS304.

Experimental set-up

Experiment for computer numerical control machining centers

In this research, a small-sized contouring test piece according to the International Organization for Standardization (1988) standard was used as a standard test piece. The method for preparing the blank, including the selection of the cutting parameters, was done by following the recommendations mentioned in the ISO standard.

When the machining process was finished, the test piece was assessed for its measured tolerance values using the CMM machine. The 13 tolerance measurements (mentioned in International Organization for Standardization, 1998) were recorded. Then, these tolerance values were converted to the tolerance per unit length of each tolerance type plus the measurement uncertainty.

The design shown in Figure 6 was used as a case study to test the concept of the new technique for evaluating the performance of a CNC machining center. Before production, the calculated tolerance was used to predict the dimension of the workpiece. After the machining process was complete, the real and the predicted dimensions were compared.

It should be noted that the number of contact points required for CMM measurement followed the recommendations shown in Table 1.

Experiment for computer numerical control turning centers

A cylindrical test piece, the flatness of surface test piece and a circular test piece of the ISO 13041-6 standard with sizing in category 1 were used as standard test pieces. The method for preparing the blank, including the selection of the cutting parameters, followed the recommendations mentioned in the ISO standard.

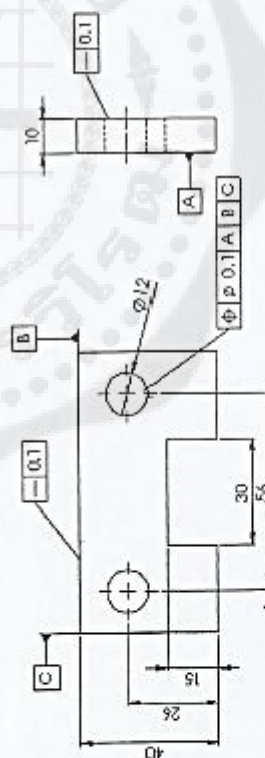


Figure 6 Case study for workpiece produced by the machining center.

As in the above section, when the machining process was finished, the CMM machine was used to measure the tolerance values of each test piece. The four objects of tolerance (mentioned in International Organization for Standardization, 2005) were recorded. Then, these tolerance values were converted to the tolerance per unit length of each tolerance type plus the measurement uncertainty.

The design shown in Figure 7 was used as a case study to test the concept of the new technique to evaluate the performance of the CNC turning center. Before production, the calculated tolerance was used to predict the dimensions of the workpiece. After the machining process was finished, the actual and the predicted dimensions were compared.

RESULTS AND DISCUSSION

Testing of computer numerical control machining center performance

The performance of the CNC machining center was assessed by following International

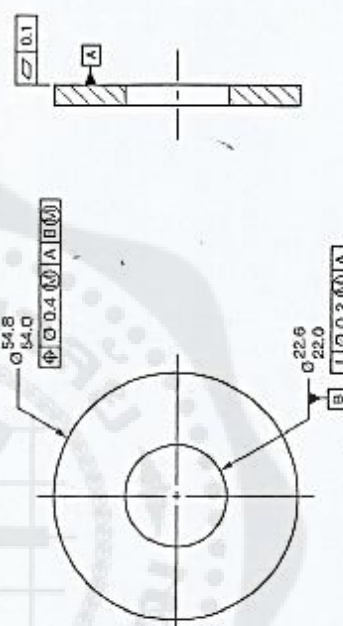


Figure 7 Case study for workpiece produced by the turning center.

Table 1 Recommended contact point for coordinate measuring machine measurement (Flack, 2001).

Geometric feature	Mathematical minimum	Recommended amounts
Straight line	2	5
Plane	3	9 (approximately three lines of three)
Circle	3	7 (to detect up to six lobes)
Sphere	4	9 (approximately three circles of three in three parallel planes)
Cone	6	12 (circles in four parallel planes for information on straightness) 15 (five points on each circle for information on roundness)
Ellipse	4	12
Cylinder	5	12 (circles in four parallel planes for information on straightness) 15 (five points on each circle for information on roundness)
Cube	6	18 (at least three per face)

Organization for Standardization (1998). In this work, a small-sized contouring test was used (Figure 8). Using the CMM machine, the test results were recorded and are shown in Table 2. Considering Table 3 of International Organization for Standardization (1998), it was found that there are some tolerance objects which did not meet the accepted criteria. These were the squareness of the adjacent sides to basis B, the accuracy of the 75°

angle to basis B, the circularity, the accuracy of angles 93° and 3° to basis B and the concentricity of the inner hole to the outer hole D. Although this machine can be used for producing low accuracy workpieces, the owner needs to refurbish as soon as possible.

As stated earlier, the test results following International Organization for Standardization (1998) need to be converted to the tolerance per unit length with uncertainty. The uncertainty value can be determined from: 1) the actual uncertainty of the CMM machine that is reported in the certificate of calibration, or 2) the permissible error of the CMM machine calculated following International Organization for Standardization (2009).

In this research, the uncertainty value was taken from the permissible error of the CMM machine (International Organization for Standardization, 2009). This value can be calculated from $\Delta U = \pm (3.9 + 4 L / 1,000) \mu\text{m}$. Since the unit length that was used in this research was 100 mm, the uncertainty is $\pm 4.3 \mu\text{m}$.



Figure 8 Example of a small-sized contouring test piece.

Table 2 Small-sized contouring test piece.

Object	Measuring value (μm)	Measuring value per unit length with uncertainty (μm)
Cylindricity	8	$2.9 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Squareness between the hole axis and the basis A	7	$6.7 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Straightness of the side	10	$6.3 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Squareness of the adjacent sides to basis B	15	$9.4 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Parallelism of the opposite site to basis B	5	$3.1 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Straightness of the side	6	$3.8 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Accuracy of 75° angles to basis B	10	$8.3 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Circularity	20	$18.5 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Concentricity of the external circle and the internal borehole C	23	$76 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Straightness of the faces	4	$2.5 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Accuracy of angles 93° and 3° angles to basis B	4	$2.5 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Position of the holes with respect to internal bored hole C	11	$21.2 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Concentricity of inner hole to outer hole D	25	$82.5 \mu\text{m} / 100 \text{ mm} \pm 4.3 \mu\text{m}$

Predicting milling workpiece dimension using the introduced concept

Employing the case study shown in Figure 6, the predicted tolerance values were calculated as shown in Table 2. Compared with the real tolerance values measured by the CMM machine (Figure 9), it was found that the new concept, introduced in this research work, can be used to predict the workpiece dimensions (Table 4).

