การสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยโปรแกรมตารางจัดการ

นางสาวชลาลัยวงเวียน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

TOLERANCE CHARTING WITH A SPREADSHEET

Chalalai Wongwian

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineeringe in Industrial Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

ชลาลัย วงเวียน : การสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยโปรแกรมตารางจัดการ (TOLERANCE CHARTING WITH A SPREADSHEET)อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์, 174หน้า.

แผนภูมิความคลาดเคลื่อน คือ ภาพที่แสดงมิติ (dimensions) ของชิ้นงานในทุกขั้นตอนการผลิตอย่างมีระบบ โดยจะแสดงให้เห็นว่าในแต่ละครั้งที่ตัดโลหะนั้น โลหะที่ถูกตัดออกไป (stock removal) มีขนาดและความคลาดเคลื่อนเท่าใด มิติที่เกิดจากการตัดมีขนาดเท่าใด มีความคลาดเคลื่อนสะสมให้กับมิติอื่นหรือไม่ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะแสดงในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนตั้งแต่การตัดโลหะครั้งแรกจนกระทั่งเกิดเป็นชิ้นงานสำเร็จ ซึ่งเป็นเทคนิคเก่าแก่ มีความซับซ้อน และเข้าใจยาก เพราะมีการประยุกต์ใช้ในหลายวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ยังเกิดความผิดพลาดง่าย และต้องใช้เวลาตรวจสอบนาน จึงทำให้ความนิยมใช้ลดลง ต่อมามีนักวิจัยกลุ่มหนึ่งเริ่มให้ความสนใจ และพัฒนาเทคนิคนี้ ให้สามารถสร้างและใช้งานได้ง่าย และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยให้ทำงานเร็วขึ้น ในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้โปรแกรมมีศักยภาพที่จะสามารถแก้ไขจุดอ่อนต่าง ๆ ของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนได้

วิทยานิพนธ์เล่มนี้อธิบายรายละเอียดของการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนโดยใช้โปรแกรมตารางจัดการ (spread sheet) โปรแกรมจะอาศัยเครื่องมือของ Microsoft Excel ทั้งรับข้อมูลและแสดงผลข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการใช้โปรแกรมนี้ ได้แก่ ภาพของชิ้นงาน ขนาดและความคลาดเคลื่อนของแต่ละมิติของชิ้นงาน และรายละเอียดของลำดับการตัดชิ้นงานในแต่ละขั้นตอน เป็นต้น ผลลัพธ์จากโปรแกรมคือ แผนภูมิความคลาดเคลื่อน การแก้ไขหรือปรับปรุงแผนภูมิสามารถทำได้ โดยการป้อนข้อมูลชุดใหม่

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถจัดลำดับการตัดงาน (machining operation)ได้ถึง 30 งาน ภายในเวลา 16วินาที การทดสอบโปรแกรมใช้วิธีการเทียบผลลัพธ์จากการใช้โปรแกรมกับผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยมือโดยอาศัยตัวอย่างจากหนังสือหรือบทความต่าง ๆ ปรากฏว่าได้ผลลัพธ์ตรงกัน อย่างไรก็ตามโปรแกรมยังคงมีข้อจำกัดของการใช้อยู่ ที่สำคัญคือ

(1) พิจารณาเฉพาะ linear tolerance เท่านั้น ไม่ได้รวมถึง geometric tolerance เพราะฉะนั้นจึงมีโอกาสที่จะปรังปรุงโปรแกรมให้ครอบคลุมจุดอ่อนเหล่านี้ต่อไปในอนาคต

(2) ไม่สามารถปรับลำการตัดโลหะได้อย่างอัตโนมัติ ไม่สามารถปรับตัวแปรอิสระ เพื่อขจัดปัญหาความคลาดเคลื่อนสะสม (tolerance stack problem)

(3) ไม่ได้รวมเทคนิคการกระจายความคลาดเคลื่อนอย่างเหมาะสม (optimization technique for tolerance allocation) ในโปรแกรม

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2558 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

CHALALAI WONGWIAN: TOLERANCE CHARTING WITH A SPREADSHEET.THESIS ADVISOR : ASST. PROF.YONGYOOTH SREMSUTIANUWAT, Ph.D., 174 PP.

TOLERANCE CHART/TOLERANCE ANALYSIS/MACHINING SEQUENCE

A tolerance chart is a graphical representation of a machining sequence for producing a machined part. This technique has been reported to be used in machine-shops since the mid – 20th century, but it was not until 1984 that the first computer program was developed for tolerance charting. However, to chart the tolerances in the environment of a spreadsheet has not been found reported. This thesis describes the development of a computer program for charting tolerances with a spread sheet application (Excel). The package is written in Microsoft's Visual Basic.

The algorithm developed for the calculations in the program has been based mainly on the rooted-tree graph technique. The inputs for the program include: a sketch of machined part, blueprint dimensions, a machining sequence, the machine used for each of the processing operations, and the tolerances for all machining operations. These data are interactively input into the program. To input the sketch of the workpiece, a screen with a guidance menu provides short instructions for drawing the outlines of workpiece in an area allocated on the screen. For other data, a form to be filled up is provided on the screen.

The program imitates the steps of manually tolerance charting by first renaming all vertical faces of the machined part; then, calculating tolerance stacks for stock removals; calculating tolerance stacks on resultant dimensions; and, calculating basic

working dimensions (the basic sizes for the machining cuts). The out puts are shown on a separate worksheet in the form of a tolerance chart. In the case of a tolerance stack problem exists, the user can also make modifications on the tolerances of related working dimensions.

The validation of the program had been made by comparison of the results from the program with those from manual calculations. Some complicated workpieces with a number of cuts as many as 30 cuts performed on 15 surfaces had been used as the test samples. It was found that all the results agreed well with those obtained from hand calculations.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Industrial Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2015 Advisor's Signature _____

การสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยโปรแกรมตารางจัดการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(ผศ.ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย)
ประธานกรรมการ

_____

(ผศ.ดร.ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
กรรมการ

_____

(ผศ. ดร.ปภากร พิทยชวาล)
กรรมการ

_____

(ศ.ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

_____

(รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ) ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฏ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 สมมุติฐานและขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 2
1.4.1 การวางแผนกระบวนการผลิต 3
1.4.2 แผนภูมิความคลาดเคลื่อน 7
1.5 สรุป 9
2 หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 9
2.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อน 9
2.1.1ประโยชน์จากแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 10
2.1.2 รูปร่างของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 11
2.1.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 14
2.1.4 ขั้นตอนการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 14
2.2 หลักการคำนวณในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 16
2.2.1 การคำนวณโดยใช้วิธีการแกะรอย (Method of Traces) 16
2.2.2 การคำนวณด้วย Balance Dimensions 17
2.2.3 การคำนวณโดยใช้เทคนิคกราฟต้นไม้ (Rooted-tree graph) 19

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3 สรุป 23

3 โครงสร้างโปรแกรม 24

3.1 องค์ประกอบของโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 24

3.2 โมดูลรับข้อมูล (input module) 25

3.2.1 โมดูลรับข้อมูลรูปภาพชิ้นงาน 27

3.2.2 โมดูลรับข้อมูลขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน 30

3.2.3 โมดูลรับข้อมูลลำดับการผลิตชิ้นงาน 30

3.3 โมดูลการประมวลผลหรือการคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน..... 34

3.3.1 โมดูลการหาผิวชิ้นงานและกำหนดชื่อผิวชิ้นงาน 34

3.3.2 โมดูลการคำนวณตามหลักแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 34

3.4 โมดูลแสดงข้อมูล 37

3.5 โมดูลแก้ไขแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 37

3.6 สรุป 37

4 โปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 38

4.1 ตัวแปร 38

4.2 การป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม 41

4.2.1 โมดูลย่อยสำหรับสร้างภาพชิ้นงาน 41

4.2.2 โมดูลย่อยสำหรับรับข้อมูลในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 41

4.3 การคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 44

4.3.1 โมดูลย่อยการคำนวณขนาดมูลฐานจากแบบชิ้นงาน 44

4.3.2 โมดูลย่อยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะ 49

4.3.3 โมดูลย่อยเปลี่ยนชื่อผิวตามลำดับการตัดโลหะ 51

4.3.4 โมดูลย่อยสำหรับสร้างเส้นทาง (Path) 55

4.3.5 โมดูลย่อยสำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไป ในแต่ละขั้นตอนการผลิต 57

4.3.6 โมดูลย่อยสำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน 60

4.4 ฟังก์ชั่นในโปรแกรม 61

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4.1 ฟังก์ชั่น Comp1 สำหรับเปรียบเทียบ Path....62
4.4.2 ฟังก์ชั่น CalTolสำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสม....64
4.4.3ฟังก์ชั่น Basic สำหรับเรียกใช้ค่าขนาดมูลฐานของชิ้นงาน....65
4.5 โมดูลแสดงแผนภูมิความคลาดเคลื่อน....65
4.5.1 โมดูลย่อยในการแสดงลูกศรแสดงการตัดชิ้นงาน....66
4.5.2 โมดูลย่อยสำหรับแสดงค่าบนแผนภูมิความคลาดเคลื่อน....73
4.6 โมดูลสำหรับแก้ไขแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (improvement module)....73
4.7 สรุป....74
5 ทดสอบโปรแกรม....75
5.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน....75
5.2 สรุป....84
6 สรุปผลการวิจัย....85
6.1 สรุป....85
6.2 ข้อจำกัดของโปรแกรม....85
6.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป....86
รายการอ้างอิง....87
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก, ตารางเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (ISO 286-2)....90
ภาคผนวก ข, คู่มือการใช้งานโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน....92
ภาคผนวก ค, รายการโปรแกรม (Program Listings)....104
ภาคผนวก ง, การทดสอบโปรแกรมโดยการคำนวณด้วยมือ....134
ภาคผนวก จ, บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่....169
ประวัติผู้เขียน....174

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 14
3.1 ตารางแสดงเครื่องมือสำหรับสเกตซ์ภาพชิ้นงาน 28
4.1 ตารางแสดงรายเอียดตัวแปรแบบ Module variable ที่ใช้ในโปรแกรม..... 39
4.2 ลำดับการตัดชิ้นงานตัวอย่าง 51
4.3 Path จากแผนภาพต้นไม้ 56
5.1 ตารางคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของเนื้อโลหะที่โดนตัดออกไป 78
5.2 ตารางคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของมิติในแบบชิ้นงาน 81
5.3 ตารางแสดงการคำนวณ Working Dimension..... 82

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนในการวางแผน 4
1.2 แผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Gadzala , 1959) 7
2.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อน (O.R. Wade,1967) 12
2.2 แบบฟอร์มของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 13
2.3 แสดงการคำนวณ resultants-dimensions tolerance. 17
2.4 แสดงการคำนวณ resultants-dimensions tolerance ด้วย Balance dimensions 18
2.5 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนในชิ้นงานเกียร์ 19
2.6 กราฟต้นไม้ 21
2.7 แสดงวิธีการคำนวณ working dimensions 22
3.1 องค์ประกอบหลักของโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 24
3.2 แผนภาพแสดงรายละเอียดหน้าที่การทำงานของแต่ละส่วนในโปรแกรม 25
3.3 หน้าจอสำหรับสเก็ตซ์ภาพชิ้นงาน 26
3.4 ตัวอย่างภาพชิ้นงานที่ผู้ใช้สเก็ตซ์ขึ้น 28
3.5 หน้าจอรับข้อมูลขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน 29
3.6 หน้าจอสำหรับรับข้อมูลลำดับการผลิตชิ้นงาน 32
3.7 หน้าจอแสดงการหาผิวชิ้นงานและกำหนดชื่อผิวชิ้นงาน 33
3.8 แผนผังการทำงานของโมดูลคำนวณตามหลักแผนภูมิความคลาดเคลื่อน 35
4.1 Flowchart ของชุดคำสั่งสำหรับตรวจสอบจำนวนผิวชิ้นงานและกำหนดชื่อ 43
4.2 ชิ้นงานสำเร็จจากการตัดโลหะมิติต่าง ๆ 45
4.3 Flowchart แสดงการทำงานโมดูลย่อยการคำนวณขนาดของชิ้นงานในทุกผิวในทุกผิวตัด 47
4.4 Flowchart แสดงการทำงานโมดูลย่อยคำนวณขนาดของชิ้นงานในทุกผิวในทุกผิวตัด(ต่อ) 48
4.5 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยในพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนขั้นตอนการตัด 49
4.6 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยเปลี่ยนชื่อผิวตัดชิ้นงาน 54
4.7 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยเปลี่ยนชื่อผิวตัดชิ้นงาน 55
4.8 แผนภาพต้นไม้ (Rooted-tree graph) 56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.9 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยสำหรับสร้างเส้นทาง (Path) 57
4.10 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยสำหรับเปรียบเทียบ Path 59
4.11 Flowchart แสดงการทำงานสำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน 61
4.12 Flowchart แสดงการทำงานของฟังก์ชั่น Comp1() 63
4.13 Flowchart แสดงการทำงานของฟังก์ชั่น CalTol() 64
4.14 Flowchart แสดงการทำงานของฟังก์ชั่น Basic() 65
4.15 Flowchart แสดงการทำงานของการลบเส้นและลบวัตถุเก่าในสมุดงาน 67
4.16 Flowchart แสดงการทำงานของการแสดงรูปชิ้นงานและลากเส้นแสดงผิวชิ้นงาน 68
4.17 Flowchart การลากสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการตัดชิ้นงานในขั้นตอนแรก 70
4.18 Flowchart แสดงการทำงานของการลากสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการตัดชิ้นงาน (ต่อ) 71
4.19 Flowchart แสดงการทำงานของการลากสัญลักษณ์แสดงมิติชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ 72
5.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรม 76
5.2 แผนภาพต้นไม้ 77
5.3 เมทริกขนาดมูลฐานของชิ้นงานที่ได้จากแบบชิ้นงาน 80

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการตัดโลหะ (metal machining industry) ประสิทธิภาพในการผลิตขององค์กรขึ้นอยู่กับความสามารถในการผลิต คุณภาพของการผลิต ซึ่งการวางแผนกระบวนการผลิต (process planning) เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดลำดับการผลิต วิธีการหรือกระบวนการผลิต ตลอดจนเงื่อนไขของการใช้กระบวนการผลิต เพื่อให้ผลผลิตเป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบ กิจกรรมดังกล่าว มีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพขององค์กรและเป็นจุดเริ่มต้นของการวางแผนและควบคุมการผลิตอื่น ๆ ดังนั้นงานวางแผนกระบวนการผลิตจึงมีความสำคัญ ต้องอาศัยผู้ชำนาญงานที่มีความรู้หลายด้าน

แผนภูมิความคลาดเคลื่อนเป็นแผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงมิติ (dimension) ความคลาดเคลื่อน (tolerance) และส่วนที่ถูกตัดออก (stock removal) ของแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะ ตั้งแต่เริ่มต้นจนชิ้นงานสำเร็จ เป็นเทคนิคเก่าแก่ของการควบคุมความคลาดเคลื่อนในแต่ละขั้นตอนของการตัดโลหะอย่างมีประสิทธิภาพและเคยเป็นเครื่องมือที่เผยแพร่มาตั้งแต่ 50-60 ปีที่แล้วสำหรับตรวจสอบความเหมาะสมของลำดับการผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งลำดับการตัดโลหะ (machining sequence) แต่ความนิยมลดน้อยลงในเวลาต่อมา เนื่องจากการหลักการของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนนั้น ซับซ้อน เข้าใจยาก และต้องใช้เวลาศึกษามาก นอกจากนั้นยังเกิดความผิดพลาดในการคำนวณได้ง่าย จนกระทั่ง Ahaluwalia และ Karolin เสนอบทความเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์เขียนแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ทำให้เกิดงานวิจัยทางด้านนี้ โดยเน้นที่การพัฒนาโปรแกรมและเทคนิคสำหรับคำนวณให้รวดเร็วและง่ายต่อการตรวจสอบ

ในปัจจุบันโปรแกรมตารางจัดการ (spreadsheet) เป็นโปรแกรมที่สะดวกต่อการใช้งานหลาย ๆ ด้าน และมีเครื่องมือที่เอื้ออำนวยต่อการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานเฉพาะด้านได้หลากหลาย ซึ่งเครื่องมือเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการเขียนและการคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน งานวิจัยนี้จึงเป็นเรื่องของการพัฒนาโปรแกรมสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนโดยใช้โปรแกรมตารางจัดการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เขียนโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนในโปรแกรมตารางจัดการ โดยสร้างเครื่องมือต่างๆสำหรับการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการตัด (machining cut) ตามแผนการตัดโลหะแบบทดลอง (tentative machining sequence),คำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนสะสม (tolerance stacks) ของมิติในแต่ละขั้นตอนการตัด และแสดงผลออกเป็นแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

1.2.2 ศึกษาศักยภาพของตารางจัดการในการประยุกต์ใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในงานด้านการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น

1.3 สมมติฐานและขอบเขตของการวิจัย

การพัฒนาโปรแกรมเขียนแผนภูมิความคลาดเคลื่อนในงานวิจัยนี้ มีขอบเขตสำหรับงานตัดโลหะ (machinedpart) เท่านั้น ไม่รวมการเปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องจากการทำการอบชุบ (heat treatment) หรือการเคลือบผิวในระหว่างขั้นตอนการตัด ใช้เฉพาะชิ้นงานตัดโลหะสองมิติที่มีการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete machine part) เท่านั้น โดยมีขั้นตอนการผลิตด้วยกระบวนการตัดโลหะพื้นฐาน (basic machining processes) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกลึง (turning operation) และการเจียรนัย (grinding operation)และสมมติว่าชิ้นงานถูกตัดภายใต้สภาวการณ์ตัดโลหะโดยเฉลี่ย (average conditions)

โปรแกรมเขียนแผนภูมิความคลาดเคลื่อนในที่นี้ ได้พัฒนาขึ้นด้วย VBA ในโปรแกรมตารางจัดการ Microsoft Excel

1.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แม้ว่าจะมีการประยุกต์ใช้แผนภูมิความคลาดเคลื่อนหลายแบบกับหลายปัญหา ในงานประกอบและการวางแผนกระบวนการผลิต (process planning) แต่ที่เห็นได้เด่นชัดที่สุดคือ การตรวจลำดับขั้นการตัดโลหะในการวางแผนกระบวนการผลิต ดังนั้น ทฤษฎีและหลักการที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาโปรแกรมเขียนแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ก็คือการวางแผนกระบวนการผลิตและหลักการเขียนและคำนวณค่าสำหรับแผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่มีผู้รู้เสนอให้ใช้หลายวิธี

1.4.1 การวางแผนกระบวนการผลิต (process planning)

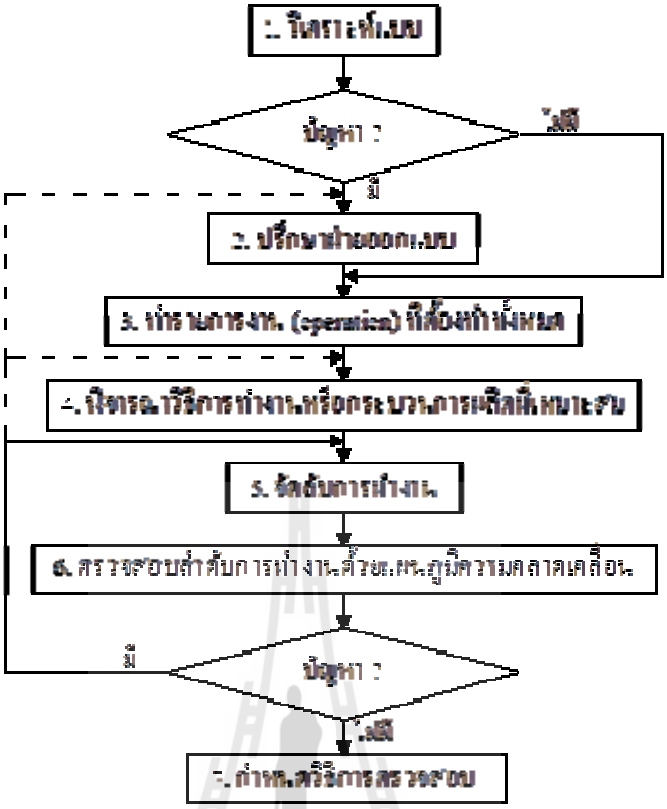
1.)ความสำคัญของการวางแผนกระบวนการผลิต

การวางแผนกระบวนการผลิตหมายถึง การกำหนดวิธีการผลิตให้กับชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ (workpiece or product)เป็นกิจกรรมเริ่มต้นสำหรับกิจกรรมวางแผนและควบคุมการผลิต (production planning & control) อื่น ๆ เช่น การกำหนดวิธีการทำงาน กำหนดเวลามาตรฐาน แผนการผลิต แผนการควบคุม และการกำหนดตารางการทำงาน (production scheduling) เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่าแผนกระบวนการผลิต (process plan) คือจุดเริ่มต้นของการผลิตทั้งหมด

วิศวกรเครื่องมือ มีภาระในด้านการวางแผนกระบวนการผลิต (process planning) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้กระบวนการผลิตและอุปกรณ์ และจัดลำดับกระบวนการผลิตในการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบให้เป็นชิ้นงานสำเร็จได้ตรงตามความต้องการ (design specifications)ถ้าหากไม่มีแผนการชนิดนี้แล้ว หน่วยผลิตแต่ละหน่วยที่รับผิดชอบแต่ละกิจกรรมของการผลิตดังกล่าวข้างต้น จะขาดการประสานงานกันในด้านการออกแบบละการใช้เครื่องมือ ทำให้เกิดผลกระทบต่อหน่วยงานอื่น ผลที่ตามมาก็คือเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการลองผิดลองถูกมากกว่าจะได้แผนกระบวนการผลิตที่ยอมรับได้ ด้วยเหตุนี้เองแผนกระบวนการผลิตจึงช่วย

- กำจัดความสูญเสียและความไม่มีประสิทธิภาพอันเกิดจากความสับสนของหน่อยงานต่าง ๆ ที่ออกแบบและใช้เครื่องมือ จิกส์ (jigs) ฟิกเจอร์ (fixtures) และแม่พิมพ์ (dies)
- กำจัดวิธีการลองผิดลองถูกที่ต้องเสียเวลาละค่าใช่จ่ายสูง

ในที่นี้จะกล่าวถึงการวางแผนกระบวนการผลิตสำหรับชิ้นงานตัดโลหะ (machined parts) เฉพาะในส่วนของการจัดลำดับงานตัดโลหะ (sequence of machining operations) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการใช้งานแผนภูมิความคลาดเคลื่อน



รูปที่1.1ขั้นตอนในการวางแผน

2.)ขั้นตอนทั่วไปสำหรับการวางแผนกระบวนการผลิต

การวางแผนกระบวนการผลิตเป็นเรื่องที่ต้องใช้ความรู้ และใช้ประสบการณ์จากการทำงาน จากการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้ร่วมงาน จากการสอบถามผู้รู้ จากการอ่าน จากการศึกษาที่ผ่านมา และจากการสังเกต เปรียบเทียบ ดัดแปรงวิธีการทำงานต่าง ๆ กล่าวได้ว่าการที่จะวางแผนกระบวนการผลิตได้ดี วิศวกรเครื่องมือจะต้องมีความรู้อย่างดีในด้านเครื่องมือกลชนิดพื้นฐานและชนิดใช้งานเฉพาะด้าน รู้ถึงความต้องการในอุปกรณ์ช่วยผลิต เช่น จิกส์และฟิกเจอร์ของวิธีการผลิตแต่ละอย่าง รู้หลักเศรษฐศาสตร์ในการเลือกกรรมวิธีการผลิต และต้องเป็นผู้ที่มีประสบการณ์มาก ดังนั้นจึงมักจะพบอยู่เสมอว่า แบบของชิ้นงานเดียวกัน ผู้วางแผนกระบวนการผลิต 2 คน จะกำหนดกรรมวิธีและลำดับขั้นตอนการผลิตได้แตกต่างกัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะความแตกต่างในคุณลักษณะดังกล่าวเพราะฉะนั้นจึงดูเหมือนว่าการวางแผนกระบวนการผลิตเป็นเรื่องของแต่ละบุคคลและยากที่ทำให้ได้ดี อย่างไรก็ตามมีผู้ชำนาญการทางด้านนี้หลายท่านได้วางหลักเกณฑ์และจุดที่ต้องตรวจสอบ (check list) ทั้งหลายไว้ เพื่อเป็นแนวปฏิบัติที่จะนำไปสู้แผน

กระบวนการผลิตที่ดี ในที่นี้ได้สรุปขั้นตอนของการวางแผนกระบวนการผลิตเป็นแผนภาพในรูปที่ 1.1 โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

กรอบที่ 1การวิเคราะห์แบบ (part print analysis)

การวิเคราะห์แบบเป็นการพิจารณารายละเอียดของแบบเพื่อทำความเข้าใจ หากพบจุดใดที่ไม่ชัดเจน ข้อมูลไม่ครบหรือผิดพลาดต้องสอบถามผู้ออกแบบ ในขณะเดียวกันนี้ก็ต้องพยายามมองหารายละเอียดที่สำคัญอื่นๆ เช่น คุณลักษณะของผิวที่ต้องการ มิติที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยและผิวอ้างอิงของการบอกขนาดต่าง ๆ เพื่อจัดลำดับความสำคัญของรูปลักษณ์ของชิ้นงาน โดยการวิเคราะห์แบบมีวัตถุประสงค์เพื่อระบุข้อกำหนดของงานให้ชัดเจน บอกได้ถึงสิ่งที่ต้องทำและความสำคัญข้อแต่ละข้อกำหนด และแต่ละข้อกำหนดมีความสัมพันธ์ต่อกันอย่างไร

กรอบที่ 2การปรึกษากับผู้ออกแบบ (consulting the product designer)

ในขณะที่ทำการวิเคราะห์แบบ อาจจำเป็นจะต้องขอความร่วมมือจากผู้ออกแบบให้อธิบายบางจุดของแบบที่ไม่ชัดเจน หรือในบางครั้งผู้วางแผนอาจมองเห็นปัญหาในการผลิตที่สามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนแปลงแบบ

กรอบที่ 3การทำรายการงานที่ต้องทำทั้งหมด (listing the operations required)

เป็นขั้นตอนของการแจกแจงว่ามีงาน (operations) ใดบ้างที่ต้องทำและทำกับส่วนใดของชิ้นงาน ในรายการงานนี้ไม่จำเป็นต้องเรียงตามลำดับงานที่จะเกิดขึ้นจริง เป็นเพียงบันทึกงานทั้งหมด และยังไม่มีการพิจารณาปัจจัยอื่นประกอบ อาจจะทำเป็นตาราง หรือเป็นรายการธรรมดาก็ได้

กรอบที่ 4การกำหนดกระบวนการผลิตสำหรับงานแต่ละอย่าง (selecting the process)

ในการเลือกกระบวนการผลิตหรือวิธีการทำงานให้กับงานในแต่ละขั้นตอนของการผลิต ผู้วางแผนจะต้องพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการผลิตต่าง ๆ ที่สามารถทำงาน (operations) เดียวกันได้ กระบวนการผลิตหรือวิธีการทำงานที่เลือกควรเป็นชนิดที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด หลังจากพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องแล้ว เช่น ความเที่ยงตรงของเครื่อง คุณภาพของงานและอัตราการผลิต เป็นต้น ในการเลือกควรนำ 2-3 วิธีมาเปรียบเทียบกัน ในบางกรณีผู้วางแผนสามารถตัดสินใจเลือกกระบวนการผลิตสำหรับแต่ละงาน โดยใช้ประสบการณ์เป็นแนวทาง วิธีการนี้แม้ว่าจะรวดเร็ว แต่ก็ไม่ควรที่จะนำมาใช้ตลอดเวลาเพราะไม่ใช่วิธีการที่ดีที่วิศวกรพึงใช้และอาจทำให้มองไม่เห็นปัญหาหรือละเลยเป้าหมายสำคัญได้

กรอบที่ 5การจัดลำดับการทำงาน (determining the sequence of operations)

ในการขั้นตอนนี้เป็นการนำเอางานทั้งหลายมาพิจารณาจัดเรียงลำดับ จัดลำดับตามความสำคัญของงานแต่ละงาน

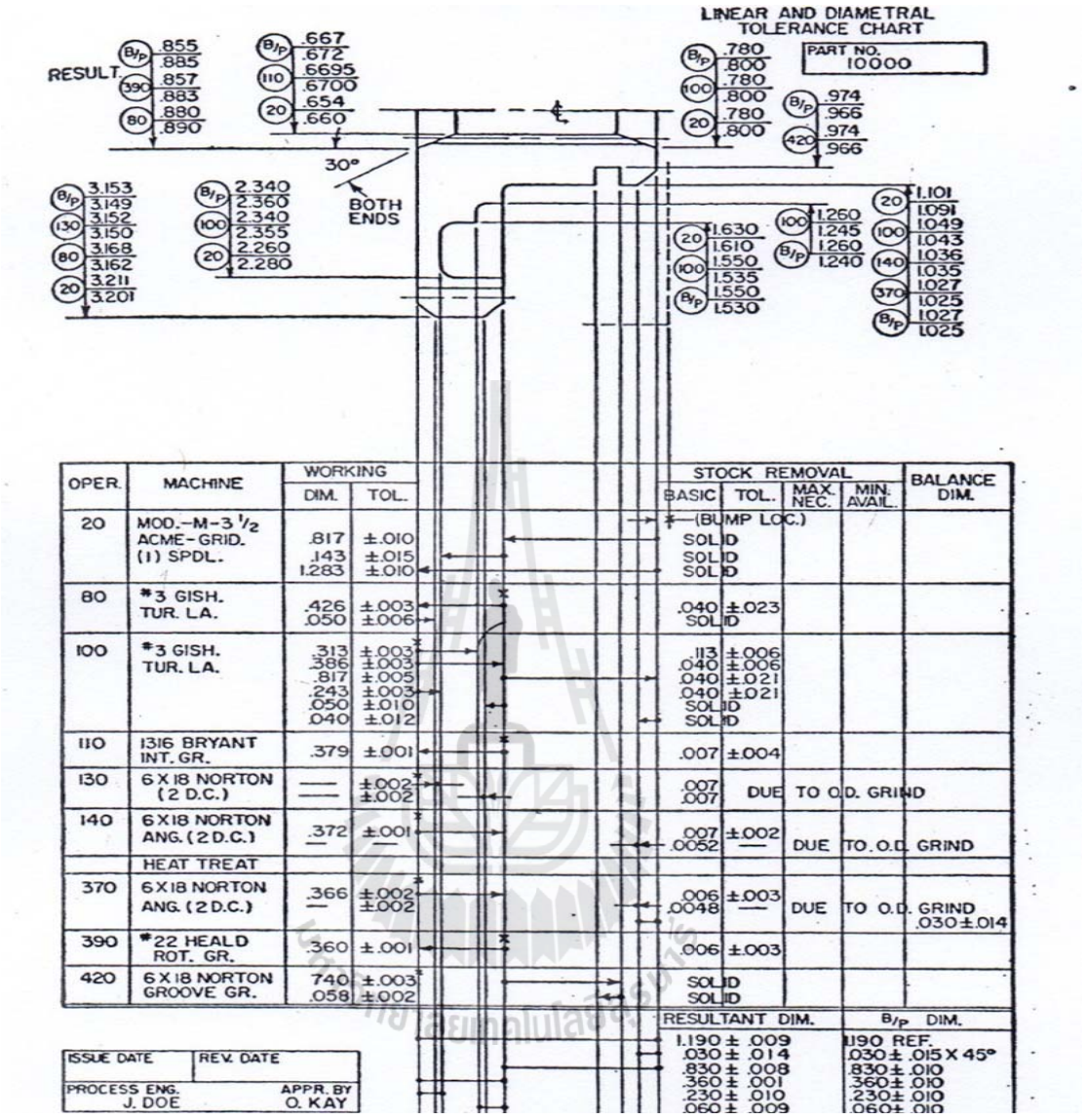
กรอบที่ 6การตรวจสอบลำดับการทำงานด้วยแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

แผนภูมิความคลาดเคลื่อน (tolerance chart) คือแผนภาพที่แสดงความเปลี่ยนแปลงในมิติและความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของการตัดโลหะ แผนภาพชนิดนี้มีประโยชน์สำหรับตรวจสอบว่าขั้นตอนการตัดโลหะ (sequence of machining) ที่กำหนดขึ้นนั้นสามารถทำงานได้ตามที่แบบต้องการหรือไม่ เพราะฉะนั้นการใช้แผนภูมิความคลาดเคลื่อนจึงเป็นการประเมินความเป็นไปได้ของขั้นตอนการตัดโลหะก่อนที่จะเกิดการตัดโลหะจริง และหากพบว่าจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนการทำงานให้เหมาะสม ก็สามารถใช้แผนภูมิอีกเช่นกันเป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อปรับเปลี่ยน กล่าวได้ว่าแผนภูมิชนิดนี้คือเครื่องมือที่สำคัญของวิศวกรเครื่องมือ

กรอบที่ 7การกำหนดวิธีการตรวจสอบ (specifying gaging and measuring methods)

ถึงแม้ว่าการออกแบบเครื่องตรวจสอบ เป็นหน้าที่ของฝ่ายออกแบบเครื่องมือ แต่ผู้วางแผนกระบวนการผลิต (process planners) ก็มีส่วนรับผิดชอบกำหนดวิธีการวัดและตรวจสอบงานในขั้นตอนต่าง ๆ โดยทำงานประสานกับฝ่ายควบคุมคุณภาพ (quality control) วิธีการตรวจสอบที่ว่านี้อาจเป็นเพียงการใช้เครื่องมือวัดมาตรฐานธรรมดา ๆ หรือการออกแบบเกจ (gage) ขึ้นใช้ และรวมไปถึงการใช้เครื่องมืออัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติตรวจสอบด้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 1.2แผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Gadzala, 1959)

1.4.2 แผนภูมิความคลาดเคลื่อน

แผนภูมิความคลาดเคลื่อน (tolerance chart) คือภาพที่แสดงมิติ (dimensions) ของชิ้นงานในทุกขั้นตอนการผลิตอย่างมีระบบ ตั้งแต่การตัดโลหะครั้งแรกจนกระทั่ง เกิดเป็นชิ้นงานสำเร็จ ทำให้สามารถตรวจสอบได้ว่า ขั้นตอนหรือวิธีการตัดโลหะที่กำหนดไว้นั้นเหมาะสมหรือไม่ หรือควรจะทำการปรับปรุงแก้ไขอย่างไร เพื่อให้ชิ้นงานสำเร็จขั้นสุดท้ายเป็นไปตามแบบ (design specification)

ในรูปที่ 1.2 แสดงรูปแบบหนึ่งของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนตามวิธีการของ Gadzala (1959) ซึ่งประกอบด้วยภาพชิ้นงานที่อยู่ส่วนบนของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (ในรูปแสดงภาพชิ้นงานเพียงครึ่งเดียว) และล้อมรอบด้วยรายละเอียดของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เกิดจากการตัดในแต่ละขั้นตอน (operation)รายละเอียดเหล่านี้ไม่ใช่ผลจากการใช้แผนภูมิความคลาดเคลื่อนแต่เป็นผลของการวางแผนกระบวนการผลิต ส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรง คือ ส่วนที่อยู่ใต้ภาพชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วย

(1). ลำดับการตัดโลหะ แสดงเป็นลูกศรจากผิวอ้างอิงของการตัดไปยังผิวที่ถูกตัดที่ปลายลูกศร

(2). ชนิดเครื่องมือกลและมิติจากการตัดแต่ละครั้ง (working dimension) ส่วนนี้จะอยู่ทางซ้ายมือของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

(3). ส่วนของโลหะที่ถูกตัดออกไป (stock removal) ซึ่งแสดงอยู่ทางด้านขวามือของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

(4).มิติในแบบ (B/P dimensions) คือ มิติที่ต้องการที่อยู่ในแบบของชิ้นงาน

(5). มิติอันเป็นผลลัพธ์จากการใช้แผนภูมิความคลาดเคลื่อนวิเคราะห์ เรียกว่า Resultant dimensions ซึ่งแสดงไว้ที่ขวามือด้านล่างของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (ติดกับ B/P dimension เพื่อให้สะดวกต่อการเปรียบเทียบ)

สำหรับผลของขั้นตอนการตัดโลหะในรูปที่ 1.2 คือทุกมิติที่ต้องการอยู่ภายใต้ขอบเขตของข้อกำหนดของแบบ

ดังได้กล่าวแล้วว่ามีการประยุกต์ใช้แผนภูมิความคลาดเคลื่อนในหลายด้าย เพราะฉะนั้นรูปแบบของแผนภูมิจึงแตกต่างกันบ้าง ซึ่งในบทต่อไปจะแสดงรายละเอียดของแต่ละส่วนของแผนภูมิมากขึ้น ตามวิธีการของ O.R. Wade (1967)

1.5 สรุป

ในบทนี้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์สมมติฐานและขอบเขตของการวิจัยนี้และได้กล่าวโดยสังเขปถึงการวางแผนกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญ มุ่งเน้นให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้แผนภูมิความคลาดเคลื่อน และแสดงรายละเอียดเบื้องต้นของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

บทที่ 2
ทบทวนวรรณกรรมและการคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

ในบทนี้กล่าวโดยสังเขปถึงงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนด้วยแผนภูมิความคลาดเคลื่อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ สำหรับคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

2.1 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนและแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

การขยายตัวของอุตสาหกรรมการตัดโลหะและความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทำให้เกิดมีการใช้คอมพิวเตอร์วางแผนกระบวนการผลิตและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนอย่างจริงจัง (Fainguelernt, Weill, &Bourdet, 1986) โดยเริ่มจาก Ahaluwalia and Korolin (1984) ที่พัฒนาโปรแกรมเขียนแผนภูมิความคลาดเคลื่อนเป็นครั้งแรก แต่จุดอ่อนของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่สำคัญ คือตรวจสอบความคลาดเคลื่อนสะสมได้ยาก แม้ว่าจะมีเทคนิค Method of traces ของ Gadzala (1959), เทคนิค Early และ Johnson (1962) และเทคนิคการใช้ Balance dimensions ของ O.R. Wade (1967) ก็ตาม ด้วยเหตุนี้เองในระยะหลังจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาวิธีการ (algorithm)สำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ดังจะเห็นได้จากผลงานของ Davie (1988) ที่ใช้กราฟ (graph) ร่วมกับกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ในการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสม และเทคนิคของIrani, Mittal and Lehtihet (1989) ซึ่งใช้ Directed graph ชนิดหนึ่งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างรอยตัดของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยวิธีการ ที่เรียกว่า Path tracing ในการบ่งชี้ความเชื่อมโยงของความคลาดเคลื่อน แต่วิธีการนี้ก็ยังเป็นวิธีที่ยากต่อการนำไปใช้ในทางปฏิบัติเพราะไม่สามารถบ่งชี้ผิวหน้าในการตัด (machined surface) ที่แน่นอนได้อีกทั้งมียังใช้กฎเกณฑ์ที่ซับซ้อน

Whybrew, Britton, Robinson and Sermsuti-Anuwat (1990) ได้เสนอการวิธีประยุกต์ใช้กราฟต้นไม้ (rooted-tree graph) ช่วยในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนและอาจกล่าวได้ว่าวิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจและไม่ต้องอาศัยกฎเกณฑ์ที่ยุ่งยากซับซ้อนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของมิติได้อย่างดี จึงเป็นจุดเริ่มต้นในการนำไปสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ง่าย สามารถดำเนินการบนคอมพิวเตอร์ได้

ในทางด้านการกระจายความคลาดเคลื่อนที่เหมาะสมให้กับการตัดแต่ละครั้งในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนNgoi(1992) ประยุกต์กราฟต้นไม้เป็น Path-tracing technique ร่วมกับหาค่าความคลาดเคลื่อนให้กับแต่ละขั้นตอนของการตัดโลหะ และ Ngoi ยัง นำไปใช้ช่วยจัดลำดับกระบวนการผลิตในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนอย่างอัตโนมัติ (Ngoi and Cheong, 1998) ด้วย นอกจากนี้อรวรรณและยงยุทธ(2011) ใช้กราฟต้นไม้ในทำนองเดียวกับ Ngoi แต่กำหนด lower boundariesที่เหมาะสมกับความสามารถของกระบวนการผลิตเป็นเงื่อนไขให้กับผลลัพธ์ของสมการเชิงเส้นตรง

ในด้านการวางแผนกระบวนการผลิต มีการนำแผนภูมิความคลาดเคลื่อนตรวจสอบผลจากการตัดโลหะใน 3 มุมมองของภาพฉาย (3 orthogonal projection) (Sermsuti-Anuwat, Whybrew and McCallion, 1995) และสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการประเมินคุณภาพในการทำงานของผู้ผลิตที่ทำการตามแผนกระบวนการผลิตได้อีกด้วย (In-Ho &Zuomin, 2005)

ในการพัฒนาโปรแกรมในที่นี้ อาศัยเทคนิคกราฟต้นไม้ที่พัฒนาโดย Whybrewและคณะเป็นหลักในการคำนวณต่าง ๆ ในโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

2.1.1 ประโยชน์จากแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

แผนภูมิความคลาดเคลื่อนใช้สำหรับงานตัดโลหะ โดยที่ถ้าการตัดโลหะที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจำเป็นต้องเปลี่ยนตำแหน่งการจับชิ้นงานบ่อย มีการตัดซ้ำหลายครั้งและมีความละเอียดจนต้องควบคุมผลของความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดขึ้นแล้ว แผนภูมิความคลาดเคลื่อนจะสามารถช่วยในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการตัดโลหะได้ดี แต่ถ้าหากการตัดโลหะไม่มีความซับซ้อนมากนัก การตรวจสอบความเหมาะสมของขั้นตอนการตัดโลหะก็ไม่จำเป็นจะต้องใช้แผนภูมิความคลาดเคลื่อน เนื่องจากแผนภูมิความคลาดเคลื่อนเป็นทั้งเทคนิคของการวิเคราะห์มิติและเทคนิคของการควบคุมความคลาดเคลื่อน (tolerance control) จึงมีการนำเอาแผนภูมิความคลาดเคลื่อนไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ หลากหลาย เช่น

- เป็นเอกสารสำหรับให้วิศวกรการผลิต (process engineers) ใช้กำหนดองค์ประกอบหรือปัจจัยในการผลิต เพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามความต้องการของการออกแบบ
- เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการปรับปรุงการจัดลำดับขั้นตอนการผลิตชิ้นงานให้เหมาะสม
- เป็นเครื่องมือที่มีวิธีการในการคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนในแต่ละขั้นตอนการผลิตในลำดับการตัดชิ้นงานที่วิเคราะห์
- เป็นเครื่องมือที่รับรองได้ว่ามีเนื้อชิ้นงานสำหรับตัดออกไปเสมอในแต่ละขั้นตอน

- เป็นเอกสารที่ใช้เจรจา สื่อสารระหว่างฝ่ายออกแบบเมื่อข้อกำหนดในการผลิตไม่สามารถผลิต หรือมีค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง
- เป็นเครื่องมือที่ช่วยในกำหนดเครื่องมือวัดขนาด สำหรับตรวจสอบขนาดที่เปลี่ยนแปลงตามกระบวนการผลิต
- เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดขนาดของวัตถุดิบเริ่มต้น (size of raw stock or material)

LINE NO.						BALANCE DIM.		STOCK REMOVAL	
	OP. NO.	MACHINE USED	MACHINE TO MEAN	MACHINE TO ±TOL	A B C D	MEAN	±TOL	MEAN	±TOL
1	10	W&S							
2	"	"	0.993	0.001				SOLID	
3	"	"	0.536	0.01				"	
4	"	"	2.022	0.01				"	
5						1.029	0.001		
6									
7	20	HARDING	0.513	0.003				0.023	0.013
8	"	"	1.007	0.001				0.022	0.012
9						2	0.002		
10									
11	30	NORTON	0.509	0.002				0.004	0.005
12						0.498	0.003		
13									
14	40	"	0.505	0.002				0.004	0.004
15									
16	100	"	0.502	0.001				0.003	0.003
17						1	0.004		
18									
19	110	"	0.5	0.001				0.002	0.002
20						0.5	0.005		
21									
22									
23			BLUE PRINT			RESULTANTS			
24			0.5	0.005		0.5	0.005		
25			0.5	0.001		0.5	0.001		
26			2	0.002		2	0.002		
27									

รูปที่ 2.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อน (O.R. Wade, 1967)

2.1.2 รูปร่างของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

รูปร่างของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่มีองค์ประกอบเหมือน ๆ กัน จะมีส่วนที่แตกต่างกันบ้างตามวิธีการสร้างและการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของแต่ละวิธี

ในรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนตามหนังสือของ O.R. Wade(1967) มีสดมภ์“Balance dimensions” เพิ่มเติมจากรูปแบบของ Gadzala (1959) ที่กล่าวมาแล้ว เพราะวิธีการของ Wade ใช้ประโยชน์ของ balance dimensions ในการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมและขนาดมูลฐาน (basic size)ของการตัดแต่ละครั้ง (working basic dimensions) แผนภูมิความคลาดเคลื่อนแบบนี้ แบ่งเป็น 5 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1ส่วนบนสุดของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนเป็นพื้นที่ที่ใช้สำหรับสเกตช์ภาพชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์

ส่วนที่ 2ส่วนซ้ายของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ประกอบด้วย 4 คอลัมน์ ดังต่อไปนี้

- คอลัมน์ LINE NO. เป็นคอลัมน์แสดงตัวเลขระบุจำนวนเส้นแสดงการตัด (ไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของแผนภูมิโดยตรงแต่มีไว้เพื่อประกอบคำอธิบายหรืออ้างอิง)
- คอลัมน์ OP. NO. เป็นคอลัมน์แสดงตัวเลขประจำแต่ละขั้นตอนการผลิต
- คอลัมน์ MHICNE USED เป็นคอลัมน์แสดงเครื่องจักรที่ใช้ผลิตแต่ละขั้นตอนการตัดชิ้นงาน
- คอลัมน์ WORKING DIM. เป็นคอลัมน์แสดง ขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานที่จะเกิดให้แต่ละขั้นตอนการตัดชิ้นงาน

ส่วนที่ 3ส่วนกลางของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนเป็นพื้นที่สำหรับใส่สัญลักษณ์แสดงการตัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอน

ส่วนที่ 4ส่วนขวาของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

- คอลัมน์ BALANCE DIM. แสดงขนาดและความคลาดเคลื่อนอันเป็นผลจากการตัดก่อนหน้านั้น
- คอลัมน์ LINE INVOLVED เป็นรายละเอียดของบรรทัดที่เกี่ยวข้องซึ่งเป็นเทคนิคของ Wade
- คอลัมน์ STOCK REMOVAL เป็นคอลัมน์แสดงขนาดและความคลาดเคลื่อนของเนื้อชิ้นงานที่จะต้องถูกตัดออกในครั้งที่ตัดชิ้นงานประกอบด้วยขนาดมูลฐานและความคลาดเคลื่อน

ส่วนที่ 5ส่วนล่างของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

- คอลัมน์ BLUE PRINT คอลัมน์แสดงข้อกำหนดของชิ้นงานตามแบบ

- พื้นที่สำหรับแสดงตำแหน่งของผิวชิ้นงานตามที่แบบกำหนด
- คอลัมน์ RESUITANTSคอลัมน์แสดงขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากขั้นตอนการตัดโลหะในแผนภูมิ

จะเห็นได้ว่ารูปแบบของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนของ Wade จะแตกต่างไปจากของ Gadzalaบ้าง ตามเทคนิคของการคำนวณในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนแต่ความแตกต่างเหล่านี้เป็นเพียงส่วนน้อยเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วรูปแบบของแผนภูมิจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ 5 ส่วนดังกล่าว และมีแบบฟอร์มดังในรูปที่ 2.2

OP. NO.	MACHINE USED	WORKING DIM.			STOCK REMOVAL	
		BASIC	±TOL/2		BASIC	±TOL/2
		BLUE PRINT			RESULTANTS	

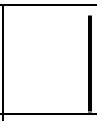
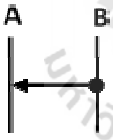
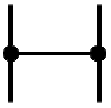
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 2.2แบบฟอร์มของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

2.1.3 สัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

ในตารางที่ 1.1 แสดงสัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในแผนภูมิเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจและการสื่อความหมายที่กระชับในการวิเคราะห์ด้วยหลักการของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ 1.1แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

1			Plane	ระนาบแนวดิ่งแสดงผิวชิ้นงาน
2			Locating surface	ใช้ระบุผิวอ้างอิงการตัดหรือผิวอ้างอิงในการวัดขนาด
3			Surface being cut	ใช้ระบุผิวที่ต้องการตัดในแต่ละขั้นตอน
4			Facing cut symbol	ใช้ระบุผิวที่ถูกปาดหน้าหรือตัดในครั้งแรกหรือระบุผิวกำหนดตำแหน่งเริ่มต้น
5			Machining cut symbol	ลูกศรชี้ไปที่ผิวหรือระนาบ A ซึ่งเป็นผิวที่ถูกตัดและจุดวงกลมสีดำระบุระนาบอ้างอิงของการวัดขนาดความยาว A-B (ค่าความยาว A-B ของแต่ละครั้งในการตัดจะถูกระบุอยู่ในช่อง working dimensions)
6			Dot-to-dot symbol	มิติของชิ้นงาน (blueprint dimension) หรือมิติที่เกิดจากการตัดชิ้นงาน (resultant dimension หรือ balance dimension)

2.1.4 ขั้นตอนการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

เนื่องจากแผนภูมิความคลาดเคลื่อนเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์แผนกระบวนการผลิต และจะเป็นเครื่องมือในการสื่อสารระหว่างวิศวกรการผลิตกับผู้ออกแบบ ดังนั้นผู้ที่สร้างหรือต้องการให้งานแผนภูมิความคลาดเคลื่อนจะต้องมีความรู้พื้นฐานด้านการผลิต และ

เข้าใจสัญลักษณ์ที่แสดงในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ก่อนสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนจะต้องมีข้อมูลที่จำเป็นในดังต่อไปนี้

- แบบชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ โดยในแบบจะต้องแสดงขนาดและความคลาดเคลื่อนของแต่ละผิวชิ้นงานอย่างครบถ้วน
- แผนกระบวนการตัดโลหะ ซึ่งเป็นแผนกระบวนการผลิตที่ผู้วางแผนต้องการตรวจสอบด้วยแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

และมีขั้นตอนการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ดังนี้

1). สเกตซ์ภาพชิ้นงานที่ส่วนบนของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ซึ่งการสเกตซ์ต้องแยกผิวชิ้นงานในแนวดิ่งในชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผิวที่เกิดจากการตัดไม่พร้อมกัน ต้องสเกตซ์ในเป็นคนละผิวตัด และถ้าเป็นชิ้นงานสมมาตรรอบแกนในแนวระดับอาจแสดงหรือสเกตซ์เพียงครึ่งใดครึ่งหนึ่งได้

2). ลากเส้นกำกับระนาบในแนวดิ่งต่อจากเส้นแนวดิ่งของผิวตัดของชิ้นงาน จากนั้นกำหนดตัวอักษรสำหรับระนาบแต่ละระนาบ

3). ใส่ขั้นตอนการตัดโลหะ (machining cut) โดยแปรงจากลำดับการตัดชิ้นงานจริงเป็นสัญลักษณ์ (machining cut symbol) ลงในส่วนกลางของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนจากนั้นใส่ตัวเลขกำกับเพื่อระบุลำดับในการตัดให้กับแต่ละสัญลักษณ์ที่เขียนขึ้น

4). เติมหมายเลขการดำเนินงานในคอลัมน์ PER NO. และชนิดของเครื่องจักรการที่ใช้สำหรับผลิตชิ้นงานแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะในคอลัมน์ MHACHINE USED

5). เขียนมิติ (dimension) ของชิ้นงานลงในคอลัมน์ BLUEPRINT จากนั้นเขียนสัญลักษณ์(dot-to-dot symbols) แสดงผิวของมิตินั้นๆ

6). กำหนดความคลาดเคลื่อนให้กับคอลัมน์ ±TOL ในคอลัมน์ WORKING DIM. ทั้งหมด ซึ่งจะกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนตามความสามารถของเครื่องหรือของกรรมวิธีการผลิต (กำหนดให้เพียงแต่ความคลาดเคลื่อนไม่ต้องกำหนดขนาดของมิติ)

7). ใส่ขนาดของ basic size ลงในคอลัมน์ RESULTANTSโดยคัดลอกจากขนาดของ basic size จากคอลัมน์ BLUEPRINT

8). คำนวณความคลาดเคลื่อนตามหลักการของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ใส่ลงในคอลัมน์ ±TOL ของคอลัมน์ STOCK REMOVAL

9). กำหนดค่าขนาดของโลหะเฉลี่ยที่แต่ละขั้นตอนการตัดโลหะให้กับคอลัมน์ BASIC ของคอลัมน์ STOCK REMOVAL

10). คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนตามหลักการของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ให้กับคอลัมน์ ±TOL ของคอลัมน์ RESLUTANT (ตอนล่างของแผนภาพ)

11). คำนวณขนาดของคอลัมน์ WORKING DIM. ใส่ในคอลัมน์ BASIC

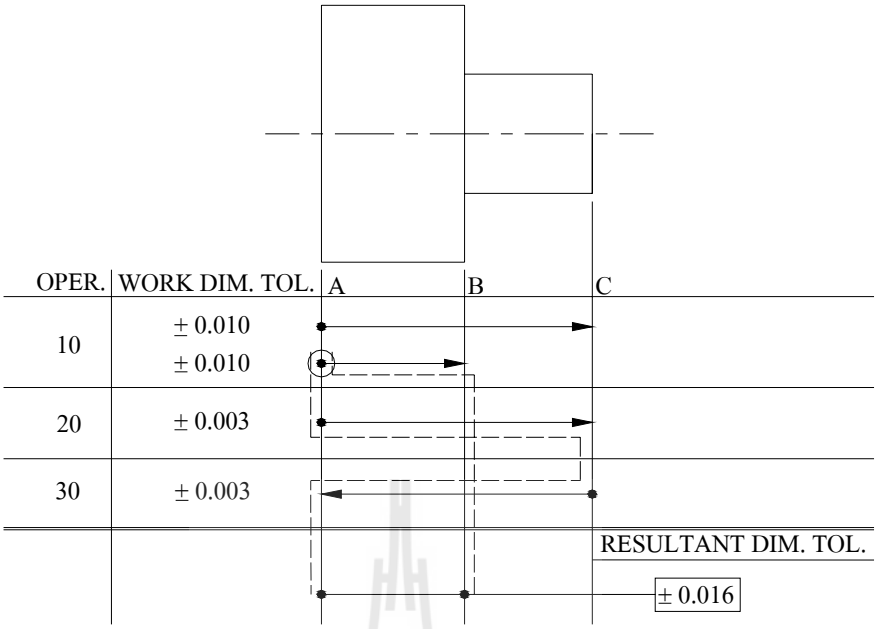
2.2 หลักการคำนวณในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