For the case study, it should be noted that only two objects (straightness and center to center of two holes) were investigated as shown in Figure 6.

Testing of computer numerical control turning centre performance

Before machining these test pieces, pre-machine blanks (Figure 10) were prepared as recommended by International Organization for Standardization (2005). Employing the cutting parameters specified in International Organization for Standardization (2005), three test pieces were made. Employing the CMM

machine to measure the test pieces (Figure 11), the test results were recorded and are shown in Table 5. Considering Tables M1, M2 and M4 in International Organization for Standardization (2005), it was found that there were some tolerance objects which could not pass the accepted criteria,

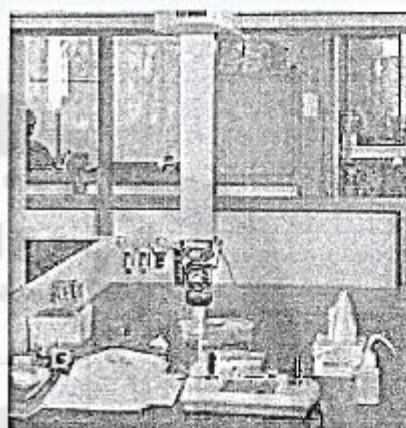


Figure 9 Measurement of the case study using the coordinate measuring machine.

Table 3 Small-sized contouring test piece (all dimensions in millimeters).

Object	Tolerance Nominal Size		Measuring instrument
	320	160	
Central hole			
a) Cylindricity	0.015	0.010	CMM
b) Squareness between the hole axis and the basis A	0.015	0.010	CMM
Square			
c) Straightness of the sides	0.015	0.010	CMM or straightedge and dial gauge
d) Squareness of the adjacent sides to basis B	0.020	0.010	CMM or square and dial gauge
e) Parallelism of the opposite side to basis B	0.020	0.010	CMM or height gauge or dial gauge

CMM = coordinate measuring machine

Table 4 Case study for concept testing.

Object	Predicted Value (μm)	Real Value (μm)	Error (%)
Straightness of the side (40 mm length)	1.52 ± 1.3	2.21 ± 1.24	31.22 ± 0.64
Center to center of two holes	11.9 ± 1.8	9.83 ± 1.24	17.39 ± 0.43

being the consistency of machined diameters and the flatness. From these results, the owner needs to refurbish this machine as soon as possible although it can be used for making low accuracy workpieces.

The uncertainty value was taken from the permissible error of the CMM machine (International Organization for Standardization, 2009). This value can be calculated from $\Delta U =$

$\pm (3.9 + 4 L / 1,000) \mu\text{m}$. Since the unit length that was used in this research was 100 mm, the uncertainty is $\pm 4.3 \mu\text{m}$.

The following steps show an example of the calculation. Supposing, the flatness needs to be converted into the form of tolerance per unit length with uncertainty. As shown in Table 1, the measuring value is $15 \mu\text{m}$ for 132 mm length (radius). For a length of 100 mm, the tolerance value per unit length (100 mm) is $(15 \times 100 / 132) = 11.4 \mu\text{m} / 100 \text{ mm (radius)} \pm 4.3 \mu\text{m}$. The rest of the converted values are shown in Table 5.



Figure 10 Example of pre-machined blank of a flatness-of-surface test piece.

Predicting turning workpiece dimension using the introduced concept

Three of four test pieces were used in the experiment. Hence, only four tolerance objects (cylindricity, consistency of machined diameters, flatness and circular deviation of a 100°) can be estimated in terms of the tolerance value per unit length (shown in Table 4).

The results of the case study shown in Figure 7 showed that there are three GD&T predictions of concern. However, only the flatness



Figure 11 Measurement of test pieces using the coordinate measuring machine: (a) Cylindrical test piece; (b) Flatness-of-surface test piece; (c) Circular test piece.

Table 5 Cylindrical, flatness-of-surface and a circular test pieces

Object	Measuring value (μm)	Measuring value per unit length with uncertainty (μm)
Cylindricity	5	$12.6 \mu\text{m} / 100 \text{ mm (radius)} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Consistency of machined diameters	15	$37.9 \mu\text{m} / 100 \text{ mm (radius)} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Flatness	15	$11.4 \mu\text{m} / 100 \text{ mm (radius)} \pm 4.3 \mu\text{m}$
Circular deviation of a 100°	25	$50 \mu\text{m} / 100 \text{ mm (radius)} \pm 4.3 \mu\text{m}$

can be predicted before machining because the other GD&T values need to be predicted from a test piece machined under different kinematic conditions which was not done in this research.

Using information in Table 4, the predicted flatness was calculated. The value is about $6.2 \mu\text{m} \pm 4.3 \mu\text{m}$ (calculated using linear approximation). Compared with the real tolerance values measured by the CMM machine ($5.3 \mu\text{m} \pm 0.8 \mu\text{m}$), the result showed that the new concept introduced in this research work, can be used to predict the workpiece dimensions.

Limitation of the introduced method

The important limitation of the method is that in this state, the proposed technique cannot be applied in some cases such as: 1) the cutting conditions of the test piece differ from the cutting conditions of the workpiece; and 2) the material properties of the test piece differ from the material properties of the workpiece.

CONCLUSION

The standard test piece was used as a case study and the experimental results indicated that the proposed technique can be used to evaluate the performance of both CNC machining and turning centers. In addition, by applying this technique, machined part manufacturers can approximate the geometric error of their product in advance. However, with the machining center, the difference between the predicted value and the real value is quite substantial (Table 4). Similar results were observed in the case of the turning center. Therefore, this technique needs to be improved in order to enhance its accuracy for approximating the geometric error of a product in advance.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Kasetsart University, Bangkok, Thailand for a supporting research grant and would like to thank Miss

Laopisai and Mr. Rujipong for collecting primary experimental data.

LITERATURE CITED

- Chean X. B. and A. Geddam. 1997. Accuracy Improvement of three-axis CNC machining centers by quasi-static error compensation. *J. Manu. Sys.* 16: 323-336.
- Chungchoo C. 2013a. An Application of Finished Test Pieces in ISO 10791-7 for Performance Evaluation of CNC Machining Centres. *In Proceedings of the 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICOME 2013)*. Burapha University, 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- Chungchoo C. 2013b. An Application of Finished Test Pieces in ISO 13041-6 for Performance Evaluation of CNC Turning Centres. *In Proceedings of the 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICOME 2013)*. Burapha University, 16-18 October 2013, Pattaya, Chonburi, Thailand.
- Flack D. 2001. *Measurement Good Practice Guide: CMM Measurement Strategies*, National Physical Laboratory, London, UK.
- International Organization for Standardization. 1998. *10791-7: (E) Test Conditions for Machining Centres – Part 7: Accuracy of A Finished Test Piece*. International Organization for Standardization (IOS). Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. 2005. *13041-6: Test Conditions for Numerically Controlled Turning Machines and Turning Centres – Part 6: Accuracy of A Finished Test Piece*. First Edition. International Organization for Standardization (IOS). Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. 2009. *10360-2: Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and*

- Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines – 2: CMMs used for Measuring Linear Dimension.** First Edition. International Organization for Standardization (IOS). Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. 2012. **230-1: Test Code for Machine Tools – 1: Geometric Accuracy of Machines Operating under No-load or Quasi-Static Conditions. First Edition.** International Organization for Standardization (IOS). Geneva, Switzerland.
- Liu Z. Q. and P. K. Venuvinod. 1999. Error compensation in CNC turning solely from dimensional measurements of previously machined parts. *Ann. CIRP*. 48: 429–432.
- Raksiri C. and M. Parnichkun. 2004. Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *Int. J. Mach. Tool. and Manu.* 44: 1283–1291.
- Zhu S., G. Ding, S. Qin, J. Lei, L. Zhuang and K. Yan. 2012. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools. *Int. J. Mach. Tool. and Manu.* 52: 24–29.



ภาคผนวก ข
อภิธานศัพท์

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

S	=	ระยะทางที่ลูกสูบเคลื่อนที่	m
l	=	ความยาวก้านสูบ	m
θ	=	มุมของเพลาช้อเหวี่ยง	rad
v	=	ความเร็วของสลักก้านสูบ	m/s
a	=	ความเร่งของสลักก้านสูบ	m/s ²
t	=	เวลา	s
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดของเครื่องยนต์	m
r	=	รัศมีใบพัดของเครื่องยนต์	m
m	=	มวลของใบพัดของเครื่องยนต์	kg
THK	=	ความหนาของชั้นใบพัดของเครื่องยนต์	mm
P	=	แรงดัน	N/m ²
m_s	=	มวลของเพลาช้อ	kg
θ_i	=	ค่าความเบี่ยงเบนจากเส้นตั้งฉาก	rad
ω	=	ความเร็วเชิงมุม	rad/s
k_t	=	ค่าคงที่ของสปริง	N/m
c_t	=	ค่าคงที่ของความหน่วง	N.s/m
x_n	=	อินพุตโหนดที่ n มีทั้งหมด	N
s_m	=	เอาต์พุตของชั้นซ่อน ก่อนทำการปรับค่า (activation)	y_m
y_m	=	เอาต์พุตของชั้นซ่อน หลังทำการปรับค่าของโหนดที่ m	M
v_j	=	เอาต์พุตของชั้นเอาต์พุต ก่อนทำการปรับค่า (activation)	z_j
z_j	=	ค่าเอาต์พุตที่ได้ทำการปรับค่าแล้วของชั้นเอาต์พุตโหนดที่ j	J
t_j	=	ค่าเอาต์พุตที่ต้องการที่ชั้นเอาต์พุตโหนดที่ j	J
w_{nm}	=	น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นอินพุต กับชั้นซ่อน	
w_{mj}	=	น้ำหนักของเส้นเชื่อมระหว่างชั้นซ่อน กับชั้นเอาต์พุต	
r	=	จำนวนรอบที่จะทำการเรียนรู้ มี R เป็นจำนวนรอบที่กำหนด	R
q	=	จำนวนชุดของข้อมูลตัวอย่าง	Q
$e^{(q)}$	=	ค่าผิดพลาดของข้อมูลตัวอย่าง	
E	=	ค่าผิดพลาดรวมเฉลี่ยของข้อมูลตัวอย่าง	

ภาคผนวก ค
ตารางบันทึกผลการทดสอบ



ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8	แบบที่ 9
0	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300
6	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622
12	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988
18	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750
24	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456
30	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793
36	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522
42	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379
48	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988
54	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793
60	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043
66	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823
72	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111
78	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833
84	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912
90	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293
96	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959
102	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936
108	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284
114	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088
120	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421
126	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303
132	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637
138	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153
144	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383
150	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679
156	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293

ตารางที่ 1 (ต่อ) ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8	แบบที่ 9
156	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808
162	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976
168	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019
174	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408
180	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815
186	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137
192	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503
198	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266
204	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971
210	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308
216	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037
222	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895
228	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503
234	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308
240	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558
246	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338
252	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626
258	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348
264	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427
270	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808
276	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475
282	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451
288	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800
294	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603
300	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936
306	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818
312	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152
318	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669
324	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898
330	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195
336	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808
342	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976
348	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019
354	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408
360	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 10	แบบที่ 11	แบบที่ 12	แบบที่ 13	แบบที่ 14	แบบที่ 15	แบบที่ 16	แบบที่ 17	แบบที่ 18
0	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300
6	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622
12	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988
18	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750
24	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456
30	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793
36	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522
42	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379
48	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988
54	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793
60	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043
66	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823
72	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111
78	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833
84	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912
90	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293
96	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959
102	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936
108	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284
114	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088
120	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421
126	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303
132	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637
138	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153
144	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383
150	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679
156	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293
162	157.151	156.842	157.461	157.151	156.842	157.461	157.151	156.842	157.461
168	164.199	163.895	164.504	164.199	163.895	164.504	164.199	163.895	164.504
174	168.592	168.291	168.893	168.592	168.291	168.893	168.592	168.291	168.893
180	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300