เนื่องจากแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Tolerance Chart)เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ขั้นตอนการตัดชิ้นงาน โดยการจำลองการตัดชิ้นงานทุกขั้นตอนที่จะเกิดขึ้นและบันทึกลงในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน เป็นการจำลองโดยไม่ต้องตัดชิ้นงานจริง แต่อาศัยหลักการพิจารณาความคลาดเคลื่อนสะสมที่จะเกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการผลิตและการคำนวณขนาดมูลฐานของการตัดแต่ละครั้ง เพราะฉะนั้นแผนภูมิความคลาดเคลื่อนจึงสามารถแสดงให้เห็นปัญหาจากขึ้นจากขั้นตอนการผลิตชิ้นงานได้อย่างดี

ในที่นี้จะแสดงวิธีการหรือเทคนิคสำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสม 3 วิธีคือ:-

2.2.1 การคำนวณโดยใช้วิธีการแกะรอย (Method ofTraces)

Gadzala (1959) ได้เสนอหลักการคำนวณความคลาดเคลื่อนโดยใช้วิธีการแกะรอยในการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติระหว่างผิว 2 ผิว ที่พิจารณาโดยมีหลักการง่าย ๆ ว่าให้ลากเส้นดิ่งจากผิวทั้งสองขึ้นไปด้านบน เมื่อพบหัวลูกศรให้เลี้ยวหักศอกไปยังปลายลูกศรอีกด้านและที่ปลายลูกศร ถ้าเหนือขึ้นไปบนเส้นดิ่งเดียวกัน ยังมีลูกศรกระทำอยู่ ก็ให้ลากขึ้นไปหาลูกศรนั้น และเมื่อใดเส้นดิ่งมารวมกันและเคลื่อนที่ขึ้นพร้อมกันก็ให้หยุด รอยตัด (cuts) ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับมิติระหว่างผิว 2 ผิวนั้น จะอยู่ภายในเส้นทาง (path)ที่ลากจากผิวทั้งสองจนบรรจบกัน

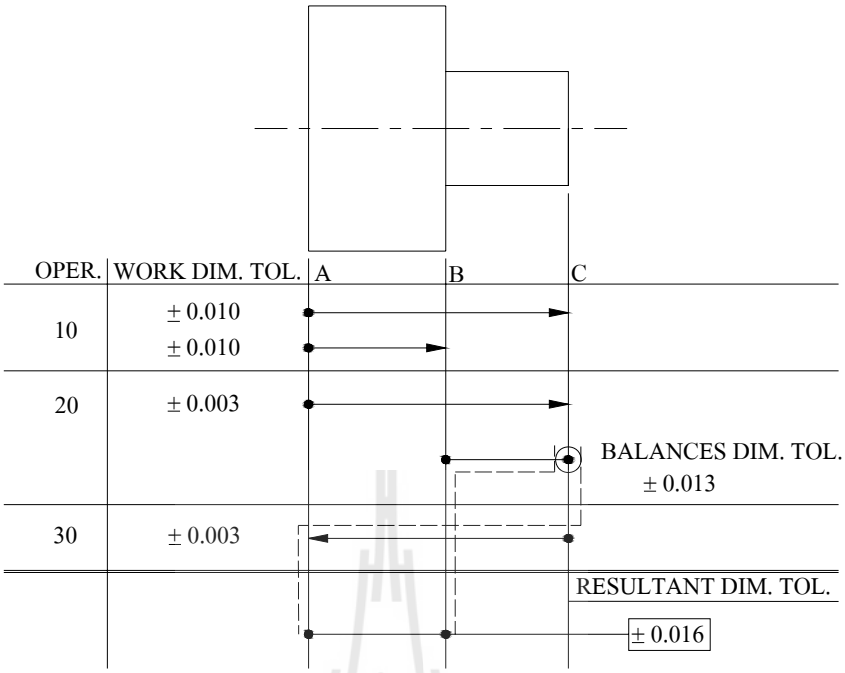


รูปที่ 2.3แสดงการคำนวณ resultants-dimensions tolerance. (Gadzala, 1959)

ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการทราบความคลาดเคลื่อนสะสมระหว่างผิว A และ B (รูปที่ 2.3) คือสัญลักษณ์ dot-to-dot เริ่มจากลากเส้นขึ้นบนจากทางขวาและซ้ายของสัญลักษณ์เมื่อพบหัวลูกศรแรกของworking dimension ให้ลากสวนทางกลับไปยังปลายอีกด้านของลูกศรจากนั้นลากเส้นขึ้นบนตามผิว C เมื่อพบหัวลูกศรทำเหมือนเดิม ทำทั้งสองด้านของสัญลักษณ์dot-to-dot และเมื่อเส้นที่ลากจากทั้งสองด้านมาบรรจบกันที่เส้นแนวดิ่งเดียวกัน จะได้เป็นแผนภาพวงรอบ (loop diagram)จากนั้นนำความคลาดเคลื่อนของ working dimension ทุกมิติที่เกี่ยวข้องมารวมกันตามหลักสมการวงรอบ จะได้เป็นความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติที่ต้องการคำนวณนั้น ๆ

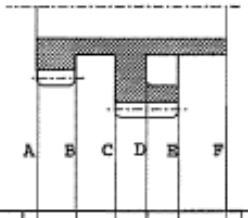
2.2.2 การคำนวณด้วย Balance Dimensions

O.R. Wade(1967)ใช้ Balance Dimensions ช่วยในการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน Balance Dimensionsในแผนภูมิจะมีสัญลักษณ์เป็น dot-to-dot(รูปที่ 2.4) จะเห็นได้ว่า Balance Dimensionsเป็นมิติที่สร้างเพิ่มขึ้นมาใหม่ จากมิติของรอยตัด 2 รอยตัดในแผนภูมิการสร้าง Balance Dimensionsมีเป้าหมายเพื่อต้องการหามิติของขนาดที่เป็นผลจากการตัดโลหะที่ผ่านมา



รูปที่ 2.4แสดงการคำนวณ resultants-dimensions tolerance ด้วยBalance dimensions

ตัวอย่างเช่น Balance Dimension ระหว่างผิว B และ C ในรูปที่ 2.4 เป็นมิติที่เกิดจากการตัดของ 2 มิติ ในขั้นตอน 10 (OPER.10) สามารถคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมได้เป็น ± (0.010 + 0.003) = ±0.013หรือถ้าต้องการทราบความคลาดเคลื่อนสะสมระหว่างผิว A และ B จะเกิดจาก Balance Dimensions ระหว่างผิว B และ C กับขั้นตอน 30 ซึ่งจะได้ผลการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมเท่ากันการคำนวณโดยใช้วิธีการแกะรอย (Method ofTraces)



1	2	3	4	5	6	7	8
CUT NO.	OPER. NO.	FACE CUT	MACHINE	WORKING DIM. BASIC	WORKING DIM. +/-TOL.	STOCK REMOVAL BASIC	STOCK REMOVAL +/-TOL.
0		A			0		
1		B		42.17	0.762	stock	
2		C		5.68	0.381	stock	
3		E		29.39	0.761	stock	
4	1	F1	Au.lathe	39.73	0.381	2.44	1.143
5	"	E1	"	7.46	0.076	2.80	1.600
6	2	A1	Au.lathe	30.77	0.076	1.50	0.533
7	"	C1	"	24.05	0.076	2.54	0.914
8	"	C2	"	21.65	0.076	2.40	0.152
9	3	A2	I.D Grd.	30.64	0.051	0.13	0.127
10	4	F2	S. Grd.	37.95	0.051	0.15	0.178
11	14	C3	Turret L.	19.25	0.076	2.40	0.152
12	"	A3	"	8.99	0.076	2.40	0.203
13	"	B	"	2.20	0.076	solid cut	
14	15	F3	Turret L.	24.16	0.051	2.40	0.229
15	"	D	"	6.80	0.102	solid cut	
16	16	C4	I.D Grd.	19.05	0.051	0.20	0.127
17	"	A4	"	8.94	0.025	0.25	0.228
18	26	F4	S. Grd.	32.70	0.102	0.20	0.305
19	27	A5	S. Grd.	32.50	0.076	0.20	0.178
				BLUEPRINT		RESULTANTS	
				19.05	0.254	19.05	0.051
				6.60	0.254	6.60	0.229
				8.74	0.254	8.74	0.203
				2.40	0.254	2.40	0.203
				32.50	0.254	32.50	0.076

รูปที่ 2.5แผนภูมิความคลาดเคลื่อนในชิ้นงานเกียร์(Sermsuti-anuwat และคณะ,1995)

2.2.3 การคำนวณโดยใช้เทคนิคกราฟต้นไม้ (Rooted-tree graph)

Whybrewและคณะ (1990) ได้พัฒนากราฟต้นไม้ (rooted-tree graph) สำหรับช่วยคำนวณในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ข้อแตกต่างของการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมแบบนี้จากวิธีการอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้วก็คือ มีคอลัมน์ของสัญลักษณ์แทนผิวที่เกิดจากการตัด (CUT FACE)ขึ้นอีกคอลัมน์หนึ่ง เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผิวที่เกิดจากการตัดซ้ำ หมายความว่าถ้าผิวใดผิวหนึ่งถูกตัดครั้งแรกแทนด้วย A เมื่อผิวดังกล่าวถูกตัดครั้งที่ 2 จะเป็นผิว A1 และครั้งที่ 3 จะเป็น A2 เป็นต้น

ในที่นี้จะใช้ลำดับการตัดโลหะในรูปที่ 2.5 เป็นพื้นฐานในการสร้างกราฟต้นไม้และคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมและขนาดมูลฐานของ working dimensions

จากรูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการตัดโลหะที่เรียกว่า แผนภูมิความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นขั้นตอนชิ้นงานตามขั้นตอนดังนี้

Line # 1: face F is defined relative to locating face A

Line # 2: face C is defined relative to face A

Line # 3: face E is defined relative to face C

Line # 4: face Fl is defined relative to face A

Line # 5: face El is defined relative to face Fl

Line # 6: face Al is defined relative to face El

Line # 7: face Cl is defined relative to face El

Line # 8: face C2 is defined relative to faceE1

Line # 9: face A2 is defined relative to face El

Line # 10: face F2 is defined relative to face A2

Line # 11: face C3 is defined relative to face El

Line # 12: face A3 is defined relative to face C3

Line # 13: face B is defined relative to face C3

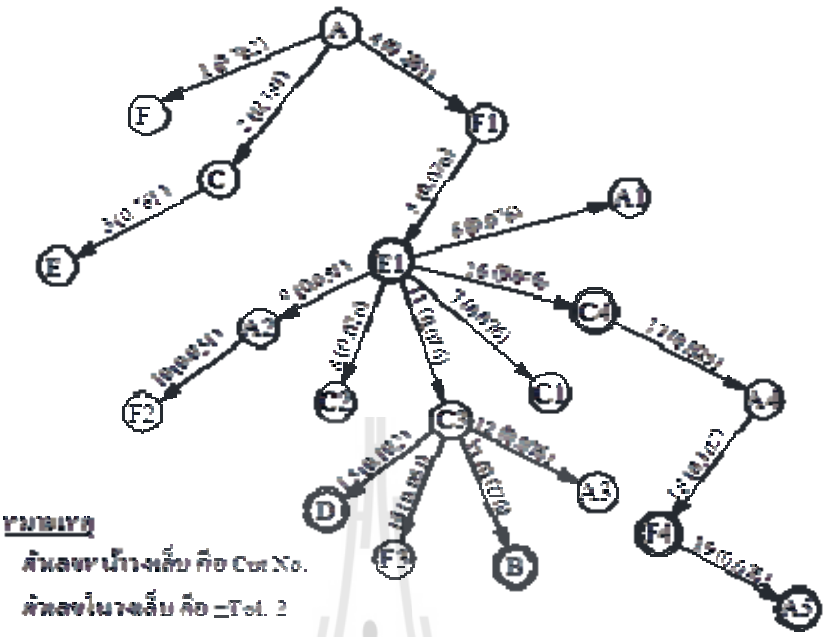
Line # 14: face F3 is defined relative to face C3

Line # 15: face D is defined relative to face C3

Line # 16: face C4 is defined relative to face El

Line # 17: face A4 is defined relative to face C4

จากขั้นตอนการตัดชิ้นงานดังกล่าว เป็นขั้นตอนที่เขียนแสดงการอ้างอิง และการตัดเป็นชื่อผิวของชิ้นงานที่ได้กำหนดไว้ สามารถพิจารณาขั้นตอนทั้งหมดและสรุปความสัมพันธ์ที่ถูกตัดและผิวที่เป็นจุดอ้างอิงได้ดังสัญลักษณ์ที่แสดงในส่วนกลางของแผนภูมิในรูปที่ 2.5จะเห็นว่าชื่อผิวตัดชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนจะถูกเขียนแทนด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์และมีตัวเลขแสดงลำดับการตัดกำกับอยู่ด้านหลัง โดยตัวเลขจะเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการตัดซ้ำ เช่น ผิวF โดนตัดครั้งแรกเป็นผิว F (Line1) ถ้าถูกตัดซ้ำ เป็นผิว F1 (Line 4)เป็นต้น จากขั้นตอนดังกล่าวสามารถเขียนเป็นกราฟต้นไม้ได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6กราฟต้นไม้ (Sermsuti-anuwat และคณะ,1995)

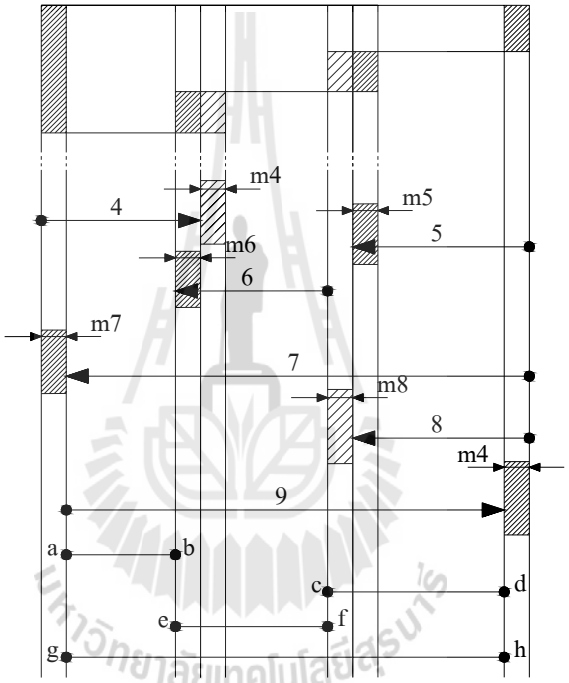
จากกราฟต้นไม้ในรูปที่ 2.6จะสามารถหาเส้นทาง (path) ระหว่างผิวตัดของชิ้นงาน (node) หนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่ง เป็นความสัมพันธ์ระหว่างผิวที่สามารถนำไปหาขนาดและความคลาดเคลื่อนของผิวชิ้นงานได้ เช่น การคำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างผิวตัดสุดท้ายของแต่ละผิวชิ้นงาน เช่น จากผิว B กับผิว C4(ซึ่งเป็นผิวสุดท้ายของการตัดชิ้นงาน) จะมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับผลรวมของความคลาดเคลื่อนของการตัดที่อยู่ในเส้นทางระหว่างผิว B และผิว C4(ดังรูปที่ 2.6) นั่นคือ ผลรวมของความคลาดเคลื่อนของ B -C3(cut 11), C3 - E1 (cut 13) และ E1 - C4(cut16) เท่ากับ± (0.076 + 0.076 + 0.076) = ± 0.228 mm ซึ่งจะได้เป็นความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติ นอกจากนี้กราฟต้นไม้ยังสามารถหาความคลาดเคลื่อนของเนื้อชิ้นงานที่จะโดยตัดออก (stock removal) ในแต่ละขั้นตอน และขนาดของการตัดชิ้นงานที่จะเกิดการตัดในแต่ละขั้นตอน (working dimension)

1). การคำนวณความคลาดเคลื่อนของ stock removal

ความคลาดเคลื่อนของ stock removal ใน Cut 7 สามารถคำนวณได้จากการผลรวมของความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในเส้นทางของผิวที่โดนตัดใหม่ (C1) กับผิวก่อนหน้า (C) ซึ่งจะดูได้จากรูปที่ 2.6จะได้เป็นผลรวมของ cut 2, 4, 5 และ 7หรือสามารถคำนวณได้ดังนี้± (0.381+ 0.381+ 0.076 + 0.076) = ± 0.914 mm

2). การคำนวณขนาดของ working dimension

ขนาดมูลฐานของการตัดชิ้นงาแต่ละในแต่ละขั้นตอน (working dimension) สามารถคำนวณได้จากแผนภูมิความคลาดเคลื่อน โดยคำนวณย้อนกลับจากค่าขนาดสุดท้ายหรือขนาดมูลฐานที่ได้จากแบบชิ้นงานที่ต้องการผลิต(finished part dimensions)ได้เป็นขนาดมูลฐานของชิ้นงานก่อนการตัด (raw stock dimensions)ซึ่งวิธีการนี้จะเริ่มจากขนาดจากแบบชิ้นงาน (drawing dimensions) ที่ทราบค่า นำไปหา working dimensions ที่ยังไม่ทราบค่า โดยการบวกเข้าหรือลบออกของเนื้อชิ้นงานที่กำหนดให้โดนตัดออกไป (basic of stock removal)ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7แสดงวิธีการคำนวณ working dimensions (Sermsuti-anuwat และคณะ,1995)

จากรูปที่ 2.7การคำนวณ working dimensions ของ การตัดชิ้นงานขั้นตอนที่ 4, 5, และ 6 (cut 4, 5 and 6) สามารถคำนวณได้ดังนี้

cut 4 = (ab + m6 + m7)

cut 5 = (cd + m8 + m9)

cut 6 = (ef + m8)

ซึ่งจากรูปขนาด ab cd และef คือ ขนาดจากแบบชิ้นงาน และ m6, m7, m8 และ m9 คือ เนื้องานที่โดนตัดออกไปของ ขั้นตอนการตัดที่ 6, 7, 8 และ 9ตามลำดับ

2.3 สรุป

การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนทำได้หลายวิธี ทำให้รูปแบบของแผนภูมิแตกต่างกันบ้าง แต่องค์ประกอบหลักของแผนภูมิเหมือนกันคือ ประกอบด้วย:- ภาพสเกตซ์ของชิ้นงานสำเร็จ; รายละเอียดของเครื่องมือกลที่ใช้และเงื่อนไขในการตัดแต่ละครั้ง; ลำดับการตัดโลหะ โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์แทนผิวที่ถูกตัดด้วยหัวลูกศรและผิวอ้างอิงด้วยจุด (dot); ขนาดมูลฐานและความคลาดเคลื่อนสำหรับการตัดโลหะแต่ละครั้ง; และส่วนที่แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิ (resultant dimensions) และข้อกำหนดในแบบ (blueprint dimensions) ซึ่งจากหลักการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมที่แตกต่างกันนั้น จะเห็นว่า เทคนิคการใช้กราฟต้นไม้ (Rooted-tree graph) เป็นเทคนิคสามารถคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (stock of tolerances) และขนาดมูลฐานของชิ้นงานก่อนการตัด (raw stock dimensions) ได้อย่างเป็นระบบและไม่ซับซ้อนสามารถสร้างเป็นวิธีการดำเนินบนคอมพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดี

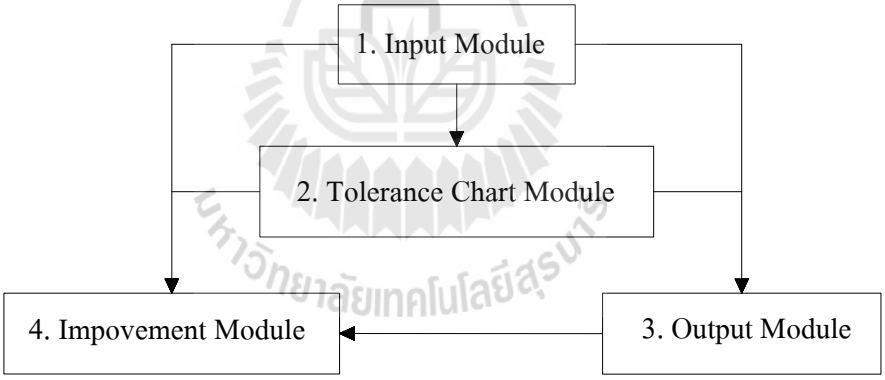
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
โครงสร้างโปรแกรม

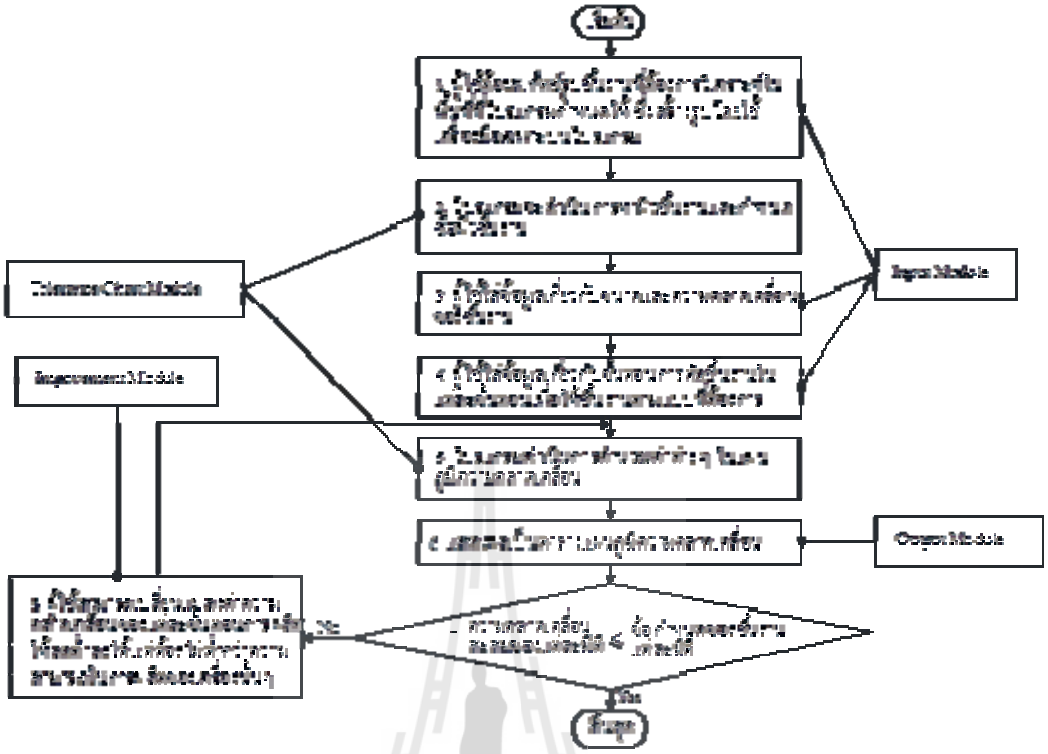
โปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Tolerance Charting Program) ที่พัฒนาขึ้นเป็นการสร้างสมุดงาน (workbook) ในโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (microsoft excel) โดยใช้มาโคร (macro)และวิชวลเบสิคหรือ VBA(Visual Basic for Applications) สำหรับเขียนคำสั่งการคำนวณต่าง ๆ ในโปรแกรมหรือในโมดูลย่อยติดต่อกับผู้ใช้ (user interface)

3.1 องค์ประกอบของโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

โปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนมีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน หรือ 4 โมดูล ซึ่งแต่ละส่วนมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกันแสดงดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบหลักของโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 3.2แผนภาพ (Flowchart) แสดงหน้าที่ของแต่ละส่วนของโปรแกรม

3.2 โมดูลรับข้อมูล(input module)

ในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนนั้นผู้ใช้งานโปรแกรมต้องมีข้อมูลเบื้องต้น สำหรับใช้ให้การสร้างแผนภูมิ ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นนั้น คือ แบบของชิ้นงาน และขั้นตอนการผลิตชิ้นงานซึ่งผู้ใช้ต้องสามารถวาดรูปชิ้นงานและเขียนลำดับการผลิตในรูปของสัญลักษณ์ (ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2)ลงในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนได้โมดูลรับข้อมูลทำหน้าที่ รับข้อมูลต่าง ๆ ที่ผู้ใช้โปรแกรมป้อนให้กับโปรแกรมและเก็บบันทึกไว้ในฐานข้อมูลเพื่อส่งต่อในกับโมดูลอื่นๆ (ดังรูปที่ 3.1) เพื่อใช้ในประมวลผลและแสดงผลต่อไปโมดูลการรับข้อมูล ประกอบด้วย 3 โมดูลย่อย (ดังรูปที่ 3.2 กรอบที่ 1, 3 และ 4) คือ

1.) โมดูลรับข้อมูลรูปภาพชิ้นงาน
2.) โมดูลรับข้อมูลขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน
3.) โมดูลรับข้อมูลลำดับการผลิตชิ้นงาน

แต่ละโมดูลเป็นกระดาษงาน (worksheet) ที่สร้างขึ้นเพื่อรับข้อมูลสำคัญในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

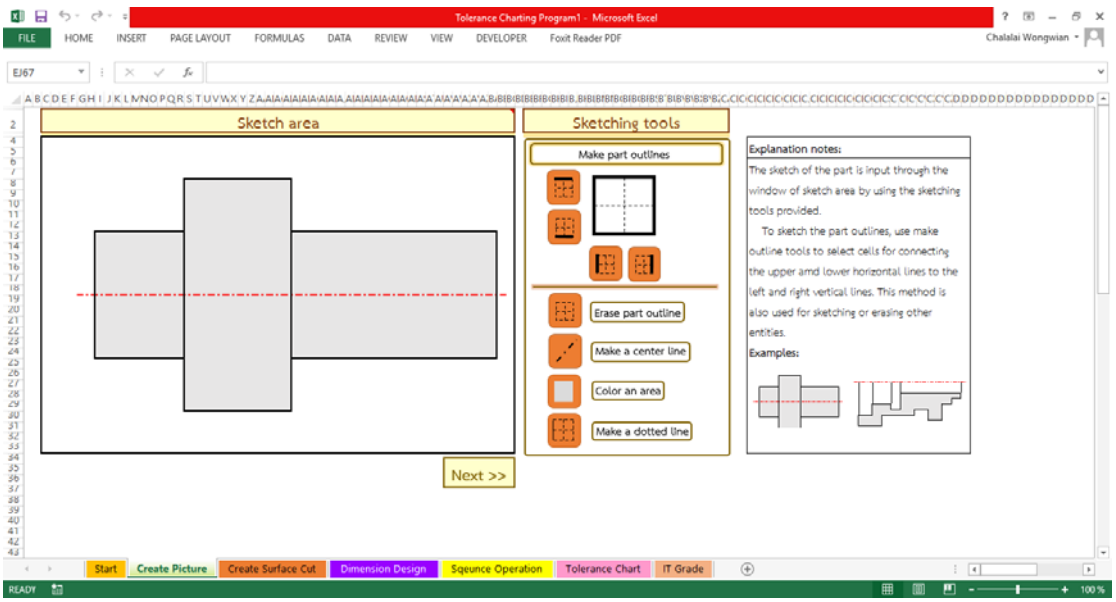
รูปที่ 3.3 หน้าจอสำหรับสเก็ตซ์รูป

3.2.1 โมดูลรับข้อมูลรูปภาพชิ้นงาน

การสเกตซ์ภาพชิ้นงานเป็นส่วนแรกในการทำงานของโปรแกรม (รูปที่ 3.2 กรอบที่ 1)เพื่อใช้ภาพชิ้นงานสำหรับประมวลผลเพื่อกำหนดผิวของชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์และแสดงในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนซึ่งโปรแกรมจะต้องสามารถทราบตำแหน่งของผิวชิ้นงานแต่ละผิวที่ทำการตัดโลหะตามขั้นตอนการผลิตที่ต้องการพิจารณา ด้วยเหตุนี้ โมดูลนี้เป็นกระดาษงาน (worksheet) แผ่นหนึ่งที่ชื่อว่า “Create Picture”ในรูปที่ 3.3ซึ่งถูกออกแบบและสร้างคำสั่งโดยมีพื้นที่สำหรับสเกตซ์รูปของชิ้นงานและเครื่องมือที่บันทึกคำสั่งสำหรับสเกตซ์รูปของชิ้นงาน เพื่อใช้สำหรับแสดงในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนโดยเฉพาะดังในรูปที่ 3.4 เป็นตัวอย่างภาพชิ้นงานที่ผู้ใช้สเกตซ์ขึ้นโดยใช้เครื่องมือในกระดาษนี้

ในการสร้างพื้นที่สำหรับรับรูปชิ้นงาน โปรแกรมสร้างพื้นที่ให้สามารถรับรูปชิ้นงานที่มีจำนวนผิวตัดในแนวดิ่งได้มากถึง 50 ผิว โดยโปรแกรมมีข้อกำหนด ให้เส้นขอบเซลล์ 1 เส้นเป็น1 ผิวตัด โดยผู้ใช้โปรแกรมต้องสเกตซ์ผิวชิ้นงานตามผิวที่จะเกิดการตัดในแต่ละครั้ง (ถ้าตัดไม่พร้อมกันต้องสเกตซ์เป็นคนละผิวในแนวดิ่ง หรือถ้าผิว 2 ผิวอยู่ตรงกันในแนวดิ่ง แต่ตัดไม่พร้อมกันก็ต้องเยื่องผิวทั้งสองด้วย)

เครื่องมือที่สำหรับสเกตซ์รูปชิ้นงาน มีทั้งหมด 8ชนิดดังที่ได้แสดงในตารางที่ 3.1 โดยตารางประกอบด้วย หน้าที่และสัญลักษณ์ที่ใช้ในการสร้างเป็นกดคำสั่งสำหรับสเกตซ์ภาพชิ้นงาน ซึ่งแต่ละเครื่องมือจะมีลักษณะการสั่งงานให้วาดเส้นที่ต่างกับคำสั่งที่ในไมโครซอฟต์เอ็กเซลที่มีให้ใช้งานอยู่แล้วเนื่องจากเครื่องมือในโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนมีคำสั่งการเปลี่ยนสีพื้นหลังเพิ่มเข้าไปเพื่อใช้สำหรับตรวจหาเนื้อของชิ้นงานในการประมวลผลในโมดูลต่อไป

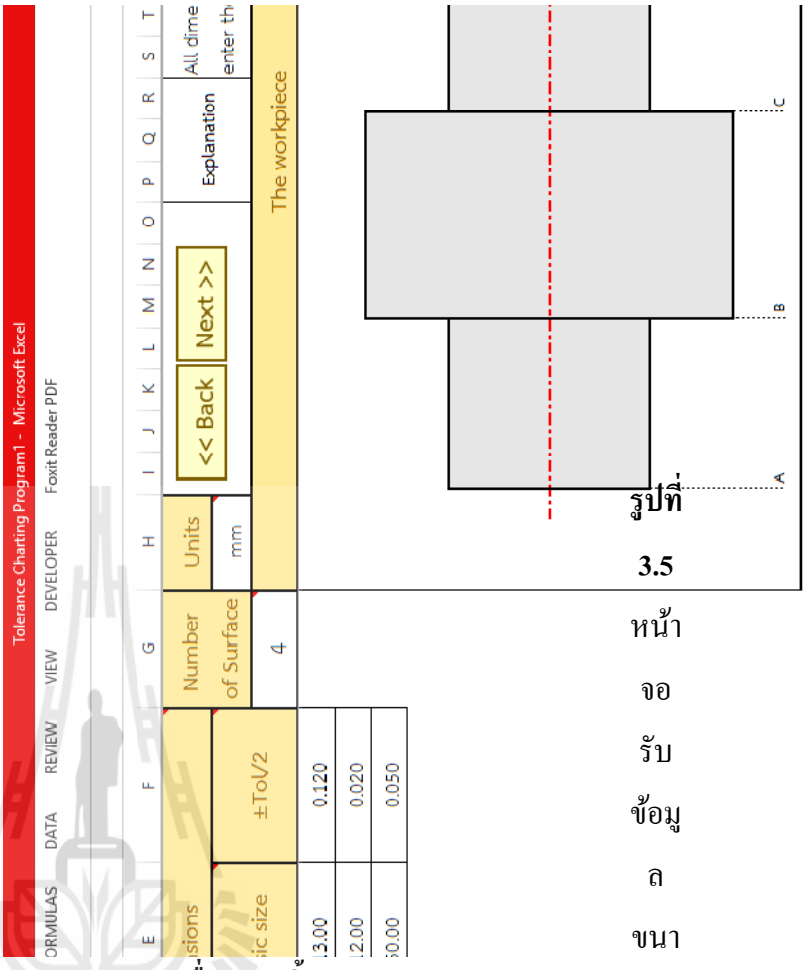


รูปที่ 3.4ตัวอย่างภาพชิ้นงานที่ผู้ใช้สเก็ตซ์ขึ้น

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงเครื่องมือสำหรับสเกตซ์ภาพชิ้นงาน

ลำดับ	เครื่องมือ		
	ชนิด	สัญลักษณ์	หน้าที่
1	วาดเส้นขอบซ้าย(left border)		วาดเส้นขอบซ้ายพื้นของที่เซลล์ที่เลือก
2	วาดเส้นขอบขวา(right border)		วาดเส้นขอบขวาของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
3	วาดเส้นขอบล่าง(bottom border)		วาดเส้นกรอบล่างของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
4	วาดเส้นขอบบน(top border)		วาดเส้นขอบบนของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
5	ลบเส้นขอบ(no border)		ลบเส้นขอบของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
6	วาด center line กรอบล่าง (bottom border of cells)		วาดเส้น center line ที่ขอบล่างของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
7	วาดเส้นบางกรอบล่าง (bottom border of cells)		วาดเส้นบางที่ขอบล่างของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
8	เติมสีเนื้อชิ้นงาน		เติมเต็มสีเนื้อในการชิ้นงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.5 หน้าจอรับข้อมูลขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน

3.2.2 โมดูลรับข้อมูลขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน

จากการสเกตช์รูปชิ้นงาน ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องการชื่อผิวตัดของชิ้นงาน ให้เป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ ตามลำดับ จากซ้ายมือไปขวามือของรูปชิ้นงาน โปรแกรมจะทำหน้าที่ตรวจสอบผิวและกำหนดชื่อ

โมดูลที่ใช้รับข้อมูลขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานเป็นกระดาษงานแผ่นหนึ่งที่ใช้ชื่อว่า “Dimension Design”ในรูปที่ 3.5 ซึ่งถูกออกแบบเป็นตาราง ไว้สำหรับรับข้อมูลเกี่ยวข้องขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานตามตารางที่กำหนด

การกรอกข้อมูลในโมดูลการรับข้อมูลนี้ โปรแกรมออกแบบให้ผู้ใช้สามารถพิมพ์ชื่อผิวชิ้นงาน (เฉพาะตัวอักษรพิมพ์ใหญ่) หรือเลือกชื่อผิวตัดชิ้นงานจากในช่องตารางที่โปรแกรมกำหนดให้ โปรแกรมได้กำหนดจำนวนมิติ (dimensions) ที่ผู้ใช้ต้องกรอกข้อมูล ตามจำนวนผิวตัดชิ้นงานที่โปรแกรมได้ตรวจสอบพบก่อนหน้านี้ คือ

จำนวนมิติของชิ้นงาน เท่ากับ จำนวนผิวของชิ้นงานที่ถูกตัด -1

การสั่งงานในกระดาษงานเป็นการสร้างโมดูลย่อย ด้วย VBA เพื่อใช้งานเครื่องมือ (object) ในไมโครซอฟต์เอ็กเซลหรือสั่งงานโปรแกรมให้ทำงานตามขั้นตอนที่กำหนด เริ่มจาก

โมดูลสำหรับการสร้างตารางรับข้อมูลตามจำนวนมิติที่ผู้ใช้ต้องการ และโมดูลในการช่วยในการกรอกข้อมูลของผู้ใช้ ซึ่งอาศัยคำสั่งของโปรแกรมควบคุมเครื่องมือ data validation ในไมโครซอฟต์เอ็กเซล

3.2.3 โมดูลรับข้อมูลลำดับการผลิตชิ้นงาน

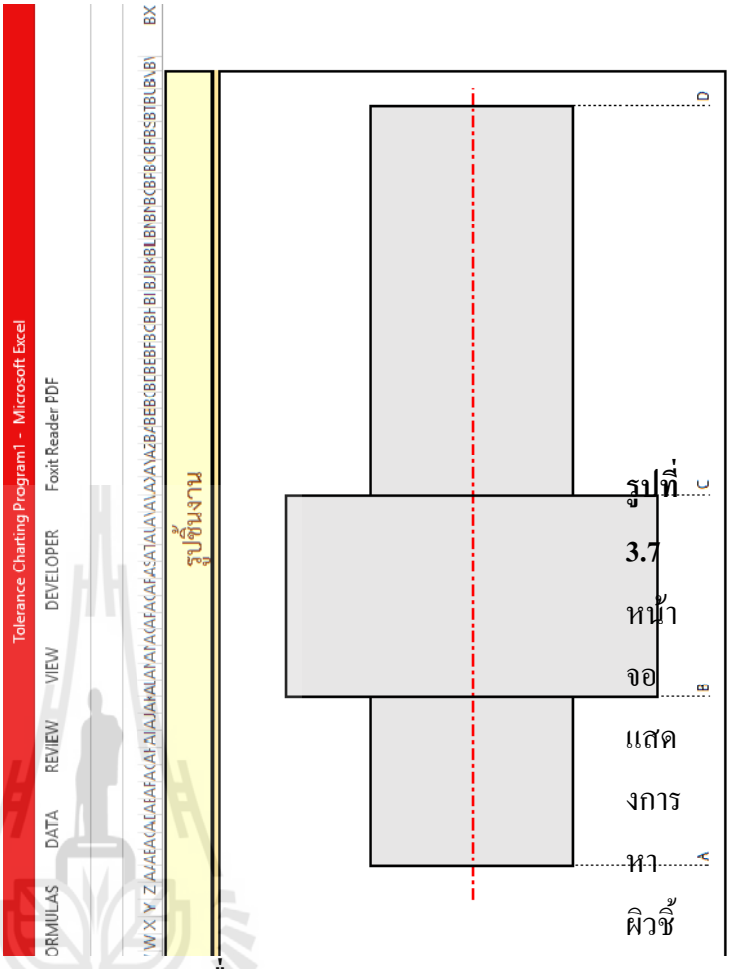
การป้อนลำดับการตัดชิ้นงาน (machiningsequence) ผู้ใช้โปรแกรมจะต้องป้อนข้อมูลจำนวนของการตัดโลหะ (numbers of sequenceoperation)ที่เกิดขึ้นในการตัดทั้งหมด จากนั้นป้อนข้อมูลรายละเอียดของการตัดแต่ละรอยตัด (cut)โมดูลจะสร้างกระดาษงานแผ่นชื่อว่า “Sequence Operation” ซึ่งถูกออกแบบเป็นตารางไว้ (รูปที่ 3.6) สำหรับรับข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวข้องลำดับการผลิตชิ้นงานและมีส่วนประกอบคือ :-

- ตัวเลขแสดงลำดับการตัด (operation numbers)
- ชนิดของเครื่องจักรที่ใช้ผลิต (machine used) หรือครึ่งหนึ่งความความเคลื่อนของการบวนการผลิต ((± tolerance of working dimension) /2) ในแต่ละขั้นตอน
- ผิวอ้างอิงในการตัด (reference cut)
- ผิวตัดในแต่ละครั้ง(face cut)

ในการกรอกข้อมูลผิวของชิ้นงาน โปรแกรมจะขึ้นแถบเครื่องมือสำหรับให้ผู้ใช้เลือกชื่อผิวชิ้นงานตามที่โปรแกรมกำหนดชื่อไว้และ(เช่นเดิม) อาศัยเครื่องมือป้องกันการกรอกข้อมูลผิด (data validation) ช่วยในผู้ใช้โปรแกรมสามารถกรอกข้อมูลลงในตารางได้รวดเร็วและถูกต้อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.6 หน้าจอสำหรับรับข้อมูลลำดับการ



รูปที่ 3.7 หน้าจอแสดงการหาผิวชิ้นงาน

3.3 โมดูลการคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน(tolerance chartcalculation module)

โมดูลนี้อ่านข้อมูลจากโมดูลรับข้อมูล จากนั้นจึงประมวลผลข้อมูลให้เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณตามหลักการของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน โปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนเป็นการสร้างและคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อนโดยอาศัยกราฟต้นไม้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผิวตัด และคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน แต่นอกจากการคำนวณค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน โมดูลนี้ทำหน้าที่ตรวจหาผิวตัดชิ้นงานในรูปชิ้นงานที่ผู้ใช้โปรแกรมสเก็ตซ์ขึ้นจากโมดูลก่อนหน้า ประกอบด้วย 2 โมดูลย่อย ดังนี้

3.3.1 โมดูลย่อยการหาผิวชิ้นงานและกำหนดชื่อผิวชิ้นงาน

โมดูลนี้ทำหน้าตรวจสอบหาผิวชิ้นงานทั้งหมดที่ผู้ใช้สเก็ตซ์ขึ้น จากนั้นกำหนดชื่อให้แต่ละผิว ตามหลักการที่ใช้ในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน โปรแกรมจะตรวจหาผิวชิ้นงานเฉพาะผิวในแนวดิ่งหรือผิวที่มีมิติในแนวราบ (horizontal dimension)แล้วกำหนดชื่อให้

แต่ละผิวชิ้นงาน ตามลำดับ เมื่อตรวจสอบสำเร็จ จะแสดงผลชิ้นงานที่กำหนดผิวชิ้นแล้วในกระดาษงานที่ชื่อว่า “Create Surface Cut” ดังในรูปที่ 3.7

3.3.2 โมดูลการคำนวณตามหลักแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

โมดูลนี้เป็นโมดูลหลักของการคำนวณในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน เพราะเป็นโมดูลที่รวมโมดูลย่อยต่าง ๆ ในการสร้างและการคำนวณค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนไว้ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยโมดูลย่อย10 โมดูลแต่ละโมดูลมีความสัมพันธ์กัน ดังรูปที่ 3.8และทำหน้าที่ดังนี้:-

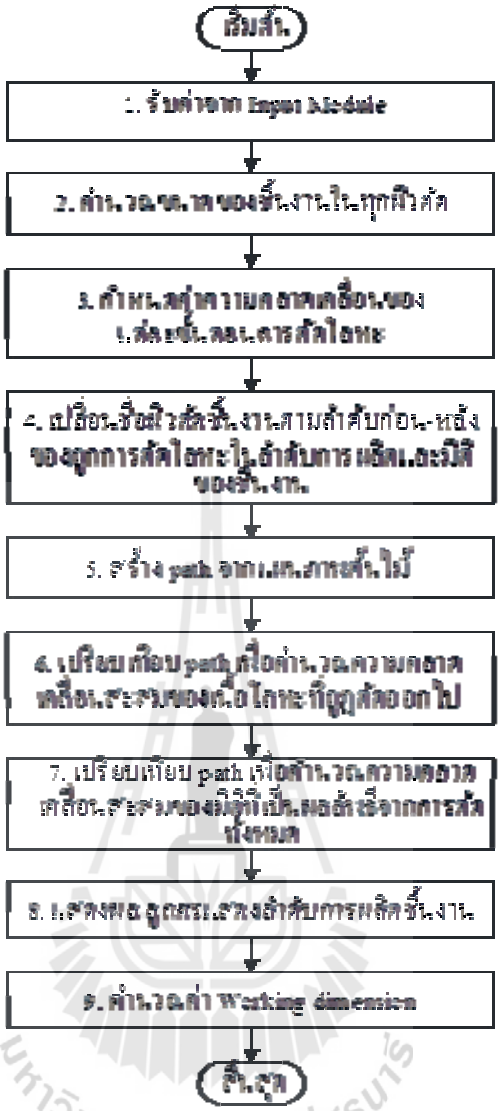
<u>กรอบที่ 1</u> รับค่าจาก input module

เป็นโมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่สร้างฐานข้อมูล (ประกาศตัวแปร) และอ่านค่าที่อยู่ในเซลล์จากส่วนรับข้อมูลทั้งหมดไปเก็บในตัวแปรในฐานข้อมูลของโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ข้อมูลเหล่านี้ใช้สำหรับคำนวณค่าในขั้นตอนต่อไป

<u>กรอบที่ 2</u> คำนวณขนาดของชิ้นงานในทุกผิวตัด

เป็นโมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่คำนวณขนาดมูลฐานทั้งหมดของชิ้นงานจากขนาดมูลฐานของมิติที่ผู้ใช้ป้อน โดยใช้หลักการของแผนภาพวงรอบ loop diagram)ในการคำนวณ (เป็นการคำนวณมิติชิ้นงานที่ยังไม่ทราบค่าจากมิติที่ผู้ใช้ป้อน)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.8 แผนผังการทำงานของโมดูลคำนวณตามหลักแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

<u>กรอบที่ 3</u>กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะ

เป็นโมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่ในการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนให้กับแต่ละขั้นตอนการตัดตามที่ผู้ใช้กำหนดหรือตามชนิดของเครื่องจักรที่ใช้ผลิต โดยกำหนดตามค่าในตารางที่แสดงค่าของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (ตาราง IT) โปรแกรมเลือกใช้ตัวเลข IT ที่ต่ำสุดที่สุดที่เครื่องจักสามารถทำงาน เนื่องจากโปรแกรมต้องการลดโอกาสในการเกิดปัญหาความคลาดเคลื่อนสะสมกับลำดับการผลิตที่ต้องการวิเคราะห์

กรอบที่ 4เปลี่ยนชื่อผิวตัดชิ้นงานตามลำดับก่อน-หลังของถูกการตัดโลหะในลำดับการผลิตชิ้นงานและในมิติของชิ้นงาน

เป็นโมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนชื่อผิวตัดชิ้นงานตามลำดับก่อน-หลังของถูกการตัดโลหะซึ่งหลักการในการใช้แผนภาพต้นไม้สร้างความสัมพันธ์ของผิวชิ้นงานในการตัดชิ้นงานตามลำดับก่อน-หลังที่เกิดขึ้น จึงต้องทำการเปลี่ยนชื่อผิวตัดชิ้นงานตามลำดับการตัดชิ้นงาน โดยการใส่ตัวเลขต่อท้ายชื่อผิวชิ้นงาน แสดงให้เห็นถึงลำดับการตัดทีเกิดขึ้น เช่น ผิว A ถูกตัดครั้งแรกจะเป็นผิว A0 ถูกตัดซ้ำอีกจะเป็นผิว A1, A2 ตามลำดับโมดูลย่อยนี้จะเป็นเปลี่ยนชื่อผิวให้กับลำดับการผลิตชิ้นงาน

จากนั้นโมดูลนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนชื่อผิวตัดชิ้นงานตามลำดับก่อน-หลังของถูกการตัดโลหะ ของมิติของชิ้นงาน ซึ่งชื่อผิวในมิติชิ้นงานจะเป็นผิวสุดท้ายที่เกิดจากการตัดชิ้นงานตามลำดับการผลิตแล้ว ด้วยเหตุนี้การเปลี่ยนชื่อผิวในมิติชิ้นงานจะเป็นชื่อผิวตัดสุดท้าย และชื่อผิวนี้จะถูกใช้ในการพิจารณาจากความสัมพันธ์ในแผนภาพต้นไม้ จะได้เป็นความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดกับมิตินั้น

กรอบที่ 5 สร้าง path จากแผนภาพต้นไม้

เป็นโมดูลนี้ทำหน้าที่สร้างเส้นทางความสัมพันธ์ (path)จากแผนภาพต้นไม้ในการใช้แผนภาพต้นไม้ในการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของผิวตัดชิ้นงานตามลำดับการตัด สามารถเขียนโดยpathของทุกผิวตัด ซึ่งเส้นทางนี้จะแสดงชื่อผิวตัดที่เชื่องโยงกับผิวตัดนั้น ๆ ไปยังผิวแรก

กรอบที่ 6 เปรียบเทียบpathเพื่อคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไป

เป็นโมดูลนี้ทำหน้าที่คำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไปในแต่ละครั้งโดยการเปรียบเทียบ path หรือนำ path2 เส้นซ้อนทับกัน ซึ่งการเปรียบเทียบ path เป็นหาผิวตัดที่มีความสัมพันธ์ระหว่างผิวที่ต้องการ2 ผิว ซึ่งเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไปคือเส้นทางที่ประกอบผิวชิ้นงานที่เกี่ยวข้องจากผิวที่พิจารณาไปยังผิวตัดที่เกิดขึ้นก่อนหน้าเช่น พิจารณาที่ผิว A1 จะได้ความคลาดเคลื่อนสะสมของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไปจะสะสมอยู่ใน Path จาก A0 ถึง A1 เป็นต้นซึ่งจะได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนสะสม จากนั้นคำนวณขนาดมูลฐานของเนื้อโลหะที่จะถูกตัดออกไปในแต่ขั้นตอน

กรอบที่ 7 เปรียบเทียบ path เพื่อคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงานที่ต้องการพิจารณา

เป็นโมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่คำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงานโดยการเปรียบเทียบ pathเหมือนในกรอบที่6 แต่เป็นหาความสัมพันธ์ของผิว 2 ผิวที่เป็นมิติของชิ้นงาน

ได้เป็นความคลาดเคลื่อนสะสมในมิติของชิ้นงานเมื่อทำการผลิตตามลำดับการตัดชิ้นงานที่กำหนด ซึ่งค่านี้ใช้เปรียบเทียบกันความคลาดเคลื่อนในแบบชิ้นงานต่อไป

กรอบที่ 8 แสดงผลสัญลักษณ์ (ลูกศร) แสดงลำดับการผลิตชิ้นงาน

เป็นโมดูลนี้ทำหน้าที่ค้นหาว่าสัญลักษณ์ (ลูกศร) ของแต่ละรอยตัด ทำให้มิติที่ถูกตัดสั้นลงหรือยาวขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณขนาดมูลฐานของมิติใช้งาน (working dimensions) ที่เกิดในแต่ละขั้นตอน

กรอบที่ 9 คำนวณค่า working dimension

เป็นโมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่คำนวณค่าขนาดมูลฐานของมิติ (working dimensions) ในแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะซึ่งเริ่มต้นจากคู่ผิวของขนาดมูลฐานของข้อกำหนดในแบบ จากตอนล่างไปยังตอนบนของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

3.4 โมดูลแสดงข้อมูล(output module)

โมดูลนี้ทำหน้าที่แสดงผลข้อมูลใส่ในแต่ละเซลล์ในฟอร์มแผนภูมิความคลาดเคลื่อน โมดูลนี้มีความสัมพันธ์เชื่อมโยงกับ3 ส่วนของโปรแกรม คือ โมดูลรับข้อมูล โมดูลการคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อนและโมดูลแก้ไขแผนภูมิความคลาดเคลื่อน เนื่องจากส่วนนี้เพียงอ่านข้อมูลจากฐานข้อมูลของส่วนต่าง ๆ มาแสดงผลข้อมูลเท่านั้น

3.5 โมดูลแก้ไขแผนภูมิความคลาดเคลื่อน(improvement module)

เมื่อผู้ใช้ดำเนินการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนเสร็จตามขั้นตอนของโปรแกรม แล้วเป็นปัญหาความคลาดเคลื่อนสะสม หรือความคลาดเคลื่อนที่วิเคราะห์ได้เกินกว่าที่ต้องการ ผู้ใช้โปรแกรมสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ในแต่ละกระบวนที่เกี่ยวกับมิติของชิ้นงานที่เกิดปัญหา โดยโมดูลนี้ทำหน้าที่คำนวณและแสดงผลค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนใหม่อีกครั้ง

3.6 สรุป

ลำดับการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Tolerance Charting Program)ประกอบด้วย4 โมดูล คือโมดูลรับข้อมูล (input module) โมดูลการคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (tolerance chart module) โมดูลแสดงข้อมูล (output module)และโมดูลแก้ไขแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (improvement module) ซึ่งหัวใจการทำงานหลักของโปรแกรมอาศัยโมดูลที่สองทำหน้าที่แปลงข้อมูลทั้งหมดในโมดูลแรก ให้เป็นค่าต่าง ๆ ในแผนภูมิ และส่งผ่านข้อมูลที่ประมวลผลได้ให้กับโมดูลแสดงผล

บทที่ 4
โปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของโมดูลย่อย (sub module)ที่เป็นหลักของการทำงานของโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Tolerance Charting Program)ซึ่งประกอบด้วยคำอธิบายเกี่ยวกับชนิด ขนาด และหน้าที่ของตัวแปรที่ใช้และแสดง flow chart สำหรับลำดับการประมวลผลในแต่ละโมดูลเหล่านั้น

4.1 ตัวแปร

ในโปรแกรมมีขอบเขตการใช้งานอยู่2 ระดับ คือ

1. Module variable เป็นตัวแปรที่สามารถใช้ได้ภายในงาน (module) โดยประกาศตัวแปรภายนอกโมดูลย่อยดังตารางที่ 4.1 แสดงตัวแปรชนิดนี้ของโปรแกรม

2.Local variable เป็นตัวแปรใช้งานได้ภายในโมดูลย่อยเดียวกันที่ได้ประกาศตัวแปรเท่านั้น

ตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนนอกจากจะแตกต่างกันตามชนิดข้อมูล (data type) ใน VBA เช่น Integer, Single,String และVariantเป็นต้นแล้วยังมีตัวแปรชนิด “Dimension” ที่ผู้ใช้งานกำหนด (user-defined)องค์ประกอบขึ้นเองสามารถเก็บได้หลายชนิด เช่น SQIn() ประกอบด้วย

1.)SQIn().From เป็นตัวแปรเก็บข้อมูลประเภท String

2.)SQIn().To เป็นตัวแปรเก็บข้อมูลประเภท String

3.)SQIn().Basic เป็นตัวแปรเก็บข้อมูลประเภท Single

4.)SQIn().Tolerance เป็นตัวแปรเก็บข้อมูลประเภท Single

5.)SQIn().MC เป็นตัวแปรเก็บข้อมูลประเภท String

6.)SQIn().OpNเป็นตัวแปรเก็บข้อมูลประเภท Long

ในตารางที่ 4.1 แสดง Module variable ทั้งหมดและที่เป็น Dimension variable

ตารางที่ 4.1ตารางแสดงรายเอียดตัวแปรแบบ Module variable ที่ใช้ในโปรแกรม

ชื่อตัวแปร	ประเภท	ขนาด	หน้าที่ของตัวแปร
Nosque	integer	-	เก็บค่าจำนวนของขั้นตอนการตัดชิ้นงาน
NoSurf	integer	-	เก็บค่าจำนวนของผิวชิ้นงาน
Surf()	sting	อาร์เรย์ 1 มิติ (จำนวนผิวชิ้นงาน)	เก็บชื่อผิวชิ้นงาน
GenBP()	string	อาร์เรย์ 2 มิติ (จำนวนผิวชิ้นงาน x จำนวนผิวชิ้นงาน)	เก็บค่าของขนาดชิ้นงานในทุกผิว เป็นอาร์เรย์ของขนาดจากผิวหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่ง
NoNode()	integer	อาร์เรย์ 1 มิติ (จำนวนผิวชิ้นงาน)	เก็บค่าจำนวนครั้งที่แต่ละผิวถูกตัด
DirectionC()	integer	อาร์เรย์ 1 มิติ (จำนวนขั้นตอนการตัดชิ้นงาน)	เก็บค่าทิศทางในการถูกตัด
StockRB()	single	อาร์เรย์ 1 มิติ (จำนวนขั้นตอนการตัดชิ้นงาน)	เก็บค่าขนาดของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไป
Part()	string	อาร์เรย์ 1 มิติ (จำนวนขั้นตอนการตัดชิ้นงาน)	เก็บเส้นทางของชื่อผิว ที่ได้จากแผนภาพต้นไม้จากแต่ละผิวไปยังผิวแรกที่ตัด
TolBP()	string	อาร์เรย์ 1 มิติ (จำนวนมิติของชิ้นงาน)	เก็บค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของของแต่ละมิติที่แบบต้องการ

ตารางที่ 4.1ตารางแสดงรายเอียดตัวแปรแบบ Module variable ที่ใช้ในโปรแกรม (ต่อ)

ชื่อตัวแปร	ประเภท	ขนาด	หน้าที่ของตัวแปร
SQIn()	dimension	อาร์เรย์ 1 มิติมีขนาดเท่ากับจำนวนขั้นตอนการตัดชิ้นงาน	เก็บค่ารายละเอียดของการตัดชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนที่ผู้ใช้กรอกซึ่งประกอบด้วย ลำดับการผลิต (SQIn().OpN) ชื่อผิวอ้างอิง (SQIn().From) ชื่อผิวตัดชิ้นงาน (SQIn().To) ขนาดมูลฐาน (SQIn().Basic) ความคลาดเคลื่อน (SQIn().Tolerance) เครื่องจักรที่ใช้ผลิต (SQIn().MC)
SQInN()	dimension	อาร์เรย์ 1 มิติ มีขนาดเท่ากับจำนวนขั้นตอนการตัดชิ้นงาน	เก็บค่ารายละเอียดของการตัดชิ้นงานที่โปรแกรมคำนวณใหม่ ซึ่งประกอบด้วย ชื่อผิวอ้างอิง (SQInN().From) ชื่อผิวตัดชิ้นงาน (SQInN().To) ขนาดมูลฐานของ Working dimension (SQInN().Basic) ความคลาดเคลื่อนของWorking dimension(SQIn()N.Tolerance)
BP()	dimension	อาร์เรย์ 1 มิติ มีขนาดเท่ากับ จำนวนมิติของชิ้นงาน	เก็บค่ารายละเอียดของมิติชิ้นงานจากแบบชิ้นงานที่ผู้ใช้กรอก ซึ่งประกอบด้วย ชื่อผิวอ้างอิง (BP().From) ชื่อผิวที่ใช้วัด(BP().To) ขนาดมูลฐาน (BP().Basic) ความคลาดเคลื่อน (BP().Tolerance)
BPN()	dimension	อาร์เรย์ 1 มิติ มีขนาดเท่ากับ จำนวนมิติของชิ้นงาน	เก็บค่ารายละเอียดเกี่ยวกับมิติของชิ้นงานที่โปรแกรมคำนวณใหม่ ซึ่งประกอบด้วย ชื่อผิวอ้างอิง (BPN().From) ชื่อผิวที่ใช้วัด (BPN().To)

4.2 การป้อนข้อมูลให้กับโปรแกรม

ได้กล่าวมาแล้วว่าข้อมูลที่จำเป็นเบื้องต้นสำหรับสร้าง Tolerance Chart คือ ภาพสเก็ตซ์ของชิ้นงานตอนบนของแผนภูมิและรายละเอียดต่างๆทางด้านซ้ายมือของแผนภูมิ ดังนั้นการป้อนข้อมูลจึงประกอบด้วย โปรแกรมย่อยหลัก ๆ 2 ชุดคือ โมดูลย่อยสำหรับสร้างภาพชิ้นงาน (Create Picture) และโมดูลย่อยสำหรับรับข้อมูลอื่นๆ ด้วยการตอบ-โต้กับผู้ใช้ (user's interaction)ตาม flow chart ในรูปที่ 3.2

4.2.1 โมดูลย่อยสำหรับสร้างภาพชิ้นงาน

เป็นการป้อนข้อมูลที่ใช้เครื่องมือ(object) ในโปรแกรม ซึ่งเป็นหน้าจอสำหรับสร้างรูปชิ้นงาน เพื่อใช้ในการแสดงผลและพิจารณาการตัดที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน

โมดูลย่อยสำหรับวาดเส้นที่จำเป็นในสร้างชิ้นงาน ประกอบด้วย 8คำสั่ง ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 3 ซึ่งแต่ละคำสั่งจะการทำการวาดเส้นหรือลบเส้นในพื้นที่เซลล์ที่ผู้ใช้เลือกด้วยคำสั่งในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ (property)ของเซลล์ตามที่กำหนด ซึ่งคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงได้คือ

- กรอบของเซลล์ (border): สามารถกำหนด มีหรือไม่มีเส้นกรอบเซลล์ได้
- สีภายในเซลล์ (interiorcolor): ทำงานเปลี่ยนแปลงสีของพื้นที่ภายในเซลล์ตามที่กำหนด

4.2.2 โมดูลย่อยสำหรับรับข้อมูลในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

เป็นโมดูลย่อยสำหรับรับข้อมูลอื่นๆ นอกจากรูปชิ้นงานที่จำเป็นในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนประกอบด้วยสมุดงานสำหรับป้อนข้อมูล 3 สมุดงาน (ในบทที่ 3) แต่ละสมุดงานมีโมดูลย่อยในการทำงานแบ่งเป็น 2 หน้าที่ คือโมดูลย่อยในตรวจสอบจำนวนผิวชิ้นงานและกำหนดชื่อและโมดูลย่อยสำหรับสร้างตารางรับข้อมูล ดังนี้

1. โมดูลย่อยสำหรับตรวจสอบจำนวนผิวชิ้นงานและกำหนดชื่อ

โมดูลย่อยนี้จะทำหน้าที่ตรวจจำนวนผิวชิ้นงานและกำหนดชื่อผิวชิ้นงานเพื่อให้ประมวลผลอื่น ในขั้นตอนต่อไป

<u>ตัวแปรในโมดูลย่อย</u>

- rng, D(j)และS เป็นตัวแปรเก็บค่าประเภท Variant สำหรับเก็บค่าตำแหน่งและรายละเอียดอื่น ๆ ของเซลล์ ด้วยคำสั่ง Set

- i และ j เป็นตัวแปรเก็บค่าประเภท Integer โดยที่ iแทนแถว (row) และ j แทนคอลัมน์ (column) ของช่วงเซลล์ทั้งหมดที่โปรแกรมต้องการตรวจหาผิวแนวดิ่งของชิ้นงาน

<u>ขั้นตอนการทำงานของโมดูลย่อย</u> แสดงดังรูปที่ 4.1 มีรายละเอียดดังนี้

1.)กำหนดให้ตัวแปร rngเก็บค่าตำแหน่งของเซลล์ที่ใช้สำหรับวาดภาพชิ้นงาน ให้ Name เท่ากับ 64 เพื่อใช้ในการสั่งพิมพ์ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ด้วยคำสั่ง Chr(Name) ให้countjเท่ากับ 0

2.)เริ่ม For loop ด้วยตัวแปร j เริ่มที่ j = 2 วนทุกคอลัมน์ของตัวแปร rng

3.) กำหนดให้ countiเท่ากับ 0

4.)เริ่ม For loop ด้วยตัวแปร iเริ่มที่ i = 1 วนทุกแถวของตัวแปร rng

5.)จากนั้นตรวจสอบที่เซลล์ rng(i,j) ว่ามีเส้นขอบเซลล์หรือไม่ถ้าใช่ทำข้อ6 ถ้าไม่มีให้ทำข้อ 7

6.)ให้เพิ่มค่า countiหนึ่งค่า และกำหนดให้ D(j) เป็นกำหนดเซลล์นั้น

7.)เพิ่มค่า iไปอีก 1

8.)ตรวจสอบว่าcountiไม่เท่ากับ 0 หรือไม่ ถ้าใช่ให้ทำข้อ8ถ้าไม่ใช่ให้ทำข้อ 11

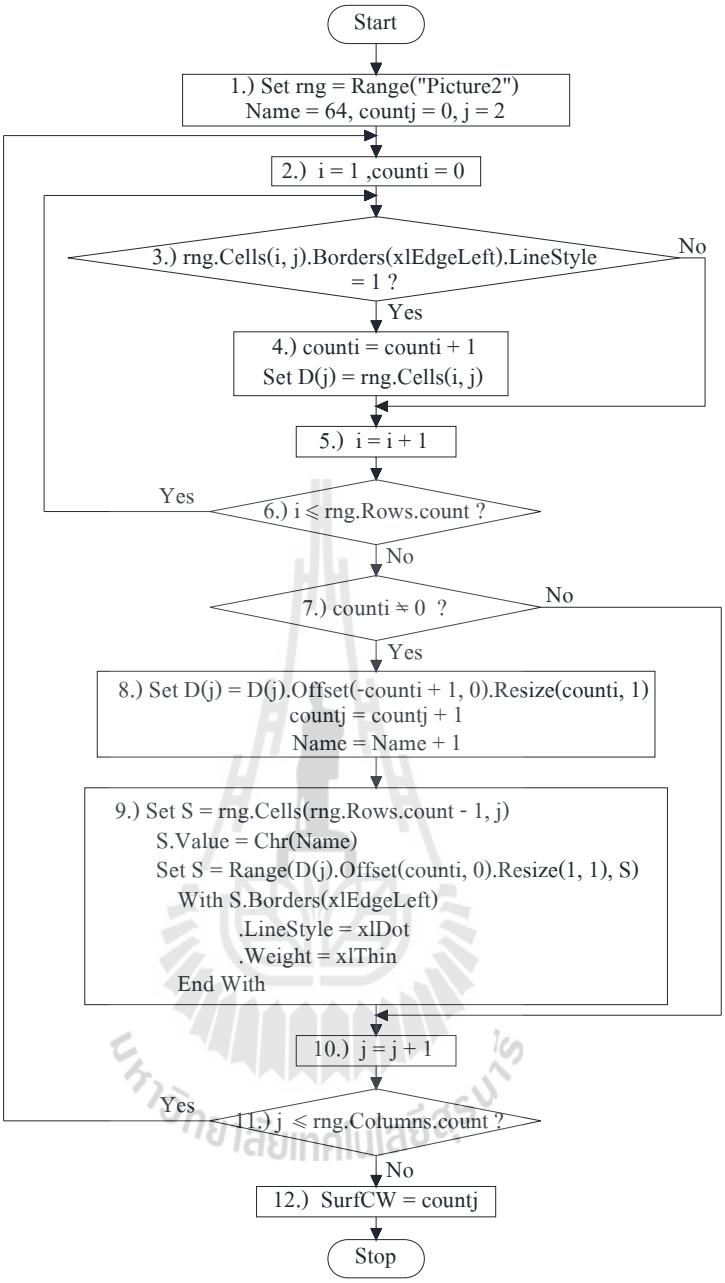
9.) เปลี่ยนแปลงตำแหน่งตัวแปร D(j) ย้ายไปยังตำแหน่งด้านล่างสุดของเซลล์ที่มีเส้นขอบในแต่ละ j โดยคำสั่งในข้อนี้ จะสั่งให้ D(j) ย้ายตำแหน่ง ด้วยคำสั่ง Offset ซึ่งคำสั่ง Offset จะสั่งให้ D(j)ย้ายลงไป(ทิศทาง-)โดยมีจำนวนเซลล์ที่ขยับลงไป เท่ากับ counti+1 แถว,0 คอลัมน์จากนั้นเพิ่มค่า countjและ Name ไปอีก 1

10.) กำหนดให้S เก็บค่าตำแหน่งเซลล์สุดท้ายของ ตัวแปร rngจากนั้น พิมพ์ชื่อผิวตัดลงในเซลล์ S ตามตัวแปร Nameจากนั้นกำหนดค่าตัวแปร S ใหม่ด้วยคำสั่ง Range โดยคำสั่งนี้จะเป็นการเลือกให้ตัวแปร S เก็บค่าตำแหน่งแถวจากเซลล์ D(j) ไปจนถึงเซลล์ S

11.) เพิ่มค่า j ไปอีก1

12.)พิมพ์ชื่อผิวชิ้นงานลงที่เซลล์บนสมุดงาน

จากขั้นตอนที่ได้กล่าวในข้างต้น เป็นการวนตรวจสอบในทุกเซลล์ของพื้นที่สร้างรูปภาพเพื่อดำเนินการตรวจสอบคุณสมบัติเส้นขอบด้านซ้ายของเซลล์ โดยเงื่อนไขที่ใช้ตรวจสอบคือ .Border(xlEdgeLeft).LineStyleเท่ากับ 1 (กรอบที่ 3)แสดงว่าเซลล์นั้นมีการเส้นแสดงผิวตัด จะบันทึกค่าและกำหนดชื่อให้แกผิวนั้น เป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่



รูปที่ 4.1 Flowchart ของโมดูลย่อยสำหรับตรวจสอบจำนวนผิวชิ้นงานและกำหนดชื่อ

2. โมดูลย่อยในการสร้างตารางรับข้อมูลของโปรแกรม

โมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่สร้างตารางเพื่อให้ผู้ใช้ป้อนข้อมูลได้ตรงตามที่โปรแกรมต้องการใช้ในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ซึ่งประกอบด้วย 3 โมดูลย่อย ดังนี้

2.1 ตารางรับข้อมูลขนาดและความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน

2.2 ตารางรับข้อมูลรายละเอียดลำดับการผลิตชิ้นงาน

2.3 ตารางหรือแบบฟอร์มแสดงแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

ลักษณะการทำงานของโมดูลย่อยทั้ง 3 โมดูลย่อยเป็นการเลือกเซลล์ที่ต้องการให้ผู้ใช้ป้อนข้อมูล และใช้คำสั่งวาดตารางเพื่อสร้างตารางรับข้อมูลในสมุดงานหรือเซลล์ที่ต้องการเพื่อเป็นกำหนดให้ผู้ใช้สามารถป้อนข้อมูลได้ตรงตามที่โปรแกรมต้องใช้งาน

คำสั่งหลักที่ใช้สำหรับวาดตาราง เป็นการเลือกเซลล์ที่ต้องการวาดด้วยด้วยคำสั่ง Range จากนั้นใช้คำสั่งเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเซลล์ ดังนี้

คำสั่ง Font.Nameให้เป็น "TH SarabunPSK"

คำสั่ง Font.Sizeให้เป็นขนาด 16

คำสั่ง HorizontalAlignmentให้เป็น xlCenter

คำสั่ง VerticalAlignmentให้เป็นxlCenter

คำสั่ง Borders.LineStyleให้เป็นxlContinuous

คำสั่ง Borders.Weight ให้เป็น xlThin

คำสั่ง NumberFormatให้เป็น "0.00"

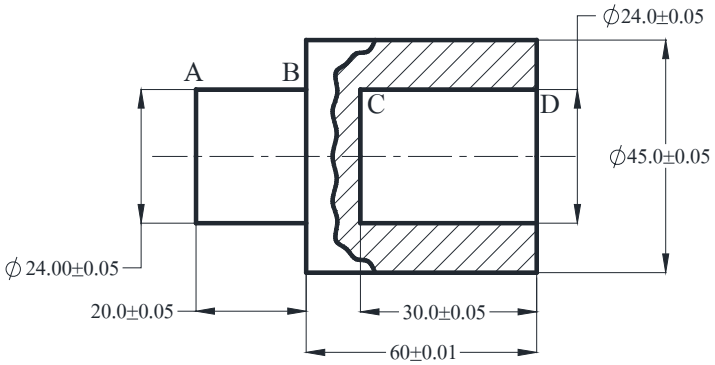
และ คำสั่ง Validation.Add Type ให้เป็นข้อมูลให้เลือกที่กำหนด ใช้เฉพาะกรณีที่ต้องการให้ผู้ใช้งานเลือกป้อนข้อมูลตามที่โปรแกรมกำหนดให้เท่านั้น

4.3 การคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

หลังจากผู้ใช้ป้อนข้อมูล โปรแกรมจะทำการประมวลผลข้อมูลและดำเนินงานตามขั้นตอนการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนตามลำดับขั้นตอนในโมดูลการคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยขั้นตอนการทำงานแบ่งได้เป็น 6 โมดูลย่อยมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

4.3.1 โมดูลย่อยการคำนวณขนาดมูลฐานจากแบบชิ้นงาน

ทำหน้าที่คำนวณขนาดมูลฐานจากแบบของชิ้นงาน โดยใช้ข้อมูลขนาดมูลฐานของมิติของชิ้นงานจากที่ได้รับจากผู้ใช้ผลจากการคำนวณขนาดมูลฐานของชิ้นงาน คือ อาร์เรย์ 2 มิติ ; GenBP,ขนาด= (จำนวนผิวชิ้นงาน) x (จำนวนผิวชิ้นงาน) และโปรแกรมให้ชื่อว่า ซึ่งจะบันทึกค่าในตัวแปรนี้ ตามผิวชิ้นงานหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่ง ดังตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 4.2ชิ้นงานสำเร็จจากการตัดโลหะมิติต่าง ๆ (Whybrew et al., 1990)

ตัวอย่าง หลักการในการคำนวณขนาดมูลฐานของชิ้นงานจากรูปที่ 4.2 โดยมีเงื่อนไขของการบันทึกค่าเครื่องหมายของขนาด คือ ถ้ามิติบอกขนาดจากผิวชิ้นงานน้อยไปมาก (A-Z) ค่าที่ถูกเก็บจะเป็นค่าขนาดเป็นบวก (+) แต่ถ้ามิติบอกขนาดจากผิวชิ้นงานมากไปน้อย (Z-A) ค่าที่ถูกเก็บจะเป็นค่าขนาดเป็นลบ (-)จะได้ข้อมูลเบื้องต้นหรือข้อมูลที่ได้รับจากผู้ใช้ คือ

มิติ A-B มีขนาดเท่ากับ 20และมิติ B-A มีขนาดเท่ากับ -20

มิติ B-Dมีขนาดเท่ากับ 60และมิติ D-B มีขนาดเท่ากับ -60

มิติ C-D มีขนาดเท่ากับ 30และ มิติ D-C มีขนาดเท่ากับ -30

สามารถนำข้อมูลพื้นฐาน 3 มิติ นี้ไปหาขนาดของมิติอื่นได้ดังนี้

A-B + B-D= A-D = 20 + 60 =80ซึ่งจะได้ D-A = -80

B-D + D-C= B-C= 60 + (-30) = 30ซึ่งจะได้ C-B = -30

จะได้เป็น GenBP(4,4) ดังนี้

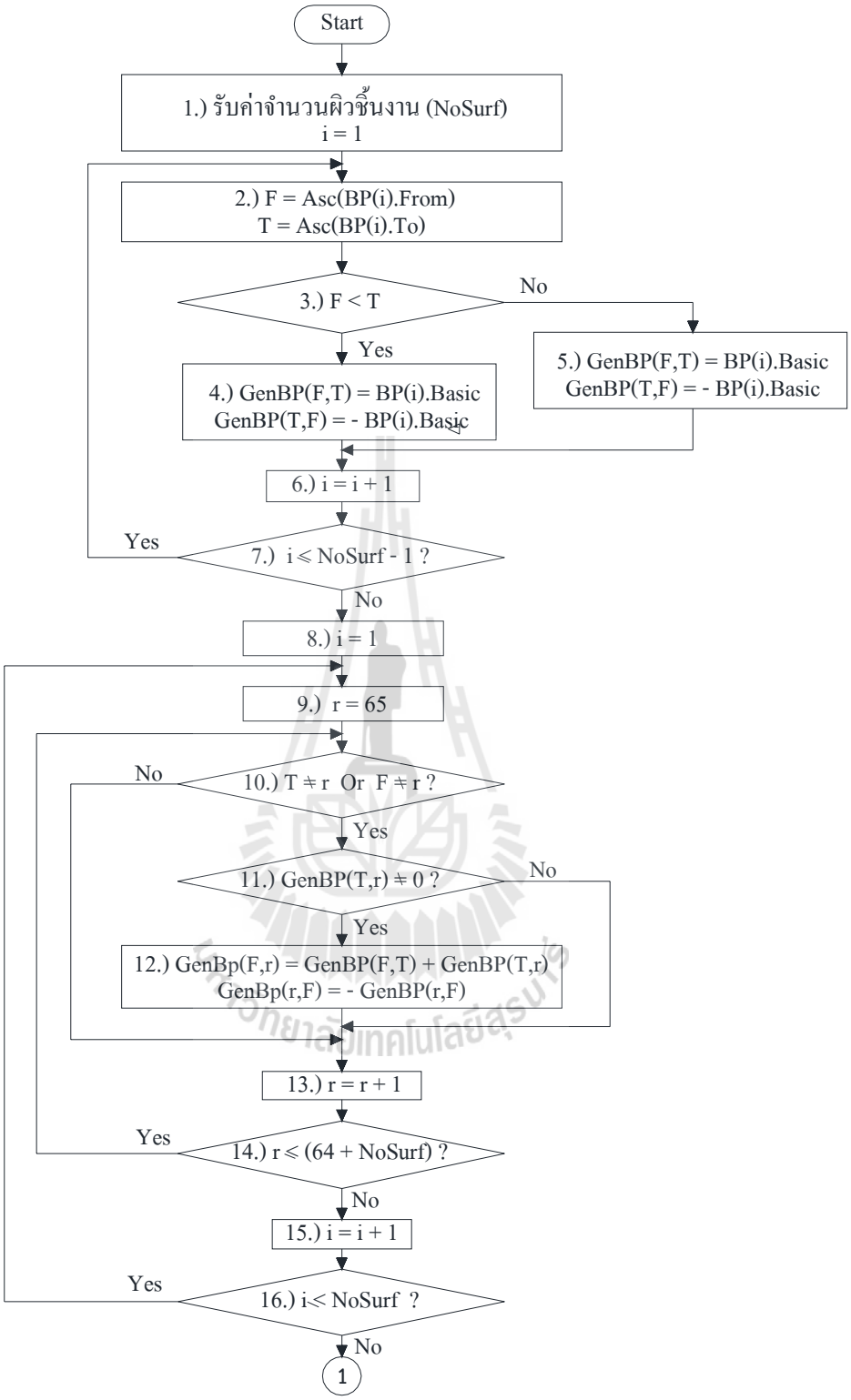
		A	B	C	D
	A	0	20	50	80
GenBP(4,4) =	B	-20	0	30	60
	C	-50	-30	0	30
	D	-80	-60	-30	0

จากหลักการตัวอย่างจะเห็นว่า การคำนวณแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4ซึ่งแต่ละช่วงมีการทำงาน ดังนี้

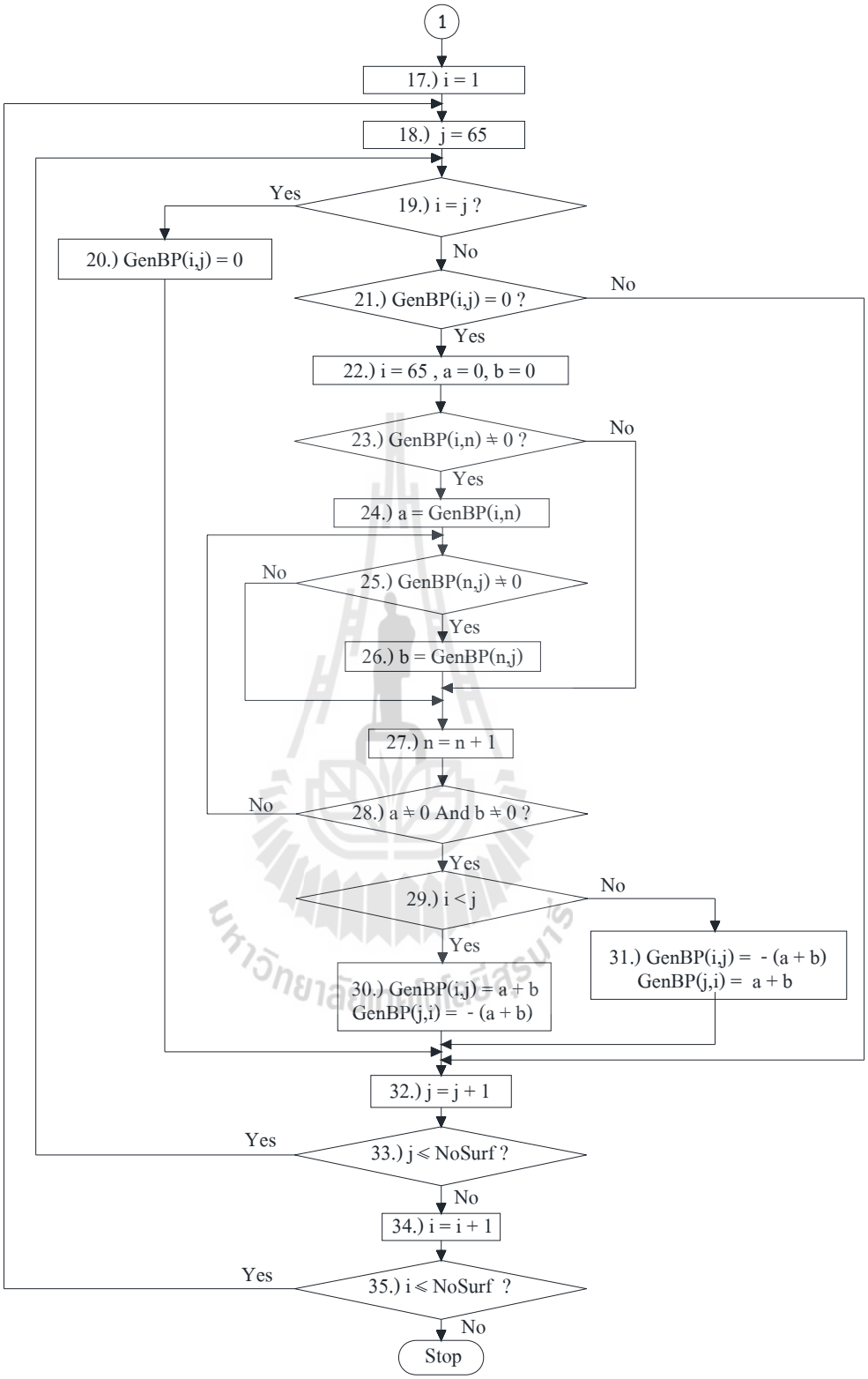
<u>ช่วงที่ 1</u>กรอบที่ 1-7 เป็นขั้นตอนการวนลูบทุกมิติที่ได้รับมาจากผู้ใช้ เพื่อเก็บค่าลงในอาร์เรย์GenBP เลยซึ่งจะเก็บค่าขนาดมูลฐานของมิติ ตามผิวบอกขนาดที่ได้จากผู้ใช้ใส่และมิติที่มีผิวตรงกันข้ามด้วย โดยการบันทึกค่ามีเงื่อนไขเครื่องหมายในข้างต้น

ช่วงที่ 2กรอบที่ 8-16เป็นขั้นตอนการวนลูบทุกตำแหน่งของอาร์เรย์ GenBPเพื่อคำนวณขนาดมูลฐานของมิติจากค่าที่มีอยู่แล้วในอาร์เรย์ โดยคำนวณจากมิติที่ทราบค่า2 มิติ ซึ่งจะเริ่มจากตรวจหามิติที่ทราบค่ามิติแรก จากนั้นนำไปอีกมิติที่มีผิวเหมือนกัน สามารถนำมาคำนวณได้เป็นมิติใหม่และเก็บค่าในอาร์เรย์ GenBPตามเงื่อนไขเครื่องหมายในข้างต้น

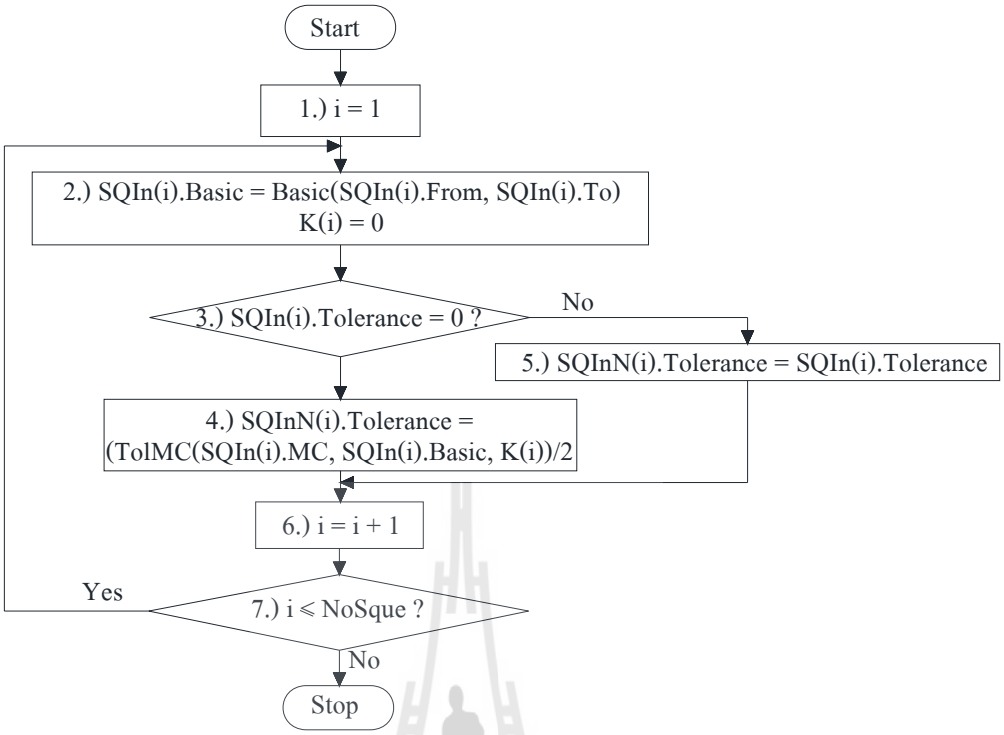
ช่วงที่ 3กรอบที่ 17-35เป็นขั้นตอนการวนลูบทุกตำแหน่งของอาร์เรย์ GenBP เพื่อคำนวณขนาดมูลฐานของมิติที่ยังไม่ทราบค่าซึ่งเป็นการเติมเต็มค่าทั้งหมดในอาร์เรย์ GenBP ซึ่งใช้หลักการคำนวณและเงื่อนไขเครื่องหมายในข้างต้น



รูปที่ 4.3 Flowchart แสดงการทำงานโมดูลย่อยการคำนวณขนาดของชิ้นงานในทุกผิวในทุกผิวตัด



รูปที่ 4.4 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยการคำนวณขนาดของชิ้นงานในทุกผิวในทุกผิวตัด(ต่อ)



รูปที่ 4.5 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยในพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนขั้นตอนการตัด

4.3.2 โมดูลย่อยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะ

ในการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงานด้วยหลักการของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ความคลาดเคลื่อนในแต่ละขั้นตอนการผลิตชิ้นงานที่ยอมให้เกิดขึ้นได้มีความสำคัญมากต่อการผลิตชิ้นงานให้ได้ขนาดตามแบบกำหนด ซึ่งในโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนนี้ เก็บค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะในตัวแปรอาร์เรย์ชื่อ “SQInN().Tolerance” โดยค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะในตัวแปรนี้สามารถกำหนดได้ 2 วิธี คือ

1). จากการป้อนข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนตัดโลหะแต่ละกระบวนการของผู้ใช้โดยตรง

2). กำหนดค่าโดยดูจากตาราง IT ตามชนิดเครื่องจักรที่ใช้ทำการผลิตในแต่ละขั้นตอน

วิธีแรกผู้ใช้ป้อนข้อมูลโดยใส่เลขค่าตัวเลขความคลาดเคลื่อนของกระบวนตัดโลหะ โมดูลย่อยจะนำไปเก็บในตัวแปรSQInN().Tolerance วิธีหลังผู้ใช้ไม่ได้ป้อนค่าความคลาดเคลื่อนให้โดยตรง แต่ให้ข้อมูลชนิดของเครื่องจักรที่ใช้ทำการผลิต ดังนั้นโปรแกรมจะทำไปหา IT สำหรับเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง โดยเลือกค่า IT ต่ำสุดสำหรับช่วงของกระบวนการผลิตที่พิจารณา รูปที่ 4.5

เป็นขั้นการทำงานโมดูลย่อย ในการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละขั้นตอนการตัดโลหะ โดยวนลูบพิจารณาทุกขั้นตอนการตัดชิ้นงาน ถ้าใช้ค่าความคลาดเคลื่อนจากตาราง IT โมดูลย่อยจะทำงานกรอบที่ 5 คือ การเรียกใช้ฟังก์ชั่นที่ชื่อว่า ‘”TolMC” เป็นฟังก์ชั่นย่อย ที่ทำหน้าที่ในการเลือกใช้ค่าความคลาดเคลื่อนในตาราง IT โดยพิจารณาจาก ขนาดมูลฐานและชนิดเครื่องจักรของขั้นตอนที่ต้องการตรวจสอบ

4.3.3 โมดูลย่อยเปลี่ยนชื่อผิวตามลำดับการตัดโลหะ

เนื่องจากการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนอาศัยแผนภาพต้นไม้ช่วยคำนวณค่าในแผนภูมิ โหนดทุกโหนดในแผนภาพต้นไม้ แทนผิวชิ้นงานตามความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องใช้สัญลักษณ์ของผิวที่ถูกตัดที่ถูกตัดซ้ำให้แตกต่างไปจากเดิม แต่ข้อมูลเดิมของลำดับการตัดโลหะระบุผิวตัดหรือผิวอ้างอิงโดยไม่ได้คำนึงถึงการตัดซ้ำ เพราะฉะนั้นโมดูลนี้จึงทำหน้าที่ตั้งชื่อผิวชิ้นงานใหม่ ให้สอดคล้องกับการตัดซ้ำ เช่น เดิมผิว A เป็นผิว A0 หรือถ้า A0 ถูกตัดจะเกิดเป็นผิว A1 เป็นต้น ตัวอย่างเช่นชิ้นงานในรูปที่ 4.2 มีขั้นตอนการผลิตดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Operation 10 เลื่อยตัด ได้ผิว A โดยอ้างอิงจากผิว D
ขั้นตอนที่ 2 Operation 30 กลึงตัด ได้ผิว B โดยอ้างอิงจากผิว D
ขั้นตอนที่ 3 Operation 40 กลึงตัด ได้ผิว A โดยอ้างอิงจากผิว D
ขั้นตอนที่ 4 Operation 50 กลึงตัด ได้ผิว D โดยอ้างอิงจากผิว A
ขั้นตอนที่ 5 Operation 60 เจาะรู ได้ผิว C โดยอ้างอิงจากผิว A
ขั้นตอนที่ 6 Operation 70 กลึงตัด ได้ผิว C โดยอ้างอิงจากผิว A
ขั้นตอนที่ 7 Operation 80 เจียระไน ได้ผิว A โดยอ้างอิงจากผิว D
ขั้นตอนที่ 8 Operation 90 เจียระไน ได้ผิว D โดยอ้างอิงจากผิว A

โมดูลนี้จะเปลี่ยนชื่อผิวที่ถูกตัดและผิวอ้างอิงตามลำดับการตัดเป็นชื่อใหม่ที่สะท้อนลำดับก่อน – หลังของการตัด ดังในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2ลำดับการตัดชิ้นงานตัวอย่าง

Operation	Cut face	Locating face
10	A0	D0
30	B0	D0
40	A1	D0
50	D1	A1
60	C0	A1
70	C1	A1
80	A2	D1
90	D2	A2

นอกจากจะเปลี่ยนชื่อผิวตามลำดับการตัดโลหะแล้ว โมดูลย่อยนี้ยังทำหน้าที่เปลี่ยนชื่อผิวชิ้นงานในแบบด้วย เพราะเป็นผิวที่เกิดจากการตัดสุดท้ายอันเป็นผลลัพธ์จากการตัดตามแผนการผลิตทั้งหมด ดังนั้นชื่อผิวที่ถูกเปลี่ยนแปลงด้วยโมดูลย่อยนี้จึงมี2 ชุด คือ

- ผิวตัดชิ้นงานในแต่ละขั้นตอนการตัด ประกอบด้วย ผิวอ้างอิง (reference face) เก็บค่าอยู่ในตัวแปร “SQIn.From” และผิวที่ถูกตัด (face cut) เก็บค่าอยู่ในตัวแปร “SQIn.To”
- ผิวชิ้นงานของมิติในแบบชิ้นงาน ซึ่งกำหนดให้เป็นผิวอ้างอิง (from)เก็บค่าอยู่ในตัวแปร “BP.From” และผิวในการวัด(to)เก็บค่าอยู่ในตัวแปร “BP.To”

ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลดังกล่าว ตามลำดับการตัด จึงทำให้การทำงานโมดูลย่อยนี้ แบ่งการทำงานได้เป็น 2 ช่วงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7

<u>ช่วงที่ 1</u>เป็นขั้นตอนการทำงานสำหรับเปลี่ยนผิวตัดในข้อมูลที่บอกผิวตัดที่เก็บค่าในอาร์เรย์ “SQIn.To” และในข้อมูลที่บอกมิติชิ้นงานที่เก็บค่าในอาร์เรย์ “BP.From”และ “BP.To” โดยใส่ตัวเลขกำกับการตัดหลังตัวอักษรชื่อ จากนั้นเก็บค่าไปยังอาร์เรย์ “SQInN.To”, “BPN.From”และ “BPN.To”การเปลี่ยนชื่อผิวเริ่มจากชื่อผิวตัดในแต่ละขั้นตอนการผลิต เพราะเมื่อผิวถูกตัดซ้ำจะทำให้เกิดผิวใหม่ จะได้จำนวนครั้งที่ถูกการตัดซ้ำทั้งหมดของแต่ละผิว จากนั้นจะได้เป็นผิวสุดท้ายชิ้นงานซึ่งก็คือผิวในแบบชิ้นงาน

<u>ตัวแปรในโมดูลย่อยช่วงที่ 1</u>

- NoSurf, NoSque, Surf(j), SQIn.(i).To, SQInN(i).To, BP(i).From, BP(i).To, BPN(i).From, BPN(i).To และ NoNode(j) เป็น Module variable
- S,i, j, และ c เป็นตัวแปรเก็บค่าประเภท Integer เป็น Local variable โดยที่ S เป็นจำนวนตัดซ้ำของแต่ละผิวชิ้นงาน, jเป็นตัวเลขแทนตำแหน่งของผิวชิ้นงาน,iเป็นตัวเลขแทนลำดับของขั้นตอนการตัดชิ้นงาน และ c เป็นจำนวนมิติในแบบชิ้นงาน

<u>ขั้นตอนการทำงานของโมดูลย่อย</u> แสดงดังรูปที่ 4.6มีรายละเอียดดังนี้

1.) กำหนดค่าให้กับตัวแปร i = 1, j = 1 และ S = 0

2). เริ่ม For loop ด้วยตัวแปร jเริ่มที่ j = 1 วนทุกผิวชิ้นงาน(j ≤NoSurf)

3.) เริ่ม For loop ด้วยตัวแปร iเริ่มที่ i = 1 วนทุกขั้นตอนที่ตัดชิ้นงาน (i≤NoSque)

4.) ตรวจสอบว่า SQIn(i).To เท่ากับลบ(“-”)หรือไม่ ซึ่งเป็นขั้นตอนการตรวจสอบผิวตัดว่าเป็นขั้นตอนอื่นที่ไม่พิจารณาในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนหรือไม่ ถ้าเท่ากันให้ทำข้อ 6 ถ้าไม่เท่าให้ทำข้อ 5

5.) เก็บค่า SQInN(i).To เป็นลบ

6.) ตรวจสอบว่า SQIn(i).To เท่ากับ Surf(j) หรือไม่ เป็นการวนลูบเช็คทุก iเพื่อมีเช็คว่าผิว Surf(j) เกิดขึ้นหรือถูกตัดซ้ำกี่ครั้ง ถ้าเกิดขึ้นซ้ำจะทำข้อ 7 (ถ้าเท่ากันให้ทำข้อ 7) แต่ถ้าไม่ซ้ำให้ทำข้อ 8

7.)เก็บค่า SQInN(i).To เป็นSQIn(i).To ต่อด้วยค่า S จากนั้นเพิ่มค่า S = S + 1

8.) เพิ่มค่า iไปอีก 1

9.) กำหนดค่าให้กับตัวแปร c = 1

10.) เริ่ม For loop ด้วยตัวแปร c เริ่มที่ c = 1 วนทุกมิติที่บอกขนาดชิ้นงาน (c ≤NoSurf) จากนั้นจะทำทั้งข้อ 11 และ ข้อ 13

11.) ตรวจสอบว่า BP(c).From เท่ากับ Surf(j) หรือไม่ เป็นวนลูบเช็คไปทีละมิติ (c) ว่าผิวบอกขนาดด้าน From เท่ากับชื่อผิวชิ้นงานของแต่ละ(j) หรือไม่ถ้าเท่ากันให้ทำข้อ 12 ถ้าไม่เท่าให้ทำข้อ 15

12.)เก็บค่า BPN(c).From เป็นBP(c).From ต่อด้วยค่า S - 1 ซึ่ง S -1 จะเป็นจำนวนครั้งที่มีการตัดซ้ำของแต่ละผิวชิ้นงาน (j)จึงมาต่อท้ายชื่อผิวบอกขนาดชิ้นงานที่มีเงื่อนไขดังข้อ 11

13.)ตรวจสอบว่า BP(c).To เท่ากับ Surf(j) หรือไม่ เป็นวนลูบเช็คไปทีละมิติ (c) ว่าผิวบอกขนาดด้าน To เท่ากับชื่อผิวชิ้นงานของแต่ละ(j) หรือไม่ ถ้าเท่ากันให้ทำข้อ 14 ถ้าไม่เท่าให้ทำข้อ 15

14.) เก็บค่า BPN(c).To เท่ากับ BP(c).To ต่อด้วยค่า S - 1

15.) เพิ่มค่า c ไปอีก 1

16.)เก็บค่าNoNode(j) เท่ากับ S - 1

17.) เพิ่มค่า j ไปอีก 1

<u>ช่วงที่ 2</u>เป็นขั้นตอนการทำงานต่อจากช่วงที่ 1 ซึ่งเป็นขั้นตอนสำหรับเปลี่ยนชื่อผิวอ้างอิงของการตัดในข้อมูลที่บอกผิวอ้างอิงที่เก็บค่าในอาร์เรย์ “SQIn.From” โดยใส่ตัวเลขกำกับการตัดหลังตัวอักษรชื่อ จากนั้นเก็บค่าไปยังอาร์เรย์ “SQInN.From” เป็นทำงานหลังจากที่ทราบค่า “SQInN.To”แล้วจึงดำเนินการเปลี่ยนโดยอาศัยค่าผิวที่ถูกตัดก่อนหน้าเป็นหลัก

<u>ตัวแปรในโมดูลย่อยช่วงที่ 2</u>

- NoSque, SQInN(i).To, SQInN(r).From, SQIn(i).To และSQIn(r).From เป็น Module variable ซึ่งเรียกใช้และเก็บค่าตามขั้นตอนในโมดูลย่อยนี้
- iและ r เป็นตัวแปรเก็บค่าประเภท Integer เป็น Local variable โดยที่ iและ r เป็นตัวเลขแทนตำแหน่งของลำดับของขั้นตอนการตัดชิ้นงาน

Flow chart ในรูปที่ 4.7แสดงการทำงานของโมดูลและสามรถสรุปต่อจากช่วงที่ 1 ได้ดังนี้

18.) กำหนดค่าให้กับตัวแปร i = 0

19.) เริ่ม For loop ด้วยตัวแปร iเริ่มที่ i = 1 วนทุกขั้นตอนที่ตัดชิ้นงาน (i≤NoSque)

20.) กำหนดค่าให้ r = i + 1

21.) ตรวจสอบว่า SQIn(i).To เท่ากับลบหรือไม่ ซึ่งเป็นขั้นตอนการตรวจสอบผิวตัดว่าเป็นขั้นตอนอื่นที่ไม่พิจารณาในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนหรือไม่ ถ้าเท่ากันให้ทำข้อ 22 ถ้าไม่เท่าให้ทำข้อ 23

22.) เก็บค่า SQInN(r).To เป็นลบ

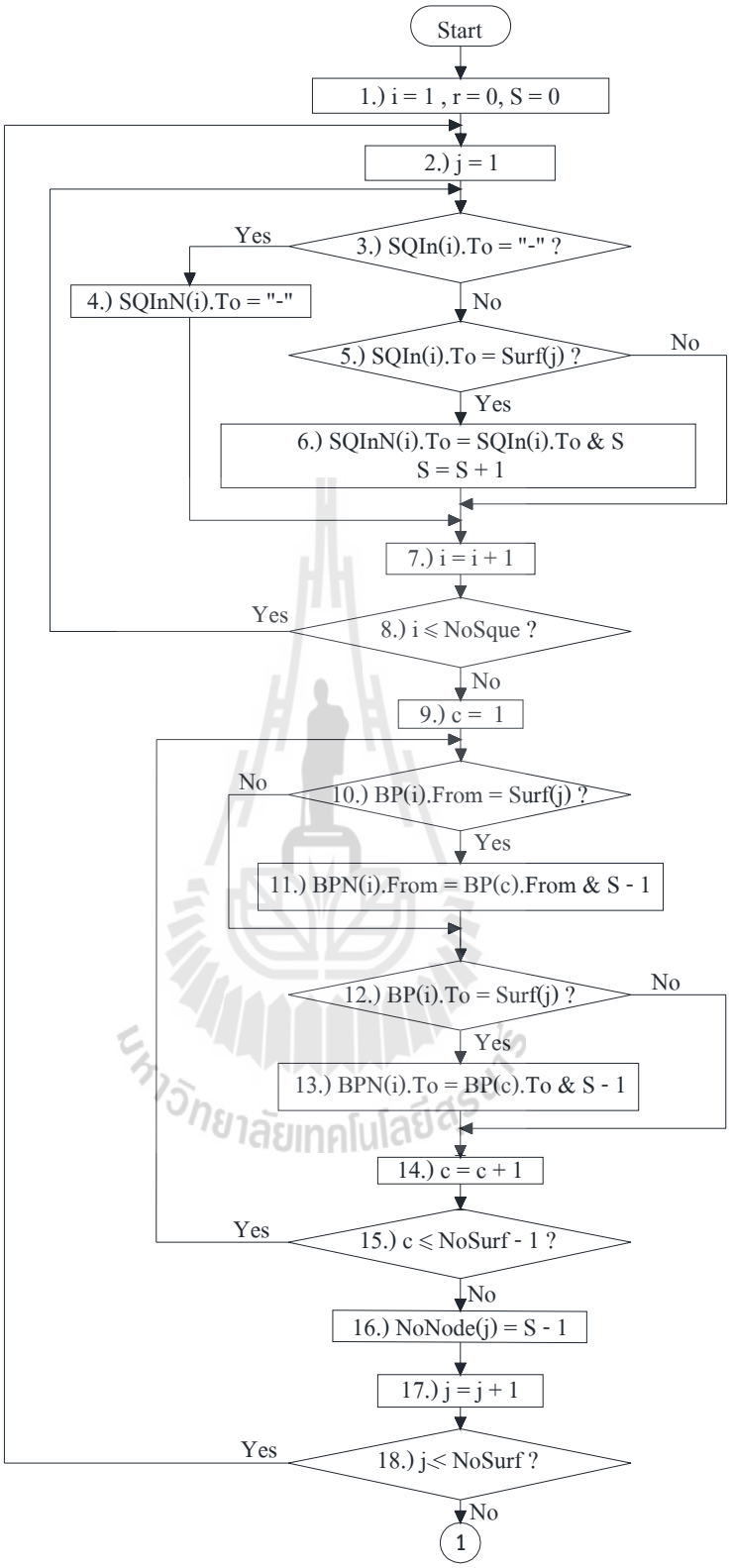
23.) ตรวจสอบว่า SQIn(r).From เท่ากับ SQIn(i).To หรือไม่ ถ้าเท่ากันจะทำข้อ 24 แต่ถ้าไม่เท่าให้ทำข้อ 27

24.) เก็บค่า SQInN(i).To เป็น SQIn(i).To ต่อด้วยค่า S จากนั้นเพิ่มค่า S = S + 1

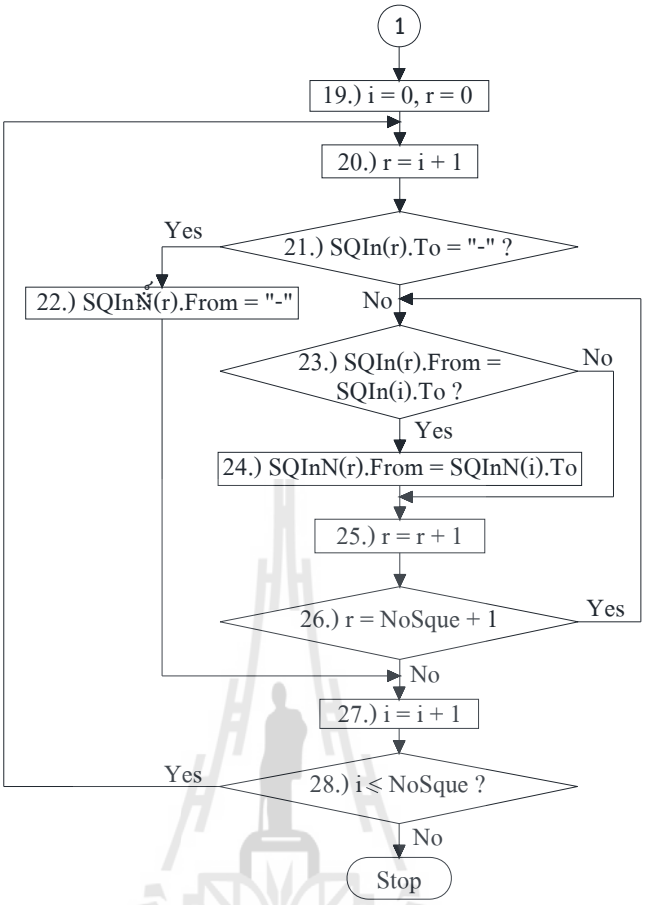
25.) เพิ่มค่า r ไปอีก 1

26.) ตรวจสอบค่า r ว่า r เท่ากับ จำนวนขั้นตอนการตัด - 1 หรือไม่ ถ้าเท่ากันกลับไปทำตั้งแต่ข้อ 23 ใหม่อีก ถ้าไม่เท่าออกไปทำข้อ 27 ซึ่งเงื่อนไขในขั้นตอนนี้เป็นการใช้คำสั่ง Do until เป็นงานสั่งให้ทำงานจากค่าที่r เท่ากับi+1 จนถึงค่าสุดท้าย

27.) เพิ่มค่า iไปอีก 1



รูปที่ 4.6 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยเปลี่ยนชื่อผิวตัดชิ้นงาน



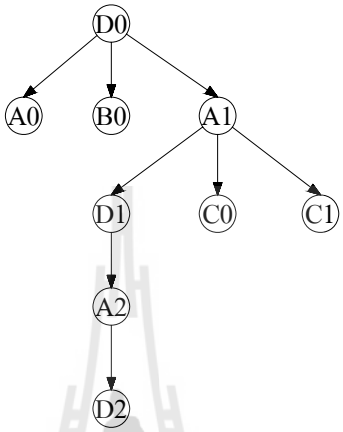
รูปที่ 4.7 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยโมดูลย่อยเปลี่ยนชื่อผิวตัดชิ้นงานต่อ)

4.3.4 โมดูลย่อยสำหรับสร้างเส้นทาง (Path)

ในการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยแผนภาพต้นไม้Whybrew et al. (1990) ได้เสมอการใช้เส้นทาง(path)แทนความสัมพันธ์ของผิวตัดที่เป็นโหมดในแผนภาพต้นไม้ (รูปที่ 4.8) ซึ่ง Path เป็นข้อความที่แสดงผิวตัดชิ้นงานจากผิวตัดใด ๆ ไปยังผิวตัดแรก(root node) ซึ่งโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนนี้ใช้ Path สำหรับหาความสัมพันธ์ของผิวตัดเพื่อใช้ในการคำนวณค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