ตารางที่ 2 (ต่อ) ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 10	แบบที่ 11	แบบที่ 12	แบบที่ 13	แบบที่ 14	แบบที่ 15	แบบที่ 16	แบบที่ 17	แบบที่ 18
186	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137
192	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503
198	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266
204	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971
210	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308
216	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037
222	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895
228	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503
234	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308
240	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558
246	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338
252	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626
258	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348
264	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427
270	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808
276	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475
282	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451
288	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800
294	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603
300	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936
306	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818
312	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152
318	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669
324	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898
330	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195
336	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808
342	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976
348	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019
354	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408
360	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 19	แบบที่ 20	แบบที่ 21	แบบที่ 22	แบบที่ 23	แบบที่ 24	แบบที่ 25	แบบที่ 26	แบบที่ 27
0	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300
6	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622	168.321	168.020	168.622
12	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988	163.683	163.379	163.988
18	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750	156.441	156.132	156.750
24	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456	147.140	146.825	147.456
30	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793	136.472	136.150	136.793
36	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522	125.196	124.870	125.522
42	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379	114.050	113.722	114.379
48	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988	103.659	103.331	103.988
54	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793	94.467	94.141	94.793
60	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043	86.722	86.401	87.043
66	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823	80.509	80.194	80.823
72	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111	75.802	75.493	76.111
78	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833	72.529	72.225	72.833
84	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912	70.611	70.310	70.912
90	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293	69.993	69.693	70.293
96	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959	70.658	70.357	70.959
102	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936	72.631	72.326	72.936
108	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284	75.974	75.664	76.284
114	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088	80.771	80.455	81.088
120	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421	87.098	86.775	87.421
126	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303	94.975	94.647	95.303
132	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637	104.307	103.976	104.637
138	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153	114.823	114.492	115.153
144	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383	126.055	125.728	126.383
150	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679	137.357	137.035	137.679
156	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293	147.977	147.661	148.293
162	157.151	156.842	157.461	157.151	156.842	157.461	157.151	156.842	157.461
168	164.199	163.895	164.504	164.199	163.895	164.504	164.199	163.895	164.504
174	168.592	168.291	168.893	168.592	168.291	168.893	168.592	168.291	168.893
180	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300	170.000	169.700	170.300

ตารางที่ 3 (ต่อ) ตารางแสดงค่าระยะทางการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27 (หน่วย: mm)

Crank (°)	แบบที่ 19	แบบที่ 20	แบบที่ 21	แบบที่ 22	แบบที่ 23	แบบที่ 24	แบบที่ 25	แบบที่ 26	แบบที่ 27
186	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137	128.836	128.535	129.137
192	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503	124.199	123.894	124.503
198	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266	116.956	116.647	117.266
204	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971	107.656	107.340	107.971
210	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308	96.987	96.666	97.308
216	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037	85.711	85.385	86.037
222	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895	74.566	74.237	74.895
228	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503	64.175	63.846	64.503
234	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308	54.982	54.657	55.308
240	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558	47.237	46.917	47.558
246	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338	41.024	40.709	41.338
252	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626	36.317	36.009	36.626
258	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348	33.044	32.740	33.348
264	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427	31.126	30.825	31.427
270	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808	30.508	30.208	30.808
276	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475	31.173	30.872	31.475
282	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451	33.146	32.841	33.451
288	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800	36.490	36.179	36.800
294	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603	41.287	40.970	41.603
300	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936	47.614	47.291	47.936
306	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818	55.491	55.163	55.818
312	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152	64.822	64.491	65.152
318	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669	75.338	75.008	75.669
324	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898	86.571	86.243	86.898
330	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195	97.873	97.551	98.195
336	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808	108.492	108.176	108.808
342	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976	117.667	117.357	117.976
348	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019	124.715	124.410	125.019
354	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408	129.107	128.806	129.408
360	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815	130.515	130.215	130.815

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9 (หน่วย: mm/s)

[illegible]

ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27 (หน่วย: mm/s)

[illegible]

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8	แบบที่ 9
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50
12	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48
18	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88
24	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43
30	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50
36	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95
42	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62
48	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13
54	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
60	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
66	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
72	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
78	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
84	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
90	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
96	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
102	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
108	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
114	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
120	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
126	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86
132	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95
138	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51
144	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88
150	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97
156	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17
162	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66
168	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73
174	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
180	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

ตารางที่ 7 (ต่อ) ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 1 - 9 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8	แบบที่ 9
186	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	-1072341.83	1070799.51
192	-943790.80	-944417.71	-943167.48	-943790.80	944417.71	-943167.48	-943790.80	-944417.71	943167.48
198	-745422.51	-745796.76	-745050.89	-745422.51	745796.76	-745050.89	-745422.51	-745796.76	745050.89
204	-494566.05	-494581.47	-494551.43	-494566.05	494581.47	-494551.43	-494566.05	-494581.47	494551.43
210	-218022.33	-217611.25	-218431.51	-218022.33	217611.25	-218431.51	-218022.33	-217611.25	218431.51
216	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	49728.94
222	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	276064.61
228	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	436626.12
234	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
240	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
246	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
252	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
258	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
264	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
270	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
276	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
282	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
288	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
294	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
300	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
306	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	528033.87
312	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	431801.95
318	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	262144.52
324	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	27534.88
330	-245365.44	-244989.31	-245739.96	-245365.44	244989.31	-245739.96	-245365.44	-244989.31	245739.96
336	-522728.65	-522787.26	-522671.17	-522728.65	522787.26	-522671.17	-522728.65	-522787.26	522671.17
342	-770250.41	-770663.04	-769840.65	-770250.41	770663.04	-769840.65	-770250.41	-770663.04	769840.65
348	-962061.93	-962715.88	-961411.72	-962061.93	962715.88	-961411.72	-962061.93	-962715.88	961411.72
354	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	1080420.18
360	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	1117734.75

ตารางที่ 8 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 10	แบบที่ 11	แบบที่ 12	แบบที่ 13	แบบที่ 14	แบบที่ 15	แบบที่ 16	แบบที่ 17	แบบที่ 18
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50
12	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48
18	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88
24	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43
30	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50
36	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95
42	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62
48	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13
54	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
60	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
66	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
72	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
78	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
84	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
90	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
96	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
102	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
108	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
114	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
120	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
126	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86
132	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95
138	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51
144	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88
150	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97
156	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17
162	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66
168	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73
174	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
180	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

ตารางที่ 8 (ต่อ) ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 10 - 18 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 10	แบบที่ 11	แบบที่ 12	แบบที่ 13	แบบที่ 14	แบบที่ 15	แบบที่ 16	แบบที่ 17	แบบที่ 18
186	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	-1072341.83	0799.51	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51
192	-943790.80	-944417.71	-943167.48	-943790.80	-944417.71	3167.48	-943790.80	-944417.71	-943167.48
198	-745422.51	-745796.76	-745050.89	-745422.51	-745796.76	3050.89	-745422.51	-745796.76	-745050.89
204	-494566.05	-494581.47	-494551.43	-494566.05	-494581.47	1551.43	-494566.05	-494581.47	-494551.43
210	-218022.33	-217611.25	-218431.51	-218022.33	-217611.25	3431.51	-218022.33	-217611.25	-218431.51
216	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	728.94	50533.86	51343.61	49728.94
222	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	064.61	277106.75	278155.67	276064.61
228	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	626.12	437651.25	438683.02	436626.12
234	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	421.77	526182.94	526948.60	525421.77
240	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	134.91	554489.86	554846.32	554134.91
246	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	015.10	543950.63	543885.06	544015.10
252	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	476.58	516067.27	515655.17	516476.58
258	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	702.16	487054.90	486403.99	487702.16
264	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	683.32	466902.73	466118.12	467683.32
270	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	456.76	460636.18	459811.49	461456.76
276	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	478.18	469706.64	468931.06	470478.18
282	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	108.64	492482.47	491852.63	493108.64
288	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	949.99	523578.56	523204.43	523949.99
294	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	335.28	552328.98	552321.84	552335.28
300	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	121.70	561552.29	561984.88	561121.70
306	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	033.87	528874.82	529720.89	528033.87
312	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	801.95	432889.79	433984.81	431801.95
318	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	144.52	263214.63	264291.77	262144.52
324	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	534.88	28330.37	29130.61	27534.88
330	-245365.44	-244989.31	-245739.96	-245365.44	-244989.31	3739.96	-245365.44	-244989.31	-245739.96
336	-522728.65	-522787.26	-522671.17	-522728.65	-522787.26	671.17	-522728.65	-522787.26	-522671.17
342	-770250.41	-770663.04	-769840.65	-770250.41	-770663.04	840.65	-770250.41	-770663.04	-769840.65
348	-962061.93	-962715.88	-961411.72	-962061.93	-962715.88	1411.72	-962061.93	-962715.88	-961411.72
354	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	0420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
360	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	7734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 19	แบบที่ 20	แบบที่ 21	แบบที่ 22	แบบที่ 23	แบบที่ 24	แบบที่ 25	แบบที่ 26	แบบที่ 27
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50	-1071568.67	-1072341.82	-1070799.50
12	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48	-943790.80	-944417.70	-943167.48
18	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88	-745422.50	-745796.75	-745050.88
24	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43	-494566.04	-494581.46	-494551.43
30	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50	-218022.32	-217611.24	-218431.50
36	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95	50533.86	51343.62	49728.95
42	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62	277106.76	278155.67	276064.62
48	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13	437651.26	438683.02	436626.13
54	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
60	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
66	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
72	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
78	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
84	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
90	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
96	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
102	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
108	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
114	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
120	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
126	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86	528874.81	529720.88	528033.86
132	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95	432889.79	433984.80	431801.95
138	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51	263214.62	264291.77	262144.51
144	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88	28330.36	29130.60	27534.88
150	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97	-245365.45	-244989.32	-245739.97
156	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17	-522728.66	-522787.27	-522671.17
162	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66	-770250.42	-770663.05	-769840.66
168	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73	-962061.94	-962715.88	-961411.73
174	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	-1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
180	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	-1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

ตารางที่ 9 (ต่อ) ตารางแสดงค่าความเร่งในการเคลื่อนที่ ตั้งแต่แบบที่ 19 - 27 (หน่วย : mm/s²)