โดยการสร้าง Path โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้แสดงในรูปที่ 4.9ซึ่งโมดูลย่อยนี้มีหน้าที่สร้างPath ประจำผิวตัดดังตารางที่ 4.3ซึ่งแสดงให้เห็นถึง Path ที่ได้จากลำดับการตัดชิ้นงานของตัวอย่างข้างต้น โดยแสดงให้เห็นถึงPath ประจำตัดที่เกิดขึ้น โดยโมดูลย่อยดำเนินการวนทำงานในทุกขั้นตอนการตัดโดยเริ่มจากผิวแรกที่ถูกตัด โดยเริ่มจากกำหนด Path ของผิวแรกคือ ผิวที่เป็นผิวอ้างอิงการตัดในขั้นตอนแรก ซึ่งจะวนลูบเก็บค่า Path ของแต่ละผิวใส่ในตัวแปรอาร์เรย์ “Path(i)” โดยมีเงื่อนไขในการต่อ(กรอบที่8) เป็นตรวจสอบว่าหา Path ก่อนที่เป็นผิวเดียวกับผิว

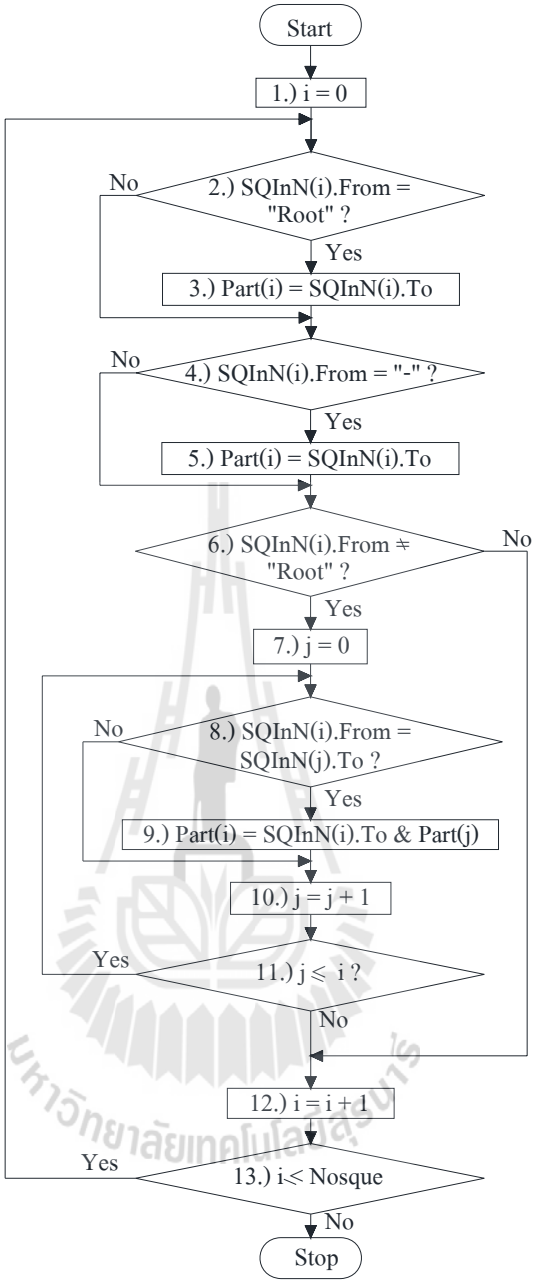
อ้างอิงจากนั้นนำ Path นั้นมาต่อท้ายจากผิวตัดนั้นเช่น Path(0) เกิดขึ้นก่อน เท่ากับ D0 จากนั้นสร้าง Path(1) โดยวนลูปหา Path ของผิวอ้างอิงการตัด จากนั้นนำ Pathต่อท้ายผิวตัดนั้น ได้เป็น A0D0 โดยหลักการในการต่อแบบนี้ สามารถทำได้เนื่องจาก ผิวที่ใช้อ้างอิงต้องเกิดขึ้นแล้วเสมอ จึงจะมี Path ก่อนหน้าอยู่แล้วเสมอ



รูปที่ 4.8แผนภาพต้นไม้ (Rooted-tree graph)

ตารางที่ 4.3 Path จากแผนภาพต้นไม้

i	Operation	New face	Locating face	Path
0	00	D0	-	D0
1	10	A0	D0	A0 D0
2	30	B0	D0	B0 D0
3	40	A1	D0	A1 D0
4	50	D1	A1	D1 A1 D0
5	60	C0	A1	C0 A1 D0
6	70	C1	A1	C1 A1 D0
7	80	A2	D1	A2 D1 A1 D0
8	90	D2	A2	D2 A2 D1 A1 D0



รูปที่ 4.9 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยสำหรับสร้างเส้นทาง (Path)

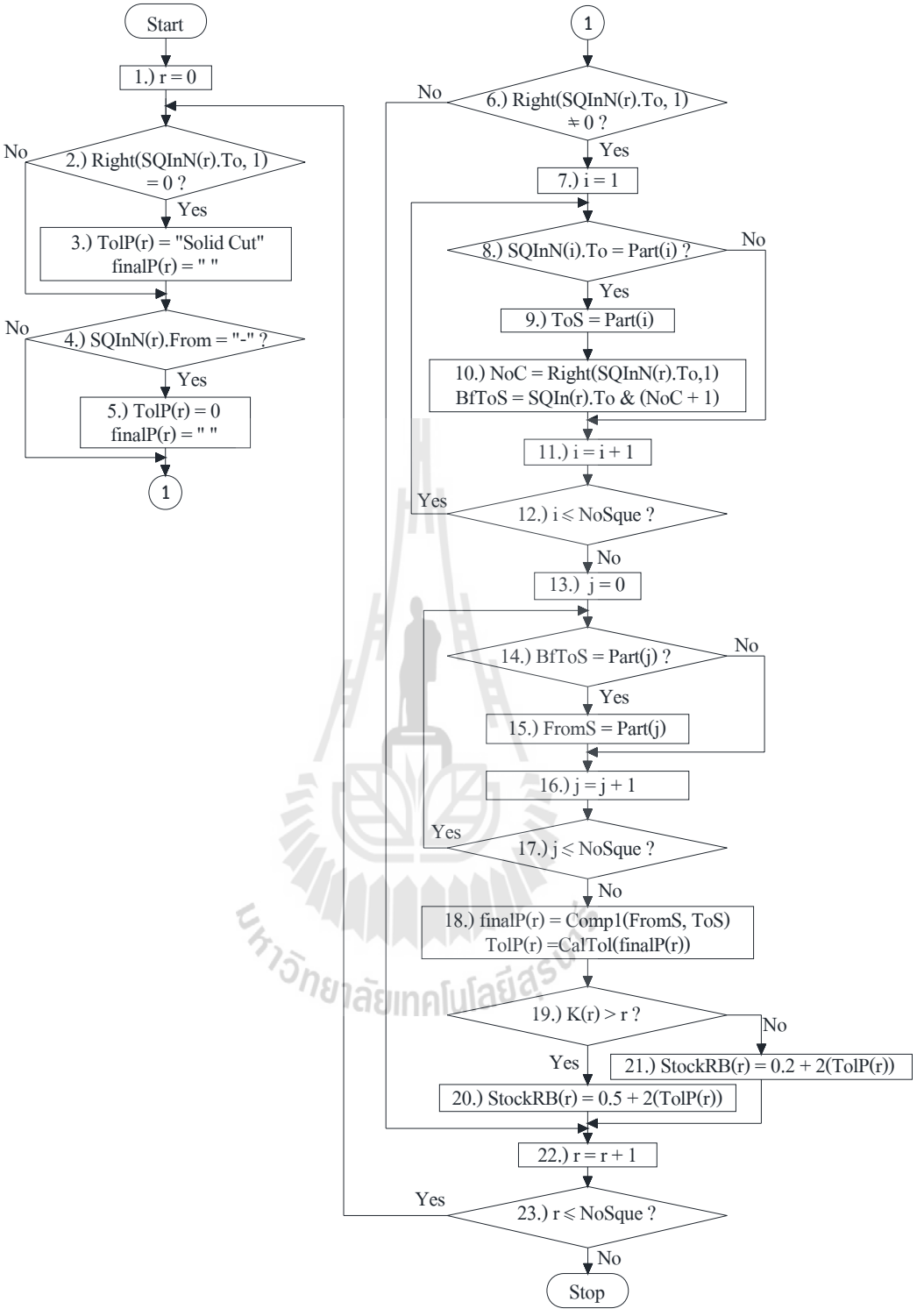
4.3.5 โมดูลย่อยสำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไปในแต่ละขั้นตอนการผลิต

โมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่สำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมและกำหนดขนาดมูลฐานของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไป(stock removal) ในแต่ละลำดับการผลิต โดยเก็บค่าความคลาดเคลื่อนในตัวแปรอาร์เรย์ “TolP()” และเก็บค่าขนาดมูลฐานในตัวแปรอาร์เรย์

“StockRB()”การคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไปในแต่ละลำดับในโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนนี้ ดำเนินการโดยนำค่าความคลาดเคลื่อนของรอยตัด (cut) ที่มีความสัมพันธ์กับรอยตัดที่ต้องการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของ stock removal ทั้งหมดมารวมกัน ซึ่งก็คือผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนของ path ในแผนภาพต้นไม้ระหว่างผิวที่ตัดซ้ำ เช่น ผิว A0 เมื่อมีการตัดซ้ำจะเกิดผิว A1 เพราะฉะนั้นความคลาดเคลื่อนของ stock removal จากการตัดผิว A1 คือ ผลรวมของความคลาดเคลื่อนของรอยตัดที่อยู่ใน path ของแผนภาพต้นไม้ (รูปที่ 4.8) จากผิว A0 ถึง A1 เป็นต้น

ขั้นตอนการทำงานของโมดูลย่อย แสดงดังรูปที่ 4.10เริ่มต้นด้วยการวนลูบตรวจสอบค่าในทุกผิวขั้นตอนการตัดชิ้นงาน โดยตรวจสอบที่ผิวตัดชิ้นงาน (ตัวแปร SQInN(r).To) ว่าเป็นผิวที่ถูกครั้งที่เท่าไหร่ ถ้าเป็นผิวที่ตัดครั้งแรก (เลขที่ตามหลังชื่อผิว = 0) โปรแกรมจะเก็บค่า finalP(r) เป็นช่องว่าง และ ค่า TolP(r) เป็น “Solid Cut” และถ้าเป็นขั้นตอนที่ไม่มีการตัด เก็บค่า finalP(r) เป็นช่องว่าง และ ค่า TolP(r) เป็น 0.00 แต่ถ้าไม่ใช่ผิวที่ถูกตัดครั้งแรก จะมีความคลาดเคลื่อนสะสมเกิดขึ้น ซึ่งโปรแกรมจะดำเนินการวนลูบเพื่อหาค่า Path(r) ของผิวตัดนั้นและ Path(r) ผิวที่เกิดขึ้นก่อนหน้า จากนั้นเก็บค่าในตัวแปร ToS และFromS เพื่อส่งเข้าไปในฟังก์ชั่น “Comp1” สำหรับเปรียบเทียบโดยส่ง 2 Path ที่ต้องการหาความสัมพันธ์ ฟังก์ชั่นจะดำเนินการตามขั้นตอนการทำงาน จากนั้นสั่งค่ากลับเป็นตัวแปรสตริงของชื่อผิวที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเก็บค่าไว้ในตัวแปรอาร์เรย์ finalP(r)จากนั้นเรียกฟังก์ชั่น “CalTol” โดยส่งค่าในตัวแปร finalP(r) สำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมทั้งของผิวชิ้นงานฟังก์ชั่นดำเนินการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดขึ้นและส่งกลับมาไว้ในตัวแปรอาร์เรย์ TolP(r)

จากนั้นโมดูลจะทำการกำหนดขนาดมูลฐานของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไป เพื่อให้แน่ใจว่าการตัดทุกครั้งจะมีเนื้อโลหะถูกตัดออกไปเสมอในที่นี้ใช้หลักการกำหนดขนาดมูลฐานของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไปดังนี้ถ้าเป็นเครื่องจักรที่มีความเที่ยงตรงสูงใช้ค่าขนาดมูลฐาน StocRB(r)= 0.2 + 2(TolP(r)) แต่ถ้าไม่ได้กำหนดประเภทเครื่องจักร หรือถือว่าเครื่องจักรมีความเที่ยงตรงเฉลี่ยใช้StocRB(r)= 0.5 + 2(TolP(r))



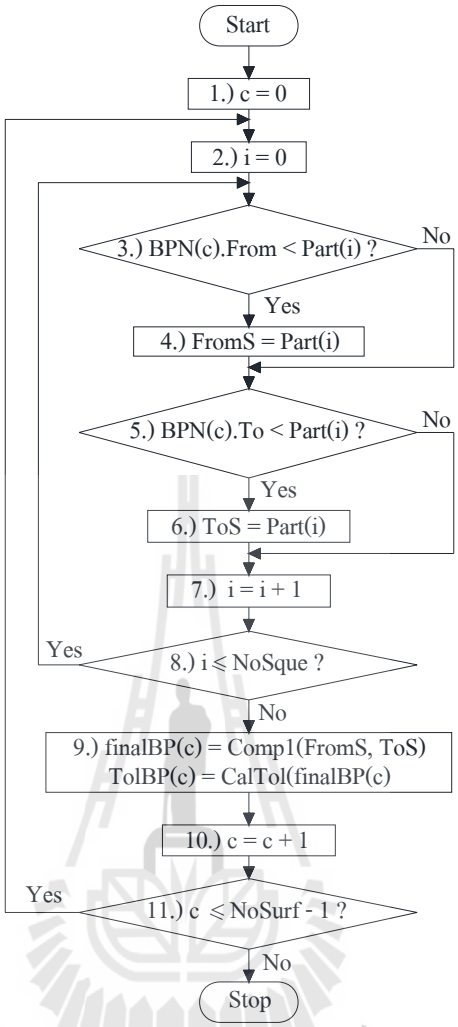
รูปที่ 4.10 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยสำหรับเปรียบเทียบ Path เพื่อคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของเนื้อโลหะที่ถูกตัดออกไปในแต่ละขั้นตอนการผลิต

4.3.6 โมดูลย่อยสำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน

โมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่สำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดในแต่ละมิติของชิ้นงานสุดท้ายของการตัด เก็บค่าความคลาดเคลื่อนในตัวแปรอาร์เรย์ “TolP()” ซึ่งการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยแผนภาพต้นไม้ ทำได้โดยการนำค่าความคลาดเคลื่อนของผิวที่มีความสัมพันธ์กับการตัดมาบวกกัน การหาความสำหรับของผิวบอกขนาดในมิตินั้น ซึ่งจะต้องเป็นผิวสุดท้ายที่ทำการตัดชิ้นงานสำเร็จแล้วในทุกขั้นตอน เช่น มิติบอกขนาดจากผิว A ถึง B จากตัวอย่างที่ได้กล่าวมาแล้ว ผิวตัดสุดท้ายเป็นผิว A2 และ B0 จากความสัมพันธ์ของผิว A2 ถึง ผิว B0 จากแผนภาพต้นไม้ จะได้เป็นผิวที่ทำให้เป็นความคลาดเคลื่อนสะสมของซึ่งนำมาใช้คำนวณเป็นค่าความคลาดเคลื่อนมิติชิ้นงาน ที่จะแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการตัดชิ้นงานที่วิเคราะห์ด้วยแผนภูมิความคลาดเคลื่อนนั้นเมื่อทำงานผลิตจริงแล้วจะมีโอกาสผลิตชิ้นงานได้ขนาดอยู่ในขอบเขตตามแบบกำหนดหรือไม่

ขั้นตอนการทำงานของโมดูลย่อย แสดงดังรูปที่ 4.11ซึ่งทำงานโดยวนลูบตรวจสอบค่าในทุกมิติของชิ้นงาน โดยจะตรวจสอบเพื่อหาค่า Path(c) ประจำผิวบอกขนาดด้านผิวอ้างอิง (BPN(c).From)และ Path(c) ประจำผิวบอกขนาดด้านผิววัด (BPN(c).To)จากนั้นเก็บค่าในตัวแปร ToS และFromSตามลำดับ เพื่อส่งเข้าไปในฟังก์ชั่น “Comp1” สำหรับเปรียบเทียบโดยส่ง 2 Path ที่ต้องการหาความสัมพันธ์ ฟังก์ชั่นจะดำเนินการตามขั้นตอน จากนั้นสั่งค่ากลับเป็นตัวแปรสตริงของชื่อผิวที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งเก็บค่าไว้ในตัวแปรอาร์เรย์ finalBP(c) จากนั้นเรียกฟังก์ชั่น “CalTol” โดยส่งค่าในตัวแปร finalBP(c) สำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมทั้งของผิวชิ้นงาน ฟังก์ชั่นดำเนินการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดขึ้นและส่งกลับมาไว้ในตัวแปรอาร์เรย์ TolBP(c)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.11 Flowchart แสดงการทำงานของโมดูลย่อยสำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน

4.4 ฟังก์ชั่นในโปรแกรม

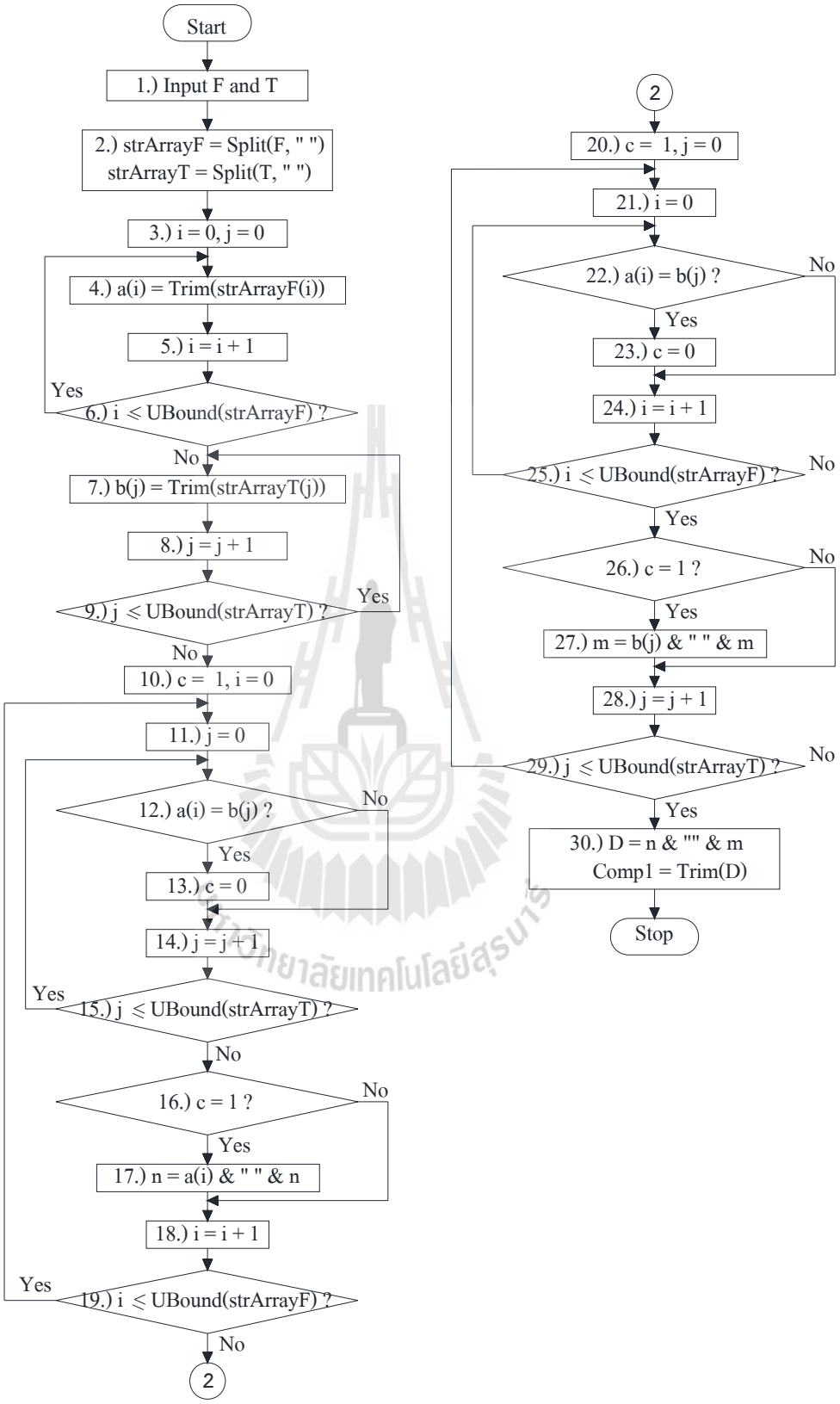
เนื่องจากในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน มีส่วนที่ทำงานซ้ำ ซึ่งส่วนที่ทำงานซ้ำหลายรอบโปรแกรมจะต้องใช้ ฟังก์ชั่น (function) แทนการใช้โมดูลย่อย ซึ่งฟังก์ชั่นเป็นสูตรสำเร็จในการคำนวณ ผู้ใช้งานสามารถออกแบบฟังก์ชันให้ทำงานต่าง ๆ ได้นอกเหนือจากฟังก์ชันที่ Microsoft Excel มีให้ โดยเมื่อสร้างฟังก์ชั่นเสร็จแล้ว ฟังก์ชั่นนี้สามารถเรียกใช้งานได้จากฟังก์ชั่นภายในโปรแกรม Microsoft Excel การเขียนคำสั่งในฟังก์ชั่นจะเขียนคำสั่งให้ส่งค่า (Return)ผลลัพธ์ได้ ซึ่งด้วยเหตุนี้โปรแกรมจึงสร้างฟังก์ชั่นสำหรับใช้งาน 3 ฟังก์ชั่น

4.4.1 ฟังก์ชั่นComp1 (F As String, T As String) สำหรับเปรียบเทียบ Path

ในการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมในโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ของผิวตัดชิ้นงานด้วยการพิจารณาจาก Path ที่โปรแกรมได้สร้างขึ้นก่อนหน้าซึ่งการเปรียบเทียบ Path เป็นเพื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์ของผิวที่เกี่ยวข้องกับผิว 2 ที่ต้องการพิจารณาเหมือนการใช้แผนภาพต้นไม้ โดยมีหลักการ คือนำ Path 2 เส้นมาเปรียบเทียบโดยการมีผิวซ้ำการจะถึงว่าผิวนั้นไม่มีความสัมพันธ์ จากนั้นจะได้เป็นผิวที่มีความสัมพันธ์กัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสม(Whybrew et al., 1990) เช่น ต้องการหาความสัมพันธ์ของผิวจาก A0 ไป D1 จากข้อมูล PathA0 = A0D0 และ Path D1 = D1A1D0 ซึ่งนำ Path เทียบกัน จะได้เป็นเส้นทางที่เกี่ยวข้องกัน คือ A0A1D1 ซึ่งการเทียบ Path จะต้องเกิดขึ้นทุกครั้งที่ต้องการคำนวณความความคลาดเคลื่อนสะสม โปรแกรมสร้างฟังก์ชั่น เพื่อเรียกใช้งานเมื่อต้องการเทียบPath และส่งค่ากลับเป็นผิวตัดที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำไปคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมต่อไป

ซึ่งฟังก์ชั่น “Comp1()” เรียกใช้งานเมื่อต้องการเปรียบเทียบโดยส่ง 2Path ที่ต้องการหาความสัมพันธ์(ฟังก์ชั่นจะรับค่าจากภายนอกแล้วไปเก็บยังตัวแปร F และ T) จากนั้นทำงานดังแสดงในรูปที่4.12 และฟังก์ชั่นส่งค่ากลับเป็นตัวแปรสตริงของชื่อผิวที่มีความสัมพันธ์กัน

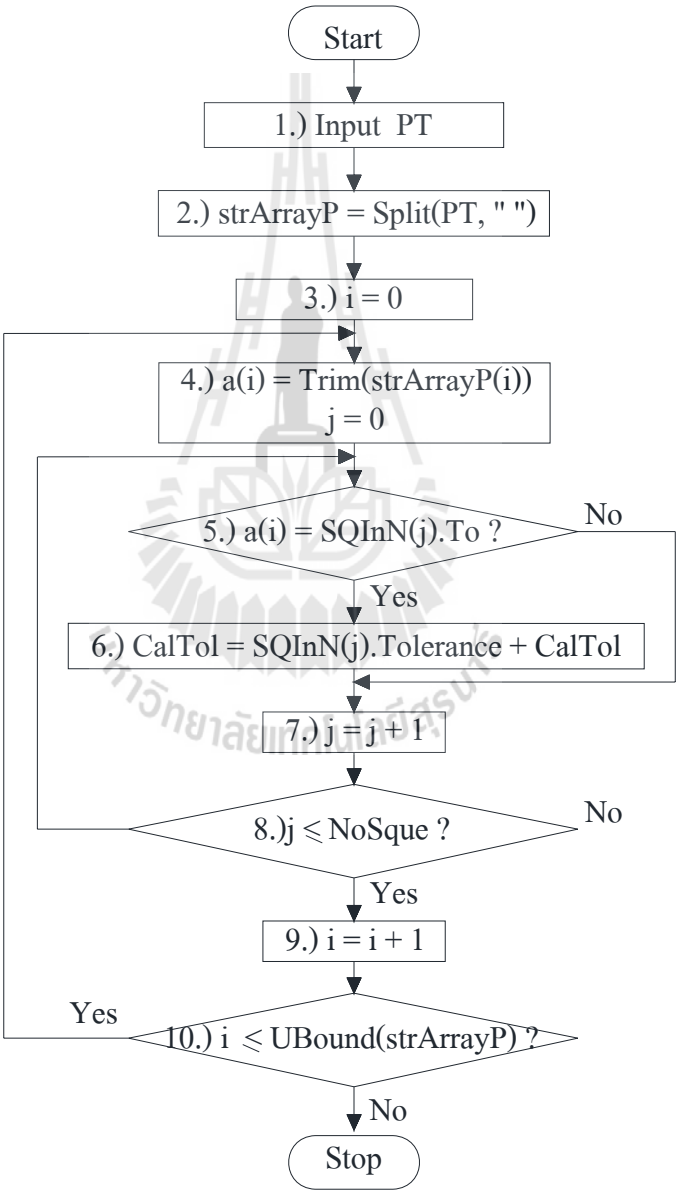
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.12 Flowchart แสดงการทำงานของฟังก์ชั่น Comp1()

4.4.2 ฟังก์ชั่นCalTol(PT As String) สำหรับคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสม

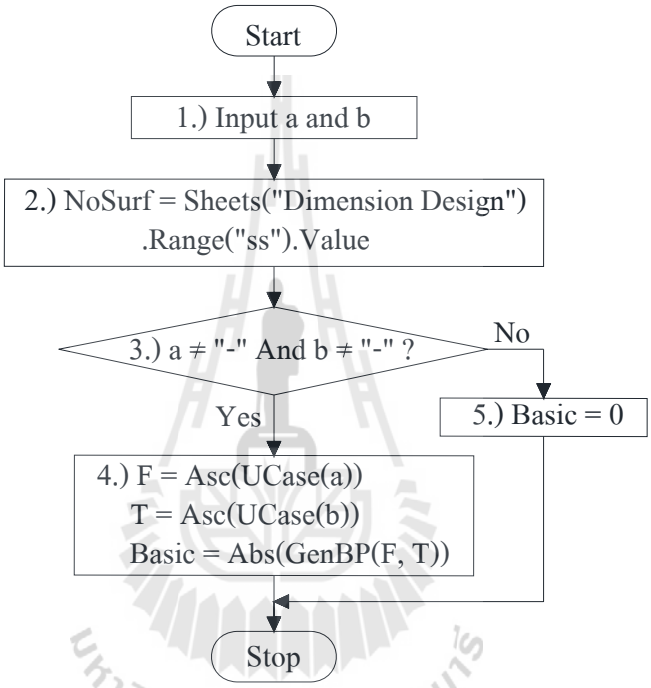
ฟังก์ชั่นชื่อว่า “CalTol()”เรียกใช้งานเมื่อโปรแกรมต้องการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของผิวชิ้นงาน โดยฟังก์ชั่นจะรับจากผิวชิ้นงานที่เกี่ยวข้องที่ได้จากการเทียบ Path แล้วมาเก็บในตัวแปร PTของฟังก์ชั่น จากนั้นโปรแกรมจะทำงานตามขั้นตอนในรูปที่4.13 ส่งกลับมาเป็นค่าความคลาดเคลื่อนสะสม ซึ่งการทำงานของฟังก์ชั่นนี้ จะเป็นการบวกของค่าความคลาดเคลื่อนประจำผิวตัดที่รับมา



รูปที่ 4.13 Flowchart แสดงการทำงานของฟังก์ชั่น CalTol()

4.4.3 ฟังก์ชั่น Basic (a As String, b As String)สำหรับเรียกใช้ค่าขนาดมูลฐานของชิ้นงาน

ฟังก์ชั่น “Basic()” เรียกใช้งานเมื่อโปรแกรมต้องการทราบค่าขนาดมูลฐานของชิ้นงานจากตัวแปรอาร์เรย์ Basic ที่โปรแกรมคำนวณค่าไว้แล้ว โดยฟังก์ชั่นจะรับผิวชิ้นงาน 2 ผิวที่โปรแกรมต้องการทราบขนาดจากนั้นฟังก์ชั่นจะนำค่ามาเก็บในตัวแปร a และ b ของฟังก์ชั่น จากนั้นโปรแกรมจะทำงานตามขั้นตอนในรูปที่4.14ส่งกลับมาเป็นขนาดมูลฐานของชิ้นงาน



รูปที่ 4.14 Flowchart แสดงการทำงานของฟังก์ชั่น Basic()

4.5 โมดูลแสดงแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

หลังจากรับข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์จากผู้ใช้ โปรแกรมสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนจะดำเนินการตามขั้นตอนในแต่ละโมดูลย่อยตามลำดับ เพื่อสร้างและแสดงผลเป็นแผนภูมิความคลาดเคลื่อนบนโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งโมดูลย่อยที่ดำเนินการแสดงผลเป็นแผนภูมิความคลาดเคลื่อนแบ่งแยกเป็น 2 โมดูลย่อยคือ โมดูลย่อยแสดงลูกศรแสดงการตัดชิ้นงานและโมดูลย่อยแสดงค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

4.5.1 โมดูลย่อยในการแสดงลูกศรแสดงการตัดชิ้นงาน

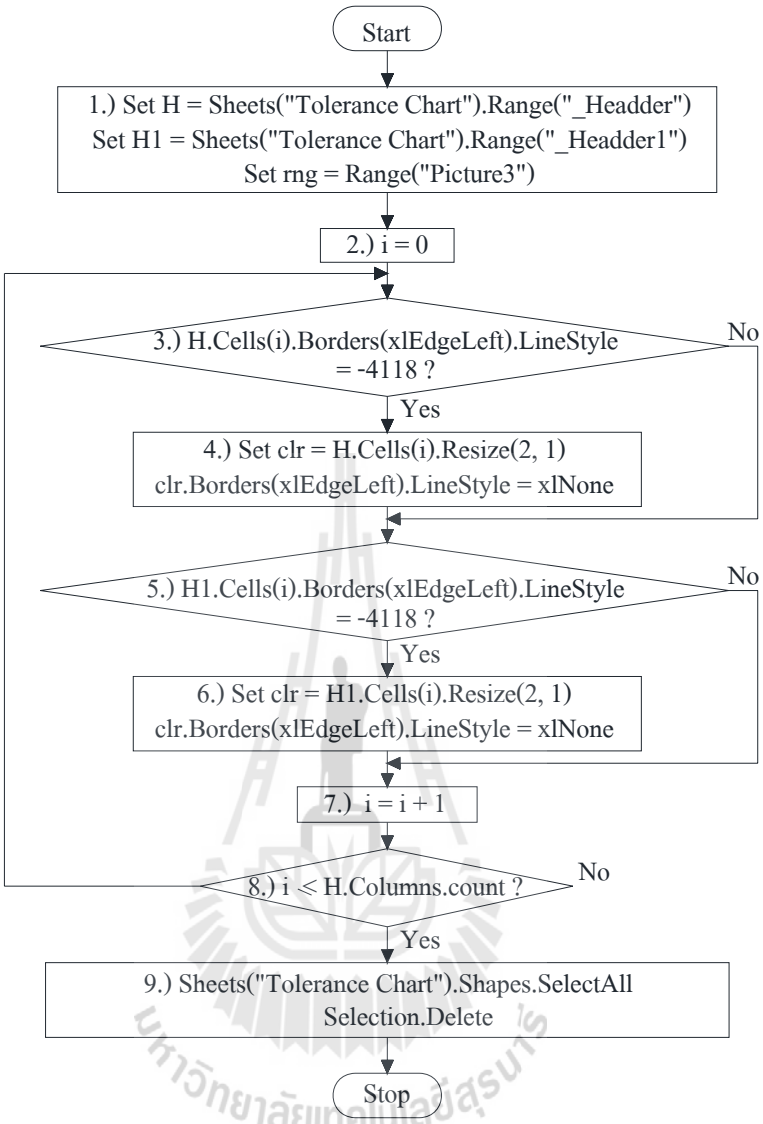
โมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่ลากลูกศรแสดงการตัดชิ้นงาน ตามลำดับของขั้นตอนการตัดชิ้นงานด้วยในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน เป็นการนำเอาข้อมูลที่ได้จากผู้ใช้ มาแสดงผลเป็นลูกศรโดยอัตโนมัติ ซึ่งสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าที่ใช้สำหรับคำนวณและสัมพันธ์กับผิวชิ้นงาน โดยโมดูลย่อยแบ่งการทำงานเป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. โมดูลย่อยสำหรับลบเส้นและลบวัตถุเก่าบนสมุดงาน

โปรแกรมจะทำการลบเส้นและวัตถุเก่าที่มีอยู่บนสมุดงาน “Tolerance Chart” ก่อนดำเนินการสร้างสัญลักษณ์แสดงการตัดและลากเส้นที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ โดยโปรแกรมใช้คำสั่งและขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.15

เป็นการใช้คำสั่งจัดการเซลล์บน VBA สั่งเลือกเซลล์และวัตถุทั้งหมด จากนั้นใช้คำสั่ง Selection.Deleteในขั้นตอน 9 บนแผนการทำงานที่ได้แสดง

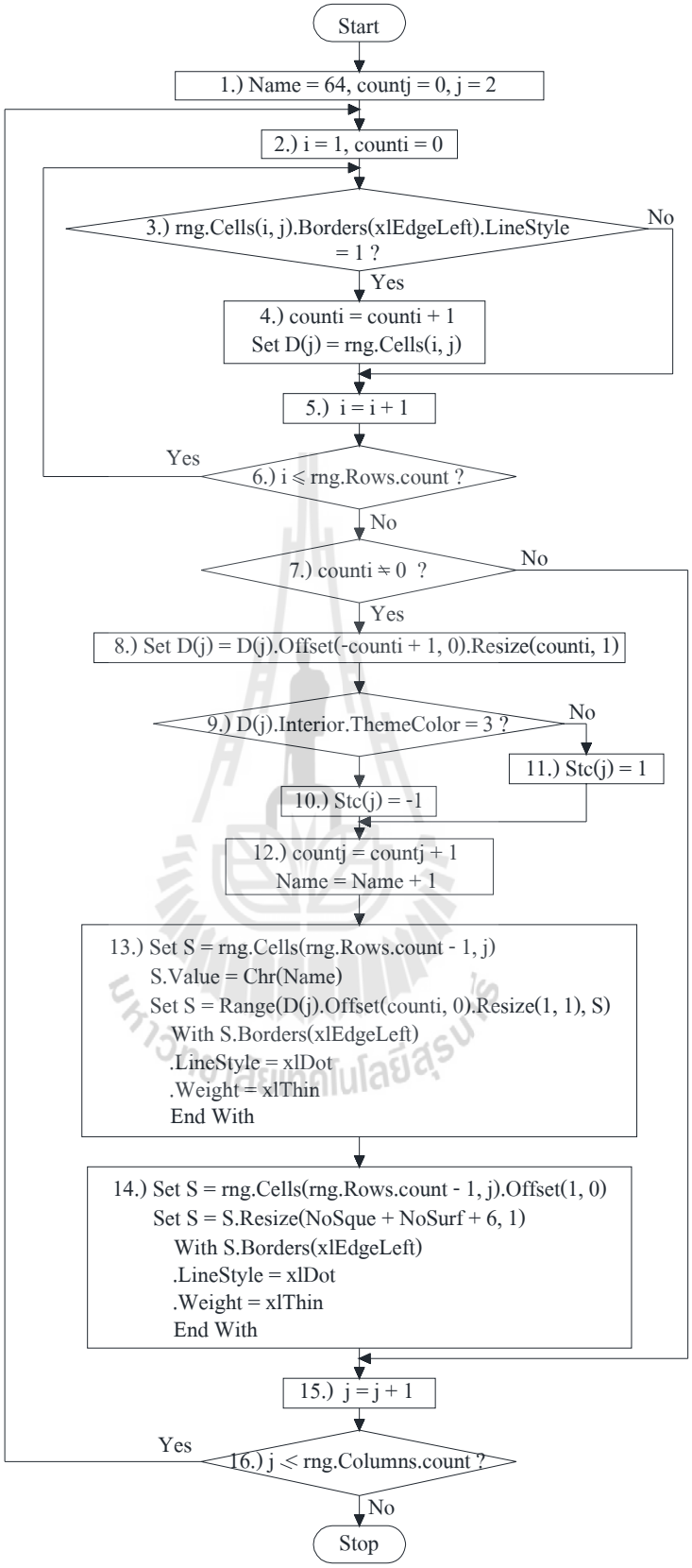
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.15 Flowchart แสดงการทำงานของการลบเส้นและลบวัตถุเก่าที่มีอยู่บนสมุดงาน

2. โมดูลย่อยสำหรับแสดงรูปชิ้นงานและลากเส้นแสดงผิวชิ้นงาน

เนื่องจากในการสร้างลูกศรแสดงการตัดชิ้นงาน มีความสัมพันธ์โดยตรงการรูปภาพของชิ้นงาน โปรแกรมจึงต้องคัดลอกรูปภาพของชิ้นงานจากข้อมูลที่ผู้ใช้สร้างขึ้น มาใช้สำหรับเป็นผิวชิ้นงานอ้างอิงสำหรับแสดงการตัดที่จะเกิดขึ้นในแต่ละผิวตามขั้นตอนผลิตที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งขั้นตอนการทำงานของโมดูลย่อยแสดงในรูปที่ 4.16ทำหน้าที่คัดลอกรูปชิ้นงานและค้นหาตำแหน่งเซลล์ที่เป็นผิวชิ้นงาน (กรอบที่ 3-13) จากนั้นลากเส้นแสดงผิวชิ้นงาน (กรอบที่ 14-15) เพื่อเป็นเซลล์อ้างอิงในการสร้างลูกศรในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 4.16 Flowchart แสดงการทำงานของการแสดงรูปชิ้นงานและลากเส้นแสดงผิวชิ้นงาน

3. โมดูลย่อยสำหรับลากสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการตัดชิ้นงาน

หลังจากที่โปรแกรมได้ข้อมูลเซลล์ประจำผิวชิ้นงานที่ได้ลากเส้นประแสดงในผู้ใช้เห็นในขั้นตอนที่ผ่านมา จากนั้นโปรแกรมจะดำเนินการสร้างลูกศรแสดงการตัดชิ้นงาน ซึ่งแบ่งการทำงาน 2 ขั้นตอน เริ่มจากต้องดำเนินการวาดลูกศรของขั้นตอนแรกในการตัดชิ้นงาน เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ไม่มีผิวอ้างอิงการตัดชิ้นงาน (ดังรูปที่ 4.17) จากนั้นดำเนินการวาดลูกศรตามลำดับการตัดชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ (ดังรูปที่ 4.18)ซึ่งคำสั่งมีสำคัญ (ขั้นตอนข้อ 28) ที่ใช้ในการลากเส้นดังนี้

1. การกำหนดหัวของเส้นให้เป็นจุดกลมใช้คำสั่ง

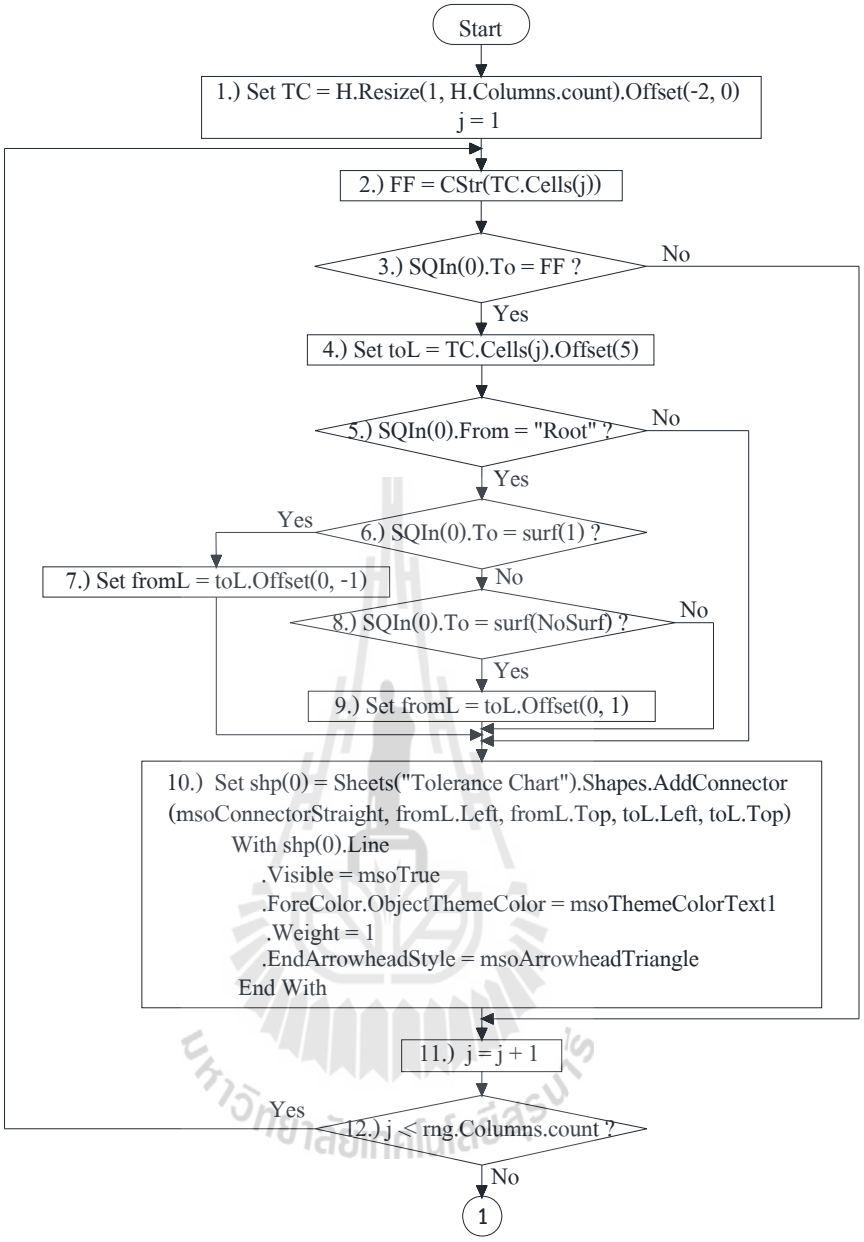
shp(i).Line.BeginArrowheadStyle= msoArrowheadOval

2. การกำหนดปลายของเส้นให้เป็นลูกศรใช้คำสั่ง

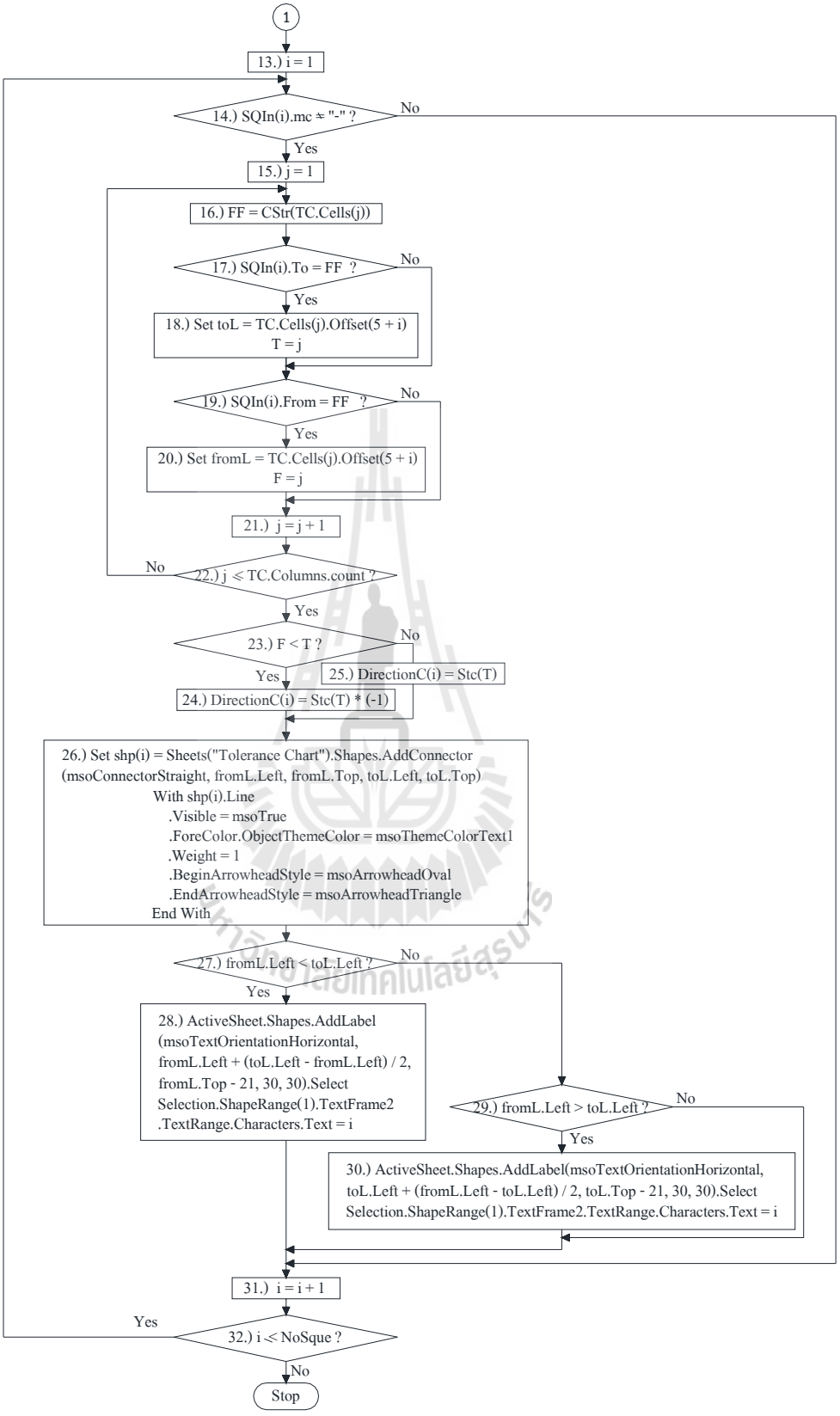
shp(i).Line.EndArrowheadStyle = msoArrowheadTriangle

ซึ่งตำแหน่งในการสั่งลากเส้น (คำสั่งในข้อ 30 และ 32) เป็นไปตามเซลล์ของแต่ละขั้นตอนและแต่ละผิวที่โปรแกรมกำหนด โดยโปรแกรมสั่งให้วาดในตำแหน่ง ซ้ายบนสุดของเซลล์นั้น ๆ เสมอ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



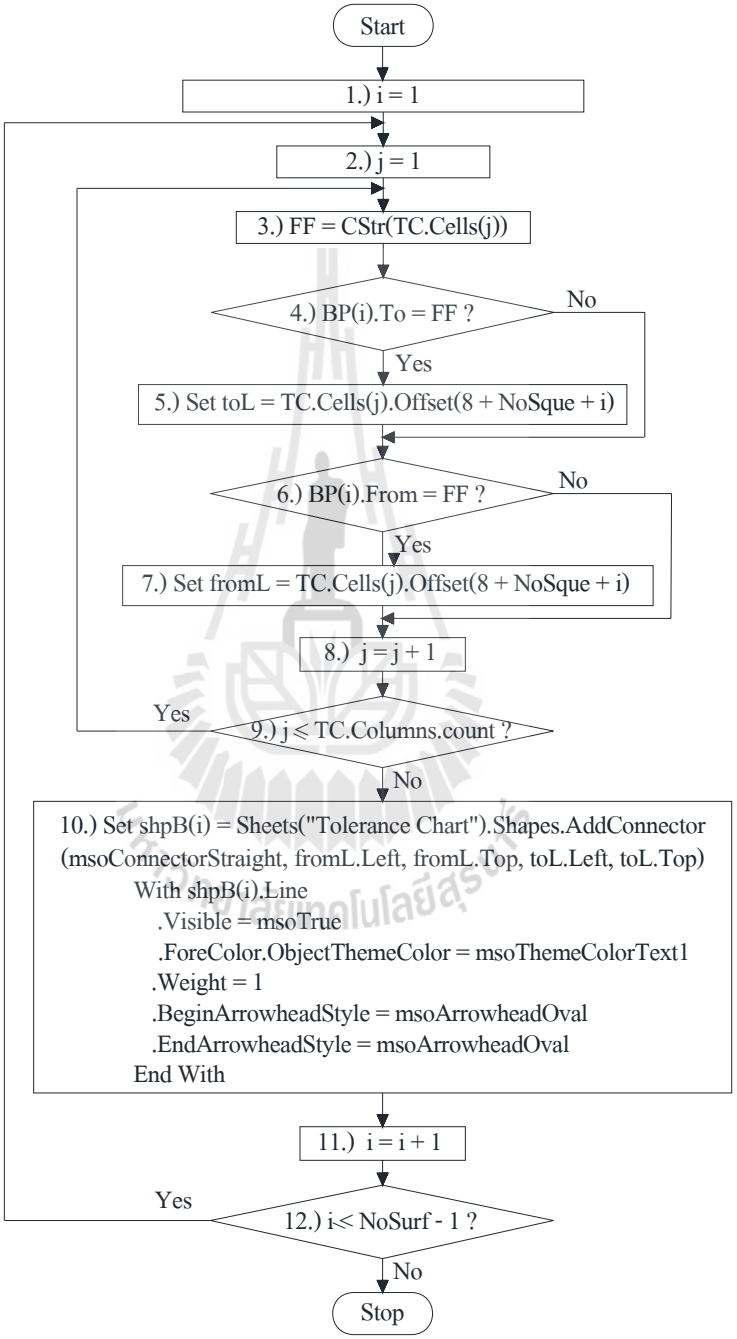
รูปที่ 4.17 Flowchart การลากสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการตัดชิ้นงานในขั้นตอนแรก



รูปที่ 4.18 Flowchart แสดงการทำงานของการลากสัญลักษณ์แสดงขั้นตอนการตัดชิ้นงาน(ต่อ)

4. โมดูลย่อยสำหรับลากสัญลักษณ์แสดงมิติในแบบของชิ้นงาน

หลังจากที่โปรแกรมลากลูกศรแสดงขั้นตอนการตัดชิ้นงาน จากนั้นโปรแกรมจะดำเนินการลากเส้นแสดงมิติของชิ้นงาน (ดังรูปที่ 4.19) ซึ่งสัญลักษณ์ที่ใช้แทนมิติชิ้นงานเป็นเส้นตรงที่หัวเส้นและท้ายเส้นเป็นจุดกลม โดยคำสั่งที่ใช้ในการลากเส้นคือคำสั่งในกรอบที่10



รูปที่ 4.19 Flowchart แสดงการทำงานของการลากสัญลักษณ์แสดงมิติชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์

4.5.2 โมดูลย่อยสำหรับแสดงค่าบนแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

โมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่สำหรับแสดงค่าบนแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ซึ่งจะเป็นการแสดงผลค่าที่เกี่ยวข้องในแผนภูมิความคลาเคลื่อนทั้งหมด โดยโมดูลย่อยนี้จะทำงานโดยการเลือกเซลล์ต่าง ๆ ที่ต้องการแสดงจากนั้นแสดงค่า ซึ่งข้อมูลที่แสดงมีดังต่อไปนี้

1. Operation number ของแต่ขั้นตอนการตัด
2. Mechine used หรือชนิดของเครื่องจักรที่ใช้ผลิต (ถ้ามี)
3. Referrance cut หรือ ผิวตัดชิ้นงาน (โปรแกรมเก็บค่าไว้ในตัวแปร SQInN(i).To)
4. ขนาดของ Working dimension (โปรแกรมเก็บค่าไว้ในตัวแปร BasicCut(i))
5. ความคลาดเคลื่อนของ Working dimension (โปรแกรมเก็บค่าไว้ในตัวแปร SQInN(i).Tolerance)
6. ขนาดของ Stock removal (โปรแกรมเก็บค่าไว้ในตัวแปร StockRB(i))
7. ความคลาดเคลื่อนของ Stock removal(โปรแกรมเก็บค่าไว้ในตัวแปร TolP(i))
8. ความคลาดเคลื่อนของมิติชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ (โปรแกรมเก็บค่าไว้ในตัวแปร TolBP(i))

4.6 โมดูลสำหรับแก้ไขแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (improvement module)

ส่วนของการแก้ไขเมื่อโปรแกรมแสดงผล แล้วค่าความคลาดเคลื่อนในมิติของชิ้นงานที่ได้การวิเคราะห์มีค่ามากกว่าที่แบบชิ้นงานกำหนด ซึ่งแต่แสดงให้เห็นว่า เกิดปัญหาความคลาดเคลื่อนสะสมจากขั้นตอนการผลิต ซึ่งขั้นตอนการแก้ไขปัญหานี้ มี 3 วิธี ดังนี้

1. ปรับลดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้นให้แต่ละกระบวนการผลิต
2. ปรับเปลี่ยนลำดับขั้นตอนในการผลิต
3. ปรับเปลี่ยนแบบชิ้นงาน