Crank (°)	แบบที่ 19	แบบที่ 20	แบบที่ 21	แบบที่ 22	แบบที่ 23	แบบที่ 24	แบบที่ 25	แบบที่ 26	แบบที่ 27
186	1071568.67	-1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51	-1071568.67	-1072341.83	-1070799.51
192	-943790.80	-944417.71	-943167.48	-943790.80	-944417.71	-943167.48	-943790.80	-944417.71	-943167.48
198	-745422.51	-745796.76	-745050.89	-745422.51	-745796.76	-745050.89	-745422.51	-745796.76	-745050.89
204	-494566.05	-494581.47	-494551.43	-494566.05	-494581.47	-494551.43	-494566.05	-494581.47	-494551.43
210	-218022.33	-217611.25	-218431.51	-218022.33	-217611.25	-218431.51	-218022.33	-217611.25	-218431.51
216	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	49728.94	50533.86	51343.61	49728.94
222	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	276064.61	277106.75	278155.67	276064.61
228	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	436626.12	437651.25	438683.02	436626.12
234	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77	526182.94	526948.60	525421.77
240	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91	554489.86	554846.32	554134.91
246	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10	543950.63	543885.06	544015.10
252	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58	516067.27	515655.17	516476.58
258	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16	487054.90	486403.99	487702.16
264	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32	466902.73	466118.12	467683.32
270	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76	460636.18	459811.49	461456.76
276	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18	469706.64	468931.06	470478.18
282	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64	492482.47	491852.63	493108.64
288	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99	523578.56	523204.43	523949.99
294	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28	552328.98	552321.84	552335.28
300	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70	561552.29	561984.88	561121.70
306	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	528033.87	528874.82	529720.89	528033.87
312	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	431801.95	432889.79	433984.81	431801.95
318	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	262144.52	263214.63	264291.77	262144.52
324	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	27534.88	28330.37	29130.61	27534.88
330	-245365.44	-244989.31	-245739.96	-245365.44	-244989.31	-245739.96	-245365.44	-244989.31	-245739.96
336	-522728.65	-522787.26	-522671.17	-522728.65	-522787.26	-522671.17	-522728.65	-522787.26	-522671.17
342	-770250.41	-770663.04	-769840.65	-770250.41	-770663.04	-769840.65	-770250.41	-770663.04	-769840.65
348	-962061.93	-962715.88	-961411.72	-962061.93	-962715.88	-961411.72	-962061.93	-962715.88	-961411.72
354	1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	1081202.93	-1081989.73	-1080420.18	1081202.93	-1081989.73	-1080420.18
360	1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	1118555.16	-1119379.69	-1117734.75	1118555.16	-1119379.69	-1117734.75

ภาคผนวก ง
มาตรฐาน ISO ที่เกี่ยวข้อง



**INTERNATIONAL
STANDARD**

**ISO
2768-1**

First edition
1988-11-15

องค์การนิรโทษกรรม
 หน่วยงานบริหารงานพิเศษ
 ๒๕๓๖-๒๕๓๗

General tolerances —

Part 1:
Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications

*Tolérances générales —
Partie 1 : Tolérances pour dimensions linéaires et angulaires non affectées de tolérances individuelles*

ห้างหุ้นส่วน
 จำกัด
 สำนักงานบริหารงานพิเศษ
 ๒๕๓๖-๒๕๓๗

YISI Library
 ๒๕๓๖-๒๕๓๗

๒๕๓๖-๒๕๓๗

Reference number
ISO 2768-1:1988 (E)

Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for approval before their adoption by the ISO Council. They are approved in accordance with ISO procedures requiring at least 75 % approval by the member bodies voting.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for approval before their adoption by the ISO Council. They are approved in accordance with ISO procedures requiring at least 75 % approval by the member bodies voting.

International Standard ISO 2768-1 was prepared by Technical Committee ISO/TC 3, *Limits and fits*.

This first edition of ISO 2768-1, together with ISO 2768-2:1988, cancel and replace ISO 2768:1973.

ISO 2768 consists of the following parts, under the general title *General tolerances*:

- Part 1: *Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications*
- Part 2: *Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications*

Annex A of this part of ISO 2768 is for information only.

© ISO 1988

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, without permission in writing from the publisher.

International Organization for Standardization
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Switzerland
Printed in Switzerland

Introduction

All features on component parts always have a size and a geometrical shape. For the deviation of size and for the deviations of the geometrical characteristics (form, orientation and location) the function of the part requires limitations which, when exceeded, impair this function.

The tolerancing on the drawing should be complete to ensure that the elements of size and geometry of all features are controlled, i.e. nothing shall be implied or left to judgment in the workshop or in the inspection department.

The use of general tolerances for size and geometry simplifies the task of ensuring that this prerequisite is met.

General tolerances —

Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications

1 Scope

This part of ISO 2768 is intended to simplify drawing indications for linear and angular dimensions without individual tolerance indications in four tolerance classes.

NOTE 1 — The concepts behind the general tolerancing of linear and angular dimensions are described in annex A.

It applies to the dimensions of parts that are produced by metal casting or parts that are formed from sheet metal.

NOTES

2 These tolerances may be suitable for use with materials other than metal.

3 Permitted International Standards exist or are planned, e.g. see ISO 8002 for castings.

This part of ISO 2768 only applies for the following dimensions which do not have an individual tolerance indication:

- linear dimensions (e.g. external size, internal size, step size, diameter, radii, distance, external radii and chamfer heights for broken edges);
- angular dimensions, including angular dimensions usually not indicated, e.g. right angles (90°), unless reference to ISO 2768-2 is made, or angles of uniform polygons;
- linear and angular dimensions produced by machining assembled parts.

It does not apply for the following dimensions:

- linear and angular dimensions which are covered by reference to other standards on general tolerances;
- auxiliary dimensions indicated in brackets;
- dimensionally exact dimensions indicated in rectangular frames.

1) ISO 8002:1984, Castings — System of dimensional tolerances.

2 General

When selecting the tolerance class, the respective customary manufacturing processes and the respective tolerances are permissible and more economical for any individual feature, such tolerances should be indicated adjacent to the relevant nominal dimension.

General tolerances for linear and angular dimensions apply to the dimensions of parts that are produced by metal casting or parts that are formed from sheet metal. If the part of ISO 2768 is not indicated, the tolerance class is the one of the national Standards, reference shall be made to them on the drawing. If the tolerance class is not indicated, the tolerance class shall be the one of the national Standards, reference shall be made to them on the drawing. If the tolerance class is not indicated, the tolerance class shall be the one of the national Standards, reference shall be made to them on the drawing. If the tolerance class is not indicated, the tolerance class shall be the one of the national Standards, reference shall be made to them on the drawing.

3 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of ISO 2768. At the time of approval of this International Standard, the following standards were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this part of ISO 2768 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards indicated. ISO and IEC maintain registers of currently valid International Standards.

ISO 2768-2:1989, *General tolerances — Part 2: Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications.*

ISO 8001:1985, *Technical drawings — Fundamental drawing principles.*

4 General tolerances

4.1 Linear dimensions

General tolerances for linear dimensions are given in tables 1 and 2.

1) ISO 8002:1984, Castings — System of dimensional tolerances.

4.2 Angular dimensions

General tolerances specified in angular units control only the general orientation of lines or line elements of surfaces, but not their form deviations.

The general orientation of the line derived from the actual surface is the orientation of the contacting line of ideal geometrical form. The maximum distance between the contacting line and the actual line shall be the least possible value (see ISO 8016).

The permissible deviations of angular dimensions are given in table 3.

5 Indications on drawings

If general tolerances in accordance with this part of ISO 2768 shall apply, the following information shall be indicated in or near the title block:

- a) "ISO 2768";
b) the tolerance class in accordance with this part of ISO 2768.

EXAMPLE

ISO 2768 m

6 Rejection

Unless otherwise stated, workpieces exceeding the general tolerance shall not lead to automatic rejection provided that the ability of the workpiece to function is not impaired (see clause A.4).

Annex A (informative)

Concepts behind general tolerancing of linear and angular dimensions

A.1 General tolerances should be indicated on the drawing by reference to this part of ISO 2768 in accordance with clause 5.

The values of general tolerances correspond to tolerance classes of customary workshop accuracy, the appropriate tolerance class being selected and indicated on the drawing according to the requirement for the components.

A.2 Above certain tolerance values, there is usually no gain in manufacturing economy by making the tolerance finer. The tolerance is usually rounded to a high level of conformance in a workshop with "customary medium accuracy". Specifying a tolerance of a higher accuracy than the workshop accuracy is not indicated, as the general tolerance values of ± 0.3 mm would be quite adequate.

However, if for functional reasons a feature requires a smaller tolerance value than the "general tolerance", then that feature should have the smaller tolerance indicated individually adjusted to the required tolerance. This type of tolerance falls outside the scope of general tolerancing.

In cases where the function of a feature allows a tolerance value larger than the "general tolerance", then that feature should not be indicated as described in clause 5. This type of tolerance allows full use of the concept of general tolerancing.

There will be "exceptions to the rule" where the function of the feature allows a larger tolerance than the general tolerance, but should not be indicated as described in clause 5. This type of tolerance allows full use of the concept of general tolerancing. In these special cases, the larger tolerance should be indicated individually adjacent to the dimension for the particular feature, e.g. the depth of blind holes drilled at assembly.

A.3 Using general tolerances leads to the following advantages:

- drawings are easier to read and thus communication is made more effective to the user of the drawing;
- the design draughtsman saves time by avoiding detailed tolerance calculations as it is sufficient only to know that the function allows a tolerance greater than or equal to the general tolerance;

c) the drawing readily indicates which feature can be produced by the workshop and which feature can be assisted by quality engineering by reducing inspection levels;

d) these dimensions, meaning, which have individually in drawing form, are not subject to individual inspection of the tolerances and which therefore may require special effort in the production process; this will be helpful for production planning and control; this will also be helpful for the supplier, since in this respect the drawing is complete.

e) purchase and sub-contract supply engineers can negotiate orders more readily since the "customary workshop accuracy" is known before the contract is placed; this also avoids arguments on delivery between the buyer and the supplier, since in this respect the drawing is complete.

These advantages are fully obtained only when there is a tolerance value indicated on the drawing which is not exceeded, i.e. when the customary workshop accuracy of the particular workshop is equal to or finer than the general tolerance indicated in the drawing.

The workshop should, therefore:

- find out by measurements what its customary workshop accuracy is;
- accept only those drawings having general tolerances equal to or greater than its customary workshop accuracy;
- check by sampling that its customary workshop accuracy does not deteriorate.

Relying on undefined "good workmanship" with all its uncertainties is not a valid concept in the workshop. The general geometrical tolerances define the required accuracy of "good workmanship".

A.4 The tolerance the function allows is often greater than the general tolerance. The function of the part, therefore, not only allows but also requires a tolerance greater than the general tolerance. Exceeding the general tolerance should lead to a rejection of the workpiece only if the function is impaired.

Table 1 — Permissible deviations for linear dimensions except for broken edges (external radii and chamfer heights, see table 2)

Tolerance class	Permissible deviations for basic size ranges					
	0.5 ¹⁾ up to 3	over 3 up to 6	over 6 up to 30	over 30 up to 120	over 120 up to 400	over 400 up to 2 000
f	± 0.05	± 0.05	± 0.1	± 0.15	± 0.2	± 0.3
m	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 1.2
c	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 0.8	± 1.2	± 2
v	—	± 0.5	± 1	± 1.5	± 2.5	± 6

1) For nominal sizes below 0.5 mm, the deviations shall be indicated adjacent to the relevant nominal size(s).

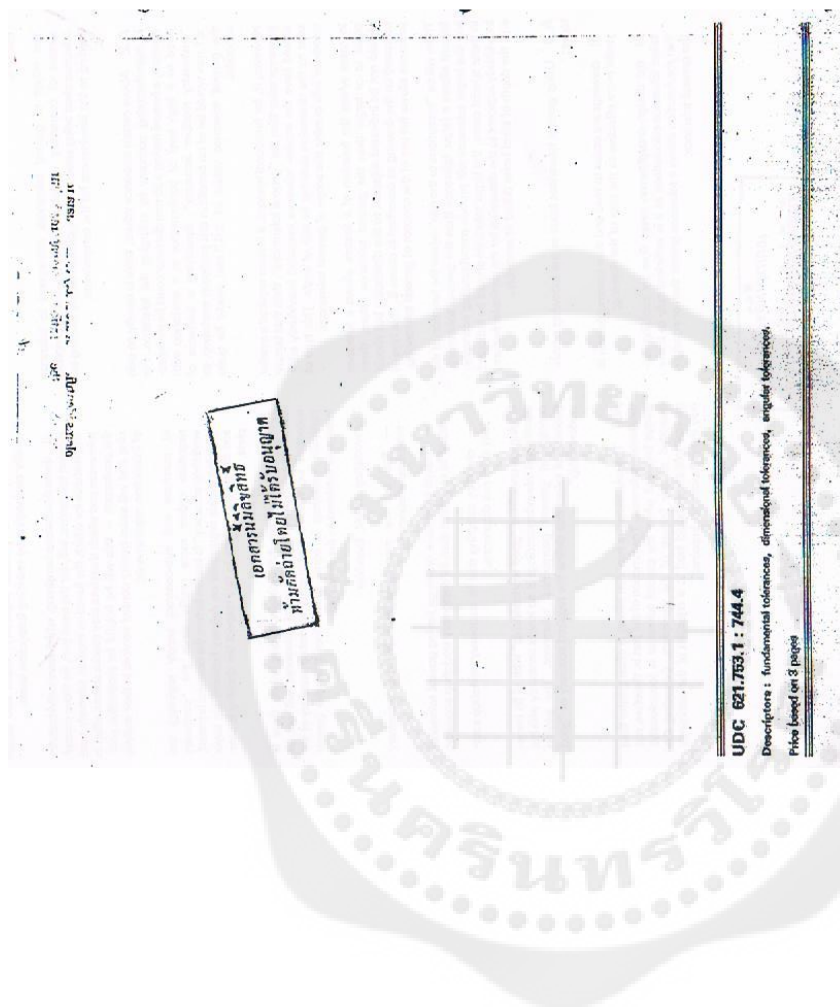
Table 2 — Permissible deviations for broken edges (external radii and chamfer heights)