ซึ่งโมดูลย่อยนี้ทำหน้าที่ ขั้นตอนการแก้ไขแผนภูมิความคลาดเคลื่อนในวิธีที่ 1 ซึ่งเป็นเบื้องต้น เป็นปรับลดค่าความคลาดเคลื่อนของกระบวนการผลิต ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนค่าในคอลัมน์ ±Tol/2 ของ Working dimension ได้โดยตรง ซึ่งเมื่อโปรแกรมตรวจพบว่ามีการเปลี่ยนแปรของค่าโปรแกรมจะดำเนินการคำนวณค่าต่าง ๆ ใหม่และแสดงผลให้เห็นทันที ซึ่งถ้าผู้ใช้ไม่สามารถปรับลดค่าได้แล้ว ผู้ใช้สามารถย้อนกลับเพื่อปรับเปลี่ยนลำดับการตัดชิ้นงานใหม่ได้ แต่ถ้ายังไม่ได้แก้ไขด้วยวิธีอื่นต่อไป

4.7 สรุป

ในการดำเนินงานของโปรแกรมสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน เป็นการทำงานภายใต้การเชื่อมโยงกันของโมดูลย่อยและฟังก์ชั่นการทำงานเฉพาะ ดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้ ซึ่งแต่ละโมดูลสามารถสรุปการทำงานได้เป็นแผนภาพการทำงาน (flow chart) ที่แสดงเงื่อนไขการสั่งงานและลำดับการพิจารณาโดยละเอียดในแต่ละขั้นตอน ซึ่งโมดูลย่อยและฟังก์ชั่นส่วนใหญ่เป็นการเปลี่ยนการสร้างและการคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยมือตามหลักการแผนภาพต้นไม้เป็นการดำเนินงานบนคอมพิวเตอร์ และโมดูลย่อยบางส่วน ทำหน้าที่สำหรับการแสดงข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลแล้ว ในอยู่ในรูปลักษณ์ของแผนภูมิความคลาดเคลื่อนบนสมุดงานโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft Excel)

บทที่ 5
ทดสอบโปรแกรม

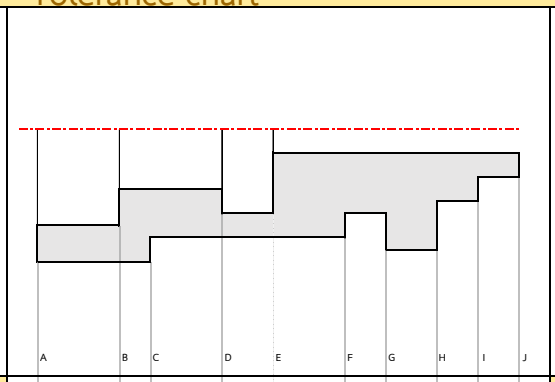
การทดสอบการทำงานของโปรแกรมใช้วิธีการเทียบผลลัพธ์กับการคำนวรด้วยมือ ในบทนี้จะแสดงตัวอย่างของการคำนวณด้วยมือเพื่อเปรียบกับผลจากการใช้โปรแกรม แต่เนื่องจากวิธีการการคำนวณในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนมีหลายวิธี ดังได้กล่าวในรายละเอียดในบทที่ 2 แล้ว การทดสอบโปรแกรมในที่นี้จึงใช้ทุกวิธี แต่สำหรับตัวอย่างที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ใช้วิธี Rooted-tree graph ส่วนวิธีอื่น ๆ ได้แสดงในภาคผนวก จ

5.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

ในการทดสอบโปรแกรมในบทนี้ใช้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว (รูปที่ 5.1) โดยมีลำดับการตัดชิ้นงาน 23 ขั้นตอน ตามที่แสดงในส่วนกลางของแผนภูมิ สามารถสร้างเป็นแผนภาพต้นไม้(rooted-tree graph)ได้ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งผิวตัดสุดท้ายของแต่ละผิวชิ้นงาน คือ A4, B2, C0, D0, E2, F1, G1, H2, I0 และ J2 คำนวณค่าขนาดและความคลาดเคลื่อนของเนื้อโลหะที่โดนตัดออกไป (tolerance of stock removal) ด้วยมือในแต่ละขั้นตอนดังตารางที่ 5.1ซึ่งเป็นค่าในสดมภ์±Tol./2และ Basic ของสดมภ์ Stock Removal

ตารางที่ 5.2 เป็นการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของมิติในแบบชิ้นงานในสดมภ์ Resultant จากขนาดมูลฐานตามแบบชิ้นงาน สามารถคำนวณขนาดมูลฐานทั้งหมดได้ผลดังรูปที่ 5.3 ซึ่งใช้สำหรับคำนวณค่าขนาดมูลฐานขณะตัด (working dimension) ในแต่ละขั้นตอนดังตารางที่ 5.3

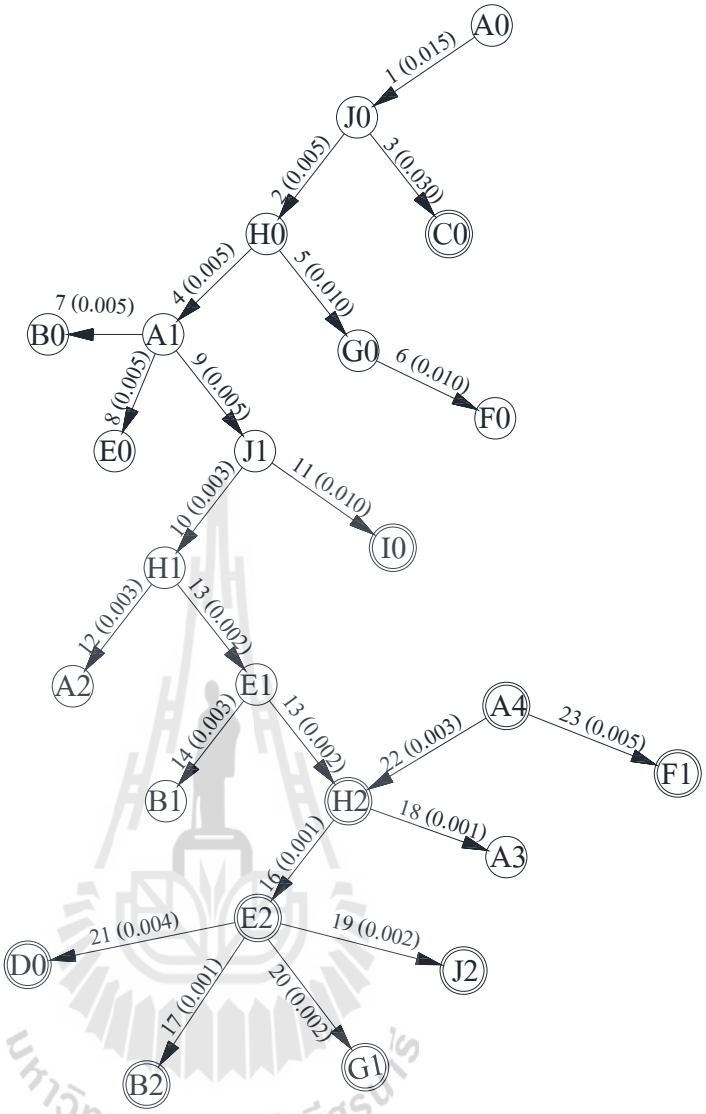
Tolerance chart



OP No.	Machine used	Reference Cut	Working Dim. Basic	Working Dim. ±Tol/2	Stock Removal Basic	Stock Removal ±Tol/2
		A0	0.00	0.000	0.00	Solid Cut
		J0	76.35	0.015	0.00	Solid Cut
		H0	19.47	0.005	0.00	Solid Cut
		C0	60.45	0.030	0.00	Solid Cut
		A1	56.63	0.005	0.25	0.025
		G0	16.72	0.010	0.00	Solid Cut
		F0	14.97	0.010	0.00	Solid Cut
		B0	10.20	0.005	0.00	Solid Cut
		E0	21.21	0.005	0.00	Solid Cut
		J1	75.87	0.005	0.23	0.015
		H1	19.01	0.003	0.23	0.013
		I0	15.22	0.010	0.00	Solid Cut
		A2	56.63	0.003	0.22	0.011
		E1	35.41	0.002	0.23	0.015
		B1	11.01	0.003	0.24	0.018
		H2	35.21	0.002	0.21	0.004
		E2	35.00	0.001	0.21	0.003
		B2	11.00	0.001	0.21	0.007
		A3	56.21	0.001	0.22	0.008
		J2	54.00	0.002	0.22	0.010
		G1	18.00	0.002	0.26	0.030
		D0	3.00	0.004	0.00	Solid Cut
		A4	56.00	0.003	0.21	0.004
		F1	24.00	0.005	0.29	0.045

Bule Print Basic	Bule Print ±Tol/2	Result Basic	Result ±Tol/2
10.00	0.100	10.00	0.005
15.00	0.060	15.00	0.055
3.00	0.050	3.00	0.004
21.00	0.050	21.00	0.004
9.00	0.060	9.00	0.060
15.00	0.020	15.00	0.011
17.00	0.010	17.00	0.003
4.00	0.020	4.00	0.017
15.00	0.020	15.00	0.020

รูปที่ 5.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรม



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หมายเหตุ

ตัวเลขหน้าวงเล็บ คือ Cut No.

ตัวเลขในวงเล็บ คือ ±Tol./2

โหนดวงกลมซ้อน คือ ผิวตัดสุดท้าย

รูปที่ 5.2แผนภาพต้นไม้

ตารางที่ 5.1ตารางคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของเนื้อโลหะที่โดนตัดออกไป

Line. No.	Machining Sequence	Node Involved	Line Involved in Rooted-Tree Graph (Tolerance Stack)	±Tol./2	Basic Size
0	A0	-	-	0	Solid cut
1	A0-H0	-	-	0	Solid cut
2	J0-H0	-	-	0	Solid cut
3	J0-C0	-	-	0	Solid cut
4	H0-A1	A0-A1	Line1,2,4 (0.005+0.005+0.015)	0.025	0.25
5	H0-G0	-	-	0	Solid cut
6	G0-F0	-	-	0	Solid cut
7	A1-B0	-	-	0	Solid cut
8	A1-E0	-	-	0	Solid cut
9	A1-J1	J0-J1	Line2,4,9 (0.005+0.005+0.005)	0.015	0.23
10	J1-H1	H0-H1	Line4,9,10 (0.005+0.005+0.003)	0.013	0.23
11	J1-I0	-	-	0	Solid cut
12	H1-A2	A1-A2	Line9,10,12 (0.005+0.003+0.003)	0.011	0.22
13	H1-E1	E0-E1	Line8,9,10,13 (0.005+0.005+0.003+0.002)	0.015	0.23
14	E1-B1	B0-B1	Line7, 9, 10, 13, 14 (0.005+0.005+0.003+0.002+0.003)	0.018	0.24
15	E1-H2	H1-H2	Line13, 15 (0.002+0.002)	0.004	0.21
16	H2-E2	E1-E2	Line15, 16 (0.002+0.001)	0.003	0.21
17	E2-B2	B1-B2	Line14, 15, 16, 17 (0.003+0.002+0.001+0.001)	0.007	0.21

ตารางที่ 5.1 ตารางคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของเนื้อโลหะที่โดนตัดออกไป (ต่อ)

Line. No.	Machining Sequence	Node Involved	Line Involved in Rooted-Tree Graph (Tolerance Stack)	±Tol./2	Basic Size
18	H2-A3	A2-A3	Line12, 13, 15, 18 (0.003+0.002+0.002+0.001)	0.008	0.22
19	E2-J2	J1-J2	Line10, 13, 15, 16, 19 (0.003+0.002+0.002+0.001+0.002)	0.010	0.22
20	E2-G1	G0-G1	Line5, 4, 9, 10, 13, 15, 16, 20 (0.010+0.005+0.005+0.003+0.002+ 0.002+0.001+0.002)	0.030	0.26
21	E2-D0	-	-	0	Solid cut
22	H2-A4	A3-A4	Line18, 22 (0.001+0.003)	0.004	0.21
23	A4-F1	F0-F1	Line6, 5, 4, 9, 10, 13, 15, 22, 23 (0.010+0.010+0.005+0.005+0.003+ 0.002+0.002+0.003+0.005)	0.045	0.29

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.2 เป็นการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของมิติในแบบชิ้นงานในสดมภ์ Resultant จากขนาดมูลฐานตามแบบชิ้นงาน สามารถคำนวณขนาดมูลฐานทั้งหมดได้ผลดังรูปที่ 5.3 ซึ่งใช้สำหรับคำนวณค่าขนาดมูลฐานขณะตัด (working dimension) ในแต่ละขั้นตอนดังตารางที่ 5.3

	A4	B2	C0	D0	E2	F1	G1	H1	I0	J2
A4	0	(10)	(15)	18	(21)	24	39	56	60	75
B2	(-10)	0	5	8	11	14	29	46	50	65
C0	(-15)	-5	0	3	6	(9)	24	41	45	60
D0	-18	-8	-3	0	(3)	6	21	38	42	57
E2	(-21)	-11	-6	(-3)	0	3	18	35	39	54
F1	-24	-14	(-9)	-6	-3	0	(15)	32	36	51
G1	-39	-29	-24	-21	-18	(-15)	0	(17)	21	36
H1	-56	-46	-41	-38	-35	-32	(-17)	0	(4)	19
I0	-60	-50	-55	-52	-49	-46	-31	(-4)	0	(15)
J2	-75	-65	-60	-57	-54	-51	-36	-19	(-15)	0

รูปที่ 5.3เมทริกขนาดมูลฐานของชิ้นงานที่ได้จากแบบชิ้นงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 5.2ตารางคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของมิติในแบบชิ้นงาน

No.	Blueprint Dimension	Line Involved in Rooted-Tree Graph (Tolerance Stack)	Total (±Tol./2)
1	A4-B2	Line22, 16, 17 (0.003+0.001+0.001)	0.005
2	A4-C0	Line22, 15, 13, 10, 9, 4, 2, 3 (0.003+0.002+0.002+0.003+0.005+0.005+0.005+0.030)	0.055
3	D0-E2	Line21 (0.004)	0.004
4	A4-E2	Line16, 22 (0.001+0.003)	0.004
5	C0-F1	Line3, 2, 4, 9, 10, 13, 15, 22, 23 (0.030+0.005+0.005+0.005+0.003+0.002+0.002+0.003 +0.005)	0.060
6	F1-G1	Line23, 22, 16, 20 (0.005+0.003+0.001+0.002)	0.011
7	G1-H2	Line16, 20 (0.001+0.002)	0.003
8	H2-I0	Line15, 13, 10, 11 (0.002+0.002+0.003+0.010)	0.017
9	I0-J2	Line11, 10, 13, 15, 16, 19 (0.010+0.003+0.002+0.002+0.001+0.002)	0.020

ตารางที่ 5.3ตารางแสดงการคำนวณ Working Dimension

Line. No.	Machining Sequence	Method of calculate Working Dimension |Basic size| +/- (Basic size of stock removal,Cut No.)	Working Dimension
23	A4-F1	|A4-F1| + 0 |24|	24.00
22	H2-A4	|H2-A4| + 0 |-56|	56.00
21	E2-D0	|E2-D0| + 0 |-3|	3.00
20	E2-G1	|E2-G1| + 0 |18|	18.00
19	E2-J2	|E2-J2| + 0 |54|	54.00
18	H2-A3	|H2-A4| + (**A4**-A3,22) |-56| + 0.21	56.21
17	E2-B2	|E2-B2| + 0 |-11|	11.00
16	H2-E2	|H2-E2| + 0 |-35|	35.00
15	E1-H2	|E2-H2| + (**E2**-E1,16) |35| + 0.21	35.21
14	E1-B1	|E2-B2| +((**E2**-E1,16)-(**B2**-B1,17)) |-11| + (0.21+0.21)	11.00
13	H1-E1	|H2-E2| +((**H2**-H1,15)+ (**E2**-E1,16)) |-35| + (0.21+0.21)	35.42
12	H1-A2	|H2-A4| + ((**H2**-H1,15)+(**A4**-A3,22)+(**A3**-A2,18)) |-56| + (0.21+0.21+0.22)	56.64
11	J1-I0	|J2-I0| + (**J2**-J1,19) |-15| + 0.22	15.22

ตารางที่ 5.3ตารางแสดงการคำนวณ Working Dimension (ต่อ)

Line. No.	Machining Sequence	Method of calculate Working Dimension |Basic size| +/- (Basic size of stock removal,Cut No.)	Working Dimension
10	J1-H1	|J2-H2| + ((**J2**-J1,19) -(H2-H1,15)) |-19| + (0.22 - 0.21)	19.01
9	A1-J1	|A4-J2| + ((**A4**-A3,22)+(**A3**-A2,18)+(**A2**-A1,12)+(**J2**-J1,19)) |75| + (0.21+0.22+0.22+0.22)	75.87
8	A1-E0	|A4-E2| + ((**A4**-A3,22)+(**A3**-A2,18)+(**A2**-A1,12)-(**E2**-E1,16)-(**E1**-E0,13) |21| + (0.21+0.22+0.22-0.21-0.23)	21.21
7	A1-B0	|A4-B2| + ((**A4**-A3,22)+(**A3**-A2,18)+(**A2**-A1,12)-(**B2**-B1,17)-(**B1**-B0,14)) |10| + (0.21+0.22+0.22-0.21-0.24)	10.20
6	G0-F0	|G1-F1| + ((**G1**-G0,20)-(**F1**-F0,23)) |-15| + (0.26-0.29)	14.97
5	H0-G0	|H2-G1| + (-(**H2**-H1,15)+(**H1**-H0,10)+(**G1**-G0,20)) |-17| + (-0.21+0.23+0.26)	16.72
4	H0-A1	|H2-A4| + ((**H2**-H1,15)-(**H1**-H0,10)+((**A4**-A3,22)+(**A3**-A2,18)+(**A2**-A1,12) |-56| + (0.21-0.23+0.21+0.22+0.22)	56.63
3	J0-C0	|J2-C0| + ((**J2**-J1,19)+(**J1**-J0,9)) |-60| + (0.22+0.23)	60.45
2	J0-H0	|J2-H2| + ((**J2**-J1,19)+(**J1**-J0,9)-(**H2**-H1,15)+(**H1**-H0,10)) |-19| + (0.22+0.23-0.21+0.23)	19.47
1	A0-J0	|A4-J2| + ((**A4**-A3,22)+(**A3**-A2,18)+(**A2**-A1,12))+(**A1**-A0,4)+(**J2**-J1,19)+(**J1**-J0,9)) |75| + (0.21+0.22+0.22+0.25+0.22+0.23)	76.35

5.2 สรุป

จากการคำนวณค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนโดยอาศัยแผนภาพต้องไม้ จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนสะสมได้ผลตรงกับการดำเนินงานจากโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน แต่ในค่าขนาดมูลฐานขณะตัดชิ้นงานได้ผลต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการปัดเศษทศนิยมของการคำนวณมือเท่านั้น ซึ่งจากการทดสอบโปรแกรมทั้งหมด แสดงให้เห็นได้ว่าโปรแกรมสามารถสร้างและคำนวณค่าในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนได้ถูกต้องตามหลักการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุป

งานวิจัยนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้คือ การพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้สำหรับสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนโดยใช้โปรแกรมตารางจัดการ โดยอาศัยเครื่องมือสำเร็จรูปต่าง ๆ ของโปรแกรมตารางจัดการ และการสร้างชุดคำสั่งสำหรับใช้งานเฉพาะทาง โดยใช้หลักการเขียนของโปรแกรม visual basic มาพัฒนาเพื่อให้เกิดระบบงานสำหรับการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนการตัดตามแผนการตัดโลหะแบบทดลองคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนสะสม (tolerance stacks) ของมิติในแต่ละขั้นตอนการตัด และแสดงผลออกเป็นแผนภูมิความคลาดเคลื่อน โดยอาศัยหลักการแผนภาพต้นไม้ ซึ่งโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนจะใช้สมุดงานและเซลล์ของโปรแกรมสำหรับรับข้อมูล แก้ไขข้อมูล และแสดงผลออกมาเป็นแผนภูมิความคลาดเคลื่อนได้แม่นยำ และรวดเร็วเลยมากขึ้น

นอกจากนี้ทำให้ทราบถึงศักยภาพของตารางจัดการในการประยุกต์ใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในงานด้านการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถใช้งานแต่สามารถทำได้ดีมาก ถ้ามีการเชื่อมโยงการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเข้ากันเครื่องมือสำเร็จจากโปรแกรมที่มีอยู่ให้มากขึ้น ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น

6.2 ข้อจำกัดของโปรแกรม

เนื่องจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้วิธีการสร้างและการคำนวณโดยสร้างชุดคำสั่งสำหรับใช้งานเฉพาะทางเพื่อสร้างและคำนวณมากเกินไป ทำให้โปรแกรมต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานค่อยข้างมาก เนื่องจากต้องดำเนินการรันโปรแกรมตามขั้นตอนที่เขียนโปรแกรมกำหนดไว้

โปรแกรมเขียนแผนภูมิความคลาดเคลื่อนในงานวิจัยนี้ มีขอบเขตสำหรับงานตัดโลหะ (machined part) เท่านั้น ไม่รวมการเปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องจากการทำการอบชุบ (heat treatment) หรือการเคลือบผิวในระหว่างขั้นตอนการตัด ใช้เฉพาะชิ้นงานตัดโลหะสองมิติที่มีการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete machine part) เท่านั้น โดยมีขั้นตอนการผลิตด้วยกระบวนการตัดโลหะพื้นฐาน

(basic machining processes) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกลึง (turning operation) และการเจียรนัย (grinding operation)

6.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

การพัฒนาโปรแกรมถือได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ แต่ก็ยังมีหลายส่วนที่สามารถนำไปพัฒนาให้ดีขึ้นได้ เช่น ในส่วนของการรับข้อมูลรูปภาพและมิติชิ้นงาน อาจเชื่อมโยงกับโปรแกรมเฉพาะทาง เพื่ออ่านรูปจากไฟล์งานที่เป็นแบบชิ้นงานจริงได้เลย ในส่วนของการคำนวณค่าต่าง ๆ ในแผนภูมิความคลาดเคลื่อนต้องดำเนินการตามคำสั่งเฉพาะ ทำให้ไม่สามารถแก้ไขย้อนกลับในแต่ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมได้ ทำให้เสียเวลาให้การรันโปรแกรมใหม่ ในกรณีที่ต้องการแก้ไขแผนภูมิ เพื่อให้โปรแกรมใช้งานได้รวดเร็วและใช้ศักยภาพของโปรแกรมตารางจัดการอย่างเต็มที่ อาจต้องพัฒนาโปรแกรมโดยสร้างโปรแกรม สร้างคำสั่งโดยเลือกใช้เครื่องมือ เซลล์ หรือฟังก์ชั่นสำเร็จรูปที่โปรแกรมตารางการมีอยู่ จะทำให้โปรแกรมใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

ตารางเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (ISO 286-2)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ก1 แสดงค่าของเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสำหรับขนาดมูลฐานตั้งแต่ 0-3150 mm[1)](ISO 286-2)

Basic Size mm		Standard tolerance grades																	
		IT1[2)]	IT2[2)]	IT3[2)]	IT4[2)]	IT5[2)]	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14[3)]	IT15[3)]	IT16[3)]	IT17[3)]	IT18[3)]
Above	Up to and including	Tolerances																	
		μm								mm									
-	3[3)]	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0.1	0.14	0.25	0.4	0.6	1	1.4
3	6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0.12	0.18	0.3	0.48	0.75	1.2	1.8
6	10	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0.15	0.22	0.36	0.58	0.9	1.5	2.2
10	18	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0.18	0.27	0.43	0.7	1.1	1.8	2.7
18	30	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0.21	0.33	0.52	0.84	1.3	2.1	3.3
30	50	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0.25	0.39	0.62	1	1.6	2.5	3.9
50	80	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0.3	0.46	0.74	1.2	1.9	3	4.6
80	120	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0.35	0.54	0.87	1.4	2.2	3.5	5.4
120	180	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0.4	0.6	1	1.6	2.5	4	6.3
180	250	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0.46	0.72	1.15	1.85	2.9	4.6	7.2
250	315	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0.52	0.81	1.3	2.1	3.2	5.2	8.1
315	400	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0.57	0.89	1.4	2.3	3.6	5.7	8.9
400	500	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0.63	0.97	1.55	2.5	4	6.3	9.7
500	630[2)]	9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0.7	1.1	1.75	2.8	4.4	7	11
630	800[2)]	10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0.8	1.25	2	3.2	5	8	12.5
800	1000[2)]	11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0.9	1.4	2.3	3.6	5.6	9	14
1000	1250[2)]	13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1.05	1.65	2.6	4.2	6.6	10.5	16.5
1250	1600[2)]	15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1.25	1.95	3.1	5	7.8	12.5	19.5
1600	2000[2)]	18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1.5	2.3	3.7	6	9.2	15	23
2000	2500[2)]	22	30	41	55	78	110	175	380	440	700	1100	1.75	2.8	4.4	7	11	17.5	28
2500	3150[2)]	26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1350	2.1	3.3	5.4	8.6	13.5	21	33

1) Value for standard tolerance grades IT01 and IT0 for basic sizes less than or equal to 500 mm are given in annex A table 5.
2) Value for standard tolerance grades IT1 and IT5 (incl.) for basic sizes over 500 mm are included for experimental use.
3) Standard tolerance grades IT14 and IT18 (incl.) shall not be used for basic sizes less than or equal to 1 mm.

ภาคผนวก ข

คู่มือการใช้งานโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
แผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Tolerance Chart)

1.1.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อน

แผนภูมิความคลาดเคลื่อนคือ แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงมิติในการตัดชิ้นงานตามแผนลำดับการตัดชิ้นงาน โดยแผนภูมิความคลาดเคลื่อนเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับตรวจสอบเพื่อยืนยันว่าแผนลำดับการตัดชิ้นงานนั้น สามารถผลิตชิ้นงานแล้วได้ชิ้นงานตามขนาดแล้วความคลาดเคลื่อนตามที่แบบกำหนดไว้ ไม่มีปัญหาความคลาดเคลื่อนสะสม (Tolerance trackup)เกิดขึ้น

หลักการที่ใช้สำหรับสร้างและการคำนวณแผนภูมิยาก ซับซ้อนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากจะมีการทำงานซ้ำ ๆ และเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการคำนวณง่ายจึงได้ประยุกต์ใช้ข้อดีของโปรแกรมประเภท Spreadsheet(Microsoft Excel)โดยการใช้ VBA (Visual Basic in Application) เข้ามาช่วยในสร้างและการคำนวณแผนภูมิในสามารถใช้งานได้ง่ายและเร็วขึ้น

1.1.2 ข้อมูลสำหรับการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

ในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนนั้น เป็นเครื่องมือสำคัญที่ให้วิเคราะห์ลำดับการผลิตชิ้นงานก่อนการผลิตชิ้นงานจริง ซึ่งมีในการสร้างมีข้อมูลต้องใช้ดังต่อไปนี้

1. แบบ(drawing) ของชิ้นงานที่ต้องการผลิต ซึ่งแบบของชิ้นงานจะเป็นวัตถุประสงค์ในการวางแผนการผลิตชิ้นงาน (process planning) ที่สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามแบบกำหนด

2. ลำดับการตัดชิ้นงาน (machining sequence) เป็นแผนการผลิตชิ้นงานที่แสดงลำดับในการผลิตชิ้นงานแต่ละขั้นตอนอย่างชัดเจน

3. ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ(machining tolerance) ที่ใช้ให้การผลิต หรือ ชนิดเครื่องมือ (machine used) ที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการตัดชิ้นงาน

บทที่ 2
Template(แม่แบบ) ในการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

2.1 รูปแบบและลักษณะของ Template (แม่แบบ)

Tolerance Charting Program เป็น Excel File ที่เป็นรูปแบบตารางสำเร็จรูปที่มีการฝัง Macro สำหรับสร้างและคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ซึ่งมีรูปแบบตารางเพื่อการคำนวณไว้ให้ครบถ้วนเพียงผู้ใช้กรอกข้อมูลสามารถนำไปใช้ได้ทันที เป็น File Template ที่สามารถติดตั้งภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Window 7 ขึ้นไป และ Microsoft Excel2007 ขึ้นไป

ลักษณะไฟล์เป็น(.xltm) เป็นไฟล์แบบเปิดใช้ Macro สำหรับ Excel Templateใน Excel Versions 2007-2013 โดยเก็บโค้ดVBA หรือMacro SheetExcel 4.0 (.xlm)

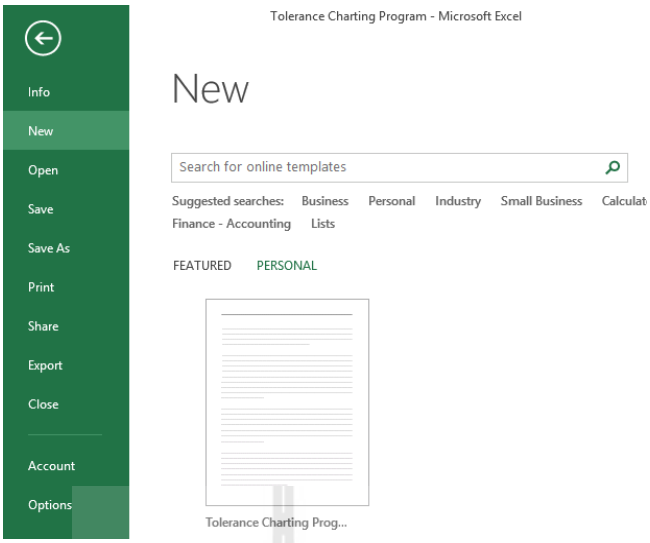
2.2 ขั้นตอนการใช้แม่แบบเพื่อสร้างสมุดงานTolerance Charting Program

2.2.1 การสร้างไฟล์ต้นแบบเป็น Template (แม่แบบ)

1. เปิดสมุดงานชื่อ Tolerance Charting Program.xltm ที่ใช้เป็นแม่แบบ
2. คลิก ปุ่ม Microsoft Office จากนั้นคลิก Save as
3. ในกล่อง ชื่อแฟ้ม ให้พิมพ์ชื่อที่คุณต้องใช้สำหรับแม่แบบ
4. ในกล่อง บันทึกเป็นชนิด ให้คลิก Excel Macro-EnabledTemplate
5. คลิกSave (แม่แบบจะได้รับการวางลงในโฟลเดอร์แม่แบบเพื่อทำให้แน่ใจว่าจะมีพร้อมใช้งานในเวลาที่คุณต้องการใช้เพื่อสร้างสมุดงานใหม่)

2.2.2 เปิดใช้งาน Template (แม่แบบ) เพื่อใช้บนเครื่อง

1. คลิก ปุ่ม Microsoft Office จากนั้นคลิก New
2. คลิก PERSONAL ดังรูป
3. เลือก ไฟล์ที่ต้องใช้สำหรับแม่แบบ คลิก Create



รูปที่ 2.1PERSONAL

2.3 ส่วนประกอบและเครื่องมือต่าง ๆ

2.3.1 Start Work Sheet

Start Worksheet เป็นแผ่นงานเริ่มต้นและแสดงรายละเอียดของการใช้งานเบื้องต้น ซึ่งในแผ่นงานมีส่วนประกอบดังนี้

1. ปุ่มLet's go เป็นปุ่มกดเพื่อเข้าสู่การสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน โดยจะส่งต่อไปยัง Create Picture Worksheet
2. ปุ่ม กากบาท เป็นปุ่มกดเพื่อปิดสมุดงานเมื่อไม่ต้องการทำงานต่อ
3. คู่มือการใช้งานเบื้องต้น เป็นกล่องแสดงรายละเอียดการใช้งานเบื้องต้น

2.3.2 Create Picture Worksheet

Create Picture Worksheet เป็นแผ่นงานสำหรับสเกตซ์ภาพชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ โดยชิ้นงานต้องมีลักษณะเป็นไปตามข้อกำหนดของโปรแกรม ซึ่งในแผ่นงานมีส่วนประกอบดังนี้

1. พื้นที่สำหรับสเกตซ์ภาพชิ้นงาน
2. เครื่องมือ(Tools)สำหรับใช้ในการสเกตซ์ภาพชิ้นงานโดยการเลือกพื้นที่ที่ต้องกการวาดแล้วเลือกใช้เครื่องมือซึ่งมี 7 ชนิด (ดังตารางที่ 1)
3. ปุ่ม Next เป็นปุ่มกดเพื่อดำเนินการต่อไป โดยจะส่งต่อไปยัง Create Surface CutWorksheet

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเครื่องมือสำหรับสเกตซ์ภาพชิ้นงาน

ลำดับ	เครื่องมือ		
	ชนิด	สัญญาลักษณ์	หน้าที่
1	วาดเส้นขอบซ้าย (Left Border)		วาดเส้นขอบซ้ายพื้นของที่เซลล์ที่เลือก
2	วาดเส้นขอบขวา (Right Border)		วาดเส้นขอบขวาของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
3	วาดเส้นขอบล่าง (Bottom Border)		วาดเส้นกรอบล่างของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
4	วาดเส้นขอบบน (Top Border)		วาดเส้นขอบบนของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
5	ลบเส้นขอบ (No Border)		ลบเส้นขอบของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
6	วาดเส้นบางกรอบซ้าย (Left Border of Cells)		วาดเส้นบางที่ขอบซ้ายของพื้นที่เซลล์ที่เลือก
7	วาด Center Line กรอบล่าง(Bottom Border of Cells)		วาดเส้นCenter Line ที่ขอบล่างของพื้นที่เซลล์ที่เลือก

2.3.3 Create Surface Cut Worksheet

Create Surface Cut Worksheet เป็นแผ่นงานที่ทำงานโดยอัตโนมัติสำหรับตรวจหาผิวชิ้นงานจากภาพที่ผู้ใช้สเกตซ์ ซึ่งทำการตรวจผิวที่ตรงข้ามกับมิติที่ต้องการวิเคราะห์ (ตามแนวตั้งฉาก) จากนั้นแสดงเส้นกำกับพร้อมทั้งกำหนดชื่อผิวชิ้นงาน ซึ่งในแผ่นงานมีส่วนประกอบดังนี้

1. พื้นที่แสดงภาพชิ้นงาน ซึ่งแสดงเส้นกำกับและชื่อผิวชิ้นงานที่โปรแกรมกำหนดให้
2. พื้นที่แสดงจำนวนผิวชิ้นงานที่โปรแกรมตรวจสอบพบและชื่อผิวชิ้นงานที่โปรแกรมกำหนดให้
3. ปุ่ม Back เป็นปุ่มกดย้อนกลับไปยัง Create Surface CutWorksheet เพื่อแก้ไขภาพสเกตซ์ของชิ้นงาน
4. ปุ่ม Next เป็นปุ่มกดเพื่อดำเนินการต่อไป โดยจะส่งต่อไปยัง Dimension DesignWorksheet

2.3.4 Dimension Design Worksheet

Dimension Design Worksheet เป็นแผ่นงานเพื่อรับข้อมูลมิติ (Dimensions) ของชิ้นงาน มีจำนวนแถวตามจำนวนผิวชิ้นงาน (จะต้องมีมิติน้อยกว่าผิวชิ้นงานอยู่หนึ่งมิติ) ซึ่งในแผ่นงานมีส่วนประกอบดังนี้

1. ตารางรับข้อมูลมิติของชิ้นงาน แบ่งเป็นคอลัมน์ดังนี้

1.) No. column เป็นคอลัมน์บันทึกลำดับของมิติ

2.) Dimensions surface column เป็นคอลัมน์สำหรับใส่ข้อมูลชื่อผิวชิ้นงานจากมิติหนึ่งไปมิติหนึ่ง โดยมี 2 คอลัมน์ คือ Fromและ Toสามารถใช่การจากผิวใดไปผิวใดก็ได้

3.) Basic size column เป็นคอลัมน์สำหรับใส่ข้อมูลขนาดมาตรฐานของมิตินั้น ๆ

4.) ±Tol/2 column เป็นคอลัมน์สำหรับใส่ข้อมูลความความเคลื่อนของมิตินั้น ๆ

5.) Number of surface column เป็นคอลัมน์แสดงจำนวนผิวของชิ้นงาน

6.) Unit column เป็นคอลัมน์แสดงหน่อยของข้อมูลที่ถูกบันทึกลงในตาราง

2. รูปภาพแสดงตัวอย่างของชิ้นงานเพื่อให้ผู้ใช้ใส่ข้อมูลตามชื่อผิวที่โปรแกรมกำหนดให้

3. ปุ่ม Back เป็นปุ่มกดย้อนกลับไปยัง Create Surface Cut Worksheet

4. ปุ่ม Next เป็นปุ่มกดเพื่อดำเนินการต่อไปโดยจะต้องใส่จำนวนขั้นตอนการตัดชิ้นงาน จากนั้นจะส่งต่อไปยัง Sequence Operation Worksheet

2.3.5 Sequence Operation Worksheet

Sequence Operation Worksheet เป็นแผ่นงานเพื่อรับข้อมูลรายละเอียดของลำดับขั้นตอนการตัดชิ้นงาน โดยมีจำนวนแถวตามจำนวนที่ผู้ใช้ใส่ไว้ข้างต้น ซึ่งในแผ่นงานมีส่วนประกอบดังนี้

1. ตารางการรับข้อมูลลำดับการการผลิตชิ้นงาน แบ่งเป็นคอลัมน์ดังนี้

1.) No. column เป็นคอลัมน์บันทึกลำดับของขั้นตอนการตัด

2.) Operation Numbers column เป็นคอลัมน์สำหรับใส่ข้อมูลตัวเลขลำดับการตัดชิ้นงานตามแผนลำดับการตัดที่ได้กำหนดไว้

3.) Machine used column เป็นคอลัมน์สำหรับใส่ข้อมูลชนิดเครื่องจักรที่ให้ในการตัดชิ้นงานในแต่ละขั้นตอน ซึ่งโปรแกรมใช้เป็นข้อมูลในการประมาณ Machining tolerance เพื่อใช้สำหรับคำนวณผลลัพธ์ต่าง ๆ ของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

4.) ±Tol/2 column เป็นคอลัมน์สำหรับใส่ข้อมูลMachining tolerance โดยตรงตามแบบแผนลำดับการตัดที่ได้กำหนดไว้

5.) Reference Cut column เป็นคอลัมน์สำหรับใส่ข้อมูลชื่อผิวชิ้นงานที่ใช้เป็นผิวกำหนดตำแหน่งให้การตัดหรือการวัดในการตัดชิ้นงานในขั้นตอนนั้น ๆ

6.) Face Cut column เป็นคอลัมน์สำหรับใส่ข้อมูลชื่อผิวชิ้นงานที่เป็นผิวที่จะทำการตัดในขั้นตอนนั้น ๆ

2. รูปภาพแสดงตัวอย่างของชิ้นงาน เพื่อให้ผู้ใช้ใส่ข้อมูลตามชื่อผิวที่โปรแกรมกำหนดให้

3. ปุ่ม Back เป็นปุ่มกดย้อนกลับไปยัง Dimension Design Worksheet เพื่อแก้ไขรายละเอียดมิติของชิ้นงาน

4. ปุ่ม Next เป็นปุ่มกดเพื่อดำเนินการต่อไป Tolerance Chart Worksheet เพื่อสร้างและคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

2.3.6 Tolerance Chart Worksheet

Tolerance Chart Worksheet เป็นแผ่นงานสำหรับแสดงผลการคำนวณต่าง ๆ เป็นแผนภูมิความคลาดเคลื่อนซึ่งในแผ่นงานมีส่วนประกอบดังนี้

1. แผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Tolerance Chart)

เป็นตารางแสดงผลการคำนวณต่าง ๆ (ในบทที่ 1) ซึ่งเมื่อได้แผนภูมิแล้ว ผู้ใช้จะวิเคราะห์ในเบื้องต้นว่า ถ้าผู้ใช้ยอมรับผลการวิเคราะห์ ผู้ใช้สามารถสั่งพิมพ์เพื่อนำไปใช้งานต่อไป แต่ถ้าผู้ใช้ไม่ยอมรับผลการวิเคราะห์สามารถแก้ไขได้ โดยการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนในบ้างขั้นต้องการตัด หรือสามารถปรับแก้ลำดับการตัดชิ้นงานใหม่

2. แผนภาพต้นไม้ (Rooted-tree graph)

เป็นส่วนที่แสดงแผนภาพต้นไม้ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการตัดชิ้นงานที่ทำงานวิเคราะห์ ซึ่งเป็นแผนภาพต้นไม้เป็นหลักการสำคัญที่ให้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

3. ปุ่ม Back เป็นปุ่มกดย้อนกลับ เพื่อแก้ไขข้อมูล

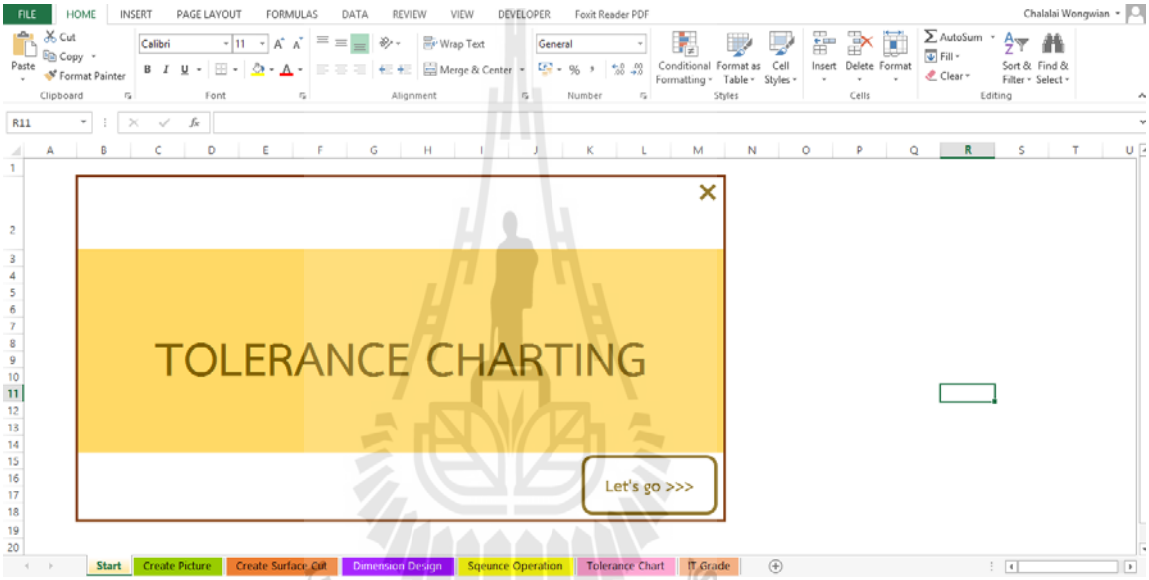
2.3.7 IT Grade Worksheet

IT Grade Worksheet เป็นแผ่นงานแสดงตารางข้อกำหนดที่โปรแกรมใช้เป็นข้อมูลในการประมาณ Machining tolerance จากชนิดของเครื่องจักรที่ใช้ในการตัดชิ้นงานในแต่ละขั้นตอน เพื่อใช้สำหรับคำนวณผลลัพธ์ต่าง ๆ ของแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

2.4 ขั้นตอนการใช้งานแม่แบบ (template)การสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน

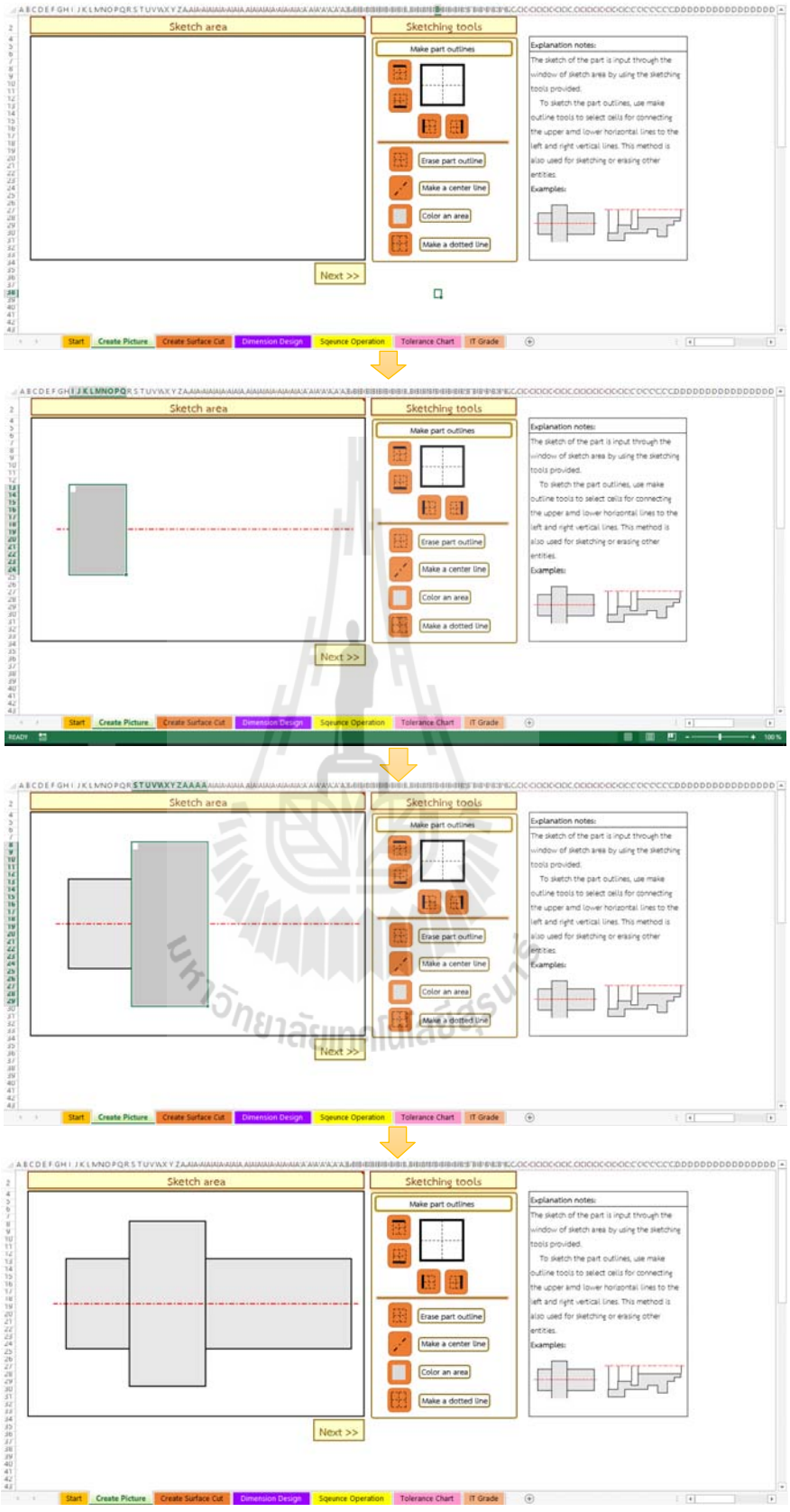
เมื่อผู้ใช้มีข้อมูลลำดับขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน ซึ่งต้องการวิเคราะห์หรือสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน ในการใช้งานแม่แบบ (template) การสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนผู้ใช้ต้องทำการติดตั้งแม่แบบการสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อน (Tolerance Chart Program) ลงบนเครื่องคอมพิวเตอร์และเปิดใช้งานตามขั้นตอนในข้อ 2.2 จากนั้นการใช้งานสมุดงานตามขั้นตอนดังนี้

1.เปิดสมุดงาน ซึ่งลักษณะดังรูปที่ 2.1เริ่มต้นการสร้างแผนภูมิความเคลื่อนเคลื่อน คลิกปุ่ม Let’s go



รูปที่ 2.1หน้าจอเริ่มต้น

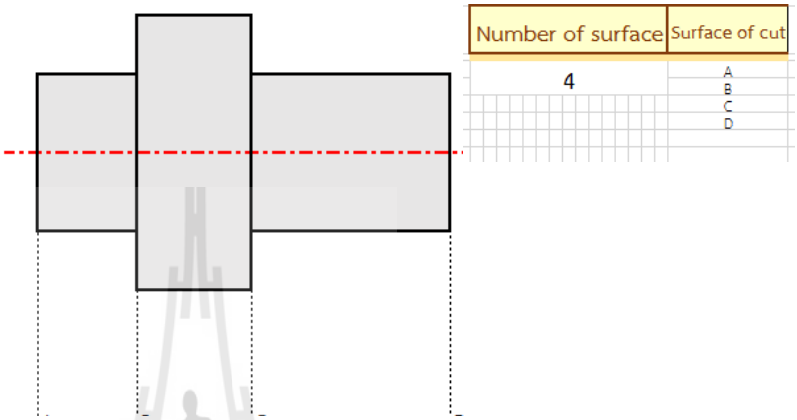
2. ผู้ใช้ต้องสเกตช์ภาพชิ้นงานในกรอบพื้นที่ โดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ โปรแกรมกำหนด จากนั้น เพื่อดำเนินการต่อกดปุ่ม Next



รูปที่ 2.2ขั้นตอนการสเกตซ์ภาพชิ้นงานจากเครื่องมือของโปรแกรม

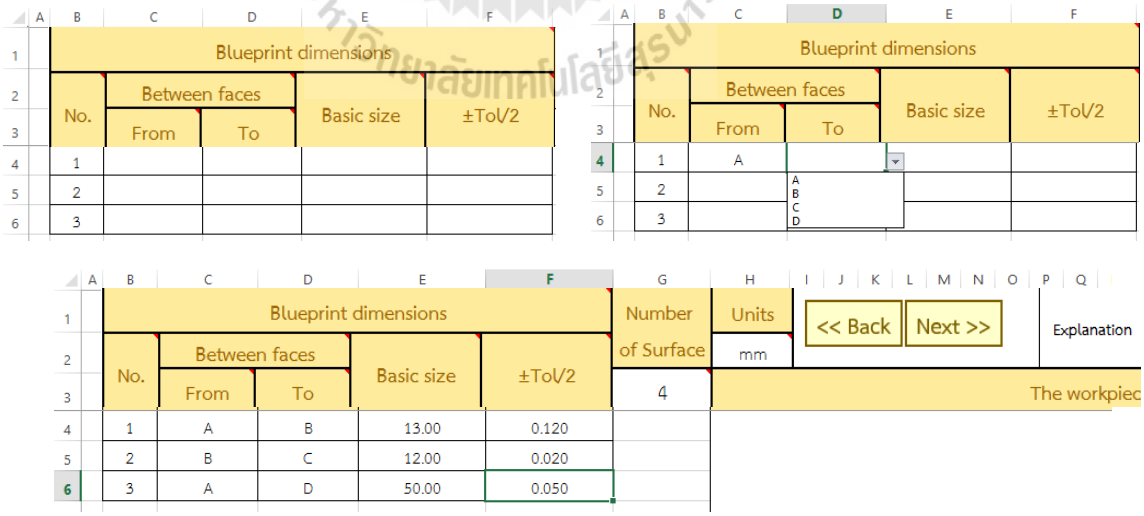
<u>เงื่อนไข</u> โปรแกรมกำหนดให้เส้นแนวดิ่งคือผิวชิ้นงานที่ตัดหนึ่งผิว ผู้ใช้จะต้องสเกตซ์ภาพผิวชิ้นงานที่ตัดไม่พร้อมกันเป็นเส้นแนวดิ่งคนละเส้น

3. โปรแกรมจะแสดงเส้นประระบุผิวชิ้นงานและชื่อกำกับผิวชิ้นงาน ถ้าผิวชิ้นงานถูกต้องกดปุ่ม Next เพื่อดำเนินการต่อ แต่ถ้าผู้ใช้ต้องการแก้ไขกดปุ่ม Back



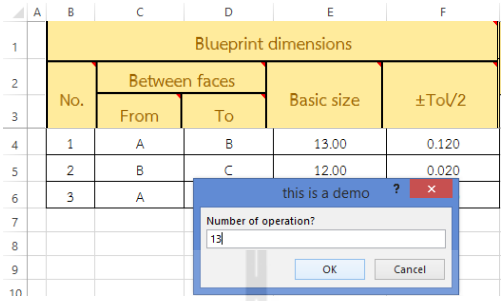
รูปที่ 2.3ภาพเส้นประระบุผิวชิ้นงานและชื่อกำกับผิวชิ้นงาน

4. ผู้ใช้ต้องใส่ข้อมูลรายละเอียดมิติ (dimensions) ของชิ้นงานในตารางดังรูปที่2.4ให้ครบถ้วน จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อดำเนินการต่อไป

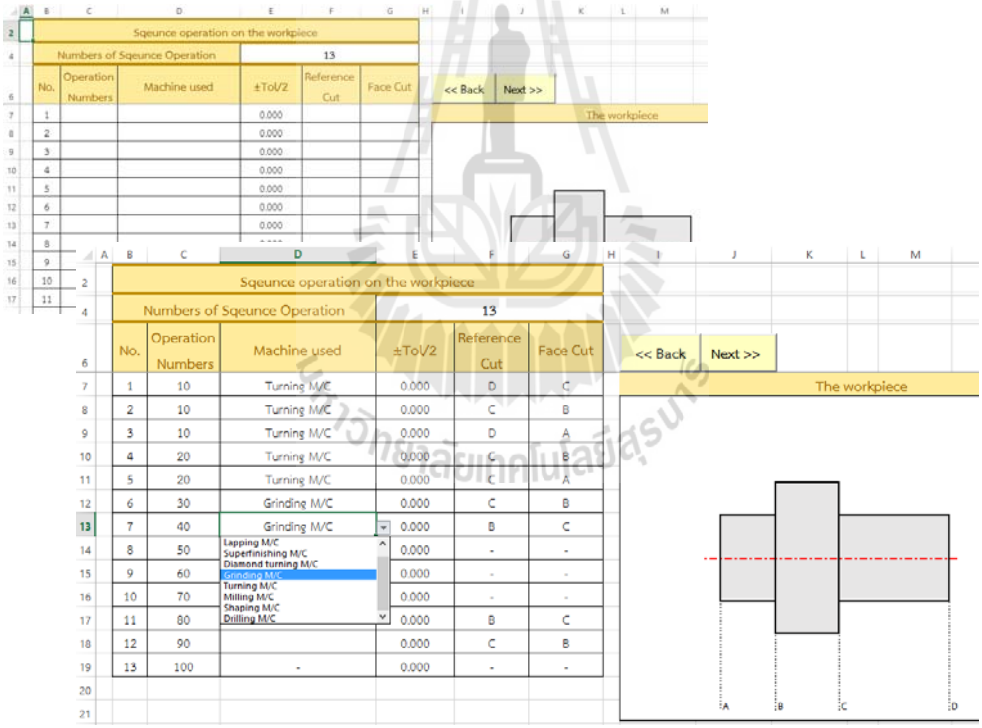


รูปที่ 2.4ตารางใส่ข้อมูลมิติชิ้นงาน

5. ผู้ใช้ต้องใส่จำนวนของลำดับการตัดชิ้นงานลงในกล่องข้อความดังรูปที่ 2.5 (ก.) จากนั้นกดปุ่ม ok ต่อไปผู้ใช้ต้องใส่ข้อมูลรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนให้การตัดชิ้นงานดังรูปที่ 2.5 (ข.) เมื่อใส่ข้อมูลครบ กดปุ่ม Nextเพื่อดำเนินการต่อไป



(ก.)

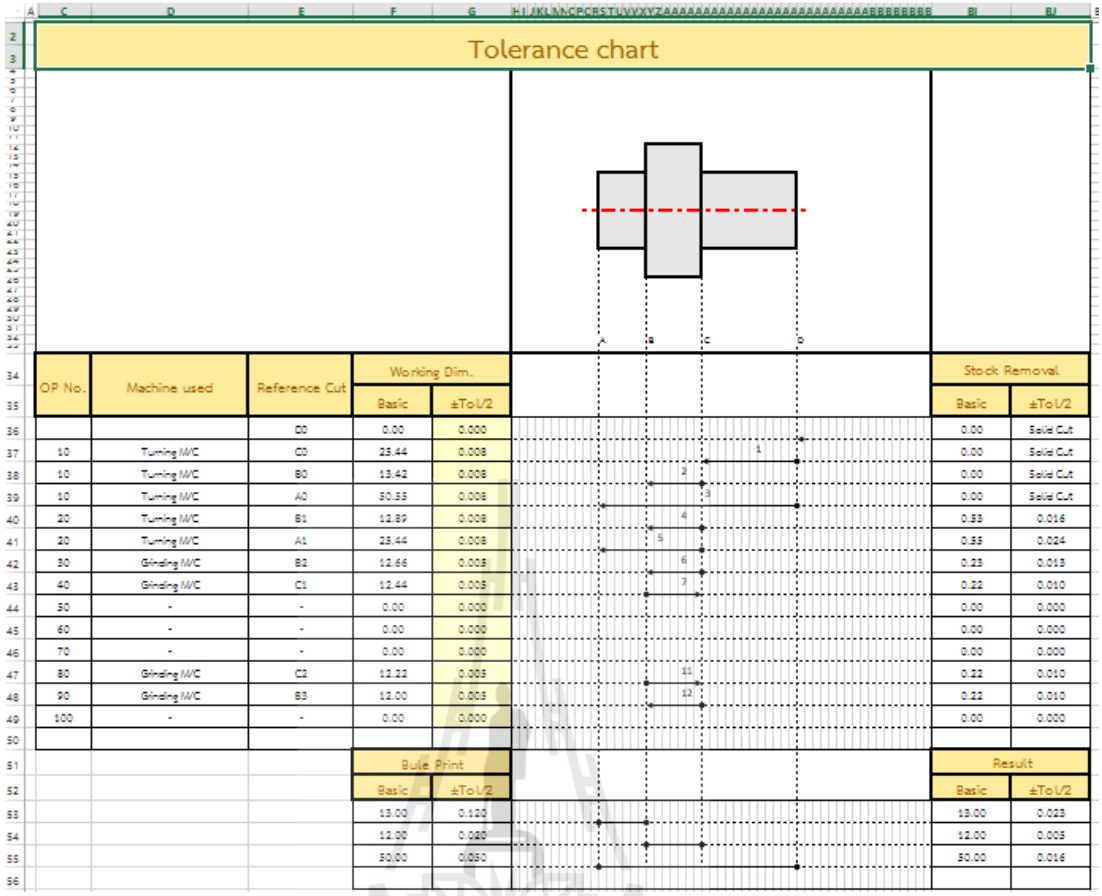


(ข.)

รูปที่ 2.5(ก.) กล่องข้อความสำหรับใส่จำนวนขั้นตอนการตัดชิ้นงาน

(ข.) ขั้นตอนการใส่ข้อมูลลำดับการตัดชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์

6.แสดงแผนภูมิความคลาดเคลื่อนตามข้อมูลที่ผู้ใช้ใส่ทั้งหมด ดังรูป 2.6



Tolerance chart

OP No.	Machine used	Reference Cut	Working Dim. Basic	Working Dim. ±Tol/2	Stock Removal Basic	Stock Removal ±Tol/2
		D0	0.00	0.000	0.00	Solid Cut
10	Turning M/C	C0	25.44	0.008	0.00	Solid Cut
10	Turning M/C	B0	13.42	0.008	0.00	Solid Cut
10	Turning M/C	A0	50.55	0.008	0.00	Solid Cut
20	Turning M/C	B1	12.89	0.008	0.53	0.016
20	Turning M/C	A1	25.44	0.008	0.55	0.024
30	Grinding M/C	B2	12.66	0.005	0.23	0.013
40	Grinding M/C	C1	12.44	0.005	0.22	0.010
50	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
60	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
70	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
80	Grinding M/C	C2	12.22	0.005	0.22	0.010
90	Grinding M/C	B3	12.00	0.005	0.22	0.010
100	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000

Bule Print Basic	Bule Print ±Tol/2	Result Basic	Result ±Tol/2
13.00	0.120	13.00	0.023
12.00	0.020	12.00	0.005
50.00	0.050	50.00	0.016

รูปที่ 2.6แผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

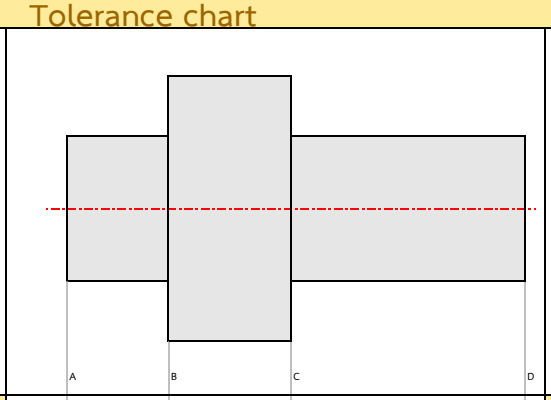
7. เมื่อสมุดงานแสดงผลแผนภูมิความเคลื่อนแล้ว ผู้ใช้สามารถแก้ไขแผนภูมิได้ 2 วิธีดังนี้

7.1 แก้ไขทันที โดยการแก้ไขค่าในคอลัมน์ของความคลาดเคลื่อนกระบวนการผลิต (machining tolerance)

7.2 กดปุ่ม Backเพื่อย้อนกลับไปแก้ไขข้อมูล

8. การปริ้นแผนภูมิความคลาดเคลื่อน เมื่อกดคำสั่งปริ้นผ่านคำสั่งของโปรแกรม Microsoft Excel จะได้เป็นแผนภูมิ ดังรูปที่ 2.7

Tolerance chart



OP No.	Machine used	Reference Cut	Working Dim. Basic	Working Dim. ±Tol/2	Stock Removal Basic	Stock Removal ±Tol/2
		D0	0.00	0.000	0.00	Solid Cut
	Turning M/C	C0	24.56	0.008	0.00	Solid Cut
	Turning M/C	B0	13.42	0.008	0.00	Solid Cut
	Turning M/C	A0	50.55	0.008	0.00	Solid Cut
	Turning M/C	B1	12.89	0.008	0.53	0.016
	Turning M/C	A1	25.44	0.008	0.55	0.024
	Grinding M/C	B2	12.66	0.005	0.23	0.013
	Grinding M/C	C1	12.44	0.005	0.22	0.010
	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
	Grinding M/C	C2	12.22	0.005	0.22	0.010
	Grinding M/C	B3	12.00	0.005	0.22	0.010
	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000

Bule Print Basic	Bule Print ±Tol/2	Result Basic	Result ±Tol/2
13.00	0.120	13.00	0.023
12.00	0.020	12.00	0.005
50.00	0.050	50.00	0.016

รูปที่ 2.7แผนภูมิความคลาดเคลื่อน

ภาคผนวก ค

รายการโปรแกรม (Program Listings)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ส่วนของการกำหนดตัวแปร(Global variables)

```
Public Type Dimension
        From As String
        To As String
        Basic As Single
        Tolerance As Single
        mc As String
        OP As Long
End Type
Public Stc() As Integer
Public part() As String, finalP() As String, finalBP() As String, surf() As String
Public NoSurf As Integer, NoSque As Integer
Public TolP() As Variant
Public TolBP() As Single, StockRB() As Single, DivBStc() As Single
Public BP() As Dimension
Public BPN() As Dimension
Public SQIn() As Dimension
Public SQInN() As Dimension
Public GenBP() As Single
Public BasicCut() As Single
Public NoNode() As Integer
Public DirectionC() As Integer
```

ส่วนของรับข้อมูล(Input Module)

```
Sub ClosePG()
   ActiveWorkbook.Save
   ActiveWorkbook.Close
End Sub

Sub NextPG()
      data = MsgBox("Sketch The Workpiece", vbYesNo, "Tolerance Charting")
         If data = 7 Then
               ActiveWorkbook.Save
               ActiveWorkbook.Close
         Else
            Sheets("create picture").Select
         End If
End Sub

Sub CP_letf()
         With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
            .LineStyle = xlContinuous
            .ColorIndex = 0
            .TintAndShade = 0
            .Weight = xlMedium
         End With
      With Selection.Interior
      .Pattern = xlSolid
      .PatternColorIndex = xlAutomatic
      .ThemeColor = xlThemeColorDark2
      .TintAndShade = 0
      .PatternTintAndShade = 0
   End With
End Sub

Sub CP_rigth()
```

```
        With Selection.Borders(xlEdgeRight)
            .LineStyle = xlContinuous
            .ColorIndex = 0
            .TintAndShade = 0
            .Weight = xlMedium
        End With
       With Selection.Interior
      .Pattern = xlSolid
      .PatternColorIndex = xlAutomatic
      .ThemeColor = xlThemeColorDark2
      .TintAndShade = 0
      .PatternTintAndShade = 0
   End With

End Sub
Sub CP_top()
        With Selection.Borders(xlEdgeTop)
            .LineStyle = xlContinuous
            .ColorIndex = 0
            .TintAndShade = 0
            .Weight = xlMedium
        End With
        With Selection.Interior
      .Pattern = xlSolid
      .PatternColorIndex = xlAutomatic
      .ThemeColor = xlThemeColorDark2
      .TintAndShade = 0
      .PatternTintAndShade = 0
   End With
End Sub

Sub CP_clear()
        Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlEdgeTop).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlEdgeBottom).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlEdgeRight).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlInsideHorizontal).LineStyle = xlNone
          With Selection.Interior
      .Pattern = xlSolid
      .PatternColorIndex = xlAutomatic
      .ThemeColor = xlThemeColorDark1
      .TintAndShade = 0
      .PatternTintAndShade = 0
   End With
End Sub

Sub CP_bottom()
        With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
            .LineStyle = xlContinuous
            .ColorIndex = 0
            .TintAndShade = 0
            .Weight = xlMedium
        End With
       With Selection.Interior
```

```
      .Pattern = xlSolid
      .PatternColorIndex = xlAutomatic
      .ThemeColor = xlThemeColorDark2
      .TintAndShade = 0
      .PatternTintAndShade = 0
   End With
End Sub

Sub CP_centerline()
        With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
           .LineStyle = xlDashDot
           .Color = -16776961
           .TintAndShade = 0
           .Weight = xlMedium
        End With
End Sub

Sub CP_Outside()
        Selection.Borders(xlDiagonalDown).LineStyle = xlNone
        Selection.Borders(xlDiagonalUp).LineStyle = xlNone
        With Selection.Borders(xlEdgeLeft)
           .LineStyle = xlContinuous
           .ColorIndex = 0
           .TintAndShade = 0
           .Weight = xlMedium
        End With
        With Selection.Borders(xlEdgeTop)
           .LineStyle = xlContinuous
           .ColorIndex = 0
           .TintAndShade = 0
           .Weight = xlMedium
        End With
        With Selection.Borders(xlEdgeBottom)
           .LineStyle = xlContinuous
           .ColorIndex = 0
           .TintAndShade = 0
           .Weight = xlMedium
        End With
        With Selection.Borders(xlEdgeRight)
           .LineStyle = xlContinuous
           .ColorIndex = 0
           .TintAndShade = 0
           .Weight = xlMedium
        End With
        Selection.Borders(xlInsideVertical).LineStyle = xlNone
       With Selection.Interior
      .Pattern = xlSolid
      .PatternColorIndex = xlAutomatic
      .ThemeColor = xlThemeColorDark2
      .TintAndShade = 0
      .PatternTintAndShade = 0
   End With
End Sub

Sub Cp_pt()
      Application.ScreenUpdating = False
           Sheets("Create Surface Cut").Select
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
            Range("Picture2").Select
            Selection.Copy
            Sheets("Dimension Design").Select
            ActiveSheet.Shapes.Range(Array("PP")).Select
            Selection.Delete
            Range("PT_S3").Select
            ActiveSheet.Pictures.Paste(Link:=True).Select
            Selection.Name = ("PP")
             Sheets("Sqeunce Operation").Select
            ActiveSheet.Shapes.Range(Array("PP")).Select
            Selection.Delete
            Range("PSS").Select
            ActiveSheet.Pictures.Paste(Link:=True).Select
            Selection.Name = ("PP")
            Sheets("Tolerance Chart").Select
            Range("PictureTC").Select
            Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteAllUsingSourceTheme, Operation:=xlNone _
               , SkipBlanks:=False, Transpose:=False
            Application.CutCopyMode = False
      Application.ScreenUpdating = True
End Sub

Sub TransferPT1()
   Dim rng, rng1 As Variant
      Application.ScreenUpdating = False
       Set rng = Sheets("Create Picture").Range("C4:BC33")
        rng.Copy
        Set rng1 = Sheets("Create Surface Cut").Range("C4")
       rng1.PasteSpecial Paste:=xlPasteAllUsingSourceTheme, Operation:=xlNone _
          , SkipBlanks:=False, Transpose:=False
        Application.CutCopyMode = False
      Application.ScreenUpdating = True
End Sub

Sub CreateTable()
Application.ScreenUpdating = False
Dim Del1 As Variant
Dim rng As Variant
Dim i As Integer
Dim j As Integer
     'ลบdim
      Set Del1 = Range(Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(1, 0), _
      Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(1, 0).End(xlDown))
      Set Del1 = Del1.Resize(Del1.Rows.count, 7)
         Del1.clear
         SS = Sheets("Dimension Design").Range("ss").Value
         Set rng = Sheets("Dimension Design").Range("No_dim").Offset(1, 0).Resize(SS - 1, 1)
               For i = 1 To SS - 1
                  rng(i).Value = i
               Next i
      Set rng = Range(rng, rng.Offset(0, 4))
         With rng
                     .Font.Name = "TH SarabunPSK"
                     .Font.Size = 16
                     .HorizontalAlignment = xlCenter
                     .VerticalAlignment = xlCenter
         End With
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
        With rng.Borders
                .LineStyle = xlContinuous
                .ColorIndex = 0
                .TintAndShade = 0
                .Weight = xlThin
        End With
   Set rng = rng.Offset(0, 3)
            rng.NumberFormat = "0.00"
   Set rng = rng.Offset(0, 1)
            rng.NumberFormat = "0.000"
    Call Validate_FT
    Sheets("Dimension Design").Select
    Application.ScreenUpdating = True
End Sub

Private Sub Validate_FT()
Dim rng As Variant
      Set rng = Range(Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(1, 0), _
      Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(1, 0).End(xlDown))
        Set rng = rng.Offset(0, 1).Resize(rng.Rows.count, 2)
                    With rng.Validation
                       .Delete
                       .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator:= _
                       xlBetween, Formula1:="=_SurfW"
                       .IgnoreBlank = True
                       .InCellDropdown = True
                       .InputTitle = ""
                       .ErrorTitle = ""
                       .InputMessage = ""
                       .ErrorMessage = ""
                       .ShowInput = True
                       .ShowError = True
                    End With
End Sub
Sub CreateSque()
Application.ScreenUpdating = False
Dim Del2 As Variant
Dim i, n() As Integer
Dim rng As Variant
     Set Del2 = Range(Sheets("sqeunce operation").Range("_NO").Offset(1, 0), _
          Sheets("sqeunce operation").Range("_NO").Offset(1, 0).End(xlDown))
     Set Del2 = Del2.Resize(Del2.Rows.count, 7)
     Del2.clear
     NoSque = Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_s").Value
     ReDim n(NoSque)
     Set rng = Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_")
     Set rng = rng.Resize(NoSque, 6)
        With rng
                .Font.Name = "TH SarabunPSK"
                .Font.Size = 16
                .HorizontalAlignment = xlCenter
                .VerticalAlignment = xlCenter
        End With
        With rng.Borders
                .LineStyle = xlContinuous
                .ColorIndex = 0
                .TintAndShade = 0
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
                .Weight = xlThin
            End With
        Set rng = rng.Resize(NoSque, 1)
        For i = 1 To NoSque
            rng.Cells(i) = i
        Next
        Call ValidateSQ
Application.ScreenUpdating = True
End Sub

Private Sub ValidateSQ()
Application.ScreenUpdating = False
Dim rng1 As Variant
Dim rng2 As Variant
        Sheets("create surface cut").Select
        Range(Sheets("create surface cut").Range("Surf_begin").Offset(1, 0), _
                Sheets("create surface cut").Range("Surf_begin").End(xlDown)).Select
         ActiveWorkbook.Names.Add Name:="_SurfSQ", RefersToR1C1:=Selection
        Sheets("Sqeunce Operation").Select
        Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_").Select
        Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
        Range(Selection, Selection.Offset(0, 5)).Select
            Selection.Validation.Delete
        Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_").Select
         Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Offset(0, 2).Select
             With Selection.Validation
                        .Delete
                        .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator:= _
                        xlBetween, Formula1:="=_MC"
                        .IgnoreBlank = False
                        .InCellDropdown = True
                        .InputTitle = ""
                        .ErrorTitle = ""
                        .InputMessage = "Select machine used"
                        .ErrorMessage = ""
                        .ShowInput = True
                        .ShowError = True
                    End With
          Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_").Select
          Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Offset(0, 4).Select
          Range(Selection, Selection.Offset(0, 1)).Select
                With Selection.Validation
                        .Delete
                        .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator:= _
                        xlBetween, Formula1:="=_SurfSQ"
                        .IgnoreBlank = False
                        .InCellDropdown = True
                        .InputTitle = ""
                        .ErrorTitle = ""
                        .InputMessage = "select surface of cut"
                        .ErrorMessage = ""
                        .ShowInput = True
                        .ShowError = True
                    End With
        Range("No_").Select
        Selection.Offset(0, 3).Select
        Set rng2 = Selection.Resize(Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_s").Value, 1)
```

```
        rng2.NumberFormat = "0.000"
        For i = 1 To rng2.Rows.count
            rng2.Cells(i) = 0
            Next
Application.ScreenUpdating = True
End Sub

Sub LineNo()
Application.ScreenUpdating = False
        Call SetupBP
        Call DelTable2
        Call CreatTable2
        Call Title
        Call BluePrint
Application.ScreenUpdating = True
End Sub

Sub CreatTable2()
Application.ScreenUpdating = False
Dim rng As Variant
Dim rng1 As Variant
        NoSque = Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_s").Value
        Set rng1 = Sheets("Tolerance Chart").Range("_LineNo").Offset(1, 0)
        Set rng1 = rng1.Resize(NoSque + 1, 1)
        Set rng1 = rng1.Resize(NoSque + 2, 6)
            With rng1
                    .Font.Name = "TH SarabunPSK"
                    .Font.Size = 16
                    .HorizontalAlignment = xlCenter
                    .VerticalAlignment = xlCenter
            End With
            With rng1.Borders
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
        Set rng1 = rng1.Offset(0, 4).Resize(NoSque + 1, 1)
            rng1.NumberFormat = "0.00"
        Set rng1 = rng1.Offset(0, 1)
            rng1.NumberFormat = "0.000"
        Set rng1 = rng1.Offset(0, 1).Resize(NoSque + 2, 53)
            With rng1.Borders(xlEdgeLeft)
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
            With rng1.Borders(xlEdgeRight)
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
            With rng1.Borders(xlEdgeTop)
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
```

```
                .TintAndShade = 0
                .Weight = xlThin
            End With
            With rng1.Borders(xlEdgeBottom)
                .LineStyle = xlContinuous
                .ColorIndex = 0
                .TintAndShade = 0
                .Weight = xlThin
            End With
            With rng1.Borders(xlInsideHorizontal)
                .LineStyle = xlDot
                .ColorIndex = 0
                .TintAndShade = 0
                .Weight = xlThin
            End With
        Set rng1 = rng1.Offset(0, 53).Resize(NoSque + 2, 2)
            With rng1
                .Font.Name = "TH SarabunPSK"
                .Font.Size = 16
                .HorizontalAlignment = xlCenter
                .VerticalAlignment = xlCenter
            End With
            With rng1.Borders
                .LineStyle = xlContinuous
                .ColorIndex = 0
                .TintAndShade = 0
                .Weight = xlThin
            End With
        Set rng1 = rng1.Resize(NoSque + 1, 1)
            rng1.NumberFormat = "0.00"
        Set rng1 = rng1.Offset(0, 1)
            rng1.NumberFormat = "0.000"
Application.ScreenUpdating = True
End Sub

Sub DelTable2()
'ลบเส้นตาราง
Dim rng As Variant
        Set rng = Sheets("Tolerance Chart").Range("_LineNo").Offset(1, 1)
         Set rng = rng.Resize(Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_s").Value, 61)
             rng.clear
   End Sub

Sub Title()
Dim rng As Variant
        NoSque = Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_s").Value
        Set rng = Sheets("Tolerance Chart").Range("_Title")
        rng.cut Destination:=Sheets("Tolerance Chart").Range("_WBasic").Offset(NoSque + 3, 0)
End Sub

Sub SetupBP()
Dim rng1 As Variant
        Call DelBP
       Set rng1 = Sheets("Tolerance Chart").Range("_Title")
       rng1.cut Destination:=Range("_SetTT").Offset(0, 1)
End Sub
```

```
Sub BluePrint()
Dim rng As Variant
Dim rng1 As Variant
Dim rng2 As Variant
Dim Rng3 As Variant
Dim rng4 As Variant
        NoSurf = Sheets("Dimension Design").Range("ss").Value
        Set rng2 = Sheets("Dimension Design").Range("No_dim").Offset(1, 3)
        Set rng2 = rng2.Resize(NoSurf - 1, 2)
        Set Rng3 = Sheets("Tolerance Chart").Range("_BPBasic").Offset(1, 0)
        Set Rng3 = Rng3.Resize(NoSurf, 2)
            With Rng3
                    .Font.Name = "TH SarabunPSK"
                    .Font.Size = 16
                    .HorizontalAlignment = xlCenter
                    .VerticalAlignment = xlCenter
            End With
            With Rng3.Borders
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
        Set rng = Rng3.Offset(0, 2).Resize(NoSurf, 53)
            With rng.Borders(xlEdgeLeft)
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
            With rng.Borders(xlEdgeRight)
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
            With rng.Borders(xlEdgeTop)
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
            With rng.Borders(xlEdgeBottom)
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
            With rng.Borders(xlInsideHorizontal)
                    .LineStyle = xlDot
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
        Set rng4 = Sheets("Tolerance Chart").Range("_RBasic").Offset(1, 0)
        Set rng4 = rng4.Resize(NoSurf, 2)
            With rng4
```

```
                    .Font.Name = "TH SarabunPSK"
                    .Font.Size = 16
                    .HorizontalAlignment = xlCenter
                    .VerticalAlignment = xlCenter
            End With
            With rng4.Borders
                    .LineStyle = xlContinuous
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
            End With
        Set rng = Rng3.Resize(NoSurf, 1)
            rng.NumberFormat = "0.00"
        Set rng = rng.Offset(0, 1)
            rng.NumberFormat = "0.000"
        Set rng = rng4.Resize(NoSurf, 1)
            rng.NumberFormat = "0.00"
        Set rng = rng.Offset(0, 1)
            rng.NumberFormat = "0.000"
        Set Rng3 = Rng3.Resize(NoSurf - 1, 2)
        Set rng4 = rng4.Resize(NoSurf - 1, 1)
            Rng3.Value = rng2.Value
            rng4.Value = Rng3.Resize(NoSurf - 1, 1).Value
End Sub

Sub DelBP()
Dim rng1 As Variant
Dim a As Integer
        On Error GoTo ErrV
        Set rng1 = Sheets("Tolerance Chart").Range("_BPBasic").Offset(1, 0)
        Set rng1 = Range(rng1, rng1.End(xlDown))
            a = 1
            a = a + rng1.Rows.count
        Set rng1 = rng1.Resize(a, 59)
            rng1.clear
ErrV:
        a = 1
End Sub

Sub SurfW()
Application.ScreenUpdating = False
Dim rng As Variant
Dim i As Integer
        Set rng = Sheets("create surface cut").Range("_SurfcW")
        rng.Value = SurfCW
        NoSurf = SurfCW
            If NoSurf = 0 Then
                    End
            End If
       ReDim surf(NoSurf)
       Set rng = Range(Sheets("create surface cut").Range("Surf_begin").Offset(2, 0), _
                    Sheets("create surface cut").Range("Surf_begin").Offset(2, 0).End(xlDown))
            rng.clear
      Set rng = rng.Resize(NoSurf, 1)
      With rng
                .Font.Name = "TH SarabunPSK"
                .Font.Size = 12
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
            .HorizontalAlignment = xlCenter
            .VerticalAlignment = xlCenter
        End With
        For i = 1 To NoSurf
           surf(i) = Chr(i + 64)
           rng.Cells(i) = surf(i)
        Next i
        Sheets("create surface cut").Select
            rng.Select
            ActiveWorkbook.Names.Add Name:="_SurfW", RefersToR1C1:=Selection
        Sheets("create surface cut").Range("Surf_begin").Select
Application.ScreenUpdating = True
End Sub
```

ส่วนของการทำงานในแผนภูมิความคลาดเคลื่อน(Tolerance Chart Module)

```
Sub NewCut()
Dim n() As String, H() As String, g As String
Dim i  As Integer, j As Integer, r As Integer, c As Integer, T As Integer, K() As Integer
Dim FromS As String, ToS As String
Dim a() As String, b() As String
Dim strArrayP() As String
Dim intCount As Integer
Dim rng As Variant
   NoSurf = Sheets("Dimension Design").Range("ss").Value
   NoSque = Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_s").Value
   ReDim H(NoSque)
   ReDim n(NoSque)
   ReDim SQIn(NoSque)
   ReDim BP(NoSurf)
   ReDim BPN(NoSurf)
   ReDim surf(NoSurf)
   ReDim SQInN(NoSque)
   ReDim part(NoSque)
   ReDim finalP(NoSque)
   ReDim finalBP(NoSurf)
   ReDim TolP(NoSque)
   ReDim TolBP(NoSurf)
   ReDim NoNode(NoSurf)
   ReDim StockRB(NoSque)
   ReDim DirectionC(NoSque)
   ReDim DivBStc(NoSque)
    ReDim K(NoSque)
        For i = 1 To NoSurf
           surf(i) = Chr(i + 64)
        Next i
         SQIn(0).From = "Root"
         SQIn(0).To = Sheets("sqeunce operation").Range("_RefCut").Offset(1, 0)
         For i = 1 To NoSque
            SQIn(i).OP = Sheets("sqeunce operation").Range("_OP").Offset(i, 0)
            SQIn(i).From = Sheets("sqeunce operation").Range("_RefCut").Offset(i, 0)
            SQIn(i).To = Sheets("sqeunce operation").Range("_FacCut").Offset(i, 0)
            SQIn(i).mc = Sheets("sqeunce operation").Range("_MC_inp").Offset(i, 0)
            SQIn(i).Tolerance = Sheets("sqeunce operation").Range("_Tol").Offset(i, 0)
         Next
   Call BasicBP
      For i = 1 To NoSque
            SQIn(i).Basic = Basic(SQIn(i).From, SQIn(i).To)
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
            K(i) = 0
          If SQIn(i).Tolerance = 0 Then
             SQInN(i).Tolerance = TolMC(SQIn(i).mc, Basic(SQIn(i).From, SQIn(i).To), K(i))
            Else
              SQInN(i).Tolerance = SQIn(i).Tolerance
            End If
      Next
        For i = 1 To NoSurf - 1
          BP(i).From = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 1)
          BP(i).To = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 2)
          BP(i).Basic = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 3)
          BP(i).Tolerance = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 4)
       Next i
      r = 0
      For j = 1 To NoSurf
            S = 0
        For i = 0 To NoSque
                If SQIn(i).To = "-" Then
                   SQInN(i).To = "-"
                ElseIf SQIn(i).To = surf(j) Then
                     SQInN(i).To = SQIn(i).To & S
                     S = S + 1
                 End If
        Next i
        For c = 1 To NoSurf - 1
            If BP(c).From = surf(j) Then
              BPN(c).From = BP(c).From & S - 1
            End If
            If BP(c).To = surf(j) Then
              BPN(c).To = BP(c).To & S - 1
            End If
        Next c
        NoNode(j) = S
      Next j
      For i = 0 To NoSque
            n(i) = SQInN(i).To
            H(i) = Left(n(i), 1)
      Next
      For c = 0 To NoSque
        r = c + 1
         If H(c) = "-" Then
           SQInN(c).From = "-"
           r = r + 1
        Else
          Do Until r = NoSque + 1
             If SQIn(r).From = H(c) Then
                SQInN(r).From = SQInN(c).To
              End If
              r = r + 1
               Loop
          End If
      Next
      SQInN(0).From = "Root"
      For i = 0 To NoSque
      Next
   For i = 0 To NoSque
          If SQInN(i).From = "Root" Then
```

```
            part(i) = SQInN(i).To & " "
          ElseIf SQInN(i).From = "-" Then
            part(i) = SQInN(i).To
          ElseIf SQInN(i).From <> "Root" Then
                    For j = 0 To i
                     If SQInN(i).From = SQInN(j).To Then
                          part(i) = SQInN(i).To & " " & part(j)
                    End If
                    Next j
          End If
    Next i
   For r = 0 To NoSque
          If Right(SQInN(r).To, 1) = 0 Then
            finalP(r) = " "
            TolP(r) = "Solid Cut"
          ElseIf SQInN(r).From = "-" Then
            finalP(r) = " "
            TolP(r) = 0
          ElseIf Right(SQInN(r).To, 1) <>0 Then
                For i = 0 To NoSque
                      If SQInN(r).To = Left(part(i), 2) Then
                      FromS = part(i)
                      T = Right(SQInN(r).To, 1)
                      g = Left(SQInN(r).To, 1) & T - 1
                     End If
                Next
                For j = 0 To NoSque
                      If g = Left(part(j), 2) Then
                     ToS = part(j)
                     End If
                Next
                finalP(r) = Comp1(FromS, ToS)
                TolP(r) = CalTol(finalP(r))
                  If K(r) >4 Then
                       StockRB(r) = 0.5 + 2 * (TolP(r))
                  Else
                       StockRB(r) = 0.2 + 2 * (TolP(r))
                  End If
          End If
    Next r
For c = 1 To NoSurf - 1
        For i = 0 To NoSque
          If BPN(c).From = Left(part(i), 2) Then
          FromS = part(i)
          End If
        Next
        For j = 0 To NoSque
          If BPN(c).To = Left(part(j), 2) Then
          ToS = part(j)
          End If
        Next
        finalBP(c) = Comp1(FromS, ToS)
        TolBP(c) = CalTol(finalBP(c))
    Next
     Call MakeTree
     Call ShowArrow
     Call FineBasicCut
```

```
    Call ShowTC
End Sub


Sub MakeTree()
Dim rng As Variant
        Set rng = Range("RootNode").CurrentRegion
        rng.ClearContents
        DrawNode2 SQInN(1).From, 0, 0
End Sub

Sub DrawNode2(ByRef header As String, ByRef row As Integer, ByRef depth As Integer)
Range("RootNode").Offset(row, depth) = header
Dim r As Integer
   For r = 1 To NoSque
      If SQInN(r).From = header Then
         row = row + 1
          Range("RootNode").Offset(row, depth) = Chr(149)
         DrawNode2 SQInN(r).To, row, depth + 1
      End If
   Next
End Sub

Function Comp1(ByVal F As String, ByVal T As String) As String
Dim strArrayF() As String,  strArrayT() As String
Dim intCount As Integer, c As Integer
Dim a(50) As String, b(50) As String, n As String, m As String, D As String
strArrayF = Split(F, " ")
strArrayT = Split(T, " ")
       For i = LBound(strArrayF) To UBound(strArrayF)
          a(i) = Trim(strArrayF(i))
       Next
       For j = LBound(strArrayT) To UBound(strArrayT)
          b(j) = Trim(strArrayT(j))
       Next
          c = 1
       For i = LBound(strArrayF) To UBound(strArrayF)
          For l = LBound(strArrayT) To UBound(strArrayT)
                If a(i) = b(j) Then
                   c = 0
                End If
          Next
                If c = 1 Then
                   n = a(i) & " " & n
                End If
     Next
     c = 1
      For j = LBound(strArrayT) To UBound(strArrayT)
          For i = LBound(strArrayF) To UBound(strArrayF)
                  If a(i) = b(j) Then
                    c = 0
                End If
          Next
                  If c = 1 Then
           m = b(j) & " " & m
                  End If
       Next
```

```
        D = n & "" & m
        Comp1 = Trim(D)
 End Function

Function CalTol(ByVal PT As String) As Single
Dim strArrayP() As String
Dim i As Integer, j As Integer
Dim a() As String
        strArrayP = Split(PT, " ")
ReDim a(UBound(strArrayP))
        For i = LBound(strArrayP) To UBound(strArrayP)
            a(i) = Trim(strArrayP(i))
             For j = 0 To NoSque
                        If a(i) = SQInN(j).To Then
                        CalTol = SQInN(j).Tolerance + CalTol
                        End If
            Next
    Next
End Function

Function TolMC(ByVal mc As String, ByVal Bs As Single, ByRef K As Integer) As Single
            If mc = "Lapping M/C" Then 'IT2
                        K = 1
                        If Bs <= 3 Then
                           TolMC = 0.0012
                        ElseIf Bs >3 Or Bs >= 6 Then
                           TolMC = 0.0015
                        ElseIf Bs >6 Or Bs >= 10 Then
                           TolMC = 0.0015
                        ElseIf Bs >10 Or Bs >= 18 Then
                           TolMC = 0.002
                        ElseIf Bs >18 Or Bs >= 30 Then
                           TolMC = 0.0025
                        ElseIf Bs >30 Or Bs >= 50 Then
                           TolMC = 0.0025
                        ElseIf Bs >50 Or Bs >= 80 Then
                           TolMC = 0.003
                        ElseIf Bs >80 Or Bs >= 120 Then
                           TolMC = 0.004
                        ElseIf Bs >120 Or Bs >= 180 Then
                           TolMC = 0.005
                        ElseIf Bs >180 Or Bs >= 250 Then
                           TolMC = 0.007
                        ElseIf Bs >250 Or Bs >= 315 Then
                           TolMC = 0.008
                        ElseIf Bs >315 Or Bs >= 400 Then
                           TolMC = 0.009
                        ElseIf Bs >400 Or Bs >= 500 Then
                           TolMC = 0.01
                        ElseIf Bs >500 Or Bs >= 630 Then
                           TolMC = 0.011
                        ElseIf Bs >630 Or Bs >= 800 Then
                           TolMC = 0.013
                        ElseIf Bs >800 Or Bs >= 1000 Then
                           TolMC = 0.015
                        End If
                ElseIf mc = "Superfinishing M/C" Then 'IT4
```

```
            K = 2
              If Bs <= 3 Then
                TolMC = 0.003
             ElseIf Bs >3 Or Bs >= 6 Then
                TolMC = 0.004
              ElseIf Bs >6 Or Bs >= 10 Then
                TolMC = 0.004
             ElseIf Bs >10 Or Bs >= 18 Then
                TolMC = 0.005
              ElseIf Bs >18 Or Bs >= 30 Then
                TolMC = 0.006
             ElseIf Bs >30 Or Bs >= 50 Then
                TolMC = 0.007
            ElseIf Bs >50 Or Bs >= 80 Then
                TolMC = 0.008
           ElseIf Bs >80 Or Bs >= 120 Then
                TolMC = 0.01
            ElseIf Bs >120 Or Bs >= 180 Then
                TolMC = 0.012
            ElseIf Bs >180 Or Bs >= 250 Then
                TolMC = 0.014
           ElseIf Bs >250 Or Bs >= 315 Then
                TolMC = 0.016
           ElseIf Bs >315 Or Bs >= 400 Then
                TolMC = 0.018
            ElseIf Bs >400 Or Bs >= 500 Then
                TolMC = 0.02
           ElseIf Bs >500 Or Bs >= 630 Then
                TolMC = 0.022
           ElseIf Bs >630 Or Bs >= 800 Then
                TolMC = 0.025
           ElseIf Bs >800 Or Bs >= 1000 Then
                TolMC = 0.028
           End If
      ElseIf mc = "Diamond turning M/C" Then 'IT4
            K = 3
              If Bs <= 3 Then
                TolMC = 0.003
             ElseIf Bs >3 Or Bs >= 6 Then
                TolMC = 0.004
              ElseIf Bs >6 Or Bs >= 10 Then
                TolMC = 0.004
             ElseIf Bs >10 Or Bs >= 18 Then
                TolMC = 0.005
              ElseIf Bs >18 Or Bs >= 30 Then
                TolMC = 0.006
             ElseIf Bs >30 Or Bs >= 50 Then
                TolMC = 0.007
            ElseIf Bs >50 Or Bs >= 80 Then
                TolMC = 0.008
             ElseIf Bs >80 Or Bs >= 120 Then
                TolMC = 0.01
              ElseIf Bs >120 Or Bs >= 180 Then
                TolMC = 0.012
             ElseIf Bs >180 Or Bs >= 250 Then
                TolMC = 0.014
            ElseIf Bs >250 Or Bs >= 315 Then
```

```
            TolMC = 0.016
        ElseIf Bs >315 Or Bs >= 400 Then
            TolMC = 0.018
         ElseIf Bs >400 Or Bs >= 500 Then
            TolMC = 0.02
        ElseIf Bs >500 Or Bs >= 630 Then
            TolMC = 0.022
        ElseIf Bs >630 Or Bs >= 800 Then
            TolMC = 0.025
      ElseIf Bs >800 Or Bs >= 1000 Then
            TolMC = 0.028
        End If
ElseIf mc = "Grinding M/C" Then 'IT5
        K = 4
          If Bs <= 3 Then
            TolMC = 0.004
        ElseIf Bs >3 Or Bs >= 6 Then
            TolMC = 0.005
        ElseIf Bs >6 Or Bs >= 10 Then
            TolMC = 0.006
         ElseIf Bs >10 Or Bs >= 18 Then
            TolMC = 0.008
        ElseIf Bs >18 Or Bs >= 30 Then
            TolMC = 0.009
        ElseIf Bs >30 Or Bs >= 50 Then
            TolMC = 0.011
        ElseIf Bs >50 Or Bs >= 80 Then
            TolMC = 0.013
       ElseIf Bs >80 Or Bs >= 120 Then
            TolMC = 0.015
         ElseIf Bs >120 Or Bs >= 180 Then
            TolMC = 0.018
        ElseIf Bs >180 Or Bs >= 250 Then
            TolMC = 0.02
       ElseIf Bs >250 Or Bs >= 315 Then
            TolMC = 0.023
        ElseIf Bs >315 Or Bs >= 400 Then
            TolMC = 0.025
        ElseIf Bs >400 Or Bs >= 500 Then
            TolMC = 0.027
      ElseIf Bs >500 Or Bs >= 630 Then
            TolMC = 0.032
        ElseIf Bs >630 Or Bs >= 800 Then
            TolMC = 0.036
        ElseIf Bs >800 Or Bs >= 1000 Then
            TolMC = 0.04
        End If
ElseIf mc = "Turning M/C" Then 'IT6
        K = 5
        If Bs <= 3 Then
            TolMC = 0.006
        ElseIf Bs >3 Or Bs >= 6 Then
            TolMC = 0.008
        ElseIf Bs >6 Or Bs >= 10 Then
            TolMC = 0.009
        ElseIf Bs >10 Or Bs >= 18 Then
            TolMC = 0.011
```

```
        ElseIf Bs >18 Or Bs >= 30 Then
            TolMC = 0.013
        ElseIf Bs >30 Or Bs >= 50 Then
            TolMC = 0.016
        ElseIf Bs >50 Or Bs >= 80 Then
            TolMC = 0.019
        ElseIf Bs >80 Or Bs >= 120 Then
            TolMC = 0.022
        ElseIf Bs >120 Or Bs >= 180 Then
            TolMC = 0.025
        ElseIf Bs >180 Or Bs >= 250 Then
            TolMC = 0.029
        ElseIf Bs >250 Or Bs >= 315 Then
            TolMC = 0.032
        ElseIf Bs >315 Or Bs >= 400 Then
            TolMC = 0.036
        ElseIf Bs >4000 Or Bs >= 500 Then
            TolMC = 0.04
        ElseIf Bs >500 Or Bs >= 630 Then
            TolMC = 0.044
        ElseIf Bs >630 Or Bs >= 800 Then
            TolMC = 0.05
        ElseIf Bs >800 Or Bs >= 1000 Then
            TolMC = 0.056
        End If
    ElseIf mc = "Milling M/C" Then 'IT9
        K = 6
        If Bs <= 3 Then
            TolMC = 0.025
        ElseIf Bs >3 Or Bs >= 6 Then
            TolMC = 0.03
        ElseIf Bs >6 Or Bs >= 10 Then
            TolMC = 0.036
        ElseIf Bs >10 Or Bs >= 18 Then
            TolMC = 0.043
        ElseIf Bs >18 Or Bs >= 30 Then
            TolMC = 0.052
        ElseIf Bs >30 Or Bs >= 50 Then
            TolMC = 0.062
        ElseIf Bs >50 Or Bs >= 80 Then
            TolMC = 0.074
        ElseIf Bs >80 Or Bs >= 120 Then
            TolMC = 0.087
        ElseIf Bs >120 Or Bs >= 180 Then
            TolMC = 0.1
        ElseIf Bs >180 Or Bs >= 250 Then
            TolMC = 0.115
        ElseIf Bs >250 Or Bs >= 315 Then
            TolMC = 0.13
        ElseIf Bs >315 Or Bs >= 400 Then
            TolMC = 0.14
        ElseIf Bs >400 Or Bs >= 500 Then
            TolMC = 0.155
        ElseIf Bs >500 Or Bs >= 630 Then
            TolMC = 0.175
        ElseIf Bs >630 Or Bs >= 800 Then
            TolMC = 0.2
```

```
            ElseIf Bs >800 Or Bs >= 1000 Then
               TolMC = 0.23
            End If
        ElseIf mc = "Shaping M/C" Then 'IT10
            K = 7
             If Bs <= 3 Then
               TolMC = 0.04
            ElseIf Bs >3 Or Bs >= 6 Then
               TolMC = 0.048
             ElseIf Bs >6 Or Bs >= 10 Then
               TolMC = 0.058
            ElseIf Bs >10 Or Bs >= 18 Then
               TolMC = 0.07
             ElseIf Bs >18 Or Bs >= 30 Then
               TolMC = 0.084
            ElseIf Bs >30 Or Bs >= 50 Then
               TolMC = 0.1
             ElseIf Bs >50 Or Bs >= 80 Then
               TolMC = 0.12
             ElseIf Bs >80 Or Bs >= 120 Then
               TolMC = 0.14
            ElseIf Bs >120 Or Bs >= 180 Then
               TolMC = 0.16
            ElseIf Bs >180 Or Bs >= 250 Then
               TolMC = 0.185
             ElseIf Bs >250 Or Bs >= 315 Then
               TolMC = 0.21
             ElseIf Bs >315 Or Bs >= 400 Then
               TolMC = 0.23
             ElseIf Bs >400 Or Bs >= 500 Then
               TolMC = 0.25
            ElseIf Bs >500 Or Bs >= 630 Then
               TolMC = 0.28
             ElseIf Bs >630 Or Bs >= 800 Then
               TolMC = 0.32
             ElseIf Bs >800 Or Bs >= 1000 Then
               TolMC = 0.36
            End If
        ElseIf mc = "Drilling M/C" Then 'IT11
            K = 8
            If Bs <= 3 Then
               TolMC = 0.06
             ElseIf Bs >3 Or Bs >= 6 Then
               TolMC = 0.075
             ElseIf Bs >6 Or Bs >= 10 Then
               TolMC = 0.09
             ElseIf Bs >10 Or Bs >= 18 Then
               TolMC = 0.11
             ElseIf Bs >18 Or Bs >= 30 Then
               TolMC = 0.13
            ElseIf Bs >30 Or Bs >= 50 Then
               TolMC = 0.16
             ElseIf Bs >50 Or Bs >= 80 Then
               TolMC = 0.19
             ElseIf Bs >80 Or Bs >= 120 Then
               TolMC = 0.22
              ElseIf Bs >120 Or Bs >= 180 Then
```

```
                    TolMC = 0.25
                ElseIf Bs >180 Or Bs >= 250 Then
                    TolMC = 0.29
                ElseIf Bs >250 Or Bs >= 315 Then
                    TolMC = 0.32
                ElseIf Bs >315 Or Bs >= 400 Then
                    TolMC = 0.36
                 ElseIf Bs >400 Or Bs >= 500 Then
                    TolMC = 0.4
                ElseIf Bs >500 Or Bs >= 630 Then
                    TolMC = 0.44
                ElseIf Bs >630 Or Bs >= 800 Then
                    TolMC = 0.5
                ElseIf Bs >800 Or Bs >= 1000 Then
                    TolMC = 0.56
                End If
            Else
                    TolMC = 0
            End If
End Function

Sub BasicBP()
Dim i As Integer, j As Integer, n As Integer, m As Integer, F As Integer, T As Integer
Dim a As String, b As Single
      NoSurf = Sheets("Dimension Design").Range("ss").Value
ReDim BP(NoSurf)
ReDim GenBP(65 To 65 + NoSurf, 65 To 65 + NoSurf)
      For i = 1 To NoSurf - 1
          BP(i).From = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 1)
          F = Asc(BP(i).From)
          BP(i).To = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 2)
          T = Asc(BP(i).To)
          BP(i).Basic = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 3)
          BP(i).Tolerance = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 4)
            If F < T Then
                    GenBP(F, T) = BP(i).Basic
                    GenBP(T, F) = -BP(i).Basic
                    ElseIf F > T Then
                    GenBP(F, T) = -BP(i).Basic
                    GenBP(T, F) = BP(i).Basic
            End If
      Next i
      For i = 1 To NoSurf - 1
            F = Asc(BP(i).From)
            T = Asc(BP(i).To)
        For r = 65 To 64 + NoSurf
          If T <> r Or F <> r Then
            If GenBP(T, r) <>0 Then
              GenBP(F, r) = GenBP(F, T) + GenBP(T, r)
              GenBP(r, F) = -GenBP(F, r)
            End If
          End If
        Next
      Next

      For i = 65 To 64 + NoSurf
        For j = 65 To 64 + NoSurf
```

```
            If i = j Then
            GenBP(i, j) = 0
            ElseIf i <> j Then
               If GenBP(i, j) = 0 Then
                  n = 65
                  a = 0
                  b = 0
                  Do Until a <>0 And b <>0
                     If GenBP(i, n) <>0 Then
                       a = GenBP(i, n)
                        If GenBP(n, j) <>0 Then
                           b = GenBP(n, j)
                        End If
                     End If
                  n = n + 1
                  Loop
                    If i < j Then
                              GenBP(i, j) = a + b
                              GenBP(j, i) = -GenBP(i, j)
                              ElseIf i > j Then
                              GenBP(i, j) = -(a + b)
                              GenBP(j, i) = -GenBP(i, j)
                            End If
                  End If
            End If
         Next
      Next
End Sub

Function Basic(ByVal a As String, ByVal b As String) As Single
Dim i As Integer, j As Integer, F As Integer, T As Integer
      NoSurf = Sheets("Dimension Design").Range("ss").Value
      If a <> "-" And b <> "-" Then
            F = Asc(UCase(a))
            T = Asc(UCase(b))
            Basic = Abs(GenBP(F, T))
      Else
            Basic = 0
      End If
End Function

Sub FineBasicCut()
Dim i As Integer, j As Integer, c As Integer, F1 As Integer, F2 As Integer, T1 As Integer
Dim T2 As Integer, Nt As Integer, Nf As Integer
Dim FPart As String, TPart As String, P As String
Dim SRf As String, SRt As Single
ReDim BasicCut(NoSque)
      i = NoSque
Do Until i = 0
   If SQInN(i).From <> "-" Then
      F1 = Asc(SQInN(i).From)
      T1 = Asc(SQInN(i).To)
      F2 = CInt(Right(SQInN(i).From, 1))
      T2 = CInt(Right(SQInN(i).To, 1))
      If F1 <> 45 Then
            For j = 1 To NoSurf
                  If SQIn(i).From = surf(j) Then
```

```
                    Nf = NoNode(j) - 1
                End If
                 If SQIn(i).To = surf(j) Then
                    Nt = NoNode(j) - 1
                End If
            Next
            BasicCut(i) = Abs(GenBP(F1, T1))
               SRf = 0
               If F2 < Nf Then
                    Do Until F2 = Nf
                       FPart = SQIn(i).From & F2 + 1
                       TPart = SQIn(i).From & F2

                          For c = 1 To NoSque
                             If FPart = SQInN(c).To Then
                                SRf = SRf + (StockRB(c) * (DirectionC(c)))
                             End If
                          Next
                       F2 = F2 + 1
                    Loop
                     BasicCut(i) = BasicCut(i) + SRf
               End If

               If T2 < Nt Then
                SRt = 0
                    Do Until T2 = Nt
                       FPart = SQIn(i).To & T2 + 1
                       TPart = SQIn(i).To & T2

                          For c = 1 To NoSque
                             If FPart = SQInN(c).To Then
                                SRt = SRt + (StockRB(c) * (DirectionC(c)))
                             End If

                          Next
                       T2 = T2 + 1
                    Loop
                    BasicCut(i) = BasicCut(i) + SRt
               End If
      Else
          BasicCut(i) = 0
      End If
   End If
     i = i – 1
Loop
End Sub
```