Tolerance class	Permissible deviations for basic size ranges	
	0.5 ¹⁾ up to 3	over 3 up to 6
f	± 0.2	± 0.5
m	—	± 1
c	—	± 2
v	—	± 4

1) For nominal sizes below 0.5 mm, the deviations shall be indicated adjacent to the relevant nominal size(s).

Table 3 — Permissible deviations of angular dimensions

Tolerance class	Permissible deviations for ranges of lengths, in millimetres, of the shorter side of the angle concerned			
	up to 10	over 10 up to 50	over 50 up to 120	over 120 up to 400
f	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 05'$
m	—	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 15'$	$\pm 0^\circ 10'$
c	$\pm 3^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$
v	—	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$



General Tolerances to DIN ISO 2768

- The latest DIN standard sheet version applies to all parts made to DIN standards.
- Variations on dimensions without tolerance values are according to "DIN ISO 2768- mk".

GENERAL TOLERANCES FOR LINEAR AND ANGULAR DIMENSIONS (DIN ISO 2768 T1)

LINEAR DIMENSIONS:

Permissible deviations in mm for ranges in nominal lengths	f (fine)	Tolerance class designation (description)		v (very coarse)
		m (medium)	c (coarse)	
0.5 up to 3	±0.05	±0.1	±0.2	-
over 3 up to 6	±0.05	±0.1	±0.3	±0.5
over 6 up to 30	±0.1	±0.2	±0.5	±1.0
over 30 up to 120	±0.15	±0.3	±0.8	±1.5
over 120 up to 400	±0.2	±0.5	±1.2	±2.5
over 400 up to 1000	±0.3	±0.8	±2.0	±4.0
over 1000 up to 2000	±0.5	±1.2	±3.0	±6.0
over 2000 up to 4000	-	±2.0	±4.0	±8.0

EXTERNAL RADIUS AND CHAMFER HEIGHTS

Permissible deviations in mm for ranges in nominal lengths	f (fine)	Tolerance class designation (description)		v (very coarse)
		m (middle)	c (coarse)	
0.5 up to 3	±0.2	±0.2	±0.4	±0.4
over 3 up to 6	±0.5	±0.5	±1.0	±1.0
over 6	±1.0	±1.0	±2.0	±2.0

ANGULAR DIMENSIONS

Permissible deviations in degrees and minutes for ranges in nominal lengths	f (fine)	Tolerance class designation (description)		v (very coarse)
		m (middle)	c (coarse)	
up to 10	±1°	±1°	±1°30'	±3°
over 10 up to 50	±0°30'	±0°30'	±1°	±2°
over 50 up to 120	±0°20'	±0°20'	±0°30'	±1°
over 120 up to 400	±0°10'	±0°10'	±0°15'	±0°30'
over 400	±0°5'	±0°5'	±0°10'	±0°20'

GENERAL TOLERANCES FOR FORM AND POSITION (DIN ISO 2768 T2)

STRAIGHTNESS AND FLATNESS

Ranges in nominal lengths in mm	Tolerance class		
	H	K	L
up to 10	0.02	0.05	0.1
over 10 up to 30	0.05	0.1	0.2
over 30 up to 100	0.1	0.2	0.4
over 100 up to 300	0.2	0.4	0.8
over 300 up to 1000	0.3	0.6	1.2
over 1000 up to 3000	0.4	0.8	1.6

PERPENDICULARITY

Ranges in nominal lengths in mm	Tolerance class		
	H	K	L
up to 100	0.2	0.4	0.6
over 100 up to 300	0.3	0.6	1
over 300 up to 1000	0.4	0.8	1.5
over 1000 up to 3000	0.5	0.8	2

SYMMETRY

Ranges in nominal lengths in mm	Tolerance class		
	H	K	L
up to 100	0.5	0.6	0.6
over 100 up to 300	0.5	0.6	1
over 300 up to 1000	0.5	0.8	1.5
over 1000 up to 3000	0.5	1	2

RUN-OUT

Tolerance class		
H	K	L
0.1	0.2	0.5

ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล
วันเดือนปีเกิด
สถานที่เกิด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน

นายกิตติโชติ สุขกำเนิด
31 สิงหาคม 2527
จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
153/185 หมู่ 3 อื่นนิชิไธ้ 2 ปิ่นเกล้าวังแหวน
ต.ศาลากลาง อ.บางกรวย จ.นนทบุรี
โทร 089-614-0565

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2539

ประถม

จาก พระแม่มาลี ประจวบคีรีขันธ์

พ.ศ. 2545

มัธยมปลาย

จาก โรงเรียนประจวบวิทยาลัย

พ.ศ. 2550

ปริญญาตรี วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พ.ศ. 2553

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม)

จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2560

ปริญญาเอก ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