ส่วนของการแสดงผล **(Output Module)**

```
Sub ShowTC()
Dim TC(1 To 7) As Variant, INP(1 To 7) As Variant, rng1 As Variant, rng2 As Variant
       NoSque = Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_s").Value
          Set TC(1) = Sheets("Tolerance Chart").Range("_OP.NO.").Offset(2, 0)
          Set TC(1) = TC(1).Resize(NoSque, 1)
          Set TC(2) = Sheets("Tolerance Chart").Range("_FaceCut").Offset(1, 0)
          Set TC(2) = TC(2).Resize(NoSque, 1)
          Set TC(3) = Sheets("Tolerance Chart").Range("_SelectMC").Offset(2, 0)
          Set TC(3) = TC(3).Resize(NoSque, 1)
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
        Set TC(4) = Sheets("Tolerance Chart").Range("_WBasic").Offset(2, 0)
        Set TC(4) = TC(4).Resize(NoSque, 1)
        Set TC(5) = Sheets("Tolerance Chart").Range("_WTol").Offset(1, 0)
        Set TC(5) = TC(5).Resize(NoSque, 1)
        Set TC(6) = Sheets("Tolerance Chart").Range("_SBasic").Offset(1, 0)
        Set TC(6) = TC(6).Resize(NoSque, 1)
        Set TC(7) = Sheets("Tolerance Chart").Range("_STol").Offset(1, 0)
        Set TC(7) = TC(7).Resize(NoSque, 1)
        Set INP(1) = Sheets("Sqeunce Operation").Range("_OP").Offset(1, 0)
        Set INP(1) = INP(1).Resize(NoSque, 1)
        Set INP(3) = Sheets("Sqeunce Operation").Range("_MC_inp").Offset(1, 0)
        Set INP(3) = INP(3).Resize(NoSque, 1)
        Set rng1 = Sheets("Tolerance Chart").Range("_Rtol").Offset(1, 0)
        Set rng1 = rng1.Resize(NoSurf - 1, 1)
        Set rng2 = Sheets("Tolerance Chart").Range("_BPTol").Offset(1, 0)
        Set rng2 = rng2.Resize(NoSurf - 1, 1)
        TC(1).Value = INP(1).Value
        TC(3).Value = INP(3).Value
        For i = 0 To TC(2).Rows.count
           TC(2).Cells(i + 1).Value = SQInN(i).To
           TC(5).Cells(i + 1).Value = SQInN(i).Tolerance
          With TC(5).Cells(i + 1).Interior
           .Pattern = xlSolid
           .PatternColorIndex = xlAutomatic
           .Color = 13434879
           .TintAndShade = 0
           .PatternTintAndShade = 0
           End With
           TC(6).Cells(i + 1).Value = StockRB(i)
           TC(7).Cells(i + 1).Value = TolP(i)
           TC(4).Cells(i).Value = BasicCut(i)
        Next
        For i = 1 To NoSurf - 1
        rng1.Cells(i).Value = TolBP(i)
        With rng1.Cells(i).Font
                .Color = xlThemeColorLight1
            End With
          If rng1.Cells(i).Value > rng2.Cells(i).Value Then
            With rng1.Cells(i).Font
               .Color = -16776961
            End With
          End If
        Next
End Sub

Sub ShowArrow()
Dim i As Integer, j As Integer, c()As Integer
Dim countj As Integer, counti As Integer, F As Integer, T As Integer
Dim rng As Variant, clr As Variant, H As Variant,H1 As Variant
Dim S As Variant, D() As Variant, TC As Variant, fromL As Variant, toL As Variant
Dim Name As String, FF As String, TT As String
Dim shp() As Variant, shpB() As Variant, NO() As Variant
   Set H = Sheets("Tolerance Chart").Range("_Headder")
   Set H1 = Sheets("Tolerance Chart").Range("_Headder1")
   Set rng = Range("Picture3")
   ReDim shpB(NoSurf)
   ReDim shp(NoSque)
```

```
    ReDim NO(NoSque)
   ReDim c(rng.Rows.count)
   ReDim D(rng.Columns.count)
   ReDim Stc(rng.Columns.count)
   ReDim DirectionC(NoSque)
   For i = 1 To H.Columns.count
      If H.Cells(i).Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = -4118 Then
            Set clr = H.Cells(i).Resize(2, 1)
            clr.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
      End If
       If H1.Cells(i).Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = -4118 Then
            Set clr = H1.Cells(i).Resize(2, 1)
            clr.Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = xlNone
      End If
Next
   Sheets("Tolerance Chart").Select
   Sheets("Tolerance Chart").Shapes.SelectAll
    Selection.Delete
   Name = 64
   countj = 0
   For j = 2 To rng.Columns.count
    counti = 0
         For i = 1 To rng.Rows.count
               If rng.Cells(i, j).Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = 1 Then
                     counti = counti + 1
                     Set D(j) = rng.Cells(i, j)
               End If
          Next
      If counti <>0 Then
         Set D(j) = D(j).Offset(-counti + 1, 0).Resize(counti, 1)
           If D(j).Interior.ThemeColor = 3 Then
               Stc(j) = -1
           Else
               Stc(j) = 1
           End If
           countj = countj + 1
           Name = Name + 1
          Set S = rng.Cells(rng.Rows.count - 1, j)
               S.Value = Chr(Name)
            Set S = Range(D(j).Offset(counti, 0).Resize(1, 1), S)
                  With S.Borders(xlEdgeLeft)
                     .LineStyle = xlDot
                     .ColorIndex = 0
                     .TintAndShade = 0
                     .Weight = xlThin
                  End With
               Set S = rng.Cells(rng.Rows.count - 1, j).Offset(1, 0)
               Set S = S.Resize(NoSque + NoSurf + 6, 1)
                With S.Borders(xlEdgeLeft)
                     .LineStyle = xlDot
                     .ColorIndex = 0
                     .TintAndShade = 0
                     .Weight = xlThin
                  End With
      End If
   Next
   Set TC = H.Resize(1, H.Columns.count).Offset(-2, 0)
```

```
    For j = 1 To TC.Columns.count
       FF = CStr(TC.Cells(j))
                If SQIn(0).To = FF Then
                   Set toL = TC.Cells(j).Offset(5)
                      If SQIn(0).From = "Root" Then
                         If SQIn(0).To = surf(1) Then
                            Set fromL = toL.Offset(0, -1)
                         ElseIf SQIn(0).To = surf(NoSurf) Then
                            Set fromL = toL.Offset(0, 1)
                         End If
                      End If
          Set shp(0) = Sheets("Tolerance Chart").Shapes.AddConnector(msoConnectorStraight,
fromL.Left, fromL.Top, toL.Left, toL.Top)
          With shp(0).Line
             .Visible = msoTrue
             .ForeColor.ObjectThemeColor = msoThemeColorText1
            .Weight = 1
            .EndArrowheadStyle = msoArrowheadTriangle
          End With
          End If
    Next
          For i = 1 To NoSque
          If SQIn(i).mc <> "-" Then
             For j = 1 To TC.Columns.count
                FF = CStr(TC.Cells(j))
                If SQIn(i).To = FF Then
                   Set toL = TC.Cells(j).Offset(5 + i)
                      T = j
                End If
                If SQIn(i).From = FF Then
                      Set fromL = TC.Cells(j).Offset(5 + i)
                      F = j
                End If
             Next
                   If F < T Then
                      DirectionC(i) = Stc(T) * (-1)
                   Else
                      DirectionC(i) = Stc(T)
                   End If
                Set shp(i) = Sheets("Tolerance Chart").Shapes.AddConnector(msoConnectorStraight,
fromL.Left, _
                  fromL.Top, toL.Left, toL.Top)
                  With shp(i).Line
                     .Visible = msoTrue
                     .ForeColor.ObjectThemeColor = msoThemeColorText1
                    .Weight = 1
                    .BeginArrowheadStyle = msoArrowheadOval
                    .EndArrowheadStyle = msoArrowheadTriangle
                  End With
                     If fromL.Left < toL.Left Then
                      ActiveSheet.Shapes.AddLabel(msoTextOrientationHorizontal, fromL.Left +
(toL.Left - fromL.Left) / 2, _
                         fromL.Top - 21, 30, 30).Select
                      Selection.ShapeRange(1).TextFrame2.TextRange.Characters.Text = i
                      ElseIf fromL.Left > toL.Left Then
                          ActiveSheet.Shapes.AddLabel(msoTextOrientationHorizontal, toL.Left +
(fromL.Left - toL.Left) / 2, _
```

```
                    toL.Top - 21, 30, 30).Select
                Selection.ShapeRange(1).TextFrame2.TextRange.Characters.Text = i
                End If
        End If
    Next
  For i = 1 To NoSurf - 1
        For j = 1 To TC.Columns.count
          FF = CStr(TC.Cells(j))
          If BP(i).To = FF Then
            Set toL = TC.Cells(j).Offset(8 + NoSque + i)
          End If
          If BP(i).From = FF Then
            Set fromL = TC.Cells(j).Offset(8 + NoSque + i)
          End If
        Next
     Set shpB(i) = Sheets("Tolerance Chart").Shapes.AddConnector(msoConnectorStraight,
fromL.Left, _
        fromL.Top, toL.Left, toL.Top)
        With shpB(i).Line
          .Visible = msoTrue
          .ForeColor.ObjectThemeColor = msoThemeColorText1
          .Weight = 1
          .BeginArrowheadStyle = msoArrowheadOval
          .EndArrowheadStyle = msoArrowheadOval
        End With
        Next
  Sheets("Sqeunce Operation").Select
  ActiveSheet.Shapes.Range(Array("CommandButton1")).Select
  Selection.Copy
  Sheets("Tolerance Chart").Select
  Range("BL4").Select
  ActiveSheet.Paste
End Sub
```

ส่วนของการแก้ไขและพัฒนา(Improvement Module)

```
Sub NewCutEdit()
Dim n() As String, H() As String, g As String
Dim i  As Integer, j As Integer, r As Integer, c As Integer, T As Integer, K() As Integer
Dim FromS As String, ToS As String
Dim a() As String, b() As String
Dim strArrayP() As String
Dim intCount As Integer
Dim rng As Variant
  NoSurf = Sheets("Dimension Design").Range("ss").Value
  NoSque = Sheets("Sqeunce Operation").Range("No_s").Value
  ReDim H(NoSque)
  ReDim n(NoSque)
  ReDim SQIn(NoSque)
  ReDim BP(NoSurf)
  ReDim BPN(NoSurf)
  ReDim surf(NoSurf)
  ReDim SQInN(NoSque)
  ReDim part(NoSque)
  ReDim finalP(NoSque)
  ReDim finalBP(NoSurf)
  ReDim TolP(NoSque)
  ReDim TolBP(NoSurf)
```

```
ReDim NoNode(NoSurf)
ReDim StockRB(NoSque)
ReDim DirectionC(NoSque)
ReDim DivBStc(NoSque)
 ReDim K(NoSque)
      For i = 1 To NoSurf
         surf(i) = Chr(i + 64)
      Next i
       SQIn(0).From = "Root"
       SQIn(0).To = Sheets("sqeunce operation").Range("_RefCut").Offset(1, 0)
       For i = 1 To NoSque
          SQIn(i).OP = Sheets("sqeunce operation").Range("_OP").Offset(i, 0)
          SQIn(i).From = Sheets("sqeunce operation").Range("_RefCut").Offset(i, 0)
          SQIn(i).To = Sheets("sqeunce operation").Range("_FacCut").Offset(i, 0)
          SQIn(i).mc = Sheets("sqeunce operation").Range("_MC_inp").Offset(i, 0)
          SQIn(i).Tolerance = Sheets("sqeunce operation").Range("_Tol").Offset(i, 0)
       Next
       Set rng = Range("_WTol").Offset(1, 0)
       Set rng = rng.Resize(NoSque + 1, 1)

Call BasicBP
    For i = 1 To NoSque
          SQIn(i).Basic = Basic(SQIn(i).From, SQIn(i).To)
          K(i) = 0
          SQInN(i).Tolerance = rng.Cells(i + 1)
       Next
       For i = 1 To NoSurf - 1
          BP(i).From = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 1)
          BP(i).To = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 2)
          BP(i).Basic = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 3)
          BP(i).Tolerance = Sheets("dimension design").Range("No_dim").Offset(i, 4)
      Next i
   r = 0
   For j = 1 To NoSurf
         S = 0
      For i = 0 To NoSque
               If SQIn(i).To = "-" Then
                  SQInN(i).To = "-"
               ElseIf SQIn(i).To = surf(j) Then
                     SQInN(i).To = SQIn(i).To & S
                     S = S + 1
                End If
      Next i
      For c = 1 To NoSurf - 1
          If BP(c).From = surf(j) Then
            BPN(c).From = BP(c).From & S - 1
          End If
          If BP(c).To = surf(j) Then
            BPN(c).To = BP(c).To & S - 1
          End If
      Next c
      NoNode(j) = S
   Next j
   For i = 0 To NoSque
          n(i) = SQInN(i).To
          H(i) = Left(n(i), 1)
   Next
```

```
    For c = 0 To NoSque
       r = c + 1
        If H(c) = "-" Then
          SQInN(c).From = "-"
          r = r + 1
       Else
         Do Until r = NoSque + 1
           If SQIn(r).From = H(c) Then
              SQInN(r).From = SQInN(c).To
            End If
            r = r + 1
             Loop
          End If
    Next
    SQInN(0).From = "Root"
 For i = 0 To NoSque
        If SQInN(i).From = "Root" Then
          part(i) = SQInN(i).To & " "
        ElseIf SQInN(i).From = "-" Then
          part(i) = SQInN(i).To
       ElseIf SQInN(i).From <> "Root" Then
                    For j = 0 To i
                     If SQInN(i).From = SQInN(j).To Then
                          part(i) = SQInN(i).To & " " & part(j)
                    End If
                    Next j
        End If
 Next i
For r = 0 To NoSque
       If Right(SQInN(r).To, 1) = 0 Then
          finalP(r) = " "
          TolP(r) = "Solid Cut"
       ElseIf SQInN(r).From = "-" Then
          finalP(r) = " "
          TolP(r) = 0
       ElseIf Right(SQInN(r).To, 1) <>0 Then
            For i = 0 To NoSque
                  If SQInN(r).To = Left(part(i), 2) Then
                  FromS = part(i)
                  T = Right(SQInN(r).To, 1)
                  g = Left(SQInN(r).To, 1) & T - 1
                 End If
            Next
            For j = 0 To NoSque
                  If g = Left(part(j), 2) Then
                 ToS = part(j)
                 End If
            Next
            finalP(r) = Comp1(FromS, ToS)
            TolP(r) = CalTol(finalP(r))
              If K(r) >4 Then
                  StockRB(r) = 0.5 + 2 * (TolP(r))
              Else
                  StockRB(r) = 0.2 + 2 * (TolP(r))
              End If
       End If
 Next r
```

```
For c = 1 To NoSurf - 1
        For i = 0 To NoSque
           If BPN(c).From = Left(part(i), 2) Then
           FromS = part(i)
          End If
       Next
       For j = 0 To NoSque
           If BPN(c).To = Left(part(j), 2) Then
          ToS = part(j)
          End If
       Next
       finalBP(c) = Comp1(FromS, ToS)
       TolBP(c) = CalTol(finalBP(c))
   Next
    Call FineBasicCut
    Call ShowTC
End Sub

Sub FineFaceCut()
   Dim i, j, c(), countj, counti As Integer
   Dim rng, S, D() As Variant
   Dim Name As String
   Set rng = Range("Picture2")
   ReDim c(rng.Rows.count)
   ReDim D(rng.Columns.count)
   ReDim Stc(rng.Columns.count)
   Name = 64
   countj = 0
   For j = 2 To rng.Columns.count
    counti = 0
         For i = 1 To rng.Rows.count
               If rng.Cells(i, j).Borders(xlEdgeLeft).LineStyle = 1 Then
                     counti = counti + 1
                     Set D(j) = rng.Cells(i, j)
               End If
         Next
       If counti <> 0 Then
         Set D(j) = D(j).Offset(-counti + 1, 0).Resize(counti, 1)
            countj = countj + 1
            Name = Name + 1
           Set S = rng.Cells(rng.Rows.count - 1, j)
              S.Value = Chr(Name)
            Set S = Range(D(j).Offset(counti, 0).Resize(1, 1), S)
                 With S.Borders(xlEdgeLeft)
                    .LineStyle = xlDot
                    .ColorIndex = 0
                    .TintAndShade = 0
                    .Weight = xlThin
                 End With
       End If
   Next
     SurfCW = countj
End Sub
```

ภาคผนวก ง

การทดสอบโปรแกรมโดยการคำนวณด้วยมือ

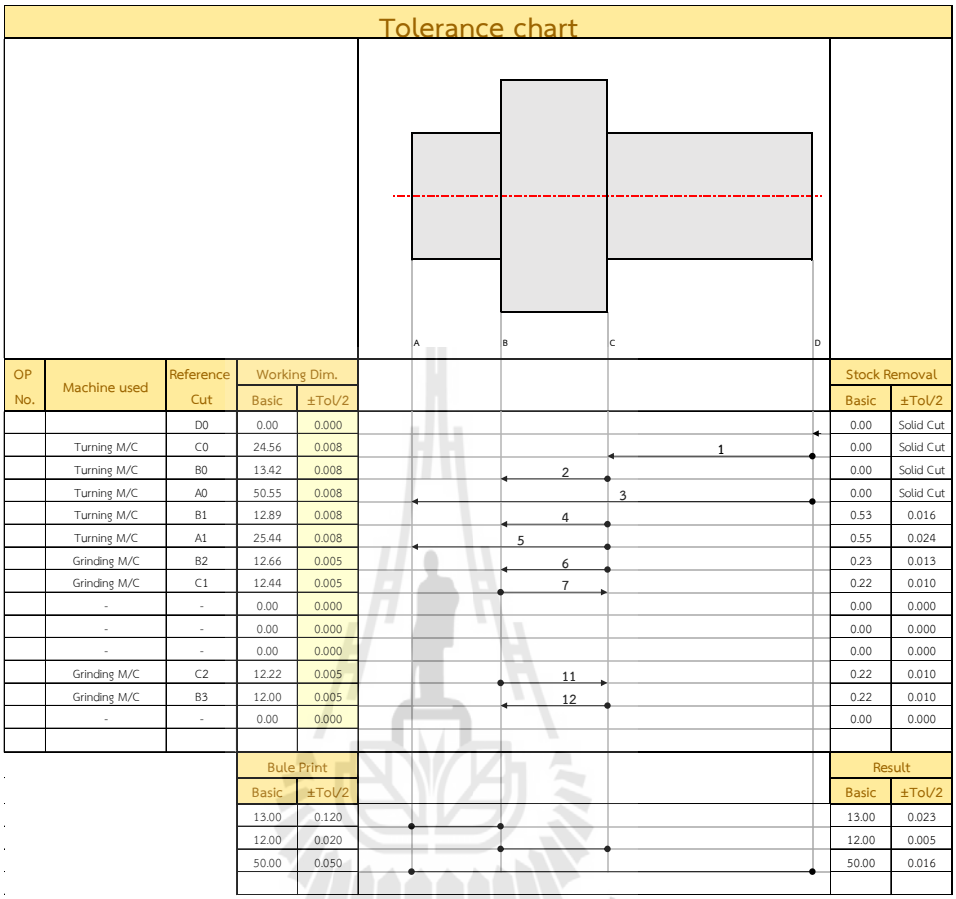
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากโปรแกรมแผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ได้สร้างขึ้นในงานวิจัยชิ้นงาน เป็นโปรแกรมสำหรับสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนบนโปรแกรม Microsoft excel ซึ่งเพื่อทดสอบความถูกต้องและความสามารถให้การใช้งาน จึงทดสอบด้วยการเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรมสร้างแผนภูมิความคลาดเคลื่อนกับแผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ใช้วิธีการสร้างและคำนวณแผนภูมิความคลาดเคลื่อนด้วยมือตามคำแนะนำของ Wade (1967) และ Gadzala (1959) เป็นจำนวน 5 ตัวอย่าง

ในตัวอย่างที่ 1 - 3 ใช้ Balance dimension ซึ่ง Wade ใช้ตลอดในหนังสือของเขา ส่วนตัวอย่างที่ 4 และ 5 ใช้ Method of traces ของ Gadzala ซึ่งในความจริงแล้วก็คือวิธีการที่ปรับปรุงมาจากการใช้ Balance dimensions นั่นเอง แต่วิธีการนี้ใช้แผนภาพ (diagram) ที่เกิดจากการลากเส้นอย่างต่อเนื่อง แทนที่จะแยกแผนภาพเป็นส่วน ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวอย่างที่ 1



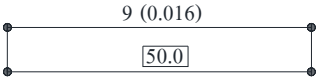
Tolerance chart

OP No.	Machine used	Reference Cut	Working Dim. Basic	Working Dim. ±Tol/2	Stock Removal Basic	Stock Removal ±Tol/2
		D0	0.00	0.000	0.00	Solid Cut
	Turning M/C	C0	24.56	0.008	0.00	Solid Cut
	Turning M/C	B0	13.42	0.008	0.00	Solid Cut
	Turning M/C	A0	50.55	0.008	0.00	Solid Cut
	Turning M/C	B1	12.89	0.008	0.53	0.016
	Turning M/C	A1	25.44	0.008	0.55	0.024
	Grinding M/C	B2	12.66	0.005	0.23	0.013
	Grinding M/C	C1	12.44	0.005	0.22	0.010
	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000
	Grinding M/C	C2	12.22	0.005	0.22	0.010
	Grinding M/C	B3	12.00	0.005	0.22	0.010
	-	-	0.00	0.000	0.00	0.000

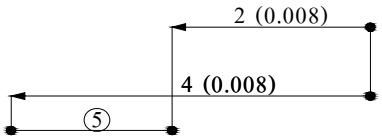
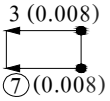
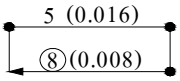
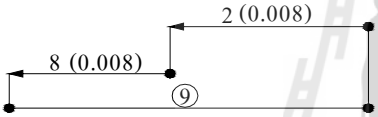
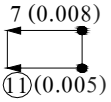
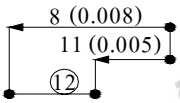
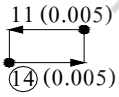
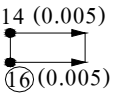
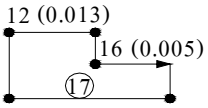
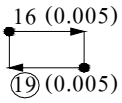
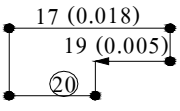
Bule Print Basic	Bule Print ±Tol/2	Result Basic	Result ±Tol/2
13.00	0.120	13.00	0.023
12.00	0.020	12.00	0.005
50.00	0.050	50.00	0.016

รูปที่ 1.1แผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรมในตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 1.1แสดงความคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน

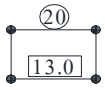
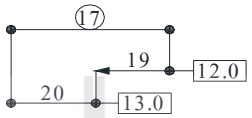
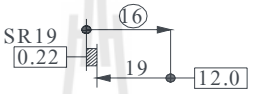
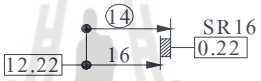
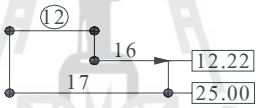
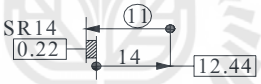
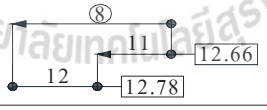
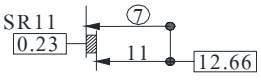
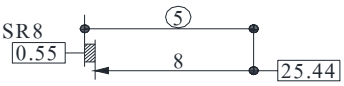
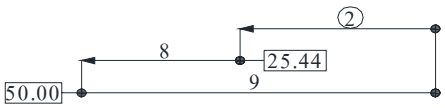
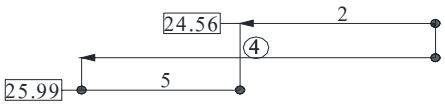
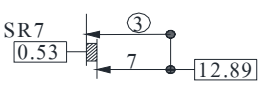
Resultant		Loop Diagrams
Basic Size (Basic)	Toleraces (± Tol.)	
13.00	0.023	
12.00	0.005	
50.00	0.016	

ตารางที่ 1.2แสดงความคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการผลิต

Line No.	Loop Diagrams	Balance Dimensions		Stock Removal	
		Toleraces (± Tol.)	Basic Size (Basic)	Toleraces (± Tol.)	Basic Size (Basic)
2				Solid cut	
3				Solid cut	
4				Solid cut	
5		0.016			
7				0.016	0.53
8				0.024	0.55
9		0.016			
11				0.013	0.23
12		0.013			
14				0.010	0.22
16				0.010	0.22
17		0.018			
19				0.010	0.22
20		0.023			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 1.3แสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต

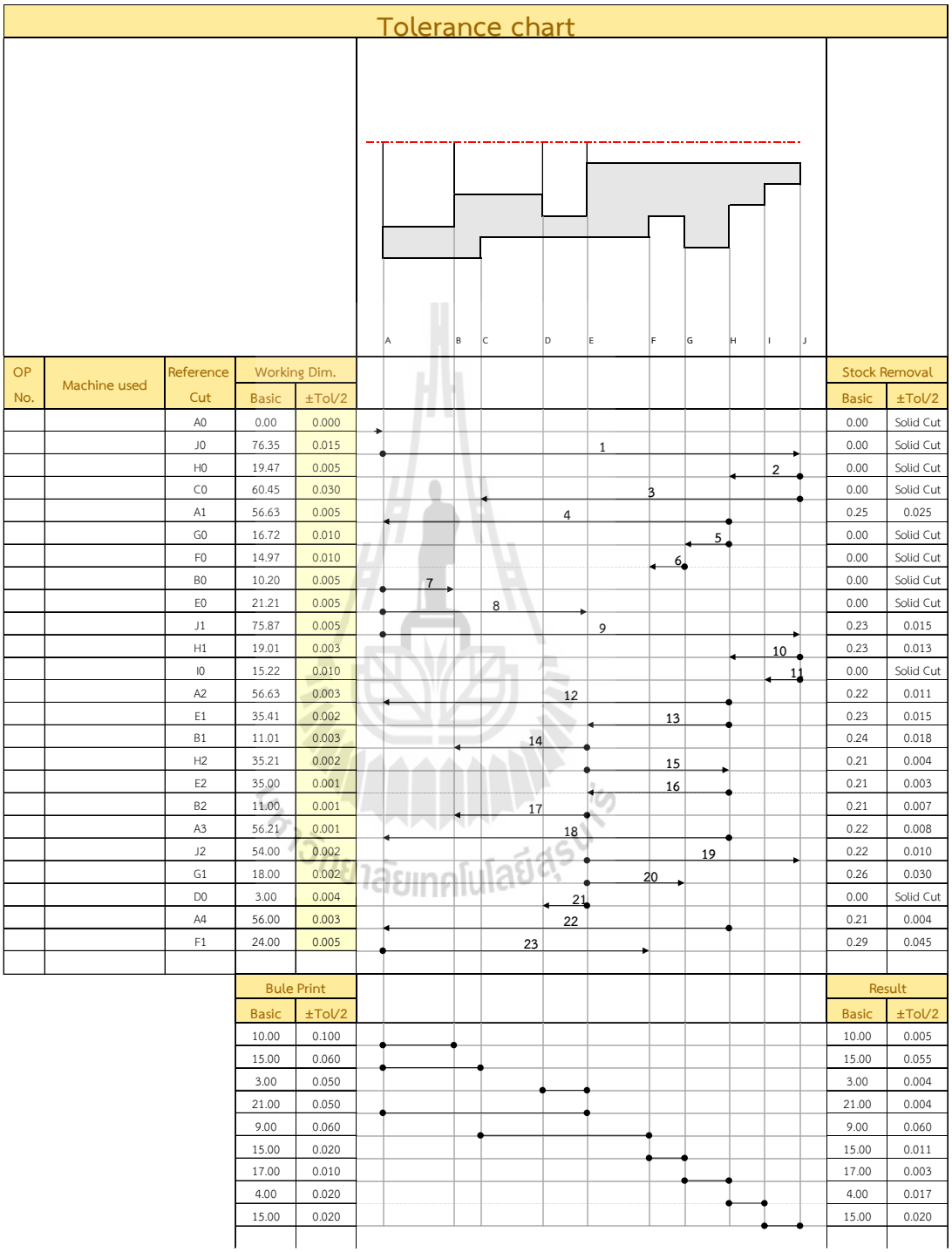
Line No.	Basic Size (Basic)		Loop Diagrams
	Working Dimensions	Balance Dimensions	
20		13.00	
19	12.00		
17		25.00	
16	12.22		
14	12.44		
12		12.78	
11	12.66		
9		50.00	
8	25.44		
7	12.89		
5		25.99	
2	24.56		
4	50.55		
3	13.42		

LINE NO.	OPER NO.	MACHINE USED	WORKING DIM.		A B C D	BALANCE DIM.		STOCK REMOVAL	
			BASIC	±TOL/2		BASIC	±TOL/2	BASIC	±TOL/2
1	10	W&S							
2	"	"	24.56	0.008					Solid cut
3	"	"	13.42	0.008					Solid cut
4	"	"	50.55	0.008					Solid cut
5						25.99	0.016		
6									
7	20	HARDING	12.89	0.008				0.53	0.016
8	"	"	25.44	0.008				0.55	0.024
9						50	0.016		
10									
11	30	NORTON	12.66	0.005				0.23	0.013
12						12.78	0.013		
13									
14	40	"	12.44	0.005				0.22	0.010
15									
16	100	"	12.22	0.005				0.22	0.010
17						25	0.018		
18									
19	110	"	12	0.005				0.22	0.010
20						13	0.023		
21									
			BLUE PRINT			RESULTANTS			
			13	0.12		13	0.023		
			12	0.02		12	0.005		
			50	0.05		50	0.016		

รูปที่ 1.2 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนในตัวอย่างที่ 1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวอย่างที่ 2



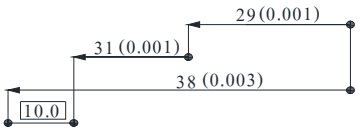
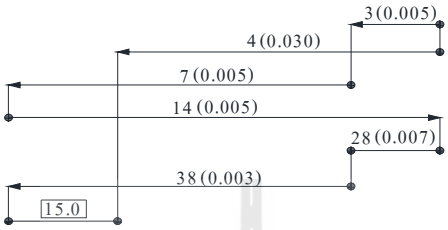
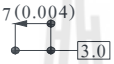
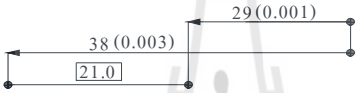
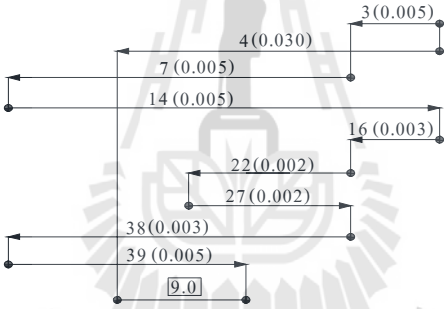
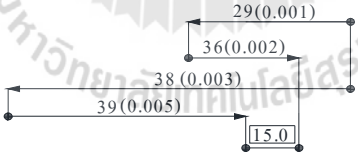
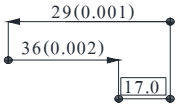
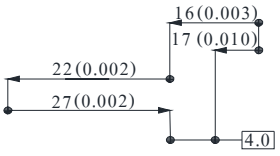
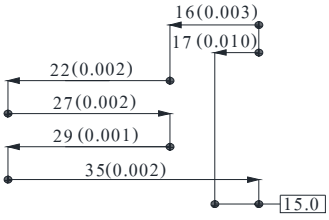
Tolerance chart

OP No.	Machine used	Reference Cut	Working Dim. Basic	Working Dim. ±Tol/2	Stock Removal Basic	Stock Removal ±Tol/2
		A0	0.00	0.000	0.00	Solid Cut
		J0	76.35	0.015	0.00	Solid Cut
		H0	19.47	0.005	0.00	Solid Cut
		C0	60.45	0.030	0.00	Solid Cut
		A1	56.63	0.005	0.25	0.025
		G0	16.72	0.010	0.00	Solid Cut
		F0	14.97	0.010	0.00	Solid Cut
		B0	10.20	0.005	0.00	Solid Cut
		E0	21.21	0.005	0.00	Solid Cut
		J1	75.87	0.005	0.23	0.015
		H1	19.01	0.003	0.23	0.013
		I0	15.22	0.010	0.00	Solid Cut
		A2	56.63	0.003	0.22	0.011
		E1	35.41	0.002	0.23	0.015
		B1	11.01	0.003	0.24	0.018
		H2	35.21	0.002	0.21	0.004
		E2	35.00	0.001	0.21	0.003
		B2	11.00	0.001	0.21	0.007
		A3	56.21	0.001	0.22	0.008
		J2	54.00	0.002	0.22	0.010
		G1	18.00	0.002	0.26	0.030
		D0	3.00	0.004	0.00	Solid Cut
		A4	56.00	0.003	0.21	0.004
		F1	24.00	0.005	0.29	0.045

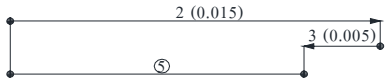
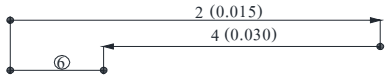
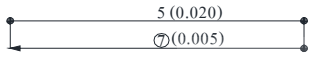
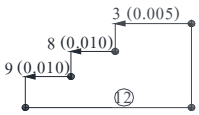
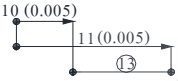
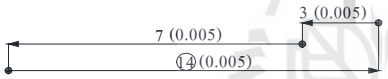
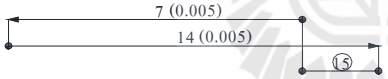
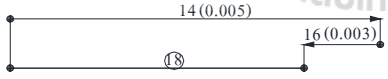
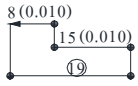
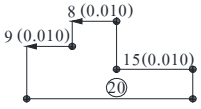
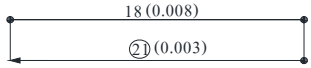
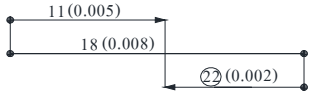
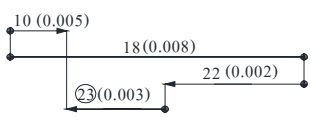
Bule Print Basic	Bule Print ±Tol/2	Result Basic	Result ±Tol/2
10.00	0.100	10.00	0.005
15.00	0.060	15.00	0.055
3.00	0.050	3.00	0.004
21.00	0.050	21.00	0.004
9.00	0.060	9.00	0.060
15.00	0.020	15.00	0.011
17.00	0.010	17.00	0.003
4.00	0.020	4.00	0.017
15.00	0.020	15.00	0.020

รูปที่ 2.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรมในตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงความคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน

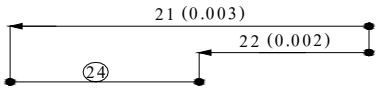
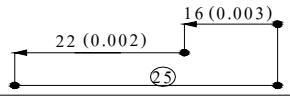
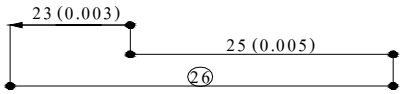
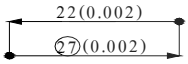
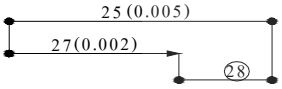
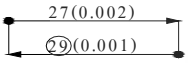
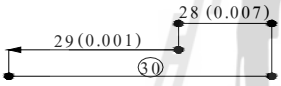
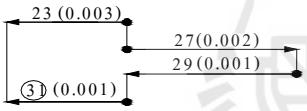
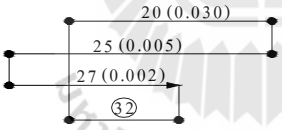
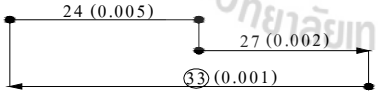
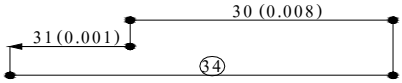
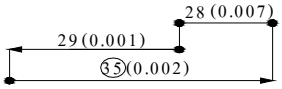
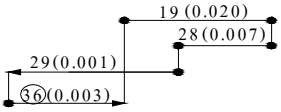
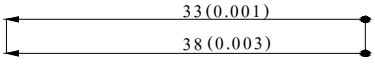
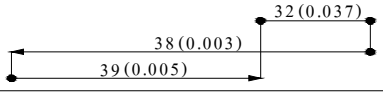
Resultant		Loop Diagrams
Basic Size (Basic)	Toleraces (± Tol.)	
10.0	0.005	
15.0	0.055	
3.0	0.004	
21.0	0.004	
9.0	0.060	
15.0	0.011	
17.0	0.003	
4.0	0.017	
15.0	0.020	

ตารางที่ 2.2แสดงความคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการผลิต

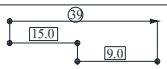
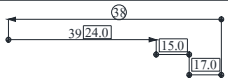
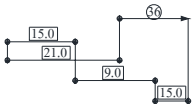
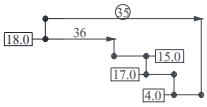
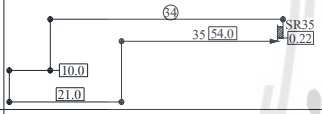
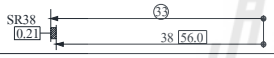
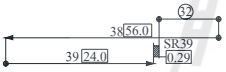
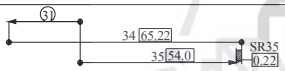
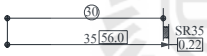
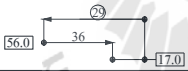
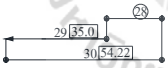
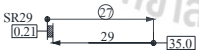
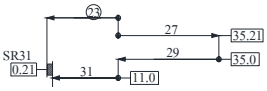
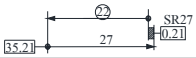
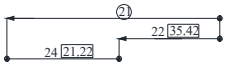
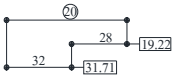
Line No.	Loop Diagrams	Balance Dimensions		Stock Removal	
		Toleraces (+ Tol.)	Basic Size (Basic)	Toleraces (+ Tol.)	Basic Size (Basic)
2				Solid cut	
3				Solid cut	
4				Solid cut	
5		0.020			
6		0.045			
7				0.025	0.25
8				Solid cut	
9				Solid cut	
10				Solid cut	
11				Solid cut	
12		0.025			
13		0.010			
14				0.015	0.23
15		0.010			
16				0.013	0.23
17				Solid cut	
18		0.008			
19		0.020			
20		0.030			
21				0.011	0.22
22				0.015	0.23
23					

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

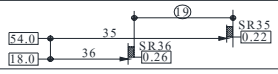
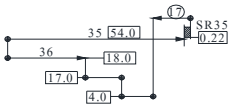
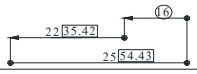
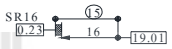
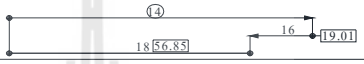
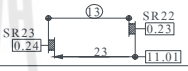
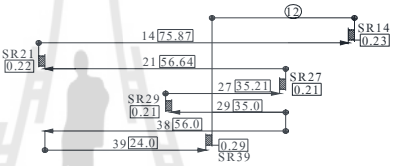
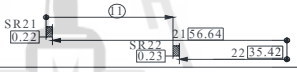
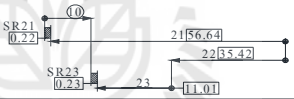
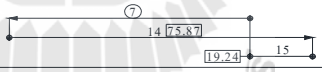
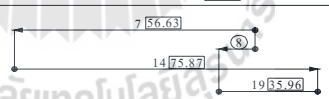
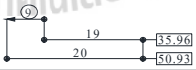
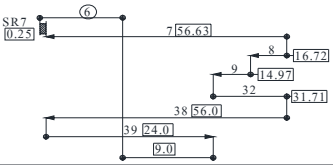
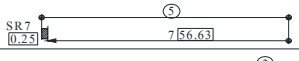
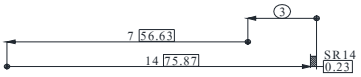
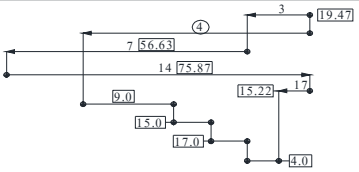
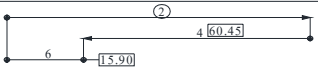
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงความคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการผลิต (ต่อ)

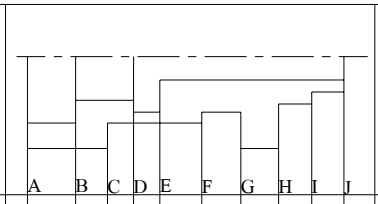
Line No.	Loop Diagrams	Balance Dimensions		Stock Removal	
		Toleraces (+ Tol.)	Basic Size (Basic)	Toleraces (+ Tol.)	Basic Size (Basic)
24		0.005			
25		0.005			
26		0.008			
27				0.004	0.21
28		0.007			
29				0.003	0.21
30		0.008			
31				0.007	0.21
32		0.037			
33				0.008	0.22
34		0.009			
35				0.010	0.22
36				0.030	0.2600
37				Solid cut	
38				0.004	0.21
39				0.045	0.29

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต

Line No.	Basic Size (Basic)		Loop Diagrams
	Working Dimensions	Balance Dimensions	
39	24.00		
38	56.00		
37	3.00		
36	18.00		
35	54.00		
34		65.22	
33	56.21		
32		31.71	
31	11.00		
30		54.22	
29	35.00		
28		19.22	
27	35.21		
26		65.41	
25		54.43	
24		21.22	
23	11.00		
22	35.42		
21	56.64		
20		50.93	

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต (ต่อ)

Line No.	Basic Size (Basic)		Loop Diagrams
	Working Dimensions	Balance Dimensions	
19		35.96	
18		56.86	
17	15.22		
16	19.01		
15		19.24	
14	75.87		
13		11.02	
12		51.57	
11	21.21		
10	10.20		
7	56.63		
8	16.72		
9	15.20		
6		15.90	
5		56.88	
3	19.47		
4	60.45		
2	76.35		

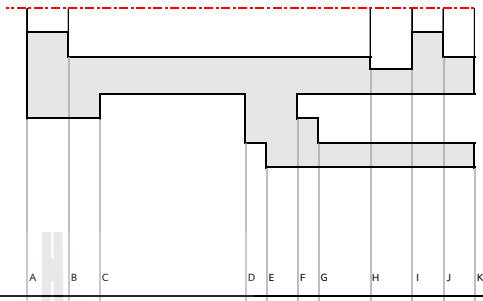


LINE NO.	OPER NO.	MACHINE USED	WORKING DIM. BASIC	WORKING DIM. ±TOL/2	BALANCE DIM. BASIC	BALANCE DIM. ±TOL/2	STOCK REMOVAL BASIC	STOCK REMOVAL ±TOL/2
			76.35	0.015				Solid cut
			19.47	0.005				Solid cut
			60.45	0.030				Solid cut
					56.88	0.020		
					15.90	0.045		
			56.63	0.005			0.250	0.015
			16.72	0.010				Solid cut
			14.97	0.010				Solid cut
			10.20	0.005				Solid cut
			21.21	0.005				Solid cut
					51.16	0.025		
					11.01	0.010		
			75.87	0.005			0.230	0.015
					19.24	0.010		
			19.01	0.003			0.226	0.013
			15.22	0.010				Solid cut
					56.86	0.008		
					60.65	0.015		
					3.50	0.045		
			56.32	0.003			0.222	0.011
			35.41	0.002			0.230	0.015
			11.01	0.003			0.236	0.018
					46.42	0.005		
					10.00	0.008		
					54.43	0.005		
			35.21	0.002			0.208	0.004
					19.22	0.007		
			35.00	0.001			0.206	0.003
					54.22	0.008		
			11.00	0.001			0.214	0.007
					46.00	0.002		
			56.00	0.001			0.216	0.008
					65.00	0.009		
			54.00	0.002			0.220	0.010
			18.00	0.002			0.260	0.030
			3.00	0.004				Solid cut
			56.00	0.003			0.208	0.004
			24.00	0.005			0.290	0.045
			BLUE PRINT		RESULTANTS			
			10	0.10	10	0.005		
			15	0.06	15	0.055		
			3	0.05	3	0.004		
			21	0.05	21	0.004		
			9	0.06	9	0.060		
			15	0.02	15	0.011		
			17	0.10	17	0.003		
			4	0.02	4	0.017		
			15	0.02	15	0.020		

รูปที่ 2.2 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนในตัวอย่างที่ 2

ตัวอย่างที่ 3

Tolerance chart

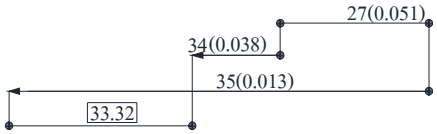
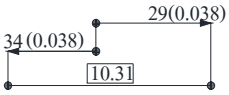
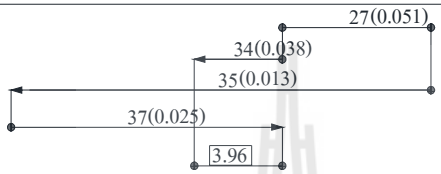
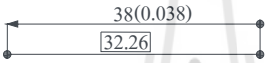
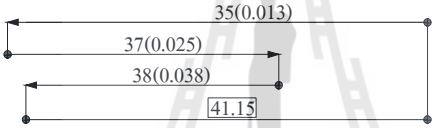
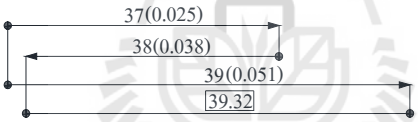
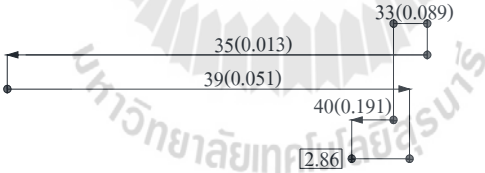
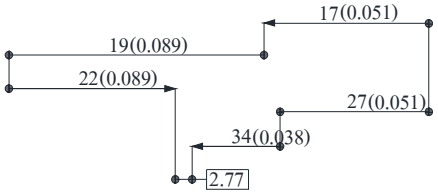
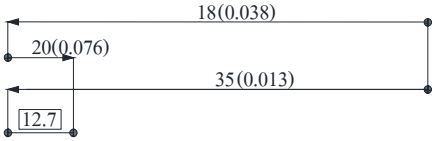
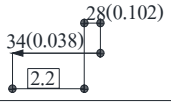


OP No.	Machine used	Reference Cut	Working Dim. Basic	Working Dim. ±Tol/2	Stock Removal Basic	Stock Removal ±Tol/2
		K0	0.00	0.000	0.00	Solid Cut
		A0	49.12	0.254	0.00	Solid Cut
		D0	33.40	0.076	0.00	Solid Cut
		E0	34.03	0.127	0.00	Solid Cut
		C0	15.50	0.064	0.00	Solid Cut
		K1	13.68	0.076	1.41	0.457
		G0	7.71	0.102	0.00	Solid Cut
		I0	1.71	0.076	0.00	Solid Cut
		F0	11.46	0.102	0.00	Solid Cut
		B0	42.86	0.076	0.00	Solid Cut
		F1	10.65	0.051	0.81	0.153
		A1	46.72	0.038	0.98	0.241
		C1	13.25	0.076	1.26	0.381
		D1	31.10	0.089	1.31	0.406
		A2	46.42	0.013	0.30	0.051
		G1	37.91	0.038	0.81	0.153
		I1	5.97	0.038	0.83	0.165
		B1	33.49	0.051	0.86	0.178
		E1	4.34	0.038	0.83	0.165
		A3	46.17	0.013	0.25	0.026
		G2	37.28	0.025	0.38	0.089
		B2	32.26	0.038	0.86	0.178
		J0	44.34	0.051	0.00	Solid Cut
		H0	2.15	0.191	0.00	Solid Cut

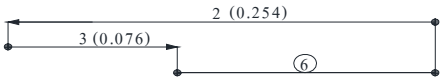
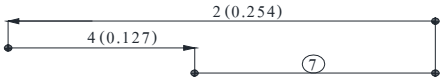
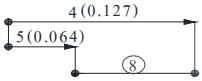
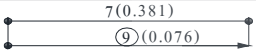
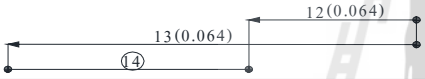
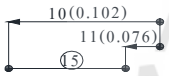
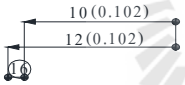
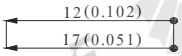
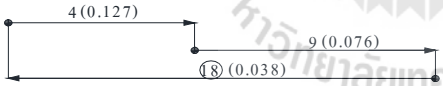
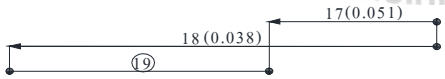
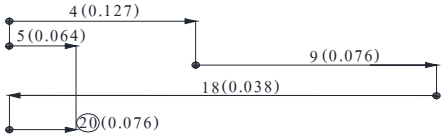
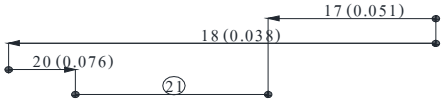
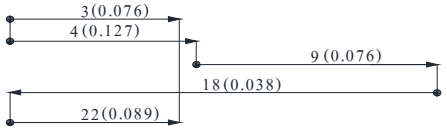
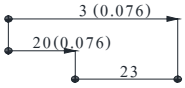
Bule Print Basic	Bule Print ±Tol/2	Result Basic	Result ±Tol/2
33.32	0.127	33.32	0.102
10.31	0.254	10.31	0.076
3.96	0.127	3.96	0.127
32.26	0.508	32.26	0.038
41.15	0.127	41.15	0.076
39.32	0.051	39.32	0.114
2.86	0.191	2.86	0.344
2.77	0.254	2.77	0.216
12.70	0.127	12.70	0.127
2.20	0.254	2.20	0.140

รูปที่ 3.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรมในตัวอย่างที่ 3

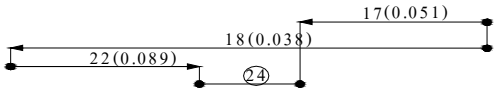
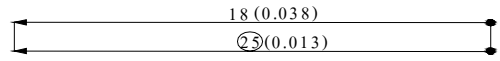
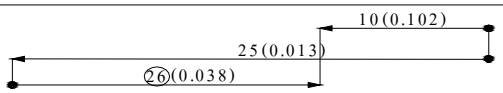
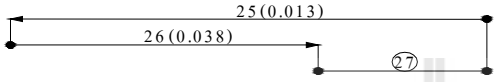
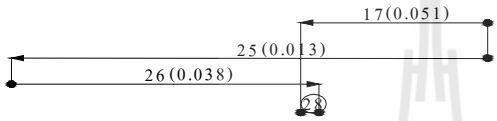
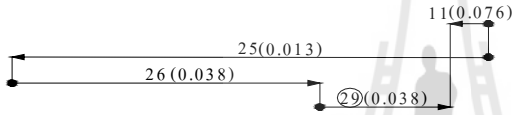
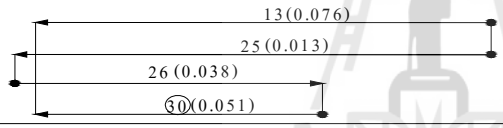
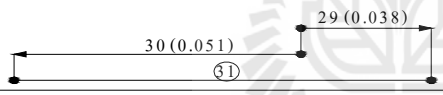
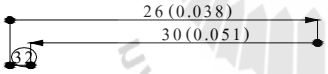
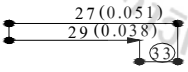
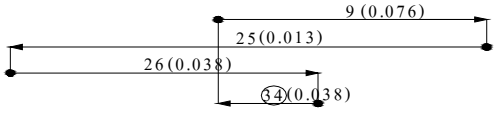
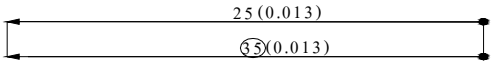
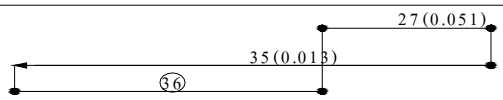
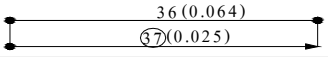
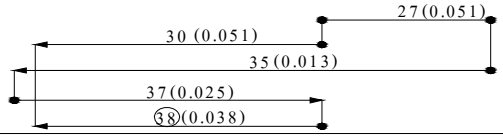
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงความคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน

Resultant		Loop Diagrams
Basic Size (Basic)	Toleraces (± Tol.)	
33.32	0.102	
10.31	0.076	
3.96	0.127	
32.26	0.038	
41.16	0.076	
39.32	0.114	
2.86	0.344	
2.77	0.216	
12.70	0.127	
2.20	0.140	

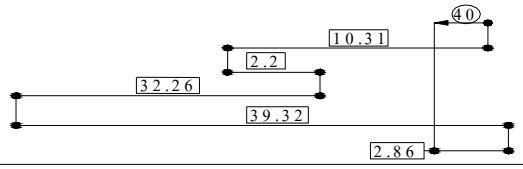
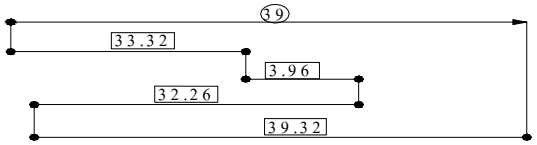
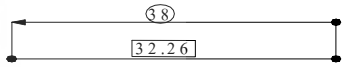
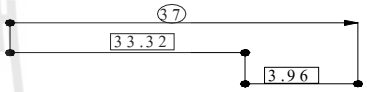
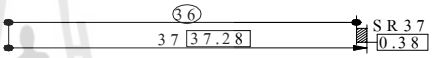
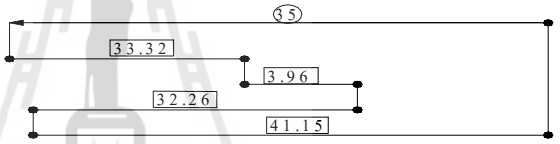
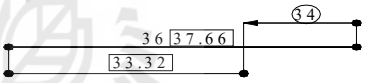
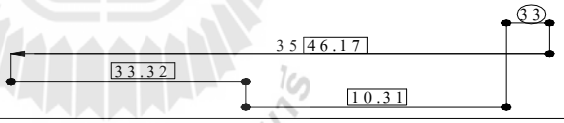
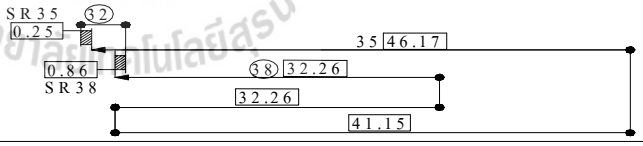
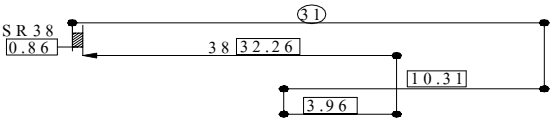
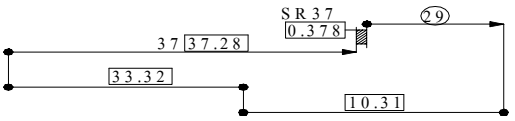
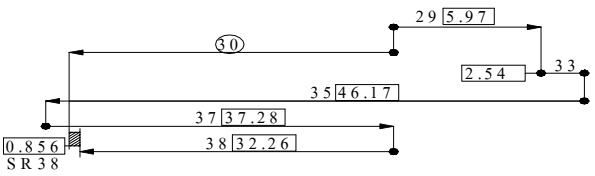
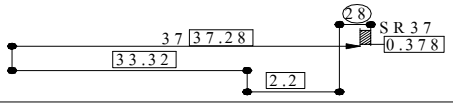
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงความคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการผลิต

Line No.	Loop Diagrams	Balance Dimensions		Stock Removal	
		Toleraces (+ _ Tol.)	Basic Size (Basic)_	Toleraces (+ Tol.)	Basic Size (Basic)
2				Solid cut	
3				Solid cut	
4				Solid cut	
5				Solid cut	
6		0.330			
7		0.381			
8		0.191			
9				0.457	1.41
10				Solid cut	
11				Solid cut	
12				Solid cut	
13				Solid cut	
14		0.178			
15		0.178			
16		0.204			
17				0.153	0.81
18				0.241	0.98
19		0.089			
20				0.381	1.26
21		0.165			
22				0.406	1.31
23					

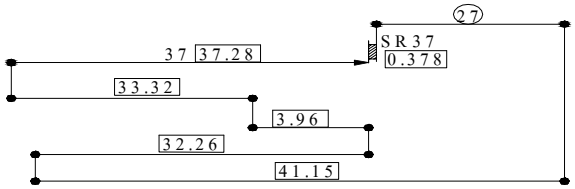
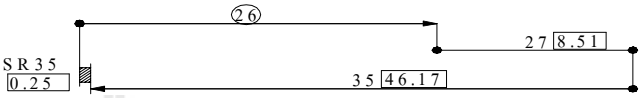
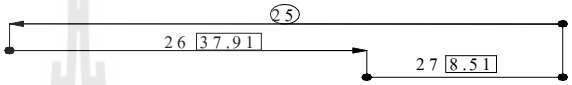
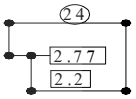
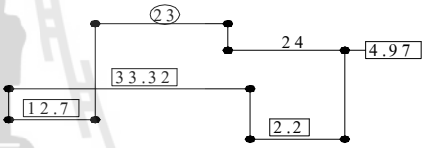
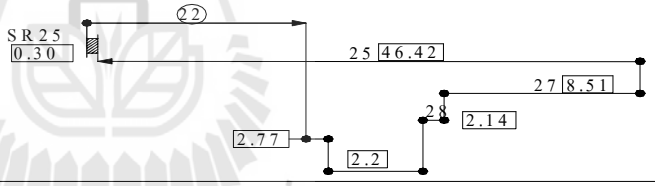
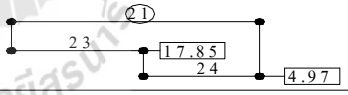
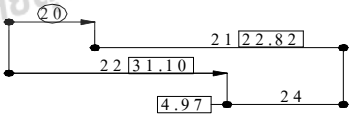
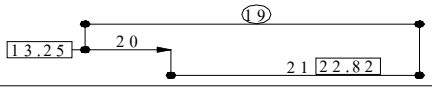
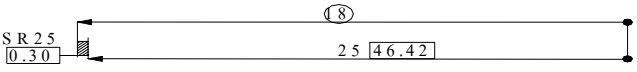
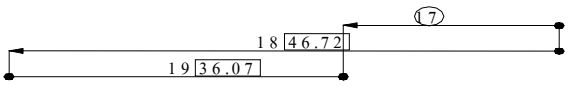
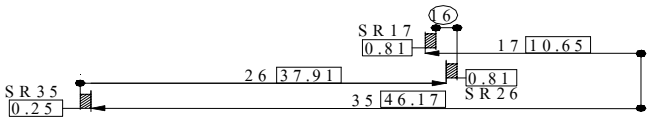
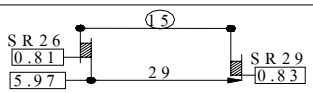
ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงความคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการผลิต (ต่อ)

Line No.	Loop Diagrams	Balance Dimensions		Stock Removal	
		Toleraces (+ Tol.)	Basic Size (Basic)	Toleraces (+ Tol.)	Basic Size (Basic)
24		0.178			
25				0.051	0.30
26				0.153	0.81
27		0.051			
28		0.102			
29				0.165	0.83
30				0.178	0.86
31		0.089			
32		0.089			
33		0.089			
34				0.165	0.83
35				0.026	0.25
36		0.064			
37				0.089	0.38
38				0.178	0.86
39				Solid cut	
40				Solid cut	

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต

Line No.	Basic Size (Basic)		Loop Diagrams
	Working Dimensions	Balance Dimensions	
40	2.15		
39	44.34		
38	32.26		
37	37.28		
36		37.66	
35	46.17		
34	4.34		
33		2.54	
32		5.02	
31		39.46	
29	5.97		
30	33.49		
28		2.16	

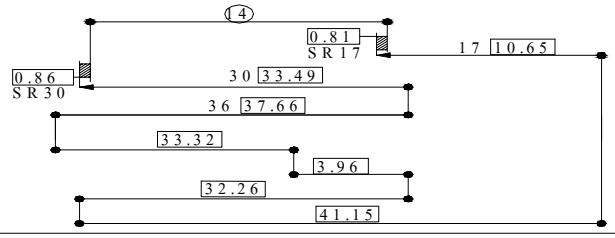
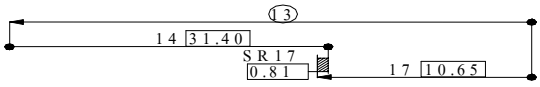
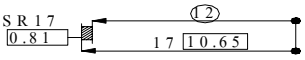
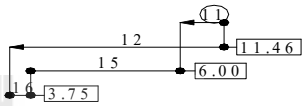
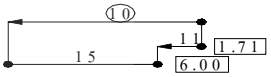
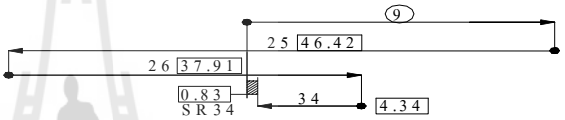
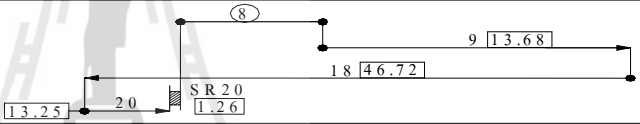
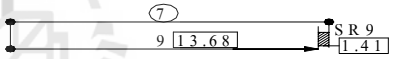
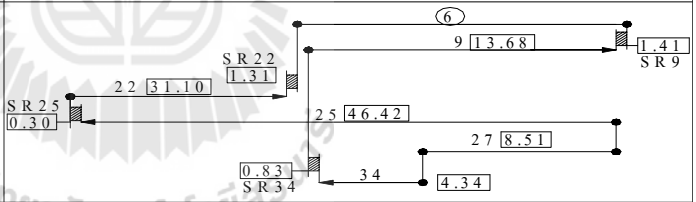
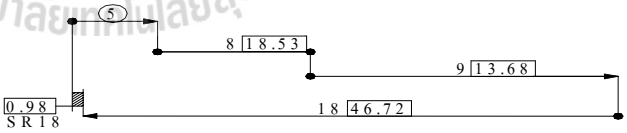
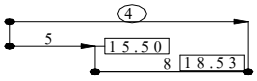
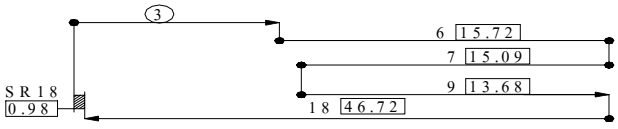
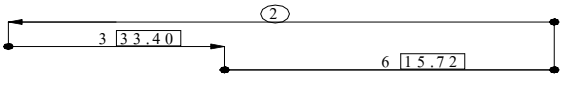
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต (ต่อ)

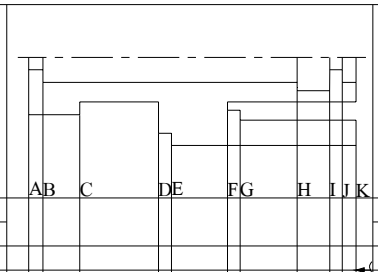
Line No.	Basic Size (Basic)		Loop Diagrams
	Working Dimensions	Balance Dimensions	
27		8.51	
26	37.91		
25	46.42		
24		4.97	
23		17.85	
22	31.10		
21		22.82	
20	13.25		
19		36.07	
18	46.72		
17	10.65		
16		3.75	
15		6.00	

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต (ต่อ)

Line No.	Basic Size (Basic)		Loop Diagrams
	Working Dimensions	Balance Dimensions	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

14		31.40	
13	42.86		
12	11.46		
11	1.71		
10	7.71		
9	13.68		
8		18.53	
7		15.09	
6		15.72	
5	15.50		
3	34.03		
4	33.40		
2	49.12		

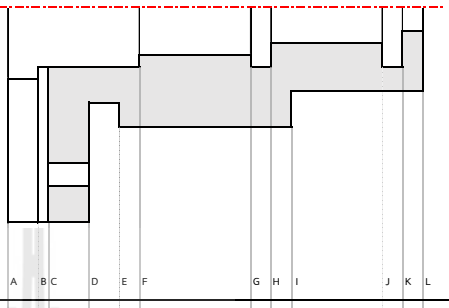


LINE NO.	OPER NO.	MACHINE USED	WORKING DIM. BASIC	WORKING DIM. ±TOL/2	BALANCE DIM. BASIC	BALANCE DIM. ±TOL/2	STOCK REMOVAL BASIC	STOCK REMOVAL ±TOL/2
			49.12	0.254				Solid cut
			33.40	0.076				Solid cut
			34.03	0.127				Solid cut
			15.50	0.064				Solid cut
					15.72	0.330		
					15.09	0.381		
					18.53	0.191		
			13.68	0.076			1.41	0.457
			7.71	0.102				Solid cut
			1.71	0.076				Solid cut
			11.46	0.102				Solid cut
			42.86	0.076				Solid cut
					31.40	0.178		
					6.00	0.178		
					3.75	0.204		
			10.65	0.051			0.81	0.153
			46.72	0.038			0.98	0.241
					36.07	0.089		
			13.25	0.076			1.26	0.381
					22.82	0.165		
			31.10	0.089			1.31	0.406
					17.85	0.165		
					4.97	0.254		
			46.42	0.013			0.30	0.051
			37.91	0.038			0.81	0.153
					8.51	0.051		
					2.16	0.102		
			5.97	0.038			0.83	0.165
			33.49	0.051			0.86	0.178
					39.46	0.089		
					5.02	0.089		
					2.54	0.089		
			4.34	0.038			0.83	0.165
			46.17	0.013			0.25	0.026
					37.66	0.140		
			37.28	0.025			0.38	0.089
			32.26	0.038			0.86	0.178
			44.34	0.051				Solid cut
			2.15	0.191				Solid cut
			BLUE PRINT		RESULTANTS			
			33.32	0.127	33.32	0.102		
			10.31	0.254	10.31	0.076		
			3.96	0.127	3.96	0.127		
			32.26	0.508	32.26	0.038		
			41.15	0.127	41.15	0.076		
			39.32	0.051	39.32	0.114		
			2.86	0.191	2.86	0.344		
			2.77	0.254	2.77	0.216		
			12.70	0.127	12.70	0.127		
			2.20	0.254	2.20	0.140		

รูปที่ 3.2 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนในตัวอย่างที่ 3

ตัวอย่างที่ 4

Tolerance chart

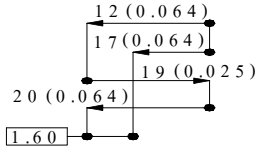
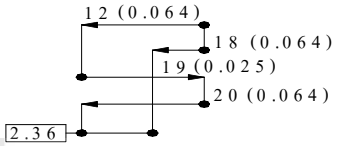
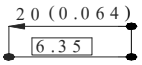
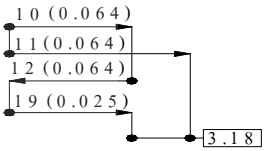
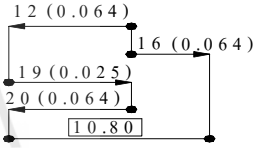
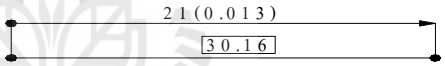
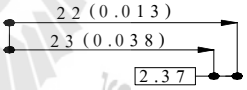
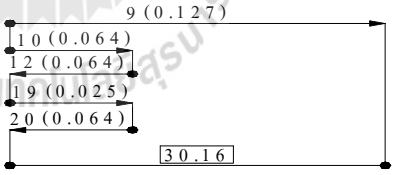
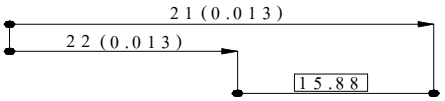
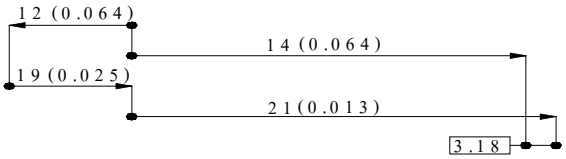
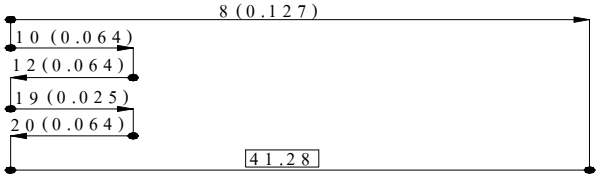


OP No.	Machine used	Reference Cut	Working Dim. Basic	Working Dim. ±Tol/2	Stock Removal Basic	Stock Removal ±Tol/2
		A0	0.00	0.000	0.00	Solid Cut
		L0	44.99	0.127	0.00	Solid Cut
		D0	9.80	0.127	0.00	Solid Cut
		I0	33.87	0.127	0.00	Solid Cut
		A1	8.92	0.064	0.88	0.191
		K0	2.78	0.064	0.00	Solid Cut
		H0	13.92	0.064	0.00	Solid Cut
		L1	42.71	0.127	1.39	0.445
		I1	31.59	0.127	1.39	0.445
		D1	8.16	0.064	0.76	0.128
		E0	10.96	0.064	0.00	Solid Cut
		A2	7.41	0.064	0.76	0.128
		K1	2.52	0.064	1.01	0.256
		J0	0.43	0.064	0.00	Solid Cut
		H1	13.66	0.064	1.01	0.256
		F0	4.07	0.064	0.00	Solid Cut
		B0	5.13	0.064	0.00	Solid Cut
		C0	4.37	0.064	0.00	Solid Cut
		D2	7.03	0.025	0.38	0.089
		A3	6.35	0.064	0.68	0.089
		K2	2.37	0.013	0.53	0.166
		H2	13.51	0.013	0.53	0.166
		G0	43.67	0.038	0.00	Solid Cut

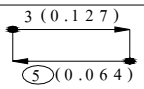
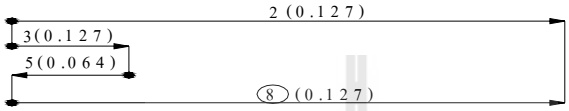
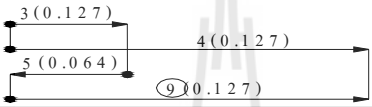
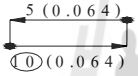
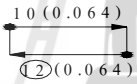
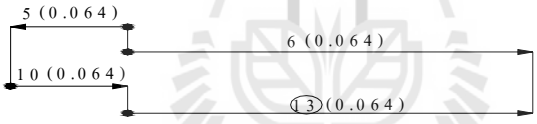
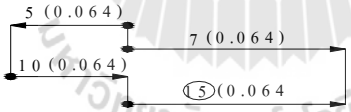
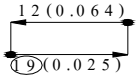
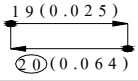
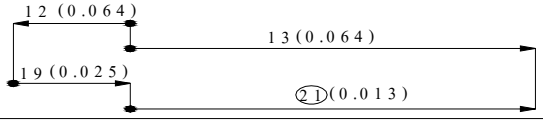
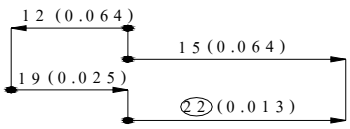
Bule Print Basic	Bule Print ±Tol/2	Result Basic	Result ±Tol/2
1.60	0.254	1.60	0.217
2.36	0.254	2.36	0.217
6.35	0.254	6.35	0.064
3.18	0.254	3.18	0.217
10.80	0.254	10.80	0.217
2.37	0.025	2.37	0.013
30.16	0.051	30.16	0.051
30.16	0.254	30.16	0.344
15.88	0.025	15.88	0.026
3.18	0.254	3.18	0.166
41.28	0.254	41.28	0.344

รูปที่ 4.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรม

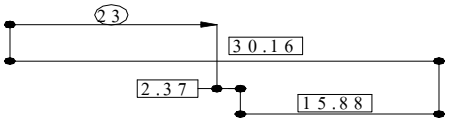
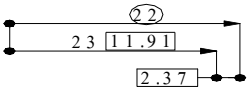
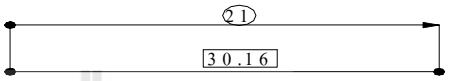
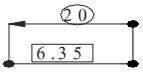
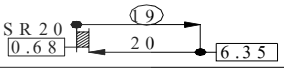
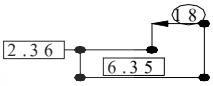
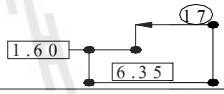
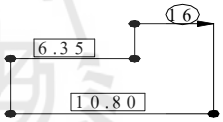
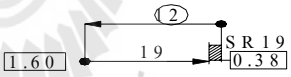
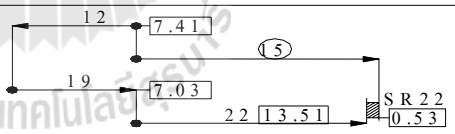
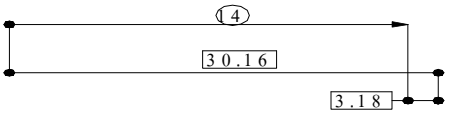
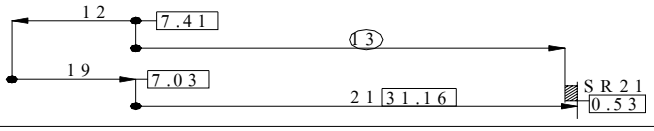
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงความคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน

Resultant		Loop Diagrams
Basic Size (Basic)	Toleraces (+ Tol.)	
1.60	0.217	
2.36	0.217	
6.35	0.064	
3.18	0.217	
10.18	0.217	
30.16	0.013	
2.37	0.051	
30.16	0.344	
15.88	0.026	
3.18	0.166	
41.28	0.344	

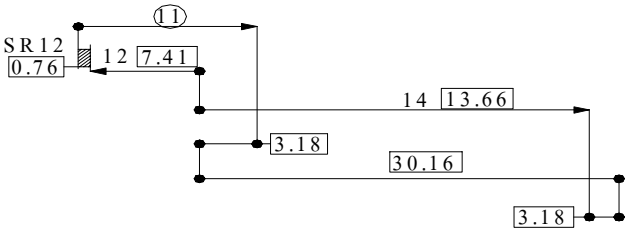
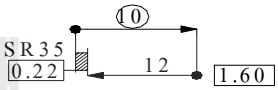
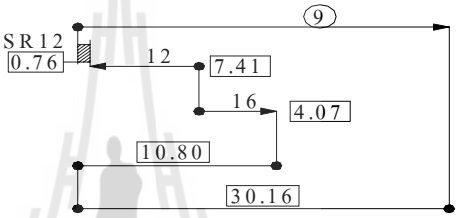
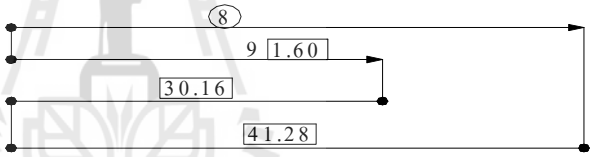
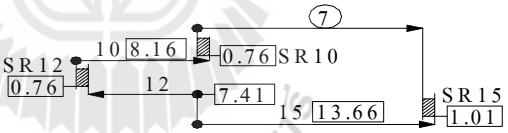
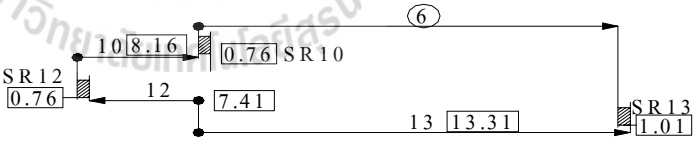
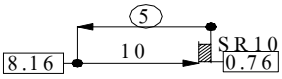
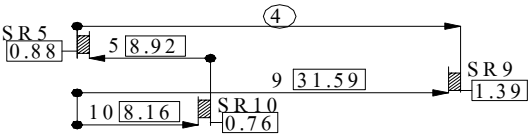
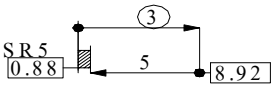
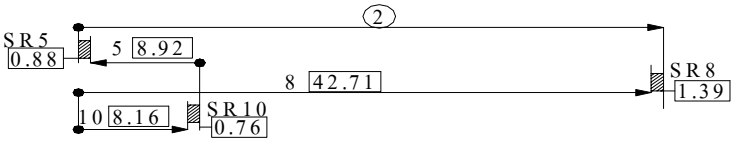
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงความคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการผลิต

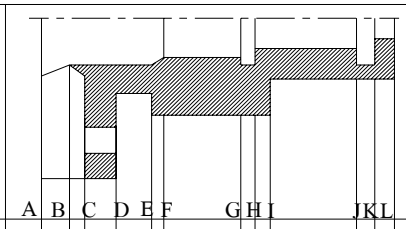
Line No.	Loop Diagrams	Stock Removal	
		Toleraces (± Tol.)	Basic Size (Basic)
2		Solid cut	
3		Solid cut	
4		Solid cut	
5		0.88	0.191
6		Solid cut	
7		Solid cut	
8		1.39	0.445
9		1.39	0.445
10		0.76	0.128
11		Solid cut	
12		0.76	0.128
13		1.01	0.256
14		Solid cut	
15		1.01	0.256
16		Solid cut	
17		Solid cut	
18		Solid cut	
19		0.38	0.089
20		0.68	0.089
21		0.53	0.166
22		0.53	0.166
23		Solid cut	

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต

Line No.	Working Dimensions	Loop Diagrams
23	43.67	
22	13.51	
21	2.37	
20	6.35	
19	7.03	
18	4.37	
17	5.13	
16	4.07	
12	7.41	
15	13.66	
14	0.43	
13	2.52	

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต (ต่อ)

Line No.	Working Dimensions	Loop Diagrams
11	10.96	
10	8.16	
9	31.59	
8	42.71	
7	13.92	
6	2.78	
5	8.92	
4	33.87	
3	9.80	
2	44.99	

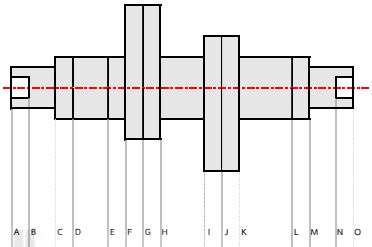


LINE NO.	OPER NO.	MACHINE USED	WORKING DIM. BASIC	WORKING DIM. +TOL/2	STOCK REMOVAL BASIC	STOCK REMOVAL +TOL/2
1						
2			44.99	0.127	0.00	Solid cut
3			9.80	0.127	0.00	Solid cut
4			33.87	0.127	0.00	Solid cut
5			8.92	0.064	0.88	0.191
6			2.78	0.064	0.00	Solid cut
7			13.92	0.064	0.00	Solid cut
8			42.71	0.127	1.39	0.445
9			31.59	0.127	1.39	0.445
10			8.16	0.064	0.76	0.128
11			10.56	0.064	0.00	Solid cut
12			7.41	0.064	0.76	0.128
13			2.52	0.064	1.01	0.256
14			0.43	0.064	0.00	Solid cut
15			13.66	0.064	1.01	0.256
16			4.07	0.064	0.00	Solid cut
17			5.13	0.064	0.00	Solid cut
18			4.57	0.064	0.00	Solid cut
19			7.03	0.025	0.38	0.089
20			6.35	0.064	0.68	0.089
21			2.37	0.013	0.53	0.166
22			13.51	0.013	0.53	0.166
23			43.67	0.038	0.00	Solid cut
			BLUE PRINT		RESULTANTS	
			1.60	0.254	1.60	0.217
			2.36	0.254	2.36	0.217
			6.35	0.254	6.35	0.064
			3.18	0.254	3.18	0.217
			10.18	0.254	10.18	0.217
			30.16	0.025	30.16	0.013
			2.37	0.051	2.37	0.051
			30.16	0.025	30.16	0.344
			15.88	0.025	15.88	0.026
			3.18	0.254	3.18	0.166
			41.28	0.254	41.28	0.344

รูปที่ 4.2 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนในตัวอย่างที่ 4

ตัวอย่างที่ 5

Tolerance chart

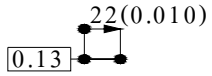
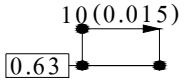
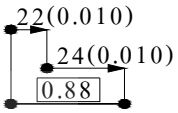
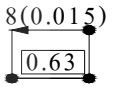
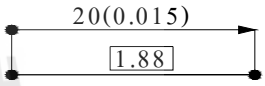
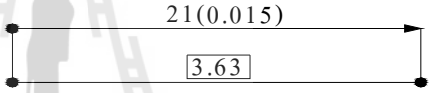
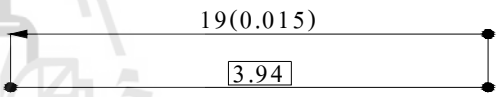
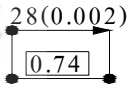
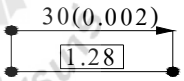
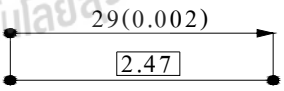
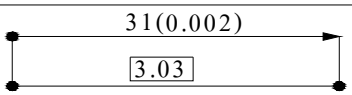
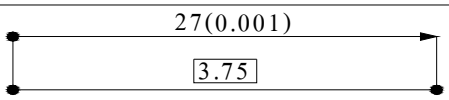
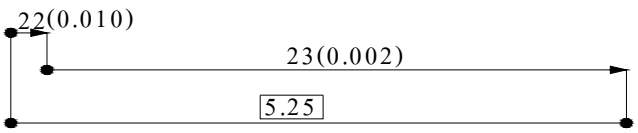
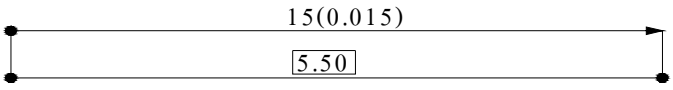


OP No.	Machine used	Reference Cut	Working Dim. Basic	Working Dim. ±Tol/2	Stock Removal Basic	Stock Removal ±Tol/2
		A0	0.00	0.000	0.00	Solid Cut
		F0	2.34	0.031	0.00	Solid Cut
		H0	0.62	0.031	0.00	Solid Cut
		I0	1.81	0.031	0.00	Solid Cut
		K0	0.82	0.031	0.00	Solid Cut
		O0	4.03	0.062	0.00	Solid Cut
		K1	2.30	0.005	0.33	0.067
		O1	1.39	0.005	0.34	0.072
		A1	4.36	0.005	0.28	0.041
		C0	0.63	0.015	0.00	Solid Cut
		D0	1.37	0.010	0.00	Solid Cut
		F1	1.83	0.003	0.23	0.013
		H1	2.40	0.003	0.29	0.044
		I1	3.58	0.003	0.29	0.044
		O2	5.50	0.015	0.25	0.025
		K2	4.15	0.003	0.22	0.008
		L0	5.16	0.010	0.00	Solid Cut
		M0	0.63	0.015	0.00	Solid Cut
		E0	3.94	0.015	0.00	Solid Cut
		G0	1.88	0.015	0.00	Solid Cut
		J0	3.63	0.015	0.00	Solid Cut
		B0	0.13	0.010	0.00	Solid Cut
		N0	5.25	0.002	0.00	Solid Cut
		D1	0.98	0.010	0.26	0.030
		L1	3.77	0.010	0.28	0.040
		D2	0.75	0.005	0.23	0.015
		L2	3.75	0.001	0.25	0.026
		F2	0.72	0.002	0.24	0.020
		I2	2.47	0.002	0.24	0.020
		H2	1.28	0.002	0.24	0.020
		K3	3.03	0.002	0.24	0.020

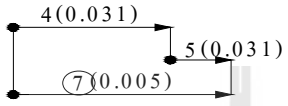
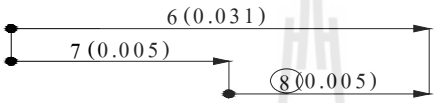
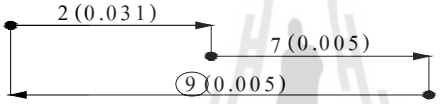
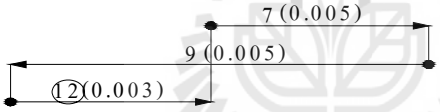
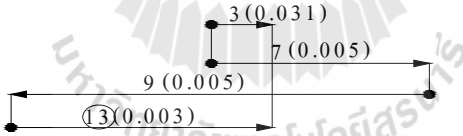
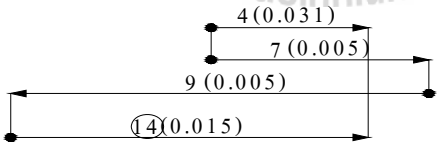
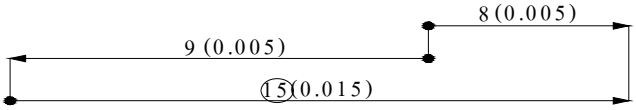
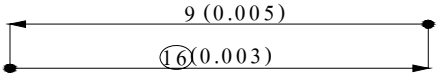
Bule Print Basic	Bule Print ±Tol/2	Result Basic	Result ±Tol/2
0.13	0.015	0.13	0.010
0.63	0.015	0.63	0.015
0.88	0.015	0.88	0.015
0.63	0.015	0.63	0.015
1.88	0.015	1.88	0.015
3.63	0.015	3.63	0.015
3.94	0.015	3.94	0.015
0.72	0.002	0.72	0.002
1.28	0.002	1.28	0.002
2.47	0.002	2.47	0.002
3.03	0.002	3.03	0.002
3.75	0.001	3.75	0.001
5.25	0.002	5.25	0.002
5.50	0.015	5.50	0.015

รูปที่ 5.1 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนที่ได้จากโปรแกรม

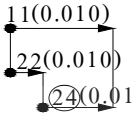
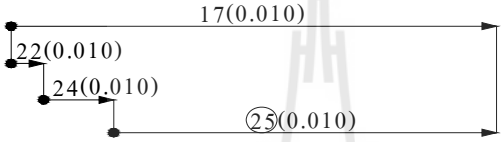
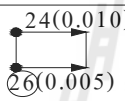
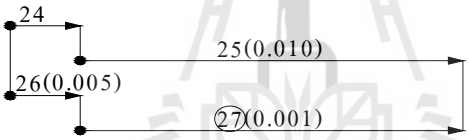
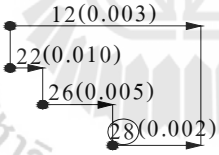
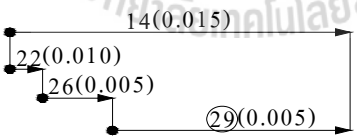
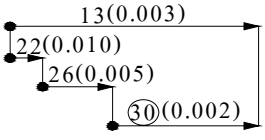
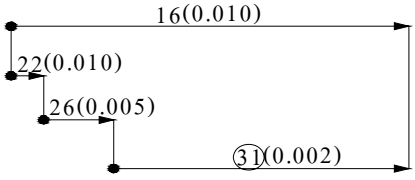
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงความคำนวณความคลาดเคลื่อนสะสมของมิติชิ้นงาน

Resultant		Loop Diagrams
Basic Size (Basic)	Toleraces (+ Tol.)	
0.13	0.010	
0.63	0.015	
0.88	0.015	
0.63	0.015	
1.88	0.015	
3.63	0.015	
3.94	0.015	
0.74	0.002	
1.28	0.002	
2.47	0.002	
3.03	0.002	
3.75	0.001	
5.25	0.002	
5.50	0.015	

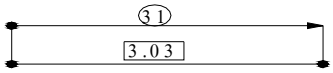
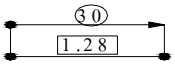
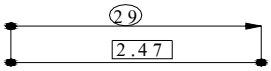
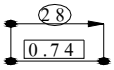
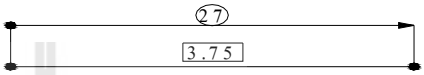
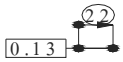
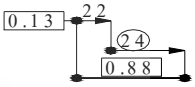
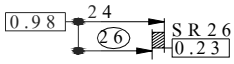
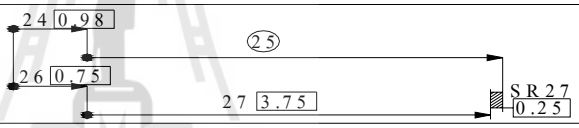
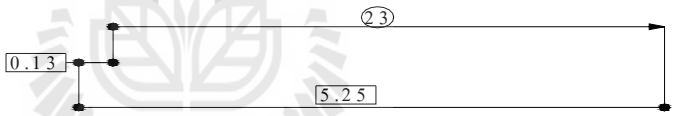
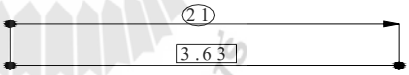
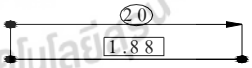
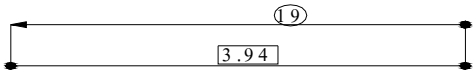
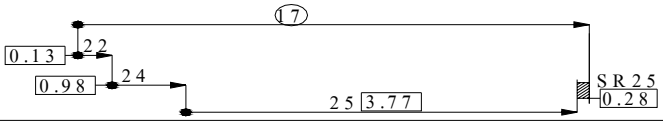
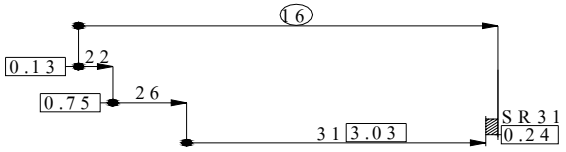
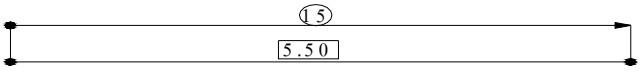
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงความคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการผลิต

Line No.	Loop Diagrams	Stock Removal	
		Toleraces (± Tol.)	Basic Size (Basic)
2		Solid cut	
3		Solid cut	
4		Solid cut	
5		Solid cut	
6		Solid cut	
7		0.33	0.067
8		0.34	0.072
9		0.28	0.041
10		Solid cut	
11		Solid cut	
12		0.23	0.013
13		0.29	0.044
14		0.29	0.044
15		0.25	0.025
16		0.22	0.008
17		Solid cut	
18		Solid cut	
19		Solid cut	

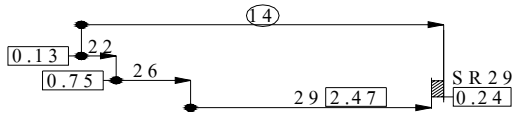
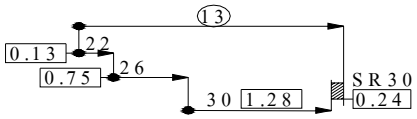
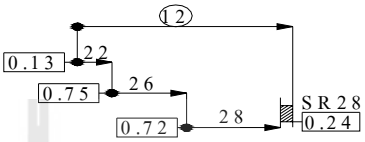
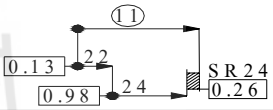
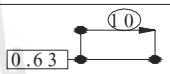
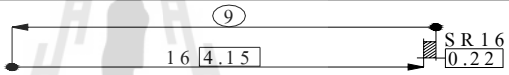
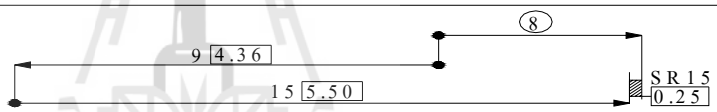
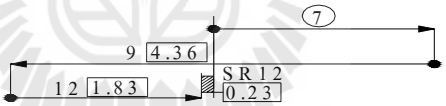
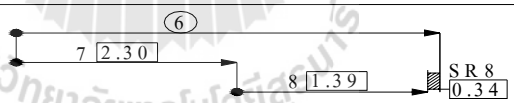
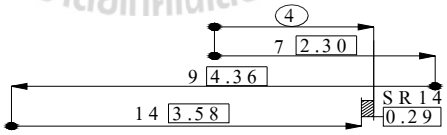
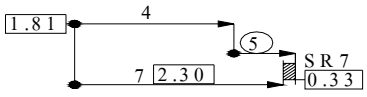
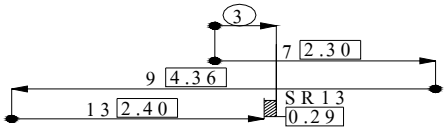
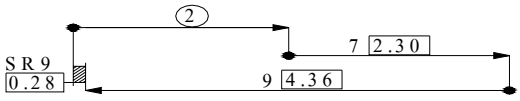
ตารางที่ 5.3ตารางแสดงความคำนวณขนาดและความคลาดเคลื่อนของขั้นตอนการผลิต (ต่อ)

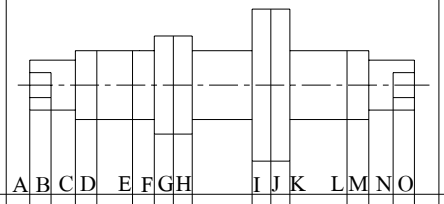
Line No.	Loop Diagrams	Stock Removal	
		Toleraces (± Tol.)	Basic Size (Basic)
20		Solid cut	
21		Solid cut	
22		Solid cut	
23		Solid cut	
24		0.26	0.030
25		0.28	0.040
26		0.23	0.150
27		0.25	0.260
28		0.24	0.020
29		0.24	0.020
30		0.24	0.020
31		0.24	0.020

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต

Line No.	Working Dimensions	Loop Diagrams
31	3.03	
30	1.28	
29	2.47	
28	0.72	
27	3.75	
22	3.77	
24	0.98	
26	0.75	
25	3.77	
23	5.25	
21	3.63	
20	1.88	
19	3.94	
18	0.63	
17	5.16	
16	4.15	
15	5.50	

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงความคำนวณขนาดของขั้นตอนการผลิต (ต่อ)

Line No.	Working Dimensions	Loop Diagrams
14	3.58	
13	2.40	
12	1.83	
11	1.37	
10	0.63	
9	4.36	
8	1.39	
7	2.30	
6	4.03	
4	1.81	
5	0.82	
3	0.62	
2	2.34	



LINE NO.	OPER NO.	MACHINE USED	WORKING DIM. BASIC	WORKING DIM. +TOL/2	STOCK REMOVAL BASIC	STOCK REMOVAL ±TOL/2
1						
2			2.34	0.031	0.00	Solid cut
3			0.62	0.031	0.00	Solid cut
4			1.81	0.031	0.00	Solid cut
5			0.82	0.031	0.00	Solid cut
6			4.03	0.062	0.00	Solid cut
7			2.30	0.005	0.33	0.067
8			1.39	0.005	0.34	0.072
9			4.36	0.005	0.28	0.041
10			0.63	0.015	0.00	Solid cut
11			1.37	0.010	0.00	Solid cut
12			1.83	0.003	0.23	0.013
13			2.40	0.003	0.29	0.044
14			3.58	0.003	0.29	0.044
15			5.50	0.015	0.25	0.025
16			4.15	0.003	0.22	0.008
17			5.16	0.010	0.00	Solid cut
18			0.63	0.015	0.00	Solid cut
19			3.94	0.015	0.00	Solid cut
20			1.88	0.015	0.00	Solid cut
21			3.63	0.015	0.00	Solid cut
22			0.13	0.010	0.00	Solid cut
23			5.25	0.002	0.00	Solid cut
24			0.98	0.010	0.26	0.030
25			3.77	0.010	0.28	0.040
26			0.75	0.005	0.23	0.015
27			3.75	0.001	0.25	0.026
28			0.72	0.002	0.24	0.020
29			2.47	0.002	0.24	0.020
30			1.28	0.002	0.24	0.020
31			3.03	0.002	0.24	0.020
			BLUE PRINT		RESULTANTS	
			0.13	0.015	0.13	0.010
			0.63	0.015	0.63	0.015
			0.88	0.015	0.88	0.015
			0.63	0.015	0.63	0.015
			0.19	0.015	0.19	0.015
			3.63	0.015	3.63	0.015
			3.94	0.015	3.94	0.015
			0.72	0.002	0.72	0.002
			0.13	0.002	0.13	0.002
			2.47	0.002	2.47	0.002
			3.03	0.002	3.03	0.002
			3.75	0.001	3.75	0.001
			5.25	0.002	5.25	0.002
			5.50	0.015	5.50	0.015

รูปที่ 5.2 แผนภูมิความคลาดเคลื่อนในตัวอย่างที่ 5

ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Chalalai Wongwian, Yongyooth Sermsuti-Anuwat. (2015). TOLERANCE CHARTING WITH A SPREADSHEET. 9th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium.27 – 30 July 2015. Suranaree University of Technology. Thailand.

TOLERANCE CHARTING WITH A SPREADSHEET

Chalalai Wongwian and Yongyooth Sermsuti-anuwat
School of Industrial Engineering, Suranaree University of Technology

ABSTRACT

Tolerance Chart is a graphical representation of the dimensions that occur during the production of a machined part. This tool is used for checking if a sequence of machining operations can produce a workpiece to the blueprint dimensions prior to the actual production. Manual tolerance charting has been reported since the early 1950s. Despite the tolerance chart is a most effective tool for process planning, the charting of tolerances is a time consuming and error prone activity. Therefore, the computerized tolerance charting has been used to replacing manual charting. As a result, a substantial number of computer programs for tolerance charting are now available; but, none of them is developed under a spreadsheet application. This paper reports the research work on tolerance charting using Microsoft Excel; particularly, the routine for constructing the Rooted-Tree Graph for tolerance stack calculations in the tolerance chart.

1. INTRODUCTION

A tolerance chart is a graphical representation of a machining sequence for producing metal parts. The chart shows the basic-size and the tolerance of each machining cut and the amount of stock to be removed at each step in the sequence. It is an important tool for process planning to ensure that a tentative sequence of machining operations is appropriate for producing a product of the required dimensions

As early as 1950, the tolerance chart was mainly used for controlling dimensions of machined parts. Despite its usefulness, charting of tolerances using this technique not only requires a great deal of machining expertise but also is a time-consuming and an error-prone process. In order to alleviate the shortcomings of tolerance charting, Gadzala (1959) proposed "the method of traces"; then, Johnson, et al. (1963) and Wade (1967) attempted to systemize the charting procedures. It was not until 1984 that the computer was introduced to chart the tolerances. The work of Ahaluwalia and Karolin (1984) on the development a computer program to assist in generating tolerance charts has opened up a new area of tolerance charting by using a computer.

On the charting algorithm side, Xiaoqing and Davies (1988) developed a complex algorithm for tolerance chart calculations; then, Whybrew et al. (1990) proposed a method of using a rooted-tree graph for calculating tolerance stacks. With the latter technique, Ngoi (1992), applied the optimization technique for tolerance allocation in the tolerance chart and proposed a method of balancing the allocated tolerances.

At present, although there are many computer programs for tolerance charting developed in various programming languages and under various operating systems, but none has been found to be developed under a spreadsheet application, even though it is equipped with all the facilities that tolerance charting requires.

This paper describes an ongoing research on the development of a computerized tolerance charting program using the Microsoft Excel and basing on the rooted tree-graph for tolerance calculations.

2. ROOTED-TREE GRAPH APPROACH TO TOLERANCE CHARTING

Fig. 1, taken from an example of Wade (1967), is the blueprint of a simple machined part superimposed with capital letters for surface identifications. A tentative sequence of machining for this workpiece is shown in Table 1. To identify a surface resulting from a machining operation a numerical subscript is added to the capital letter; whenever a machined surface is re-machined, the numerical subscript for the newly cut surface will be increased by 1. This system of surface identification is the essence of the construction of the rooted-tree graph. The tolerance chart in Fig 3 is prepared from Table 1 with the order of machining cuts are indicated by numbers. This chart is slightly different from those of Wade in that no intermediate balance dimension is shown between the working dimensions. Since the tolerance is concerned with only length dimensions, other dimensions of diameters are all omitted from the chart.

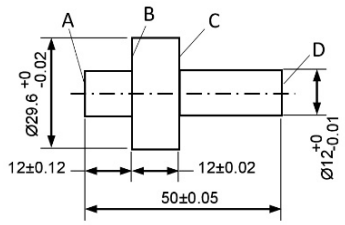


Fig.1. Workpiece dimensions (in millimeters)

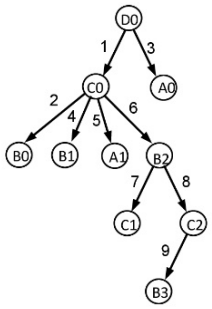


Fig.2. Rooted-tree graph.

Table 1. Tentative machining sequence for the workpiece in Fig. 1.

OP.No.	M/C USED	Cut NO.	Reference face	Machined face
10	W&S turret lathe	1	D0	C0
10	W&S turret lathe	2	C0	B0
10	W&S turret lathe	3	D0	A0
20	Harding chucker	4	C0	B1
20	Harding chucker	5	C0	A1
30	Norton cylinder grinder	6	C0	B2
40	Norton cylinder grinder	7	B2	C1
50	Rough grind 29.6 mm. dia.		-	-
60	Harden		-	-
70	Lap centers		-	-
80	Norton cylinder grinder	8	B2	C2
90	Norton cylinder grinder	9	C2	B3
100	Finish grind 29.6 mm. dia.		-	-

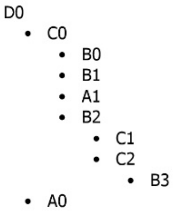
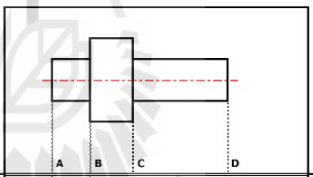


Fig.3. Rooted-tree graph with



OP.NO.	Face Cut.	M/C USED	WORKING DIM.		STOCK REMOVAL	
			BASIC	±TOL/2	BASIC	±TOL/2
10	D0	W&S turret				
10	C0	W&S turret	25.880	0.050	solid cut	
10	B0	W&S turret	12.585	0.050	solid cut	
10	A0	W&S turret	50.350	0.050	solid cut	
20	B1	H. chucker	12.285	0.050	0.300	0.100
20	A1	H. chucker	24.120	0.050	0.300	0.150
30	B2	N. grinder	12.180	0.005	0.105	0.055
40	C1	N. grinder	12.120	0.005	0.060	0.010
80	C2	N. grinder	12.060	0.005	0.060	0.010
90	B3	N. grinder	12.000	0.005	0.060	0.010

BLUE PRINT		RESULTANTS	
BASIC	±TOL/2	BASIC	±TOL/2
12.00	0.120	12.00	0.065
12.00	0.020	12.00	0.005
50.00	0.050	50.00	0.100

Fig.3. Tolerance chart for the workpiece in Fig.1.

Fig.2 shows the rooted - tree graph corresponding to the machining sequence in Table 1. To draw the graph, start with the node of the first reference face, D0, at the top. Then, extend an arrow to the machined face of the first cut using D0 as the reference face; the arrow of cut 1 with the end node of C0 is now obtain. Next, the arrows of cuts 2 and 3 are drawn to the nodes B0 and A0 respectively. After this, the arrow of cut 4 is then drawn to face B, which has been previously machined to be face B0; therefore, the arrow points to face B1. Repeat drawing arrows for the rest of all cuts, the diagram of rooted–tree will be obtained.

To calculate a tolerance stack resulting from the machining operations, for example between faces A and B, look in the diagram for the last nodes representing the two faces, viz. A1 and B3; the tolerance stack is equal to the sum of the tolerances of all cuts in the path from A1 to B3.

Similarly, the tolerance of the stock removal of cut 4, is equal to the sum of the tolerances of cuts 2 and 4 in the path from nodes B0 to B1 or vice versa.

Table 2. Reversed paths from each node to the root.

No	Reference face	Machined face	Reversed Path
10	Root	D0	D0
10	D0	C0	C0 D0
10	C0	B0	B0 C0 D0
10	D0	A0	A0 D0
20	C0	B1	B1 C0 D0
20	C0	A1	A1 C0 D0
30	C0	B2	B2 C0 D0
40	B2	C1	C1 B2 C0 D0
80	B2	C2	C2 B2 C0 D0
90	C2	B3	B3 C2 B2 C0 D0

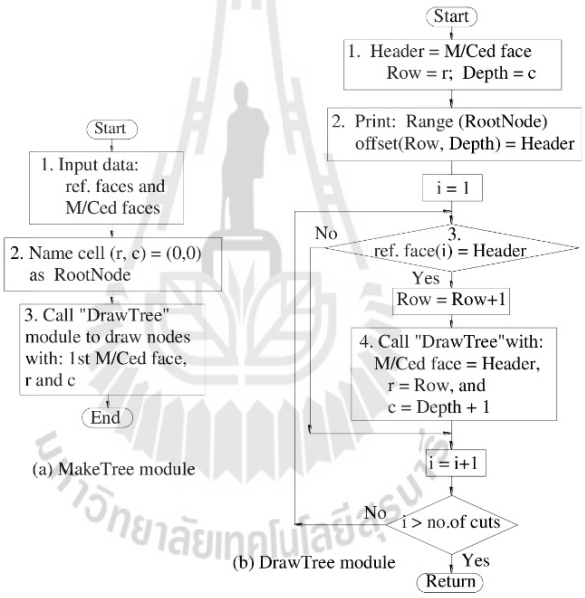


Fig.5. Flowchart

3. ROOTED-TREE GRAPH WITH EXCEL

The rooted-tree graph generated by Excel is shown in Fig. 3. Although the diagram is different from that shown in Fig. 4, it still serves the same purposes. In this diagram, each node symbolized by a capital letter and a number as before. The root node is on the farthest left side of the diagram; each node in each column is the child node of its corresponding parent node in the left hand column and at the same time is also the parent node of its child node in the right hand column. No arrow link has shown in the diagram, but it can be understandable that the nodes in two columns side-by-side are the end nodes of a link.

Fig. 5 shows the flowchart of the algorithm for generating this type of tree graph. The main program module (MakeTree Module), with the flowchart in Fig. 5a, is responsible for setting the cell name, as RootNode, for writing a tree node, and set the first node to the cell position of row 0 and column 0 of the worksheet. With these data and the name of the first cut face the module calls the sub-module, DrawTree in Fig.5b, to write all the nodes of the tree.

In this subprogram, the variable Header, which temporally holding the name of the surface previously machined or cut, is used for testing if a particular cut has its reference surface being the machined face it holds. If the result is true, then shift the RootNode cell to the next row and the next column, and call DrawTree to print the node name; otherwise, the next machining cut in the sequence will be tested. This process continues repeatedly until the nodes of all machined surfaces have been printed, that is the diagram has been completed.

With some modifications by cooperating with other program modules, the MakeTree module can be used for generating the path from each end node of the tree to the root node (or the reversed paths) as shown in Table 2, which will facilitate the calculations of both the tolerance stacks and the basic sizes in the tolerance chart.

4. TOLERANCE CHARTING AND EXCEL

One of the dominant applications of the tolerance chart is in the area of process planning for checking the practical feasibility of a machining sequence. Any tolerance stack problem if exists can be spotted by the chart and modifications can be made iteratively to the sequence until the chart arrives at a satisfactory result.

A spreadsheet like the Excel has an excellent property in automatically updating the results when some relationships or variables in the solution sequence have been modified or changed. The tolerance charting program developed under Excel application can therefore make use of this potential to its most advantage.

5. CONCLUSION

This paper reports some results of the research on computerized tolerance charting using Excel which has been being conducted in the School of Industrial Engineering at Suranaree University of Technology, Thailand. It demonstrates the computer routine for constructing the rooted-tree graph which is a powerful tool for calculating tolerance stacks. It is expected that the research work, when completed, would be beneficial to all the metal machining industries.

REFERENCES

Ahaluwalia, R. S., and Karolin, A. V., CATC A computer-aided tolerance control system, Journal of Manufacturing Systems, vol. 3, no. 2, pp. 153-160, 1984.

Gadzala, J. L., Dimensional Control in Precision Manufacturing: As Applied in Production Machining to Effect Higher Production and Lower Unit Costs, McGraw-Hill, 1959.

Johnson, A. M., Wilson, F. W., & Harvey, P. D., Manufacturing Planning and Estimating Handbook, 1963.

Ngoi, B. K. A., Applying linear programming to tolerance chart balancing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 7, no. 4, pp. 187-192, doi: 10.1007/BF02601622, (1992).

Sermsuti-anuwat, Y., Whybrew, K., McCallion, H., CAPPFD – A tolerance-based feature sequencing CAPP system, Journal of Systems Engineering, vol. 5 no. 1, pp. 2-15, 1995.

Sermsuti-anuwat, Y., Tool Engineering Basics: jig, fixture & gauge design, Nonthaburi, 21st Century Publishers, 2013 (in Thai).

Wade, O. R., Tolerance Control in Design and Manufacturing,Industrial Press, 1967.

Whybrew, K., Britton, G. A., Robinson, D. F., and Sermsuti-anuwat, Y., A graphtheoretic approach to tolerance charting, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 5, pp. 175-183, 1990.

Xiaoqing, T., and Davies, B.J., Computer aided dimensional planning, International Journal of Production Research vol. 26, no. 2, pp. 283-297, 1988.

Chalalai Wongwian is a post-graduate student in the School of Industrial Engineering, Suranaree University of technology, Thailand. The title of her masters thesis is "Tolerance charting with a spreadsheet"

Yongyooth Sermsuti-Anuwat received, Ph. D. (Mechanical engineering) from the University of Canterbury, New Zealand.

He is an Assistant Professor in the School of Industrial Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His research interests are in the areas of tolerance technology, process planning and fixture design.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชลาลัย วงเวียน เกิดเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พ.ศ. 2533 ภูมิลำเนาอยู่ที่บ้านเลขที่3 หมู่ 6 ตำบล คลองขุด อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี จบการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนประดิษฐ์ศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนท่าใหม่ “พูลสวัสดิ์ราษฎช์นุกูล” และเริ่มเข้าศึกษาระดับปริญญาตรีที่สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2552 และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2555

จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2556 ในขณะที่ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ได้เป็นผู้ช่วยสอนรายวิชาปฏิบัติการกรรมวิธีการผลิตรายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการขั้นพื้นฐาน และรายวิชาวิศวกรรมเครื่องมือกลของสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ 9th SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM (SEATUC) SYMPOSIUM ประจำปี พ.ศ. 2558 เรื่อง TOLERANCE CHARTING WITH A SPREADSHEET

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

วิชา ศิริธรรมจักร และ สุรเชษฐ์ วงศ์ชันพรพงษ์. (2550). **Excel VBA Programming.** กรุงเทพ: เคที่ พี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์.

ยงยุทธ เสริมสุธีอนุวัฒน์. (2556). **หลักวิศวกรรมเครื่องมือเบื้องต้น: การออกแบบจิก, ฟิกซ์เจอร์และเกจตรวจสอบ.** นนทบุรี: 21 เซ็นจูรี่.

Ahaluwalia, R. S., and Karolin, A. V. (1984). **CATC A Computer-Aided Tolerance Control System**. Journal of Manufacturing Systems. 3(2): 153-160.

Association for the Development of Computer-Aided Tolerancing Systems (ADCATS).**ADCATS software: Free Tolerance Spreadsheets.** (http://adcats.et.byu.edu/home.php - search made an Angust 30, 2015)

Gadzala, J. L. (1959).**Dimensional Control in Precision Manufacturing: As Applied in Production Machining to Effect Higher Production and Lower Unit Costs**. McGraw-Hill.

Johnson, A. M., Wilson, F. W., & Harvey, P. D.(1963).**Manufacturing Planning and Estimating Handbook.**

Ngoi, B. K. A.(1992).**Applying Linear Programming to Tolerance Chart Balancing**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 7(4): 187-192.

Sermsuti-Anuwat, Y. (1992). **Computer-aided Process Planning and Fixture Design (CAPPFD)**. A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.

Sermsuti-anuwat, Y. (2009). **Milling fixture design: a tolerance analysis approach**. International Journal of Mechanical Engineering Education. 37(2): 111-117.

Sermsuti-anuwat, Y. (2014). Circulation Notes, **Concepts of rooted tree graph for establishing dimensional relationship between part components and assembly function and their application in jig design**. Dated 08/09/2014.

Wade, O. R.(1967).**Tolerance Control in Design and Manufacturing,Industrial Press**.

Whybrew, K., Britton, G. A., Robinson, D. F., &Sermsuti-anuwat, Y. (1990). **A graph-theoretic approach to tolerance charting**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 5(2): 175-183.

Xiaoqing, T., and Davies, B.J. (1988).**Computer Aided Dimensional Planning.** International Journal of Production Research. 26(2): 283-297.